HBI Haerter Beratende Ingenieure

HBI Haerter Beratende Ingenieure

Auswahl und Grundlagen der Auslegung der Lüftungssysteme für Tunnel

Dr. Matthias Wehner
HBI Haerter GmbH, Heidenheim, www.hbi.eu

21. Fachtagung „Tunnelsicherheit“, 30.9. - 1.10.2025 in Bamberg

Inhalt: Auswahl und Grundlagen der Auslegung der Lüftungssysteme für Tunnel

- Richtlinien, Empfehlungen und angewandte Praxis
- Grundlegende Lüftungssysteme in Straßentunneln
- Beispiel 3,2 km langer Richtungsverkehrstunnel
- Grundlagen der Auslegung der Tunnellüftung
- Konzeption der Tunnellüftung für Richtungs- und Gegenverkehr
- Risikoanalyse und Sicherheitsbewertung
- Zusammenfassung

Inhalt: Auswahl und Grundlagen der Auslegung der Lüftungssysteme für Tunnel

- **Richtlinien, Empfehlungen und angewandte Praxis**
- Grundlegende Lüftungssysteme in Straßentunneln
- Beispiel 3,2 km langer Richtungsverkehrstunnel
- Grundlagen der Auslegung der Tunnellüftung
- Konzeption der Tunnellüftung für Richtungs- und Gegenverkehr
- Risikoanalyse und Sicherheitsbewertung
- Zusammenfassung

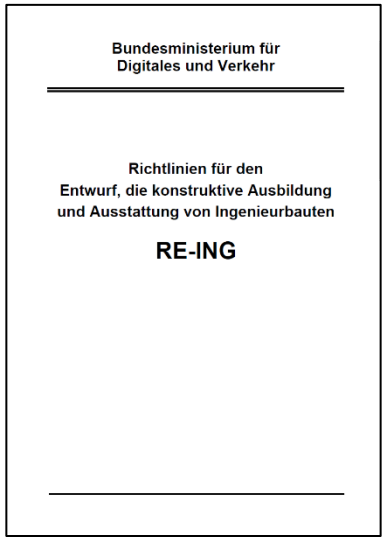
Grundlagen, Richtlinien, Empfehlungen und angewandte Praxis

Konzeption und Auslegung der Tunnellüftung

EU-RICHTLINIE 2004

EABT-80/100, 2019

RE-ING, 12/2024



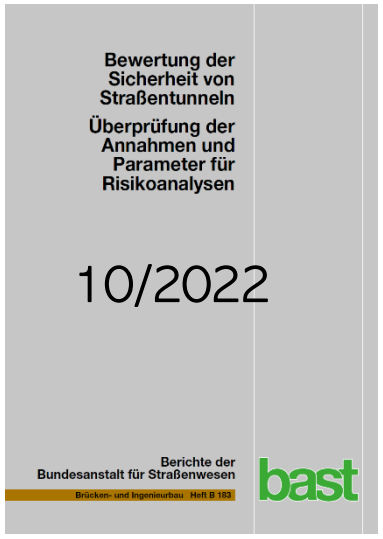
Risikoanalysen und Sicherheits-bewertungen

Gefahrgut, ADR

Leitfaden, 2009

Heft B 66

Heft B 183



Grundlagen, Richtlinien, Empfehlungen und angewandte Praxis

Konzeption und Auslegung der Tunnellüftung

EU-RICHTLINIE 2004

Richtlinie 2004/54/EG

des Europäischen Parlaments und des Rates

vom 29. April 2004

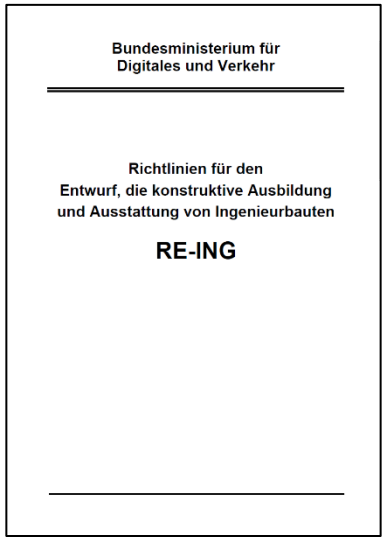
Directive 2004/54/EC

of the European Parliament and of the Council

of 29 April 2004

EABT-80/100, 2019

RE-ING, 12/2024



Risikoanalysen und Sicherheits-bewertungen

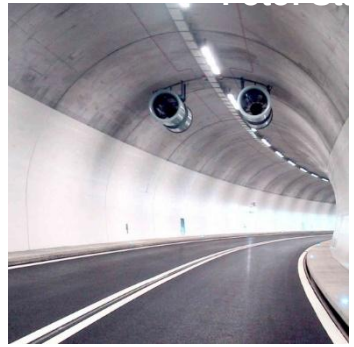
Angewandte Praxis für einen Richtungsverkehrstunnel bei Erneuerung der technischen Ausrüstung:

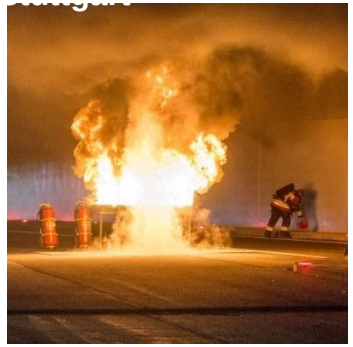
- Längerer **Gegenverkehrsbetrieb in einer Röhre** wird als Regelbetrieb betrachtet.

Inhalt: Auswahl und Grundlagen der Auslegung der Lüftungssysteme für Tunnel

- Richtlinien, Empfehlungen und angewandte Praxis
- **Grundlegende Lüftungssysteme in Straßentunneln**
- Beispiel 3,2 km langer Richtungsverkehrstunnel
- Grundlagen der Auslegung der Tunnellüftung
- Konzeption der Tunnellüftung für Richtungs- und Gegenverkehr
- Risikoanalyse und Sicherheitsbewertung
- Zusammenfassung

Grundlegende Lüftungssysteme in Straßentunneln



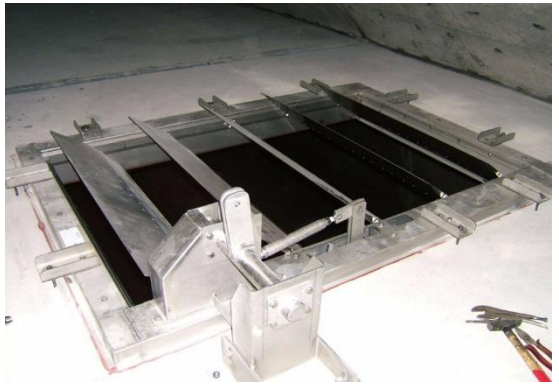


Natürliche Belüftung

Längslüftung mit Strahlventilatoren

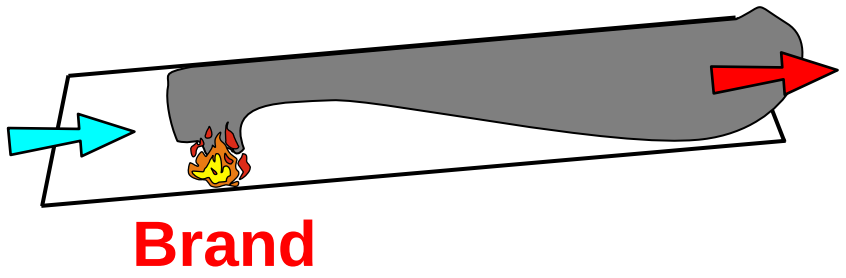
Punktabsaugung

Zwischendecke mit Rauchabsaugung



Lüftungssystem im Brandfall: Natürliche Belüftung

Natürliche Längslüftung



Natürliche Wirkungen

- Vor dem Brand: Kolbenwirkung der Fahrzeuge
- Wind auf ein Portal
- Temperaturunterschiede (thermischer Auf- oder Abtrieb)

