



**Ingenieurbüro Lohmeyer  
GmbH & Co. KG**

**Immissionsschutz, Klima,  
Aerodynamik, Umweltsoftware**

Mohrenstraße 14, D-01445 Radebeul

Telefon: +49 (0) 351 / 8 39 14 - 0

E-Mail: [info.dd@lohmeyer.de](mailto:info.dd@lohmeyer.de)

URL: [www.lohmeyer.de](http://www.lohmeyer.de)

---

**LÜFTUNGSGUTACHTEN  
MIT RISIKOANALYSE UND  
BRANDFALLKONZEPT NACH RABT 2006  
FÜR DIE TUNNEL KÖ-BOGEN  
IN DÜSSELDORF**

**VERKEHRSLÖSUNG GEM.  
RATSBESCHLUSS VOM 13.12.2007 UND  
ZWISCHENLÖSUNG**

Auftraggeber: Bürger  
Bau- und Projektmanagement GmbH (IDR AG)  
Henkelstraße 164  
40589 Düsseldorf

  
Dr. rer. nat. I. Düring

Dr.-Ing. A. Lohmeyer

Dr. rer. nat. R. Bösing

Februar 2008  
Projekt 70313-06-17  
Berichtsumfang 63 Seiten

## INHALTSVERZEICHNIS

<b>1</b>	<b>AUFGABENSTELLUNG .....</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>VORGEHENSWEISE .....</b>	<b>3</b>
<b>3</b>	<b>EINGANGSDATEN .....</b>	<b>4</b>
3.1	Allgemein.....	4
3.2	Tunneldaten .....	4
3.2.1	Erster Bauabschnitt .....	4
3.2.2	Zweiter Bauabschnitt .....	8
3.2.3	Strömungstechnische Parameter .....	12
3.3	Bauliche Situation an den Portalen .....	13
3.3.1	Erster Bauabschnitt .....	13
3.3.2	Zweiter Bauabschnitt .....	13
3.4	Verkehrsdaten .....	14
3.5	Meteorologische Daten .....	14
<b>4</b>	<b>LÜFTUNGSBERECHNUNGEN FÜR REGELBETRIEB .....</b>	<b>18</b>
4.1	Zuluftbedarf bei verschiedenen Verkehrszuständen .....	18
4.1.1	Anforderungen und maßgebende Abgaskomponenten .....	18
4.1.2	Zuluftbedarf und maßgebende Verkehrsfälle.....	18
4.2	Selbstlüftung durch äußere Einflüsse .....	20
<b>5</b>	<b>LÜFTUNG BEI BRAND IM TUNNEL .....</b>	<b>21</b>
5.1	Anforderungen.....	21
5.2	Bewertung des Gefährdungs- und des Sicherheitspotenzials für den 1. Bauabschnitt.....	21
5.3	Bewertung des Gefährdungs- und des Sicherheitspotenzials unter Berücksichtigung des 2. Bauabschnittes .....	23
5.4	Maßgebende Brandgröße .....	23
5.5	Lüftungssysteme im Brandfall .....	24

<b>6 LÜFTUNGS AUSLEGUNG FÜR DEN 1. BAUABSCHNITT OHNE BERÜCKSICHTIGUNG DES 2. BAUABSCHNITTES.....</b>	<b>26</b>
6.1 Verkehrslösung gem. Ratsbeschluss vom 13.12.2007.....	26
6.2 Zwischenlösung.....	34
6.3 Einfluss der angeschlossenen Tiefgaragen auf die Tunnellüftung .....	34
6.3.1 Tiefgaragen im Zuge der Planungen Kö-Bogen unter MK2 und MK3.....	34
6.3.2 Tiefgaragen am Gustaf-Gründgens-Platz .....	35
<b>7 LÜFTUNGS AUSLEGUNG UNTER BERÜCKSICHTIGUNG DES 2. BAUABSCHNITTES .....</b>	<b>37</b>
7.1 Mögliche Lüftungsarten und Lüftungssteuerung.....	37
7.2 Lüftungsdimensionierung für mechanische Längslüftung mittels Strahlventilatoren.....	40
7.2.1 Erforderlicher Schub der Ventilatoren bei Längslüftung.....	41
7.2.2 Brandfall im Tunnel.....	42
7.2.3 Auslegung für den Brandfall .....	43
7.3 Lüftungsdimensionierung für mechanische Lüftung bei Punktabsaugung.....	44
<b>8 ZUSAMMENFASSUNG .....</b>	<b>45</b>
<b>9 LITERATUR .....</b>	<b>49</b>
<b>A N H A N G A1: BERECHNUNGEN DES ZULUFTBEDARFS .....</b>	<b>50</b>
<b>A N H A N G A2: BERECHNUNGEN DES VOLUMENSTROMS BEI SELBSTLÜFTUNG .....</b>	<b>56</b>
<b>A N H A N G A3: BERECHNUNGEN DES ERFORDERLICHEN SCHUBES DER VENTILATOREN (LÄNGSLÜFTUNG) IM BRANDFALL.....</b>	<b>59</b>

**Hinweise:**

Die Tabellen und Abbildungen sind kapitelweise durchnummeriert.

Literaturstellen sind im Text durch Name und Jahreszahl zitiert. Im Kapitel Literatur findet sich dann die genaue Angabe der Literaturstelle.

Es werden Dezimalpunkte (= wissenschaftliche Darstellung) verwendet, keine Dezimalkommas. Eine Abtrennung von Tausendern erfolgt durch Leerzeichen.

## 1 AUFGABENSTELLUNG

Die Stadt Düsseldorf lässt derzeit den B-Plan 5477/123 (Kö-Bogen) erarbeiten. In diesem Zusammenhang ist in einem ersten Bauabschnitt (1. BA) die Errichtung eines Tunnels in Ost-West-Richtung in der Elberfelder Straße geplant mit verkehrlichen Anbindungen an die Hofgartenstraße (Norden), der Heinrich-Heine-Allee (Westen) sowie an die unter den Bauflächen des B-Planes MK2 und MK3 geplante Tiefgarage. Der Tunnel wird eine Röhre aufweisen und soll ausschließlich im Richtungsverkehr (Richtung West) befahren werden. Die Tunnellänge wird ca. 320 m betragen. Zusätzlich soll die Berliner Allee (Süd-Nord-Tunnel) von der Einmündung Schadowstraße bis ca. 340 m nach Norden tiefergelegt werden. Hier soll der Verkehr in Richtung Norden fahren, ggf. mit Anschluss an die unter dem Gustaf-Gründgens-Platz befindlichen Tiefgaragen (Dreischeibenhaus und Schauspielhaus). Beide Tunnel werden über eine ca. 85 m lange unterirdische Verbindung (Ost-West-Richtung) miteinander verbunden.

In einem zweiten Bauabschnitt (2. BA) ist ein neuer Tunnel (Nord-Süd bzw. Nord-Ost) mit einer Länge von ca. 520 m geplant, der mit dem Ost-West-Tunnel verbunden ist.

Im 1. BA sollen die Tiefgaragen unter dem Gustaf-Gründgens-Platz über den Süd-Nord-Tunnel von Süden und nach Norden erschlossen werden. Die Erreichbarkeit aus Richtung Norden und Osten erfolgt hierbei oberirdisch. Für den Fall, dass eine unterirdische Anbindung nicht erreicht werden kann, ist eine vollständige Erreichbarkeit über die Oberfläche gewährleistet. Im Rahmen des möglichen 2. BA erfolgt die Anbindung der Tiefgaragen von Norden und nach Süden auch über den Nord-Süd-Tunnel, sodass dann ein Vollanschluss hergestellt ist.

Nach RABT (2006) ist für Tunnel mit Längen kleiner 400 m wie im vorliegenden Fall des ersten Bauabschnitts keine maschinelle Tunnellüftung erforderlich. Allerdings muss geprüft werden, ob durch die geplanten Ein- und Ausfahrten zu den angrenzenden Tiefgaragen bzw. den Lichtzeichen geregelten Knotenpunkt vor dem Westportal des Ost-West-Tunnels eine insbesondere im Brandfall besondere Situation vorliegt, die eine mechanische Entlüftung notwendig macht.

Da mittlerweile eine erste Planung für den 2. BA vorliegt (siehe oben), soll zusätzlich geprüft werden, welche Konsequenz dieses auf das Tunnellüftungskonzept im 1. BA hat.

Aus diesem Grund sind die Anforderungen der RABT (unter Berücksichtigung der genannten Besonderheiten) zu prüfen und Empfehlungen zu gegeben, mit welchem Lüftungssystem die Tunnel ausgestattet werden müssten. Hierzu wird sowohl der Regelbetrieb als auch der Brandfall berücksichtigt.

## 2 VORGEHENSWEISE

Das vorliegende Lüftungsgutachten beruht auf der Grundlage der einschlägigen Richtlinien zur Tunnelplanung (RABT, in deren aktueller Fassung, derzeit Ausgabe 2006).

Die Ermittlung der betriebstechnischen Parameter zur Bemessung der Lüftung der Tunnelröhren werden auf der Grundlage dieser Richtlinie durchgeführt. Es wird in Anlehnung an die RABT die Lüftung im Regelbetrieb und im Brandfall betrachtet. Dabei finden die von der Deutschen Montan Technologie GmbH im Auftrag der BASt festgelegten Mindestschutzmaßnahmen im Brandfall Beachtung (DMT, 1999).

### 3 EINGANGSDATEN

#### 3.1 Allgemein

Es ist vorgesehen, durch die Errichtung eines komplexen Tunnelbauwerks wesentliche Fahrbeziehungen, die heute oberirdisch verlaufen, zukünftig unterirdisch abzuwickeln:

- Dazu wird die Berliner Allee in Fahrtrichtung Norden vom Knotenpunkt Immermannstraße bis zur Hofgartenstraße auf Höhe der Jägerhofpassage in einem Tunnel geführt (Tunnel „Süd-Nord“).
- Von diesem Bauwerk zweigt ein zweiter Tunnel in Fahrtrichtung Westen ab (Tunnel „Ost-West“), der in der Elberfelder Straße unmittelbar vor dem Knotenpunkt Heinrich-Heine-Allee wieder die Oberfläche erreicht.
- Die Verbindung von der Hofgartenstraße (aus Richtung Norden) zur Elberfelder Straße wird ebenfalls unterirdisch geführt („Tunnel Nord-West“).
- Die oberirdische Verkehrsbeziehung von der Hofgartenstraße nach Süden in die Berliner Allee und Immermannstraße über die Hochstraße (Tausendfüßler) bleibt bestehen.
- In die unter den Baukörpern MK2 und MK3 geplante Tiefgarage (TG) wird an einer Stelle im Ost-West-Tunnel in das 2. Untergeschoss (UG) eingefahren und aus dem 2. UG in den Tunnel Nord-West ausgefahren.
- In die Tiefgaragen Dreischeibenhaus und Schauspielhaus erfolgt ein unterirdischer Anschluss aus bzw. in den Süd-Nord-Tunnel.

#### 3.2 Tunneldaten

##### 3.2.1 Erster Bauabschnitt

Die betrachteten Tunnel sind in der **Abb. 3.1** schematisch für den 1. BA aufgezeigt. Zur Betrachtung aus lüftungstechnischer Sicht werden die Tunnel in drei Abschnitte aufgeteilt.



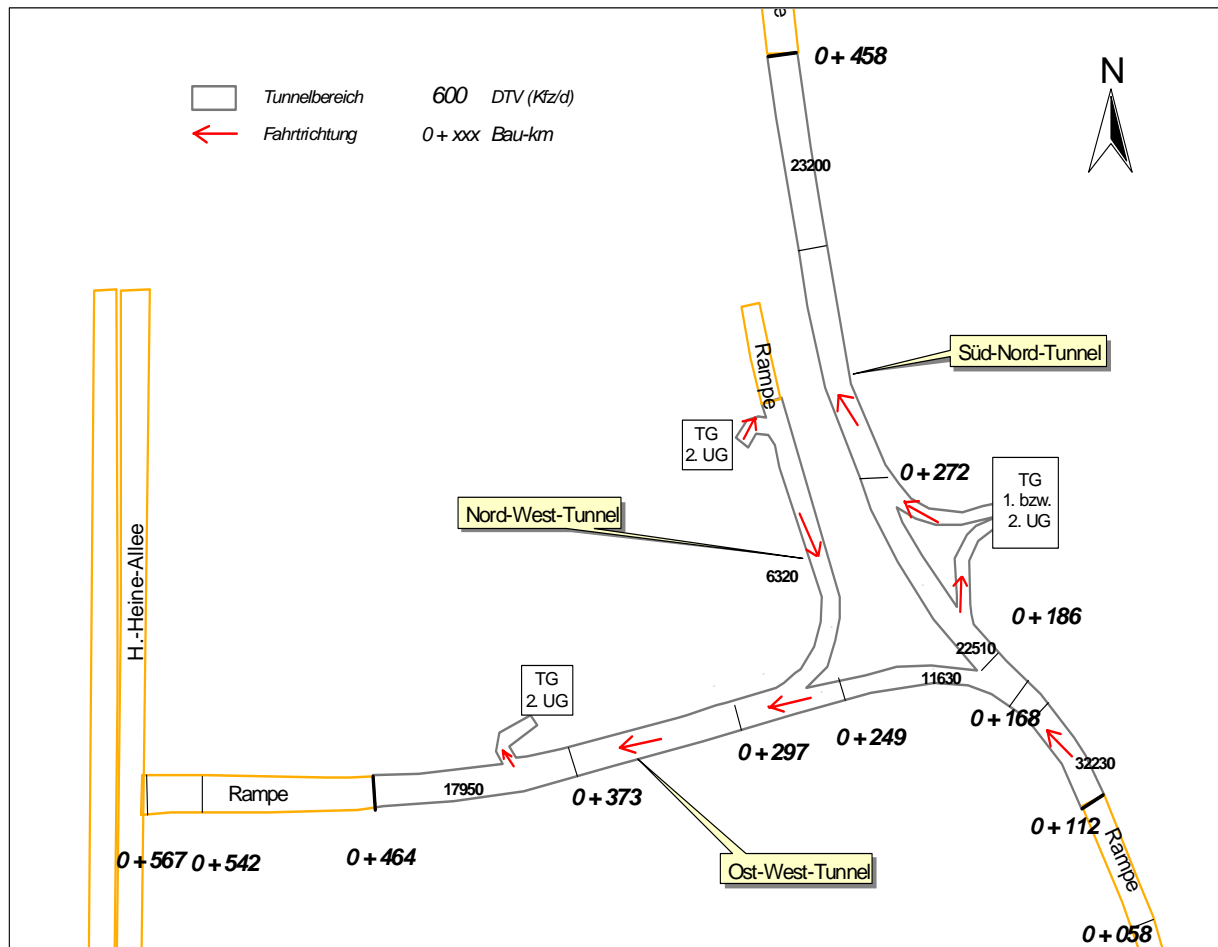


Abb. 3.1: Schematische Darstellung der betrachteten Tunnel inkl. wesentliche Kenngrößen für den 1. BA

In dieser Anordnung werden im Folgenden drei Haupt-Lüftungsabschnitte betrachtet:

1. Lüftungsabschnitt Süd-Nord: Dieser entspricht dem gesamten Süd-Nord-Tunnel und weist eine Länge von 340 m bei einer Längsneigung von ca. 0.7 % auf. Südlich schließt sich eine ca. 80 m lange Einfahrrampe mit einer Längsneigung von -8 % an, nördlich eine Ausfahrrampe mit ca. +7 % Längsneigung. In diesen Abschnitt binden unterirdische Zu- bzw. Abfahrten in bzw. aus den Tiefgaragen Dreischeibenhaus und Schauspielhaus ein. Die Zufahrt erfolgt in die -1 Ebene, die Ausfahrt erfolgt aus der -2 Ebene. Die Verkehrsstärke in diesem Tunnel liegt bei ca. 32 230 Kfz/24h (südlich des genannten Abzweiges des Ost-West-Tunnels), 22 510 Kfz/24h (nördlich Abzweig zum Ost-West-Tunnel) bzw. 23 200 Kfz/24h (nördlich der Ausfahrt aus den Tiefgaragen). Die signalisierte Höchstgeschwindigkeit wird 50 km/h betragen. Dieser Tunnel besteht aus einer

Röhre mit drei Fahrstreifen, die im Richtungsverkehr (Süd-Nord) befahren werden. Der Tunnel soll ein Rechteckprofil mit einer lichten Weite von 11.75 m und einer lichten Höhe von 4.95 m aufweisen. In ca. 110 m Entfernung zum Ausfahrportal befindet sich ein Lichtsignal geregelter Knotenpunkt.

2. Lüftungsabschnitt Ost-West. Die Länge dieses Abschnittes beträgt von der Einmündung aus dem Süd-Nord-Tunnel bis zum Tunnelende im Westen 290 m bei einer Längsneigung bis ca. 0.8 %. Westlich schließt sich ein offener Rampenbereich von ca. 80 m mit einer Längsneigung von ca. +8 % an. Die Verkehrsstärke in diesem Tunnel liegt bei ca. 11 630 (östlich Einmündung Nord-West-Tunnel) bis 17 950 Kfz/24h (westlich o. g. Einmündung). Die signalisierte Höchstgeschwindigkeit wird 50 km/h betragen. Dieser Tunnel besteht im Wesentlichen aus einer Röhre mit drei Fahrstreifen (lichte Weite 11.75 m, im Bereich der TG-Einfahrt 1. UG 11.92 m, lichte Höhe 4.95 m), die im Richtungsverkehr (Ost-West) befahren werden. Zwischen Ausfahrt aus dem Süd-Nord-Tunnel und Einmündung des Nord-Westtunnels ist der Tunnel auf ca. 80 m auf 1 Fahrstreifen plus Standstreifen (lichte Weite von 7.75 m und lichte Höhe von 4.95 m) eingeengt. An einer Stelle ist aus diesem Tunnel die Zufahrt in die geplante Tiefgarage möglich (Zufahrt in 2. UG). Die Tiefgarage wird über bis zu 800 Stellplätze auf bis zu drei Ebenen verfügen. Etwa 80 m nach der Tunnelausfahrt befindet sich der LSA-geregelte Knotenpunkt Elberfelder Straße/Heinrich-Heine-Allee.
3. Lüftungsabschnitt Nord-West: Dieser stellt eine Zufahrt in den Ost-West-Abschnitt dar. Die Länge dieses Abschnittes beträgt von der Einfahrt im Norden bis zur Einmündung in den Ost-West-Tunnel ca. 120 m bei einer Längsneigung bis ca. 0.6 %. Die nördliche offene Einfahrtsrampe weist eine Länge von ca. 70 m bei einer Längsneigung von ca. -8 % auf. Die Verkehrsstärke in diesem Tunnelabschnitt liegt bei ca. 6 320 Kfz/24h. Die signalisierte Höchstgeschwindigkeit wird maximal 50 km/h betragen. Dieser Tunnel besteht ebenfalls aus einer Röhre mit einen Fahrstreifen plus Standstreifen (lichte Weite 7.75 m und lichte Höhe 4.95 m), die im Richtungsverkehr (Nord-Süd) befahren wird. Direkt am Nordportal befindet sich die TG-Ausfahrt.

Hinweise: Für die Risiko-Brandfallbetrachtung werden im Rahmen der Bewertung z. T. auch Abschnitte zusammengefasst, z. B. der Abschnitt Süd-West (= Einfahrt Südportal bis Ausfahrt Westportal), der eine Länge von 360 m aufweist. Es wird in Absprache mit dem Auftraggeber davon ausgegangen, dass die Luftqualität in den Tunneln durch den Betrieb und gegebenenfalls durch Brand in der geplanten Tiefgarage unter den Baufeldern MK2 und MK3

nicht negativ beeinflusst wird. Die Tiefgaragen unter dem Gustaf-Gründgens-Platz existiert bereits. Hier sollen Aussagen gemacht werden, wie aus lüftungstechnischer Sicht der Vollanschluss an die geplanten Tunnel erfolgen kann. Dies wird separat im Abschnitt 6.3 diskutiert.

Die für die Lüftung relevanten und den nachfolgenden Betrachtungen zugrunde gelegten Tunneldaten sind in den **Tab. 3.1** bis **Tab. 3.3** nochmals zusammengestellt.

Parameter	Abkürzung	Wert	Einheit
Länge	L	340	m
Längsneigung	i	+0.7	%
freie Querschnittsfläche	A	58.2	m <sup>2</sup>
Umfang innen	U	33.4	m
hydraulischer Durchmesser	D <sub>H</sub>	7.0	m

Tab. 3.1: Tunneldaten für die Lüftungsberechnungen Abschnitt 1 (Süd-Nord-Tunnel)

Parameter	Abkürzung	Wert	Einheit
Länge	L	290	m
Längsneigung	i	-0.8	%
freie Querschnittsfläche	A	58.2 (38.4)	m <sup>2</sup>
Umfang innen	U	33.4 (25.4)	m
hydraulischer Durchmesser	D <sub>H</sub>	7.0 (6.0)	m

Tab. 3.2: Tunneldaten für die Lüftungsberechnungen Abschnitt 2 (Ost-West-Tunnel).  
Werte in Klammern für den eingengten Bereich.

Parameter	Abkürzung	Wert	Einheit
Länge	L	120	m
Längsneigung	i	-0.6	%
freie Querschnittsfläche	A	38.4	m <sup>2</sup>
Umfang innen	U	25.4	m
hydraulischer Durchmesser	D <sub>H</sub>	5.8	m

Tab. 3.3: Tunneldaten für die Lüftungsberechnungen Abschnitt 3 (Nord-West-Tunnel)

### 3.2.2 Zweiter Bauabschnitt

Für den zweiten Bauabschnitt lag eine erste planerische Idee (Stand 22.10.07) ohne detaillierte Lage- und Höhenpläne vor. Die dann vorliegenden Tunnel sind in der **Abb. 3.2** schematisch für den 2. BA aufgezeigt. Durch einen zusätzlichen Tunnel (Nord-Süd) und dessen Verknüpfung mit dem Ost-West-Tunnel entsteht nunmehr ein komplexes Tunnelsystem.

