



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Eidgenössisches Departement für
Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK

Bundesamt für Strassen ASTRA

Richtlinie

Ausgabe 2008 V2.03

Lüftung der Strassentunnel

Systemwahl, Dimensionierung und Ausstattung

ASTRA 13001

ASTRA OFROU USTRA UVIAS

Impressum

Autoren / Arbeitsgruppe

Jeanneret Alain	(ASTRA N-SFS, Vorsitz)
Allemann Martin	(ASTRA I-FU)
Berner Marcel	(ASTRA I-NV)
Fagnoli David	(ASTRA I-FU)
Hofer Andreas	(ASTRA I-FU)
Joseph Cédric	(ASTRA N-SFS)
Lüthy Daniel	(ASTRA I-FU)
Steinemann Urs	(US+FZ Beratende Ingenieure, Wollerau)
Zumsteg Franz	(US+FZ Beratende Ingenieure, Lenzburg, Erarbeitung)

Übersetzung (original Version in Deutsch)

Herausgeber

Bundesamt für Strassen ASTRA
Abteilung Strassennetze N
Standards, Forschung, Sicherheit SFS
3003 Bern

Bezugsquelle

Das Dokument kann kostenlos von www.astra.admin.ch herunter geladen werden.

© ASTRA 2008

Abdruck - ausser für kommerzielle Nutzung - unter Angabe der Quelle gestattet.

Vorwort

Die Grundsätze der im Dezember 2004 erstmals publizierten Richtlinie „Lüftung der Strassentunnel“ wurden schon in der Entstehungsphase dieser Richtlinie seit dem Jahr 2001 umgesetzt. Die Mehrzahl der heute in der Schweiz dem Verkehr übergebenen Strassentunnel erfüllen die Anforderungen der Richtlinie bereits umfänglich oder sie wurden so weit wie möglich an diese Vorgaben angepasst. Bei verschiedenen Ereignissen hat sich die neue Lüftungsstrategie bewährt. Es bestand deshalb keine Notwendigkeit die fundamentalen Anforderungen der ersten Ausgabe der vorliegenden Richtlinie zu ändern. Die neue Version 2.00 präzisiert einige Aspekte und führt gewisse neue Erkenntnisse ein. Der mit Version 1.0 eingeführte Standard der Auslegung der Lüftungen von Strassentunnel behält weiterhin seine Gültigkeit.

Bundesamt für Strassen

Rudolf Dieterle, Dr. sc. techn.
Direktor

Inhaltsverzeichnis

	Impressum	2
	Vorwort.....	3
1	Einleitung	9
1.1	Zweck der Richtlinie	9
1.2	Geltungsbereich	9
1.3	Adressaten	9
1.4	Inkrafttreten und Änderungen	9
2	Aufgaben der Lüftung.....	10
2.1	Schutzziele	10
2.2	Lüftung bei normalem Verkehr.....	10
2.3	Lüftung im Ereignisfall.....	10
2.4	Minderung der Umweltbelastung	10
3	Beschreibung der Lüftungssysteme.....	11
3.1	Hauptgruppen der Lüftungssysteme.....	11
3.2	System der natürlichen Lüftung	11
3.3	Mechanische Lüftungssysteme ohne Absaugung im Ereignisfall.....	11
3.3.1	Allgemeines.....	11
3.3.2	System der Längslüftung mit Strahlventilatoren	11
3.4	Mechanische Lüftungssysteme mit Absaugung im Ereignisfall	12
3.4.1	Allgemeines.....	12
3.4.2	Lüftungssystem mit Absaugung ohne Zuluft.....	12
3.4.3	Lüftungssystem mit Absaugung und Zuluft.....	13
3.5	Kombinierte Lüftungssysteme.....	14
4	Anwendung der Richtlinie.....	15
5	Erforderliche Grunddaten	16
5.1	Tunneldaten	16
5.2	Verkehrsdaten	16
5.3	Übrige Angaben	17
6	Wahl des Lüftungssystems.....	18
6.1	Vorgehen.....	18
6.2	Grundlegende Verkehrsarten.....	18
6.3	Bestimmung der Hauptgruppe des Lüftungssystems	19
6.3.1	Einsatzbereiche der Hauptgruppen der Lüftungssysteme	20
6.3.2	Weitere Einflussgrössen	20
6.3.3	Minderung von Zusatzbelastungen in Portalzonen.....	22
6.4	Bestimmung des Lüftungssystems	22
6.4.1	Allgemeines.....	22
6.4.2	Hauptgruppe Lüftung ohne Absaugung	22
6.4.3	Hauptgruppe Lüftung mit Absaugung	22
7	Dimensionierung.....	23
7.1	Dimensionierung für den Normalbetrieb	23
7.1.1	Verkehrsdaten	23
7.1.2	Dimensionierungswerte für die Luftqualität.....	25
7.1.3	Emissionsberechnung	25
7.1.4	Frischluftbedarf.....	26
7.1.5	Meteorologisch-thermische Einflüsse	27

7.1.6	Angaben für die Strömungsberechnungen	27
7.1.7	Hinweise zu Systemen ohne Absaugung	28
7.1.8	Hinweise zu Systemen mit Absaugung	28
7.1.9	Vermeidung von Strömungskurzschlüssen	29
7.2	Dimensionierung für den Betrieb im Ereignisfall.....	29
7.2.1	Ereignisse zur Lüftungsauslegung.....	29
7.2.2	Druckwirkung durch Auftrieb und Portaldruckdifferenzen	30
7.2.3	Hinweise zu Systemen ohne Absaugung	31
7.2.4	Hinweise zu Systemen mit Absaugung	32
7.2.5	Szenarienanalyse	34
7.2.6	Vermeidung von Strömungskurzschlüssen	34
7.3	Anforderungen bei Ausfällen und Betriebsunterbrüchen.....	35
7.3.1	Ausfälle im Ereignisfall.....	35
7.3.2	Betriebsunterbrüche während den Unterhaltsperioden	35
7.4	Minderung von Zusatzbelastungen in Portalzonen	36
7.4.1	Luftschadstoffe.....	36
7.4.2	Lärm der Ventilatoren	36
7.5	Optimierung der Anlage	36
7.6	Belüftung der Betriebsräume	37
7.7	Dokumentation der Dimensionierung	37
8	Ausstattung	38
8.1	Allgemeines	38
8.2	Messgeräte und Detektionseinrichtung	38
8.2.1	Normalbetrieb	38
8.2.2	Ereignisfall	39
8.2.3	Anforderungen	39
8.3	Temperaturbeständigkeit	40
8.3.1	Abluftventilatoren	40
8.3.2	Strahlventilatoren	40
8.3.3	Abluftklappen	40
8.4	Fluchtwege.....	40
9	Betriebsbedingungen	41
9.1	Luftqualität im Fahrraum	41
9.2	Steuerung	41
9.2.1	Mess- und Detektionssystem.....	41
9.2.2	Strahlventilatoren	41
9.2.3	Abluftmengen.....	41
9.2.4	Zuluftbetrieb im Ereignisfall.....	41
9.2.5	Steuerbare Abluftklappen bei Normalbetrieb.....	41
9.2.6	Steuerbare Abluftklappen sowie Abluft- und Zuluftventilatoren im Ereignisfall	41
9.3	Nachvollziehbarkeit von besonderen Ereignissen	42
9.4	Unterbrechungsfreie Stromversorgung (USV).....	42
10	Besondere Überprüfungen	43
10.1	Besondere Anforderungen an Anlagekomponenten	43
10.2	Inbetriebnahme der Anlage und Schulung	43
10.3	Überprüfung des Gesamtkonzeptes	43
11	Wartungs- und Unterhaltsarbeiten.....	44
11.1	Luftqualität im Fahrraum	44
11.2	Arbeitsumfang	44
	Anhänge.....	45
	Glossar.....	67

Literaturverzeichnis	69
Auflistung der Änderungen.....	71

1 Einleitung

1.1 Zweck der Richtlinie

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.

1.2 Geltungsbereich

Die Richtlinie gilt für die Lüftung von Strassentunneln, welche bergmännisch oder im Tagbau erstellt werden. Die Richtlinie beschreibt die Systemwahl, die Dimensionierung und die Ausstattung von Tunnellüftungen. Sie nennt auch Anforderungen für den Betrieb und den Unterhalt von Tunnellüftungsanlagen.

Die Richtlinie legt einen Standard fest, der sich am Stand der Technik orientiert. Dieser Standard ist auch bei der Sanierung bestehender Tunnel zu erfüllen.

1.3 Adressaten

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.

1.4 Inkrafttreten und Änderungen

Die vorliegende Richtlinie tritt am 01.06.2008 in Kraft. Die „Auflistung der Änderungen“ ist auf Seite 71 dokumentiert.

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.

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 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;

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.

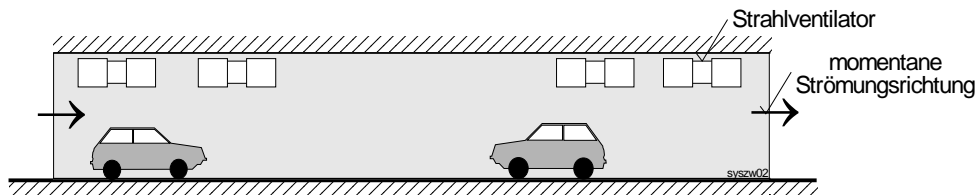


Abb. 3.1 Längslüftung mit Strahlventilatoren.
Bei Gegenverkehr oder Richtungsverkehr anwendbar.

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 Kap. 3.4.2)

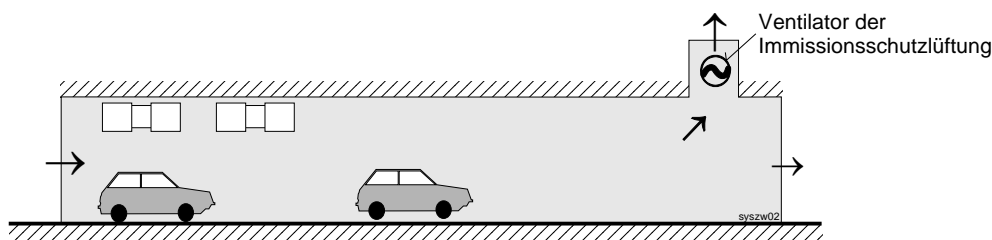


Abb. 3.2 Längslüftung mit Strahlventilatoren und Immissionsschutzlüftung.
Zur Minderung der Schadstoffbelastung im Umfeld des Ausfahrtsportals bei Tunneln mit Richtungsverkehr.

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 Kap. 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. 3.2).