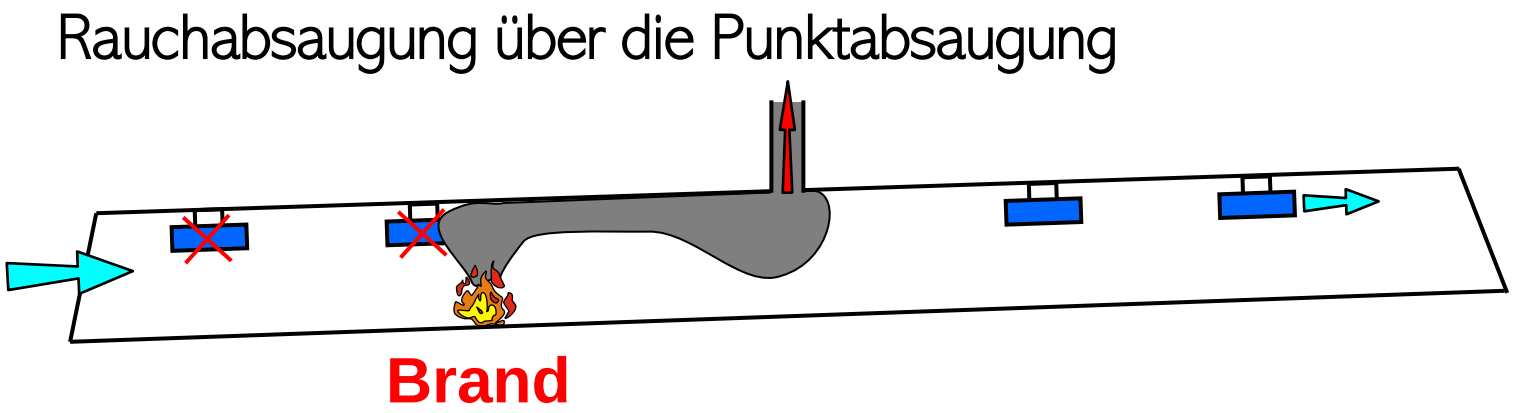
Lüftungssystem im Brandfall: Längslüftung mit Strahlventilatoren

Längslüftung mit Strahlventilatoren

Wirkungen

- Strahlventilatoren oder Saccardo-Düsen
- Impuls auf die Luftsäule im Tunnel
- Gerichtete Strömung, Eventuell Überdruck bei Querschlägen

Lüftungssystem im Brandfall: Punktabsaugung

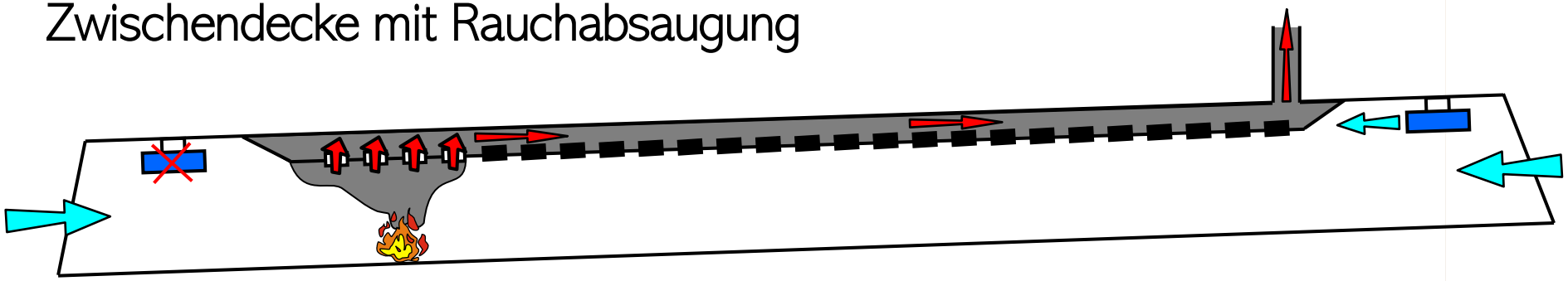


Wirkungen

- Rauchabsaugung in der Mitte
- Ggf. zusätzlich Beeinflussung der Längslüftung zur Stabilisierung der Luftsäule

Lüftungssystem im Brandfall: Zwischendecke mit Rauchabsaugung

Zwischendecke mit Rauchabsaugung



Wirkungen

- Brandnahe Rauchabsaugung über steuerbare Rauchabsaugklappen in der Zwischendecke
- Beeinflussung der Längslüftung zur Stabilisierung der Luftsäule

Grundlegende Lüftungssysteme in Straßentunneln

Lüftungsart im Brandfall bei Richtungsverkehr nach RE-ING 12, 2024

Tunnellänge l	Lüftungsart im Brandfall
l ≤ 600 m	Natürliche Längslüftung
600 m < l ≤ 3 000 m	Mechanische Längslüftung
> 3 000 m*)	Längslüftung mit Punktabsaugung im Abstand von ≤ 2000 m oder Absaugung über steuerbare Klappen und Abluftkanal

*) Wenn mehr als eine Punktabsaugung im Tunnel erforderlich wird, sind diese als Luftaustauschzentralen auszuführen.

Lüftungsart im Brandfall bei Gegenverkehr nach RE-ING 12, 2024

Tunnellänge l	Lüftungsart im Brandfall
l ≤ 400 m	Natürliche Längslüftung
400 m < l ≤ 600 m*)	Mechanische Längslüftung
600 m < l ≤ 1 200 m	Längslüftung oder Absaugung nach Risikoanalyse
> 1 200 m	Rauchabsaugung über steuerbare Klappen und Abluftkanal

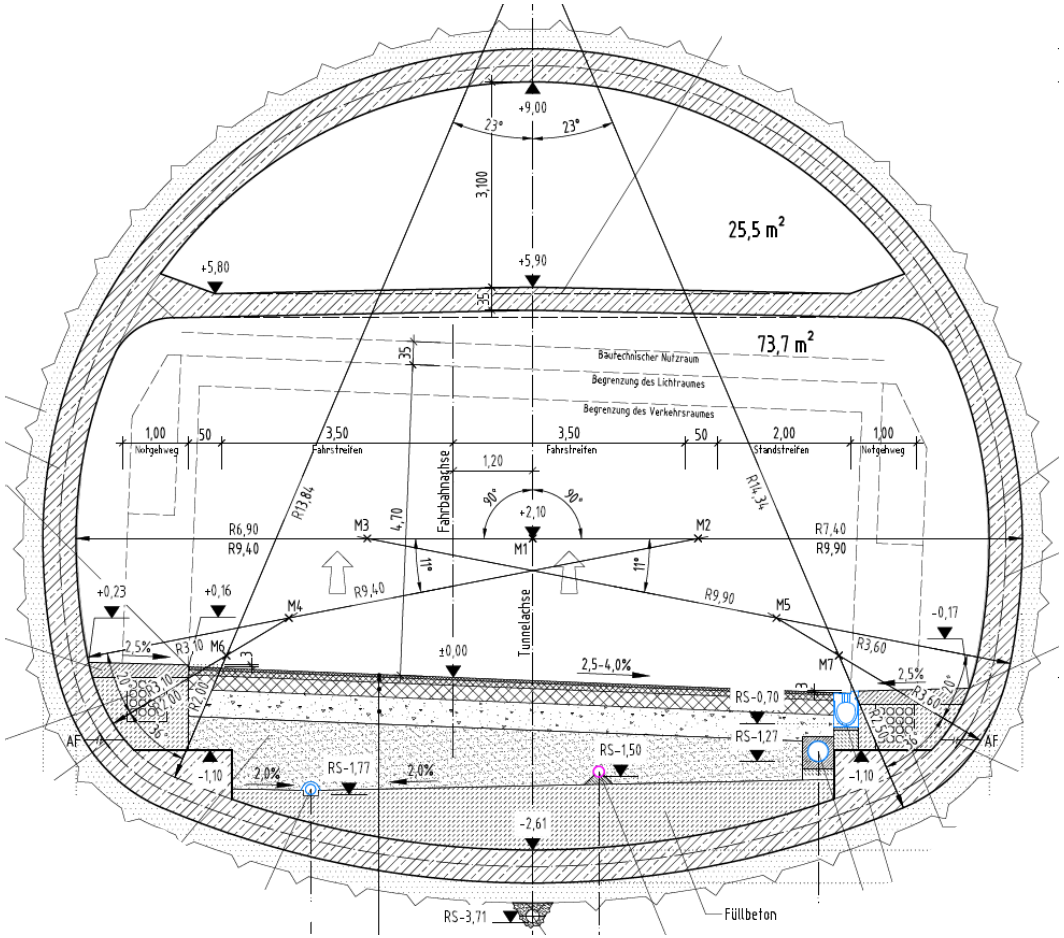
*) bis l ≤ 1.200 m bei Gewölbequerschnitt, bei Längsneigung ≤ 3 % und bei einer Bemessungsbrandleistung ≤ 30 MW

