

**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

URL: www.lohmeyer.de

LÄRMSCHUTZBAUWERK LÜNEBURG IM ZUGE DER A 39

LÜFTUNGSGUTACHTEN UND BRANDFALLKONZEPT NACH RABT 2006

Auftraggeber: Niedersächsische Landesbehörde für
Straßenbau und Verkehr
Göttinger Chaussee 76 A
30453 Hannover

Dr. rer. nat. I. Düring

Dr.-Ing. A. Lohmeyer

November 2010
Projekt 70695-10-17
Berichtsumfang 38 Seiten

INHALTSVERZEICHNIS

1	ZUSAMMENFASSUNG	1
2	AUFGABENSTELLUNG	5
3	VORGEHENSWEISE	6
4	EINGANGSDATEN	7
4.1	Allgemein.....	7
4.2	Tunneldaten	7
4.3	Verkehrsdaten	11
4.4	Meteorologie.....	11
5	LÜFTUNGSBERECHNUNGEN NACH RABT	14
5.1	Zuluftbedarf bei verschiedenen Verkehrszuständen	14
5.1.1	Anforderungen und maßgebende Abgaskomponenten	14
5.1.2	Zuluftbedarf und maßgebende Verkehrsfälle.....	14
5.2	Selbstlüftung durch äußere Einflüsse bei Richtungsverkehr	15
5.3	Selbstlüftung durch äußere Einflüsse bei Gegenverkehrsregime	16
6	BRAND IM TUNNEL	19
6.1	Anforderungen.....	19
6.2	Bewertung des Gefährdungs- und des Sicherheitspotenzials	19
6.3	Maßgebende Brandgröße	22
6.4	Lüftungssysteme im Brandfall	22
7	BENÖTIGTES LÜFTUNGSSYSTEM NACH FERTIGSTELLUNG.....	24
8	BENÖTIGTES LÜFTUNGSSYSTEM WÄHREND DER BAUPHASE	25
9	LITERATUR	27
	ANHANG A1: LAGEPLAN FÜR LÄRMSCHUTZTUNNEL LÜNEBURG.....	28

ANHANG A2: BERECHNUNGEN DES ERFORDERLICHEN ZULUFTBEDARFS NACH RABT (2006).....	30
ANHANG A3: BERECHNUNG DER SELBSTLÜFTUNG.....	33

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 ZUSAMMENFASSUNG

Im Zuge der Neuplanung der A 39, Lüneburg – Wolfsburg wird in Lüneburg ein etwa 400 Meter langer, zweiröhriger Lärmschutztunnel geplant. Hierfür ist die Lüftung zunächst gemäß RABT, Abschnitt 4, zu begutachten.

Position 1: Lüftung

Unter Berücksichtigung der Verkehrsfälle

- Normalbetrieb (2+2 - Verkehrsführung)
- Gegenverkehrsbetrieb (4+0 - Verkehrsführung) in einer Röhre

ist zu begutachten, ob gemäß RABT 4.2 und 4.3 eine Lüftung im Tunnel erforderlich ist. Dabei ist es insbesondere für den Brand im Tunnel nicht ausreichend, die Tunnellänge z. B. gemäß Tabelle 9a und 9b als Entscheidungskriterium heranzuziehen.

Wenn eine mechanische Lüftung erforderlich ist, ist die Anlage zu konzeptionieren, zu dimensionieren und eine Kostenschätzung (Betriebs- und Investitionskosten) durchzuführen.

Position 2: Risikoanalyse

Wenn eine mechanische Lüftung im Brandfall erforderlich ist, ist mit Hilfe einer Risikoanalyse gemäß RABT (2006) Abschnitt 0.5 zu untersuchen, ob die geplanten Fluchtwege bei Station 4+415 und 4+550 als Kompensationsmaßnahme geeignet sind. Hierfür ist zusätzlich eine Kosten-Wirksamkeits-Analyse durchzuführen.

Das vorliegende Gutachten bezieht sich zunächst auf die Position 1 (Tunnellüftung).

Ergebnisse:

Im Normalbetrieb ist für den betrachteten Tunnel laut DMT (1999) ein mittleres Gesamtgefährdungspotenzial gegeben. Auch wenn Gefahrguttransporte im Tunnel nicht zugelassen wären, würde ein mittleres Gesamtgefährdungspotenzial resultieren.

In der Bauphase (Gegenverkehrsbetrieb) ist für den betrachteten Tunnel laut DMT (1999) ein mittleres Gesamtgefährdungspotenzial gegeben, wenn man von ausnahmsweise stockendem Verkehr und uneingeschränkten Gefahrguttransporten ausgeht. Unter der Annahme, dass Gefahrguttransporte im Tunnel zugelassen sind und *täglich stockender Verkehr* auftritt, würde ein *hohes* Gesamtgefährdungspotenzial resultieren.

Eine detailliertere Risikobewertung könnte mittels BAST (2009) durchgeführt werden. Dies war nicht Bestandteil der vorliegenden Untersuchung.

Empfehlungen für die Situation nach dem Neubau:

Nach Ende des Neubaus wird der Tunnel im Richtungsverkehr befahren.

Auf Grund der prognostizierten Verkehrszahlen und der beendeten Bauarbeiten kann im Normalfall mit flüssigem Verkehr und damit von ausreichender Selbstlüftung ausgegangen werden. Die Anforderungen an die Lüftungskapazität werden daher durch die Ausnahmesituationen, wie stockender oder stillstehender Verkehr sowie Brand, festgelegt.

Die Tunnelröhren sind 400 m lang. Die RABT (2006) lässt bei Tunneln bis 600 m Länge für die Lüftung im Brandfall eine reine natürliche Längslüftung zu, da „in kurzen Tunneln eine Beeinflussung mittels Ventilatoren wegen der Ausbreitungsgeschwindigkeit des Rauches keinen Sinn macht.“

Die hier zu betrachtenden Tunnelröhren sind deutlich kürzer als 600 m. Nach der Bewertung für den betrachteten Tunnel ist laut DMT (1999) im Normalbetrieb ein mittleres Gesamtgefährdungspotenzial gegeben. In der derzeitigen Planung sind zwei Fluchtwege zwischen den beiden Röhren bei Bau-km 4+550 sowie 4+415 geplant. Die Fluchtweglängen betragen damit maximal 135 m. Damit wären die max. Fluchtweglängen entsprechend RABT (2006) von 300 m in beiden Tunnelröhren deutlich eingehalten.

Für den Regelbetriebsfall wird keine mechanische Entlüftung benötigt, da sich infolge der Kolbenwirkung der Fahrzeuge sowie meteo-bedingter Strömungen der Tunnel in den meisten Fällen selbst lüften wird, wie die hier durchgeführten Berechnungen gezeigt haben.

Aus diesen Gründen kann auf die Installation einer Lüftungsanlage nach der Fertigstellung verzichtet werden.

Empfehlung für die Bauphase:

Nachfolgend wird die Situation während der Bauphase diskutiert. Die Oströhre wird im Gegenverkehr befahren.

Die Anforderungen an die Lüftungskapazität werden durch die Ausnahmesituationen, wie stockender oder stillstehender Verkehr sowie Brand, festgelegt.

Nach der Bewertung ist für den betrachteten Tunnel laut DMT (1999) in der Bauphase ein mittleres Gesamtgefährdungspotenzial gegeben. Unter der Annahme, dass Gefahrguttransporte im Tunnel zugelassen sind, und täglich Stau auftritt würde ein hohes Gesamtgefährdungspotenzial resultieren.

Bei Tunnellängen von mehr als 400 m sind nach RABT (2006) in regelmäßigen Abständen von kleiner/gleich 300 m Notausgänge anzuordnen. In der derzeitigen Planung sind zwei Fluchtwege zwischen den beiden Röhren bei Bau-km 4+550 sowie 4+415 geplant. Diese sollen nach Aussage des Auftraggebers schon während der Gegenverkehrsphase uneingeschränkt verfügbar sein. Die Fluchtweglängen betragen damit maximal 135 m. Damit wären die max. Fluchtweglängen entsprechend RABT (2006) von 300 m in beiden Tunnelröhren deutlich eingehalten.

Eine natürliche Längslüftung wird während der Bauphase als geeignet angesehen, weil

- bei der geringen Tunnellänge von 400 m insbesondere auch bei Gegenverkehr eine Brandfalllüftung wegen der Gefahr der Rauchverwirbelung wenig Sinn macht,
- der Tunnel sich in den meisten Fällen selbst lüftet und es sich
- um eine temporäre Maßnahme mit einer Dauer von ca. einem Jahr handelt.