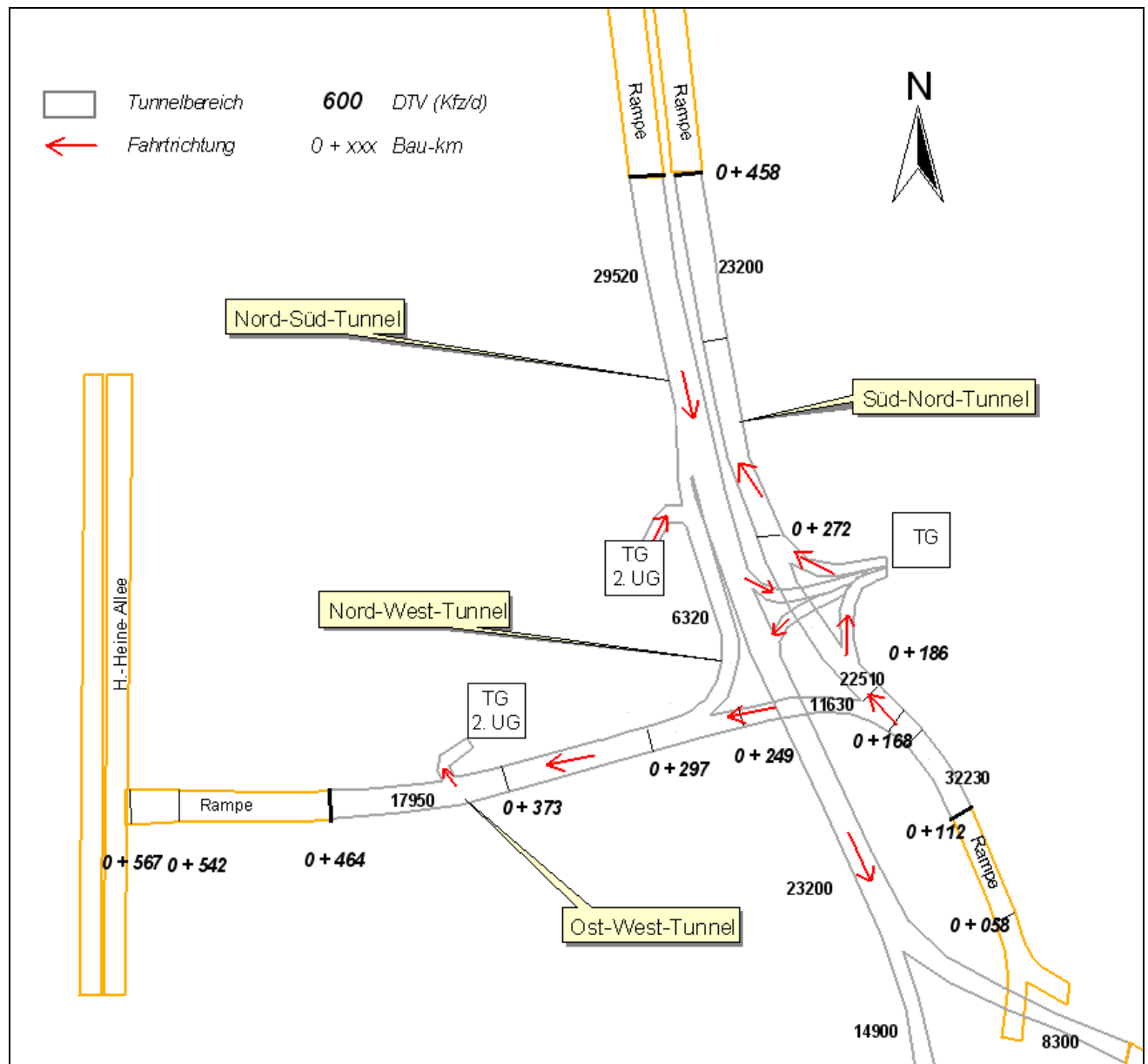


Abb. 3.2: Schematische Darstellung der betrachteten Tunnel inklusive wesentliche Kenngrößen für den 2. BA

Zur Betrachtung aus Lüftungstechnischer Sicht werden die Tunnel in folgende Abschnitte aufgeteilt:

1. Lüftungsabschnitt Süd-Nord: Dieser entspricht dem gesamten Süd-Nord-Tunnel und weist eine Länge von 340 m bei einer Längsneigung von 0.7 % auf. Südlich schließt sich eine ca. 80 m lange Einfahrrampe mit einer Längsneigung von ca. -8 % an, nördlich eine Ausfahrrampe mit ca. +7 % Längsneigung. In diesen Abschnitt binden unterirdische Zu- bzw. Abfahrten in bzw. aus den Tiefgaragen Dreischeidenhaus und Schauspielhaus ein. Die Zufahrt erfolgt in die -1 Ebene, die Ausfahrt erfolgt aus der -2 Ebene. Die Verkehrsstärke in diesem Tunnel liegt bei ca. 32 230 Kfz/24h (südlich des genannten Abzweiges des Ost-West-Tunnels), 22 510 Kfz/24h (nördlich Abzweig zum Ost-West-Tunnel) bzw. 23 200 Kfz/24h (nördlich der Ausfahrt aus der Tiefgarage). Die signalisierte Höchstgeschwindigkeit wird 50 km/h betragen. Dieser Tunnel besteht aus einer Röhre mit drei Fahrstreifen, die im Richtungsverkehr (Süd-Nord) befahren werden. Dieser Tunnel soll ein Rechteckprofil mit einer lichten Weite von 11.75 m und einer lichten Höhe von 4.95 m aufweisen. In ca. 110 m Entfernung zum Ausfahrportal befindet sich ein Lichtsignal geregelter Knotenpunkt.
2. Lüftungsabschnitt Ost-West. Die Länge dieses Abschnittes beträgt von der Einmündung aus dem Süd-Nord-Tunnel bis zum Tunnelende im Westen 290 m bei einer Längsneigung bis ca. 0.8 %. Westlich schließt sich ein offener Rampenbereich von ca. 80 m mit einer Längsneigung von ca. +8 % an. Die Verkehrsstärke in diesem Tunnel liegt bei ca. 11 630 (östlich Einmündung Nord-West-Tunnel) bis 17 950 Kfz/24h (westlich o. g. Einmündung). Die signalisierte Höchstgeschwindigkeit wird 50 km/h betragen. Dieser Tunnel besteht im Wesentlichen aus einer Röhre mit drei Fahrstreifen (lichte Weite 11.75 m, im Bereich der TG-Einfahrt 1. UG 11.92 m, lichte Höhe 4.95 m), die im Richtungsverkehr (Ost-West) befahren werden. Zwischen Ausfahrt aus dem Süd-Nord-Tunnel und Einmündung des Nord-Westtunnels ist der Tunnel auf ca. 80 m auf 1 Fahrstreifen plus Standstreifen (lichte Weite von 7.75 m und lichte Höhe von 4.95 m) eingeengt. An einer Stelle ist aus diesem Tunnel die Zufahrt in die geplante Tiefgarage möglich (Zufahrt in 2. UG). Die Tiefgarage wird über bis zu 800 Stellplätze auf bis zu drei Ebenen verfügen. Etwa 80 m nach der Tunnelausfahrt befindet sich der LSA-geregelte Knotenpunkt Elberfelder Straße/Heinrich-Heine-Allee.
3. Lüftungsabschnitt Nord-Süd/Ost: Dieser entspricht dem gesamten Nord-Süd-Tunnel mit der Ausfahrt Ost (Ausfahrt Immermannstraße) und weist eine Länge von ca. 520 m auf.

Die Längsneigung ist zwischen Einfahrportal (Nord) und Kreuzung des Ost-West-Tunnels zu ca. -8 % geplant, dann steigt der Tunnel mit ca. +4 % auf 120 m an, um dann mit ca. +1.5 % auszufahren. Im nördlichen Bereich des Tunnels zweigt der Nord-West-Tunnel ab. Im mittleren Bereich münden die unterirdischen Zu- bzw. Ausfahrten in bzw. aus der Tiefgaragen Dreischeidenhaus und Schauspielhaus ein. Die Zufahrt erfolgt in die -3 Ebene, die Ausfahrt erfolgt aus der -2 Ebene. Die Verkehrsstärke in diesem Tunnel liegt bei ca. 29 520 Kfz/24h (nördlich des genannten Abzweiges des Nord-West-Tunnels), 23 200 Kfz/24h (südlich davon) bzw. 8 300 Kfz/24h (in der Ausfahrt Ost). Die signalisierte Höchstgeschwindigkeit wird 50 km/h betragen. Es wird angesetzt, dass dieser Tunnel aus einer Röhre mit drei Fahrstreifen besteht, die im Richtungsverkehr (Nord-Süd) befahren werden. Es wird für diesen Tunnel ebenfalls von einem Rechteckprofil mit einer lichten Weite von 11.75 m und einer lichten Höhe von 4.95 m ausgegangen. In ca. 140 m Entfernung zum Ausfahrportal Ost befindet sich ein Lichtsignal geregelter Knotenpunkt.

4. Lüftungsabschnitt Nord-West: Dieser stellt eine Ausfahrt aus dem Nord-Süd-Abschnitt und eine Zufahrt in den Ost-West-Abschnitt dar. Die Länge dieses Abschnittes beträgt von der Einfahrt im Norden bis zur Einmündung in den Ost-West-Tunnel ca. 120 m bei einer Längsneigung bis ca. 0.6 %. Die Verkehrsstärke in diesem Tunnelabschnitt liegt bei ca. 6 320 Kfz/24h. Die signalisierte Höchstgeschwindigkeit wird 50 km/h betragen. Dieser Tunnel besteht ebenfalls aus einer Röhre mit einen Fahrstreifen plus Standstreifen (lichte Weite 7.75 m und lichte Höhe 4.95 m), die im Richtungsverkehr (Nord-Süd) befahren werden. Im nördlichen Bereich befindet sich die TG-Ausfahrt.

Hinweise: Für die Risiko-Brandfallbetrachtung werden im Rahmen der Bewertung wiederum auch Abschnitte zusammengefasst, z. B. der Abschnitt Süd-West (= Einfahrt Südportal bis Ausfahrt Westportal), der ein Länge von 360 m aufweist. Es wird in Absprache mit dem Auftraggeber davon ausgegangen, dass die Luftqualität in den Tunneln durch den Betrieb und gegebenenfalls durch Brand in der geplanten Tiefgarage unter den Baufeldern MK2 und MK3 nicht negativ beeinflusst wird. Die Tiefgaragen unter dem Gustaf-Gründgens-Platz existiert bereits. Hier sollen Aussagen gemacht werden, wie aus Lüftungstechnischer Sicht der Vollanschluss an die geplanten Tunnel erfolgen kann. Dies wird separat im Kapitel 6.3 diskutiert.

Die für die Lüftung relevanten und den nachfolgenden Betrachtungen zugrunde gelegten Tunneldaten sind in den **Tab. 3.4** bis **Tab. 3.7** nochmals zusammengestellt.

Parameter	Abkürzung	Wert	Einheit
Länge	L	340	m
Längsneigung	I	+0.7	%
freie Querschnittsfläche	A	58.2	m <sup>2</sup>
Umfang innen	U	33.4	m
hydraulischer Durchmesser	D <sub>H</sub>	7.0	m

Tab. 3.4: Tunneldaten für die Lüftungsberechnungen Abschnitt 1 (Süd-Nord-Tunnel)

Parameter	Abkürzung	Wert	Einheit
Länge	L	290	m
Längsneigung	i	-0.8	%
freie Querschnittsfläche	A	58.2 (38.4)	m <sup>2</sup>
Umfang innen	U	33.4 (25.4)	m
hydraulischer Durchmesser	D <sub>H</sub>	7.0 (6.0)	m

Tab. 3.5: Tunneldaten für die Lüftungsberechnungen Abschnitt 2 (Ost-West-Tunnel). Werte in Klammern für den eingegengten Bereich.

Parameter	Abkürzung	Wert	Einheit
Länge	L	520	m
Längsneigung	i	-8	%
freie Querschnittsfläche	A	58.2 (38.4)	m <sup>2</sup>
Umfang innen	U	33.4 (25.4)	m
hydraulischer Durchmesser	D <sub>H</sub>	7.0 (6.0)	m

Tab. 3.6: Tunneldaten für die Lüftungsberechnungen Abschnitt 3 (Nord-Süd-Tunnel mit Ausfahrt Immermannstraße). Werte in Klammern für die Ausfahrt Immermannstraße und Berliner Straße.

Parameter	Abkürzung	Wert	Einheit
Länge	L	120	m
Längsneigung	i	-0.6	%
freie Querschnittsfläche	A	38.4	m <sup>2</sup>
Umfang innen	U	25.4	m
hydraulischer Durchmesser	D <sub>H</sub>	6.0	m

Tab. 3.7: Tunneldaten für die Lüftungsberechnungen Abschnitt 4 (Nord-West-Tunnel)

### 3.2.3 Strömungstechnische Parameter

Für die strömungsmechanischen Berechnungen werden im Folgenden die nachstehenden Angaben in **Tab. 3.8** angesetzt. Dabei wird vorausgesetzt, dass die Tunnelwände glatt ausgeführt sind (Rauigkeiten  $\leq 2$  mm) und keine wesentlichen strömungsbehindernden Einbauten vorliegen.

Parameter	Abkürzung	Wert	Einheit
Dichte der Luft	$\rho$	1.2	kg/m <sup>3</sup>
Wandreibungskoeffizient	$\lambda$	0.015	-
Einström-Verlustkoeffizient	$\zeta_E$	0.3	-
Ausström-Verlustkoeffizient	$\zeta_A$	1.0	-
Widerstandsbeiwert PKW	$c_{wPKW}$	0.3	-
Widerstandsbeiwert LKW	$c_{wLKW}$	1.0	-
Querschnittsfläche PKW	$A_{PKW}$	1.5	m <sup>2</sup>
Querschnittsfläche LKW	$A_{LKW}$	5.0	m <sup>2</sup>
Widerstandsbeiwert PKW im Tunnel	$c_{wT_{PKW}}$	0.32	-
Widerstandsbeiwert LKW im Tunnel	$c_{wT_{LKW}}$	1.2	-

Tab. 3.8: Strömungsmechanische und andere Eingangsdaten für die Lüftungsberechnungen

Die Zahlenwerte für die einzelnen Parameter wurden wie folgt bestimmt:

- Wandreibungskoeffizient  $\lambda$ , der die Reibungskräfte im Tunnel charakterisiert und vom Strömungszustand der Tunnelluft, ausgedrückt durch die Reynoldszahl  $Re$  und der mittleren Rauigkeit der Tunnelwand abhängt. Da bereits für langsame Luftströmungen im Tunnel ( $u_T > 1$  m/s) turbulente Strömungsverhältnisse vorliegen ( $Re > 10^5$ ) und die Wände als hydraulisch rau gelten können, ergibt sich für  $\lambda$  ein konstanter Wert. Herzke (1972) nimmt bei der Auslegung von Tunnellüftungsanlagen aus Sicherheitsgründen  $\lambda = 0.04$  an. In STUVA (1990) wird für Tunnel, die minimale Einbauten aufweisen, ein Wert von  $\lambda = 0.015$  angesetzt. Dieser Wert wird für die vorliegende Auslegung angesetzt, weil von minimalen Einbauten ausgegangen wird.
- Einström-Verlustkoeffizient  $\zeta_E$ , der die Widerstandskraft infolge der Verengung des Strömungsquerschnitts am Tunneleingang berücksichtigt. Die Portaleintrittsverluste sind von der Form des Tunnelmundes abhängig. Je scharfkantiger die Einfahrtsbegrenzung ausgebildet ist, umso höher ist der Widerstandsbeiwert  $\zeta_e$ . In der Literatur wird



er mit 0.3 bis 0.6 angegeben (Herzke, 1972; STUVA, 1990). Es wird davon ausgegangen, dass die Kanten der Tunnelportalöffnungen in abgerundeter Form gestaltet werden, um die Einströmverluste zu minimieren.

- Mittlerer Luftwiderstandsbeiwert  $c_{w,x}$  der im Tunnel anzutreffenden Kraftfahrzeugflotte. Der Widerstandsbeiwert eines Fahrzeuges lässt sich wegen der unterschiedlichen Fahrzeugformen sinnvoller Weise nur getrennt nach PKW und LKW angeben. Unter der für die Kolbenwirkung ungünstigen Annahme, dass pro Querschnitt jeweils nur ein Fahrzeug den Tunnel versperrt, und dass eine Windschattenwirkung infolge geringer Fahrzeugabstände (Abstand  $>3 \times$  Wagenlänge) ausgeschlossen werden kann, ergeben sich für heutige Mittelklassewagen  $c_W$ -Werte für PKW zwischen 0.25 und 0.35 (z. B. Opel Astra Stufenheck BJ 1998  $c_W = 0.29$ , VW Golf 1.4 BJ 1998  $c_W = 0.31$ ) bzw. für LKW zwischen 0.8 und 1.2 (STUVA, 1990). Der Luftwiderstand eines Fahrzeuges ist in Tunnelröhren höher als auf freier Strecke, da sich in mit Fahrzeugen ausgefüllten Querschnitten höhere Luftgeschwindigkeiten und entsprechend größere Widerstände ergeben (Herzke, 1972, STUVA, 1990). Der Widerstandsbeiwert in Tunneln  $c_{wT}$  lässt sich in guter Näherung mit folgender Gleichung berechnen (Herzke, 1972):

$$c_{wT_{Kfz}} = c_{w_{Kfz}} / (1 - A_{Kfz} / A).$$

### 3.3 Bauliche Situation an den Portalen

#### 3.3.1 Erster Bauabschnitt

Unmittelbar am Westportal in der Eberfelder Straße steht nördlich und südlich geschlossene Bebauung mit bis zu 26 m Höhe.

Der Bereich des Nordportales des Süd-Nord-Tunnels ist unbebaut. Ca. 75 m nördlich befindet sich das Theatermuseum.

Beidseitig des Südportales des Süd-Nord-Tunnels in der Berliner Allee befinden sich ebenfalls beidseitig direkt angrenzend Gebäude mit Wohn- und Gewerberäumen.

#### 3.3.2 Zweiter Bauabschnitt

Unmittelbar am Westportal in der Eberfelder Straße steht nördlich und südlich geschlossene Bebauung mit bis zu 26 m Höhe.

Der Bereich des Nordportales des Süd-Nord-Tunnels ist unbebaut. Ca. 75 m nördlich befindet sich das Theatermuseum. Dies gilt auch für das Nordportal des Nord-Süd-Tunnels.

Beidseitig des Südportales des Süd-Nord-Tunnels in der Berliner Allee befinden sich ebenfalls beidseitig direkt angrenzend Gebäude mit Wohn- und Gewerberäumen.

An den südlichen Ausfahrportalen des Nord-Süd-Tunnels befinden sich u. a. die Johanneskirche, die Börse bzw. die Industrie- und Handelskammer bzw. weitere Bebauungen.

### 3.4 Verkehrsdaten

Die durchschnittliche Verkehrsstärke (DTV) im 1. Bauabschnitt für das zu betrachtende Prognosejahr beträgt im Tunnelbereich Süd-Nord (Gesamtquerschnitt) ca. 23 200 bis 32 230 Kfz/24h, im Ost-West-Abschnitt ca. 11 630 bis 17 950 Kfz/24h und in der Nord-Süd-Zufahrt ca. 6 320 Kfz/24h jeweils bei einem LKW-Anteil von 2 % (siehe **Abb. 3.1**).

Für den 2. BA wurden für die ersten überschlägigen Berechnungen für den Betriebsfall die Verkehrsprognosen des 1. BA verwendet (siehe **Abb. 3.2**) und entsprechend der geplanten Verkehrsführung zusammengefasst.

Die Spitzenstunde der Kfz-Belastung wurde aus Zählraten der Stadt Düsseldorf zu ca. 8 % des DTV abgeleitet. Werktags (Mo bis Fr) fahren ca. 7 % mehr Fahrzeuge als im Wochenmittel.

Die Dimensionierungsgeschwindigkeit für die Tunnelbereiche beträgt max. 50 km/h. Für die Bewertung und Auslegung der Tunnellüftung wird, um auf der sicheren Seite zu sein, in Abstimmung mit dem Auftraggeber „täglich stockender Verkehr“ angesetzt.

Der Tunnel darf nicht von Gefahrguttransportern befahren werden.

### 3.5 Meteorologische Daten

In Abstimmung mit dem Umweltamt Düsseldorf werden die Daten der LUQS-Station Düsseldorf-Reisholz verwendet, die vom Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz Nordrhein-Westfalen (LANUV NRW) betrieben wird. Die Winddaten der Station Düsseldorf-Reisholz werden als „für das Stadtgebiet repräsentativ“ betrachtet. Die Station steht im südlichen Vorort von Düsseldorf auf einem unbefestigten Parkplatz, umgeben von Wiesen. Das

Gelände ist flach und eben, die Station frei anströmbar. Die Windmessdaten für den Zeitraum 01.01.1993 bis 31.12.2002 wurden vom LANUV NRW besorgt und ausgewertet. Die ermittelten Häufigkeitsverteilungen der Windrichtungen und Windgeschwindigkeiten für diesen Standort sind in der **Abb. 3.3** dargestellt. Die Hauptwindrichtungen sind Südost und Südwest. Bei den geringen Windgeschwindigkeiten dominieren südöstliche Richtungen. Die mittlere Windgeschwindigkeit beträgt 3.1 m/s.

Der Wind wirkt als äußere Kraft auf die Strömung im Tunnel. Maßgebend für den Winddruck ist die Windgeschwindigkeitskomponente, die senkrecht auf das jeweilige Portal gerichtet ist. Näherungsweise werden dafür die Windrichtungen eines Sektors plus/minus 45° um die Längsachse der Tunneltrasse am Portal berücksichtigt. Auf Grund der Lage der Portale sind für die Nordportale die Windrichtungen Nordwest bis Nordost, am Westportale die Windrichtungen Südwest bis Nordwest und am Südportal die Windrichtungen Südost bis Südwest relevant.

In Day (1998) wird die Empfehlung aufgeführt, für die Dimensionierung der Lüftung in Abhängigkeit des Winddrucks die Windgeschwindigkeit zu berücksichtigen, die nur in 5 % der Zeit überschritten wird. Entsprechend der o.g. Windstatistik Reisholz liegt im von Bebauung weitgehend unbeeinflussten städtischen Bereichen der 95 Perzentilwert der Windgeschwindigkeit bei ca. 6 m/s (**Abb. 3.4**). Dieser Wert ist bei allen drei o. g. Windrichtungssektoren etwa gleich. Um den Einfluss pessimistisch abzuschätzen, wird diese Windgeschwindigkeit bei den Berechnungen auf eine Referenzhöhe von 5 m über Grund umgerechnet. Es sei allerdings darauf hingewiesen, dass durch die Lage der Portale in Tieflage sowie die umliegende z. T. dichte Bebauung die Windgeschwindigkeiten an den Portalen eher niedriger liegen werden.

