

B 29 Tunnel Schwäbisch Gmünd

**Einbau einer Luftfilteranlage
zur Reinigung der Tunnelabluft**

von

Feinstaub und Schadgasen

Machbarkeitsstudie und Gutachten

Mai 2008

B 29 Tunnel Schwäbisch Gmünd

**Einbau einer Luftfilteranlage
zur Reinigung der Tunnelabluft
von
Feinstaub und Schadgasen**

Machbarkeitsstudie und Gutachten

Mai 2008

Inhaltsverzeichnis

1	Aufgabenstellung	2
2	Sachverhalt	4
3	Auslegung der Tunnellüftung	15
4	Kontrolle der Luftströmung	17
5	Auslegung der Abluftfilter	19
6	Lüftungssystemvarianten	21
7	Wahl des günstigsten Abluftsystems	24
8	Beschreibung einer Abluftfilteranlage	26
9	Betriebskosten einer Abluftfilteranlage	29
10	Betriebskosten der Lüftungsanlage gemäß Amtsentwurf	29
11	Betriebskosteneinsparung mit einer Abluftfilteranlage	29
12	Mehrkosten für den Einbau einer Abluftfilteranlage	30
13	Minderkosten beim Einbau einer Abluftfilteranlage	31
14	Zusammenfassung	33
15	Anhang	34

Einbau einer Luftfilteranlage zur Reinigung der Tunnelabluf von Feinstaub und Schadgasen.

*Dipl.-Ing. Hinrich Rottmann
Ingenieurbüro für sichere Tunnel durch
TUNNELLÜFTUNG + TUNNELENTRAUCHUNG
D-60439 Frankfurt am Main, den 15.05.2008*

1 Aufgabenstellung

In Schwäbisch Gmünd wird im Zuge der B 29 Stuttgart-Aalen ein 2,23 km langer Tunnel als Ortsdurchfahrung zur Entlastung des Ortskerns vom Durchgangsverkehr errichtet.

Mit dem Bau des Tunnels soll neben einer Verkehrsentlastung auch eine Entlastung der im Remstal ([Anlage A / Abb. 1](#)) gelegenen Innenstadt von verkehrsinduzierten Feinstaubpartikeln und Schadgasen erreicht werden.

Die bis 2005 gemessenen Belastungen sind an der Messstation in der Lorcher Straße so hoch gewesen, dass der in der EG-Richtlinie ab dem Jahr 2005 festgelegte Grenzwert für Feinstaub PM₁₀ dort häufiger überschritten worden ist, als es nach der EG-Richtlinie zulässig ist, so dass von der Stadt Schwäbisch Gmünd eine Umweltschutzzone ([Anlage A / Abb. 2](#)) für die Innenstadt mit entsprechender Plakettenpflicht ([Anlage A / Abb. 3](#)) hat eingerichtet werden müssen.

Zulässig sind gemäß 22. BImSchV folgende Feinstaubimmissionen bei PM₁₀

- ab 01.01.2005 max. 35 Überschreitungen pro Jahr des Grenzwertes von 50 µg/m³, gemessen als Tagesmittelwert (TMW), und 40 µg/m³, gemessen als Jahresmittelwert (JMW), für den keine Überschreitungen zulässig sind.

Neben den Grenzwerten für Feinstaub PM₁₀ sind in einer neuen EG-Richtlinie auch Zielwerte und Grenzwerte für Feinstaubimmissionen bei PM_{2,5} vorgesehen, und zwar

- ab 01.01.2010 für max. 25 µg/m³ als Zielwert, gemessen als Jahresmittelwert, und
- ab 01.01.2015 für max. 25 µg/m³ als Grenzwert, gemessen als Jahresmittelwert und
- ab 01.01.2020 für max. 20 µg/m³ als Grenzwert, gemessen als Jahresmittelwert.

Für die Stickstoffoxide, kurz „Stickoxide“ oder „NO_x“, sind gemäß 22. BImSchV die folgenden Grenzwerte für Stickoxidimmissionen zulässig, und zwar

- ab 01.01.2010 max. 18 Überschreitungen pro Jahr des Grenzwertes von 200 µg/m³ für NO₂, gemessen als Stundenmittelwert,

und max. 40 µg/m³ als Jahresmittelwert (JMW) für NO₂, für den keine Überschreitungen zulässig sind.

Alle Stickoxidimmissionen aus NO und NO₂ werden bei der summarischen Auswertung als NO₂ erfasst, da die Stickoxidemissionen der Fahrzeuge (90% NO und 10% NO₂) bei Anwesenheit von Ozon und Luftsauerstoff sehr schnell in NO₂ umgewandelt werden.

Zur Unterscheidung werden die Gasgemische aus NO und NO₂ als „NO_x“ bezeichnet.

Nach dem Bau des Tunnels sollen diese Grenzwerte nicht mehr überschritten werden.

Dazu müssen die verkehrsinduzierten Schadstoffe aus dem Tunnel über eine 157 m hohe Schacht- und Kaminanlage über die Bergkuppe am „Lindenfirst“ ins Freie geblasen werden.

Mit der Schadstoffblasanlage für die ungereinigte Tunnelabluft wird eine großräumige Verteilung und Verdünnung der Schadstoffe oberhalb der Stadt Schwäbisch Gmünd erreicht, wodurch in dem Gebiet um den Kamin mit lokalen Zusatzbelastungen (Zusatzimmissionen) zu rechnen ist.

Die Zusatzbelastungen ergeben sich aus der Emission von Schadstoffen, wie z. B.: Feinstaub, Russ, Dieselrauch, Aerosole, Benzol, Ozon, Stickoxide, Schwefeldioxid, Blei und VOC.

Ferner ist mit einer zusätzlichen Geräuschbildung am Kaminkopf durch den Einbau einer dort geplanten Blende zu rechnen, die keinen Schalldämpfer erhält.

Zur Sicherstellung der Entlastungswirkung für den Ortskern sowie zur Verteilung und Verdünnung der Schadstoffe oberhalb der Stadt soll diese Anlage gemäß Planfeststellungsbeschluss von 1996 während der Hauptverkehrszeit von 5:00 bis 20:00 Uhr immer mit voller Blasleistung betrieben werden, was sehr energieaufwendig ist.

Während der verkehrsarmen Nachtzeit von 20:00 bis 5:00 Uhr bleibt die Abluftanlage außer Betrieb, weil in dieser Zeit nur 10% der jährlichen Emission im Tunnel anfallen, so dass Energiekosten gespart und Schallemissionen durch den Kamin in dieser Zeit vermieden werden können.

Die aktuell geplante Leistung der beiden Abluftventilatoren für die Tunnelentlüftung ist vom RP-S mit 400 kW je Ventilator angegeben worden (Fax vom 04.03.2008 an Firma Ecovac).

Die Energiekosten, allein für den Betrieb dieser Lüftungsanlage, werden vom RP-Stuttgart mit 1.000.000,- EUR pro Jahr angegeben, während vergleichbare Anlagen wesentlich weniger Kosten verursachen.

Beispielsweise hat das SBA-Rottweil im Bereich des RP-Freiburg im Jahr 1991 den 100 m hohen Abluftkamin des 1,83 km langen Kirchbergtunnels an der B 294 in Schiltach mit Energiekosten von nur 3.000,- DM pro Monat betreiben können, was weniger als 2% der geplanten Energiekosten sind, die für den Betrieb des Abluftkamins in Schwäbisch Gmünd geplant sind.