Es sollten aber Unfall-/Brandrisiko senkende Maßnahmen ergriffen werden. Diese können zumindest sein:

- Während der Baumaßnahme dauerhaftes Tempolimit von 60 km/h. Bei diesen Geschwindigkeiten ist das Verhältnis zwischen Fahrzeugabstand und Emissionsverhalten/Fahrzeugfluss günstig und das Unfallrisiko geringer als bei 80 km/h.
- Baken bzw. Bischofsmützen zur Abgrenzung der Fahrtrichtungen.
- Verbot für die Durchfahrt von Gefahrguttransporten.
- Bauablauf so organisieren, dass möglichst Staus im Tunnel vermieden werden.

Nach RABT (2006) sind die Rettungswege (hier die Nottüren) zwischen den Tunnelröhren mit Türen zu verschließen. Diese Türen müssen auch während der Bauphase begehrbar sein. Dies gilt ebenso für die Weströhre, die gerade gebaut bzw. ausgerüstet wird, aber dennoch als Fluchtweg dienen muss.

Sollte dies nicht möglich oder die Weströhre nicht begehbar sein, so sind weitere sicherheitsfördernde Maßnahmen zu ergreifen, wie weitere Absenkung der Fahrzeuggeschwindigkeit bzw. ggf. Tunnelsperrungen.

Eine detaillierte Risikobewertung könnte mittels BAST (2009) durchgeführt werden. Dies war nicht Bestandteil der vorliegenden Untersuchung.

2 AUFGABENSTELLUNG

Im Zuge der Neuplanung der A 39, Lüneburg – Wolfsburg wird in Lüneburg ein etwa 400 Meter langer, zweiröhriger Lärmschutztunnel geplant. Hierfür ist die Lüftung zunächst gemäß RABT, Abschnitt 4, zu begutachten.

Die Verkehrszahlen betragen für den Prognosehorizont 2025:

- $DTV_{2025} = 59\,900 \text{ Kfz/24h}$
- $SV = 10\,260 \text{ Kfz/24h}$

Pos 1: Lüftung

Unter Berücksichtigung der Verkehrsfälle

- Normalbetrieb (2+2 - Verkehrsführung)
- Gegenverkehrbetrieb (4+0) - Verkehrsführung) in einer Röhre

ist zu begutachten, ob gemäß RABT 4.2 und 4.3 eine Lüftung im Tunnel erforderlich ist. Dabei ist es insbesondere für den Brand im Tunnel nicht ausreichend, die Tunnellänge z. B. gemäß Tabelle 9a und 9b als Entscheidungskriterium heranzuziehen.

Wenn eine mechanische Lüftung erforderlich ist, ist die Anlage zu konzeptionieren, zu dimensionieren und eine Kostenschätzung (Betriebs- und Investitionskosten) durchzuführen.

Pos 2: Risikoanalyse

Wenn eine mechanische Lüftung im Brandfall erforderlich ist, ist mit Hilfe einer Risikoanalyse gemäß RABT (2006) Abschnitt 0.5 zu untersuchen, ob die geplanten Fluchtwege bei Station 4+415 und 4+550 als Kompensationsmaßnahme geeignet sind. Hierfür ist zusätzlich eine Kosten-Wirksamkeits-Analyse durchzuführen.

Das vorliegende Gutachten bezieht sich auf die Position 1 (Tunnellüftung).

3 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 Richtlinien 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).

4 EINGANGSDATEN

4.1 Allgemein

Der Bedarfsplan für die Bundesfernstraßen als Anlage zum fünften Fernstraßenausbauänderungsgesetz enthält die Bundesautobahn A 39 Wolfsburg - Lüneburg als Bestandteil eines Gesamtverkehrskonzeptes für den nordostdeutschen Raum.

In diesem Zuge ist die Anlage eines Lärmschutztunnels im Bereich Lüneburg-Moorfeld geplant.

4.2 Tunneldaten

Ein Übersichtslageplan der geplanten A 39 ist in der **Abb. 4.1** aufgezeigt. Die technische Planung mit Stand September 2009 findet sich im Anhang 1.

Der Tunnel ist Nord-Süd ausgerichtet und weist eine Länge von etwa 400 m auf. Als Querschnitt ist je Tunnelröhre ein Rechteckprofil geplant. Die Abmessungen betragen

Im Bereich Stat. 4+360:

Fahrtrichtung Hamburg = Oströhre: Lichte Breite = 14 m sowie Lichte Höhe = 4.7 m

Fahrtrichtung Wolfsburg = Weströhre: Lichte Breite = 14 m sowie Lichte Höhe = 4.7 m

Im Bereich Stat. 4+550:

Fahrtrichtung Hamburg = Oströhre: Lichte Breite = 14.5 m sowie Lichte Höhe = 4.7 m

Fahrtrichtung Wolfsburg = Weströhre: Lichte Breite = 16.8 m sowie Lichte Höhe = 4.7 m

Die Längsneigung in Fahrtrichtung beträgt in der Oströhre -1.8 % sowie in der Weströhre +1.8 %.

Die zulässige Höchstgeschwindigkeit beträgt 80 km/h.

Während der Bauphase, mit einer geplanten Dauer von ca. 12 Monaten, soll jeweils zunächst die Oströhre des Tunnels ganztägig mit Gegenverkehr (4+0) mit schmaleren Fahrstreifen betrieben werden. Nach Fertigstellung der Weströhre wird der Tunnel im Richtungsverkehrsregime (2+2) befahren.

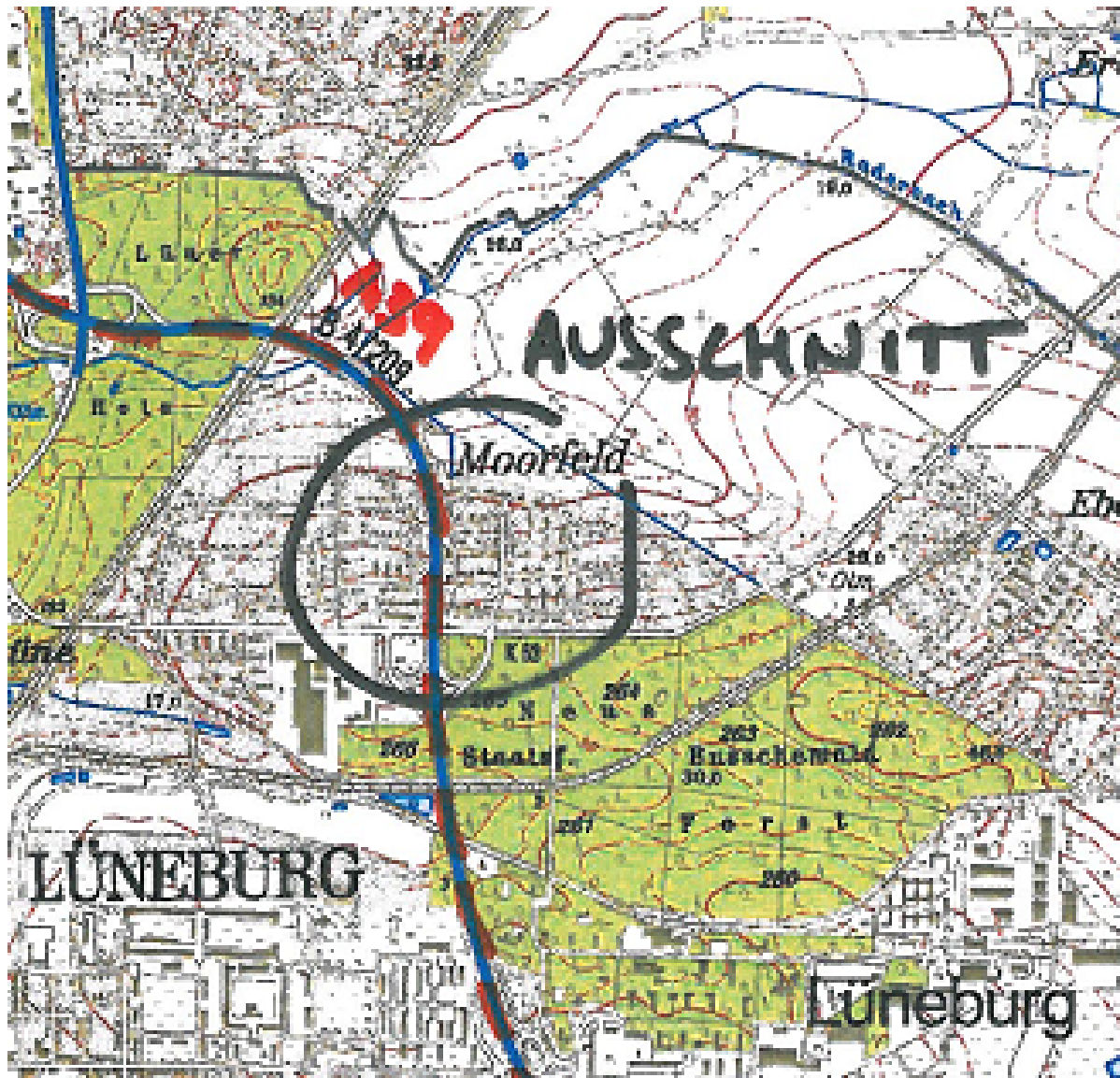


Abb. 4.1: Lageplan der A39 im Bereich des geplanten Lärmschutztunnels

Die für die Lüftung relevanten und den nachfolgenden Betrachtungen zugrunde gelegten Tunneldaten sind in den **Tab. 4.1** und **Tab. 4.2** zusammengestellt.