Inhalt: Auswahl und Grundlagen der Auslegung der Lüftungssysteme für Tunnel

- Richtlinien, Empfehlungen und angewandte Praxis
- Grundlegende Lüftungssysteme in Straßentunneln
- **Beispiel 3,2 km langer Richtungsverkehrstunnel**
- Grundlagen der Auslegung der Tunnellüftung
- Konzeption der Tunnellüftung für Richtungs- und Gegenverkehr
- Risikoanalyse und Sicherheitsbewertung
- Zusammenfassung

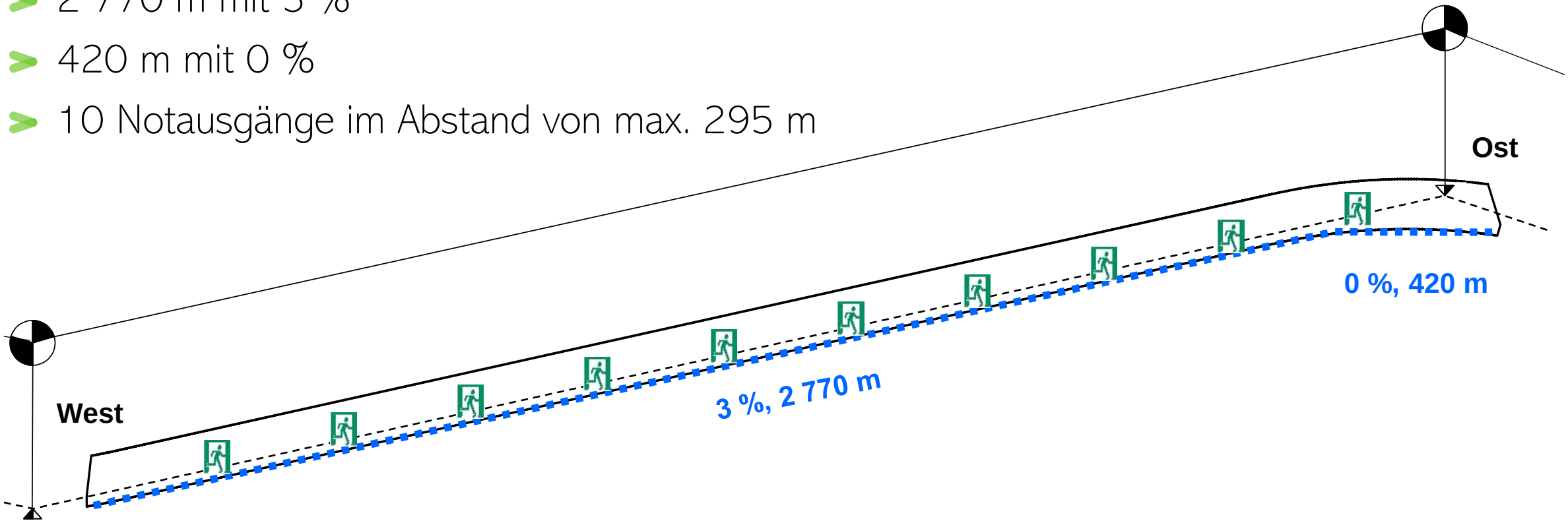
Beispiel Richtungsverkehrstunnel mit 3,2 km Länge
Wesentliche Tunneldaten

- Länge 3190 m
- Zwei Tunnelröhren im Richtungsverkehr
- Ausrichtung West - Ost
- Ca. 200 m Verflechtungsbereich im Westen
- Gewölbequerschnitt 31T
  mit zwei Fahrspuren und einem Seitenstreifen
- Verkehrsdaten für Prognosejahr 2040
  - DTV Gesamt 39 000 Kfz/24 h
  - Schwerverkehrsanteil 11,5 %
  - Zulässige signalisierte Fahrzeuggeschwindigkeit im Regelbetrieb 100 km/h



Beispiel Richtungsverkehrstunnel mit 3,2 km Länge Längsneigungsverlauf und Notausgangsabstand

- 2 770 m mit 3 %
- 420 m mit 0 %
- 10 Notausgänge im Abstand von max. 295 m



Beispiel Richtungsverkehrstunnel mit 3,2 km Länge
Betriebliche Randbedingungen

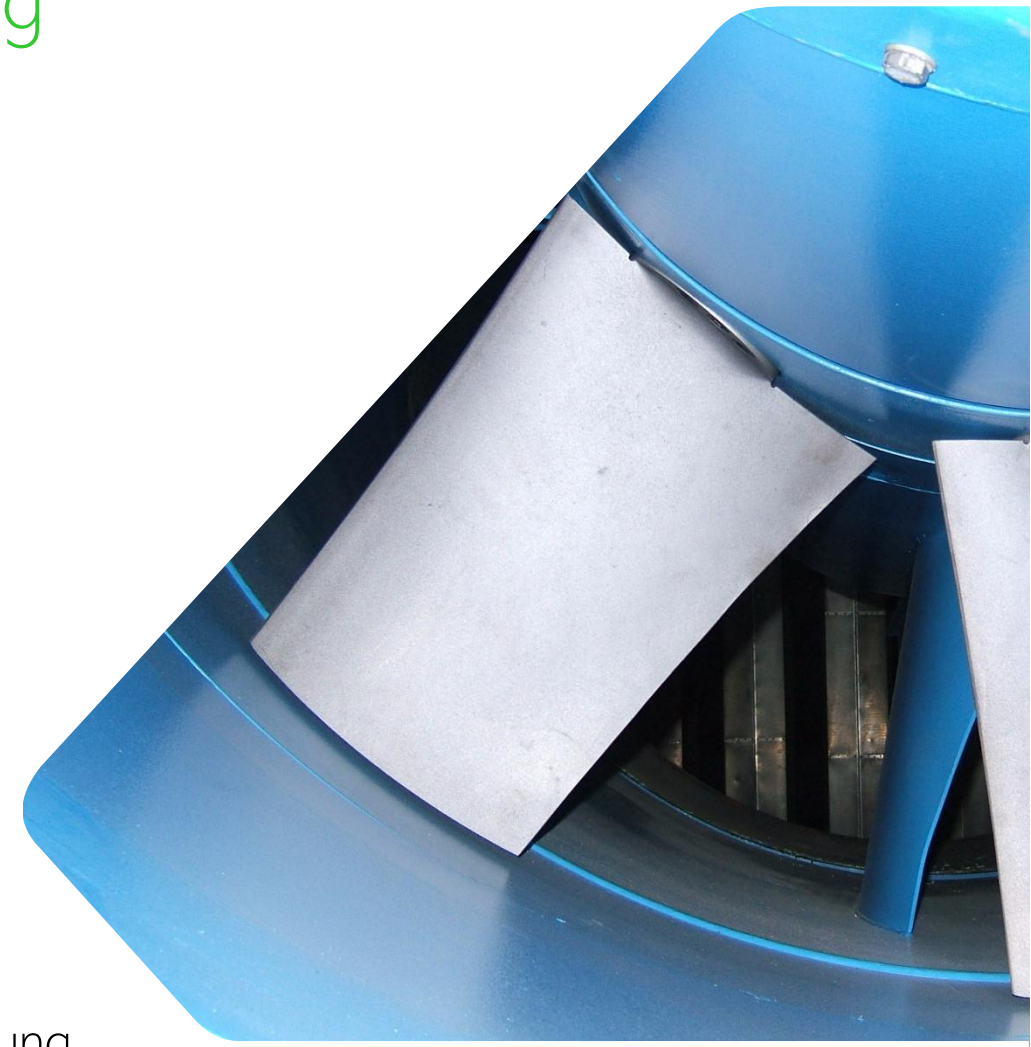
- Im Regelbetrieb Richtungsverkehr in beiden Röhren
- Im Ausnahmefall **kurzfristiger** Gegenverkehr in einer Röhre
  z.B. während Wartungsarbeiten
- Im Ausnahmefall **längerfristiger** Gegenverkehr in einer Röhre
  z.B. bei einer späteren Erneuerung der technischen Ausrüstung
- Richtlinie 2004/54/EG, 29. April 2004, Kap. 2.9.3.
  „In Tunneln mit Gegenverkehr und/oder stockendem Richtungsverkehr dürfen Längslüftungssysteme nur verwendet werden, wenn eine Risikoanalyse gemäß Artikel 13 zeigt, dass dies annehmbar ist und/oder spezielle Maßnahmen, beispielsweise angemessene Verkehrssteuerung, kürzere Abstände zwischen den Notausgängen, Rauchabsaugung in regelmäßigen Abständen, getroffen werden.“