Seitens der „Bürgerinitiative pro Tunnelfilter“ ist deshalb ein Gutachten über die Machbarkeit und Wirtschaftlichkeit eines Abluftfilters zur Reinigung der Tunnelabluft und zur nachhaltigen Energieeinsparung angefordert worden.

Ein Filter zur Abluftreinigung wird dort als sinnvolle Alternative zur planfestgestellten Schadstoffblasanlage gesehen, um sowohl die schädlichen Einwirkungen auf die Umwelt (Menschen, Tiere, Pflanzen, Boden, Wasser, Luft und Klima) als auch die Beeinträchtigung des Landschaftsbildes durch einen 33 m hohen und 7,0 m dicken Abluftkamin auf dem Lindenfirst zu vermeiden und die Kosten für den Betrieb der Tunnellüftung nachhaltig zu reduzieren.

2 Sachverhalt

Der Tunnel, der im Zuge der B 29 in Schwäbisch Gmünd gebaut wird, wurde im Jahr 1996 in der Planfeststellung mit einer Röhre und zwei Fahrstreifen für Gegenverkehr beschlossen.

Diesem Beschluss liegt ein Bauentwurf aus dem Jahr 1992 mit zwei Immissionsgutachten zu den Luftschadstoffen aus dem Kamin und an der Straße zugrunde, die sich wiederum auf eine Untersuchung der Stadt zum Gesamtverkehrsplan (GVP) für das Jahr 2010 und ein meteorologisches Gutachten des Deutschen Wetterdienstes (Wetteramt Stuttgart des DWD) abstützen.

Des Weiteren ist vom RP-Stuttgart im Jahr 2006 ein Luftreinhalte- und Aktionsplan für Schwäbisch Gmünd zur Minderung der Schadstoffbelastungen der Luft aufgestellt worden, um damit insbesondere eine Verminderung der Belastung durch Feinstaubpartikel (PM_{10}) und Stickoxide (NO_x) zu erreichen und den Forderungen der EG-Richtlinien 96/62/EG vom 27.09.1996 und 99/30/EG vom 22.04.1999 sowie der darauf erfolgten Verordnung (22. BImSchV vom 11.09.2002) zur Durchführung des Bundesimmissionsschutzgesetzes (BImSchG vom 26.09.2002 i. d. Fassung vom 08.07.2004) zu entsprechen.

Aufgrund von ständigen Messungen, die das LUBW, Karlsruhe bis Ende 2004 in der Lorcher Straße in Schwäbisch Gmünd durchgeführt hat, mit Folgemessungen (Spotmessungen) im Jahr 2005, wird in dem Luftreinhalte- und Aktionsplan festgestellt, *„dass die PM_{10} und die NO_2 -Belastungen im stark befahrenen Straßenabschnitt der Lorcher Straße gesenkt werden müssen.“*

Der genannte Luftreinhalte- und Aktionsplan für Schwäbisch Gmünd ist als Teilplan mit komplettem Anhang im Internet auf der Website des RP-Stuttgart unter www.rp-stuttgart.de für die Öffentlichkeit frei zugänglich.

Diesem Luftreinhalte- und Aktionsplan liegt eine von der Stadt Schwäbisch Gmünd aktualisierte Verkehrsprognose (Anlage A / Abb. 4) zum GVP für das Jahr 2010 zugrunde, in der von einer durchschnittlichen täglichen Verkehrsstärke (DTV) von 19.600 Kfz/Tag, mit einem Lkw-Anteil von 8,5% im Tunnel ausgegangen wird.

Zu den geplanten Maßnahmen des Aktionsplanes gehört als wirksamste Maßnahme die Maßnahme M9, die den Bau des B 29-Tunnels vorsieht.

„Neben einer Reduzierung der PM_{10} -Fraktion sollen dadurch auch die Feinanteile $PM_{2,5}$ und der Dieselruß reduziert werden.“

Dies ist auch eine zentrale Forderung der 22. BImSchV (§ 11 Abs. 3 der 22. BImSchV).“

Dem Plan zufolge *„verringern sich nach der Inbetriebnahme des B 29 - Tunnels die PM_{10} -Immissionen am Spotmesspunkt in der Lorcher Straße im Jahresmittel um 29% und die NO_2 -Immissionen um 28%, bezogen auf den Ausgangszustand im Jahr 2007“.*

In dem Luftreinhalte- und Aktionsplan wird auch erwähnt, dass der Anteil der dieseltreibenden Fahrten, die als Hauptverursacher für den verkehrsbedingten Anteil der NO_x -Emissionen gelten, in den nächsten Jahren wie folgt erheblich zunehmen wird:

Bei den Pkw-Fahrten von 26,2% im Jahr 2005 auf 38,1% im Jahr 2012 und

bei den leichten Nutzfahrzeuge von 85,8% im Jahr 2005 auf 88% im Jahr 2012.

Bei Bussen und schweren Nutzfahrzeuge sind ausschließlich dieseltreibende im Einsatz.

Es wurde vielerorts festgestellt, dass sowohl der vermehrte Einsatz von Katalysatoren und anderer motorischer Maßnahmen zur Verringerung der NO_x-Emissionen, als auch die durch Einführung von Fahrtbeschränkungen erreichbaren Minderungen weitgehend durch die gleichzeitige Zunahme des Anteils dieselbetriebener schwerer und leichter Nutzfahrzeuge wieder aufgehoben wird.

Dies wird in den Langzeittrends aus Messreihen sichtbar, die an viel befahrenen Straßen aufgezeichnet werden und in den letzten Jahren keine Verringerung der NO₂-Immissionen zeigen.

Hierfür sind exemplarisch die Aufzeichnungen der NO₂-Jahresmittelwerte aus dem Stadtgebiet von Stuttgart für den Zeitraum von 1995 bis 2006 als Anlage beigefügt ([Anlage A / Abb. 5](#)).

Die Messungen und der Trend zu stärkeren Dieselmotoren lassen derzeit nicht erwarten, dass sich die NO₂-Belastung im Straßenbereich in naher Zukunft nachhaltig bessern wird, so dass den NO₂-Emissionen wegen ihrer schädlichen Wirkung weiterhin besondere Beachtung zu schenken ist.

Vergleichbare aktuelle Messwerte sind für den Standort Schwäbisch Gmünd derzeit nicht mehr verfügbar, nachdem dort im Jahr 2005 die Messstation aus der Lorcher Straße entfernt worden ist.

Aufgrund des erwähnten Trends erscheint es jedoch zulässig, die zuletzt für das Jahr 2005 in der Lorcher Straße ermittelten Jahresmittelwerte von 80 µg/m³ für NO₂ und von 36 µg/m³ für PM₁₀ als realistische Vorbelastung im Bereich der Tunnelportale für die Auslegung der Tunnellüftung zugrunde zu legen.

Hinsichtlich der diskutierten Belastung durch schädlichen Feinstaub ist hier jedoch zu erwähnen, dass für das Planfeststellungsverfahren im Jahr 1992 noch keine Aussage über die Belastung mit Feinstaub PM₁₀ vorgelegen hat.

Die Immissionsbetrachtung hat sich 1992 nur auf die Berechnung der Ausbreitung von NO₂ durch den Abluftkamin und der erwarteten Zusatzimmission in der Umgebung des Kamins beschränkt, deren Ergebnis graphisch dargestellt worden ist ([Anlage A / Abb. 6](#)).

Dieses Ergebnis lässt jedoch auch Rückschlüsse auf die Verteilung, Häufigkeit und Konzentration des Feinstaubes zu, der sich als Schwebstaub wie ein Gas verhält und kaum sedimentiert.