# Windverteilung Düsseldorf

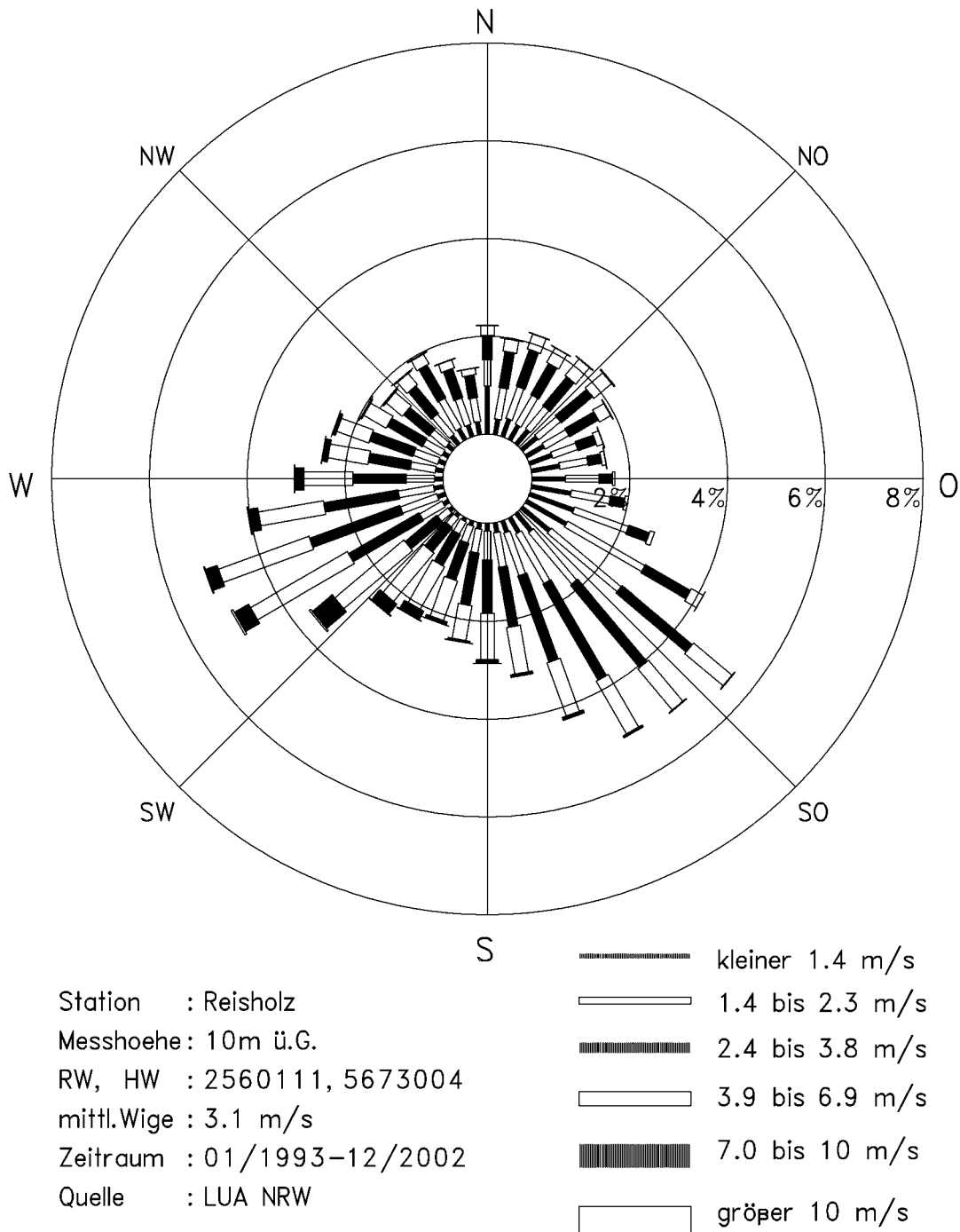


Abb. 3.3: Häufigkeitsverteilung von Windrichtungen und Windgeschwindigkeiten an der Station Düsseldorf-Reisholz (LANUV NRW)

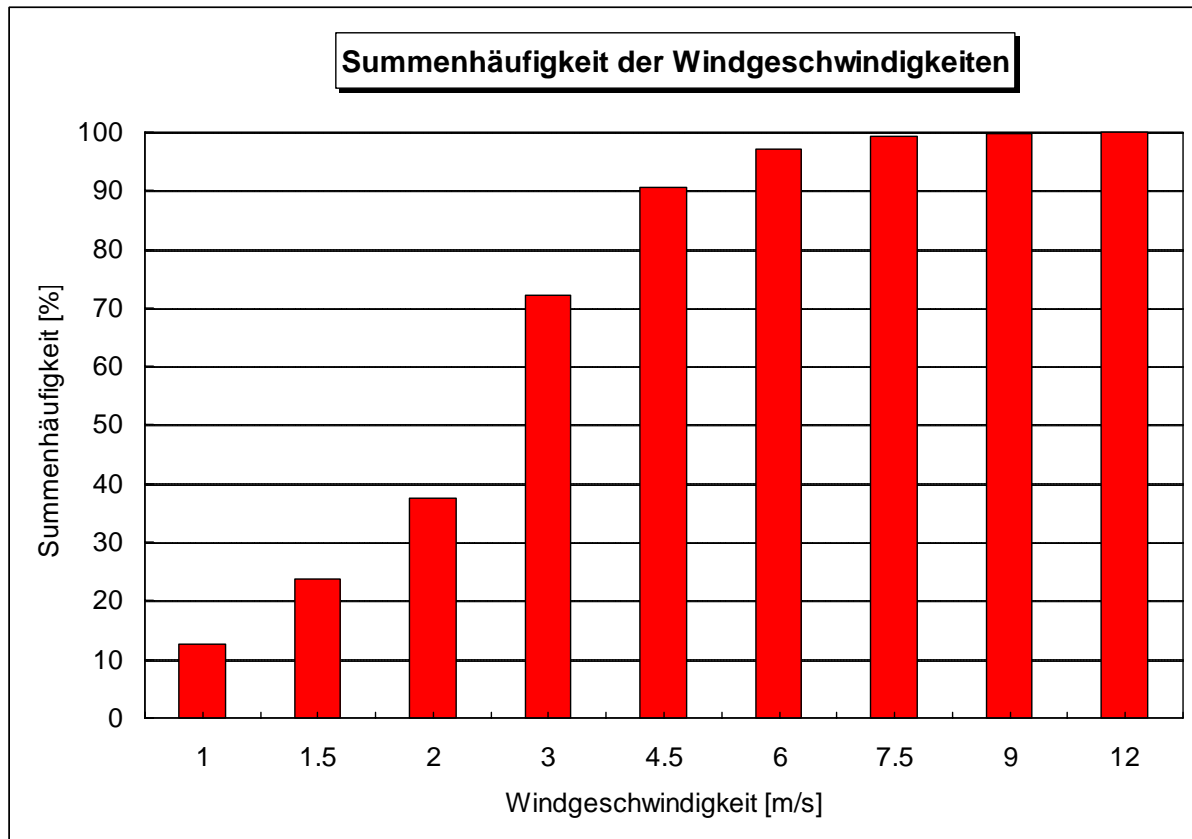


Abb. 3.4: Summenhäufigkeit der Windgeschwindigkeiten an der Station Reisholz

## 4 LÜFTUNGSBERECHNUNGEN FÜR REGELBETRIEB

### 4.1 Zuluftbedarf bei verschiedenen Verkehrszuständen

#### 4.1.1 Anforderungen und maßgebende Abgaskomponenten

Die Zuluftversorgung des Tunnels ist so zu bemessen, dass in jedem Verkehrszustand zwischen flüssiger Fahrt bis Stau bei jeweils größter Verkehrsdichte für den Verkehrsteilnehmer keine gesundheitsgefährdenden Wirkungen auftreten und auch gewisse Ansprüche an klare Sicht und wenig Geruch erfüllt werden.

Als Kriterien für die Luftqualität im Tunnel werden die Sichttrübung durch Partikel sowie die Kohlenmonoxid-Konzentration (CO) verwendet.

Die anzusetzenden Basiswerte der CO- und Sichttrübungsemission der deutschen Fahrzeugflotte für die Jahre 2000 bis 2020 sind in Tabelle 16 der RABT (2006) zusammengestellt. Die Einflüsse der Fahrgeschwindigkeit, der Fahrbahneigung, der Höhe über NN und des LKW-Typs sind in Anhang B der RABT erläutert.

#### 4.1.2 Zuluftbedarf und maßgebende Verkehrsfälle

Bei der Umrechnung der Verkehrsmenge auf Pkw-Einheiten ist nach RABT (2006) die Beziehung

$$1 \text{ LKW} = 2 \text{ PKW}$$

zu verwenden. Die Berechnung der CO- bzw. Trübe-Emissionen erfolgt für jeden Fahrstreifen einzeln. Die Dimensionierung der Lüftung bei flüssigem Verkehr ist auf die prognostizierten Verkehrszahlen abgestellt. Für Fälle mit stockendem Verkehr oder Stau, ist die maximal mögliche Verkehrsdichte gemäß Tabelle 6 aus RABT (2006) angesetzt.

Zur Bemessung der mit der Lüftung bereitzustellenden Zuluftmenge sind für die verschiedenen zu untersuchenden Verkehrszustände die in **Tab. 4.1** enthaltenen CO-Konzentrationen und Sichttrübungswerte zu verwenden (RABT, 2006).

Verkehrszustand/ Betriebszustand	CO-Konzentration	Sichttrübung Extinktionskoeffizient K
	[ppm]	[1/m]
flüssiger Spitzenverkehr $V \cong 50 - 100 \text{ km/h}$	70	0.005
täglich stockender Verkehr, Stillstand auf allen Fahrstreifen	70	0.005
Ausnahmsweise stockender Verkehr, Stillstand auf allen Fahrstreifen	100	0.007
länger andauernde Wartungsarbeiten unter Verkehr	30	0.001

Tab. 4.1: Bemessungskonzentrationen für den Zuluftbedarf bei verschiedenen Verkehrszuständen (RABT, 2006)

Die Berechnungen der notwendigen Zuluftmengen zur ausreichenden Verdünnung der Abgase im Tunnel wurden nach RABT (2006) durchgeführt. Die Ergebnisse sind in Anhang A1 für den Fall tabellarisch aufgeführt, dass die Tunnel wie geplant im Richtungsverkehr betrieben werden (dabei liegt dann die höchste Anzahl von Fahrzeugen im Tunnel vor).

### Ergebnisse für den 1. Bauabschnitt

Der für den 1. BA ermittelte maximale Zuluftbedarf beträgt dabei im Süd-Nord-Tunnel (**Tab. A1.1**)  $4.7 \text{ m}^3/\text{s}$  (bei  $60 \text{ km/h}$ ) und im Süd-West-Abschnitt (**Tab. A1.2**) konservativ betrachtet  $3.8 \text{ m}^3/\text{s}$  (Stillstand auf allen Fahrstreifen). Im Zufahrtstunnel Nord-West ist sie noch geringer. Diese Volumenströme werden bei den o.g. Tunnelquerschnitten bei Strömungsgeschwindigkeiten der Tunnelluft von weniger als  $0.1 \text{ m/s}$  erreicht.

### Ergebnisse unter Berücksichtigung des 2. Bauabschnittes

Der für den 2. BA ermittelte Zuluftbedarf beträgt für den Nord-Ost-Abschnitt (**Tab. A1.3**) konservativ betrachtet  $11.2 \text{ m}^3/\text{s}$  (bei  $50 \text{ km/h}$ ). Im Süd-Nord-Tunnel ändert sich die Situation gegenüber dem 1. BA ( $4.7 \text{ m}^3/\text{s}$  bei  $60 \text{ km/h}$ ) nicht.

Der ermittelte Zuluftbedarf für den Süd-West-Abschnitt beträgt ohne den Einfluss des Nord-Süd-Tunnels bzw. der Nord-West-Zufahrt wie im 1. BA entsprechend **Tab. A1.2**  $3.8 \text{ m}^3/\text{s}$  (bei Stillstand auf allen Fahrstreifen). Der maximale Zuluftbedarf in der Nord-West-Einfahrt (**Tab. A1.4**) beträgt  $1.2 \text{ m}^3/\text{s}$  (bei Stillstand auf allen Fahrstreifen), der im Nord-Süd-Tunnel

bis zum Abzweig zur Nord-West-Einfahrt entsprechend **Tab. A1.5** 3.0 m<sup>3</sup>/s. Geht man entsprechend der Querschnitts- bzw. der daraus zu erwartenden Volumenstromaufteilung von ca. 40% Übertritt der Schadstoffe aus dem ersten Teil des Nord-Süd-Tunnels und 100% aus der Nord-West-Einfahrt in den Süd-West-Abschnitt aus, so erhöht sich der maximale Zuluftbedarf um  $(0.4 \times 3.0 + 1.2)$  m<sup>3</sup>/s auf ca. 6 m<sup>3</sup>/s. Diese Volumenströme werden bei den o. g. Tunnelquerschnitten bei Strömungsgeschwindigkeiten der Tunnelluft von 0.1 bis 0.3 m/s erreicht.

## 4.2 Selbstlüftung durch äußere Einflüsse

Wird ein Tunnel im so genannten Richtungsverkehr betrieben, das heißt alle Fahrzeuge in einer Tunnelröhre fahren in eine Richtung, so wird durch die Kolbenwirkung der Fahrzeuge eine Luftströmung erzeugt. Der Zusammenhang zwischen Tunnelluftgeschwindigkeit, Verkehrsdichte und Fahrzeuggeschwindigkeit ist von vielen Autoren beschrieben worden (z. B. Herzke, 1972, Freibauer, 1978, Israël et al., 1996, STUVA, 1990). Die Tunnelluftgeschwindigkeit, die sich bei Richtungsverkehr in einer Tunnelröhre infolge der Kolbenwirkung einer Fahrzeugkolonne einstellt (Selbstlüftungseffekt), lässt sich mit einer Berechnungsformel für die fahrzeuginduzierten Längsströmung in einer Tunnelröhre mit konstantem Querschnitt bestimmen (Herzke, 1972, Israël et al., 1996).

Die sich einstellenden Längsströmungen im Richtungsverkehr sind exemplarisch für den Süd-West-Abschnitt für den 1. BA in **Tab. A2.1** sowie für den Nord-Ost-Abschnitt (2. BA) in **Tab. A2.2** aufgezeigt.

Bei den normal zu erwartenden Fahrzeuggeschwindigkeiten von 50 km/h werden dort Volumenströme von ca. 150 m<sup>3</sup>/s induziert und selbst bei 20 km/h ca. 80 m<sup>3</sup>/s. Dies liegt erwartungsgemäß deutlich über den erforderlichen Zuluftvolumenströmen.

Kommt der Verkehr zum Stillstand (Stau), dann geht die durch die Kolbenwirkung der Fahrzeuge induzierte Längsströmung gegen Null. In diesem Fall reichen aber natürliche Druckschwankungen (z. B. infolge des Windes) aus, um die erforderliche Strömung von 0.1 bis 0.3 m/s (siehe oben) zu gewährleisten. Für den Süd-Nord-Tunnel gilt dies analog.

Eine natürliche Längslüftung würde für diesen Betriebsfall auch unter Berücksichtigung der Erweiterungen im 2. BA ausreichen.



## 5 LÜFTUNG BEI BRAND IM TUNNEL

### 5.1 Anforderungen

Im Brandfall hat ein Tunnellüftungssystem im Wesentlichen folgende Anforderungen zu erfüllen (RABT, 2006):

- In der Phase 1 (bis ca. 15 Minuten nach Brandausbruch) steht die Selbstrettung im Vordergrund. In Tunneln ab einer bestimmten Länge (Tab. 9a und 9b der RABT 2006) sind im Tunnel fliehende Personen durch Lüftungstechnische Maßnahmen vor der Raucheinwirkung (Sichtverlust, giftige Gase und Temperatur) zu schützen. Dabei muss der Betrieb der Lüftung automatisch erfolgen.
- In der Phase 2 soll die Lüftung zur Unterstützung der Brandbekämpfung dienen, entweder durch eine wirksame Absaugung des Rauches oder durch einseitigen Rauchabtrieb vom Brandort. Das Ein- oder Umschalten der Lüftung geschieht in Abstimmung mit der Feuerwehr.
- Minderung des Explosionsrisikos sowie
- Begrenzung der Zerstörung des Tunnelbauwerks und der Ausrüstung.

Dies wird in erster Linie durch eine gezielte Abführung der heißen Brandschwaden und des Rauches erreicht (DMT, 1999).

### 5.2 Bewertung des Gefährdungs- und des Sicherheitspotenzials für den 1. Bauabschnitt

Mit den sich durch die technische Entwicklung ständig reduzierenden Fahrzeugemissionen sinkt naturgemäß der Zuluftbedarf im Normalbetrieb eines Tunnels. Für den Brandfall sind jedoch nach wie vor weitgehend unveränderte Voraussetzungen gegeben. Dieser Sachverhalt führt dazu, dass der Brandfall immer stärker die Auslegung von Tunnelbelüftungssystemen bestimmt. Auf der Grundlage des Forschungsberichtes „Festlegung von Mindestschutzmaßnahmen im Brandfall für verschiedene Tunneltypen und Verkehrssituationen“ der Deutschen Montan Technologie GmbH (DMT, 1999) wird auftragsgemäß eine Risikobewertung durchgeführt.

In der **Tab. 5.1** ist die qualitative Bewertung des Gefährdungs- und des Sicherheitspotenzials entsprechend den Angaben in DMT (1999) für den 1. BA angegeben. Erfordert ein Tunnel

auf Grund des ermittelten Gesamtgefährdungspotenzials ein erhöhtes Sicherheitspotenzial, so kommen zusätzliche Maßnahmen baulicher und sicherheitstechnischer Art in Betracht, mit denen das System verbessert und dann als sicherheitlich unbedenklich eingestuft werden kann (DMT, 1999):

- Verfügbarkeit eines höherwertigen Branderkennungs- und -meldesystem
- Vorhandensein einer ständig besetzten Sicherheitswarte
- kurze Anfahrtswege der Feuerwehr
- Verkürzung der Fluchtwegabstände
- Vorhandensein von Standstreifen
- Vorhandensein von Pannennischen.

Parameter	Tunnelbereich Süd-West/Tunnel Süd-Nord	
	Daten	Bewertung (DMT, 1999)
Länge	360/340 m	--
Tunneltyp	II (Rechteckquerschnitt, 11.75 m)	--
Längsneigung	1 %	niedrig
Verkehrsleistung	ca. $2 \times 10^6$ Kfz-km/a	mittel
LKW-Anteil	2 %	niedrig
Gefahrguttransporte	nicht zugelassen	niedrig
Verkehrszustand	täglich stockender Verkehr	hoch
Verkehrsart	Richtungsverkehr	niedrig
<b>Gesamtgefährdungspotenzial</b>		<b>mittel</b>

Tab. 5.1: Bewertung des Gefährdungspotenzials für die Süd-West- und Süd-Nord-Tunnel (1. BA) nach DMT (1999) unter der Annahme täglich stockenden Verkehrs und nicht zugelassener Gefahrguttransporte

Nach der Bewertung in **Tab. 5.1** ist für die betrachteten Tunnel laut DMT (1999) ein mittleres Sicherheitspotenzial gegeben.

Unter der Annahme „ausnahmsweise stockender Verkehr“ im Tunnel würde für den 1. BA ein **geringes** Gesamtgefährdungspotenzial resultieren.

### 5.3 Bewertung des Gefährdungs- und des Sicherheitspotenzials unter Berücksichtigung des 2. Bauabschnittes

In der **Tab. 5.2** ist die qualitative Bewertung des Gefährdungs- und des Sicherheitspotenzials entsprechend den Angaben in DMT (1999) unter Berücksichtigung des 2. BA angegeben.

Parameter	Tunnelbereich Nord-Ost	
	Daten	Bewertung (DMT, 1999)
Länge	520 m	--
Tunneltyp	II (Rechteckquerschnitt, 11.75 m)	--
Längsneigung	8 %	hoch
Verkehrsleistung	ca. $4 \times 10^6$ Kfz-km/a	mittel
LKW-Anteil	2 %	niedrig
Gefahrguttransporte	nicht zugelassen	niedrig
Verkehrszustand	täglich stockender Verkehr	hoch
Verkehrsart	Richtungsverkehr	niedrig
<b>Gesamtgefährdungspotenzial</b>		<b>mittel</b>

Tab. 5.2: Bewertung des Gefährdungspotenzials für den Nord-Ost-Tunnelabschnitt (2. BA) nach DMT (1999) unter der Annahme täglich stockender Verkehr und nicht zugelassene Gefahrguttransporte

Nach der Bewertung in **Tab. 5.2** ist für den betrachteten Tunnel laut DMT (1999) ebenfalls ein mittleres Sicherheitspotenzial gegeben. Dies gilt auch für die anderen Tunnelabschnitte.

Unter der Annahme „ausnahmsweise stockender Verkehr“ im Tunnel resultiert für den 2. BA für alle Tunnelabschnitte ein **geringes** Gesamtgefährdungspotenzial.

### 5.4 Maßgebende Brandgröße

Der Brand im Tunnel beeinflusst wesentlich die Auslegung der Lüftungsanlage. In der Regel ist für die Dimensionierung einer Rauchabsaugung bzw. der Brandfalllüftung ein LKW-Brand zugrunde zu legen. Die Auswirkungen eines PKW-Brandes sind dazu vergleichsweise gering, während ein Schutz gegen den Brand eines Benzintankwagens nur mit einem außerordentlichen Aufwand und nicht mit letzter Sicherheit möglich ist.

Der Bemessungsbrand für die Dimensionierung der Brandfall-Lüftung hat eine Brandstärke von mindestens 30 MW bei einer Rauchmenge von 80 m<sup>3</sup>/s. Abhängig von der im Tunnel zu erwartenden LKW-Fahrleistung können höhere Brandleistungen für die Dimensionierung erforderlich sein. Mit den für den hier betrachteten Tunnel prognostizierten Verkehrsmengen (Abschnitt 3.2) erhält man weniger als 500 LKW x km/Tag. Aus diesem Wert folgt gemäß RABT (2006) eine Brandleistung von 30 MW.

Die zugehörige Rauchgasmenge nach RABT (2006) beträgt 80 m<sup>3</sup>/s.