Inhalt: Auswahl und Grundlagen der Auslegung der Lüftungssysteme für Tunnel

- Richtlinien, Empfehlungen und angewandte Praxis
- Grundlegende Lüftungssysteme in Straßentunneln
- Beispiel 3,2 km langer Richtungsverkehrstunnel
- **Grundlagen der Auslegung der Tunnellüftung**
- Konzeption der Tunnellüftung für Richtungs- und Gegenverkehr
- Risikoanalyse und Sicherheitsbewertung
- Zusammenfassung

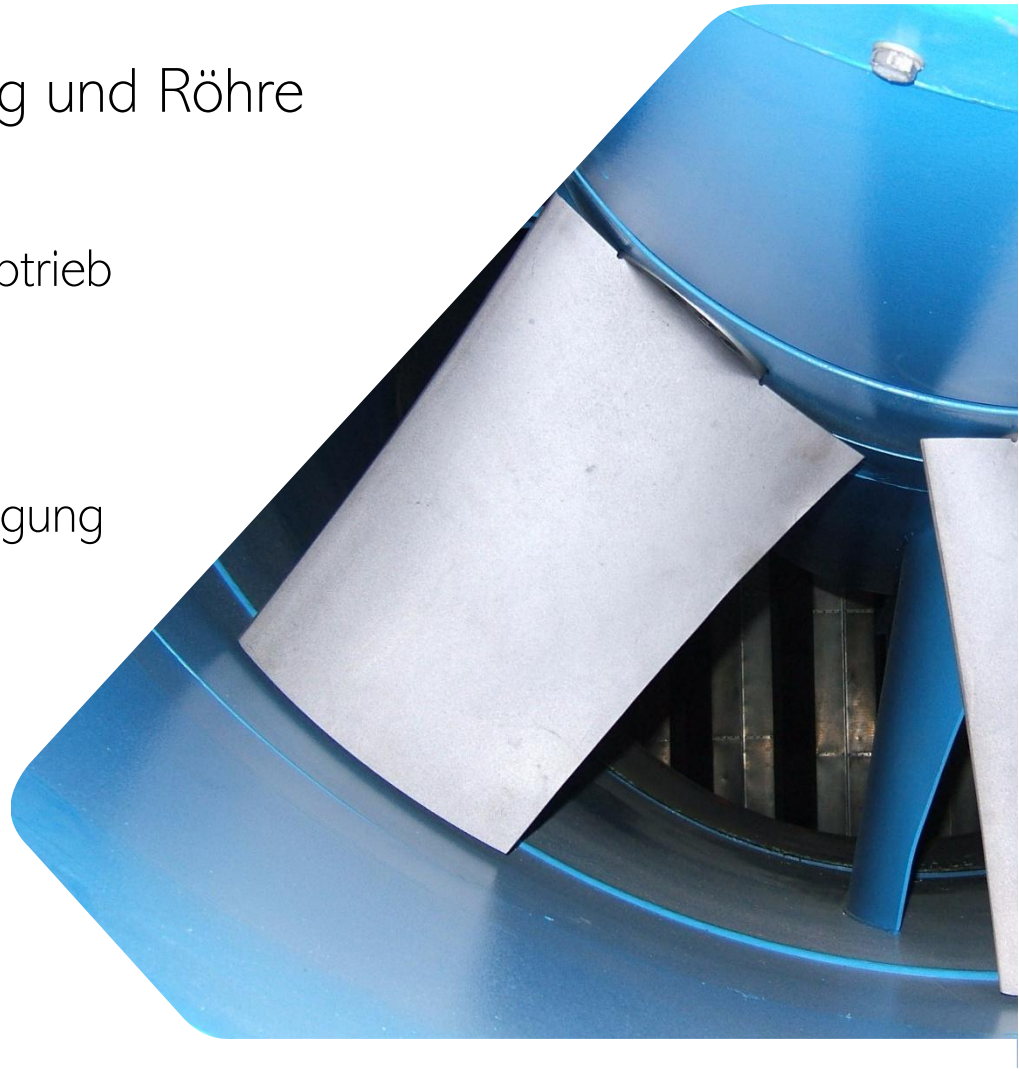
Grundlagen der Auslegung der Tunnellüftung
Wesentliche Parameter

- Länge, Längsneigungsverlauf
- Querschnitte Fahrraum und Abluftkanal
- Verkehrsart und -daten
  - Richtungsverkehr, Gegenverkehr
  - Prognosejahr
  - DTV
  - Schwerverkehrsanteil
  - Signalisierte Fahrzeuggeschwindigkeit
- Meteorologisch bedingte Druckdifferenzen
  - Wind auf Portale (Tunnelausrichtung)
  - Temperaturunterschied zwischen Tunnelfahrraum und Umgebung
  - Barometrische Druckunterschiede



Grundlagen der Auslegung der Tunnellüftung
Vorgaben der RE-ING, 12/2024

- Bemessungsbrandleistung abhängig von Lkw · km / Tag und Röhre
- Strahlventilatoren
  - Kritische Geschwindigkeit am Brandort bei einseitigem Rauchabtrieb
  - Ausfall von Lüftern nahe dem Brandort berücksichtigen
- Rauchabsaugung
  - Begrenzung der Rauchausbreitung auf 300 m bei Rauchabsaugung
  - Abstand der Klappen zwischen 50 und 100 m
  - Leckagen im Abluftkanal berücksichtigen
  - Entfernung zwischen Portal und der ersten Absaugöffnung muss mindestens 200 m betragen
  - Absaugung durch mindestens zwei Ventilatoren
  - 70 % Menge bei Ausfall eines Ventilators



Inhalt: Auswahl und Grundlagen der Auslegung der Lüftungssysteme für Tunnel

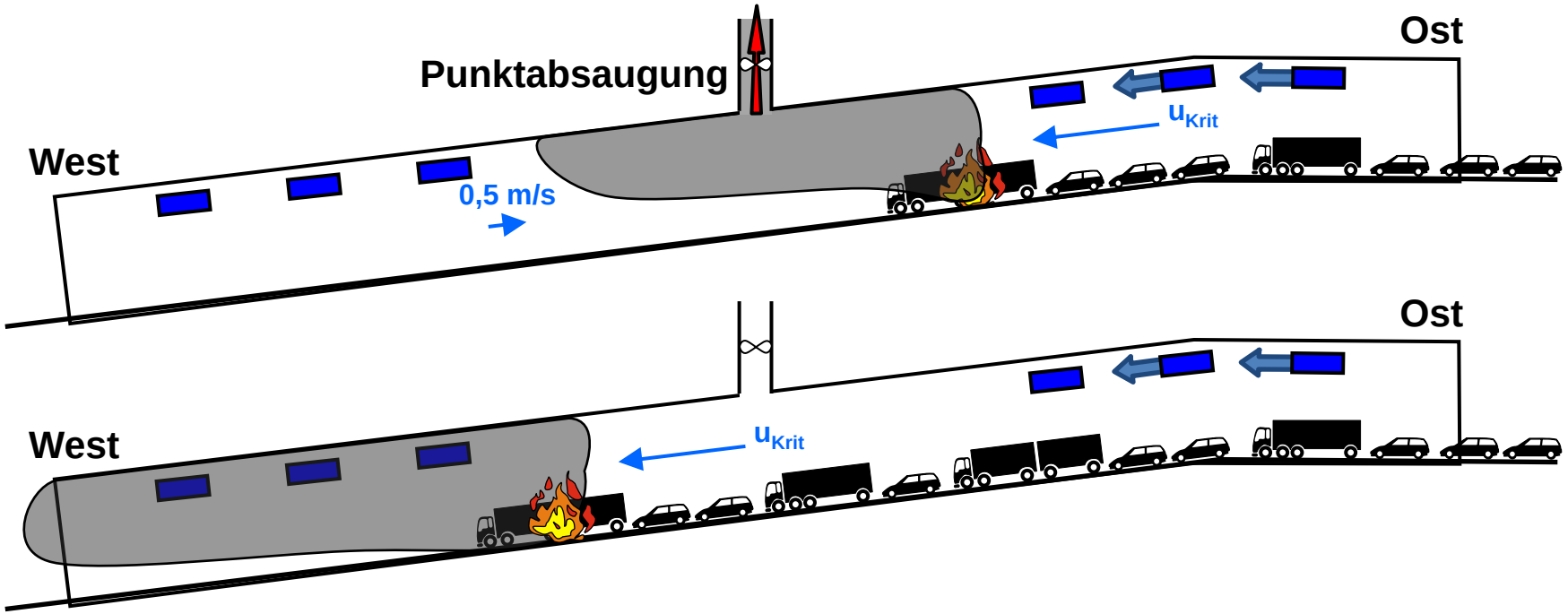
- Richtlinien, Empfehlungen und angewandte Praxis
- Grundlegende Lüftungssysteme in Straßentunneln
- Beispiel 3,2 km langer Richtungsverkehrstunnel
- Grundlagen der Auslegung der Tunnellüftung
- **Konzeption der Tunnellüftung für Richtungs- und Gegenverkehr**
- Risikoanalyse und Sicherheitsbewertung
- Zusammenfassung