Parameter	Abkürzung	Wert	Einheit
Länge	L	400	m
Längsneigung	i	+1.8	%
freie Querschnittsfläche	A	79** bzw. 66*	m ²
Umfang innen	U	43** bzw. 37*	m
hydraulischer Durchmesser	D _H	7.3** bzw. 7.1*	m
Höhe über NN		ca. 30	m üNN

Tab. 4.1: Tunneldaten für die Lüftungsberechnungen Weströhre

* Nordbereich
** Südbereich

Parameter	Abkürzung	Wert	Einheit
Länge	L	400	m
Längsneigung	i	-1.8	%
freie Querschnittsfläche	A	79** bzw. 66*	m ²
Umfang innen	U	43** bzw. 37*	m
hydraulischer Durchmesser	D _H	7.3** bzw. 7.1*	m
Höhe über NN		ca. 30	m üNN

Tab. 4.2: Tunneldaten für die Lüftungsberechnungen Oströhre

* Nordbereich
** Südbereich

Für die strömungsmechanischen Berechnungen werden im Folgenden die nachstehenden Angaben in **Tab. 4.3** angesetzt. Dabei wird vorausgesetzt, dass die Tunnelwände glatt ausgeführt sind (Rauigkeiten ≤ 2 mm) und keine wesentlichen strömungsbehindernden Einbauten vorliegen.

Parameter	Abkürzung	Wert	Einheit
Dichte der Luft	ρ	1.2	kg/m ³
Wandreibungskoeffizient	λ	0.015	-
Einström-Verlustkoeffizient	ζ_E	0.3	-
Ausström-Verlustkoeffizient	ζ_A	1.0	-
Widerstandsfläche PKW im Tunnel	$cwT_{PKW} \cdot A_{PKW}$	0.9	m ²
Widerstandsbeiwert LKW im Tunnel	$cwT_{LKW} \cdot A_{LKW}$	5.2	m ²

Tab. 4.3: Strömungsmechanische und andere Eingangsdaten für die Lüftungsberechnungen

Die Zahlenwerte für die einzelnen Parameter wurden wie folgt bestimmt:

- Wandreibungskoeffizient λ , 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 λ 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.
- Einstrom-Verlustkoeffizient ζ_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 ζ_e . In der Literatur wird er mit 0.3 bis 0.6 angegeben (Herzke, 1972; STUVA, 1990). Wir gehen davon aus, dass Kanten der Tunnelportalöffnungen in abgerundeter Form vorliegen. Deswegen wird ein Wert von 0.3 angesetzt.
- Mittlere Widerstandsfläche der im Tunnel anzutreffenden Kraftfahrzeugflotte. Der Widerstandsbeiwert eines Fahrzeuges lässt sich wegen der unterschiedlichen Fahrzeugformen sinnvollerweise nur getrennt nach PKW und LKW angeben. Die entsprechenden Widerstandsflächen eines mittleren PKW und eines mittleren LKW bei frontaler Anströmung im Tunnel wurde entsprechend Bundesamt für Straßen ASTRA (2008) angesetzt.

4.3 Verkehrsdaten

Die durchschnittliche Verkehrsstärke (DTV) für das zu Jahr 2025 wurde vom Auftraggeber mit 59 900 Kfz/24h bei einem LKW-Anteil von 17 % angegeben. Die Spitzenstunde der Kfz-Belastung wird mit 10 % des DTV angesetzt.

Die zulässige Höchstgeschwindigkeit im Tunnel im Normalbetrieb beträgt 80 km/h.

Nach Auskunft des Auftraggebers ist es nicht ausgeschlossen, dass es im Tunnel während der Bauphase wegen des dichten Verkehrs und der eingeeengten Fahrbahnen zu regelmäßigen Staus kommen kann. Nach dem Umbau wird von keinem regelmäßig stockenden Verkehr oder Stau ausgegangen, auch wenn es gelegentlich geringe Beeinträchtigungen des Verkehrsflusses in der Spitzenstunde im Bereich des Einfädelungstreifen (Oströhre) geben kann.

Weiterhin wird zunächst davon ausgegangen, dass der Tunnel von Gefahrguttransportern befahren werden darf. Bei der Risikobewertung wird dieser Umstand diskutiert.

4.4 Meteorologie

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 West bis Nord, für die Südportale die Windrichtungen Süd bis Ost relevant.

In Day (1998) wird die Empfehlung aufgeführt, für die Dimensionierung der Lüftung in Abhängigkeit des Winddrucks die Windgeschwindigkeit zu berücksichtigen, die in 5 % der Zeit überschritten wird.

Das Plangebiet ist lediglich leicht orographisch gegliedert und im Gebiet der Luheheide gelegen, welches großräumig gesehen der Lüneburger Heide zugeordnet wird. Vereinfacht dargestellt bildet die Luheheide eine schwach nach Norden geneigte Fläche, die von überwiegend nach Norden gerichteten Flusstälern durchzogen ist. Vom Deutschen Wetterdienst (DWD) wurde für den Bereich des 1. Abschnittes der A 39 die Übertragbarkeit verschiedener Winddaten geprüft, die an Windmessstationen in der Umgebung des Plangebietes erfasst

wurden (DWD, 2007). Demnach ist die Übertragbarkeit der an der Station Fassberg vom DWD erfassten Winddaten gegeben.

Die Station Fassberg ist ca. 41 km südsüdöstlich des Untersuchungsgebietes gelegen und weist eine langjährige kontinuierliche Windmessung auf. Die Messstelle liegt in 73 m Höhe über NN an einem Flugplatzgelände. Der Windmesser befindet sich in 10 m Höhe über Grund. In **Abb. 4.2** ist die Häufigkeitsverteilung von Windrichtungen und Windgeschwindigkeiten des repräsentativen Jahres 1991 dargestellt. Die Windrichtungsverteilung wird von Winden aus westsüdwestlichen bis westlichen Richtungen geprägt, für welche auch die höchsten Windgeschwindigkeiten zu beobachten sind. Winde aus östlichen Richtungen bilden ein Nebenmaximum. Die mittlere Windgeschwindigkeit beträgt ca. 3.4 m/s.

Entsprechend der Windgeschwindigkeitsstatistik liegt der 95 Perzentilwert der Windgeschwindigkeit aus den o. g. Windsektoren an den Nordportalen bei ca. 6 m/s, an den Südportalen bei ca. 5 m/s. Wegen der Situation an den Portalen (aktive Lärmschutzmaßnahmen bzw. Tieflage) wird der etwas niedrigere Windgeschwindigkeitswert (5 m/s) für beide Portale verwendet.

Um den Einfluss realistisch abzuschätzen, wird diese Windgeschwindigkeit bei den Berechnungen auf eine Referenzhöhe von 5 m über Grund (entspricht dort 4.2 m/s) umgerechnet.