## 5.5 Lüftungssysteme im Brandfall

In kurzen Tunneln macht eine Beeinflussung mittels Ventilatoren wegen der Ausbreitungsgeschwindigkeit des Rauches wenig Sinn. Deshalb ist nach RABT (2006) für Tunnel im Richtungsverkehr mit ausnahmsweise stockendem Verkehr bei Tunnellängen bis 600 m und bei täglich stockendem Verkehr bei Tunnellängen bis 400 m eine natürliche Längslüftung für den Brandfall ausreichend. Dies ist somit für die zu betrachtenden Tunnel im 1. Bauabschnitt selbst im ungünstigen Fall gegeben.

Im zweiten Bauabschnitt wird durch die zusätzliche Installation des Nord-Süd-Tunnels mit der Verbindung zum Süd-West-Tunnel ein komplexes Tunnelsystem aus mindestens vier miteinander verbundenen Tunnelabschnitten geschaffen. Die längste durchfahrbare Strecke beträgt 520 m (Nordeinfahrt und Ausfahrt Ost-Rampe Immermannstraße). Damit ist diese Länge größer, als durch die RABT (2006) für eine natürliche Längslüftung bei Tunneln mit täglich stockendem Verkehr empfohlen. Auch ist diese Tunnellänge nur wenig kürzer als für natürliche Längslüftung bei ausnahmsweise stockendem Verkehr empfohlen.

Wegen der bereits diskutierten zusätzlichen Besonderheiten (Tiefgaragenein- und -ausfahrten, miteinander verbundene Tunnelabschnitte) war im hier vorliegenden Fall eine Einzelfallprüfung für den 1. Bauabschnitt durchzuführen. Auch sollte bei der Auslegung des 1. Bauabschnittes die mögliche Erweiterung im 2. BA bereits mitberücksichtigt werden. Aspekte des Immissionsschutzes werden bei der Wahl des Lüftungssystems ebenfalls beachtet.

Für die geplanten Tunnel sind je nach Risikoabwägung vier Lüftungsarten möglich:

- Natürliche Lüftung
- Längslüftung
- Rauchabsaugung über eine große Absaugöffnung

- Rauchabsaugung über Zwischendecke mit steuerbaren Absaugöffnungen.

Im Brandfall breitet sich der heiße Rauch zunächst mit einer Geschwindigkeit von mehreren m/s als eine einige Meter dicke Schicht entlang der Tunneldecke vom Brandort aus. Über der Fahrbahn kann sich während der ersten 5 bis 10 Minuten ab Vollbrand eine ca. 2 m hohe saubere Luftschicht halten. Voraussetzung dafür ist jedoch eine geringe Strömungsgeschwindigkeit der Tunnelluft. Im Normalfall ist im Tunnel mit Richtungsverkehr die Strömungsgeschwindigkeit so hoch, dass mit einer Rauchsichtung nicht gerechnet werden kann.

Um eine Luft-/Rauchsichtung in der Phase 1 (Selbstrettung) zu erhalten, muss die Längsströmung in der gleichen Richtung wie vor Brandausbruch weiterlaufen, möglichst mit einer Geschwindigkeit am Brandort von nicht mehr als 1.5 m/s.

In der Phase 2 soll die Lüftung die Brandbekämpfung unterstützen. Im Fall der Längslüftung geschieht dies durch einseitigen Rauchabtrieb vom Brandort. Hierzu muss die Lüftung eine Mindestgeschwindigkeit der Längsströmung in Höhe der kritischen Längsgeschwindigkeit gewährleisten, die in der RABT (2006) angegeben ist. Bei einer zu Grunde gelegten Brandleistung von 30 MW beträgt die kritische Geschwindigkeit im vorliegenden Fall 2.3 m/s.

Auswertungen von Modellrechnungen (DMT, 1999) für kurze Tunnel (400 m) zeigten bei einem Brand (5 MW) in Tunnelmitte, dass während der Vollbrandphase eine rauchfreie Schicht bis zur Hälfte der Tunnelhöhe (ca. 2.5 m) sichtbar ist. Es kommt weiterhin zu einem Einzug von Frischluft über das Tunnelportal, so dass die Brandschwaden im wesentlichen unter der Firste verbleiben und am Portal nach oben abziehen können. Liegt der Brandherd nicht in der Tunnelmitte, so kommt es zu einer starken Ungleichverteilung der Rauchgase. Auf der Seite des brandfernen Portales ist in Richtung Brandherd von einer Zone intensiver Verwirbelung der Brandschwaden im Tunnelquerschnitt auszugehen. Auf der Seite des brandnahen Portales kommt es zu einem ungehinderten Frischlufteinzug, so dass sich hier eine rauchfreie Schicht bis zu einer Höhe von etwa 3 bis 3.5 m einstellen kann.

## **6 LÜFTUNGS AUSLEGUNG FÜR DEN 1. BAUABSCHNITT OHNE BERÜCKSICHTIGUNG DES 2. BAUABSCHNITTES**

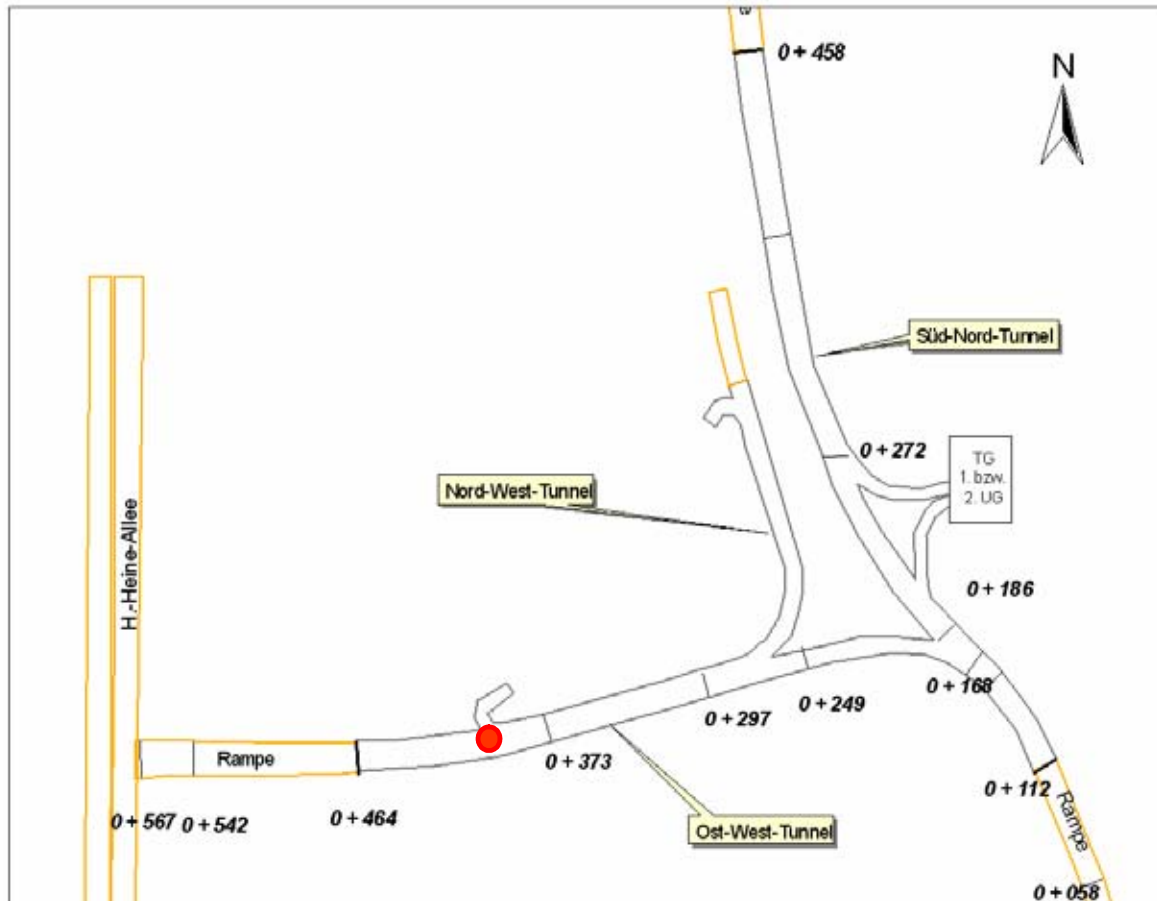
### **6.1 Verkehrslösung gem. Ratsbeschluss vom 13.12.2007**

Wie in Abschnitt 5.5 erläutert, ist nach RABT 2006 bei Tunnellängen kleiner 400 m (täglich stockender Verkehr) bzw. 600 m (ausnahmsweise stockender Verkehr) eine natürliche Längslüftung für den Brandfall ausreichend. Die längste durchgängig geschlossene Tunnelstrecke (von Südeinfahrt bis Westausfahrt bzw. von Südeinfahrt bis Nordausfahrt) ist 360 m bzw. 340 m lang. Diese Strecke ist somit kleiner als 400 m und deutlich kleiner als 600 m.

Die Risikobewertung (Abschnitt 5.2) hatte für die betrachteten Tunnel unter der Annahme regelmäßiger Verkehrsstaus im Tunnel ein mittleres Sicherheitspotenzial ergeben. Gefahrguttransporter werden nicht zugelassen. Unter der Annahme „ausnahmsweise stockender Verkehr“ ergab die Risikobewertung ein geringes Gefährdungspotential.

Im Folgenden werden verschiedene Brandfallszenarien diskutiert, um aufzuzeigen, wie sich die Fluchtwegsituation darstellen kann. Es sei darauf hingewiesen, dass den Szenarien keine Brandfallberechnungen zu Grunde liegen, sondern dass qualitativ auf Ergebnisse aus der Literatur (DMT, 1999) zurückgegriffen wurde.

**Brandfallszenario 1 (Worst case-Szenario):** Brand vor TG-Einfahrt, Wind aus westlichen Richtungen, Stau in allen Richtungen.



Verlauf:

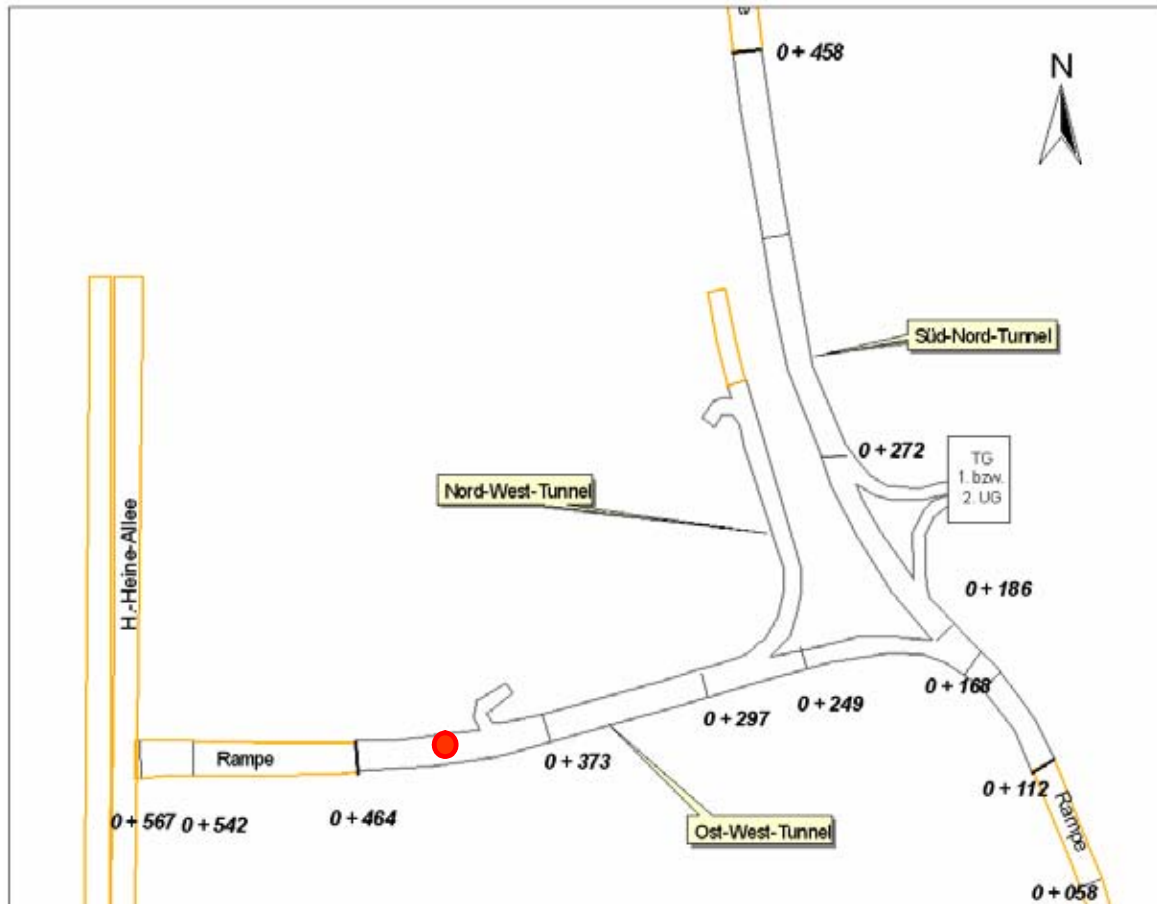
Vor dem Ereignis erzeugt der Kfz-Verkehr keine Luftströmung. Die Luftströmung im Tunnel stellt sich entsprechend des anliegenden Windes ein. Alle Tunnelabschnitte in Fahrtrichtung hinter dem Brandherd stauen sich mit Fahrzeugen, vor dem Brandherd stehen ebenfalls Fahrzeuge. Die Strömungsgeschwindigkeit im Tunnel ist kleiner als 2.3 m/s.

Ein Teil des Rauches wird gegen die gestauten Fahrzeuge zurückströmen können, der andere Teil über die gestauten Fahrzeuge hinweg aus dem Westportal entweichen. Auch der Süd-Nord-Tunnel kann verrauchen. Im Bereich des Brandes kann eine rauchfreie Schicht bis ca. 2.5 m Höhe durch Frischluftzufuhr vom Portal entstehen. Durch Abkühlen der Rauchgase wird mehrere Minuten nach Brandausbruch stromabwärts der Querschnitt vollständig verraucht sein.

Fluchtwege:

Freie Portalbereiche (z. B. Nordportal Nord-West-Tunnel ca. 250 m).

**Brandfallszenario 2:** Brand 50 m vor dem Westportal, Wind aus nicht westlichen Richtungen, flüssiger Verkehr vor Brandausbruch.



Verlauf:

Vor dem Ereignis erzeugt der Kfz-Verkehr eine Luftströmung in Richtung Westen mit ca. 2.5 m/s die vom äußeren Wind unterstützt wird. Tunnelabschnitte entgegen der Fahrtrichtung hinter dem Brandherd stauen sich mit Fahrzeugen, die Fahrzeuge vor dem Brandherd fahren aus.

Die Luftströmung wird durch die stehenden Fahrzeuge abgebremst und wird daher bald unter die kritische Geschwindigkeit von 2.3 m/s sinken. Ein Teil des Rauches wird gegen die gestauten Fahrzeuge zurückströmen können, der andere Teil aus dem Westportal entweichen. Auch der Süd-Nord-Tunnel kann verrauchen. Im Bereich des Brandes kann eine rauchfreie Schicht bis ca. 2.5 m Höhe durch Frischluftzufuhr vom Portal entstehen. Durch Abkühlen der Rauchgase wird mehrere Minuten nach Brandausbruch stromabwärts der Querschnitt vollständig verraucht sein.



Fluchtwege:

Freie Portalbereiche (z. B. Nordportal Nord-West-Tunnel ca. 250 m).

**Brandfallszenario 3:** wie Szenario 2 nur Wind aus West mit Geschwindigkeiten größer 2.3 m/s.

Verlauf:

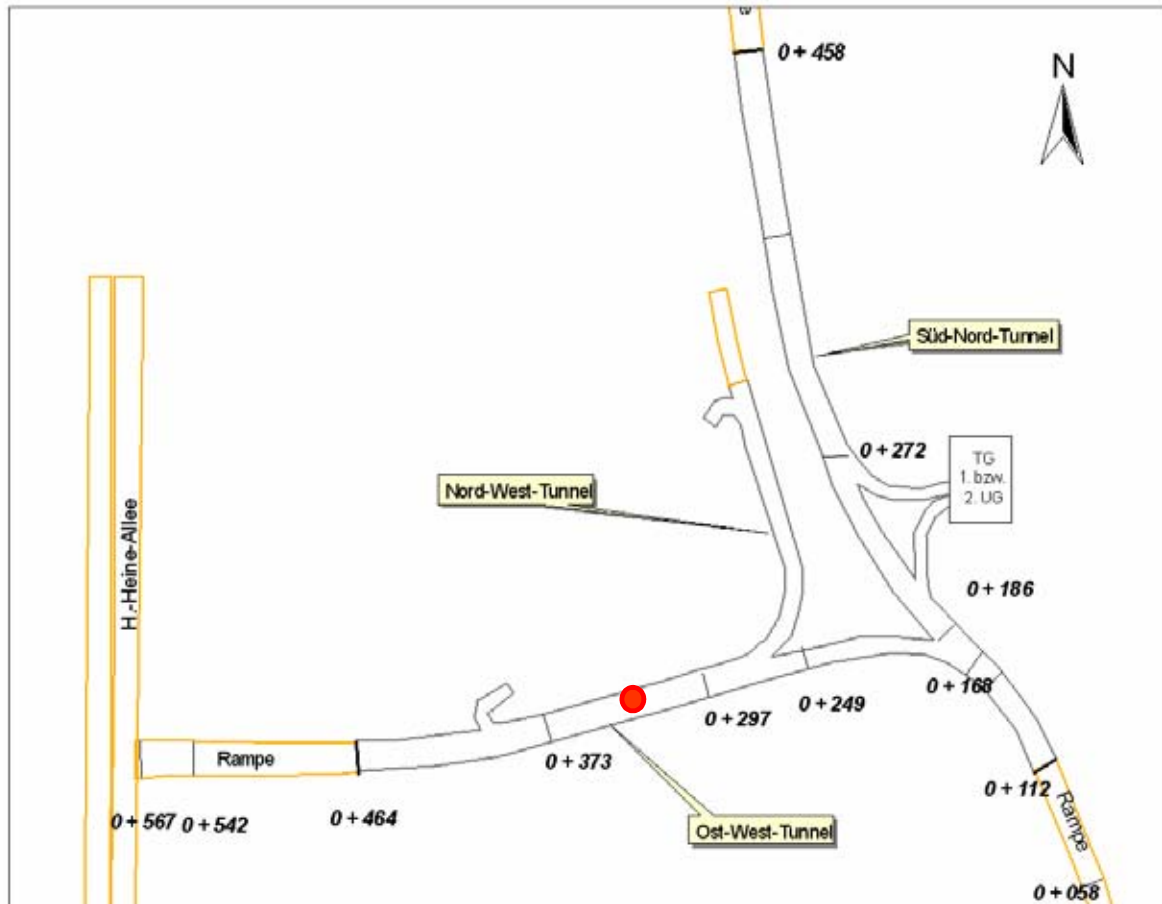
Vor dem Ereignis erzeugt der Kfz-Verkehr eine Luftströmung die vom äußeren Wind abgebremst wird. Die Strömungsgeschwindigkeit im Tunnel ist kleiner als 2.3 m/s. Tunnelabschnitte entgegen der Fahrtrichtung hinter dem Brandherd stauen sich mit Fahrzeugen, die Fahrzeuge vor dem Brandherd fahren aus.

Der Rauch strömt gegen die gestauten Fahrzeuge zurück. Auch der Süd-Nord-Tunnel kann verrauchen. Im Bereich des Brandes bleibt eine rauchfreie Schicht bis ca. 2.5 m Höhe, durch Abkühlen der Rauchgase wird mehrere Minuten nach Brandausbruch stromabwärts der Tunnelquerschnitt vollständig verraucht sein.

Fluchtwege:

Freie Portalbereiche (z. B. Nordportal Nord-West-Tunnel ca. 250 m).

**Brandfallszenario 4:** Brand ca. 50 m westlich Nord-West-Zufahrt, Wind aus westlichen Richtungen, flüssiger Verkehr vor Brandausbruch.



Verlauf:

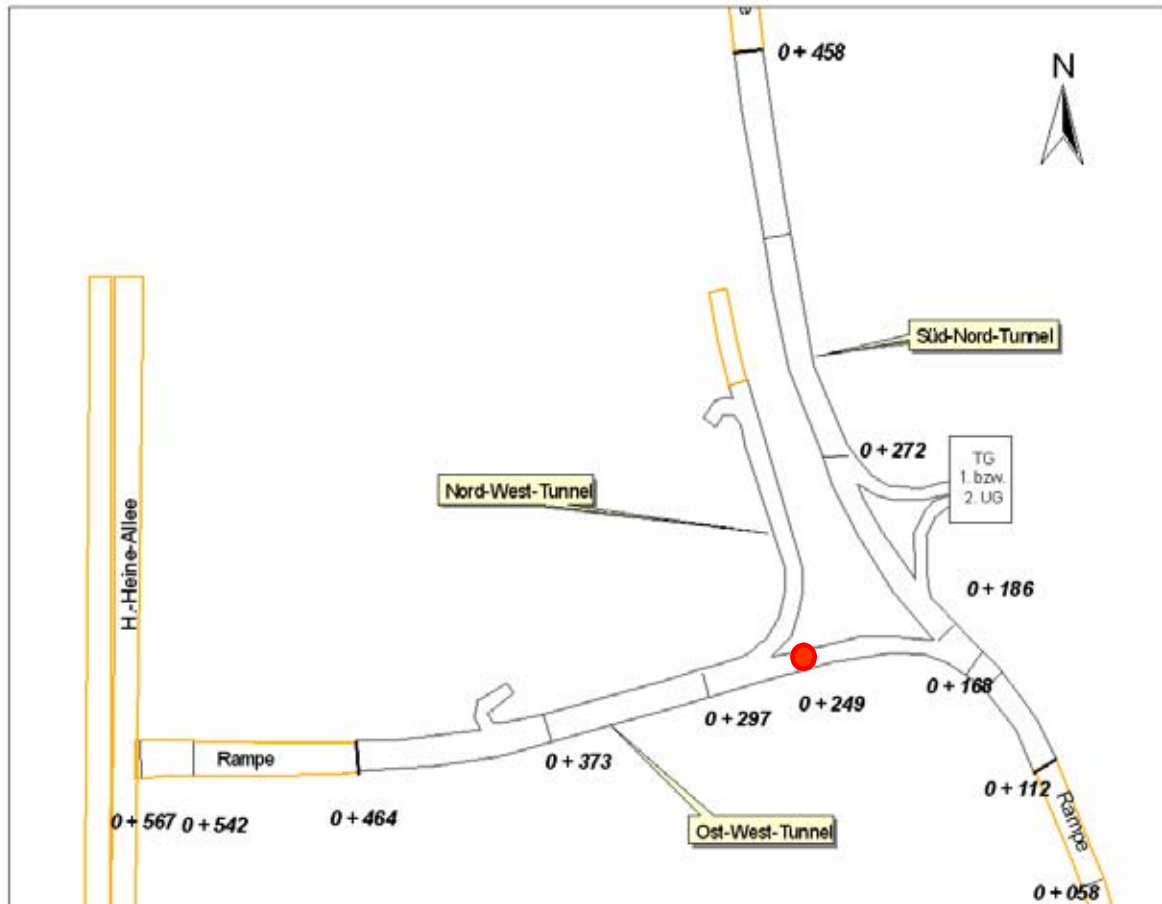
Vor dem Ereignis erzeugt der Kfz-Verkehr eine Luftströmung in Richtung Westen von ca. 2.5 m/s, die vom äußeren Wind abgebremst wird. Tunnelabschnitte entgegen der Fahrtrichtung hinter dem Brandherd stauen sich mit Fahrzeugen, die Fahrzeuge vor dem Brandherd fahren aus. Die Strömungsgeschwindigkeit im Tunnel ist kleiner als 2.3 m/s.