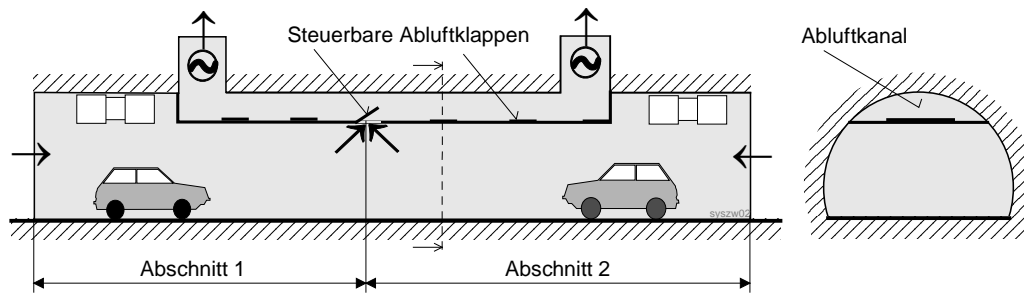


Abb. 3.3 Lüftungssystem mit Absaugung ohne Zuluft.

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 Kap. 3.4.2) oder Halbquerlüftung;
- Querlüftung.

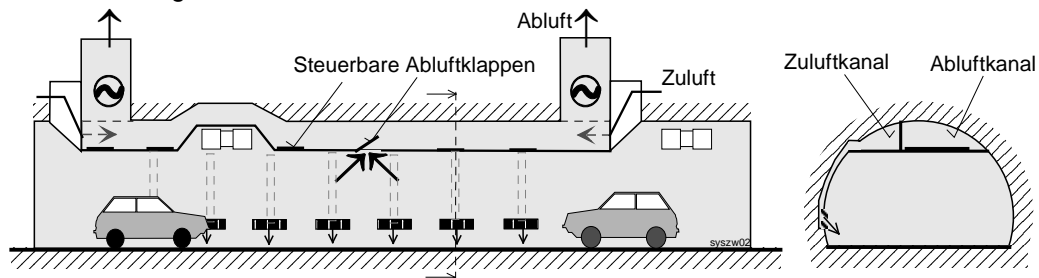


Abb. 3.4 Lüftungssystem mit Absaugung und Zuluft.

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 (Kap. 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“ [3] enthalten.

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

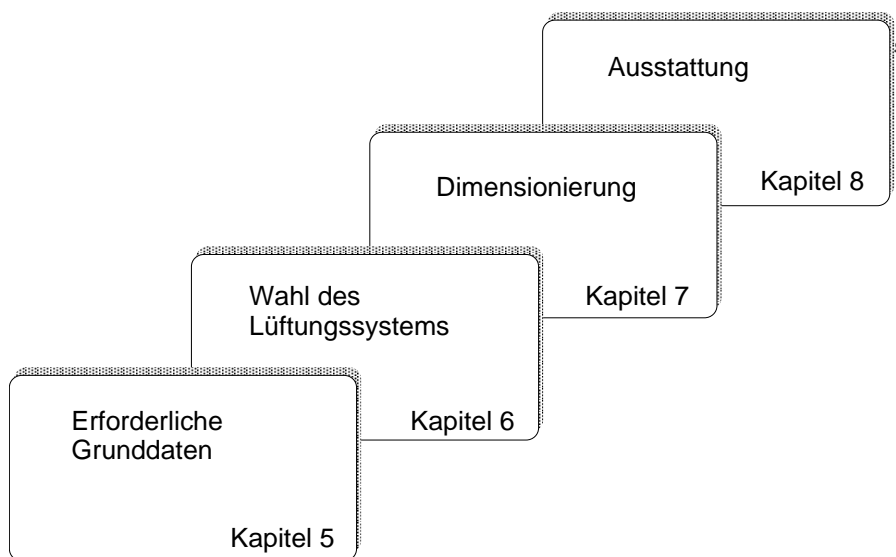


Abb. 4.1 Teilschritte in der Anwendung der Richtlinie.

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 Kap. 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. 6.2.
- 4) Befindet man sich im Übergangsbereich von zwei Hauptgruppen von Lüftungssystemen, muss die Wahl mit Hilfe der Einflussgrössen gemäss Kap. 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 zweiröhriigen Tunnel unterschiedliche Hauptgruppen des Lüftungssystems für die beiden Röhren ergeben, ist zu prüfen, ob dies baulich sinnvoll ist.

Falls gemäss Abbildung 6.2 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 Kap. 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 [14, Seite 159] drei grundlegende Verkehrsarten zu unterscheiden:

RV 1: Richtungsverkehr mit geringer Stauhäufigkeit.

RV 2: Richtungsverkehr mit grosser Stauhäufigkeit.

GV: Gegenverkehr.

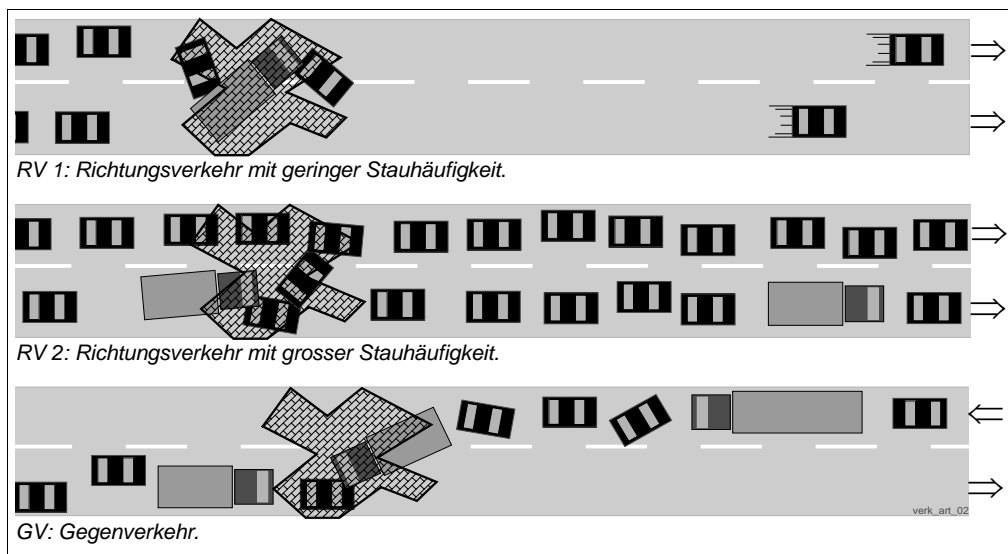


Abb. 6.1 Zuordnung zur grundlegenden Verkehrsart anhand der Stausituation im Ereignisfall.

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. 6.1, 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. 6.1, RV 2). Die Lüftung von zweiröhriigen Tunneln im städtischen Bereich ist unabhängig von einer Verkehrsprognose gemäss den Anforderungen an Anlagen mit grosser Stauhäufigkeit (RV 2) auszulegen.

Auch in Tunneln mit Gegenverkehr muss davon ausgegangen werden, dass sich die Fahrzeuge beidseits des Ereignisses stauen (Abb. 6.1, 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.

Ausnahmsweiser Gegenverkehr in einem Tunnel mit Richtungsverkehr erfordert keine Auslegung als Tunnel mit Gegenverkehr (Kap. 7.2.3).

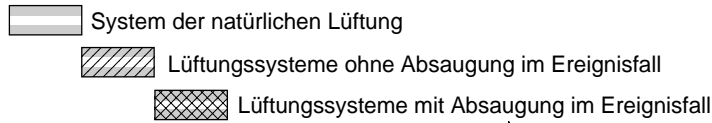
6.3 Bestimmung der Hauptgruppe des Lüftungssystems

Die Angaben in Kap. 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 (Abb. 6.2) mit den weiteren Einflussgrössen nach Kap. 6.3.2.

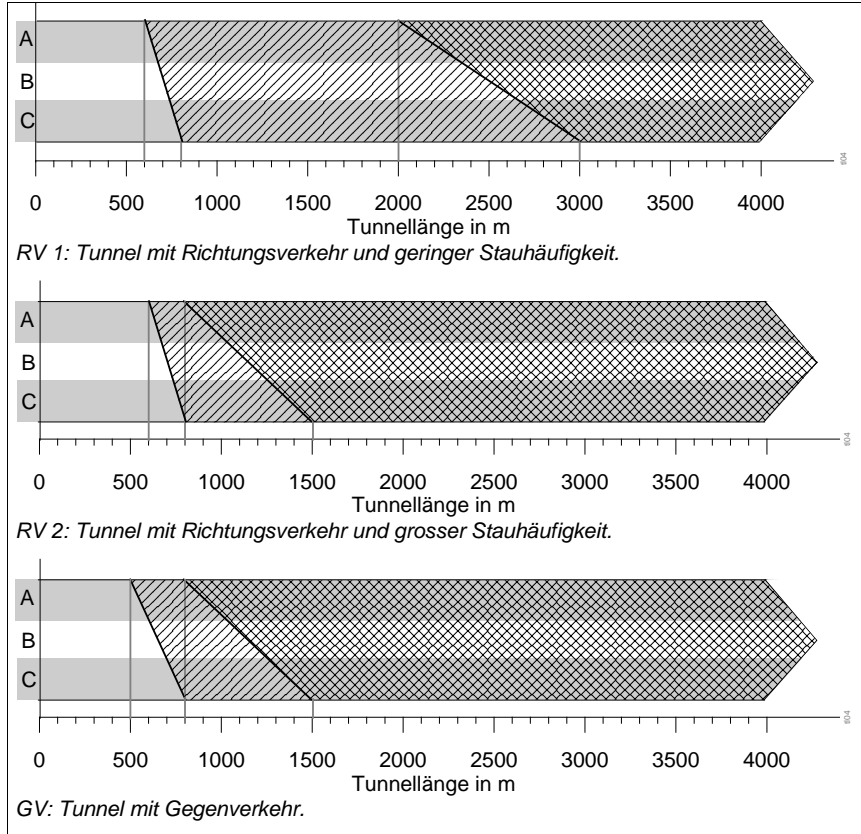


Abb. 6.2 Bestimmung der möglichen Hauptgruppe des Lüftungssystems nachsicherheitstechnischen Aspekten. Die Angaben sind gültig für Tunnel mit Längsneigungen bis 5 %.

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.

Gesamtbewertung

Aus den drei Teilbewertungen gemäss den Abbildungen 6.4 bis 6.6 ergibt sich die Gesamtbewertung der Einflussgrössen nach Abbildung 6.3, welche bei einer verfeinerten Betrachtung in Abbildung 6.2 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. 6.3 Gesamtbewertung aus den drei Teilbewertungen der Einflussgrössen.