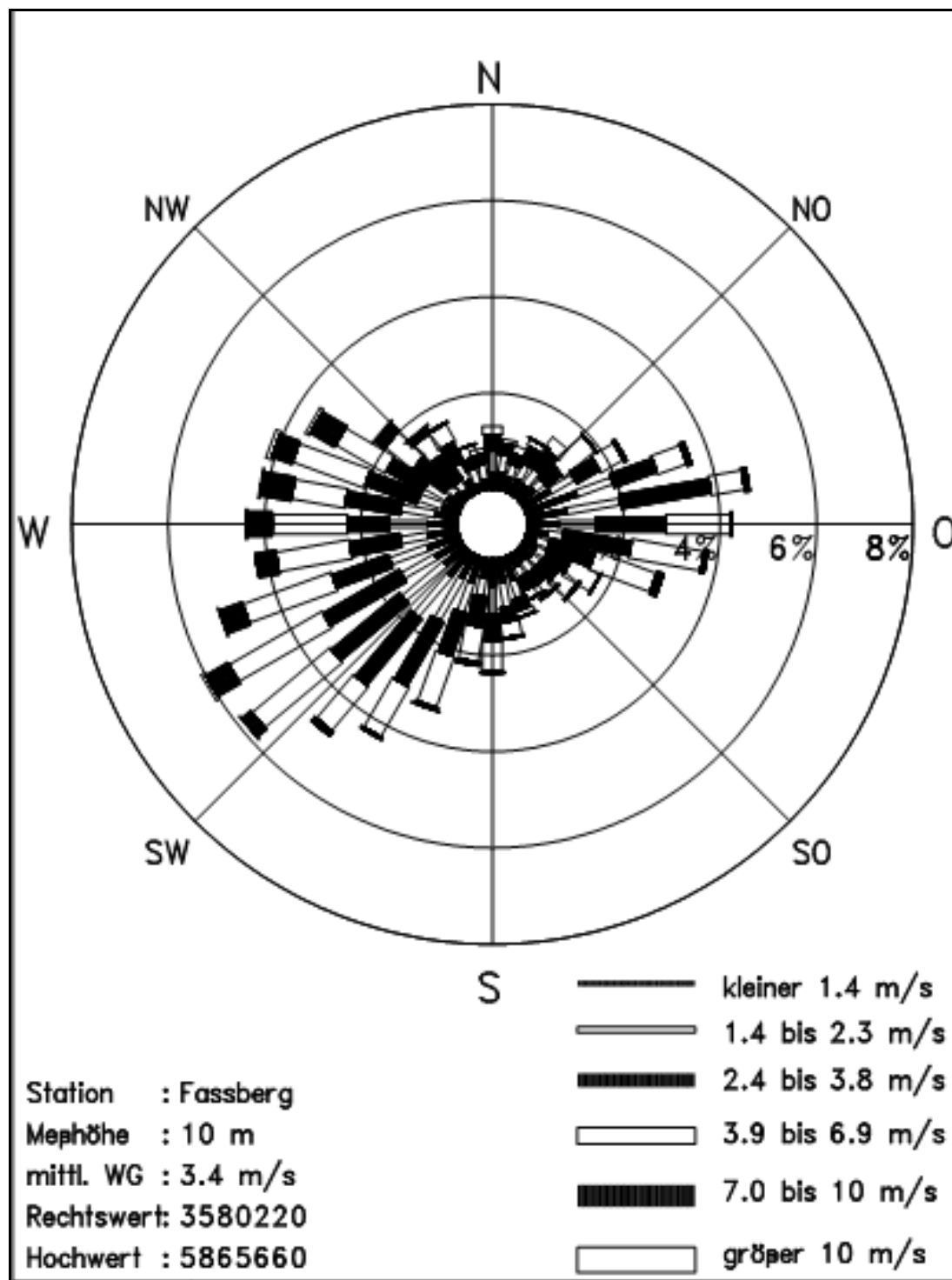


Abb. 4.2: Häufigkeitsverteilung von Windrichtungen und Windgeschwindigkeiten an der Station Fassberg

5 LÜFTUNGSBERECHNUNGEN NACH RABT

5.1 Zuluftbedarf bei verschiedenen Verkehrszuständen

5.1.1 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 Fahrbahnneigung, der Höhe über NN und des LKW-Typs sind in Anhang B der RABT erläutert.

5.1.2 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. 5.1** 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. 5.1: 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 **Tab A2.1** für den Fall tabellarisch aufgeführt, dass der Tunnel, wie nach dem Neubau geplant, im Richtungsverkehr betrieben wird. Demnach wird bei Stau ein maximaler Gesamtzuluftbedarf von 9 m³/s und für 20 km/h von ca. 8 m³/s (Oströhre, bergab) bzw. 10 m³/s (Weströhre, bergauf) benötigt. Die Zuluftmenge bei fahrendem Verkehr sinkt bei Fahrzeuggeschwindigkeiten von 80 km/h auf ca. 5 bis 7 m³/s ab.

Während der Bauphase, wenn der Tunnel im Gegenverkehrsregime betrieben wird, ergeben sich die Ergebnisse entsprechend **Tab. A2.2**. Demnach wird bei Stau ein maximaler Gesamtzuluftbedarf von ca. 18 m³/s und für 20 km/h von ca. 22 m³/s benötigt. Die Zuluftmenge bei fahrendem Verkehr sinkt bei Fahrzeuggeschwindigkeiten von 50 km/h auf 18 m³/s sowie zwischen 60 km/h und 80 km/h auf 14 m³/s bis 16 m³/s.

5.2 Selbstlüftung durch äußere Einflüsse bei Richtungsverkehr

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; Israel 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 fahrzeuginduzierte Längsströmung in einer Tunnelröhre mit konstantem Querschnitt bestimmen (Herzke, 1972; Israël et al., 1996).

Das Ergebnis dieser Berechnungen ist in der **Tab. A3.1** aufgeführt. Demnach wird bei einer Fahrzeuggeschwindigkeit von 80 km/h ein Volumenstrom von 405 m³/s erzeugt. Selbst bei stockendem Verkehr mit Geschwindigkeiten von 20 km/h wird noch ein Volumenstrom von ca. 160 m³/s induziert, der zur ausreichenden Verdünnung der Schadstoffe im Tunnel ausreichen würde.

Nur bei geringen Fahrzeuggeschwindigkeiten und ausreichendem Winddruck auf das Ausfahrportal kann die Längsströmung im Tunnel zusammenbrechen. Im Allgemeinen wird aber bei Richtungsverkehr in den Tunnelröhren die Belüftung durch die Kolbenwirkung der Fahrzeuge ausreichen.

5.3 Selbstlüftung durch äußere Einflüsse bei Gegenverkehrsregime

Bei dem hier in der Bauphase geplanten Betrieb mit Gegenverkehr wird die Oströhre in beiden Richtungen befahren. Sind die Verkehrsdichten in beiden Richtungen gleich groß und der Verkehrsfluss kontinuierlich, so heben sich die Kolbenwirkungen im Tunnel auf. Falls zugleich kein Luftdruckunterschied zwischen den Portalen herrscht, kommt es zu keiner Luftzufuhr in den Tunnel. Bei einer Druckdifferenz zwischen den Portalen und/oder kontinuierlichen Verkehrsflüssen mit unterschiedlichen Verkehrsdichten in den beiden Richtungen kann sich eine Längsströmung im Tunnel ausbilden. Die Strömungsgeschwindigkeit u_T und damit die dadurch dem Tunnel zugeführte Luftmenge können nach Freibauer (1978) mit den folgenden Gleichungen bestimmt werden:

$$u_T = \frac{I}{a} \cdot (-b \pm \sqrt{b^2 - a \cdot c})$$

$$a = \frac{I}{A} \cdot [fb_1 \cdot M_1 \cdot \text{sign}(V_{Kfz1} - u_T) + fb_2 \cdot M_2 \cdot \text{sign}(V_{Kfz2} - u_T)] - fa$$

$$b = \frac{I}{A} \cdot [fb_1 \cdot M_1 \cdot (-V_{Kfz1}) \cdot \text{sign}(V_{Kfz1} - u_T) + fb_2 \cdot M_2 \cdot (-V_{Kfz2}) \cdot \text{sign}(V_{Kfz2} - u_T)]$$

$$c = \frac{I}{A} \cdot [fb_1 \cdot M_1 \cdot V_{Kfz1}^2 \cdot \text{sign}(V_{Kfz1} - u_T) + fb_2 \cdot M_2 \cdot V_{Kfz2}^2 \cdot \text{sign}(V_{Kfz2} - u_T)] + \Delta p / \frac{\rho}{2}$$

mit:

$a_{LKW1/2}$:	LKW-Anteil an der Fahrzeugflotte Fahrspur Richtung 1 bzw. 2
$M_{1/2}$:	Anzahl der Fahrzeuge pro Stunde Fahrspur Richtung 1 bzw. 2
$V_{Kfz1/2}$:	Fahrgeschwindigkeiten Fahrspur Richtung 1 bzw. 2
$f_a = (1 + \xi_e + \lambda \cdot L/D_v) \cdot \text{sign}(u_T)$		
$f_{b1/2} = c_w T_{LKW} \cdot a_{LKW1/2} + (1 - a_{LKW1/2}) \cdot c_w T_{PKW}$		
Δp	:	Luftdruckdifferenz

Bei den im Tunnel vorliegenden Längsneigungen von ca. 2 % stellen sich, bei einem Tempolimit von 80 km/h im Tunnel, je nach Längsneigung im Mittel Fahrgeschwindigkeiten von ca. 70 bis 90 km/h ein. Die bergabfahrenden Fahrzeuge werden tendenziell schneller fahren als die bergauf fahrenden. Damit ist durch die Fahrzeuggeschwindigkeiten mit einer bevorzugten Strömungsrichtung zu rechnen. Bei einem Tempolimit von 60 km/h stellen sich Fahrzeuggeschwindigkeiten von ca. 70 km/h, weitgehend unabhängig von der Bergauf- bzw. Bergabfahrt, ein.