Die Berechnung der ursächlichen Emissionen erfolgt heute auf der Grundlage von Verkehrsprognosen, Straßen- und Fahrtbedingungen sowie von Fahrmodi und den entsprechenden Emissionsfaktoren der Fahrzeuge nach dem Emissionshandbuch des UBA.

Aus den berechneten Emissionen werden auf Basis lokaler Windrosen ([Anlage A / Abb. 7](#)) und den daraus generierten Windfeldern die Immissionsbelastungen durch den Abluftkamin ermittelt, wobei die Expansion und Mischung des Abluftstrahls mit der Umgebungsluft und die Turbulenz und Diffusion der Abluftfahne im Windfeld und mögliche atmosphärische Schichtungen und Austauschvorgänge zu berücksichtigen sind.

Die Auslegung der Schadstoffblasanlage (Abluftkamin) ist 1992 nach einer Vorgabe des DWD erstellt worden, die besagt, dass ein ständiger Schadstoffaustrag aus den beiden Tunnelportalen wegen der hohen Vorbelastung in der Portalumgebung unzulässig ist und die Tunnelabluft deshalb über einen Abluftkamin von einem Standort hoch über dem Tal in die freie Atmosphäre ausgestoßen werden muss.

Dies ist nach wie vor gültig, da sich bis heute, speziell im Hinblick auf die schärferen Grenzwerte für Feinstaub und Stickstoffoxide, an dieser Lage nichts geändert hat.

Zur Gewährleistung einer ausreichenden Verteilung der Schadstoffe ist deshalb 1992 eine Mindestblashöhe von +515 m üNN vorgegeben und festgeschrieben worden, um bei den häufigen Bodeninversionslagen mit geringer Windgeschwindigkeit in Schwäbisch Gmünd ein Durchstoßen der Inversionsschicht (das ist ein stabiler Warmluftdeckel über dem Kaltluftsee im Remstal) sicherzustellen, ohne dass es dabei zu nachteiligen Reflektionen des Abluftstrahls an der Inversionsschicht oder zu Rückströmungen in das Tal kommt.

Die Beugung von Schallwellen, die durch eine am Kaminkopf geplante Abschlussblende erzeugt und an der Grenzschicht reflektiert werden, ist dabei außer Acht gelassen worden.

Mit den Bodeninversionslagen ist gemäß DWD am gewählten Standort in 64% aller Nächte zu rechnen, wovon 42,6% eine Mächtigkeit aufweisen, welche die als kritisch erachtete Quelhöhe von +515 m üNN übersteigt.

Zur Sicherstellung der geforderten Blashöhe von +515 m üNN (die auch als „Quelhöhe“ oder als „effektive Schornsteinhöhe“ bezeichnet wird) ist eine entsprechende Kaminhöhe, Blasleistung, Blasgeschwindigkeit und Betriebsweise (von 5:00 bis 20:00 Uhr) vorgegeben worden.

Dies ergibt einen Kamin, der 33 m aus dem Gelände aufragt und zusammen mit dem vertikalen Schacht über dem Tunnel 157 m hoch sein muss, so dass der Kaminkopf auf Kote +450 m üNN liegt (die Fahrbahnoberkante „OKF“ des Tunnels liegt im Mittel auf Kote +300 m üNN).

Im Ergebnis soll der freie Blasstrahl aus dem Kamin immer die erforderliche Quelhöhe von +515 m üNN erreichen (das entspricht einer Mindestblashöhe von 65 m) und zwar auch und insbesondere bei stabiler Luftschichtung (mit einer Inversionsschicht als Deckel).

Bei starkem Seitenwind kann der Blasstrahl auch horizontal umgelenkt werden, wobei die hohe Windturbulenz dann zu einem raschen Konzentrationsabbau und zu einer weiträumigen Verteilung der Schadstoffe führt (Anlage A / Abb. 8).

Die erforderliche Abluftmenge für die Schadstoffverdünnung ist 1992 mit minimal 300 m³/s und maximal 500 m³/s ermittelt worden.

Basis der Berechnungen ist das Merkblatt über Luftverunreinigungen an Straßen, Ausgabe 1992 (MLuS 92) gewesen, das 1992 für NO_x eine Emission im Tunnel von 2,1 g/s ergeben hat.

Gemäß TA-Luft ist für NO₂ in 1992 ein Jahresmittelwert (IW-1) von 0,080 mg/m³ als Grenzwert zulässig gewesen.

Die Zusatzimmission aus dem Abluftkamin hat aber aus Gründen der Gesundheitsvorsorge nicht größer als 1% des zulässigen Grenzwertes (Unbedenklichkeitsschwelle) sein sollen.

Bei dem Planfeststellungsverfahren in den Jahren 1992 bis 1996 ist deshalb die zulässige NO₂-Zusatzimmission auf 0,8 µg/m³ begrenzt worden.

Hierzu ist eine Vorverdünnung der im Tunnel emittierten 2,1 g/s NO_x mit 300 m³/s Frischluft notwendig, die am Abluftkaminaustritt eine Stickoxidkonzentration von 7,0 mg/m³ ergibt.

Diese erfordert die weitere Verdünnung durch großräumige Verteilung über den Abluftkamin mit einem Verdünnungsfaktor von etwa 1:10.000, um die zulässige Endkonzentration (Zusatzbelastung) von 0,8 µg/m³ zu erreichen.

Bei dem vorgegebenen Kaminquerschnitt von 30 m² bedingt dies eine Aufweitung des Strahlquerschnitts auf ca. 300.000 m², die man sich als Oberfläche eines Volumenzylinders von 65 m Höhe (Inversionsdeckel) und mit einem Grundkreisradius von 0,735 km vorstellen kann.

Im Innenkreis dieses Schadstoffzylinders sind die Konzentrationen dabei höher als gewünscht.

Zur Vermeidung einer Aufkonzentration der Schadstoffe in austauscharmer Lage muss deshalb die Sperrschicht vom Abluftstrahl durchstoßen und eine ausreichende Blashöhe erreicht werden, um die Zusatzimmission in der Umgebung des Abluftkamins gering zu halten.

Für die Auslegung der Schadstoffblasanlage muss als weiteres Kriterium auch die für den späteren zweiten Bauabschnitt geplante zweite Röhre des Tunnels berücksichtigt werden.

Eine zweite Röhre wird bei gleichem Verkehrsaufkommen zwar keine Änderung der Emission bedeuten, sie erfordert aber einen permanenten Betrieb der Tunnelabluftanlage mit einer Luftmenge von insgesamt $500 \text{ m}^3/\text{s}$, da getrennte Röhren in der Regel im Richtungsverkehr befahren werden, wodurch sich dort immer eine durch den Verkehr induzierte Längslüftung von Portal zu Portal einstellt.

Aus der Längsströmung folgt dann die Notwendigkeit, die Tunnelabluft nicht mehr in Tunnelmitte sondern an den Portalen abzusaugen, um diese über Abluftkanäle an der Tunneldecke zur Abluftzentrale in Tunnelmitte zurückzuführen und über den Kamin ins Freie auszustoßen, um so einen Schadstoffaustritt an den Portalen zu verhindern.

Die von den Fahrzeugen durch ihre Kolbenwirkung in der Tunnelröhre erzeugte Luftströmung erreicht jedoch bei Richtungsverkehr eine Geschwindigkeit von etwa 5 m/s , die in dem Querschnitt der beiden Tunnelröhre eine Luftmenge von jeweils ca. $250 \text{ m}^3/\text{s}$ bewegt, so dass der Kamin in diesem Fall für $500 \text{ m}^3/\text{s}$ auszulegen ist.