Gesamtverkehr

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

Teilbewertung 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. 6.4 Bewertung der Einflussgrösse Gesamtverkehr.

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 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. 6.5 Bewertung der Einflussgrösse Lastwagenverkehr.

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 zweiröhrigen Tunneln ist die Betrachtung für jede Röhre separat vorzunehmen.

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

Abb. 6.6 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 Kap. 7.2. Dies gilt auch für Tunnel mit Gegenverkehr mit mehr als 5 % Längsneigung.

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 (Kap. 7.4.1).

6.4 Bestimmung des Lüftungssystems

6.4.1 Allgemeines

Aus den Untersuchungen in Kap. 6.3 resultiert die geeignete Hauptgruppe des Lüftungssystems. Die entsprechenden Lüftungssysteme sind in Abbildung 6.7 ersichtlich.

		Hauptgruppen der Lüftungssysteme		
		Natürliche Lüftung (Kap. 3.2)	Lüftung ohne Absaugung (Kap. 3.3)	Lüftung mit Absaugung (Kap. 3.4)
Übliche Lüftungssysteme	Natürliche Lüftung		Längslüftung mit Strahlventilatoren ohne Absaugung (Abb. 3.1 und 3.2)	Lüftung mit Absaugung und Strahlventilatoren ohne Zuluft (Abb. 3.3) Lüftung mit Absaugung, Strahlventilatoren und Zuluft (Abb. 3.4)

Abb. 6.7 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. 3.2) kann zweckmässig sein, wenn ein freies Abströmen von Tunnelluft über ein Portal aus Gründen der Umweltbelastung nicht zulässig ist (Kap. 7.4.1).

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

7.1.1 Verkehrsdaten

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 (Kap. 5.2). Bei Tunneln mit Richtungsverkehr ist jede Röhre einzeln zu betrachten.

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 Stau-prognose 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.

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.

Verkehrsdichte

Hinsichtlich des Längenbedarfs von Lastwagen gelten für fahrenden Verkehr in Anlehnung an [11, 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.

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 7.1 zu entnehmen.

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

Abb. 7.1 Maximale Fahrgeschwindigkeit der Lastwagen $v_{LW,max}$ auf Strecken verschiedener Längsneigung (LN) für die Lüftungsberechnungen.

Die Werte in Abbildung 7.1 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.

Verkehrskapazität in Tunneln

In Anlehnung an die Angaben in [11, Seite 7] und aus Analysen von Zählstellen liegt die Verkehrskapazität in Tunneln bei den Werten gemäss den Abbildungen 7.2 und 7.3. 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.

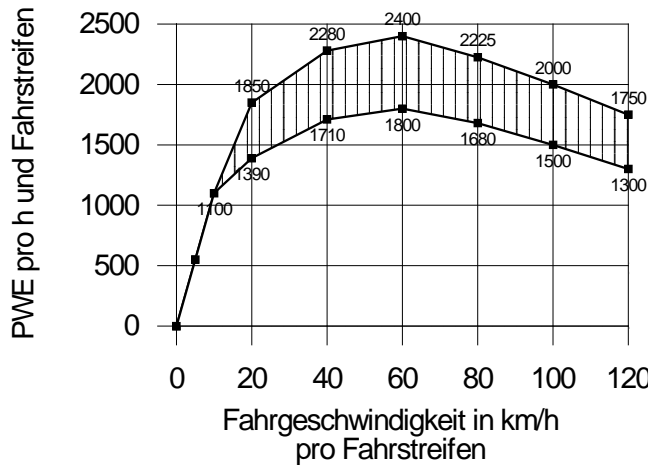


Abb. 7.2 Kapazität in Tunneln mit richtungstrennten Röhren.

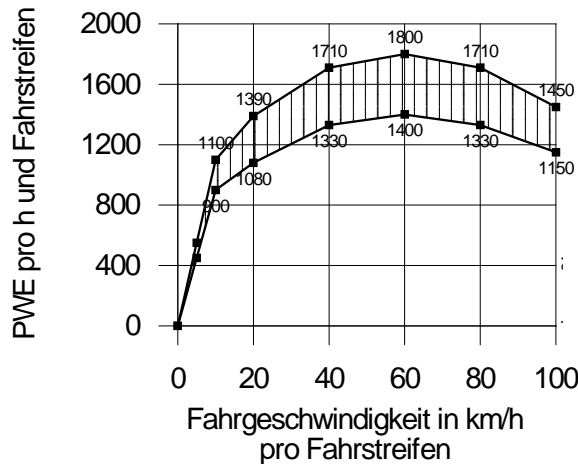


Abb. 7.3 Kapazität in Tunneln mit Gegenverkehr.

7.1.2 Dimensionierungswerte für die Luftqualität

Für die Dimensionierung der Lüftung sind auf der Grundlage von [13] die folgenden Werte der Luftqualität im Fahrraum zu verwenden:

Abb. 7.4 Luftqualität im Fahrraum, Dimensionierungswerte
(Grenzwerte der Luftqualität im Fahrraum: siehe Abb. 9.1 Seite 41)

CO-Konzentration $c_{im,co}$ [ppm]	Sichtrübung $k_{im,T}$ [m ⁻¹]
70	0.005

Für Stickstoffdioxid NO₂ empfiehlt [12] im Fahrraum einen Maximalwert von 2'000 µg/m³ (1 ppm) bei einer Stickoxid-Oxidation von 10 % (NO₂/NO_x) einzuhalten. Bei den gegebenen Werten für CO und Sichtrübung wird dieser Wert in jedem Fall eingehalten, so dass auf eine eigene Dimensionierung für NO₂ verzichtet werden kann.

7.1.3 Emissionsberechnung

Die Berechnung der Emissionen von CO und Sichtrübung 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 [13]:
 - 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:

Abb. 7.5 Richtungsaufteilung des Verkehrs zur Berechnung des Frischluftbedarfs bei Gegenverkehr

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

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

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 Kap. 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 7.4.

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 Kap. 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 7.4.

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.

Massgebender Frischluftbedarf

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

$$Q_{FL} = MAX(Q_{FL,CO}, Q_{FL,T}, Q_{FL,min}) \quad [m^3/s] \quad Gl. 7.8$$

7.1.5 Meteorologisch-thermische Einflüsse

Die meteorologisch-thermische Druckdifferenz Δp_{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 über eine Betrachtungsperiode von mindestens 1 Jahr 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 sich mit dem Gang der Aussentemperatur während des Tages und über das Jahr. Anhand der Statistik der örtlichen Umgebungstemperatur kann der natürliche Auftriebsdruck abgeschätzt werden (Gl. 7.19). Für die Auslegung ist der 95 %-Wert der jeweils ungünstigeren Richtung über eine Betrachtungsperiode von mindestens 1 Jahr zu verwenden.

Falls keine örtlich erhobenen Daten 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 5 km Länge sind besondere Erhebungen notwendig.

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 Jahresmittelwert 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:

$$\rho_L = 1.22 - 1.08 \cdot 10^{-4} \cdot H \quad [\text{kg/m}^3] \quad \text{Gl. 7.9}$$

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:

$$(c_W \cdot A_{Front})_{PW} = 0.9 \quad [\text{m}^2] \quad \text{Gl. 7.10}$$

$$(c_W \cdot A_{Front})_{LW} = 5.2 \quad [\text{m}^2] \quad \text{Gl. 7.11}$$

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

$$\Delta p_{Fz} = \rho / 2 \cdot (v_{Fz} - v_L)^2 \cdot (c_w \cdot A_{Front})_{Fz} / A_{Tunnel} \quad [\text{Pa}] \quad \text{Gl. 7.12}$$

$$\Delta p_{Verkehr} = \sum_{Fz} \Delta p_{Fz} \quad [\text{Pa}] \quad \text{Gl. 7.13}$$

Tunnelnennwerte (Richtwerte)

Einströmverlustkoeffizient in die Tunnelröhre	$\zeta_e = 0.6$	[-]	Gl. 7.14
Ausströmverlustkoeffizient aus der Tunnelröhre	$\zeta_a = 1.0$	[-]	Gl. 7.15
Wandrauhigkeit der Tunnelröhre	$k_s = 2$	[mm]	Gl. 7.16

(betonierter Innenring mit üblichen Einbauten, entsprechender Reibungskoeffizient $\lambda = 0.015$ für zweistreifige Tunnel)

Der Druckverlust an der Tunnelröhre beträgt:

$$\Delta p_{Reibung} = \rho/2 \cdot v_L^2 \cdot (\zeta_e + \lambda \frac{L_{Tunnel}}{D_H} + \zeta_a) \quad [\text{Pa}] \quad \text{Gl. 7.17}$$

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 Kap. 7.2.3 enthalten.

Der von den Strahlventilatoren aufzubringende Druck Δp_{eff} 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 Kap. 7.1.5 und 7.1.6 enthalten.

$$\Delta p_{eff} = \Delta p_{Verkehr} + \Delta p_{Reibung} + \Delta p_{mt} \quad [\text{Pa}] \quad \text{Gl. 7.18}$$

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 7.5 zu variieren. Ein andauernder ausgleichener Verkehr in beiden Richtungen ist dabei nicht zu betrachten.

Zu berücksichtigen ist die der Längsneigung entsprechende Maximalgeschwindigkeit der Lastwagen nach Abbildung 7.1. 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 [11, 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 Kap. 7.2.4 enthalten.

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 begehbar sein.

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 Kap. 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 Kap. 7.2.6 zu beachten.

7.2 Dimensionierung für den Betrieb im Ereignisfall

Die Kapitel 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 (Kap. 7.2.3 bis Kap. 7.2.6).

7.2.1 Ereignisse zur Lüftungsauslegung

AIPCR [14, Seite 63] schliesst aus verschiedenen Quellen, darunter den EUREKA-Versuchen 1998 [19], dass während einem Brand etwa folgende maximale Brandleistungen mit signifikanter Dauer erwartet werden müssen:

Abb. 7.6 Nominale Brandleistungen verschiedener Brandobjekte nach [14]

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

Bei Bränden von grossen Transportfahrzeugen wie Lastenzüge und Sattelschlepper mit brennendem Ladegut können grössere Brandleistungen entstehen als in Abbildung 7.6 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 [19].

Nach der Definition der Brandleistung in [19, 18] wird im Verhältnis zur gesamten Branddauer von rund einer Stunde die nominale Brandleistung nur während weniger Minuten erreicht oder überschritten.