Wenn eine höhere Verkehrsdichte auf einer Fahrspur vorliegt, dann wird die durch die Fahrzeugbewegung induzierte Luftströmung im Tunnel in diese Fahrtrichtung induziert. Desgleichen wirkt der bei Wind aus Nord oder Süd herrschende Winddruck auf die Portale. Folgende Szenarienrechnungen geben Hinweis auf die sich unter diesen Bedingungen einstellenden Verhältnisse:

Bei einer angenommenen Luftdruckdifferenz zwischen Süd- und Nordportal von 5 Pa (Südostwind) und einer um 10 % höheren Verkehrsdichte in Fahrtrichtung Nord sowie Fahrzeuggeschwindigkeiten von jeweils 70 bzw. 90 km/h stellt sich eine Luftströmung im Tunnel von ca. 2.1 m/s und damit ein Volumenstrom von ca. 137 m³/s (**Tab. A3.2**) ein. Bei diesen Verkehrszahlen und mit diesen Ansätzen wird demnach ein Volumenstrom erreicht, der zur Verdünnung der Tunnelluft ausreicht. Bei Gegenwind mit einer Luftdruckdifferenz von 10 Pa (Nordwind) und 5 % höherem Verkehrsaufkommen in Richtung Nord reduzieren sich die Schubkräfte, so dass die Luftströmung auf ca. 63 m³/s abnimmt (**Tab. A3.3**). Aber auch das reicht für eine Belüftung gut aus. Bei gleich großen Fahrzeuggeschwindigkeiten (z. B. bei Tempolimit 60 km/h) und einer Luftdruckdifferenz von 10 Pa (Nordwind) kompensieren sich die Schubkräfte (**Tab. A3.4**).

Im Fall von stockendem Verkehr oder Stau auf der Fahrspur Richtung Nord mit 20 % höherem Verkehrsaufkommen als in Gegenrichtung wird sich nach den o.a. Ansätzen bei einem gegengerichteten Winddruck von 5 Pa (Nordwind) eine Strömungsgeschwindigkeit von 0.1m/s (7 m³/s) in Richtung Nordportal einstellen (**Tab. A3.5**). Diese würde ebenfalls nicht für eine ausreichende Verdünnung der Tunnelluft ausreichen.

Es kann deshalb nicht immer davon ausgegangen werden, dass die Selbstlüftung durch die Kolbenwirkung der Fahrzeuge oder die meteorologischen Bedingungen sowohl im Normalbetrieb als auch bei Stau ausreicht. Ein kontinuierlich vorhandener Verkehrsfluss und/oder Winddruck in der „richtigen“ Richtung wird nicht immer vorliegen. Dann wird es zu einem „Pendeln“ der Luftsäule in den Tunnelröhren kommen. Der in Tunnelmitte liegende Teil wird ähnlich wie ein Pfropfen in einem Rohr nur hin- und herbewegt. Dadurch kann es zur Schadstoffanreicherung in der Mitte des Tunnels kommen.

6 BRAND IM TUNNEL

6.1 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).

6.2 Bewertung des Gefährdungs- und des Sicherheitspotenzials

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 vorliegend eine Bewertung des Gefährdungs- und Sicherheitspotenzials durchgeführt.

In den **Tab. 6.1** und **Tab. 6.2** sind die qualitativen Bewertungen des Gefährdungs- und des Sicherheitspotenzials entsprechend den Angaben in DMT (1999) für den Normalbetrieb und

die Umbauphase 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 als sicherheitlich unbedenklich eingestuft werden kann (DMT, 1999):

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

Parameter	Lärmschutztunnel Lüneburg Normalbetrieb	
	Daten	Bewertung (DMT, 1999)
Länge	400 m	--
Tunneltyp	II (Rechteckquerschnitt 14 m)	--
Längsneigung	2 % (Gefälle <3 %)	mittel
Verkehrsleistung je Röhre	4.3×10^6 Kfz-km/a	mittel
LKW-Anteil	17 %	mittel
Gefahrguttransporte	ohne Einschränkung zugelassen	hoch
Verkehrszustand	flüssiger Verkehr	niedrig
Verkehrsart	Richtungsverkehr	niedrig
Gesamtgefährdungspotenzial		mittel

Tab. 6.1: Bewertung des Gefährdungspotenzials nach DMT (1999) nach dem Neubau unter der Annahme ausnahmsweise stockender Verkehr und zugelassene Gefahrguttransporte

Parameter	Lärmschutztunnel Lüneburg, Bauphase	
	Daten	Bewertung (DMT, 1999)
Länge	400 m	--
Tunneltyp	II (Rechteckquerschnitt 14 m)	--
Längsneigung	2 % (Gefälle <3 %)	mittel
Verkehrsleistung je Röhre	8.8×10^6 Kfz-km/a	mittel
LKW-Anteil	17 %	mittel
Gefahrguttransporte	ohne Einschränkung zugelassen	hoch
Verkehrszustand	Ausnahmsweise stockender Verkehr	niedrig
Verkehrsart	Gegenverkehr	hoch
Gesamtgefährdungspotenzial		mittel

Tab. 6.2: Bewertung des Gefährdungspotenzials nach DMT (1999) während des Neubaus unter der Annahme ausnahmsweise stockender Verkehr und zugelassene Gefahrguttransporte

Nach der Bewertung in **Tab. 6.1** ist für den betrachteten Tunnel laut DMT (1999) im Normalbetrieb ein mittleres Gesamtgefährdungspotenzial gegeben. Auch unter der Annahme, dass Gefahrguttransporte nicht im Tunnel zugelassen sind, würde ein mittleres Gesamtgefährdungspotenzial resultieren.

Nach der Bewertung in **Tab. 6.2** ist für den betrachteten Tunnel laut DMT (1999) in der Bauphase ebenfalls ein mittleres Gesamtgefährdungspotenzial gegeben, wenn man von ausnahmsweise stockenden Verkehr und uneingeschränkten Gefahrguttransporten ausgeht. Unter der Annahme, dass Gefahrguttransporte im Tunnel zugelassen sind und *täglich stockender Verkehr* auftritt, würde ein *hohes* Gesamtgefährdungspotenzial resultieren.

Eine detaillierte Risikobewertung könnte mittels BAST (2009) durchgeführt. Dies war nicht Bestandteil der vorliegenden Untersuchung.

6.3 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 m³/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 4.3) erhält man für den ca. 400 m langen Tunnel bei *Richtungsverkehr* weniger als 4 000 LKW x km/Tag. Aus diesem Wert folgt gemäß RABT (2006) eine Brandleistung von 30 MW. Die zugehörige Rauchgasmenge nach RABT (2006) beträgt 80 m³/s.

Im Fall des *Gegenverkehrs* in einer Röhre werden unter Zugrundelegung der Verkehrszahlen für das Bezugsjahr 2025 mehr als 4 000 aber weniger als 6 000 LKW x km/Tag erwartet. Dies würde zu einer zu berücksichtigenden Brandleistung von 50 MW mit einer zugehörigen Rauchgasmenge nach RABT (2006) von 120 m³/s führen.

6.4 Lüftungssysteme im Brandfall

Nach RABT (2006, dort Tab. 9b) wird für Tunnel im Richtungsverkehr mit ausnahmsweise stockendem Verkehr bei Tunnellängen bis 600 m eine natürliche Längslüftung angegeben. Zwischen 600 m und 3 000 m (hier nicht relevant) wird eine mechanische Längslüftung empfohlen.

Nach RABT (2006, dort Tab. 9a) ist für Tunnel im Gegenverkehr bei Tunnellängen bis 400 m eine natürliche Längslüftung ausreichend. Zwischen 400 m und 600 m wird eine mechanische Längslüftung empfohlen. Zwischen 600 m und 1 200 m (hier nicht relevant) sind je nach Risikoabwägung drei Lüftungsarten möglich:

- Mechanische 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.

Um eine Luft-/Rauchschichtung 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, soweit eine vorgesehen ist, 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.

7 BENÖTIGTES LÜFTUNGSSYSTEM NACH FERTIGSTELLUNG

Nach Ende des Neubaus wird der Tunnel im Richtungsverkehr befahren.

Auf Grund der prognostizierten Verkehrszahlen und der beendeten Bauarbeiten kann im Normalfall mit flüssigem Verkehr und damit von ausreichender Selbstlüftung ausgegangen werden (siehe Abschnitt 5.2). Die Anforderungen an die Lüftungskapazität werden daher durch die Ausnahmesituationen, wie stockender oder stillstehender Verkehr sowie Brand, festgelegt.

Die Tunnelröhren sind ca. 400 m lang. Die RABT (2006) lässt bei Tunneln bis 600 m Länge für die Lüftung im Brandfall eine natürliche Längslüftung zu, da „in kurzen Tunneln eine Beeinflussung mittels Ventilatoren wegen der Ausbreitungsgeschwindigkeit des Rauches keinen Sinn macht.“ Erst zwischen 600 m und 3 000 m wird eine mechanische Längslüftung empfohlen.