Der Innendurchmesser der Schacht- und Kaminanlage ist deshalb mit $6,20 \text{ m}$ festgelegt worden, entsprechend einem Querschnitt von $30,2 \text{ m}^2$, der bei $500 \text{ m}^3/\text{s}$ eine Austrittsgeschwindigkeit von $16,6 \text{ m/s}$ und bei $300 \text{ m}^3/\text{s}$ eine von $9,9 \text{ m/s}$ ergibt.

Wie in der Abbildung gezeigt ([Anlage A / Abb. 8](#)), sind die $9,9 \text{ m/s}$ jedoch nicht ausreichend, um die geforderte Blashöhe zu erreichen.

Die Blasgeschwindigkeit ist deshalb im Jahr 1992 für die $300 \text{ m}^3/\text{s}$ auf 15 m/s erhöht worden.

Dazu ist am Kaminaustritt eine Abschlussblende vorgesehen, deren Durchmesser $5,53 \text{ m}$ betragen soll, was bei einer Austrittsgeschwindigkeit von $12,5 \text{ m/s}$ und einer Strahlkontraktionszahl von $0,83$ für die Blendenströmung zu einem Strahldurchmesser von $5,05 \text{ m}$ und einer Freistrahlgeschwindigkeit von $15,0 \text{ m/s}$ nach der Blende führt.

Im Volllastbetrieb wird sich dadurch bei einer Abluftmenge von $500 \text{ m}^3/\text{s}$ eine Freistrahlgeschwindigkeit von 25 m/s nach der Blende einstellen.

Mit dem Bau einer zweiten Röhre soll die Blende dann wieder demontiert werden, um den gesamten Kaminquerschnitt für den Blasbetrieb mit $500 \text{ m}^3/\text{s}$ bei $16,6 \text{ m/s}$ mit geringerem Druckverlust und niedrigerem Energieaufwand zur Verfügung zu haben.

Aufgrund dieser Implikationen ist in dem Planfeststellungsbeschluss von 1996 ein Kamin mit $6,2 \text{ m}$ Durchmesser und einer Mindestaustrittsgeschwindigkeit von 12 m/s festgeschrieben worden, was einer Luftmenge von $288 \text{ m}^3/\text{s}$ entspricht.

Durch den Einbau einer Blende werden zudem die Strahl-turbulenz und der Strahlwinkel vergrößert, wodurch die Mischung und Verdünnung der Schadstoffe mit der Umgebungsluft verstärkt wird.

Die starken Turbulenzen von den Mündungswirbeln führen jedoch zu einem zusätzlichen Strömungsgeräusch am Kaminkopf, für das kein Schalldämpfer vorgesehen ist.

Der Kamin ist zudem für die Abführung der Brandgase der Tunnelentrauchung auszulegen.

Hierzu ist gemäß Planfeststellung von 1996 eine Halbquerlüftung vorgesehen gewesen, die im Brandfall auf Querlüftung umgeschaltet wird, damit Frischluft von Zuluftgebläsen an den Portalen über einen Luftkanal im Tunnel verteilt werden kann, während die Brandgase über einen parallelen Abluftkanal mit Absaugklappen zum Kamin hin abgesaugt und ins Freie ausgestoßen werden sollen.

Dieses Konzept ist jedoch in der Zwischenzeit anlässlich einer zweiten Planfeststellung für den zusätzlichen Fluchtstollen im Jahr 2005 grundlegend geändert worden, was aus dem aktuellen Tunnelprojektblatt des RP-S zu erkennen ist ([Anlage A / Abb. 9](#)).

In dem geänderten Lüftungskonzept sind die beiden Kopfstationen mit den Zuluftventilatoren für die Brandbelüftung des Fahrtunnels und der zugehörige Frischluftkanal jetzt entfallen.

Geblichen sind die zwei Abluftventilatoren in der Abluftzentrale, die sowohl für die normale Regellüftung als auch für die Entrauchung im Brandfall eingesetzt werden.

Statt des Doppelkanals ist nur noch ein Abluftkanal an der Tunneldecke vorgesehen, der sowohl für die Tunnelentlüftung im Regelbetrieb als auch für die Rauchabsaugung im Brandfall genutzt werden soll ([Anlage A / Abb. 10](#)).

In dem Abluftkanal sind dafür Abluftklappen in 60 m Abständen vorgesehen.

Ferner sind in Portalnähe die Deckennischen für den Einbau von insgesamt 14 Strahlventilatoren DN630 dargestellt (6 STV am Westportal und 8 STV am Ostportal), die im Tunnel für den erforderlichen Strömungsausgleich sorgen sollen.

Die genannte Änderung des Lüftungskonzeptes ergänzte das RP-S (Fax vom 18.02.2008) mit folgendem Hinweis an Firma Ecovac: „*Die Absaug- und Austrittsmenge blieb unverändert.*“

Etwas später hat das RP-S mitgeteilt (Fax vom 04.03.2008), dass die beiden Abluftventilatoren für eine minimale Absaugmenge von $275 \text{ m}^3/\text{s}$ vorgesehen sind, entsprechend einer Gesamtabluftmenge von etwa $1.000.000 \text{ m}^3/\text{h}$ (das sind $137,5 \text{ m}^3/\text{s}$ je Ventilator), mit einer Leistung von 400 kW je Ventilator und dass diese mit Frequenzumrichtern betrieben werden.

Weiter hat das RP-S ergänzt, dass im Brandfall die minimale Absaugmenge (d. h. $275 \text{ m}^3/\text{s}$) benötigt wird und dass die Ventilatoren im Normalbetrieb im Bereich von 0-100% und in Abhängigkeit der jeweils vorherrschenden Verkehrs- und Windbedingungen betrieben werden.

Es fehlt aber jeder Hinweis, wie bei reduzierten Luftmengen von 0-100% die im Jahr 1996 als minimal erforderliche, planfestgestellte Strahlgeschwindigkeit von 12 m/s mit dem planfestgestellten Kamin- und Blendendurchmesser von $6,2 \text{ m}$ bzw. $5,35 \text{ m}$ auf die vorgegebene Blashöhe von 515 m üNN gewährleistet und wie die Verdünnung des NO_2 auf die zugrunde gelegten 1% des zulässigen JMW sichergestellt werden sollen ($0,4 \mu\text{g}/\text{m}^3$ Zusatzimmission aus $40 \mu\text{g}/\text{m}^3$).

Es bleibt auch ungeklärt, wie mit den beiden zentralen Abluftventilatoren die sehr unterschiedlichen Drücke im Absaugkanal im Normalbetrieb (mit kurzer Ansaugstrecke im Deckenkanal) und im Entrauchungsbetrieb (mit ggf. sehr langer Ansaugstrecke im Deckenkanal) beherrscht und wie die Verteilung der Absaugleistung auf die einzelnen Klappen sicher kontrolliert werden sollen, ohne dass es dort zur Rauchverschleppung (der Rauch folgt der Absaugung) oder zur Verrauchung der 300 m langen Stagnationszone zwischen den sechs Klappen kommt.

Da sich die Vorgaben z. T. widersprechen, können sie hier aber nicht weiter verifiziert werden.

In dem Entwurfsplan der Abluftzentrale ([Anlage A / Abb. 11](#)) ist außer den beiden Abluftventilatoren und den Elektroräumen auch ein Frischluftrohr DN1200 an der Außenseite des Ab-

luftschachtes dargestellt, für das der Kaminquerschnitt eiförmig statt rund ausgeführt werden muss, was den Bau des Schachtes schwieriger und um einiges teurer macht.