Konzeption der Tunnellüftung für einen ca. 3 200 m Tunnel

Lüftungsart im Brandfall bei Richtungsverkehr nach RE-ING 12, 2024

Tunnellänge l	Lüftungsart im Brandfall
l ≤ 600 m	Natürliche Längslüftung
600 m < l ≤ 3 000 m	Mechanische Längslüftung
> 3 000 m*)	Längslüftung mit Punktabsaugung im Abstand von ≤ 2000 m oder Absaugung über steuerbare Klappen und Abluftkanal

*) Wenn mehr als eine Punktabsaugung im Tunnel erforderlich wird, sind diese als Luftaustauschzentralen auszuführen.

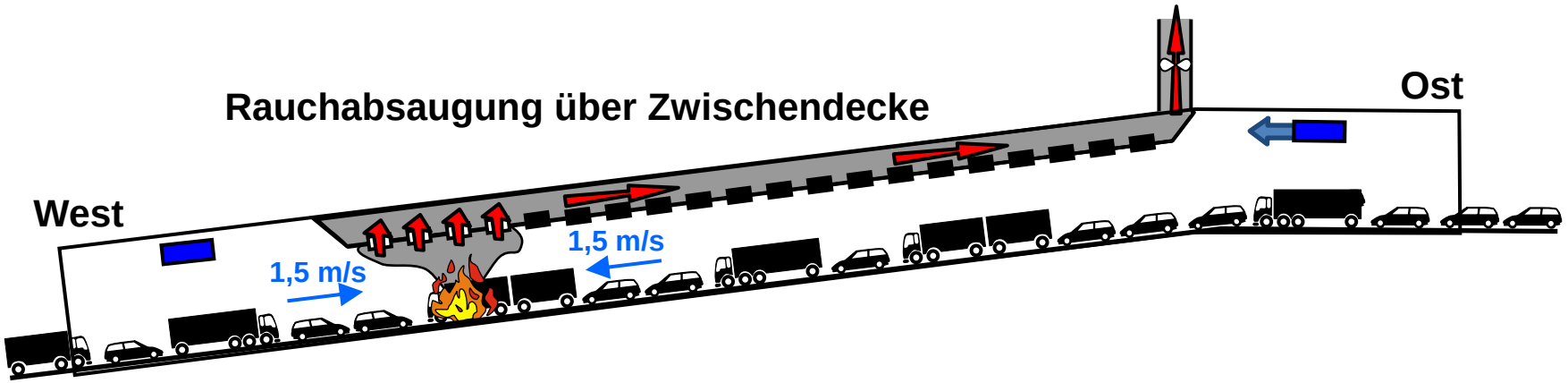


Konzeption der Tunnellüftung für einen ca. 3 200 m Tunnel

Lüftungsart im Brandfall bei Gegenverkehr nach RE-ING 12, 2024

Tunnellänge l	Lüftungsart im Brandfall
l ≤ 400 m	Natürliche Längslüftung
400 m < l ≤ 600 m*)	Mechanische Längslüftung
600 m < l ≤ 1 200 m	Längslüftung oder Absaugung nach Risikoanalyse
> 1 200 m	Rauchabsaugung über steuerbare Klappen und Abluftkanal

*) bis l ≤ 1.200 m bei Gewölbequerschnitt, bei Längsneigung ≤ 3 % und bei einer Bemessungsbrandleistung ≤ 30 MW



Inhalt: Auswahl und Grundlagen der Auslegung der Lüftungssysteme für Tunnel

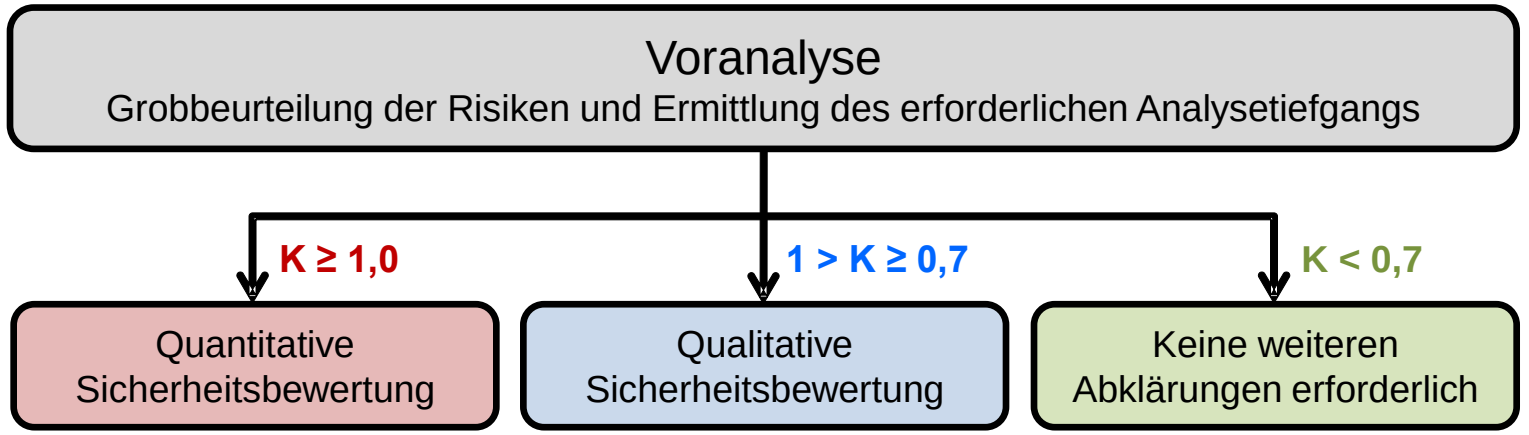
- Richtlinien, Empfehlungen und angewandte Praxis
- Grundlegende Lüftungssysteme in Straßentunneln
- Beispiel 3,2 km langer Richtungsverkehrstunnel
- Grundlagen der Auslegung der Tunnellüftung
- Konzeption der Tunnellüftung für Richtungs- und Gegenverkehr
- **Risikoanalyse und Sicherheitsbewertung**
- Zusammenfassung

Risikovoranalyse nach Leitfaden

Besondere Charakteristika

- Tunnellänge über 3 000 m
- Zusätzlicher Fahrstreifen am Westportal für Ein- bzw. Ausfahrt

Leitfaden für Sicherheitsbewertungen von Straßentunneln gemäß EABT-80/100 (Abschnitt 0.5)
Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung (BMVBS),
Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt), 31. März 2009



$$K_{Kollision} = N_K \cdot L \cdot DTV \cdot h_K \cdot f_{SV} \cdot f_{Stau}$$

$$K_{Brand} = N_B \cdot L \cdot DTV \cdot h_B \cdot g_{SV} \cdot g_{Stau} \cdot g_L \cdot g_i \cdot g_{BL} \cdot g_{NA}$$

Risikovoranalyse nach Leitfaden Richtungsverkehr

$$K_{Kollision} = N_K \cdot L \cdot DTV_R \cdot h_K \cdot f_{SV} \cdot f_{Stau}$$

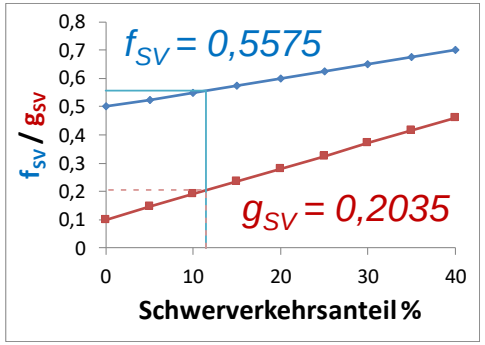
$$K_{Brand} = N_B \cdot L \cdot DTV_R \cdot h_B \cdot g_{SV} \cdot g_{Stau} \cdot g_L \cdot g_i \cdot g_{BL} \cdot g_{NA}$$