Die hier zu betrachtenden Tunnelröhren sind deutlich kürzer als 600 m. In der derzeitigen Planung sind zwei Fluchtwege zwischen den beiden Röhren bei Bau-km 4+550 sowie 4+415 geplant. Die Fluchtweglängen betragen damit maximal 135 m. Damit wären die max. Fluchtweglängen entsprechend RABT (2006) von 300 m in beiden Tunnelröhren deutlich eingehalten. Nach der Bewertung für den betrachteten Tunnel ist laut DMT (1999) im Normalbetrieb ein mittleres Gesamtgefährdungspotenzial gegeben. Für den Regelbetriebsfall wird keine mechanische Entlüftung benötigt, da sich infolge der Kolbenwirkung der Fahrzeuge sowie meteo-bedingter Strömungen der Tunnel selbst lüften wird.

Aus diesen Gründen kann auf die Installation einer Lüftungsanlage nach der Fertigstellung verzichtet werden.

8 BENÖTIGTES LÜFTUNGSSYSTEM WÄHREND DER BAUPHASE

Nachfolgend wird die Situation während der Bauphase diskutiert. Die Oströhre wird im Gegenverkehr befahren.

Die Anforderungen an die Lüftungskapazität werden durch die Ausnahmesituationen, wie stockender oder stillstehender Verkehr sowie Brand, festgelegt.

Bei Tunnellängen von mehr als 400 m sind nach RABT (2006) in regelmäßigen Abständen von kleiner/gleich 300 m Notausgänge anzuordnen. In der derzeitigen Planung sind zwei Fluchtwege zwischen den beiden Röhren bei Bau-km 4+550 sowie 4+415 geplant. Diese sollen nach Aussage des Auftraggebers schon während der Gegenverkehrsphase uneingeschränkt verfügbar sein. Die Fluchtweglängen betragen damit maximal 135 m. Damit wären die max. Fluchtweglängen entsprechend RABT (2006) von 300 m in beiden Tunnelröhren deutlich eingehalten. Nach der Bewertung in **Tab. 6.2** ist für den betrachteten Tunnel laut DMT (1999) in der Bauphase ein mittleres Gesamtgefährdungspotenzial gegeben. Unter der Annahme, dass Gefahrguttransporte im Tunnel zugelassen sind, und täglich Stau auftritt, würde ein hohes Gesamtgefährdungspotenzial resultieren.

Eine natürliche Längslüftung wird während der Bauphase dennoch als geeignet angesehen, weil

- bei der geringen Tunnellänge von ca. 400 m insbesondere auch bei Gegenverkehr eine Brandfalllüftung wegen der Gefahr der Rauchverwirbelung wenig Sinn macht,
- der Tunnel sich in den meisten Fällen selbst lüftet und es sich
- um eine temporäre Maßnahme mit der Dauer von ca. einem Jahr handelt.

Es sollten aber Unfall-/Brandrisiko senkende Maßnahmen ergriffen werden. Diese können zumindest sein:

- Während der Baumaßnahme dauerhaftes Tempolimit von 60 km/h. Bei diesen Geschwindigkeiten ist das Verhältnis zwischen Fahrzeugabstand und Emissionsverhalten/Fahrzeugfluss günstig und das Unfallrisiko geringer als bei 80 km/h.
- Baken bzw. Bischofsmützen zur Abgrenzung der Fahrtrichtungen.
- Verbot für die Durchfahrt von Gefahrguttransporten.
- Bauablauf so organisieren, dass möglichst Staus im Tunnel vermieden werden.

Nach RABT (2006) sind die Rettungswege (hier die Nottüren) zwischen den Tunnelröhren mit Türen zu verschließen. Diese Türen müssen auch während der Bauphase begehbar sein. Dies gilt ebenso für die Weströhre, die gerade gebaut bzw. ausgerüstet wird, aber dennoch als Fluchtweg dienen muss.

Sollte dies nicht möglich oder die Weströhre nicht begehbar sein, so sind weitere sicherheitsfördernde Maßnahmen zu ergreifen, wie weitere Absenkung der Fahrzeuggeschwindigkeit bzw. ggf. Tunnelsperrungen.

9 LITERATUR

- Bundesamt für Straßen ASTRA (2008): Lüftung der Straßentunnel. Systemwahl, Dimensionierung und Ausstattung. Richtlinie ASTRA 13 001. Bern, Ausgabe 2008 V2.01.
- BAST (2009): Bewertung der Sicherheit von Straßentunneln. Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen. Brücken und Ingenieurbau Heft B66. Mai 2009
- Day J.R. (1998): What price fire? The costs of providing fire ventilation for a road tunnel. Proceedings of 3rd 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. Deutsche Montan Technologie GmbH, Essen, im Auftrag der Bundesanstalt für Straßenwesen, Bergisch Gladbach.
- DWD (2007): Qualifizierte Prüfung (QPR) der Übertragbarkeit einer Ausbreitungsklassenstatistik (AKS) bzw. einer Ausbreitungsklassenzeitreihe (AKTerm) nach TA Luft 2002 für einen Standort bei 21337 Lüneburg. Amtliches Gutachten. Deutscher Wetterdienst, Abt. Klima- und Umweltberatung, Hamburg, den 24.01.2007.
- FHA (1995): Federal Highway Administration USA: Memorial Tunnel Fire Ventilation Test Program, November 1995.
- 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 Tunneln. 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.
- 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 A1:
LAGEPLAN FÜR LÄRMSCHUTZTUNNEL LÜNEBURG

A N H A N G A2:
BERECHNUNGEN DES ERFORDERLICHEN ZULUFTBEDARFS
NACH RABT (2006)

#70695 Lärmschutztunnel Lüneburg				nach RABT 2006				Bemessungskonzentrationen für den Zuluftbedarf			
Bezugsjahr		2025		Fahrzeugmasse LKW (nur 10..30t mögl.)		20 t		Verkehrszustand		CO-Konzentration	Sichttrübung
Gesamtlänge	L	0.4 km		Anteil PKW mit Diesel	xD	44% nach HBEFa2.1		COzul		Kzul	Extinktions-koeffizient K
Gradient (Betrag !!)	i	0.02		Umrechnung PKW-Einheiten	1 LKW =	2 PkwE		[ppm]		[1/m]	
Höhe über Meer		30 m üNN						flüssiger Spitzenverkehr V~ 50 - 100 km/h		70	0.005
		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	17.0%									
				steigende Röhre				fallende Röhre			
max. Verkehrsst. je Richtung (notfalls "0.1*DTV" eintragen)				Fahrstreifen FS		1	2	3	4	vF	
Mmax				M		1180	1770	1770	1180	[km/h]	
MlkW				LKW-Anteil		400	100	100	400	[PkwE/km]	
				M		33.9%	5.6%	5.6%	33.9%	max. Verkehrsdichte (RABT)	
						1580	1870	1870	1580	[PkwE/km]	
Tempolimit				Vzul		80 km/h				0	
Grenzgeschwindigkeit VF nach RABT für LKW										10	
steigende Röhre										60	
fallende Röhre											
										Stau	
										100 stockender Verkehr	
										33 flüssiger Verkehr	
										Städtischer Tunnel	
										mit Richtungsverkehr	