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 Verrauchung 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
Brandleistung nominal	0 MW	30 MW
Freigesetzte Energie	0 GJ	30 GJ
Freisetzung gefährdender Gase	20 m ³ /s	80 m ³ /s
Dauer	≥ 20 min	≥ 60 min

Abb. 7.7 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 Kap. 7.1.5)

In Tunneln mit Längsneigung stellt sich infolge Temperaturdifferenzen eine Druckwirkung auf die Luft im Fahrraum in der Richtung der Tunnelachse 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 [18]) charakterisiert:

	Schadstoff-Freisetzung	Ereignis	
		Lastwagenbrand	
		Ohne (vor) Absaugbetrieb	Mit Absaugbetrieb
ΔT_{Brand}	0 K	65 K	135 K
L_{Brand}	-	800 m	300 m

Abb. 7.8 Normwerte zur Bestimmung des Auftriebs (siehe auch Abb. 7.9).

Die in [18] dokumentierten Temperaturmesswerte ergeben bei einer Anströmung mit der kritischen Geschwindigkeit und für einen Tunnel konstanter Längsneigung eine Auftriebsverteilung gemäss Abbildung 7.9. Für andere Situationen (ändernde Längsneigung, Ausströmen aus einem Portal, symmetrische Ausbreitung) ist die Kurve anzupassen.

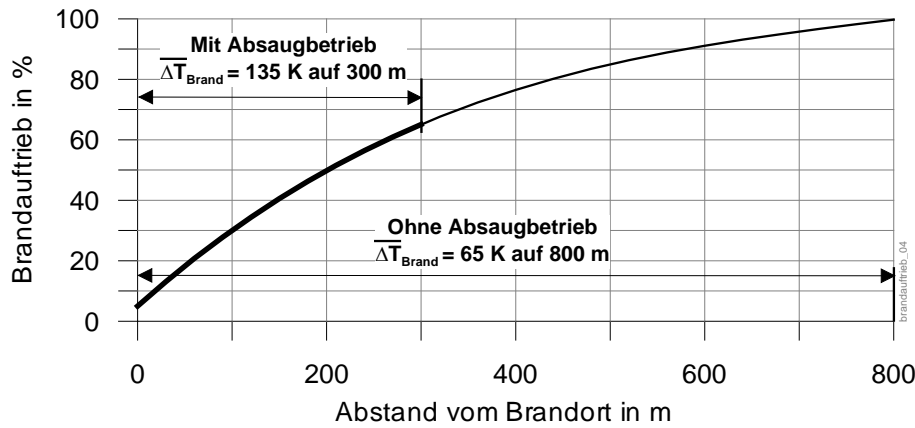


Abb. 7.9 Örtliche Verteilung des Brandauftriebs bei Anströmung mit der kritischen Geschwindigkeit und bei konstanter Längsneigung. Für Tunnel mit ändernder Längsneigung sind detaillierte Berechnungen erforderlich.

Für die Berechnung der instationären Abläufe ist anzunehmen, 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 Kap. 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 (Kap. 6.1)	Fahrrichtung am Ereignisort	Freigesetzte Energie	Geforderte Längsströmung
RV 1	Talfahrt	LW-Brand	3 m/s nach unten
	Bergfahrt	LW-Brand null	3 m/s nach oben 1.5 m/s nach oben
RV 2	Talfahrt	LW-Brand	3 m/s nach unten
	Bergfahrt	LW-Brand LW-Brand null	1.5 m/s nach unten 3 m/s nach oben 1.5 m/s nach oben
GV	Tal- und Bergfahrt	LW-Brand	1.5 m/s nach unten

Abb. 7.10 Anforderungen an die Längsströmung zur Auslegung von Strahlventilatoren bei Systemen ohne Absaugung. (Zum Betrieb der Strahlventilatoren siehe Kap. 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 Kap. 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 Lüf-

tungsanlage der Sonderfall von ausnahmsweisem Gegenverkehr berücksichtigt werden (Kap. 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 Tunnelbenützer aufhalten (GV, gegebenenfalls RV 2 sowie Röhre mit ausnahmsweisem Gegenverkehr), muss die Längsströmung am Ereignisort klein gehalten werden, damit die Tunnelbenützer 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 Tunnelbenützer aufhalten, soll eine eventuell vorhandene Rauchschichtung unter der Decke nach Möglichkeit nicht gestört werden.

Falls sich die Tunnelbenützer 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

Betreffend Anordnung von Lüftungszentralen sind die Anforderungen in SIA 197/2 [9], Kap. 8.10 zu beachten.

Die in Kap. 7.2.4 gestellten Mindestanforderungen müssen bei zweiröhri gen Tunneln für jede Röhre einzeln erfüllt werden können. Mit Klappen verschliessbare Verbindungen der Abluftkanäle zweier paralleler Röhren sind zulässig, erlauben jedoch keine Auslegung unter den 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.

Gemäss Kap. 1.2 gelten die Anforderungen auch bei der Sanierung bestehender Tunnel. Höchste Priorität haben die Absaugmenge am Brandort pro 200 m, die Kontrollierbarkeit der Längsströmung sowie die Erfüllung der Anforderungen bez. Ausfall eines Abluftventilators.

7.2.4.2 Absaugkapazität und Beeinflussung der Längsströmung

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

Verkehrsart (Kap. 6.1)	Situation vor dem Ereignis	Längsströmung gegen Ereignisort	Tunnelbereich
RV 1	fliessender Verkehr	3 m/s 0 m/s	vor dem Absaugbereich (Fahrzeugstau) nach dem Absaugbereich
	Ausn. GV*	1.5 m/s	beidseits des Absaugbereichs
RV 2	fliessender Verkehr	3 m/s 0 m/s	vor dem Absaugbereich (Fahrzeugstau) 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. 7.11 Mindestanforderungen an die Längsströmung in Richtung Ereignisort bei Systemen mit Absaugung gültig für die Auslegung und den Betrieb.

Der Zuluft eintrag 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 Abb. 7.11 ist in allen Fällen beim Ereignisort eine minimale Absaugung $Q_{ABL,min}$ erforderlich von:

$$Q_{ABL,min} = 3 \text{ m/s} \cdot A_{Tunnel} + Q_{ZUL} \quad [\text{m}^3/\text{s}] \quad \text{Gl. 7.22}$$

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. 7.7).

Die Längsströmungen gemäss Abbildung 7.11 müssen in allen Fällen und bei allen möglichen Ereignisorten eingehalten werden. Um diese Anforderungen unter Beachtung einer ausreichenden Steuerbarkeit des Gesamtsystems erfüllen zu können, sind im Fahrraum Strahlventilatoren erforderlich und die Absaugmenge am Ereignisort Q_{ABL} ist 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. Für Tunnel mit Richtungsverkehr und geringer Stauhäufigkeit (RV 1) genügt in aller Regel ein Zuschlag von $1/10 \times Q_{ABL,min}$, währenddem für Tunnel mit Richtungsverkehr und grosser Stauhäufigkeit (RV 2) und 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.

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

$$Q_{Ventilator} = Q_{ABL} + Q_{Leck} \quad [\text{m}^3/\text{s}] \quad \text{Gl. 7.24}$$

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 Kräfteinwirkungen zunehmen kann. Angaben zur Abschätzung der Gesamtleckagemenge ist in Anhang VII enthalten.

$Q_{Ventilator}$ ist der minimale Volumenstrom bei Umgebungstemperatur, der durch die Anzahl vorgesehener Abluftventilatoren zu fördern ist. Für den Sonderfall der Auslegung der Abluftventilatoren auf 400°C (siehe Kap. 8.3.1), sind diese auf die Luftmenge von $1.3 \times Q_{Ventilator}$ auszulegen. Bei Druckänderungen durch die thermische Einwirkung eines 30-MW-Brandes muss ein stabiler Absaugbetrieb gewährleistet werden.

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.

Die portalnahen Abschnitte eignen sich für die Anordnung von Strahlventilatoren. Der Beginn des Abluftkanals darf nicht weiter als 300 m vom Portal entfernt sein.

Die Abluftklappen sind möglichst breit zu dimensionieren, um ein Vorbeiströmen der freigesetzten Gase zu minimieren. Die erforderlichen Platzverhältnisse für den Klappenantrieb und für die Durchfahrt im Abluftkanal sind dabei zu berücksichtigen. Für die Festlegung der Klappenfläche ist von einer vertikalen Geschwindigkeitskomponente in der

Klappe von 15 m/s bezogen auf Umgebungstemperatur 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 neuen Anlagen darf die Druckdifferenz zwischen Fahrraum und Kanal 2'500 Pa nicht überschreiten.

Bei der Bestimmung der Kanalhöhe muss ein ausreichender Zugang zu den Klappen einbezogen werden. Die lichte Höhe muss mindestens 1.80 m betragen.

7.2.5 Szenarienanalyse

Die Tunnellüftungsanlage wird gemäss den Kap. 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 vor dem Portal von einer 30 m langen Einströmzone (Abb. 7.12) 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.

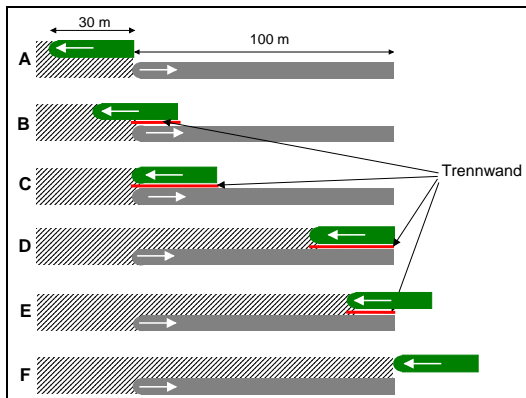


Abb. 7.12 Anordnungen von Portalen und Trennwand zur Vermeidung eines Strömungskurzschlusses.

Bei einem Ereignis ist die Lüftung der Gegenröhre so zu betreiben, dass ein Strömungskurzschluss an den Portalen verhindert wird. Zu diesem Zweck muss die Gegenröhre für den Verkehr gesperrt werden.

Damit zwei sich folgende Tunnel lüftungstechnisch unabhängig voneinander betrachtet werden können, muss der Abstand zwischen den Portalen mindestens 100 m bei Querung eines Tales, 200 m bei Führung der Strasse in einem tiefen Einschnitt zwischen den Tunneln und 250 m bei einer einseitigen Galerie betragen.

Bei der Positionierung einer Rauchausslassöffnung sind die Orographie¹ und die örtlichen meteorologischen Verhältnisse sowie die Hinweise in SIA 197/2 [9], Kap. 8.10.4, zu berücksichtigen. Als Richtwert für den Mindestabstand von Rauchausslassöffnung zu Portal gelten 50 m.