Rauch strömt zum Teil in Richtung gestauter Fahrzeuge. Auch der Nord-Süd-Tunnel kann verrauchen. Es ist zu erwarten, dass durch die Nähe des Brandes zum nächsten Portal die Rauchschichtung nur kurzzeitig erhalten bleibt.

Fluchtwege:

Freie Portalbereiche (max. 180 m).

**Brandfallszenario 5:** Brand in Ost-West-Verbundröhre, Wind aus westlichen Richtungen, flüssiger Verkehr vor Brandausbruch.



Verlauf:

Vor dem Ereignis erzeugt der Kfz-Verkehr eine Luftströmung in Richtung Westen von ca. 2.5 m/s, die vom äußeren Wind abgebremst wird. Tunnelabschnitte entgegen der Fahrtrichtung hinter dem Brandherd stauen sich mit Fahrzeugen, die Fahrzeuge vor dem Brandherd fahren aus. Die Strömungsgeschwindigkeit im Tunnel ist kleiner als 2.3 m/s.

Rauch strömt zum Teil in Richtung gestauter Fahrzeuge und auch in den Süd-Nord-Tunnel ziehen. Die Schichtung bleibt erhalten.

Fluchtwege:

Südportal (Entfernung kleiner als bei Szenario 3, max. 140 m).

**Brandfallszenario 6:** wie Szenario 5 nur Stau in allen Richtungen vor Brandausbruch

## Verlauf:

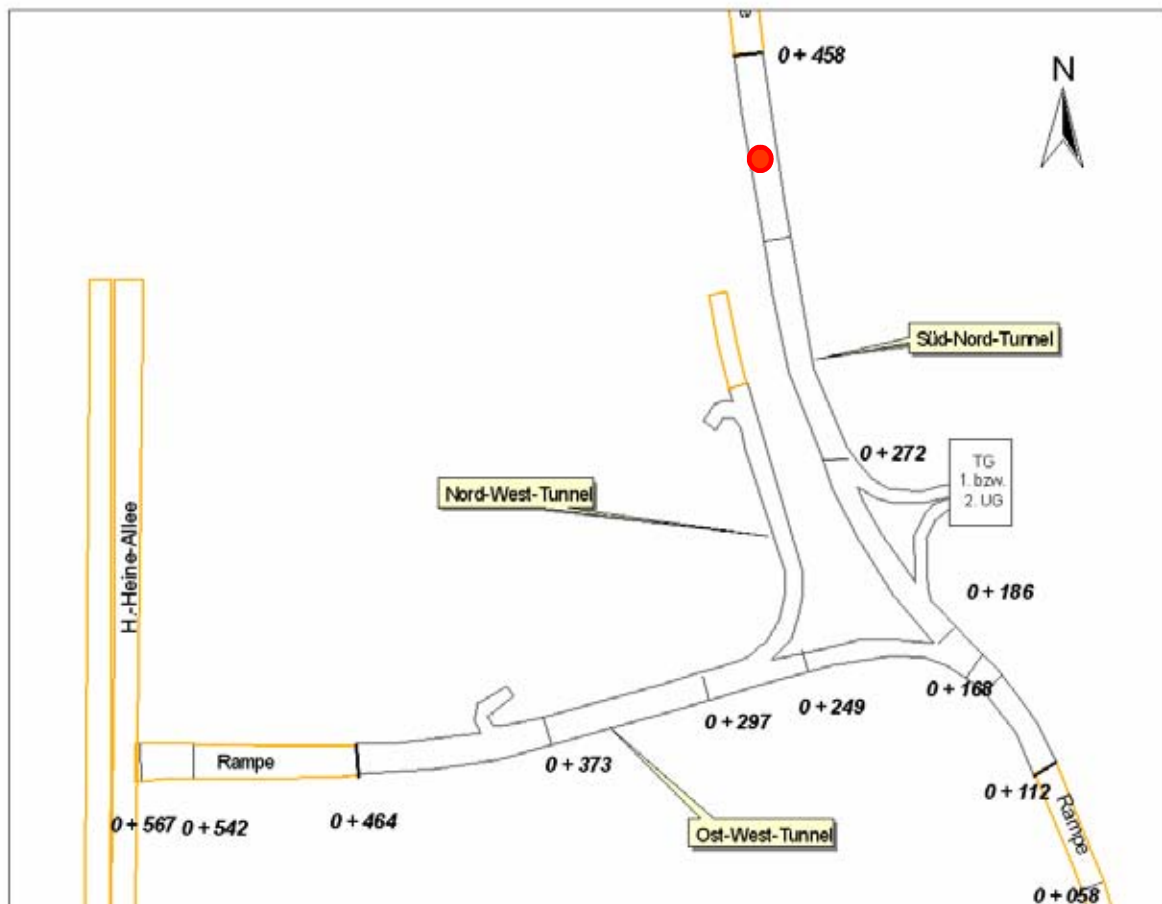
Vor dem Ereignis erzeugt der Kfz-Verkehr keine Luftströmung. Die Luftströmung im Tunnel stellt sich entsprechend des anliegenden Windes ein. Alle Tunnelabschnitte in Fahrtrichtung hinter dem Brandherd stauen sich mit Fahrzeugen, vor dem Brandherd stehen ebenfalls Fahrzeuge. Die Strömungsgeschwindigkeit im Tunnel ist kleiner als 2.3 m/s.

Der Rauch wird sich über die gestauten Fahrzeuge hinweg ausbreiten und kann auch in den Süd-Nord-Tunnel ziehen. Die Rauchschichtung bleibt erhalten.

## Fluchtwege:

Südportal, Westportal (max. 210 m).

**Brandfallszenario 7:** Brand ca. 50 m vor dem Nordportal des Süd-Nord-Tunnels, Wind aus nördlichen Richtungen, flüssiger Verkehr vor Brandausbruch.



Verlauf:

Tunnelabschnitte entgegen der Fahrtrichtung hinter dem Brandherd stauen sich mit Fahrzeugen, die Fahrzeuge vor dem Brandherd fahren aus. Die Strömungsgeschwindigkeit im Tunnel ist kleiner als 2.3 m/s. Rauch strömt zum Teil in Richtung gestauter Fahrzeuge. Im Bereich des Brandes bleibt eine rauchfreie Schicht bis ca. 2.5 m Höhe, durch Abkühlen der Rauchgase wird stromabwärts der Tunnelquerschnitt nach mehreren Minuten nach Brandausbruch vollständig verraucht sein.

Fluchtwege:

Südportal (max. 290 m), falls der Brandort näher am Nordportal liegt, kann die Weglänge zum Südportal auch mehr als 300 m betragen.

## 6.2 Zwischenlösung

Für den Fall, dass ein unterirdischer Vollanschluss der Tunnel an die Tiefgaragen am Gustaf-Gründgens-Platz nicht erfolgen kann, sondern dieser oberirdisch erfolgen muss, wurden vom Auftraggeber Verkehrszahlen zur Verfügung gestellt. Diese liegen im Süd-Nord-Tunnel 800 Kfz/d niedriger als in der bereits diskutierten Variante. Es entfallen die Ein- bzw. Ausfahrtrampen in die Tiefgarage aus bzw. in die Tiefgaragen. Im Nord-West-Tunnel und im Ost-West-Tunnel gibt es keine verkehrlichen Veränderungen. Im Regelbetrieb wirken sich diese Änderungen nicht relevant aus. Die bestehende Tiefgarage fällt in diesem Fall als Fluchtweg weg. Die Fluchtweglänge verlängert sich damit im ungünstigsten Fall auf mehr 300 m.

### Fazit für beide Varianten:

Es kann somit festgestellt werden, dass die Fluchtwege im Brandfall im Süd-Nord-Tunnel bei der Zwischenlösung mehr als ca. 300 m und in den anderen Tunneln weniger als 300 m betragen. Fluchtbereiche bei Tunnelängen größer/gleich 400 m sollten lt. RABT (2006) nicht weiter als 300 m auseinander liegen, das bedeutet Fluchtwegabstände von 150 m. Für kürzere Tunnel, wie im hier vorliegenden Fall, wird keine Vorgabe gemacht. In DMT (1999) wird ein Fluchtwegabstand von etwa 300 m als absolute Obergrenze angegeben. Der kann im ungünstigsten Fall im Süd-Nord-Tunnel in der Zwischenlösung erreicht bzw. sogar überschritten werden

Für den ersten Bauabschnitt wird deshalb ein zusätzlicher Fluchtweg ins Freie empfohlen. Dieser sollte etwa im Kreuzungsbereich des Nord-West-Tunnels mit dem Ost-West-Tunnel liegen und von allen Tunneln zugänglich sowie belüftet sein. Bei der Anlage dieses Rettungsweges sind die Randbedingungen des 2. BA mit zu berücksichtigen (siehe dazu auch Diskussion im Kapitel 7). Die Selbstrettungsphase kann dann ohne mechanische Tunnelentlüftung auskommen.

## 6.3 Einfluss der angeschlossenen Tiefgaragen auf die Tunnellüftung

### 6.3.1 Tiefgaragen im Zuge der Planungen Kö-Bogen unter MK2 und MK3

Bei dieser Tiefgaragenanbindung wird in Absprache mit dem Auftraggeber davon ausgegangen, dass die Luftqualität in den Tunneln durch den Betrieb und gegebenenfalls durch Brand in den Tiefgaragen durch ein eigenständiges Brandschutzsystem in den Tiefgaragen nicht negativ beeinflusst wird.

### 6.3.2 Tiefgaragen am Gustaf-Gründgens-Platz

Am Gustaf-Gründgens-Platz gibt es die Tiefgaragen Dreischeidenhaus mit 325 Stellplätzen auf 2 Ebenen sowie die Tiefgarage Schauspielhaus mit 641 Plätzen auf 3 Ebenen. Im 1. BA ist es geplant, aus dem Süd-Nord-Tunnel in die Tiefgarage Ebene -1 einzufahren und aus -2 auszufahren. Die Anschlüsse für den 2. BA werden vorgesehen. Diese sollen dann im neuen Tunnel Nord-Süd in die -3-Ebene einfahren und aus der -2-Ebene ausfahren.

Die Tiefgarage Schauspielhaus verfügt über eine mechanische Be- und Entlüftung separat für jedes Untergeschoss. Diese Abluftanlage wird bei Überschreitung eines CO-Schwellenwertes eingeschaltet.

#### 6.3.2.1 Zwischenlösung

In dieser Variante erfolgt keine Anbindung an die Tunnel. Somit gibt es keinen Einfluss auf die Tunnellüftung.

#### 6.3.2.2 Verkehrslösung vom 13.12.2007

Im Regelbetrieb kann es im 1. BA zu einem zusätzlichen Übertritt von Schadstoffen aus dem Süd-Nord-Tunnel in die Tiefgarage kommen. Die Berechnungen zum Regelbetrieb haben allerdings gezeigt, dass die CO-Konzentrationen auf einem sehr niedrigen Niveau liegen werden. Der Einfluss wird deshalb sehr gering sein.

Brand in den Tiefgaragen stellt für die Luftqualität in den Tunneln kein Problem dar, weil in den Tiefgaragen die Brandfallentlüftung anspringt und die Brandgase absaugt. Ein Übertritt in die Tunnel kann somit verhindert werden. Die Einfahrt in die Tunnel und insbesondere in die Tiefgaragen Dreischeidenhaus und Schauspielhaus muss allerdings bei Brand in den Tiefgaragen verhindert werden (Schrankenanlage).

Bei Brand in den Tunneln ist ein Übertritt der Brandgase in die Tiefgaragen möglich. Zwei wesentliche Möglichkeiten, um dies zu verhindern, sollten dazu geprüft werden:

- 1) Es werden an den Zu- bzw. Ausfahrten zu den Tiefgaragen Brandschutztore installiert, die im Brandfall automatisch geschlossen werden. Bei der Lage der Brandschutztore ist darauf zu achten, dass bei Brand im Süd-Nord-Tunnel direkt vor einer Tiefgaragenein- bzw. Ausfahrt für Personen in den Zu- und Abfahrten eine Flucht ins Freie möglich ist (z. B.

durch separate Brandschutztüren neben den Brandschutztooren, die per Hand geöffnet werden können und sich selbständig verschließen). Oder als alternative Lösung:

- 2) In den Tiefgaragen wird auf allen Ebenen nur die Zulüftung eingeschalten. Dadurch baut sich ein Überdruck auf, der das Eindringen der Brandgase in die Tiefgaragen verhindert. Dazu müsste die Branderkennung im Tunnel mit der Lüftungsanlage in den Tiefgaragen gekoppelt werden. Bei Brand im Bereich der Tiefgaragenzu- bzw. -ausfahrten kann allerdings bei dieser Methode die Rauchsichtung negativ beeinflusst werden.



## **7 LÜFTUNGS AUSLEGUNG UNTER BERÜCKSICHTIGUNG DES 2. BAUABSCHNITTES**

### **7.1 Mögliche Lüftungsarten und Lüftungssteuerung**

Im zweiten Bauabschnitt wird durch die zusätzliche Installation des Nord-Süd-Tunnels mit der Verbindung zum Ost-West-Tunnel ein komplexes Tunnelsystem aus mindestens vier miteinander verbundenen Tunnelabschnitten geschaffen. Die Fluchtwege im Ost-West-Tunnel verlängern sich deutlich. Die längste durchfahrbare Strecke beträgt 520 m (Nordeinfahrt und Ausfahrt Ost-Rampe Immermannstraße). Damit ist die Länge des Nord-Süd-Tunnels größer, als durch die RABT (2006) für eine natürliche Längslüftung bei Tunneln mit täglich stockendem Verkehr empfohlen. Auch ist diese Tunnellänge nur wenig kürzer als für natürliche Längslüftung bei ausnahmsweise stockendem Verkehr empfohlen. Im folgenden werden die verschiedenen grundsätzlich in Frage kommenden Möglichkeiten einer Tunnelentlüftung im Brandfall diskutiert:

#### **Längslüftung mittels Strahlventilatoren**

Für Tunnel bei Richtungsverkehr mit täglich stockendem Verkehr wird von der RABT (2006) für Tunnellängen zwischen 400 und 600 m bzw. je nach Risikoanalyse auch bis 1200 m eine mechanische Längslüftung empfohlen. In der vorliegenden Planung zum 2. Bauabschnitt sei allerdings auf Folgendes hingewiesen:

Bei einem solch komplexen Tunnelsystem weitgehend kurzer miteinander verbundener Tunnelröhren ist eine sinnvolle Steuerung einer automatische Brandfalllüftung, wie sie in der Rettungsphase benötigt wird, sehr schwierig bzw. äußerst komplex. Sie ist neben dem Ort des Brandes vom Verkehrszustand und von den Strömungsgeschwindigkeiten und –Richtungen der Tunnelluft in den einzelnen Röhren abhängig, welche wiederum von den äußeren Windverhältnissen, dem Verkehrsfluss und der Vernetzung der Röhren abhängig sind. In kurzen Tunnelabschnitten macht die Strömungsbeeinflussung mittels Strahlventilatoren zudem wenig Sinn, weil die anfänglich vorhandene Rauchsichtung zumeist gestört wird und es schneller zu einem Verrauchen des gesamten Tunnelquerschnittes kommt als ohne Lüftung.

Eine Verbesserung der Situation während der Selbstrettungsphase durch den Einsatz von Strahlventilatoren und deren Steuerung durch automatische Brandprogramme wird daher als sehr problematisch angesehen. Um dennoch den Tunnelbenutzern ein zügiges Verlassen

der Tunnelstrecken von allen Positionen aus zu gewährleisten, wäre bei dieser Lösung z. B. ein zusätzlicher Fluchtweg etwa im Bereich der Kreuzung von Nord-Süd-Tunnel und Ost-West-Tunnel zu schaffen. Dieser Fluchtweg müsste aus allen dortigen Tunnelröhren zugänglich sein, ins Freie führen und im Brandfall rauchfrei gehalten werden können (Überdruck). Dadurch würden alle Fluchtweglängen im Brandfall aus allen Tunnelröhren kleiner als 200 m sein. Eine zusätzliche mechanische Lüftung in der Selbstrettungsphase (außer der Überdrucklüftung im Fluchtweg) wäre damit nicht notwendig.

In der Brandbekämpfungsphase kann der Einsatz von Strahlventilatoren bei manueller Schaltung hilfreich sein. Die notwendige Dimensionierung der Strahlventilatoren wird im Abschnitt 7.2 gegeben.

### **Rauchabsaugung über Zwischendecke mit steuerbaren Absaugöffnungen**

Hierbei könnte die Absaugung der Brandgase über eine Zwischendecke (Deckenkanal) mit einzelnen steuerbaren Absaugklappen im Abstand von 50 m bis 100 m erfolgen. Die Rauchabsaugung in der Nähe der Portale ist in der Regel nicht wirksam. Daher soll die Entfernung zwischen Portal und der nächsten Absaugöffnung lt. RABT (2006) mindestens 200 m betragen. Die Absaugzone über dem Brand erstreckt sich in der Regel auf einer Länge von 200 m bis 300 m, abhängig von den Strömungsverhältnissen im Tunnel.

Wegen der im Wesentlichen kurzen Tunnelabschnitte im vorliegenden Fall verbleiben nur wenige Bereiche, in denen solch eine Art der Entlüftung effektiv arbeiten kann. Der Abluftkamin könnte zentral im Kreuzungsbereich des Nord-Süd-Tunnels mit dem Ost-West-Tunnel gelegen sein mit Anschluss an den Nord-West-, Nord-Süd- und Süd-Nord-Tunnel.

In den Tunnelabschnitten wären Deckenkanäle vorzusehen (lichte Höhe 1.9 m), die Klappen sollten einzeln ansteuerbar sein und jeweils einen wirksamen Strömungsquerschnitt zwischen 2 m<sup>2</sup> und 5 m<sup>2</sup> haben.

Vorteil dieser Variante der Brandfalllüftung gegenüber dem Einsatz von Strahlventilatoren ist die Möglichkeit einer einfacheren situationsangepassten automatischen Steuerung. Auch wird die Rauchsichtung nur unwesentlich beeinflusst. Nachteil sind die höheren Kosten für die Installation der Zwischendecken, der Absaugklappen und des Abluftkamines.

Um den Tunnelbenutzern ein zügiges Verlassen der Tunnelstrecken von allen Positionen aus zu gewährleisten, wäre auch bei dieser Lösung der zuvor diskutierte zusätzliche Flucht-

weg nötig. Dadurch würden alle Fluchtweglängen im Brandfall aus allen Tunnelröhren kleiner als 200 m sein.

### **Rauchabsaugung über eine zentrale Punktabsaugung**

Bei dieser Art der Brandlüftung könnte die Absaugung an einer Stelle erfolgen. Zwischendecken würden nicht benötigt.

Auch hier könnte der Abluftkamin zentral im Kreuzungsbereich des Nord-Süd-Tunnels mit dem Ost-West-Tunnel gelegen sein mit Anschluss an den Nord-West-, Nord-Süd- und Süd-Nord-Tunnel.

Vorteil dieser Variante gegenüber der Variante mit Strahlventilatoren sind die einfache Brandfallsteuerung sowie ggf. auch die Verwendung im Regelbetrieb zur Beeinflussung der Immissionssituation an den Portalen. Nachteil sind wiederum die höheren Investitionskosten, die allerdings geringer sind als bei der Variante mit Rauchabsaugung über Zwischendecke und steuerbare Absaugöffnungen. Nachteil gegenüber der Variante mit Rauchabsaugung über Zwischendecke und steuerbaren Absaugöffnungen ist die nicht konkret auf den Brandort ausgerichtete Absaugung durch nur eine Absaugstelle. Dies kann allerdings dadurch verbessert werden, dass regelbare Jalousien vorgesehen werden, um die Abluft nur aus den entsprechend wählbaren Tunneln abzusaugen.

Um den Tunnelbenutzern ein zügiges Verlassen der Tunnelstrecken von allen Positionen aus zu gewährleisten, wäre auch bei dieser Lösung der zuvor diskutierte zusätzliche Fluchtweg zu schaffen. Dadurch würden alle Fluchtweglängen im Brandfall aus allen Tunnelröhren nicht viel länger als 200 m sein.

Unter Abwägung der genannten Gesichtspunkte wird empfohlen, folgende Varianten der Brandfalllüftung weiterzuverfolgen:

Die Selbstrettungsphase kann ohne mechanische Tunnelentlüftung auskommen, wenn ein zusätzlicher, von allen Tunnelröhren zugänglicher, belüfteter Rettungsweg ins Freie geschaffen wird.

Die Brandbekämpfungsphase kann mit der Installation von reversiblen Strahlventilatoren unterstützt werden, die durch die Feuerwehr manuell bedient werden. Die Dimensionierung der Strahlventilatoren wird im folgenden Kapitel vorgenommen.

Alternativ zu den Strahlventilatoren könnte für die Brandbekämpfungsphase eine zentrale Punktabsaugung mit regelbaren Jalousien vorgesehen werden. Diese Punktabsaugung könnte auch im Regelbetrieb zur Beeinflussung der Immissionssituation an den Portalen genutzt werden.