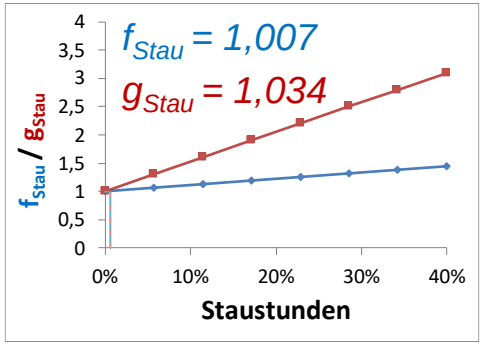
Betriebsart	Richtungsverkehr
N_K	32,1
N_B	4 400

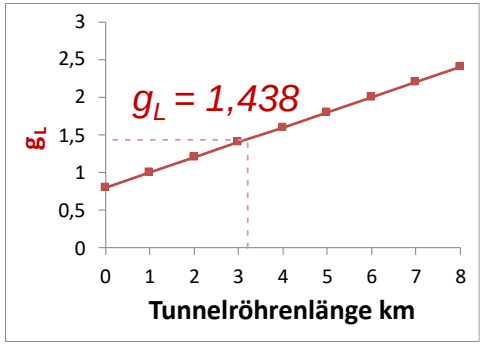
L = 3,2 km, DTV = 39 000 Kfz/Tag
Je Röhre DTV_R = 19 500 Kfz/Tag

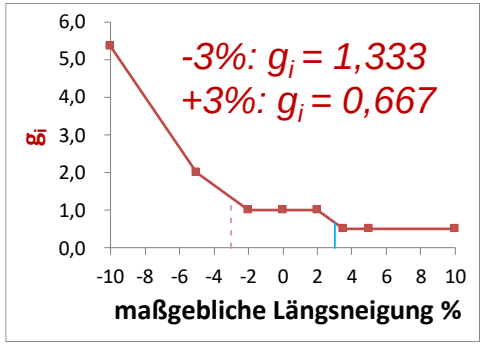
Betriebsart	Richtungsverkehr	
Einfluß von Zu- und Abfahrten	mit	ohne
h_K	$5{,}28 \times 10^{-7}$	$2{,}28 \times 10^{-7}$
h_B	$4{,}58 \times 10^{-9}$	$3{,}68 \times 10^{-9}$

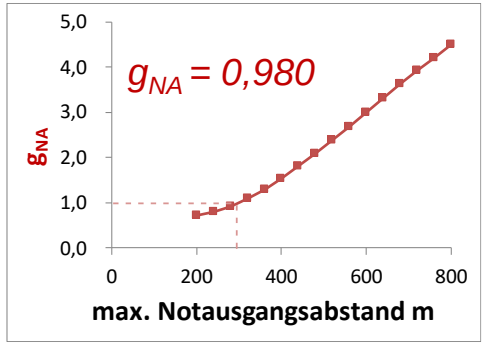
Brandlüftungssystem	g_{BL}
Natürliche Lüftung	4
Mechanische Längslüftung	1
Rauchabsaugung	0,5











$K_{Kollision}$ = 1,19 → Quantitative Sicherheitsbewertung

K_{Brand} = 0,37 → Keine weiteren Abklärungen

Risikovoranalyse nach Leitfaden Gegenverkehr

$$K_{Kollision} = N_K \cdot L \cdot DTV_R \cdot h_K \cdot f_{SV} \cdot f_{Stau}$$

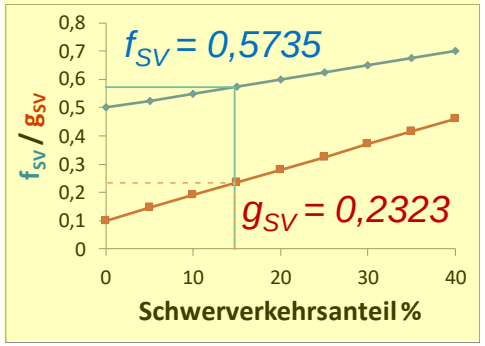
$$K_{Brand} = N_B \cdot L \cdot DTV_R \cdot h_B \cdot g_{SV} \cdot g_{Stau} \cdot g_L \cdot g_i \cdot g_{BL} \cdot g_{NA}$$

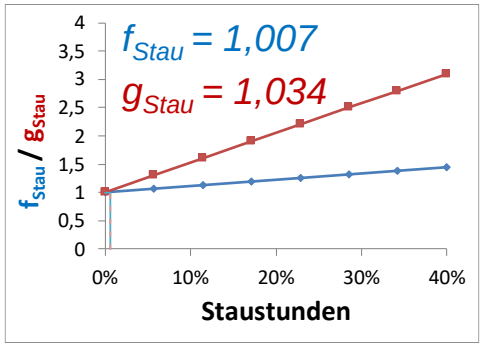
Betriebsart	Gegenverkehr
N_K	64,2
N_B	37 700

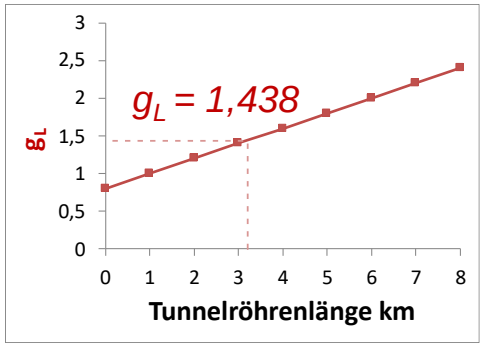
L = 3,2 km, DTV_R = 29 300 Kfz/Tag
Lkw-Anteil = 14,7 %

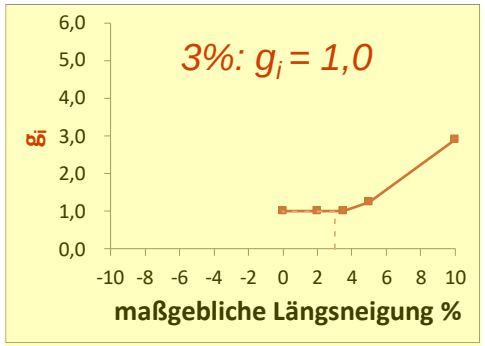
Betriebsart	Gegenverkehr	
Einfluß von Zu- und Abfahrten	mit	ohne
h_K	$9{,}81 \times 10^{-7}$	$6{,}81 \times 10^{-7}$
h_B	$5{,}94 \times 10^{-9}$	$5{,}04 \times 10^{-9}$

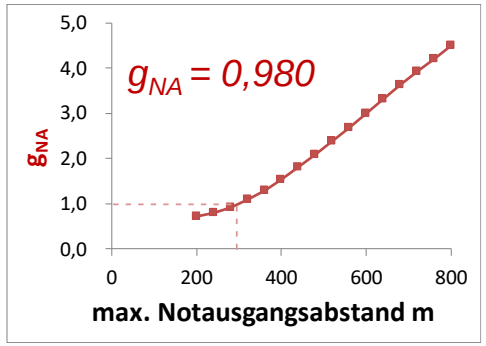
Brandlüftungssystem	g_{BL}
Natürliche Lüftung	4
Mechanische Längslüftung	1
Rauchabsaugung	0,5











$K_{Kollision}$ = 3,41 (2,9 x höher als im Richtungsverkehr) → Quantitative Sicherheitsbewertung

K_{Brand} = 3,55 (9,5 x höher als im Richtungsverkehr) → Quantitative Sicherheitsbewertung