7.3 Anforderungen bei Ausfällen und Betriebsunterbrüchen

Für die Dimensionierung der Lüftung sind im Folgenden die zwei massgebenden Fälle aufgeführt (Ausfall eines Abluftventilators im Ereignisfall sowie Betriebsunterbrüche während den Unterhaltsperioden).

7.3.1 Ausfälle im Ereignisfall

Abluftventilatoren

Beim Ausfall eines Abluftventilators muss der aus dem Fahrraum abgesaugte Volumenstrom mindestens 65 % von Q_{ABL} betragen (Gl. 7.24). Die Anforderung gilt für jede Röhre einzeln, auch wenn zur Erhöhung der Kapazität eine Verbindung zwischen den Abluftkanälen von benachbarten Röhren zur Verfügung steht.

Abluftklappen

Wenn eine der zu öffnenden Klappen geschlossen bleibt, muss der Abluftstrom durch die übrigen zu öffnenden Klappen mindestens 90 % des Sollwertes betragen.

Strahlventilatoren

Beim Ausfall einer Strahlventilatorgruppe infolge Brandeinwirkung muss der Schub der verbleibenden Strahlventilatoren mindestens 90 % des Sollwertes betragen.

7.3.2 Betriebsunterbrüche während den Unterhaltsperioden

Abluftventilatoren

Betriebsunterbrüche bis zu 72 Stunden

Während maximal 72 Stunden pro Jahr ist ein Abluftstrom von 65 % des Volumenstroms Q_{ABL} gemäss Gl. 7.24 mit Betrieb von nur einem Abluftventilator zulässig. In dieser Zeit sind Massnahmen zur Minderung des Ereignisrisikos zu treffen.

Betriebsunterbrüche länger als 72 Stunden

Führt ein Betriebsunterbruch eines Abluftventilators während mehr als 72 Stunden pro Jahr zu einem reduzierten Abluftvolumenstrom, ist eine Abschätzung der Risiken für diese Phase durchzuführen. Massnahmen zur Minderung der Risiken sind zu ergreifen. In Betracht zu ziehende Massnahmen können sein:

1. Betriebliche und organisatorische Massnahmen
z.B.: Begrenzung der Fahrgeschwindigkeit, Pikettdienst von Einsatzkräften vor Ort, Umleitung des Schwerverkehrs, Umleitung einer Fahrtrichtung bei Tunneln mit Gegenverkehr, Sperrung des Tunnels.
2. Massnahmen bei der Ausstattung.
z.B.: Ersatzmotor, grössere Anzahl Abluftventilatoren.

Die Wahl der geeigneten Massnahmen muss aufgrund wissenschaftlicher Untersuchungen (z.B. Kosten-Nutzen-Analyse) getroffen und dokumentiert werden.

¹ Die Orografie ist ein Spezialgebiet innerhalb verschiedener Geowissenschaften und befasst sich mit Höhenstrukturen auf der natürlichen Erdoberfläche. Hauptthema ist der Verlauf und die Anordnung von Gebirgen und die Fließverhältnisse von Gewässern. Das zugehörige Adjektiv orografisch bezeichnet Erscheinungen, Eigenschaften und Zusammenhänge, die von Hangneigungen und Hangrichtungen (Exposition) des Geländes und seinen fließenden Gewässern geprägt werden.

7.4 Minderung von Zusatzbelastungen in Portalzonen

7.4.1 Luftschadstoffe

Die Grundlage für die Beurteilung der Schadstoffbelastung in der Umgebung ist die Luftreinhaltverordnung (LRV) [2].

Mit einer Absaugung der Tunnelluft vor dem Ausströmen durch das Portal und dem Ausstoss über ein Immissionsschutzkamin 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 7.13 angegebenen Werte überschreiten, benötigen in der Regel Lüftungsanlagen zur Minderung der am Portal freigesetzten Abluftmenge.

Abb. 7.13 Erfahrungswerte für NO_x-Portalfrachten, bei denen Absauganlagen projektiert werden

Umfeld	Portalfracht in t NO _x /Jahr
Innerstädtisch	> 10
Locker besiedelt, Wohnbereich	> 20
Locker besiedelt, Industriebereich	> 30
Unbesiedelt, ländlich	> 40

Bei der Dimensionierung von Immissionsschutzkaminen ist auf eine ausreichende Kaminhöhe und Strahlgeschwindigkeit an der Mündung zu achten (vergleiche Anhang V, Seite 60). 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 unmittelbaren 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. Die Erforderlichkeit des Betriebs solcher Immissionsschutzanlagen ist mit Messungen periodisch zu bestätigen.

7.4.2 Lärm der Ventilatoren

Die Grundlage für die Beurteilung der Lärmbelastung in der Umgebung ist die Lärmschutzverordnung (LSV) [1].

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

7.5 Optimierung der Anlage

Bei der Dimensionierung der Anlage sind Investitions- und Betriebskosten einzubeziehen. Zu diesem Zweck ist das Vorgehen in Anhang VI Seite 62 zu verwenden.

7.6 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.

7.7 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 [8] [9] und den Richtlinien des ASTRA [3] [5] [6] [7] 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 sind im Sinne einer Checkliste weitere Angaben zur Ausstattung gegeben.

8.2 Messgeräte und Detektionseinrichtung

8.2.1 Normalbetrieb

Allgemeines

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

- Sichttrübung (ST);
- CO;
- Lüftrichtung 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.

Sichttrübungsmessung (siehe Kap. 8.2.2)

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

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.

Strömungsmessung (siehe Kap. 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 am Messquerschnitt im Fahrraum zu ermitteln.

8.2.2 Ereignisfall

Detektion

Tunnel mit mechanischer Lüftung sind mit einer Ereignis- und Branddetektion auszurüsten. Für die Branddetektion sind die Anforderungen in der ASTRA-Richtlinie Branddetektion [5] massgebend.

Grundsätzlich sind soweit möglich und sinnvoll alle im Tunnel vorhandenen Sensoren, einschliesslich der Videoanlage (siehe ASTRA-Richtlinie Verkehrsfernsehen [6]), in angemessener Weise zur Detektion eines Ereignisses zu verwenden.

Detektionsgeschwindigkeit und Detektion des Ereignisortes

Eine rasche Detektion eines Ereignisses (siehe [5]) ist entscheidend für die Wirksamkeit der installierten Lüftungsanlage. Bei einem System mit steuerbaren Abluftklappen sind zudem die Bestimmung des Ereignisortes und die Unterscheidung zwischen einem stationären und einem bewegten Brand massgebend für den richtigen Betrieb der Lüftung.

Strömungsmessung

Entsprechend den Anforderungen in den Kap. 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. Wird ein Strömungsmesswert zur Steuerung im Ereignisfall verwendet, muss dessen Plausibilität mit 3 unabhängigen Messungen ermittelt werden können.

8.2.3 Anforderungen

Mindestanforderungen an Messbereich und -genauigkeit

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

Abb. 8.1 Mindestanforderungen an die Messgeräte

Messgrösse	Messbereich	Messgenauigkeit (Gerätespezifikation)
Strömungsgeschwindigkeit		
- Fahrraum	-12 bis +12 m/s	± 0.2 m/s bei 3 m/s
- Kanäle, Schächte	entspr. Auslegung	± 5 % des Endwerts
Sichttrübung (Normalbetrieb)	0 bis 0.015 m ⁻¹	± 0.001 m ⁻¹
CO	0 bis 250 ppm	0 bis 60 ppm: ± 5 ppm 60 bis 250 ppm: ± 15 ppm

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. Falls der kürzeste Strömungsweg zwischen erster Abluftklappe und Abluftventilator 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, exponierten Zuleitungen usw., muss für eine Temperatur im Fahrraum und im Abluftkanal von 250°C über 120 Minuten gewährleistet sein.

8.4 Fluchtwege

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 [8] und 197/2 [9], der ASTRA-Richtlinie „*Belüftung von Sicherheitsstollen und Querverbindungen von Strassentunneln*“ [4] und der ASTRA-Richtlinie „*Signalisation der Sicherheitseinrichtungen in Tunneln*“ [7] durchzuführen.

9 Betriebsbedingungen

9.1 Luftqualität im Fahrraum

Die Auslegung der Lüftung erfolgt auf die Dimensionierungswerte für CO und Sichttrübung gemäss Abbildung 7.4. 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 9.1 angegebenen Werte an einer beliebigen Stelle im Fahrraum für mehr als 3 Minuten überschritten, ist die betroffene Tunnelröhre für einfahrende Fahrzeuge zu sperren.

Abb. 9.1 Grenzwerte der Luftqualität im Fahrraum zur Tunnelsperrung

CO-Konzentration [ppm]	Sichttrübung [1/m]
200	0.012

9.2 Steuerung

9.2.1 Mess- und Detektionssystem

Angaben zur Instrumentierung sind in Kapitel 8 enthalten.

9.2.2 Strahlventilatoren

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

9.2.3 Abluftmengen

Stehen grössere Abluftmengen als in Kap. 7.2.4 gefordert zur Verfügung, sind diese unter Berücksichtigung der maximalen Längsgeschwindigkeiten auszunützen.

9.2.4 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. Kap. 7.2.4). In den Nachbarabschnitten kann es zweckmässig sein, mit grossen Zuluftmengen zu fahren und die Zu- und Abluftmengen aufeinander abzustimmen.

9.2.5 Steuerbare Abluftklappen bei Normalbetrieb

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

9.2.6 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. Bei mehreren Alarmen in Folge ist die Automatik zunächst entsprechend dem ersten Alarm beizubehalten. Eine automatische Umsteuerung der Klappen ist im Allgemeinen nicht zweckmässig. Die manuelle Umsteuerung der Klappen und Ventilatoren muss möglich sein.

9.3 Nachvollziehbarkeit von besonderen Ereignissen

Alle lüftungsrelevanten Messgrößen 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.

9.4 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.

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 Leistungserhaltung bei Ausfall und Betriebsunterbruch sind die Anforderungen in Kap. 7.3 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 und Schulung

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. Um diesen Kenntnisstand zu erreichen und zu halten sind die Operateure wiederkehrend zu schulen, und der Erfahrungsaustausch ist zu fördern.

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 Wartungs- und Unterhaltsarbeiten

11.1 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.