Es stellt sich die Frage, warum hier nicht der kurze Ansaugweg vom Fluchtstollen, unter der Fahrbahn hindurch, in die Abluftkaverne gewählt wird, da der Fluchtstollen ohnehin von außen mit Frischluft im Überdruck belüftet werden muss, um im Brandfall das Eindringen von Rauchgasen zu verhindern.

Es stellt sich weiter die Frage, warum die beiden Abluft- und Entrauchungsventilatoren nicht kostengünstig an die Frischluftleitung zur Fremdkühlung der Ventilatormotoren im Brandfall angeschlossen werden, was mit einer wärmeisolierten Kapselung des Motors, mit Belüftungskanälen, Kühlflügeln und Hitzeschilden sehr viel sicherer und zuverlässiger ist, als der Einbau von „zertifizierten“ Motoren.

Während sich die Fremdkühlung schon seit vielen Jahrzehnten im Großanlagenbau und im Dauerbetrieb von Ventilatoren auch bei sehr hohen Betriebstemperaturen als wirksamer Hitzeschutz bewährt hat (siehe die Rauchzuggebläse im Feuerungsbau), gibt es beim Einsatz von zertifizierten Motoren nur das Zertifikat als Eignungsnachweis für den Hitzebetrieb, das in der Umsetzung einen völlig baugleichen Motor, mit gleicher Einbaulage, gleicher Beanspruchung, gleichen Einstellungen und gleicher Betriebsweise voraussetzt, was im konkreten Einzelfall praktisch nicht nachprüfbar ist.

Ferner hat das RP-S die Energiekosten für die Normallüftung beim Betrieb von zwei Abluftventilatoren auf der Basis von 0,35 EUR pro kWh mit 1.000.000,- EUR pro Jahr beziffert.

Eine Rückrechnung dieser Kostenangabe zeigt, dass die zwei Abluftventilatoren in der Abluftzentrale offensichtlich nicht mit ihrer Nennleistung von 400 kW betrieben werden sollen, sondern nur mit 200 kW je Ventilator, wenn man deren Betriebszeiten mit 365 Tagen im Jahr und 15 Stunden pro Tag ansetzt, wie im Planfeststellungsbeschluss ausgewiesen, und dabei die 14 STV DN630 berücksichtigt, die mit jeweils 15 kW und 50% rel. ED die Strömungsunterschiede im Tunnel ausgleichen sollen.

Der vom RP-S genannte Energieverbrauch von etwa 2.765.000 kWh pro Jahr ist deshalb nur für den Teillastbetrieb plausibel.

Dieser erfüllt bei variabler Leistung von 0-100% jedoch nicht mehr die im Jahr 1996 in der Planfeststellung beschlossene Betriebsweise von mindestens 12 m/s bei 5,35 m Blendendurchmesser, die zur ausreichenden Verteilung und Verdünnung der Schadstoffe in ausreichender Höhe über dem Lindenfirst vorgegeben ist.

In einem Schreiben des RP-S (Fax vom 25.04.2007) findet sich dazu der Hinweis auf ein weiteres Immissionsgutachten vom 06. Oktober 2006, mit dem die Vorgaben aus der Planfeststellung von 1996 hinsichtlich der Immissionskontrolle überprüft - und möglicherweise auch geändert - wurden.

Da der Inhalt dieses Gutachtens nicht bekannt ist, kann das hier nicht weiter verifiziert werden.

Auch ist eine ursprünglich angedachte Möglichkeit der Entstaubung der Tunnelabluft laut Maßnahmenplan des RP-S verworfen worden, da sie „wegen des derzeitigen Standes dieser Technik und wegen der besonderen Situation bei diesem Tunnelprojekt technisch und wirtschaftlich nicht vertretbar war“.

Hierzu werden in dem Maßnahmenplan vom Mai 2006 weder entsprechende Untersuchungsergebnisse mitgeteilt noch weiterführende Lösungsansätze für eine Realisierung dieser Möglich-

keit verfolgt, obwohl die technischen Möglichkeiten zur Abluftreinigung und zur Abscheidung von Feinstaub und Ruß sowie zur Schadgasabscheidung, einschließlich der Stickoxide (NO_x), verfügbar sowie bestens geeignet und wirtschaftlich vertretbar sind.

Ein Angebot der Firma Ecovac aus dem Jahr 2006 und dessen mehrfache Überarbeitung in 2007, das den Einbau eines Feinstaubfilters für die Kaminabluftanlage vorsieht, ist nach Prüfung der Unterlagen durch das RP-S und ein Schweizer Ingenieurbüro am 11.10.2007 wie folgt beschrieben worden (Auszug aus der Stellungnahme):

„Es wurde die Möglichkeit, einen Filter am Kamin anzuordnen, untersucht. Dabei wurde erneut bestätigt, dass bei dem jetzt geplanten Betrieb der Lüftungsanlage bereits ohne Filter die Zusatzbelastung in der Umgebung des Kamins derart gering ist, dass sie messtechnisch nicht nachgewiesen werden kann. [...] Das Ingenieurbüro Lohmeyer, das auch die Werte für den Luftreinhalte- und Aktionsplan ermittelt hat, geht von einem Anteil des Tunnels in Höhe von ca. 660 Kilogramm pro Jahr aus. Diese Feinstaubmenge fällt in sehr geringen Konzentrationen an, weil die Tunnellüftung 1.000.000 m³ Luft pro Stunde mit einer Ausblasgeschwindigkeit von 15 Metern pro Sekunde bewegt. Die zusätzliche Belastung für das Gebiet um den Abluftkamin steigt daher nur um deutlich unter 1% des zulässigen Grenzwertes (40 µg/m³) an. Der Grenzwert ist somit eingehalten.

Das Regierungspräsidium kommt weiterhin zu dem vorläufigen Ergebnis, dass die angebotene Filteranlage technisch machbar ist. Der Anbieter Ecovac muss allerdings noch die technische Eignung der Ventilatoren und der Ventilatorabschlussklappen - unter anderem durch aufwendige Brandversuche - nachweisen.

Abschließend wurden noch die kalkulierten Kosten des Angebotes der Firma Ecovac überprüft. Das Angebot, das ursprünglich von Kosten in Höhe von [...] € brutto ausging, musste noch um einige, für eine funktionsfähige Anlage unerlässliche Positionen (Kosten für Wärmetest, Kosten für größere Ventilatoren, bauliche Mehrkosten und einmalige Mehrkosten für die Energieversorgung) ergänzt werden, so dass sich die Investitionskosten nunmehr auf ca. [...] € brutto belaufen. Die jährlich anfallenden Unterhaltungskosten (Wartung der Anlage, Austausch der Filterpatronen, Entsorgung des anfallenden Staubes und Energiemehrkosten) betragen ca. [...] € brutto.

Nachdem im Jahr 2006 die Fortschreibung der Richtlinien für die Ausstattung und den Betrieb von Straßentunneln (RABT), die die Richtlinien 2004/54/EG des Europäischen Parlamentes und des Rates über die Mindestanforderungen an die Sicherheit von Tunneln im transeuropäischen Straßennetz in nationales Recht umgesetzt haben, keine Forderungen bezüglich des Einsatzes von Filteranlagen zur Abluftreinigung in Straßentunneln enthalten und sich aus dem Abluftkamin keine grenzwertigen Schadstoffkonzentrationen ergeben, verzichtet das Regierungspräsidium darauf, die Lüftungskonzeption mit einer Filteranlage weiter zu verfolgen. Diese Entscheidung ist mit dem Innenministerium abgestimmt. Mit dem geplanten Lüftungssystem (Abluftkamin in Tunnelmitte) kann die erforderliche Luftqualität gewährleistet werden.“

Da in der RABT-2006 explizit kein Abluftfilter erwähnt wird, sei hier auf die folgenden Forderungen der RABT-2006 hingewiesen, die zur Wahrung des Umweltschutzes auch Maßnahmen zur Kontrolle der durch die Tunnelabluft verursachten Immissionsbelastungen kennen und zulassen.