Es bestehen somit mehrere Möglichkeiten für eine Lüftung der Tunnelanlage. Die Festlegung der Lüftungsvariante sowie weitere Details sollten im Rahmen der weiteren Planungen mit der Feuerwehr und den zuständigen Stellen der Stadt Düsseldorf abgestimmt werden.

## **7.2 Lüftungsdimensionierung für mechanische Längslüftung mittels Strahlventilatoren**

In der Phase 2 soll die Lüftung die Brandbekämpfung unterstützen. Im Fall der Längslüftung geschieht dies durch einseitigen Rauchabtrieb vom Brandort. Hierzu muss die Lüftung eine Mindestgeschwindigkeit der Längsströmung in Höhe der kritischen Längsgeschwindigkeit gewährleisten, die in der RABT (2006) angegeben ist. Bei einer zu Grunde gelegten Brandleistung von 30 MW beträgt die kritische Geschwindigkeit im vorliegenden Fall 2.3 m/s.

Im Folgenden werden die für mechanische Längslüftung notwendigen technischen Anforderungen quantifiziert. Auf Grund der prognostizierten Zuluftmengen (Kap. 4) ist im Regelbetrieb auch bei Stau keine mechanische Entlüftung notwendig. Die Anforderungen an die Lüftungskapazität werden daher durch die Ausnahmesituationen Brandfall festgelegt.

Neben den äußeren Einflüssen Winddruck und Auftrieb wirken die stillstehenden Fahrzeuge im Tunnel und Reibungsverluste an Tunnelportalen und -wänden im ungünstigsten Fall der Luftströmung im Tunnel entgegen. Im Brandfall kommt dazu noch der Auftrieb durch die heißen Rauchgase. Die Auswirkungen dieser Einflüsse auf die erforderlichen Schubkräfte der Ventilatoren werden nachfolgend abgeschätzt.

Der Wind wirkt als äußere Kraft auf die Tunnelluft. Im Gegensatz zum pauschalen Ansatz in DMT (1999) von 50 Pa Winddruck bzw. 9 m/s Windgeschwindigkeit werden die lokalen Windverhältnisse (siehe Abschnitt 3.5) hier berücksichtigt. Zur Ermittlung des Winddrucks wird an den Portalen eine Windgeschwindigkeit von 6 m/s angesetzt, jeweils in 10 m Höhe. Um den Einfluss pessimistisch abzuschätzen, werden diese Windgeschwindigkeiten auf eine Referenzhöhe von 5 m über Grund umgerechnet. Im Fall der zu betrachtenden Tunnel wird unter diesen Voraussetzungen entsprechend den o. a. Angaben ein zu berücksichtigender Winddruck von 15 Pa (Tunnel Süd-Nord) berechnet.

Die Wirkung des Auftriebs auf Grund einer jahreszeitlich variierenden Temperaturdifferenz zwischen Tunnelluft und Atmosphäre wird entsprechend DMT (1999) angesetzt. Auch im Brandfall wirkt der Auftrieb der heißen Rauchgase in Abhängigkeit von der Längsneigung des Tunnels. Die im Einzelnen berücksichtigten Werte sind im Abschnitt 7.2.1 angegeben.

### 7.2.1 Erforderlicher Schub der Ventilatoren bei Längslüftung

Der von den Strahlventilatoren aufzubringende Schub ist im Brandfall abhängig von der mindestens zu erreichenden Strömungsgeschwindigkeit der Tunnelluft. In die Berechnung gehen die folgenden Größen ein: freier Tunnelquerschnitt, die Längsneigung, die Luftdichte, die Widerstandsbeiwerte des Tunnels und der Fahrzeuge im Tunnel, die Geschwindigkeit der Fahrzeuge und der von außen wirkende Winddruck. Die Schubkraft  $S$  in [N] errechnet sich nach:

$$S = A \cdot (\Delta p_F + \Delta p_T + \Delta p_W + \Delta p_A) + F_S$$

mit:

$$\Delta p_F = M \cdot L/A \cdot b \cdot (c_w T_{PKW} \cdot A_{PKW} \cdot n_{PKW} + c_w T_{LKW} \cdot A_{LKW} \cdot n_{LKW}) \cdot \rho/2 \cdot (v \pm u_T)^2$$

$$\Delta p_T = (1 + \zeta_E + \lambda \cdot L/D_h) \cdot \rho/2 \cdot u_T^2$$

$$\Delta p_W = \rho/2 \cdot u_W^2$$

$$\Delta p_A = L \cdot \rho \cdot g \cdot \Delta T/T \cdot i$$

$$F_S = c_P \cdot \rho/2 \cdot u_S^2$$

wobei

$\Delta p_F$  Druckverlust durch den Strömungswiderstand der Fahrzeuge je Fahrstreifen [Pa]

$\Delta p_T$  Druckverlust durch den Strömungswiderstand des Tunnels [Pa]

$\Delta p_W$  Winddruck [Pa]

$\Delta p_A$  Druckdifferenz durch Auftrieb [Pa]

$F_S$  Strömungswiderstand durch Verkehrsschild [N]

mit den in Abschnitt 3 gegebenen Daten und

$L$  Tunnellänge [km]

$M$  Fahrzeugdichte je Fahrstreifen [Kfz/km]

$n_{PKW}$  Anteil PKW an Kfz je Fahrstreifen

$n_{LKW}$  Anteil LKW an Kfz je Fahrstreifen

$b$  Reduktionsfaktor des Strömungswiderstandes der Kfz bei hoher Verkehrsdichte

$v$  Fahrzeuggeschwindigkeit [m/s]

$u_T$	Strömungsgeschwindigkeit der Tunnelluft [m/s]
$u_W$	Windgeschwindigkeit in 10 m Höhe über Grund [m/s]
$u_S$	Strömungsgeschwindigkeit an Verkehrsschildern [m/s]

Bei der Berücksichtigung von Verkehrsschildern wird derzeit davon ausgegangen, dass diese jeweils mittig zwischen zwei Strahlventilatoren angebracht werden und möglichst nur einen geringen Einfluss (z. B. durch Schrägstellen) auf die Strömungssituation im Tunnel haben. Deren Einfluss auf die Längsströmung wird deshalb vernachlässigt.

Der in technischen Datenblättern angegebene Standschub wird von einem im Freien aufgestellten Ventilator bei ruhender Luft erzeugt. Ist ein Ventilator im Tunnel installiert, so wirken der Wandinfluss und die Tunnelluftströmung schubmindernd. Der ebenfalls schubmindernde Einfluss von Verkehrsschildern, Beleuchtung und Signale im Tunnel kann bei Einhaltung ausreichender Abstände vermieden werden. Der reale Schub  $S_R$  eines Strahlventilators ergibt sich aus:

$$S_R = 1 / k * (1 - u_T / u_V) * S_N$$

wobei

$S_N$	Standschub [N]
$u_V$	Strahlaustrittsgeschwindigkeit des Ventilators [m/s]
$k$	Wandverlustfaktor (je nach Installation des Ventilators 1.1...1.3) [-]

### 7.2.2 Brandfall im Tunnel

Für den Brandfall wurden die von den Ventilatoren zu erbringenden Schubkräfte getrennt für die Tunnelabschnitte Süd-Nord, Nord-Ost und Süd-West ermittelt. Die Berechnungen sind im Anhang A3 aufgeführt.

Die Verkehrsbelegung entspricht der in Tabelle 6 der RABT (2006) angegebenen Verkehrsdichte bei Stillstand in „Stadttunneln“. Dabei wurde entsprechend RABT (2006) angenommen, dass die Tunnel zu 75 % mit Fahrzeugen belegt sind und die übrigen Fahrzeuge den jeweiligen Tunnel verlassen können.

Die maßgebende Brandgröße wurde entsprechend RABT (2006) auf 30 MW mit einer Rauchmenge von 80 m<sup>3</sup>/s angesetzt (vgl. Abschnitt 5.4). Die von den Ventilatoren zu erzeugende Strömungsgeschwindigkeit im Tunnel wurde entsprechend der o.g. kritischen Luftge-

schwindigkeit angesetzt. Der damit erreichte Volumenstrom ist ausreichend, die o. g. Rauchmenge abzuführen.

Im Brandfall wirkt der Auftrieb der heißen Rauchgase in Abhängigkeit von der Längsneigung des Tunnels. Demnach ist im maßgebenden Brandfall eine durch Auftrieb erzeugte Druckdifferenz von 6 Pa bzw. 9 Pa für die (fallenden) Tunnelröhren Fahrtrichtung West (Ost-West-Tunnel) bzw. Süd (Nord-Ost-Abschnitt) zu berücksichtigen. In der steigenden Tunnelröhre (Süd-Nord-Tunnel) unterstützt der Auftrieb die Lüftung. Da unter Umständen der Auftrieb bzw. die Temperaturerhöhung geringer ausfallen können, wird für die Fahrtrichtung Nord konservativ ohne Auftrieb gerechnet. Die Ergebnisse für den benötigten Schub je Tunnelröhre im Brandfall unter ungünstigen Bedingungen lauten:

- Süd-Nord-Tunnel: bis zu 1 700 N Schubkraft
- Ost-West-Tunnel: bis zu 1 700 N Schubkraft
- Nord-Süd-Tunnel: bis zu 4 700 N Schubkraft

Dabei wurde vorausgesetzt, dass Einbauten im Tunnel wie Hinweisschilder, Kabelschächte u. a. möglichst klein gehalten bzw. in Wände, Decke oder Boden versenkt werden. Die Wände sollen glatt gestaltet werden, um die Reibungsverluste zu minimieren (Rauigkeiten  $\leq 2$  mm).

### 7.2.3 Auslegung für den Brandfall

Die benötigten Schubkräfte könnten z.B. mit je 6 reversierbaren Strahlventilatoren in den Süd-Nord- und Ost-West-Tunnel bzw. 8 reversierbaren Strahlventilatoren im Nord-Süd-Tunnel mit den nachfolgend angegebenen technischen Daten erbracht werden. Die genauen Details (Anzahl, Durchmesser etc.), sind im Zuge der weiteren Planung festzulegen. Die Ventilatoren können z. B. in drei Zweiergruppen in gleichen Abständen zueinander angeordnet werden. In PIARC (1999) wird ein Abstand von 80 bis 100 m vom Portal für die erste Ventilatorgruppe empfohlen.

Es wird empfohlen, zwischen dem Auslass der Strahlventilatoren und der wegweisenden Beschilderung ein Abstand von 80 bis 100 m einzuhalten. Zwischen der wegweisenden Beschilderung und Einlass der Strahlventilatoren kann der Abstand kleiner sein, sollte jedoch 20 m nicht unterschreiten.

Jeder Strahlventilator müsste bei den o.g. Randbedingungen bei einer Lufttemperatur von 15°C und einer Strömungsgeschwindigkeit der Tunnelluft von 3.0 m/s einen Realschub von 780 N (Nord-Süd-Tunnel) bzw. 450 N (Ost-West-Tunnel und Süd-Nord-Tunnel) aufbringen.

Dabei wurde berücksichtigt, dass im Brandfall eine der Ventilatorgruppen nicht betrieben werden kann und somit 4 bzw. 6 Ventilatoren die Lüftungsleistung erbringen müssen. In **Tab. 7.1** sind Beispiele für geeignete Strahlventilatoren angegeben.

Firma	Voith, Heidenheim		Turbo Lufttechnik GmbH, Zweibrücken		Zitron Nederland BV	
	T 90	T 112	TAS 9.0	TAS 10.0	JZR 7-18.5/2	JZR 12-22/4
Typ	T 90	T 112	TAS 9.0	TAS 10.0	JZR 7-18.5/2	JZR 12-22/4
Laufreddurchmesser [cm]	90	112	90	100	90	120
Antriebsleistung [kW]	22	37	19	32	18.5	22
Stand Schub [N]	640	1 170	600	960	640	954
Realschub [N]	540	976	500	800	540	780

Tab. 7.1: Beispiel für geeignete Strahlventilatoren bei Auslegung für den Brandfall

### 7.3 Lüftungsdimensionierung für mechanische Lüftung bei Punktabsaugung

Für die mechanische Lüftung mittels Punktabsaugung sind ein oder mehrere Axialventilatoren in einem zentralem Lüftungsbauwerk notwendig. Die notwendige Absaugmenge liegt bei mindestens 220 m<sup>3</sup>/s. Die Leistung kann erst spezifiziert werden, wenn die Längen und Querschnitte der Abluftkanäle festgelegt sind.



## 8 ZUSAMMENFASSUNG

Es ist vorgesehen, im Bereich des B-Planes 5477/123 (Kö-Bogen) durch die Errichtung von drei Tunneln, die miteinander verbunden sind, wesentliche Fahrbeziehungen, die heute oberirdisch verlaufen, zukünftig unterirdisch abzuwickeln. Betrachtet wurde hier die Verkehrslösung gemäß Ratsbeschluss vom 13.12.2007 und eine Zwischenlösung ohne Anschluss an die Tiefgaragen am Gustaf-Gründgens-Platz.

### 1. Bauabschnitt

Die Tunnel sind zwischen 100 und 340 m lang. Die längste überdeckelte Strecke, die ein Fahrzeug befahren kann ist 360 m lang (Südeinfahrt bis Westausfahrt bzw. Südeinfahrt). In die geplante Tiefgarage wird an einer Stelle im Ost-West-Tunnel in das 2. Untergeschoss eingefahren und aus dem 2. Untergeschoss in den Nord-West-Tunnels ausgefahren. Die Tunnel sollen im Richtungsverkehr befahren, Gefahrguttransporte sollen nicht zugelassen werden.

Es wurden Lüftungsberechnungen für den Regelbetrieb nach RABT (2006) durchgeführt. Dabei wurde auch der ungünstigste Fall „täglich stockender Verkehr“ angesetzt. Erwartungsgemäß gibt es wegen der geringen Tunnellängen keine Lüftungsprobleme im Regelbetrieb. Die natürliche Längslüftung ist hier ausreichend.

Es wurde eine Risikobewertung entsprechend DMT (1999) durchgeführt. Es wird für die Tunnel ein mittleres Risikopotenzial festgestellt, wenn von „täglich stockendem Verkehr“ ausgegangen wird. Der Ansatz „ausnahmsweise stockender Verkehr“ liefert ein geringes Risikopotenzial.

In kurzen Tunneln macht eine Beeinflussung der Strömung im Brandfall mittel Ventilatoren wegen der Ausbreitungsgeschwindigkeit des Rauches wenig Sinn (RABT, 2006, abschnitt 4.3.3). Die RABT (2006) empfiehlt deshalb für Tunnellängen bis 400 m (regelmäßig stockender Verkehr) bzw. bis 600 m (ausnahmsweise stockender Verkehr) natürliche Längslüftung. Alle geplanten Tunnel im ersten Bauabschnitt halten diese Werte ein. Auch die maximal unterirdisch befahrene Streckenlänge (360 m) liegt unterhalb dieser Werte.

Die betrachteten Brandfallszenarien zeigen für den ersten Bauabschnitt, dass die Selbstretungsphase (ca. 15 min) ohne mechanische Entlüftung auskommen kann, da in den meisten Fällen kurze Fluchtwege gegeben sind. Nur bei Brand im Süd-Nord-Tunnel in der Nähe des Nordportales können die Fluchtweglängen bei oder über 300 m liegen. Eine Vorgabe für

Fluchtwegabstandslängen bei Tunneln kürzer 400 m wird durch die RABT nicht gemacht. In DMT (1999) wird ein Fluchtwegabstand von etwa 300 m als absolute Obergrenze angegeben. Diese ist hier im ungünstigsten Fall nicht erfüllt. Deshalb wird die Anlage eines belüfteten Rettungsweges etwa im Kreuzungsbereich des Nord-West- mit dem Ost-West-Tunnel empfohlen, der von allen Tunneln zugänglich ist. Bei der Anlage dieses Rettungsweges sind die Randbedingungen des 2. BA mit zu berücksichtigen (siehe unten).

Es gibt keine Einschränkung der Anwendbarkeit der RABT bei Tunnelsystemen wie im vorliegenden Fall.

Falls die Tiefgaragen Dreischeidenhaus und Schauspielhaus durch unterirdische Zu- bzw. Ausfahrten mit den Tunneln verbunden werden, muss bei Brand in den Tunneln das Übertreten von Brandgasen in die Tiefgaragen verhindert werden. Dazu besteht die Möglichkeit der Installation von Brandschutztoren, die sich im Brandfall automatisch schließen, oder durch eine Überdruckbelüftung durch das Belüftungssystem der Tiefgaragen. Bei der Lage der Brandschutztore ist darauf zu achten, dass bei Brand im Süd-Nord-Tunnel direkt vor einer Tiefgaragenein- bzw. Ausfahrt für Personen in den Zu- und Abfahrten eine Flucht ins Freie möglich ist, z. B. durch separate Brandschutztüren neben den Brandschutztoren, die per Hand geöffnet werden können und sich selbständig verschließen.

Eine natürliche Längslüftung wird für die geplanten Tunnel im ersten Bauabschnitt deshalb als ausreichend angesehen, wenn oben beschriebener zusätzlicher Rettungsweg geschaffen wird. Eine mechanische Lüftung mittels Ventilatoren würde keinen positiven Einfluss auf die Luftschichtung im Brandfall haben.

### **Berücksichtigung der Erweiterungen im 2. Bauabschnitt**

Durch den zusätzlich geplanten Nord-Süd-Tunnel und dessen Verknüpfung mit dem Ost-West-Tunnel entsteht ein Tunnelsystem mit vier verbundenen Tunneln. Die Fluchtweglängen im Ost-West-Tunnel verlängern sich und können deutlich mehr als 300 m betragen.

Im Regelfall, auch bei Stau, ist hier ebenfalls eine natürliche Längslüftung ausreichend. Allerdings ist eine rein auf natürliche Längslüftung basierende Brandfalllüftung entsprechend RABT (2006) hier nicht mehr vertretbar. In Frage kommt hier eine

- Längslüftung mittels Strahlventilatoren
- Rauchabsaugung über Zwischendecke mit steuerbaren Absaugöffnungen sowie

- Rauchabsaugung über eine zentrale Punktabsaugung.

Bei einem solch komplexen Tunnelsystem weitgehend kurzer miteinander verbundener Tunnelröhren ist eine sinnvolle Steuerung einer automatische Brandfalllüftung, wie sie in der Rettungsphase benötigt wird, mittels Strahlventilatoren sehr schwierig bzw. äußerst komplex. Sie ist neben dem Ort des Brandes vom Verkehrszustand und von den Strömungsgeschwindigkeiten und -Richtungen der Tunnelluft in den einzelnen Röhren abhängig, welche wiederum von den äußeren Windverhältnissen und dem Verkehrsfluss abhängig sind. In kurzen Tunnelabschnitten macht die Strömungsbeeinflussung mittels Strahlventilatoren zudem wenig Sinn, weil die anfänglich vorhandene Rauchsichtung zumeist gestört wird und es schneller zu einem Verrauchen des gesamten Tunnelquerschnittes kommt als ohne Lüftung.

Der Einsatz von Strahlventilatoren in der *Selbstrettungsphase* wird daher nicht empfohlen.

Die Variante mit Rauchabsaugung über Zwischendecke und steuerbaren Absaugöffnungen wäre prinzipiell am Besten in der Lage, bei diesem komplexen Tunnelsystem die Brandgase gezielt abzusaugen, stellt aber wahrscheinlich das teuerste System dar und kann wegen der kurzen Tunnelstrecken auch nur wenig effektiv arbeiten. Hierzu sollte im weiteren Planungsverlauf eine Kosten-Nutzen-Analyse aufgestellt werden.

Mit der Variante Punktabsaugung ist keine gezielte Rauchabsaugung direkt nur am Brandort möglich. Die Rauchausbreitung ist wegen der verbundenen Tunnelabschnitte und der Vielzahl von Einflussgrößen von vielen Faktoren abhängig. Mit regelbaren Jalousien an den Übergängen zwischen Absaugkanal und Tunnelröhren könnte zumindestens die Luft gezielt aus dem jeweils betroffenen Tunnel abgesaugt werden.

Unter Abwägung der genannten Gesichtspunkte wird deshalb empfohlen, folgende Varianten der Brandfalllüftung weiterzuverfolgen:

Die *Selbstrettungsphase* kann ohne mechanische Tunnelentlüftung auskommen, wenn ein zusätzlicher, von allen Tunneln zugänglicher, belüfteter Rettungsweg ins Freie geschaffen wird. Dieser sollte etwa im Kreuzungsbereich des Nord-Süd- mit dem Nord-West-Tunnel liegen. Die Fluchtweglängen sind dann für alle Tunnelabschnitte nicht viel länger als 200 m.

Die *Brandbekämpfungsphase* kann mit der Installation von reversiblen Strahlventilatoren im Nord-Süd-, Ost-West- und Süd-Nord-Tunnel unterstützt werden, die durch die Feuerwehr manuell bedient werden. Es wurden dafür erste Berechnungen zu einer Tunnellüftungsauslegung entsprechend RABT (2006) für den Brandfall durchgeführt. Diese ergaben, dass z.B.

je 6 reversierbare Strahlventilatoren mit 90 cm Laufraddurchmesser in den Süd-Nord- und Ost-West-Tunnel bzw. 8 reversierbare Strahlventilatoren mit 100 bis 120 cm Laufraddurchmesser im Nord-Süd-Tunnel ausreichen, um die Brandgase aus den Tunnelröhren auszublasen. Die Ventilatoren können z. B. in drei Zweiergruppen in gleichen Abständen zueinander angeordnet werden. In PIARC (1999) wird ein Abstand von 80 bis 100 m vom Portal für die erste Ventilatorgruppe empfohlen.

Jeder Strahlventilator müsste dabei bei einer Lufttemperatur von 15°C und einer Strömungsgeschwindigkeit der Tunnelluft von 3.0 m/s eine Schubkraft von 780 N (Nord-Süd-Tunnel) bzw. 450 N (Ost-West-Tunnel und Süd-Nord-Tunnel) aufbringen. Dabei wurde berücksichtigt, dass im Brandfall eine der Ventilatorgruppen nicht betrieben werden kann und somit 4 bzw. 6 Ventilatoren die Lüftungsleistung erbringen müssen.

Im Rahmen der weiteren Planungen sind Anzahl, Anordnung und Durchmesser der Ventilatoren weiter zu präzisieren.