11.2 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 Kap. 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 (Rauchmelder und thermischer Linienmelder);
 - 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

I	Verständigung	47
I.1	Abkürzungen	47
I.2	Einheiten	48
II	Richtwerte zur Verkehrsprognose	49
II.1	Verkehrsentwicklung	49
II.2	Massgebender stündlicher Verkehr	49
II.3	Stauhäufigkeit.....	50
III	Emissionsberechnung	51
III.1	Grundlagen.....	51
III.2	Emissionen der Personenwagen	51
III.2.1	Grundgleichungen	51
III.2.2	CO-Emission der PW mit Benzinmotor	52
III.2.3	Sichttrübe-Emission der PW mit Benzinmotor	52
III.2.4	CO-Emission der PW mit Dieselmotor	53
III.2.5	Sichttrübe-Emission der PW mit Dieselmotor	54
III.3	Emissionen der Lastwagen	54
III.3.1	Grundgleichungen	54
III.3.2	CO-Emission der LW	55
III.3.3	Sichttrübe-Emission der LW.....	56
III.4	Zeitliche Entwicklung der Basisemissionen	57
IV	Strahlventilatoren	58
IV.1	Allgemeines	58
IV.2	Ventilatoraten	58
IV.3	Anordnung.....	59
V	Hinweise zu Komponenten (Checkliste)	60
VI	Angaben zur Optimierung der Auslegung	62
VI.1	Allgemeines	62
VI.2	Amortisation des Kapitaleinsatzes	62
VI.3	Mittlere Kosten	63
VI.4	Nutzungsdauer resp. Betrachtungsperiode	63
VI.5	Kapitalzins und Teuerung	64
VI.6	Energiepreise	64
VI.7	Erforderliche Angaben	65
VII	Leckage	66
VII.1	Richtwerte	66
VII.2	Nomogramm zur Abschätzung der Leckagemenge.....	66

I Verständigung

I.1 Abkürzungen

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

deutsch	französisch	Einheit	Bedeutung
ASTRA	OFROU	-	Bundesamt für Strassen
A_{Tunnel}	A_{tunnel}	m^2	Querschnittfläche des Tunnelfahrtraums
BAFU	OFEV	-	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
k_s	k_s	mm	Wandrauhigkeit
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 = $286.7 J/(kg \cdot K)$

deutsch	französisch	Einheit	Bedeutung
RV 1	TU 1	-	Richtungsverkehr mit geringer Stauhäufigkeit
RV 2	TU 2	-	Richtungsverkehr mit grosser Stauhäufigkeit
ST	op	1/m	Sichttrübung
T	T	K	Temperatur
T_a	T_e	K	Referenztemperatur der Aussenluft
T_i	T_i	K	mittlere Temperatur im Tunnelfahrraum vor dem Ereignis
USV	ASC	-	Unterbrechungsfreie Stromversorgung <i>Uninterruptible Power Supply (UPS)</i>
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
Δp_{Brand}	$\Delta p_{incendie}$	Pa	Auftrieb durch Brand
Δp_{erf}	$\Delta p_{néc}$	Pa	Erforderlicher Druck, von Strahlventilatoren aufzubringen
Δp_{Fz}	Δp_{vhc}	Pa	Druckwirkung eines Fahrzeugs
Δp_{mt}	Δp_{mt}	Pa	Meteorologisch-thermische Druckdifferenz
Δp_{nat}	Δp_{nat}	Pa	Auf- bzw. Abtrieb durch natürliche Temperaturdifferenz
$\Delta p_{Reibung}$	$\Delta p_{rottement}$	Pa	Druckverlust an der Tunnelröhre
$\Delta p_{Verkehr}$	Δp_{trafic}	Pa	Druckwirkung des Verkehrs
ΔT_{Brand}	$\Delta T_{incendie}$	K	Mittlere Temperaturzunahme durch die Brandwärme im Abschnitt L_{Brand}
λ	λ	-	Koeffizient des Reibungsverlustes
ρ_a	ρ_e	kg/m ³	Dichte der Aussenluft
ρ_{Brand}	$\rho_{incendie}$	kg/m ³	Dichte der Luft im Bereich des Brandes
ρ_i	ρ_i	kg/m ³	Dichte der Luft im Tunnel
ζ_a	ζ_s	-	Koeffizient des Verlustes beim Ausströmen aus dem Tunnel
ζ_e	ζ_e	-	Koeffizient des Verlustes beim Einströmen in den Tunnel

I.2 Einheiten

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

II Richtwerte zur Verkehrsprognose

Die erforderlichen Verkehrsdaten sind in den Kap. 5.2 und Kap. 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 [10])	7	Klasse 4	18

* von und zu Ferienorten.

Abb. II.1 Zuordnung der Fahrzwecke zu Typen und Klassen nach [10, Ziffer 5] und massgebender stündlicher Verkehr je nach Fahrzweck. Die Angabe des MSV beruht auf den Angaben in [10] 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 Stauprognose zwischen Situationen mit geringer und mit grosser Stauhäufigkeit (Kap. 6.1) unterschieden. Als Richtwerte gelten die Angaben in Abbildung II.2.

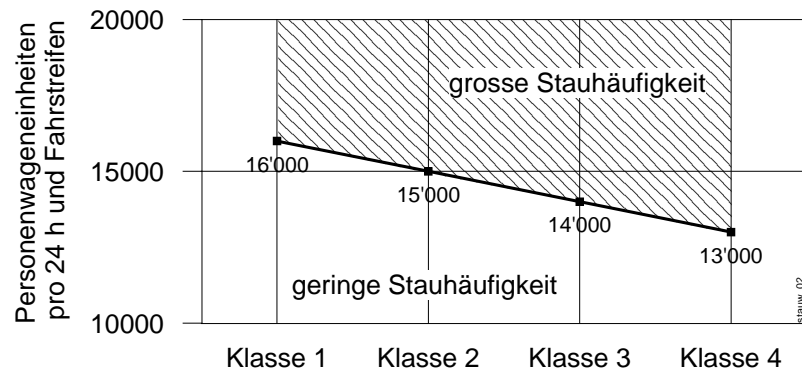


Abb. II.2 Tunnel mit Richtungsverkehr: Zuordnung zu grosser bzw. geringer Stauhäufigkeit bei fehlender Stauprognose, abgeleitet nach [4]. PWE bezieht sich auf den DTV und den mittleren LW-Anteil. Die Klassen beziehen sich auf die Fahrzwecke gemäss Abbildung II.1. Mit Verflechtungen der Fahrstreifen im 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 Kap. 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 [13] und repräsentieren einen Mittelwert 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. III.1).

III.2 Emissionen der Personenwagen

III.2.1 Grundgleichungen

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

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

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

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

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

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

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 III.1 zu verwenden. Die Werte für die Schweiz enthalten einen durchschnittlichen Anteil ausländischer Fahrzeuge. In grenznahen Gebieten und für Transitstrecken sind die Werte anzupassen.

Abb. III.1 Fahrleistungsbezogener Anteil der PW mit Dieselmotor $a_{PW,D}$ in % am durchschnittlichen PW-Verkehr (aus [17])

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

III.2.2 CO-Emission der PW mit Benzinmotor

v_{Fz} [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. III.2 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. III.3 Zeitfaktor f_z für die CO-Emission der PWB .

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. III.4 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
$q_{AR, PW}$ [$m^2/(h, Fz)$]	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. III.5 Nicht-motorische Sichttrübe-Emission der PW $q_{AR, PW}$ in $m^2/(h, Fz)$ in $m^2/(h, Fz)$.

III.2.4 CO-Emission der PW mit Dieselmotor

v_{Fz} [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. III.6 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. III.7 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. III.8 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} [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. III.9 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. III.10 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. III.11 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 III.5 zu entnehmen.

III.3 Emissionen der Lastwagen

III.3.1 Grundgleichungen

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

$$e_{LW} = e_0 \cdot f_z \cdot f_H \cdot f_M + q_{AR,LW} \tag{Gl. III.4}$$

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 Massefaktor 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} [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. III.12 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. III.13 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. III.14 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 [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. III.15 Massefaktor f_M für die CO-Emission der LW.

III.3.3 Sichttrübe-Emission der LW

v_{Fz} [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. III.16 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. III.17 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. III.18 Höhenfaktor f_H für die motorische Sichttrübe-Emission der LW

Masse [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	2.6	2.6	2.6	2.6	2.6	2.6

Abb. III.19 Massfaktor 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
$q_{AR,LW}$ [$m^2/(h,Fz)$]	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. III.20 Nicht-motorische Sichttrübe-Emission der LW.

III.4 Zeitliche Entwicklung der Basisemissionen

Die Abbildungen III.21 bis III.24 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 III.21 bis III.24 sind informativ. Für die Berechnungen sind die Werte in den Abbildungen III.1 bis III.20 zu verwenden.

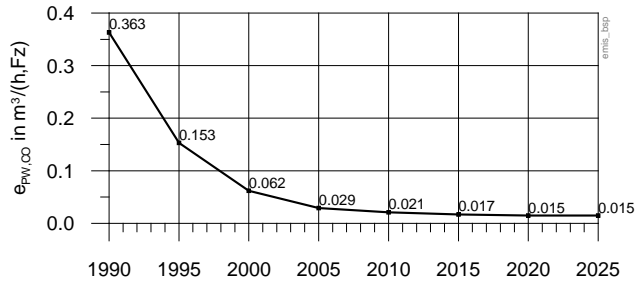


Abb. III.21 Entwicklung der CO-Emission eines mittleren PW.

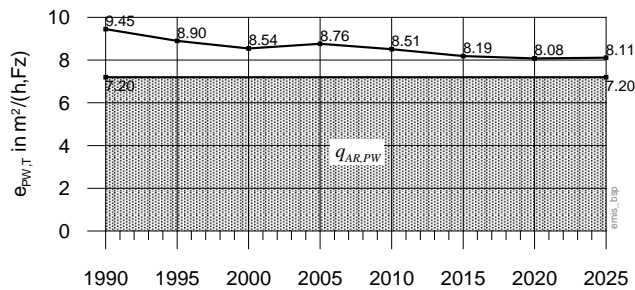


Abb. III.22 Entwicklung der Sichttrübe-Emission eines mittleren PW.

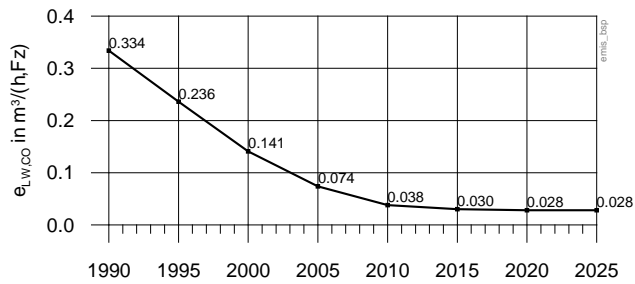


Abb. III.23 Entwicklung der CO-Emission eines LW mit 18 t.