Es heißt dort im Kapitel **0.1 Inhalt**

„Die ‚Richtlinien für die Ausstattung und den Betrieb von Straßentunneln‘ enthalten Grundsätze, Hinweise und Kriterien für die Planung der Ausrüstung von Straßentunneln sowie für deren Betrieb.“

Im Kap. **0.2 Zweck** (zweiter Absatz)

„Die in den RABT beschriebenen Maßnahmen dienen vorrangig [...] dem Schutz [...] der Umwelt [...]. Sie sollen [...] einen sicheren Betrieb mit einer den jeweiligen verkehrlichen und örtlichen Verhältnisse angemessenen Qualität unter Berücksichtigung der Wirtschaftlichkeit ermöglichen. [...] Die in den RABT getroffenen Festlegungen können die fachtechnische Untersuchung und Planung nicht ersetzen. Abweichungen von den Richtlinien bedürfen einer Begründung, [...]“.

Im Kap. **0.5 Risikoanalyse** (zweiter Absatz)

„Führen bauliche Anforderungen [...] zu unverhältnismäßig hohen Kosten, oder sind sie nicht umsetzbar, ist zu prüfen, inwieweit diese durch andere Maßnahmen als Alternative zu den baulichen Anforderungen kompensiert werden können.“

Im Abs. **4.4.1: Anforderungen**

„Rechtliche Grundlagen zur Beurteilung der Immissionssituation sind durch Richtlinien der EU und Verordnungen zur Durchführung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes gegeben. [...]“.

Im Abs. **4.4.3: Tunnellüftung für den Immissionsschutz**

„Immissionsuntersuchungen können ergeben, dass ein Ausströmen der Tunnelabluft aus dem Portal gemindert oder gänzlich verhindert werden muss; hierdurch können die Wahl des Lüftungssystems und der Betrieb stark beeinflusst werden“.

Wenngleich die RABT von den zuständigen Verwaltungsbehörden als Durchführungsverordnung eingeführt worden sind und deshalb vorrangig bei der Planung, Ausführung und den Betrieb anzuwenden sind, so müssen sie sich doch am gesetzlichen Rahmen messen lassen.

Dies gilt insbesondere für den Immissionsschutz, den Umweltschutz, den Landschaftsschutz, den Naturschutz und den Schutz der betroffenen Bürger, die ggf. den Einbau eines Abluftfilters als sinnvoll, notwendig oder wirtschaftlich vorteilhaft und vertretbar erscheinen lassen können.

Als Durchführungsverordnung einer Verwaltungsbehörde repräsentieren die RABT auch keineswegs den aktuellen Stand der Technik, da ständig neue Erkenntnisse aus Forschung und Anwendung bekannt und neue Methoden und Lösungen entwickelt und verfügbar werden.

Der Stand der Technik zur Abluftreinigung wird z. B. durch Elektrofilter repräsentiert, die in Verbindung mit Aktivkohlefiltern die Staubpartikel, den Dieselruß, den Rauch, die Aerosole und die Gerüche sowie einige Schadgase, wie z. B. Kohlenwasserstoffe aus der Tunnelabluft entfernen können und bereits seit vielen Jahren in einigen Tunneln, in Laborgebäuden, Museen, Reinräumen, an Flughäfen sowie in Kraft- und Heizwerken erfolgreich im Einsatz sind.

Als Beispiele seien hier die Neue Empfangsanlage West (NEW, jetzt „Terminal 1“) des Flughafens in Frankfurt am Main erwähnt, die bereits 1972 mit einer solchen Filtertechnik im großen Umfang ausgerüstet worden ist (mit Aktivkohlefilterpatronen) und die sich seither im täglichen Betrieb und bei allen später erfolgten Flughafenerweiterungen (Terminal 2, usw.) bewährt hat.

Ein aktuelles Beispiel bilden die zwei Abluftstationen der Stadtautobahn Calle-30 des inneren Rings in Madrid, die 2007 mit Elektro- und Aktivkohlefiltern (Schüttbettfiltern) für die Reinigung von 400 m³/s und 694 m³/s Tunnelabluft ausgestattet worden sind ([Anlage A / Abb. 12](#)).

Ein weiteres Beispiel bietet der 10 km lange Chuo-Kanjo-Shinjuku-Tunnel in Tokyo, der mit Elektrofiltern und Sorptionsfiltern ausgestattet wird und zwar mit Adsorptionsfiltern (Aktivkohle) in 5 Abluftkaminen und Absorptionsfiltern (Aktivtonerde) in 4 Abluftkaminen.

Zu den Elektrofiltern muss hier ergänzt werden, dass diese hinsichtlich ihres Filterwirkungsgrades für die Abscheidung von sehr feinem Staub $< PM_{10}$ (d. h. $PM_{2,5}$ und $PM_{0,5}$) bei sehr hohen Reinheitsanforderungen wenig geeignet und für die regelmäßige Reinigung der Elektrofilter automatische Wasch- und Wasseraufbereitungsanlagen notwendig sind.

Elektrofilter haben einen Abscheidegrad von höchstens 86% bei PM_{10} , von 74% bei $PM_{2,5}$ und von 67 % bei PM_1 .

Zum Einsatz von Aktivkohlefiltern (Adsorbern) ist zu ergänzen, dass diese nur geringe Abscheidegrade bei zweiatomigen Gasen (z. B. CO und NO), aber gute Abscheidegrade bei langkettigen Kohlenwasserstoffen erreichen.

In Verbindung mit einem vorgeschalteten Ionisator zur Oxidation des NO in NO_2 erreichen diese kurzzeitig einen mittleren Abscheidegrad für NO_x von etwa 20%, der aber schon nach wenigen Tagen, infolge der Sättigung der Aktivkohle, gegen Null geht.

Problematisch ist auch die erhöhte Brandgefahr beim Einsatz von Aktivkohle in Verbindung mit Ozon, das vor dem Aktivkohlefilter im Ionisator des Elektrofilters erzeugt wird, sowie die Gefahr der Desorption von Schadgasen aus der Aktivkohle bei höheren Temperaturen und bei der Sättigung der Aktivkohle durch Wasserdampfadsorption bei hoher Luftfeuchtigkeit.

Außerdem ist die Einsatzzeit des Filtermaterials wegen der geringen Speicherkapazität relativ kurz, so dass das Einsatzmaterial häufig erneuert und regeneriert werden muss.

Bei Schüttbettfiltern gibt es auch noch das Problem der ungleichmäßigen Verdichtung, Beaufschlagung und Sättigung der Aktivkohle, wodurch sich keine gleichmäßig Adsorption und Abscheidung der Schadgase ergibt (sog. Schadgasdurchbruch).

Ferner ist beim notwendigen Kohletausch mit Staubabrieb und Staubaustrag zu rechnen, was zusätzliche Nachfilter erforderlich macht.

Zur Vermeidung dieser Nachteile sind deshalb neue Absorptionsfiltermaterialien entwickelt worden, die auf der Basis von aktivierter Tonerde (Aluminiumoxid) hergestellt und mit einem starken Oxidationsmittel (Permanganat) imprägniert werden, so dass diese speziell für die Absorption von NO- und NO_2 -Gas geeignet sind.