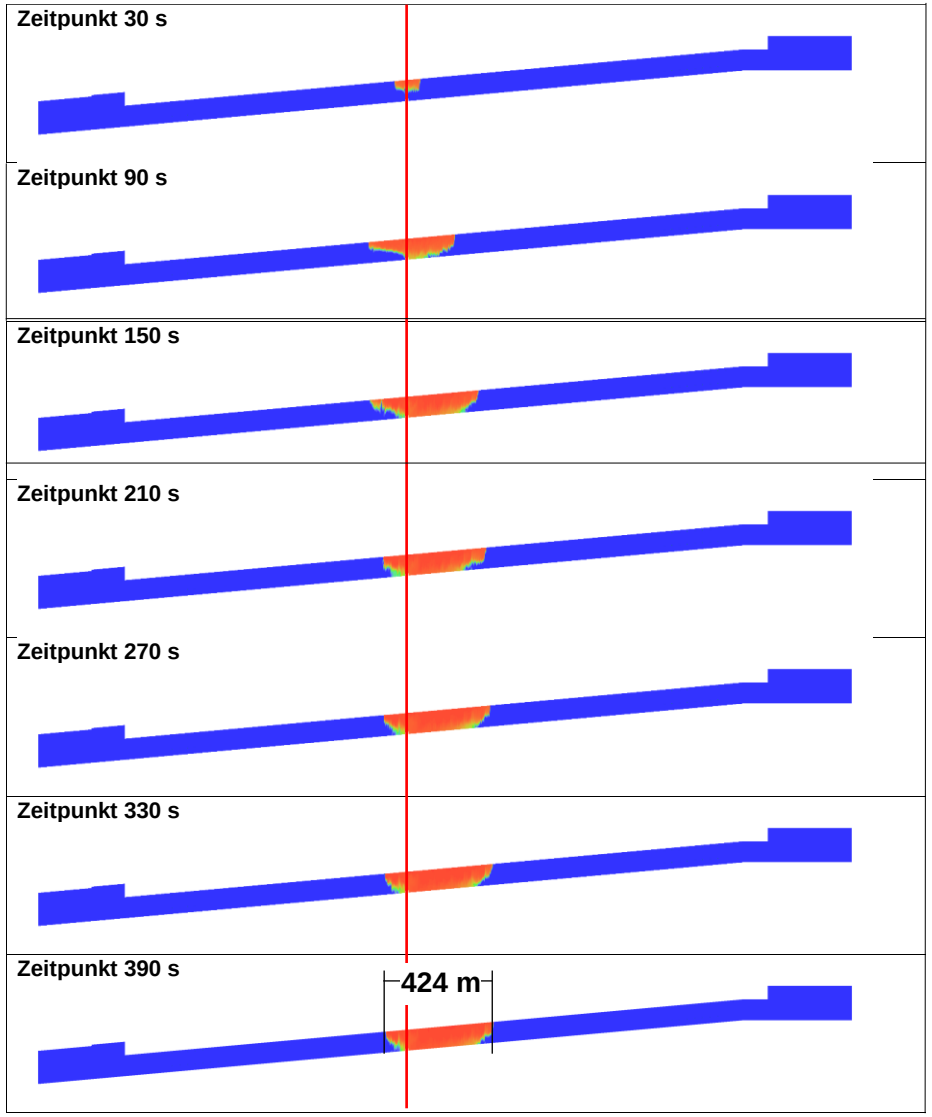
Sicherheitsbewertung Gegenverkehr – Planfall / Referenzfall

Planfall		
Tunnelparameter	**Nordröhre**	**Bemerkungen**
Verkehrsart	**Gegenverkehr**	
Seitenstreifen	**mit**	Nur in Hauptfahrtrichtung
Nothalte-/Pannenbuchten	**ohne**	
Zu-/Abfahrten (mit/ohne)	mit	Verflechtungsbereiche
Lichte Breite	**12,00 m**	RQ 31T
Lichte Höhe	**5,55 m**	
Zul. Höchstgeschwindigkeit Pkw	**80 km/h**	
Zul. Höchstgeschwindigkeit Lkw	**60 km/h**	nach StVO zulässige Höchst-geschwindigkeit ab 7,5 t
Lüftungssystem	Rauchabsaugung, Zwischendecke	
max. Abstand der Notausgänge	**295 m**	
DTV je Tunnelröhre	**29 300 Kfz/24h**	

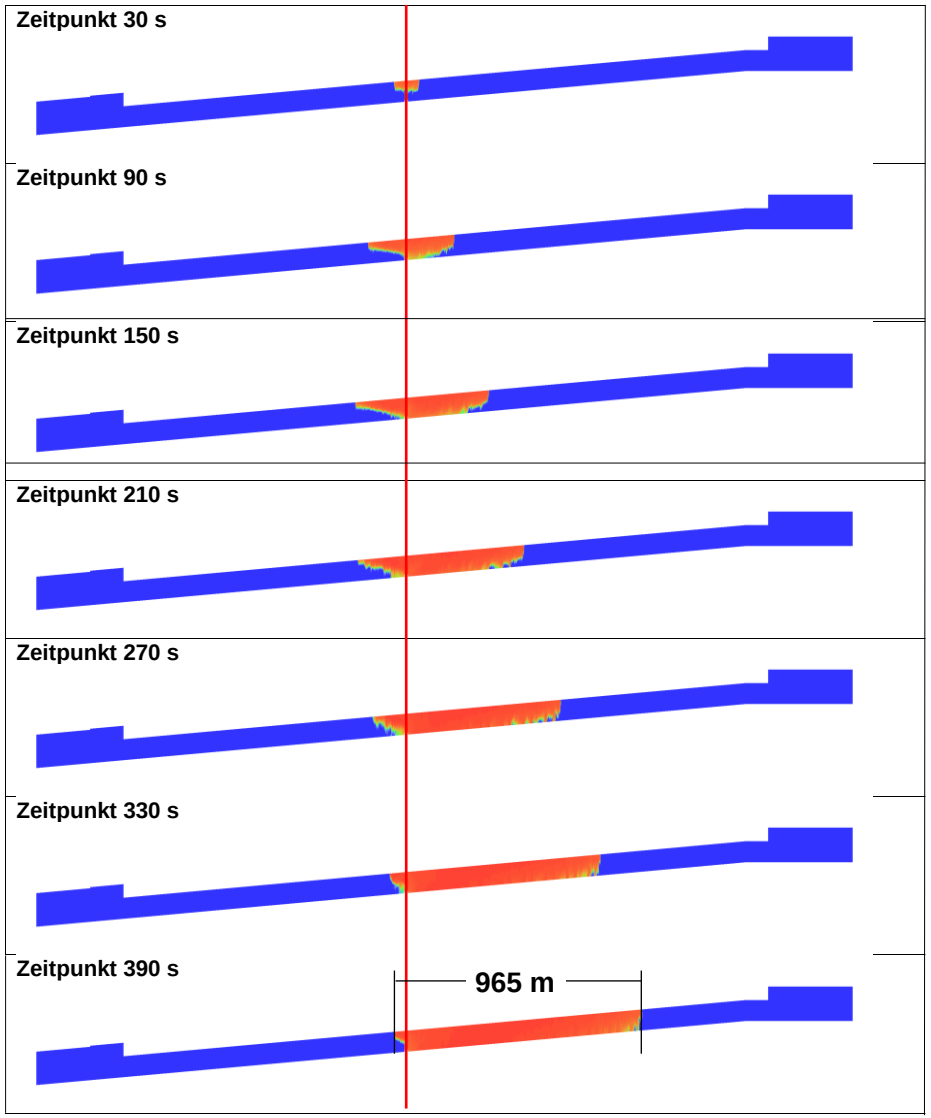
Referenzfall			
Tunnelparameter	**Nordröhre**	**Südröhre**	**Bemerkungen**
Verkehrsart	Richtungsverkehr	Richtungsverkehr	gemäß Heft B 183
Seitenstreifen	ohne	ohne	RQ 31 t
Nothalte-/Pannenbuchten	mit	mit	
Zu-/Abfahrten (mit/ohne)	mit	mit	Verflechtungsbereiche
Lichte Breite	9,50 m	9,50 m	RQ 31 t
Lichte Höhe	5,40 m	5,40 m	
Zul. Höchstgeschwindigkeit Pkw	100 km/h	100 km/h	
Zul. Höchstgeschwindigkeit Lkw	80 km/h	80 km/h	
Lüftungssystem	Rauchabsaugung, Zwischendecke	Rauchabsaugung, Zwischendecke	gemäß Heft B 183, Tab. 1
max. Abstand der Notausgänge	300 m	300 m	gemäß RE-ING 2023
DTV je Tunnelröhre	14 650 Kfz/24h	14 650 Kfz/24h	

Sicherheitsbewertung CFD-Berechnungen - Planfall

Planfall, Nordröhre: Rauchausbreitung, fließender Gegenverkehr 100 MW Brand mit aktivierter Lüftung