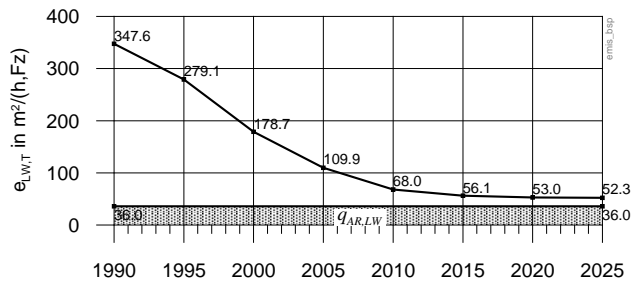


Abb. III.24 Entwicklung der Sichttrübe-Emission eines LW mit 18 t.

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:

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

Δp_{erf} Erforderlicher Druck in Pa zur Erreichung der geforderten Längsströmung v_L .

Δp_{sv} Von 1 Strahlventilator erzeugte Druckdifferenz in Pa.

ρ_L Dichte der Luft in 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 m^3/s .

η_E Einbauwirkungsgrad.

η_{Schub} Schubwirkungsgrad (= $Standschub / (\rho_L \cdot v_{Str} \cdot Q_{SV})$).

A_{Tunnel} Querschnitt des Tunnelfahrraums in 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.

Laufraddurchmesser [mm]	v_{Str} [m/s]	Q_{SV} [m^3/s]	Δp_{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. IV.1 Typische Kenndaten von ausgewählten Strahlventilatoren:

Δp_{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. Ventilatornischen können mit vertikalen Wänden begrenzt werden, falls Strahlableiter eingesetzt werden. Die Strömungs- und Wirkungsgradverluste sind zu berücksichtigen.

Über den Fahrstreifen montierte Ventilatoren müssen einen Sicherheitsabstand vom Lichtraumprofil² von 30 cm aufweisen. Der Deckenabstand des Gehäuses von Strahlventilatoren soll mindestens 30 cm betragen. Seitlich neben dem verkehrstechnischen Nutzraum angeordnete Strahlventilatoren sind bei neuen Anlagen zu vermeiden. Falls bei einer Nachrüstung einer bestehenden Anlage eine seitliche Anordnung erforderlich wird, muss der Abstand vom verkehrstechnischen Nutzraum mindestens 60 cm betragen.

Die Auslegung der Strahlventilatoren erfolgt nach Kap. 7.1 und Kap. 7.2.

² In der Regel 4.80 m über der Fahrbahn.

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 Δp und Q sowie instationäres Anfahrverhalten berücksichtigen
	Temperaturbeständigkeit	evtl. Brandfall massgebend, siehe Kap. 8.3
	Zugänglichkeit für Wartung und Ersatz	[18], 8.10.2
	Lärmemissionen / Schalldämpfer	Anforderungen LSV [1] resp. UVP beachten
	Temperaturüberwachung Motor	
	Schwingungsüberwachung (Strömungsablösung)	Strömungsablösungen möglichst weitgehend vermeiden
	Luftdichtheit der Anschlüsse	Brandfall beachten
	Energie- und Steuerkabel wo erforderlich hitzegeschützt	
Strahlventilatoren	Sichere Anordnung, Abstände einhalten, Absturzsicherung	Bei Anordnung in seitlichen Nischen Schutzmassnahmen treffen
	Lärmemissionen / Schalldämpfer	Anforderungen LSV [1] resp. UVP beachten
	Schwingungsdämpfung	
	Korrosionsschutz	
Zu- und Abluftkanäle	Begehbarkeit	Kap. 7.2.4.3
	Luftdichtheit	Leckage in Auslegung berücksichtigen, Dichtheit periodisch prüfen (ev. automatisiert durch normierte Strömungsmessung im Kanal)
	Wasserdichtheit unterliegender Kanäle	Periodisch prüfen
	Aerodynamische Ausgestaltung, vor allem der Umlenkungen	
	Zwischendecke: Statik und Temperaturfestigkeit	Einbau von Abluftklappen beachten
Zuluftöffnungen gegen Fahrraum	Einstellbarkeit (nicht ferngesteuert)	
	Zugänglichkeit	
Abluftklappen	Stromlos in aktueller Stellung bleibend	
	Luftdichtheit	Leckage in Auslegung berücksichtigen. Dichtheit periodisch prüfen
	Antrieb und Elektrokabel hitzegeschützt	Durch Anordnung z.B. im Zuluftkanal oder thermisch isoliert. (siehe Kapitel 8 Ausstattung)
	Automatisierte Funktionsprüfung	
Abschlussklappen	Alle Zu- und Abluftventilatoren mit Abschlussklappen	Zustand überwachen
	Automatisierte Funktionsprüfung	
Aussenluftansaugung	Effektive Luftgeschwindigkeit nicht zu gross	max. ca. 2 m/s
	Schneeeausfallraum	
	Schutzgitter bei der Luftfassung	
	Schalldämmung	LSV [1] resp. UVP beachten

Komponente	Anforderungen	Hinweise
Abluftkamin (Immissionsschutz- kamin, Rauchauslass)	Ausbreitungssituation beim Standort prüfen; Mindestabstand zu Portalen 50 m	LRV [2] und LSV [1] resp. UVP beachten
	Austrittsgeschwindigkeit 7 – 18 m/s	Teillastbetrieb beachten
	Immissionsschutzkamin (Betrieb > 200 h/Jahr): Bauhöhe mindestens 10 m über Terrain oder 3 m über Baumwipfel Rauchauslass (Betrieb < 200 h/Jahr): 3 m über Terrain genügend bei ausreichendem Abstand zu Gebäuden (ca. 50 m)	LRV [2] 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 mittels Investitionsrechnung (z.B. 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 1999 gültigen Randbedingungen genannt.

Allgemeine Hinweise zur Projektierung von Kunstbauten finden sich in der ASTRA-Richtlinie, *Projektierung und Ausführung von Kunstbauten der Nationalstrassen* [3].

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. VI.1 Annuitätsfaktoren bei $p = 3\%$ (Beispiel, andere Werte nach Gl. VI.2).

VI.3 Mittlere Kosten

Unter der Annahme konstanter jährlicher Teuerungsraten gilt:

$$JK = JK_1 \cdot m_K \tag{Gl. VI.3}$$

- 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:

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

Bei $t = p$ gilt:

$$m = \frac{n}{1+t} \cdot \frac{t}{1 - \frac{1}{(1+t)^n}} \tag{Gl. VI.5}$$

- 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. VI.2 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 VI.3 Beispiele zur Nutzungsdauer und zu den Unterhaltskosten verschiedener Komponenten.

	Komponente	Nutzungsdauer ND [Jahre]	Unterhaltskosten UK [% 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
Umlenklebe		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. VI.3 Beispiele für die Nutzungsdauer und die jährlichen Unterhaltskosten.

VI.5 Kapitalzins und Teuerung

Für Wirtschaftlichkeitsberechnungen kann für das langjährige Mittel ein Realzinssatz von $p = 3 \%$ und eine Teuerung von $t = 2 \%$ angenommen werden.

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 VI.4 zu verwenden.

Energieträger	Grundpreis	Zuschlag	Heutiger Gesamtpreis
Elektrizität			
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. VI.4 Energiepreise mit kalkulatorischen Energiepreiszuschlägen (Stand 2007).

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 .

Die Investitionsrechnung ist für die Gesamtkosten (Lüftung, Bauliche Anlagen, Betriebs- und Sicherheitsausrüstungen) zu optimieren.

VII Leckage

VII.1 Richtwerte

Der Einbezug von Leckagen zwischen der Absaugstelle und den Abluftventilatoren bezweckt die Vermeidung einer Unterdimensionierung der Abluftventilatoren. Aufgrund des heutigen Kenntnisstandes kann bei der Auslegung der Lüftungsanlage als Richtwerte für die Leckage von den folgenden Werten ausgegangen werden. Δp bezeichnet dabei die lokale Druckdifferenz zwischen Fahrraum und Kanal.

Leckagemenge am Bauwerk pro Laufmeter Kanal:

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

Leckagemenge durch geschlossene Klappen pro Fläche innerhalb Klappenrahmen:

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

Die Richtwerte berücksichtigen eine gewisse Alterung der Anlage. Werksneue Abluftklappen haben deutlich tiefere Leckagewerte aufzuweisen.

VII.2 Nomogramm zur Abschätzung der Leckagemenge

Die Angaben im Nomogramm sind gültig für:

- homogene Kanaleigenschaften über die gesamte Länge;
- Klappenabstand 100 m;
- Klappenfläche 4.4 m²;
- Kanalenddruck $p_0 = -400$ Pa.

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

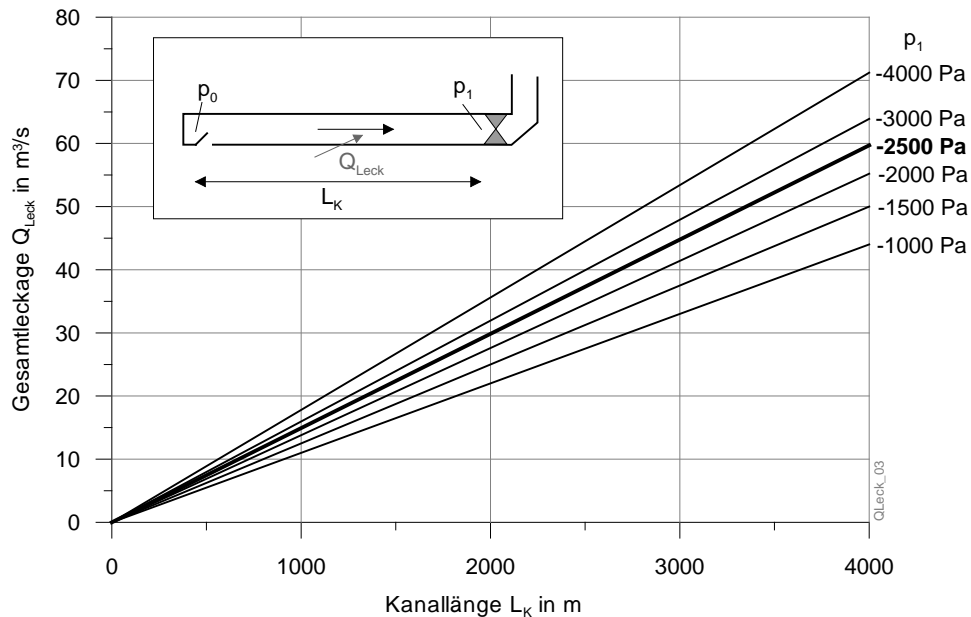


Abb. VII.1 Nomogramm zur Abschätzung der Leckagemenge in den Abluftkanal.