Andere Verdunstungs- und Verbrennungsprodukte, wie z. B. langkettige Kohlenwasserstoffe (z. B. Benzin, Benzol, Toluol, Xylol, NMVOC, PAK, BaP), werden hingegen kaum abgeschieden, was hier aber als unkritisch gesehen werden kann, weil deren Konzentration mit Einführung der Katalysatortechnik bereits sehr stark reduziert werden konnte und in den nächsten Jahren, mit der Erneuerung des Fahrzeugparks und Abgasreinigung nach Euro 4, Euro 5 und Euro 6 sowie mit der Verbreitung von neuen Hybridantrieben, weiter abnehmen wird, so dass für diese kein zusätzlicher Filter vorgesehen werden muss.

Als Stand der Technik werden die Chemie-Absorptionsfilter bereits seit vielen Jahren für die Luftaufbereitung in Abfertigungsgebäuden von internationalen Flughäfen (vor allem in den U.S.A.) zur NO_x -Abscheidung eingebaut, da von den dort startenden und landenden Maschinen - ähnlich wie von den Fahrzeugen im Tunnel - sehr große Schadstoffmengen der gleichen Art freigesetzt werden, die mit Staubfiltern und Absorptionsfiltern aus der Außenluft entfernt werden

müssen, um den lufthygienischen Komfort und die Gesundheit des Personals und der Fluggäste zu wahren.

Beim CO erfolgt im Filter eine Oxidation in CO₂, das als natürlicher Bestandteil in der Atmosphäre und im Filter vorhanden ist und deshalb nicht abgeschieden werden kann.

Beim NO erfolgt die Abscheidung im Absorptionsfilter über dessen Oxidation in NO₂ und die Umwandlung - unter Einwirkung von Luftfeuchtigkeit - in Salpeter, der dann in der Tonerde eingelagert ist (Chemiesorption) und aus der er nicht mehr desorbiert.

Das verbrauchte Permanganat wird bei diesem Prozess nach und nach in neutralen Braunstein umgewandelt und verbleibt damit ebenfalls in der Tonerde.

Neben dem NO und NO₂ scheiden die Absorptionsfilter auch SO₂, H₂S und Formaldehyd ab, wodurch das Speichervermögen des Filters für das NO_x um einen entsprechenden Prozentsatz gemindert wird. Das SO₂ wird dabei, unter Freisetzung von Sauerstoff, in ein Sulfat gewandelt.

Das Filtermaterial ist nicht brennbar und wird als abriebfestes Granulat in speziellen Patronen eingebracht, die für eine gleichmäßige Absorption und lange Standzeit bei geringem Druckverlust und niedrigem Energieaufwand sorgen.

Der Abscheidegrad für NO_x wird von der Firma Ecovac mit etwa 99,9% im Bereich von 15% bis 95 % rel. Luftfeuchte angegeben.

Die etwas höhere Luftfeuchte in einem Tunnel kommt dabei der Abscheidewirkung zugute.

Erst bei 100% rel. Luftfeuchte (Nebelbildung im Filter) kann sich der Abscheidegrad durch Kondenswasserbildung im Filtermaterial verringern, was aber durch den vorgeschalteten Ventilator verhindert wird (infolge der Temperaturerhöhung im Ventilator).

Sobald das aktive Filtermaterial erschöpft ist, kann der Abscheidegrad bis auf 90% abfallen.

Zu diesem Zeitpunkt muss das Material komplett ausgetauscht werden, was nach einer Betriebszeit von etwa einem Jahr der Fall sein wird.

Die NO_x-Abscheidung wird deshalb mit einem kontinuierlich messenden Gerät im Reinluftstrom nach dem Absorptionsfilter aufgezeichnet und von der eingebauten SPS überwacht.

Das verbrauchte Filtermaterial kann laut Firma Ecovac nach erfolgter externer Deaktivierung und Entfernung des restlichen, im Filtermaterial noch vorhandenen Oxidationsmittels problemlos entsorgt und deponiert werden.

Die Entfernung, Deaktivierung und Überwachung der Entsorgung des Filterabfalls wird laut Firma Ecovac nach der Genehmigung und Zulassung durch die zuständige Behörde von einem dafür zertifizierten Entsorgungsbetrieb erfolgen.

Hinsichtlich der Luftreinheit sind künftig aber noch weitere gesetzliche Vorgaben zu beachten.

Nachdem bisher schon die Begrenzung der NO_x- und der PM₁₀-Immissionen durch eine EU-Luftqualitätsrichtlinie und, in deren Folge, diese mit der 22. BimSchV in nationales Recht umgesetzt worden ist, hat das Europäische Parlament am 11.12.2007 eine Zusammenfassung der Luftqualitätsrichtlinie mit ihren 3 Tochterrichtlinien beschlossen, die auch eine Revision in Bezug auf die Abscheidung von Feinstaub PM_{2,5} vorsieht, für den ab 2010 ein Zielwert von 25 µg/m³ und ein ebensolcher Wert als Grenzwert für das Jahr 2015 gelten sollen.

Ferner ist der Hinweis aufgenommen worden, den Jahresgrenzwert für $PM_{2,5}$ ab 2020 auf $20 \mu\text{g}/\text{m}^3$ zu verschärfen und für den Bereich der Städte, wo viele Menschen leben, ab 2015 einen Wert von $20 \mu\text{g}/\text{m}^3$ für die durchschnittliche städtische Hintergrundbelastung einzuführen.

Da die Abscheidung von Feinstaub $PM_{2,5}$ an Elektrofiltern ungenügend ist (wegen zu kleiner Ladung), können dann nur noch hochfeine Gewebefilter mit einer Mischung aus Nanofasern und Zellulosefasern eingesetzt werden, wie sie u. a. von der Firma Ecovac angeboten werden.

Zusammen mit dem Feinstaub scheiden diese Filter auch Aerosole und Russ ab.

Sofern bleihaltiger Staub oder andere Schwermetalle (Arsen, Antimon, Kadmium, Nickel, Quecksilber, Thallium, Zink,) freigesetzt werden, werden diese als Aerosol oder Feinstaub $PM_{0,5}$ und $PM_{2,5}$ ebenfalls im Filter abgeschieden, wobei der Anteil des bleihaltigen Feinstaubes nach Einführung des bleifreien Benzins inzwischen auf 1/10 verringert werden konnte.

Gemäß Prüfzeugnis und Prüfprotokoll Nr. 200423074/6210 des Berufsgenossenschaftlichen Instituts für Arbeitsschutz (BIA), Sankt Augustin vom 14.10.2004 ([Anlage A / Abb. 13](#)) wird mit diesem Filtermaterial ein Durchlassgrad von $< 0,1\%$ bei Feinstaub erreicht, d. h. der sichere Filterwirkungsgrad beträgt $> 99,9\%$, wobei der Prüfstaub der Prüfung gemäß DIN EN 60335-2-69 Anhang AA (08/99) zu 90% aus Quarzstaub besteht, dessen Durchmesser im Bereich von $0,2 \mu\text{m}$ bis $2,0 \mu\text{m}$ liegt (als aerodynamischer Durchmesser nach Stokes), was einer Feinstaubfraktion zwischen $PM_{0,5}$ und $PM_{2,5}$ entspricht.

Bei den Feinstaubfiltern der Firma Ecovac wird dieses Filtermaterial als Vlies auf Patronen gespannt und durch Druckluftpulse während des Betriebes oder während der Betriebspausen zwischen 20:00 und 22:00 Uhr automatisch abgereinigt.