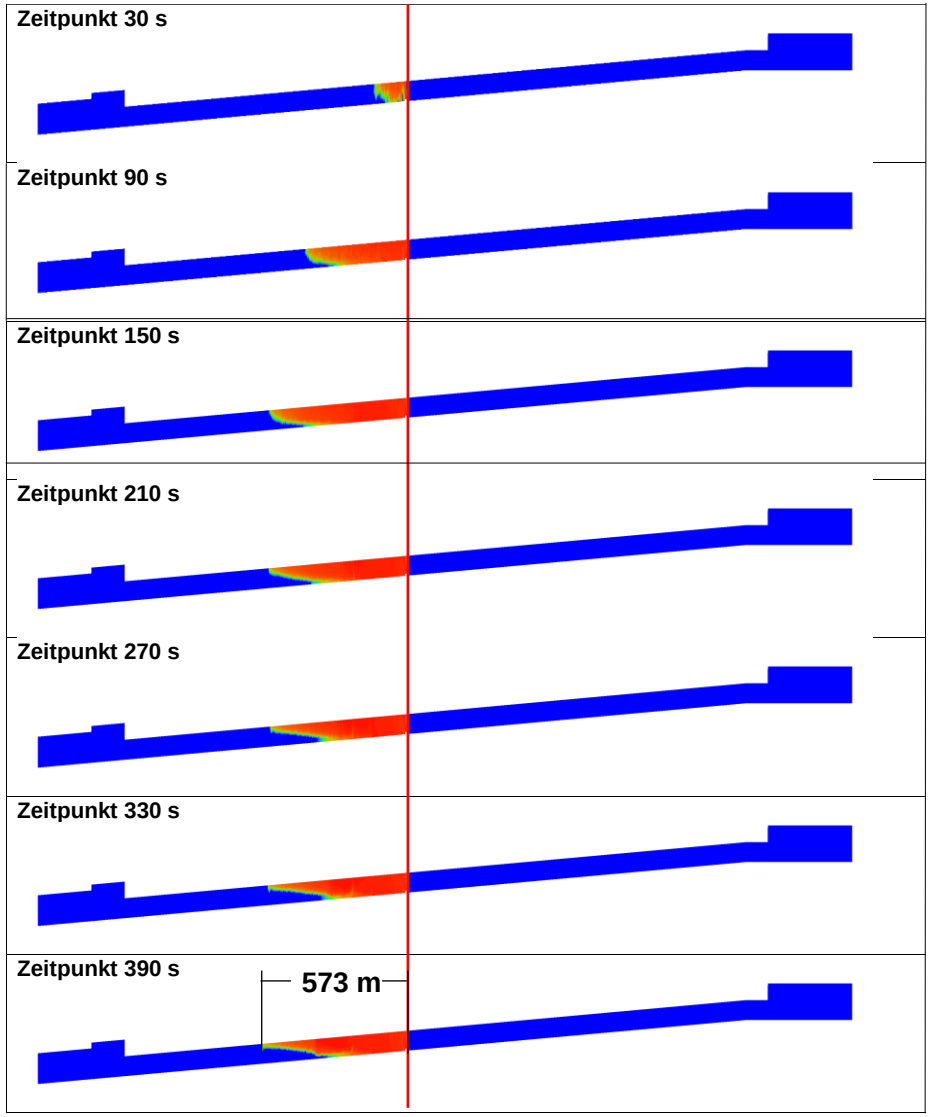


Planfall, Nordröhre: Rauchausbreitung, fließender Gegenverkehr 100 MW Brand ohne Lüftung

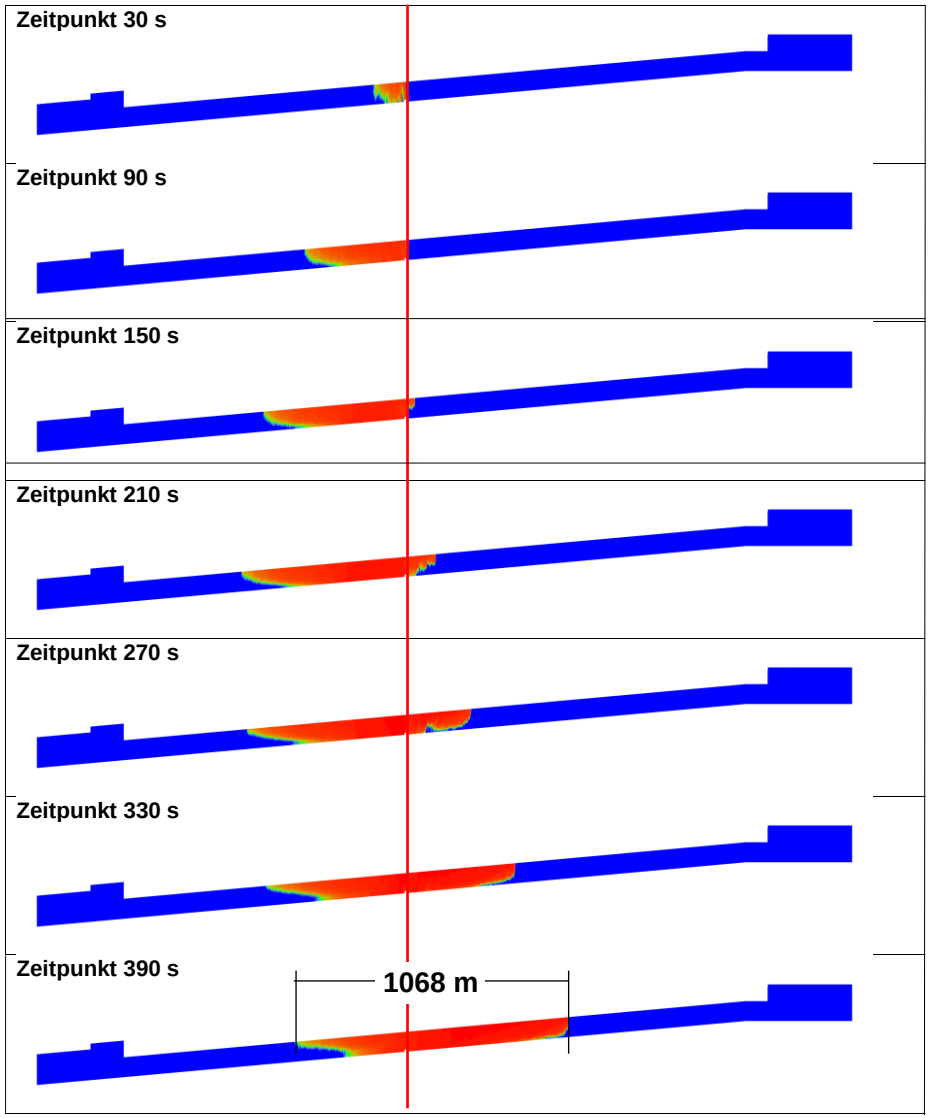


Sicherheitsbewertung CFD-Berechnungen - Referenzfall

Referenzfall, Nordröhre: Rauchausbreitung, fließender Verkehr, 100 MW Brand, mit aktivierter Lüftung



Referenzfall, Nordröhre: Rauchausbreitung, fließender Verkehr, 100 MW Brand, ohne Lüftung



Ergebnis der Sicherheitsbewertung Gegenverkehr

KOLLISION		
KOLLISION: Planfall ist	+19,2 %	+ = besser, - = schlechter

BRAND		
BRAND: Planfall ist	+20,8 %	+ = besser, - = schlechter

KOLLISION + BRAND		
KOLLISION + BRAND: Planfall ist	+20,8 %	+ = besser, - = schlechter

Inhalt: Auswahl und Grundlagen der Auslegung der Lüftungssysteme für Tunnel

- Richtlinien, Empfehlungen und angewandte Praxis
- Grundlegende Lüftungssysteme in Straßentunneln
- Beispiel 3,2 km langer Richtungsverkehrstunnel
- Grundlagen der Auslegung der Tunnellüftung
- Konzeption der Tunnellüftung für Richtungs- und Gegenverkehr
- Risikobetrachtungen
- **Zusammenfassung**

Zusammenfassung

1. Umfangreiche Richtlinienlandschaft für Tunnellüftung und Sicherheitsbewertungen.
2. Im Brandfall geringe Wirkung der punktuellen Rauchabsaugung.
3. Die Ausnahmefälle kurzfristiger und längerfristiger Gegenverkehr sollten in der Planung immer berücksichtigt werden.
4. Fehlende Vorgaben, ob bei Gegenverkehr in einer Röhre im Richtungsverkehrstunnel ein höheres Risiko akzeptiert werden darf.
5. Sicherheitsbewertung mit 3-dimensionalen Risikoberechnungen weist den Nutzen einer Zwischendecke mit Rauchabsaugung nach.

HBI Haerter Beratende Ingenieure

Auswahl und Grundlagen der Auslegung der Lüftungssysteme für Tunnel

Dr. Matthias Wehner
HBI Haerter GmbH, Heidenheim, www.hbi.eu

DMT Fachtagung Tunnelsicherheit, 30.9. - 1.10.2025 in Bamberg