Alternativ zu den Strahlventilatoren könnte eine zentrale Punktabsaugung mit Anschluss aus allen Tunneln vorgesehen werden, die wiederum mittels regelbaren Jalousien anwählbar wären. Hierzu wäre die Installation eines Lüftungsbauwerkes mit einem oder mehreren Axialventilatoren und die zusätzliche Erstellung von Lüftungskanälen zu den einzelnen Tunneln notwendig. Es muss mindestens eine Absaugmenge von 220 m<sup>3</sup>/s bewältigt werden. Die genaue Dimensionierung kann erst nach dem Vorliegen von Kanalquerschnitten und -Längen erfolgen. Zusätzlich sollte bei dieser Variante beachtet werden, dass sie bei Bedarf im Regelbetrieb auch zur Minderung der Immissionen in den Portalbereichen eingesetzt werden könnte.

Beide Varianten sollten mit der Feuerwehr und mit den zuständigen Stellen der Stadt Düsseldorf bezüglich der Handhabbarkeit bei der Brandbekämpfung, der Vor- und Nachteile und der Details diskutiert werden.

Da die Strömungssituation in dem im 2. BA entstehenden Tunnelsystem sehr komplex ist, werden im weiteren Planungsverlauf Strömungsberechnungen für verschiedene Brandfall-szenarien zur Lüftungsoptimierung und für die Festlegung der Brandfallsteuerung empfohlen.

## 9 LITERATUR

- Day J.R. (1998): What price fire? The costs of providing fire ventilation for a road tunnel. Proceedings of 3<sup>rd</sup> international conference safety in road tunnels, Nice, 9-11.3.1998, 429-440.
- DMT (1999): Festlegung von Mindestschutzmaßnahmen im Brandfall für verschiedene Tunneltypen und Verkehrssituationen. Deutschen Montan Technologie GmbH, Essen, im Auftrag der Bundesanstalt für Straßenwesen, Bergisch Gladbach.
- Freibauer, B. (1978): Bemessungsgrundlagen für die Lüftung von Straßentunneln. Bundesministerium für Bauten und Technik, Straßenforschung, Heft 87.
- Herzke, K. (1972): Der Einfluss des Kraftfahrzeugverkehrs auf die Betriebskosten von Tunnellüftungen. Bauingenieur-Praxis Heft 82, Verlag von Wilhelm Ernst & Sohn, 1992.
- Israël, G., Schlums, Ch., Treffeisen, R., Pesch, M. (1996): Rußimmissionen in Berlin. VDI-Fortschrittsbericht Nr. 152, 1996.
- PIARC (1999): Reduction of operational cost of road tunnels. Report and recommendations.
- RABT (2006): Richtlinien für die Ausstattung und den Betrieb von Straßentunneln - RABT, Ausgabe 2006. Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, Köln.
- STUVA (1990): Überprüfung der Bemessungsgrundlagen für die Be- und Entlüftung von städtischen Straßentunneln im Hinblick auf die Verringerung der Schadstoffemissionen bei Kraftfahrzeugen. STUVA Studiengesellschaft für unterirdische Verkehrsanlagen e.V., Köln, Forschungsbericht FE-Nr. 77051/86 und 77054/86, Januar 1990.

**A N H A N G A 1:**  
**BERECHNUNGEN DES ZULUFTBEDARFS**

#70313 Tunnel Süd-Nord		nach RABT 2006		Bemessungskonzentrationen für den Zuluftbedarf		
Bezugsjahr	2010	Fahrzeugmasse LKW (nur 10..30t mögl.)	20 t	Verkehrszustand	CO <sub>2</sub> -Konzentration	Sichttrübung
Gesamtlänge	L 0.34 km	Anteil PKW mit Diesel	xD 28%			
Gradiente (Betrag !!)	i 1.00%	Umrechnung PKW-Einheiten	1 LKW = 2 PkwE	flüssiger Spitzenverkehr V~ 50 - 100 km/h	CO <sub>2</sub> [ppm]	Kzul [1/m]
Höhe über Meer	35 m üNN	falls >700m, dann FH korrekt zuordnen in eXXX-Blätter!		täglich stockender Verkehr, Stillstand auf allen Fahrstreifen	70	0.005
				ausnahmsweise stockender Verkehr, Stillstand auf allen Fahrstreifen	70	0.005
LKW-Anteil	alkw 2.0%				100	0.007
max.Verkehrsst. je Richtung (notfalls "=0.1*DTV" eintragen)	Mmax 2758.888 KFZ/h	Fahrstreifen FS	steigende Röhre 1 2+3	vF [km/h]	max.Verkehrsdichte (RABT) [PkwE/km]	
	Mikw 60 LKW/h	M	1379.444 1379.444	0	165 Stau	
			48 12	10	100 stockender Verkehr	
		LKW-Anteil	3.5% 0.9%	60	33 flüssiger Verkehr	
		M	1427.444 1391.444		<b>Städtischer Tunnel mit Richtungsverkehr</b>	
Tempolimit	Vzul 50 km/h					
Grenzgeschwindigkeit VF nach RABT für LKW						
steigende Röhre	55 km/h					
fallende Röhre	55.0 km/h					

Fahrgeschwindigkeit vF [km/h]	Verkehrsdichte der Fahrzeuge je km und Fahrstreifen [Fz/km /FS] laut österr. Tunnelrichtlinie angenommen nur Steigung							
	FS 1		FS 2+3		spez. Zuluftbedarf pro km		Gesamt-Zuluftbedarf	
	[PkwE/km]	[LKW/km]	[PkwE/km]	[LKW/km]	Q_ZL (CO)	Q_ZL (Trübe)	Q_ZL (CO)	Q_ZL (Trübe)
0	165	5.5	165	1.4	7.7	10.8	2.6	3.7
5	65	2.2	68	0.6	5.3	7.7	1.8	2.6
10	89	3.0	88	0.8	9.9	11.0	3.4	3.7
20	60	2.0	59	0.5	10.5	13.3	3.6	4.5
30	44	1.5	43	0.4	8.6	12.3	2.9	4.2
40	35	1.2	34	0.3	7.4	12.2	2.5	4.2
50	28	1.0	28	0.2	6.7	13.0	2.3	4.4
60	24	0.8	23	0.2	6.6	13.8	2.2	4.7
70	20	0.7	20	0.2	6.9	11.0	2.4	3.8
80	18	0.6	17	0.1	7.2	9.0	2.4	3.1
90	15	0.5	15	0.1	9.2	10.7	3.1	3.6
100	14	0.5	13	0.1	12.1	12.3	4.1	4.2

Tab. A1.1: Berechnungen des erforderlichen Zuluftbedarfs für Süd-Nord-Tunnel nach RABT (2006) für 1. Bauabschnitt

#70313 Süd-West-Abschnitt		nach RABT 2006		Bemessungskonzentrationen für den Zuluftbedarf		
Bezugsjahr	2010	Fahrzeugmasse LKW (nur 10..30t mögl.)	20 t	Verkehrszustand	COzul	Sichttrübung
Gesamtlänge	0.36 km	Anteil PKW mit Diesel	28%			
Gradiente (Betrag !!)	1.00%	Umrechnung PKW-Einheits	1 LKW = 2 PkwE	COzul	[ppm]	Kzul
Höhe über Meer	0 m üNN	flüssiger Spitzenverkehr V- 50 - 100 km/h		70		[1/m]
	falls >700m, dann FH korrekt zuordnen in eXXX-Blätter!	täglich stockender Verkehr, Stillstand auf allen Fahrstreifen		70		0.005
		ausnahmsweise stockender Verkehr, Stillstand auf allen Fahrstreifen		100		0.005
LKW-Anteil	2.0%					0.007
max.Verkehrsst. je Richtung (notfalls "=0.1*DTV" eintragen)		steigende Röhre		vF	max.Verkehrsdichte (RABT)	
Mmax	1536.52 KFZ/h	Fahrstreifen FS	1 2+3	[km/h]	[PkwE/km]	
Mikw	30 LKW/h	M	768.26 768.26	0	165 Stau	
			24 6	10	100 stockender Verkehr	
		LKW-Anteil	3.1% 0.8%	60	33 flüssiger Verkehr	
		M	792.26 774.26		<b>Städtischer Tunnel</b>	
Tempolimit	Vzul 50 km/h				<b>mit Richtungsverkehr</b>	
Grenzgeschwindigkeit VF nach RABT für LKW						
steigende Röhre	55 km/h					
fallende Röhre	55.0 km/h					

Fahrgeschwindigkeit vF [km/h]	Verkehrsdichte der Fahrzeuge je km und Fahrstreifen [Fz/km /FS] laut österr. Tunnelrichtlinie angenommen nur Steigung							
	FS 1		FS 2+3		spez. Zuluftbedarf pro km		Gesamt-Zuluftbedarf	
	[PkwE/km]	[LKW/km]	[PkwE/km]	[LKW/km]	FS1+FS2+FS3[m3/s/km]	FS 1 + FS 2 +FS 3 [m3/s]		
	Q_ZL (CO)	Q_ZL (Trübe)	Q_ZL (CO)	Q_ZL (Trübe)	Q_ZL (CO)	Q_ZL (Trübe)	Q_ZL (CO)	Q_ZL (Trübe)
0	165	5.0	165	1.3	7.7	10.5	2.8	3.8
5	65	2.0	68	0.5	5.3	7.5	1.9	2.7
10	59	1.8	58	0.5	6.6	7.1	2.4	2.6
20	36	1.1	35	0.3	6.3	7.7	2.3	2.8
30	25	0.8	25	0.2	4.9	6.9	1.8	2.5
40	20	0.6	19	0.1	4.2	6.7	1.5	2.4
50	16	0.5	15	0.1	3.7	7.1	1.3	2.6
60	13	0.4	13	0.1	3.7	7.6	1.3	2.7
70	11	0.3	11	0.1	3.9	6.0	1.4	2.2
80	10	0.3	10	0.1	4.0	4.9	1.4	1.8
90	9	0.3	8	0.1	5.2	6.0	1.9	2.1
100	8	0.2	8	0.1	6.9	6.9	2.5	2.5

Tab. A1.2: Berechnungen des erforderlichen Zuluftbedarfs für Süd-West-Abschnitt nach RABT (2006) für 1. Bauabschnitt



#70313 Tunnelabschnitt Nord-Ost		nach RABT 2006		Bemessungskonzentrationen für den Zuluftbedarf		
Bezugsjahr	2010	Fahrzeugmasse LKW (nur 10..30t mögl.)	20 t	Verkehrszustand	CO <sub>Zul</sub> [ppm]	Sichttrübung Kzul [1/m]
Gesamtlänge	L 0.52 km	Anteil PKW mit Diesel	xD 28%			
Gradient (Betrag !!)	i 8.00%	Umrechnung PKW-Einheits	1 LKW = 2 PkwE	flüssiger Spitzenverkehr V~ 50 - 100 km/h	70	0.005
Höhe über Meer	35 m üNN	falls >700m, dann FH korrekt zuordnen in eXXX-Blätter!		täglich stockender Verkehr, Stillstand auf allen Fahrstreifen	70	0.005
				ausnahmsweise stockender Verkehr, Stillstand auf allen Fahrstreifen	100	0.007
LKW-Anteil	alkw 2.0%			vF	max.Verkehrsdichte (RABT)	
max.Verkehrsst. je Richtung (notfalls "=0.1*DTV" eintragen)		Fahrstreifen FS	steigende Röhre	[km/h]	[PkwE/km]	
Mmax	2527.768 KFZ/h	M 1263.884	1 2+3 1263.884	0	165 Stau	
Mikw	50 LKW/h	M 40	10	10	100 stockender Verkehr	
		LKW-Anteil	3.2% 0.8%	60	33 flüssiger Verkehr	
Tempolimit	Vzul 50 km/h	M 1303.884	1273.884	<b>Städtischer Tunnel mit Richtungsverkehr</b>		
Grenzgeschwindigkeit VF nach RABT für LKW						
steigende Röhre	39 km/h					
fallende Röhre	50.0 km/h					

Fahrgeschwindigkeit vF [km/h]	Verkehrsdichte der Fahrzeuge je km und Fahrstreifen [Fz/km /FS] laut österr. Tunnelrichtlinie angenommen nur Steigung							
	FS 1		FS 2+3		spez. Zuluftbedarf pro km		Gesamt-Zuluftbedarf	
	[PkwE/km]	[LKW/km]	[PkwE/km]	[LKW/km]	FS1+FS2+FS3 [m3/s/km]	FS 1 + FS 2 +FS 3 [m3/s]		
	Q_ZL (CO)	Q_ZL (Trübe)	Q_ZL (CO)	Q_ZL (Trübe)	Q_ZL (CO)	Q_ZL (CO)	Q_ZL (Trübe)	
0	165	5.1	165	1.3	7.7	10.5	4.0	5.5
5	65	2.0	68	0.5	6.2	10.5	3.2	5.5
10	84	2.6	83	0.7	11.5	16.3	6.0	8.5
20	55	1.7	54	0.4	18.4	19.7	9.6	10.2
30	41	1.3	40	0.3	19.2	18.5	10.0	9.6
40	32	1.0	31	0.2	18.0	19.3	9.4	10.0
50	26	0.8	25	0.2	15.9	21.6	8.3	11.2
60	22	0.7	21	0.2	17.6	19.9	9.2	10.4
70	19	0.6	18	0.1	21.5	15.9	11.2	8.3
80	16	0.5	16	0.1	24.3	12.7	12.7	6.6
90	14	0.4	14	0.1	36.7	17.1	19.1	8.9
100	13	0.4	12	0.1	46.6	20.8	24.2	10.8

Tab. A1.3: Berechnungen des erforderlichen Zuluftbedarfs für Nord-Ost-Tunnelabschnitt nach RABT (2006) für 2. Bauabschnitt

#70313 Tunnelabschnitt Nord-West-Einfahrt		nach RABT 2006		Bemessungskonzentrationen für den Zuluftbedarf		
Bezugsjahr	2010	Fahrzeugmasse LKW (nur 10..30t mögl.)	20 t	Verkehrszustand	CO <sub>Zul</sub>	Sichttrübung
Gesamtlänge	L 0.12 km	Anteil PKW mit Diesel	xD 28%		CO <sub>Zul</sub>	Kzul
Gradient (Betrag !!)	i 0.00%	Umrechnung PKW-Einheiten	1 LKW = 2 PkwE	flüssiger Spitzenverkehr V~ 50 - 100 km/h	[ppm]	[1/m]
Höhe über Meer	35 m üNN			täglich stockender Verkehr, Stillstand auf allen Fahrstreifen	70	0.005
	falls >700m, dann FH korrekt zuordnen in eXXX-Blätter!			ausnahmsweise stockender Verkehr, Stillstand auf allen Fahrstreifen	70	0.005
LKW-Anteil	alkw 2.0%				100	0.007
max.Verkehrsst. je Richtung (notfalls "=0.1*DTV" eintragen)		Fahrstreifen FS	steigende Röhre 1 2+3	vF [km/h]	max.Verkehrsdichte (RABT) [PkwE/km]	
Mmax	540.992 KFZ/h	M	270.496 270.496	0	165 Stau	
Mkw	10 LKW/h		8 2	10	100 stockender Verkehr	
		LKW-Anteil	3.0% 0.7%	60	33 flüssiger Verkehr	
		M	278.496 272.496		<b>Städtischer Tunnel mit Richtungsverkehr</b>	
Tempolimit	Vzul 50 km/h					
Grenzgeschwindigkeit VF nach RABT für LKW						
steigende Röhre	55 km/h					
fallende Röhre	55 km/h					

Fahrgeschwindigkeit vF [km/h]	Verkehrsdichte der Fahrzeuge je km und Fahrstreifen [Fz/km /FS] laut österr. Tunnelrichtlinie							
	FS 1 [PkwE/km] [LKW/km]		FS 2+3 [PkwE/km] [LKW/km]		spez. Zuluftbedarf pro km		Gesamt-Zuluftbedarf	
	Q_ZL (CO)	Q_ZL (Trübe)	Q_ZL (CO)	Q_ZL (Trübe)	Q_ZL (CO)	Q_ZL (Trübe)	Q_ZL (CO)	Q_ZL (Trübe)
0	165	4.7	165	1.2	7.7	10.3	0.9	1.2
5	66	1.9	68	0.5	5.2	7.3	0.6	0.9
10	25	0.7	24	0.2	2.7	2.9	0.3	0.3
20	13	0.4	13	0.1	2.3	2.7	0.3	0.3
30	9	0.3	9	0.1	1.6	2.2	0.2	0.3
40	7	0.2	7	0.0	1.3	2.1	0.2	0.3
50	6	0.2	5	0.0	1.1	2.2	0.1	0.3
60	5	0.1	5	0.0	0.9	2.4	0.1	0.3
70	4	0.1	4	0.0	0.8	1.9	0.1	0.2
80	3	0.1	3	0.0	0.6	1.6	0.1	0.2
90	3	0.1	3	0.0	0.8	1.9	0.1	0.2
100	3	0.1	3	0.0	1.0	2.2	0.1	0.3

spez. Zuluftbedarf pro km  $Q_{ZL} (CO) = 1/3600 * 10^6 / CO_{zul} * (N_{pkw} * (eCO_{pkwB} + eCO_{pkwD}) + N_{lkw} * eCO_{lkw})$

Tab. A1.4: Berechnungen des erforderlichen Zuluftbedarfs für Nord-West-Tunneleinfahrt nach RABT (2006) für 2. Bauabschnitt

#70313 Tunnelabschnitt Nord-Süd bis Abzweig Nord-West-Einfahrt				nach RABT 2006		Bemessungskonzentrationen für den Zuluftbedarf		
Bezugsjahr		2010	Fahrzeugmasse LKW (nur 10..30t mögl.)	20 t		<b>CO-Konzentration</b>	<b>Sichttrübung</b>	
Gesamtlänge	L	0.14 km	Anteil PKW mit Diesel	xD 28%		<b>Verkehrszustand</b>	COzul	Kzul Extinktions-koeffizient K
Gradient (Betrag !!)	i	8.00%	Umrechnung PKW-Einheits	1 LKW = 2 PkwE		flüssiger Spitzenverkehr V~ 50 - 100 km/h	[ppm]	[1/m]
Höhe über Meer		35 m üNN				täglich stockender Verkehr, Stillstand auf allen Fahrstreifen	70	0.005
		falls >700m, dann FH korrekt zuordnen in eXXX-Blätter!				ausnahmsweise stockender Verkehr, Stillstand auf allen Fahrstreifen	70	0.005
LKW-Anteil	alkw	2.0%					100	0.007
max.Verkehrsst. je Richtung (notfalls "=0.1*DTV" eintragen)			Fahrstreifen FS	1 2+3		vF [km/h]	max.Verkehrsdichte (RABT) [PkwE/km]	
Mmax		2527.768 KFZ/h	M	1263.884 1263.884		0	165	Stau
Mikw		50 LKW/h	LKW-Anteil	40 10		10	100	stockender Verkehr
			M	1303.884 1273.884		60	33	flüssiger Verkehr
Tempolimit	Vzul	50 km/h					<b>Städtischer Tunnel mit Richtungsverkehr</b>	
Grenzgeschwindigkeit VF nach RABT für LKW								
steigende Röhre		39 km/h						
fallende Röhre		50 km/h						

Fahrgeschwindigkeit vF [km/h]	Verkehrsdichte der Fahrzeuge je km und Fahrstreifen [Fz/km /FS] laut österr. Tunnelrichtlinie				spez. Zuluftbedarf pro km			
	FS 1 [PkwE/km] [LKW/km]		FS 2+3 [PkwE/km] [LKW/km]		spez. Zuluftbedarf pro km		Gesamt-Zuluftbedarf	
	Q_ZL (CO)	Q_ZL (Trübe)	Q_ZL (CO)	Q_ZL (Trübe)	Q_ZL (CO)	Q_ZL (Trübe)	Q_ZL (CO)	Q_ZL (Trübe)
0	165	5.1	165	1.3	7.7	10.5	1.1	1.5
5	65	2.0	68	0.5	6.2	10.5	0.9	1.5
10	84	2.6	83	0.7	11.5	16.3	1.6	2.3
20	55	1.7	54	0.4	18.4	19.7	2.6	2.8
30	41	1.3	40	0.3	19.2	18.5	2.7	2.6
40	32	1.0	31	0.2	18.0	19.3	2.5	2.7
50	26	0.8	25	0.2	15.9	21.6	2.2	3.0
60	22	0.7	21	0.2	17.6	19.9	2.5	2.8
70	19	0.6	18	0.1	21.5	15.9	3.0	2.2
80	16	0.5	16	0.1	24.3	12.7	3.4	1.8
90	14	0.4	14	0.1	36.7	17.1	5.1	2.4
100	13	0.4	12	0.1	46.6	20.8	6.5	2.9

Tab. A1.5: Berechnungen des erforderlichen Zuluftbedarfs für Tunnelabschnitt Nord-Süd bis Abzweig Nord-West-Einfahrt nach RABT (2006) für 2. Bauabschnitt

**A N H A N G A 2:**  
**BERECHNUNGEN DES VOLUMENSTROMS BEI SELBSTLÜFTUNG**

Projekt **#70313 Süd-West-Abschnitt**

Tunneldaten		Verkehrsdaten	
Gesamtlänge	L 360 m	Verkehrstärke je Röhre	M 1500 KFZ/h
lichter Querschnitt	A 58.2 m <sup>2</sup>	Lkw-Anteil	alkw 2.0% -
Umfang innen	U 33.4 m	Fahrgeschwindigkeit	vKFZ 50 km/h
hydr. Durchmesser	Dh 7.0 m	<i>Grenzgeschwindigkeit VF nach RABT für LKW</i>	
		<i>steigende Röhre</i>	53 km/h
		<i>fallende Röhre</i>	74 km/h
Wand-Reibungskoeffizient	lambda 0.015 -	Widerstandsbeiwert (Pkw)	cw <sub>pkw</sub> 0.3
Einströmverlustkoeffizient	zetaE 0.3 -	Widerstandsbeiwert (Lkw)	cw <sub>lkw</sub> 1
		Querschn.fläche (Pkw)	Apkw 1.5 m <sup>2</sup>
		Querschn.fläche (Lkw)	Alkw 5 m <sup>2</sup>
wegen Einfluss Tunnelröhre (Herzke, 1972):		Widerstandsbeiwert im Tunnel (Pkw)	cw <sub>Tpkw</sub> 0.32
		Widerstandsbeiwert im Tunnel (Lkw)	cw <sub>Tlkw</sub> 1.20