Glossar

Begriff	Bedeutung
Abluft <i>air extrait, air vicié</i>	Schadstoffbelastete Luft aus dem Tunnelraum.
Abluftklappe <i>clapet de ventilation</i>	Steuerbare Klappe, über die schadstoffbelastete Luft und Brandrauch aus dem Fahrraum abgesaugt wird.
Abrieb <i>abrasion</i>	Abrieb von Reifen, Strassenbelag, Bremsen und Kupplungen..
Aufwirbelung <i>resuspension</i>	Anteil der Partikelbelastung der Luft, der durch Wiederaufwirbelung abgelagerter Teilchen entsteht.
Aussenluft <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.
Branddauer <i>incendie (durée d')</i>	Zeitspanne zwischen Brandausbruch und Brandende.
Brandentwicklungszeit <i>incendie (durée de développement de l')</i>	Zeitspanne zwischen Brandausbruch und Vollbrand.
Brandleistung nominal <i>incendie (puissance nominale d')</i>	Bezeichnung des Dimensionierungsbrandes.
Detektionszeit <i>détection (temps de)</i>	Dauer zwischen Ereignis und Alarmierung.
Durchschnittlicher, täglicher Verkehr (DTV) <i>trafic journalier moyen (TJM)</i>	Anzahl der motorisierten Fahrzeuge an einem Strassenquerschnitt in einem Jahr dividiert durch 365 Tage.
Ereignisfall <i>incident</i>	Störung im Verkehrsfluss mit akuter Gefährdung der Verkehrsteilnehmer.
EUREKA-Versuche <i>essais EUREKA</i>	Versuchsreihe zur Bestimmung des Brandverhaltens von Fahrzeugen [19]
Fahrraum <i>espace de circulation</i>	Tunnelraum begrenzt durch Strasse, Decke und Wände.
Fluchtgeschwindigkeit <i>vitesse de fuite</i>	Fortbewegungsgeschwindigkeit einer zu Fuss flüchtenden Personen, typischer Wert: 5 km/h \approx 1.5 m/s.
Fluchtwegdistanz <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 Querverbindungen.
Frischlufte <i>air frais</i>	Aussenluft, die zur Einhaltung der geforderten CO-Konzentration und Sichttrübung in einem bestimmten Tunnelabschnitt erforderlich ist. Die Frischluft kann als Zuluft, Aussenluft (durch das Portal) oder als Anteil von vorbelasteter Luft in den Abschnitt eingebracht werden.
Frischlufbedarf <i>air frais (besoin d')</i>	Erforderlicher Frischluftvolumenstrom zur Einhaltung der Dimensionierungswerte für die Luftqualität im Tunnel.
Halbquer-/Querlüftung <i>ventilation semi-transversale/-transversale</i>	Das System der Halbquer-/Querlüftung ist nicht mehr zulässig (Kap. 3.4.3).
Halbquerlüftung <i>ventilation semi-transversale</i>	Lüftungsbetrieb mit längenverteilter Zuluft einblasung auf Strassenniveau. Die Luft strömt durch den Fahrraum ab (Kap. 3.4.3).
Längslüftung <i>ventilation longitudinale</i>	Lüftungsbetrieb zur Frischluftversorgung der Tunnelröhre durch den Fahrraum, in der Regel von Portal zu Portal.
Lastwagen <i>poids lourd</i>	Bezeichnung des mittleren Fahrzeugs aus der Gruppe der schweren Nutzfahrzeuge zur Berechnung der Emissionen.
Luftgeschwindigkeit <i>vitesse de l'air</i>	Geschwindigkeit der Längsströmung im Tunnelquerschnitt.
Massgebender, stündlicher Verkehr (MSV) <i>trafic horaire déterminant (THD)</i>	Stündlicher Verkehr pro Querschnitt, der während 30 Stunden im Jahr überschritten wird.
Natürliche Lüftung <i>ventilation naturelle</i>	Frischlufversorgung der Tunnelröhre durch die Wirkung des Verkehrs und durch Portaldruckdifferenzen.

Begriff	Bedeutung
Personenwagen <i>voiture de tourisme</i>	Bezeichnung des mittleren Fahrzeugs aus den Gruppen der Personenwagen und Lieferwagen zur Berechnung der Emissionen.
Querlüftung <i>ventilation transversale</i>	Lüftungsbetrieb, bei dem gleichzeitig und längenverteilt Zuluft und Abluft gefahren wird (Kap. 3.4.3).
Querverbindung <i>liaison transversale</i>	Verbindung zwischen zwei Tunnelröhren oder zwischen einer Tunnelröhre und einem Sicherheitsstollen.
Rezirkulation <i>recirculation</i>	Rückführung von befrachteter Luft in die zweite Tunnelröhre.
Selbstrettungsphase <i>autosauvetage (phase d')</i>	Zeitspanne vom Ereignis bis zum Eintreffen der Rettungsmannschaft.
Sichttrübe <i>matière opacifiante</i>	Summe aller Stoffe, welche die Sichttrübung bewirkt.
Sichttrübung <i>opacité</i>	Trübung der Sicht durch feine Partikel oder Rauch.
Tunnelabschnitt <i>tronçon de tunnel</i>	Abschnitt des Tunnels mit gleichen geometrischen Dimensionen.
Tunnelquerschnitt <i>section du tunnel</i>	Aerodynamischer Gesamtquerschnitt des Fahrraums.
Zuluft <i>apport d'air frais, air entrant</i>	Aussenluft, die kontrolliert in den Tunnelfahrraum eingeblasen wird.

Literaturverzeichnis

Verordnungen

- [1] Schweizerische Eidgenossenschaft (1986), „**Lärmschutz-Verordnung (LSV)**“, SR 814.41, www.admin.ch.
- [2] Schweizerische Eidgenossenschaft (1985), „**Luftreinhalte-Verordnung (LRV)**“, SR 814.318.142.1, www.admin.ch.

Weisungen und Richtlinien des ASTRA

- [3] Bundesamt für Strassen ASTRA (2005), „**Richtlinie Projektierung und Ausführung von Kunstbauten der Nationalstrassen**“, Richtlinie ASTRA 12001, www.astra.admin.ch.
- [4] Bundesamt für Strassen ASTRA (2008), „**Lüftung der Sicherheitsstollen von Strassentunneln**“, Richtlinie ASTRA 13002, V1.06, www.astra.admin.ch.
- [5] Bundesamt für Strassen ASTRA (2007), „**Branddetektion in Strassentunneln**“, Richtlinie ASTRA 13004, V2.10, www.astra.admin.ch.
- [6] Bundesamt für Strassen ASTRA (2012), „**Videoanlagen**“, Richtlinie ASTRA 13005, V1.00, www.astra.admin.ch.
- [7] Bundesamt für Strassen ASTRA (2011), „**Signalisation der Sicherheitseinrichtungen in Strassentunneln**“, Richtlinie ASTRA 13010, V2.05, www.astra.admin.ch.

Normen

- [8] Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein SIA (2004), „**Projektierung Tunnel – Grundlagen**“, Norm SIA 197.
- [9] Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein SIA (2004), „**Projektierung Tunnel – Strassentunnel**“, Norm SIA 197/2.
- [10] Schweizerischer Verband der Strassen- und Verkehrsfachleute VSS (1998), „**Massgebender Verkehr**“, SN 640016a.

Dokumentation / Berichte

- [11] Association mondiale de la route AIPCR (1996), « **Tunnels routiers: Émissions, ventilation, environnement** », ISBN 2-84060-034-X, réf. AIPCR 05.02.B, www.piarc.org.
- [12] Association mondiale de la route AIPCR (1999), « **Tunnels routiers: Émissions, ventilation, environnement** », Bericht der Arbeitsgruppe 2, Kuala Lumpur.
- [13] Association mondiale de la route AIPCR (2004), « **Tunnels routiers: Émissions des véhicules et besoin en air pour la ventilation** », ISBN 2-84060-177-X, réf. AIPCR 05.14.B.
- [14] Association mondiale de la route AIPCR (2007), « **Systèmes et équipements pour la maîtrise des incendies et des fumées dans les tunnels routiers** », ISBN 2-84060-189-3, réf. AIPCR 05.16.B.
Association mondiale de la route AIPCR (1999), « **Maîtrise des incendies et des fumées dans les tunnels routiers** », ISBN 2-84060-064-1, réf. AIPCR 05.05.B.
- [15] Association mondiale de la route AIPCR (2008), « **Tunnels routiers : guide pour l'optimisation de l'impact sur la qualité de l'air dans l'environnement** », ISBN 2-84060-204-0, réf. AIPCR 2008R04.
- [16] Bundesamt für Strassenbau ASB (Mai 1983), „**Grundlagen der Belüftung von Strassentunneln**“, SHB-Bericht.
- [17] Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft (2004), „**Handbuch Emissionsfaktoren HBEFA**“, Version 2.1.
- [18] Federal Highway Administration (November 1995), „**Memorial Tunnel Fire Ventilation Test Program**“.
- [19] Studiengesellschaft Stahlanwendung (Juli 1998), „**Brände in Verkehrstunneln**“, Projekt 145.2 (EUREKA-Versuche), Düsseldorf.

Auflistung der Änderungen

Ausgabe	Version	Datum	Änderungen
2008	2.03	28.05.2014	<ul style="list-style-type: none"> • Publikation der französischen Version. • Formelle Anpassungen im Literaturverzeichnis.
2008	2.02	15.10.2012	<ul style="list-style-type: none"> • §7.2.4.1: "...Mindestanforderungen müssen bei zweiröhren Tunneln für jede Röhre einzeln und gleichzeitig erfüllt werden können." • Formelle Anpassungen im Kap. IV.3 und Literaturverzeichnis.
2008	2.01	17.06.2009	Formelle Anpassungen im Kap.1.2. Werte in der Abbildung 6.4.
2008	2.00	01.06.2008	Inkrafttreten Ausgabe 2008. Einbindung des Inhalts von Anhang VII in den Richtlinien text. Ergänzende textliche Präzisierungen. Abstimmungen mit SIA 197/2 (Fluchtwege). Anforderungen bei Ausfällen und Betriebsunterbrüchen (Kap. 7.3).
2004	1.2	31.07.2006	Inkrafttreten Ausgabe 2004. Anhang VII: Präzisierungen. Absaugmenge, Leckagemengen, Unterdruck im Kanal, natürlicher Auftrieb.
2004	1.1	21.12.2004	Entwurf.