Fahrgeschwindigkeit vF [km/h]	Verkehrsdichte der Fahrzeuge je km und Fahrstreifen [Fz/km /FS] laut österr. Tunnelrichtlinie								Verkehrsdichte der Fahrzeuge je km und Fahrstreifen [Fz/km /FS]							
	angenommen nur Steigung								angenommen nur Gefälle							
	FS 1		FS 2		FS 3		FS 4		FS 3		FS 4		FS 3		FS 4	
	[PkwE/km]	[LKW/km]	[PkwE/km]	[LKW/km]	[PkwE/km]	[LKW/km]	[PkwE/km]	[LKW/km]	[PkwE/km]	[LKW/km]	[PkwE/km]	[LKW/km]	[PkwE/km]	[LKW/km]	[PkwE/km]	[LKW/km]
0	165	41.8	165	8.8	165	8.8	165	41.8	165	8.8	165	41.8	165	8.8	165	41.8
5	45	11.5	63	3.4	63	3.4	45	11.5	63	3.4	45	11.5	63	3.4	45	11.5
10	95	24.0	100	5.3	100	5.3	95	24.0	100	5.3	95	24.0	100	5.3	95	24.0
20	65	16.5	75	4.0	75	4.0	65	16.5	75	4.0	65	16.5	75	4.0	65	16.5
30	49	12.3	57	3.0	57	3.0	49	12.3	57	3.0	49	12.3	57	3.0	49	12.3
40	38	9.7	45	2.4	45	2.4	38	9.7	45	2.4	38	9.7	45	2.4	38	9.7
50	31	8.0	37	2.0	37	2.0	31	8.0	37	2.0	31	8.0	37	2.0	31	8.0
60	26	6.7	31	1.7	31	1.7	26	6.7	31	1.7	26	6.7	31	1.7	26	6.7
70	22	5.7	27	1.4	27	1.4	22	5.7	27	1.4	22	5.7	27	1.4	22	5.7
80	19	4.9	23	1.2	23	1.2	19	4.9	23	1.2	19	4.9	23	1.2	19	4.9
90	17	4.3	20	1.1	20	1.1	17	4.3	20	1.1	17	4.3	20	1.1	17	4.3
100	15	3.8	18	1.0	18	1.0	15	3.8	18	1.0	15	3.8	18	1.0	15	3.8
spez. Zuluftbedarf pro km $Q_{ZL}(CO) = 1/3600 * 10^6 / CO_{zul} * (N_{pkw} * (eCO_{pkwB} + eCO_{pkwD}) + N_{lkW} * eCO_{lkW})$																
Q _{ZL} (Trübe) = 1/3600 * 1/Kzul * (N _{pkw} * e _{TrpkwD} + N _{lkW} * e _{TrlkW})																
vF [km/h]	FS1 [m3/s/km]		FS2 [m3/s/km]		FS 1 + FS 2 [m3/s/km]		FS 1 + FS 2 [m3/s]		FS3 [m3/s/km]		FS4 [m3/s/km]		FS 3 + FS 4 [m3/s/km]		FS 3 + FS 4 [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)	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	2.7	15.3	2.7	6.1	5.4	21.4	2.2	8.5	2.7	6.1	2.7	15.3	5.4	21.4	2.2	8.5
5	1.2	6.1	1.8	4.0	3.1	10.1	1.2	4.0	1.6	3.4	0.9	4.4	2.5	7.8	1.0	3.1
10	3.3	14.1	3.9	6.9	7.2	20.9	2.9	8.4	3.4	5.9	2.5	10.5	5.8	16.4	2.3	6.6
20	3.9	16.7	4.9	9.4	8.9	26.1	3.5	10.4	4.2	7.8	3.1	13.3	7.2	21.1	2.9	8.4
30	3.4	15.1	4.3	9.1	7.7	24.2	3.1	9.7	3.9	7.1	2.9	12.1	6.8	19.2	2.7	7.7
40	3.1	14.2	3.9	9.2	7.0	23.4	2.8	9.4	3.4	7.0	2.5	10.9	5.9	17.8	2.4	7.1
50	2.8	13.4	3.7	9.9	6.5	23.3	2.6	9.3	2.8	7.1	2.0	9.8	4.8	16.9	1.9	6.8
60	2.8	13.3	3.8	10.5	6.7	23.8	2.7	9.5	2.3	7.3	1.6	9.3	4.0	16.6	1.6	6.6
70	3.1	12.1	4.5	8.6	7.6	20.7	3.0	8.3	2.0	6.2	1.4	8.5	3.4	14.7	1.4	5.9
80	3.2	10.3	4.9	6.9	8.1	17.1	3.2	6.8	1.8	5.4	1.2	8.0	3.0	13.4	1.2	5.4
90	3.6	10.0	6.2	8.1	9.8	18.0	3.9	7.2	1.7	6.2	1.2	8.3	2.8	14.5	1.1	5.8
100	4.5	9.8	8.1	9.1	12.5	18.9	5.0	7.6	1.7	6.8	1.2	7.9	2.9	14.7	1.1	5.9

Tab. A2.1: Berechnungen des erforderlichen Zuluftbedarfs nach RABT (2006) für Richtungsverkehr (nach Bauphase)

#70695 Lärmschutztunnel Lüneburg				nach RABT 2006				Bemessungskonzentrationen für den Zuluftbedarf			
Bezugsjahr		2015		Fahrzeugmasse LKW (nur 10..30t mögl.)		20 t		Verkehrszustand	CO-Konzentration	Sichttrübung	
Gesamtlänge	L	0.4 km		Anteil PKW mit Diesel	xD	42% nach HBEFa2.1			COzul	Kzul	Extinktions-
Gradient (Betrag !!)	i	0.02		Umrechnung PKW-Einheiten	1 LKW =	2 PkwE			[ppm]	[1/m]	koeffizient K
Höhe über Meer		30 m üNN						flüssiger Spitzenverkehr V~ 50 - 100 km/h	70	0.005	
		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	17.0%									
max. Verkehrsst. je Richtung (notfalls "0.1*DTV" eintragen)				Fahrstreifen FS	1	2	3	4	vF [km/h]	max. Verkehrsdichte (RABT) [PkwE/km]	
Mmax		5990 KFZ/h		M	1497.5	1497.5	1497.5	1497.5	0	165 Stau	
MlkW		1018 LKW/h			254.5	254.5	254.5	254.5	10	85 stockender Verkehr	
				LKW-Anteil	17.0%	17.0%	17.0%	17.0%	60	25 flüssiger Verkehr	
				M	1752	1752	1752	1752 PkwE/h			
Tempolimit	Vzul	80 km/h								Städtischer Tunnel mit Gegenverkehr	
Grenzgeschwindigkeit VF nach RABT für LKW											
steigende Röhre		72 km/h									
fallende Röhre		87 km/h									

Fahrgeschwindigkeit vF [km/h]	Verkehrsdichte der Fahrzeuge je km und Fahrstreifen [Fz/km /FS] laut österr. Tunnelrichtlinie								Verkehrsdichte der Fahrzeuge je km und Fahrstreifen [Fz/km /FS]							
	Steigung				Gefälle				FS 3				FS 4			
	FS 1		FS 2		FS 3		FS 4		FS 3		FS 4		FS 3		FS 4	
	[PkwE/km]	[LKW/km]	[PkwE/km]	[LKW/km]	[PkwE/km]	[LKW/km]	[PkwE/km]	[LKW/km]	[PkwE/km]	[LKW/km]	[PkwE/km]	[LKW/km]	[PkwE/km]	[LKW/km]	[PkwE/km]	[LKW/km]
0	165	24.0	165	24.0	165	24.0	165	24.0	165	24.0	165	24.0	165	24.0	165	24.0
5	55	7.9	55	7.9	55	7.9	55	7.9	55	7.9	55	7.9	55	7.9	55	7.9
10	85	12.3	85	12.3	85	12.3	85	12.3	85	12.3	85	12.3	85	12.3	85	12.3
20	71	10.3	71	10.3	71	10.3	71	10.3	71	10.3	71	10.3	71	10.3	71	10.3
30	54	7.8	54	7.8	54	7.8	54	7.8	54	7.8	54	7.8	54	7.8	54	7.8
40	43	6.2	43	6.2	43	6.2	43	6.2	43	6.2	43	6.2	43	6.2	43	6.2
50	35	5.1	35	5.1	35	5.1	35	5.1	35	5.1	35	5.1	35	5.1	35	5.1
60	25	3.6	25	3.6	25	3.6	25	3.6	25	3.6	25	3.6	25	3.6	25	3.6
70	25	3.6	25	3.6	25	3.6	25	3.6	25	3.6	25	3.6	25	3.6	25	3.6
80	22	3.1	22	3.1	22	3.1	22	3.1	22	3.1	22	3.1	22	3.1	22	3.1
90	19	2.7	19	2.7	19	2.7	19	2.7	19	2.7	19	2.7	19	2.7	19	2.7
100	17	2.4	17	2.4	17	2.4	17	2.4	17	2.4	17	2.4	17	2.4	17	2.4
	spez. Zuluftbedarf pro km $Q_{ZL}(CO) = 1/3600 \cdot 10^6 / CO_{zul} \cdot (N_{pkw} \cdot (eCO_{pkwB} + eCO_{pkwD}) + N_{lkW} \cdot eCO_{lkW})$								$Q_{ZL}(Trübe) = 1/3600 \cdot 1/K_{zul} \cdot (N_{pkw} \cdot eTrpkwD + N_{lkW} \cdot eTrlkW)$							
	FS1 [m3/s/km]		FS2 [m3/s/km]		FS 1 + FS 2 [m3/s/km]		FS3 [m3/s/km]		FS4 [m3/s/km]		FS 3 + FS 4 [m3/s/km]		Gesamt-Zuluftbedarf FS 1 bis FS 4 [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)	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	2.9	11.4	2.9	11.4	5.7	22.9	2.9	11.4	2.9	11.4	5.7	22.9	4.6	18.3		
5	1.6	6.0	1.6	6.0	3.3	11.9	1.3	4.4	1.3	4.4	2.6	8.8	2.4	8.3		
10	3.4	10.2	3.4	10.2	6.8	20.5	2.7	7.8	2.7	7.8	5.5	15.6	4.9	14.4		
20	4.8	15.1	4.8	15.1	9.6	30.1	3.9	12.0	3.9	12.0	7.9	24.0	7.0	21.7		
30	4.2	14.1	4.2	14.1	8.4	28.1	3.7	11.0	3.7	11.0	7.4	22.0	6.3	20.1		
40	3.8	13.5	3.8	13.5	7.5	27.1	3.2	10.2	3.2	10.2	6.4	20.3	5.6	19.0		
50	3.5	13.3	3.5	13.3	7.0	26.7	2.6	9.5	2.6	9.5	5.2	19.1	4.9	18.3		
60	3.1	11.6	3.1	11.6	6.2	23.2	1.8	7.9	1.8	7.9	3.7	15.8	4.0	15.6		
70	4.1	11.8	4.1	11.8	8.2	23.6	1.9	8.2	1.9	8.2	3.7	16.4	4.8	16.0		
80	4.4	9.8	4.4	9.8	8.8	19.5	1.6	7.4	1.6	7.4	3.3	14.8	4.8	13.7		
90	5.3	10.2	5.3	10.2	10.7	20.4	1.5	8.0	1.5	8.0	3.1	15.9	5.5	14.5		
100	6.8	10.6	6.8	10.6	13.6	21.2	1.6	8.0	1.6	8.0	3.1	16.1	6.7	14.9		