**Berechnung der Kolbengeschwindigkeit nach Herzke (Formel analog zu Tunnelmodul MLuS)**

$$u_T = (v_{KFZ}/3.6) / (1 + f_a * \sqrt{(v_{KFZ}/3.6) / (M * (c_{wTpkw} * A_{pkw} + f_b * L_{kwAnt}))})$$

induzierte Strömungs-  
geschwindigkeit  
entspr. Volumenstrom

$u_T =$	2.6 m/s
$Q_v = u_T * A$	
$Q_v =$	151 m <sup>3</sup> /s

$$f_a = \sqrt{(1 + \zeta E + \lambda * L / D_h) * A * 3600/L}$$

f<sub>a</sub> 34.75

$$f_b = c_{wTlkw} * A_{lkw} - c_{wTpkw} * A_{pkw}$$

f<sub>b</sub> 5.52

Fahrgeschwindigkeit v <sub>F</sub> [km/h]	induzierte Strömungsgeschwindigkeit [m/s]	induzierter Volumenstrom [m <sup>3</sup> /s]
20	1.5	86
30	1.9	111
40	2.3	132
50	2.6 siehe obiges Beispiel	151
60	2.9	168
70	3.2	184
80	3.4	199

Tab. A2.1: Berechnungen der durch Fahrzeugbewegungen erzeugten Luftströmung im Süd-West-Abschnitt bei Richtungsverkehr für den 1. Bauabschnitt

Projekt **#70313 Nord-Ost-Abschnitt**

Tunneldaten			Verkehrsdaten		
Gesamtlänge	L	520 m	Verkehrstärke je Röhre	M	2500 KFZ/h
lichter Querschnitt	A	38.4 m <sup>2</sup>	Lkw-Anteil	alkw	2.0% -
Umfang innen	U	25.4 m	Fahrgeschwindigkeit	vKFZ	50 km/h
hydr. Durchmesser	Dh	6.0 m	<i>Grenzgeschwindigkeit VF nach RABT für LKW</i>		
			<i>steigende Röhre</i>		53 km/h
			<i>fallende Röhre</i>		74 km/h
Wand-Reibungskoeffizient	lambda	0.015 -	Widerstandsbeiwert (Pkw)	cw <sub>pkw</sub>	0.3
Einströmverlustkoeffizient	zetaE	0.3 -	Widerstandsbeiwert (Lkw)	cw <sub>lkw</sub>	1
			Querschn.fläche (Pkw)	Apkw	1.5 m <sup>2</sup>
			Querschn.fläche (Lkw)	Alkw	5 m <sup>2</sup>
wegen Einfluss Tunnelröhre (Herzke, 1972):			Widerstandsbeiwert im Tunnel (Pkw)	cw <sub>Tpkw</sub>	0.32
			Widerstandsbeiwert im Tunnel (Lkw)	cw <sub>Tlkw</sub>	1.32

**Berechnung der Kolbengeschwindigkeit nach Herzke (Formel analog zu Tunnelmodul MLuS)**

$$u_T = (v_{KFZ}/3.6) / (1 + f_a * \sqrt{(v_{KFZ}/3.6) / (M * (c_{wTpkw} * A_{pkw} + f_b * L_{kwAnt}))})$$

induzierte Strömungs-  
geschwindigkeit  
entspr. Volumenstrom

u <sub>T</sub> =	3.9 m/s
Q <sub>v</sub> =	u <sub>T</sub> * A
Q <sub>v</sub> =	152 m <sup>3</sup> /s

$$f_a = \sqrt{(1 + \zeta E + \lambda * L / D_h) * A * 3600/L}$$

f<sub>a</sub> 26.24

$$f_b = c_{wTlkw} * A_{lkw} - c_{wTpkw} * A_{pkw}$$

f<sub>b</sub> 6.12

Fahrgeschwindigkeit v <sub>F</sub> [km/h]	induzierte Strömungsgeschwindigkeit [m/s]	induzierter Volumenstrom [m <sup>3</sup> /s]
20	2.1	82
30	2.8	108
40	3.4	131
50	3.9 siehe obiges Beispiel	152
60	4.4	170
70	4.9	188
80	5.3	204

Tab. A2.2: Berechnungen der durch Fahrzeugbewegungen erzeugten Luftströmung im Nord-Ost-Abschnitt bei Richtungsverkehr für den 2. Bauabschnitt

**A N H A N G A3:**  
**BERECHNUNGEN DES ERFORDERLICHEN SCHUBES DER VENTILATOREN**  
**(LÄNGSLÜFTUNG) IM BRANDFALL**

#70313 Tunnel Süd-Nord, **Brandfall bei Längslüftung**  
 Lüftung über Portal Nord

Tunneldaten			Verkehrsdaten			Meteorologie- und Luftdaten			
Gesamtlänge	L	0.34 km	Fahrzeugdichte Fahrstr 1	M_1	162 KFZ/km	Temperatur Aussenluft	T	288 K, dh. = 15 °C	
freie Querschnittsfläche	A	58.2 m <sup>2</sup>	Fahrzeugdichte Fahrstr 2	M_2	162 KFZ/km	Druck	p	100000 Pa	
Umfang innen	U	33.4 m	Fahrzeugdichte Fahrstr 3	M_3	162 KFZ/km	Luftdichte	ro	1.21 kg/m <sup>3</sup>	
hydr. Durchmesser	Dh	7.0 m	Fzg-geschw. Fahrstr 1	v_1	0.0 m/s	Windgeschw. (10m)	uW	6 m/s	
Gradiente (Betrag)	i	0.00% -	Fzg-geschw. Fahrstr 2	v_2	0.0 m/s	Erdbeschleunigung	g	9.81 m/s	
			Fzg-geschw. Fahrstr 3	v_3	0.0 m/s				
Wand-Reibungskoeffizient	lambda	0.015 -	Pkw-Anteil Fahrstreifen 1	PkwAnt_1	98% -		Temp.diff.zu Aussen	dT	80 K
Einströmverlustkoeffizient	zetaE	0.3	Lkw-Anteil Fahrstreifen 1	LkwAnt_1	2.0% -	Luftdichte im Tunnel	ro_B	0.95 kg/m <sup>3</sup>	
Ausströmverlustkoeffizient	zetaA	1	Pkw-Anteil Fahrstreifen 2	PkwAnt_2	98% -				
			Lkw-Anteil Fahrstreifen 2	LkwAnt_2	2.0% -	Daten Brandfall			
min. Strömungsgeschw.	uT	2.3 m/s	Pkw-Anteil Fahrstreifen 3	PkwAnt_3	98% -	Tunnelstrecke ohne Kfz	Lvor	90 m	
Volumenstrom (Kontrolle)	Qv	134 m <sup>3</sup> /s	Lkw-Anteil Fahrstreifen 3	LkwAnt_3	2% -	(von Brand bis Ausfahrt)			
			cwT * Querschn.fl(Pkw)	cwApkw	0.5 m <sup>2</sup>				
			cwT * Querschn.fl(Lkw)	cwAlkw	6.7 m <sup>2</sup>				
			Red.faktor (Stau 0.7 flüssig 1)	b	0.7				

**Berechnung des erforderlichen Schubes**

$$S = A * (dPF + dPT + dPM + dPA) + FS$$


---


$$S = 1444 \text{ N}$$

Druckverlust durch Fahrzeugwiderstand  
 Index Fahrstreifen \_1 , \_2 ...

$$dPF = (L \cdot Lvor) / A * b * [ M_1 * (cwApkw \cdot PkwAnt_1 + cwAlkw \cdot LkwAnt_1) * ro / 2 * (v_1 + uT)^2 + M_2 * (cwApkw \cdot PkwAnt_2 + cwAlkw \cdot LkwAnt_2) * ro / 2 * (v_2 + uT)^2 + M_3 * (cwApkw \cdot PkwAnt_3 + cwAlkw \cdot LkwAnt_3) * ro / 2 * (v_3 + uT)^2 ]$$

$$dPF = 2.9 \text{ Pa}$$

Druckverlust durch Strömung im Tunnel

$$dPT = (zetaE + zetaA + lambda \cdot L * 1000 / Dh) \cdot ro / 2 \cdot uT^2$$

$$dPT = 6.5 \text{ Pa}$$

Strömungswiderstand durch Verkehrsschild

$$FS = cP * ro / 2 \cdot uS^2 * AS$$

$$FS = 0.0 \text{ N}$$

Fläche Verkehrsschild	AS	0 m <sup>2</sup>
Strömungsgeschwindigkeit am Schild	uS	2.3 m/s
Druckbeiwert Schild	cP	1.5

Winddruck

$$dPm = ro / 2 * (uW * (5/10)^{0.25})^2$$

$$dPm = 15.4 \text{ Pa}$$

Druckdifferenz durch Auftrieb

$$dPA = Lvor * ro_B * g * dT / T * i$$

$$dPA = 0.0 \text{ Pa}$$

Tab. A3.1: Berechnungen des erforderlichen Schubes der Lüftungsventilatoren (Längslüftung) im Brandfall bei Lüftung über Tunnelportal Nord (Süd-Nord-Tunnel)



#70313 Tunnel Süd-Nord,  
Lüftung über Portal **Süd**

**Brandfall bei Längslüftung**

Tunneldaten		Verkehrsdaten			Meteorologie- und Luftdaten				
Gesamtlänge	L_s	0.34 km	Fahrzeugdichte Fahrstr 1	M_1_s	162 KFZ/km	Temperatur Aussenluft	T_s	288 K, dh. = 15 °C	
freie Querschnittsfläche	A_s	58.2 m <sup>2</sup>	Fahrzeugdichte Fahrstr 2	M_2_s	162 KFZ/km	Druck	p_s	100000 Pa	
Umfang innen	U_s	33.4 m	Fahrzeugdichte Fahrstr 3	M_3_s	162 KFZ/km	Luftdichte	ro_s	1.21 kg/m <sup>3</sup>	
hydr. Durchmesser	Dh_s	7.0 m	Fzg-geschw. Fahrstr 1	v_1_s	0.0 m/s	Windgeschw. (10m)	uW_s	6 m/s	
Gradiente (Betrag)	i_s	0.70%	Fzg-geschw. Fahrstr 2	v_2_s	0.0 m/s	Erdbeschleunigung	g_s	9.81 m/s	
			Fzg-geschw. Fahrstr 3	v_3_s	0.0 m/s				
Wand-Reibungskoeffizient	lambda_s	0.015	Pkw-Anteil Fahrstreifen 1	PkwAnt_1_s	98%		Temp.diff.zu Aussen	dT_s	80 K
Einströmverlustkoeffizient	zetaE_s	0.3	Lkw-Anteil Fahrstreifen 1	LkwAnt_1_s	2.0%	Luftdichte im Tunnel	ro_B_s	0.95 kg/m <sup>3</sup>	
Ausströmverlustkoeffizient	zetaA_s	1	Pkw-Anteil Fahrstreifen 2	PkwAnt_2_s	98%	Daten Brandfall			
			Lkw-Anteil Fahrstreifen 2	LkwAnt_2_s	2.0%	Tunnelstrecke ohne Kfz	Lvor_s	90 m	
min. Strömungsgeschw.	uT_s	2.3 m/s	Pkw-Anteil Fahrstreifen 3	PkwAnt_3_s	98%	max. Strecke			
Volumenstrom (Kontrolle)	Qv_s	134 m <sup>3</sup> /s	Lkw-Anteil Fahrstreifen 3	LkwAnt_3_s	2%	von Brand bis Portal	LA	250 m	
			cwT * Querschn.fl(Pkw)	cwApkw_s	0.5 m <sup>2</sup>				
			cwT * Querschn.fl(Lkw)	cwAlkw_s	0.5 m <sup>2</sup>				
			Red.faktor (Stau 0.7 flüssig 1)	b_s	0.7				

**Berechnung des erforderlichen Schubes**

$$S = A * (dPF + dPT + dPM + dPA) + FS$$


---


$$S = 1673 \text{ N}$$

Druckverlust durch Fahrzeugwiderstand  
Index Fahrstreifen \_1 , \_2 ...

$$dPF = (L-Lvor) / A * b * [ M_1 * (cwApkw PkwAnt_1 + cwAlkw LkwAnt_1) * ro/2 * (v_1 + uT)^2 + M_2 * (cwApkw PkwAnt_2 + cwAlkw LkwAnt_2) * ro/2 * (v_2 + uT)^2 + M_3 * (cwApkw PkwAnt_3 + cwAlkw LkwAnt_3) * ro/2 * (v_3 + uT)^2 ]$$

$$dPF = 2.3 \text{ Pa}$$

Druckverlust durch Strömung im Tunnel

$$dPT = (zetaE + zetaA + lambda L * 1000 / Dh) ro/2 uT^2$$

$$dPT = 6.5 \text{ Pa}$$

Strömungswiderstand durch Verkehrsschild o.ä.

$$FS = cP * ro/2 uS^2 * AS$$

$$FS = 0.0 \text{ N}$$

Fläche Verkehrsschild	AS_s	0 m <sup>2</sup>
Strömungsgeschwindigkeit am Schild	uS_s	2.3 m/s
Druckbeiwert Schild	cP_s	1.5

Winddruck

$$dPm = ro/2 * (uW * (5/10)^{0.25})^2$$

$$dPm = 15.4 \text{ Pa}$$

Druckdifferenz durch Auftrieb

$$dPA = LA * ro_B * g * dT/T * i$$

$$dPA = 4.5 \text{ Pa}$$

Tab. A3.2: Berechnungen des erforderlichen Schubes der Lüftungsventilatoren (Längslüftung) im Brandfall bei Lüftung über Tunnelportal Süd (Süd-Nord-Tunnel)

#70313 Tunnel Ost-West,  
Lüftung über Ausfahrt West

**Brandfall bei Längslüftung**

Tunnelnennungen		Verkehrsdaten			Meteorologie- und Luftdaten				
Gesamtlänge	L_s	0.29 km	Fahrzeugdichte Fahrstr 1	M_1_s	162 KFZ/km	Temperatur Aussenluft	T_s	288 K, dh. = 15 °C	
freie Querschnittsfläche	A_s	58.2 m <sup>2</sup>	Fahrzeugdichte Fahrstr 2	M_2_s	162 KFZ/km	Druck	p_s	100000 Pa	
Umfang innen	U_s	33.4 m	Fahrzeugdichte Fahrstr 3	M_3_s	162 KFZ/km	Luftdichte	ro_s	1.21 kg/m <sup>3</sup>	
hydr. Durchmesser	Dh_s	7.0 m	Fzg-geschw. Fahrstr 1	v_1_s	0.0 m/s	Windgeschw. (10m)	uW_s	6 m/s	
Gradiente (Betrag)	i_s	0.80% -	Fzg-geschw. Fahrstr 2	v_2_s	0.0 m/s	Erdbeschleunigung	g_s	9.81 m/s	
			Fzg-geschw. Fahrstr 3	v_3_s	0.0 m/s				
Wand-Reibungskoeffizient	lambda_s	0.015 -	Pkw-Anteil Fahrstreifen 1	PkwAnt_1_s	98% -		Temp.diff.zu Aussen	dT_s	80 K
Einströmverlustkoeffizient	zetaE_s	0.3	Lkw-Anteil Fahrstreifen 1	LkwAnt_1_s	2.0% -	Luftdichte im Tunnel	ro_B_s	0.95 kg/m <sup>3</sup>	
Ausströmverlustkoeffizient	zetaA_s	1	Pkw-Anteil Fahrstreifen 2	PkwAnt_2_s	98% -				
			Lkw-Anteil Fahrstreifen 2	LkwAnt_2_s	2.0% -	Daten Brandfall			
			Pkw-Anteil Fahrstreifen 3	PkwAnt_3_s	98% -	Tunnelstrecke ohne Kfz	Lvor_s	70 m	
min. Strömungsgeschw.	uT_s	2.3 m/s	Lkw-Anteil Fahrstreifen 3	LkwAnt_3_s	2% -	max. Strecke			
Volumenstrom (Kontrolle)	Qv_s	134 m <sup>3</sup> /s	cwT * Querschn.fl(Pkw)	cwApkw_s	0.5 m <sup>2</sup>	von Brand bis Portal	LA	220 m	
			cwT * Querschn.fl(Lkw)	cwAlkw_s	0.5 m <sup>2</sup>				
			Red.faktor (Stau 0.7 flüssig 1)	b_s	0.7				

**Berechnung des erforderlichen Schubes**

$$S = A * (dPF + dPT + dPM + dPA) + FS$$

$$\underline{\underline{S = 1638 \text{ N}}}$$

Druckverlust durch Fahrzeugwiderstand  
Index Fahrstreifen \_1 , \_2 ...

$$dPF = (L-Lvor) / A * b * [ M_1 * (cwApkw PkwAnt_1 + cwAlkw LkwAnt_1) * ro/2 * (v_1 + uT)^2 + M_2 * (cwApkw PkwAnt_2 + cwAlkw LkwAnt_2) * ro/2 * (v_2 + uT)^2 + M_3 * (cwApkw PkwAnt_3 + cwAlkw LkwAnt_3) * ro/2 * (v_3 + uT)^2 ]$$

$$dPF = 2.1 \text{ Pa}$$

Druckverlust durch Strömung im Tunnel

$$dPT = (zetaE + zetaA + lambda L * 1000 / Dh) ro/2 uT^2$$

$$dPT = 6.2 \text{ Pa}$$

Strömungswiderstand durch Verkehrsschild o.ä.

$$FS = cP * ro/2 uS^2 * AS$$

$$FS = 0.0 \text{ N}$$

Fläche Verkehrsschild	AS_s	0 m <sup>2</sup>
Strömungsgeschwindigkeit am Schild	uS_s	2.3 m/s
Druckbeiwert Schild	cP_s	1.5

Winddruck

$$dPm = ro/2 * (uW * (5/10)^0.25)^2$$

$$dPm = 15.4 \text{ Pa}$$

Druckdifferenz durch Auftrieb

$$dPA = LA * ro_B * g * dT/T * i$$

$$dPA = 4.5 \text{ Pa}$$

Tab. A3.3: Berechnungen des erforderlichen Schubes der Lüftungsventilatoren (Längslüftung) im Brandfall bei Lüftung über Tunnelportal West (Ost-West-Abschnitt)

#70313 Tunnelabschnitt Nord-Ost, **Brandfall bei Längslüftung**  
 Lüftung über Ausfahrt **Ost**

Tunneldaten		Verkehrsdaten			Meteorologie- und Luftdaten				
Gesamtlänge	L_s	0.52 km	Fahrzeugdichte Fahrstr 1	M_1_s	162 KFZ/km	Temperatur Aussenluft	T_s	288 K, dh. = 15 °C	
freie Querschnittsfläche	A_s	58.2 m <sup>2</sup>	Fahrzeugdichte Fahrstr 2	M_2_s	162 KFZ/km	Druck	p_s	100000 Pa	
Umfang innen	U_s	33.4 m	Fahrzeugdichte Fahrstr 3	M_3_s	162 KFZ/km	Luftdichte	ro_s	1.21 kg/m <sup>3</sup>	
hydr. Durchmesser	Dh_s	7.0 m	Fzg-geschw. Fahrstr 1	v_1_s	0.0 m/s	Windgeschw. (10m)	uW_s	6 m/s	
Gradiente (Betrag)	i_s	8.00% -	Fzg-geschw. Fahrstr 2	v_2_s	0.0 m/s	Erdbeschleunigung	g_s	9.81 m/s	
			Fzg-geschw. Fahrstr 3	v_3_s	0.0 m/s				
Wand-Reibungskoeffizient	lambda_s	0.015 -	Pkw-Anteil Fahrstreifen 1	PkwAnt_1_s	98% -				
Einströmverlustkoeffizient	zetaE_s	0.3	Lkw-Anteil Fahrstreifen 1	LkwAnt_1_s	2.0% -	Temp.diff.zu Aussen	dT_s	80 K	
Ausströmverlustkoeffizient	zetaA_s	1	Pkw-Anteil Fahrstreifen 2	PkwAnt_2_s	98% -	Luftdichte im Tunnel	ro_B_s	0.95 kg/m <sup>3</sup>	
			Lkw-Anteil Fahrstreifen 2	LkwAnt_2_s	2.0% -				
			Pkw-Anteil Fahrstreifen 3	PkwAnt_3_s	98% -	Daten Brandfall			
min. Strömungsgeschw.	uT_s	2.3 m/s	Lkw-Anteil Fahrstreifen 3	LkwAnt_3_s	2% -	Tunnelstrecke ohne Kfz	Lvor_s	130 m	
Volumenstrom (Kontrolle)	Qv_s	134 m <sup>3</sup> /s	cwT * Querschn.fl(Pkw)	cwApkw_s	0.5 m <sup>2</sup>	max. Strecke			
			cwT * Querschn.fl(Lkw)	cwAlkw_s	0.5 m <sup>2</sup>	von Brand bis Portal	LA	260 m	
			Red.faktor (Stau 0.7 flüssig 1)	b_s	0.7				

**Berechnung des erforderlichen Schubes**

$$S = A * (dPF + dPT + dPM + dPA) + FS$$

$$\underline{\underline{S = 4680 \text{ N}}}$$

Druckverlust durch Fahrzeugwiderstand  
 Index Fahrstreifen \_1, \_2 ...

$$dPF = (L - Lvor) / A * b * [ M_1 * (cwApkw PkwAnt_1 + cwAlkw LkwAnt_1) * ro / 2 * (v_1 + uT)^2 + M_2 * (cwApkw PkwAnt_2 + cwAlkw LkwAnt_2) * ro / 2 * (v_2 + uT)^2 + M_3 * (cwApkw PkwAnt_3 + cwAlkw LkwAnt_3) * ro / 2 * (v_3 + uT)^2 ]$$

$$dPF = 3.6 \text{ Pa}$$

Druckverlust durch Strömung im Tunnel

$$dPT = (zetaE + zetaA + lambda L * 1000 / Dh) / ro / 2 * uT^2$$

$$dPT = 7.7 \text{ Pa}$$

Strömungswiderstand durch Verkehrsschild o.ä.

$$FS = cP * ro / 2 * uS^2 * AS$$

$$FS = 0.0 \text{ N}$$

Fläche Verkehrsschild	AS_s	0 m <sup>2</sup>
Strömungsgeschwindigkeit am Schild	uS_s	2.3 m/s
Druckbeiwert Schild	cP_s	1.5

Winddruck

$$dPm = ro / 2 * (uW * (5/10)^{0.25})^2$$

$$dPm = 15.4 \text{ Pa}$$

Druckdifferenz durch Auftrieb

$$dPA = LA * ro_B * g * dT / T * i$$

$$dPA = 53.6 \text{ Pa}$$

Tab. A3.4: Berechnungen des erforderlichen Schubes der Lüftungsventilatoren (Längslüftung) im Brandfall bei Lüftung über Tunnelportal Ost (Nord-Ost-Abschnitt)