Tab. A2.2: Berechnungen des erforderlichen Zuluftbedarfs nach RABT (2006) für Gegenverkehr (während Bauphase)

A N H A N G A3:
BERECHNUNG DER SELBSTLÜFTUNG

Projekt

#70695 Lärmschutztunnel Lüneburg (Richtungsverkehr)

Tunnel Daten			Verkehrsdaten		
Gesamtlänge	L	400 m	Verkehrstärke je Röhre	M	2995 KFZ/h
lichter Querschnitt	A	66 m ²	Lkw-Anteil	alkw	17.0% -
Umfang innen	U	37.4 m	Fahrgeschwindigkeit	vKFZ	80 km/h
hydr. Durchmesser	Dh	7.1 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 _{pkw}	0.3
Einströmverlustkoeffizient	zeta _E	0.3 -	Widerstandsbeiwert (Lkw)	cw _{lkw}	1
			Querschn.fläche (Pkw)	Ap _{kw}	1.5 m ²
			Querschn.fläche (Lkw)	Al _{kw}	5 m ²
wegen Einfluss Tunnelröhre (Herzke, 1972):			Widerstandsbeiwert im Tunnel (Pkw)	cw _{Tpkw}	0.31
			Widerstandsbeiwert im Tunnel (Lkw)	cw _{Tlkw}	1.17

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

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

induzierte Strömungs-
geschwindigkeit
entspr. Volumenstrom

u _T =	6.1 m/s
Q _v =	u _T * A
Q _v =	405 m ³ /s

$$f_a = \sqrt{(1 + \zeta_E + \lambda \cdot L / D_h) \cdot A \cdot 3600 / L}$$

f_a = 35.74

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

f_b = 5.39

Fahrgeschwindigkeit v _F [km/h]	induzierte Strömungsgeschwindigkeit [m/s]	induzierter Volumenstrom [m ³ /s]
20	2.4	159
30	3.2	211
40	3.9	257
50	4.5	298
60	5.1	336
70	5.6	372
80	6.1	405

siehe obiges Beispiel

Tab. A3.1: Berechnungen der durch Fahrzeugbewegungen erzeugten Luftströmung bei Richtungsverkehr

induzierte Strömungs-
geschwindigkeit
entspr. Volumenstrom

```
soll = 0 !!!
      0
      0
      0
```

Tab. A3.2: Berechnung der Selbstlüftung nach Freibauer (1978) durch Fahrzeugschub bei Gegenverkehr mit 10% unterschiedlichen Verkehrsdichten und Winddruckdifferenz 5Pa

induzierte Strömungs- geschwindigkeit	$u_T = 1/a_- \cdot [-b_- \pm \sqrt{b_-^2 - a_- \cdot c_-}]$	soll = 0 !!!
	$u_T \quad 0.9 \text{ m/s}$	0
entspr. Volumenstrom	$Q_v = u_T \cdot A$	0
	$Q_v \quad 63 \text{ m}^3/\text{s}$	0

$c_{wFw1} = (1 - \alpha_{kw1}) \cdot c_{wTpkw} \cdot F_{pkw} + c_{wTlkw} \cdot F_{lkw} \cdot \alpha_{kw1}$	$c_{wFw2} = (1 - \alpha_{kw2}) \cdot c_{wTpkw} \cdot F_{pkw} + c_{wTlkw} \cdot F_{lkw} \cdot \alpha_{kw2}$
$c_{wFw1} \quad 1.63 \text{ m}^2$	$c_{wFw2} \quad 1.63 \text{ m}^2$
$N1_ \text{ und } N2_ \text{ Anzahl der KFZ im Tunnel nach RVS 9.262 Tunnel (Wien, 1997) - Biblio 13.4.16}$	
$N1_ \quad 19 \text{ KFZ im Tunnel Fahrtrichtung 1}$	$N2_ \quad 21 \text{ KFZ im Tunnel Fahrtrichtung 2}$

$a_- = 1/A \cdot (c_{wFw1} \cdot N1_ \cdot \text{sign_v1uv} + c_{wFw2} \cdot N2_ \cdot \text{sign_v2uv}) - (1 + \zeta_{E} + \lambda \cdot L/D_h) \cdot \text{sign_uv}$
$a_- \quad -2.21382$
$b_- = 1/A \cdot (c_{wFw1} \cdot N1_ \cdot (-v_{KFZ1}) \cdot \text{sign_v1uv} + c_{wFw2} \cdot N2_ \cdot (-v_{KFZ2}) \cdot \text{sign_v2uv})$
$b_- \quad -21.8129$
$c_- = 1/A \cdot (c_{wFw1} \cdot N1_ \cdot (v_{KFZ1})^2 \cdot \text{sign_v1uv} + c_{wFw2} \cdot N2_ \cdot (v_{KFZ2})^2 \cdot \text{sign_v2uv}) + \Delta P / (r_o/2)$
$c \quad 43.3749$

Tab. A3.3: Berechnung der Selbstlüftung nach Freibauer (1978) durch Fahrzeugschub bei Gegenverkehr mit 5% unterschiedlichen Verkehrsdichten und Winddruckdifferenz 10Pa

induzierte Strömungs- geschwindigkeit	$uT = 1 / a_- * [-b_- + \sqrt{b_-^2 - a_- * c_-}]$	soll = 0 !!!
entspr. Volumenstrom	$Qv = uT * A$	0
	$Qv = 3 \text{ m}^3/\text{s}$	0

$cwFw1 = (1 - alk_{w1}) * cwTpkw * Fpkw + cwTlkw * Flkw * alk_{w1}$	$cwFw2 = (1 - alk_{w2}) * cwTpkw * Fpkw + cwTlkw * Flkw * alk_{w2}$
$cwFw1 = 1.63 \text{ m}^2$	$cwFw2 = 1.63 \text{ m}^2$
$N1_ \text{ und } N2_ \text{ Anzahl der KFZ im Tunnel nach RVS 9.262 Tunnel (Wien, 1997) - Biblio 13.4.16}$	
$N1_ = 29 \text{ KFZ im Tunnel Fahrtrichtung 1}$	$N2_ = 26 \text{ KFZ im Tunnel Fahrtrichtung 2}$

$a_- = 1/A * (cwFw1 * N1_ * sign_v1uv + cwFw2 * N2_ * sign_v2uv) - (1 + \zeta_{E} + \lambda * L / Dh) * sign_uv$
$a_- = -2.08246$
$b_- = 1/A * (cwFw1 * N1_ * (-vKFZ1) * sign_v1uv + cwFw2 * N2_ * (-vKFZ2) * sign_v2uv)$
$b_- = -22.5147$
$c_- = 1/A * (cwFw1 * N1_ * (vKFZ1)^2 * sign_v1uv + cwFw2 * N2_ * (vKFZ2)^2 * sign_v2uv) + \Delta P / (ro/2)$
$c_- = 2.095579$

Tab. A3.4: Berechnung der Selbstlüftung nach Freibauer (1978) durch Fahrzeugschub bei Gegenverkehr mit 5% unterschiedlichen Verkehrsdichten und Winddruckdifferenz 10Pa

induzierte Strömungs-
geschwindigkeit
entspr. Volumenstrom

```
soll = 0 !!!
      0
      0
      0
```

Tab. A3.5: Berechnung der Selbstlüftung nach Freibauer (1978) durch Fahrzeugschub bei Gegenverkehr mit 20% unterschiedlichen Verkehrsdichten und Winddruckdifferenz 5Pa