Zum Reinigen werden die einzelnen Druckluftdüsen mit elektrischen Schnellschlussventilen sequentiell und stoßartig aktiviert, um auf dem Filtermaterial eine Schwingung zu erzeugen.

Die Steuerung erfolgt durch eine eingebaute Druckdifferenzmessung am Feinfilter und mit einem Zeitprogramm der eingebauten SPS.

Entsprechende Abscheide- und Abreinigungsversuche sind 2007 erfolgreich und ohne Probleme im praktischen Einsatz im Fellbacher Tunnel in Stuttgart von der Firma Ecovac durchgeführt worden.

Ein Festkleben oder Anbacken des Filterkuchens ist dabei nicht feststellbar gewesen.

3 Auslegung der Tunnellüftung

Die im Tunnel erforderliche Mindestluftmenge wird aus der erforderlichen Verdünnung der freigesetzten CO-Gasmenge und der Staub- und Dieselerußemissionen ermittelt, um im Tunnel die erforderliche Sichtweite und ein Mindestmaß an Komfort und Luftreinheit nach RABT 2006 sicherzustellen.

Der Auslegung liegen die Verkehrsprognosedaten aus dem GVP für 2010 sowie eine Vorgabe aus der Planfeststellung von 1992 und 1996 zugrunde, dass im Tunnel aufgrund der Verkehrsführung, Überwachung und Beeinflussung mit keinen Staus gerechnet werden muss.

Im Havariefall führt ein ungeplanter Stau zur Tunnelsperrung und zu Ersatzmaßnahmen (z. B. Aufforderung an die Fahrer, den Motor abzustellen).

Da sich die Fahrgeschwindigkeit im Tunnel bei Gegenverkehr nach dem langsamsten Fahrzeug richtet, werden der Berechnung 60 km/h zugrunde gelegt, entsprechend der maximalen Geschwindigkeit für Lkw in der Kurve mit der Steigungs- und Gefällestrecke am Ostportal.

Die Berechnung erfolgt anhand eines Tunnelschemas ([Anlage B / Abb. 14](#)), das die Trasse mit den unterschiedlichen Gradienten und die Lage der Portale und des Abluftkamins zeigt.

Die Berechnungsergebnisse sind in der Anlage B dargestellt.

Aus den Berechnungen ist klar zu ersehen, dass die größte Frischluftmenge heute in allen Fällen nicht zur Verdünnung der CO-Gase sondern zur Verdünnung der Trübungsbestandteile der Tunnelluft benötigt wird, um ausreichende Sichtweite und Fahrsicherheit zu gewährleisten.

Die Trübung der Tunnelluft entsteht aus dem Dieselruß und der Bildung von Aerosolen sowie aus dem Abrieb von Feinstaub an der Fahrbahn, den Reifen und Bremsbelägen.

Zur Trübung können auch die Stickoxide und die Luftfeuchtigkeit (Nebelbildung) beitragen.

Den größten Beitrag zur Eintrübung der Luft liefern die Nutzfahrzeuge und die Dieselmotoren.

Die Berechnungen sind für den einseitig stockenden Verkehr ([Anlage B / Tab. 1](#)) und für den ungehindert fließenden Verkehr ([Anlage B / Tab. 2](#)) durchgeführt worden.

Die größte Frischluftmenge ist demnach mit $52 \text{ m}^3/\text{s}$ für den stockenden Verkehr aufzubringen, wobei dieser Fall äußerst selten auftreten wird.

Die Auslegung des Abluftventilators erfolgt für $56 \text{ m}^3/\text{s}$ oder ca. $200.000 \text{ m}^3/\text{h}$, darin enthalten ist ein Sicherheitszuschlag für Fertigungstoleranzen und Messungenauigkeiten des Ventilators.

Die Luftmenge ist damit geringer als die nach RABT geforderte Mindestluftmenge, die dort zur Lösung von Problemen bei der Kontrolle der Luftströmung im Tunnel vorgegeben wird ($1,0 \text{ m/s}$ im Tunnelquerschnitt = $100 \text{ m}^3/\text{s}$ oder auch 4-facher Luftwechsel = $124 \text{ m}^3/\text{s}$).

Diese Lösung gilt seit 1990 mit der Einführung von drehzahlregelbaren Strahlventilatoren und intelligenter SPS zur Steuerung der Tunnellüftung aber als unwirtschaftlich und überholt.

Das Beharren der RABT-2006 auf der fragwürdigen Aussage, dass Strahlventilatoren nicht stufenlos regelbar seien, wurde bisher nie belegt, stattdessen haben sich die stufenlos regelbaren STV bereits zur Energieeinsparung und Kontrolle der Luftströmung im Tunnel bewährt.

Eine Unterdimensionierung ist dadurch nicht zu befürchten, da selbst im ungünstigsten Fall des stockenden Verkehrs mit höchster Verkehrsdichte immer noch eine sehr große Reserve von gut 70% bis zur automatischen Tunnelsperrung in der Auslegung vorhanden ist.

Die Tunnelsperrung setzt gemäß RABT erst bei einem Trübungsfaktor von 0,012/m ein, während die Auslegung der Lüftung für 0,007 erfolgt.

Zudem werden im normalen Regellüftungsbetrieb nur 48,5 m³/s benötigt, um einen Trübungsfaktor von 0,005/m aufrechtzuerhalten, so dass sich bei einer Frischluftmenge von 56 m³/s ein Trübungsfaktor von 0,0043/m einstellen wird.

Da die Lufttrübung im Tunnel in Strömungsrichtung ansteigt, ergibt sich daraus zwischen den Portalen und der Abluftzentrale ein im Mittel noch geringerer Trübungsfaktor von 0,0022/m.

Aufgrund des geringen Unterschiedes der Frischluftmengen für den flüssigen und den stockenden Verkehr ist es auch sinnvoll, die Abluftanlage von 5:00 bis 20:00 Uhr ständig mit voller Leistung zu fahren, wodurch sich deren Steuerung vereinfacht.

Eine stufenlose Drehzahlregelung des Abluftventilators von 0-100%, wie vom RP-S vorgesehen, ist in diesem Fall nicht sinnvoll, da dadurch keine nennenswerte Energieeinsparung erreichbar ist, vielmehr würde nur ein permanenter Energieverlust im Frequenzumrichter erzeugt.

Es ist völlig ausreichend, in diesem Fall einen Stern-Dreieck-Anlauf für den Motor vorzusehen, um den Anlaufstrom zu begrenzen.

4 Kontrolle der Luftströmung

Die Luftströmung im Tunnel unterliegt zahlreichen Einflüssen, die sehr un stetig sind, wie z. B. der Kolbenwirkung der Fahrzeuge, dem Winddruck auf die Portale, dem thermischen Auf- oder Abtrieb, der Reibung der Luftströmung an der Tunnelwand und an den Fahrzeugen.

Diese können die gleichmäßige und ausgeglichene Zu strömung der Frischluft von den beiden Portalen zur Abluftzentrale in der Tunnelmitte stören und zur Verschiebung der Schadstoffkonzentration im Tunnel führen, bis hin zum Austritt von belasteter Tunnel luft aus einem Portal.

Zur Kontrolle der Luftströmung sind deshalb in der Planfeststellung 14 Strahlventilatoren vorgesehen worden, die einen Abgleich der Luftströmungen in beiden Tunnelkästen bewirken.

Vielfach wurden die STV für diesen Fall bisher nur mit primitiven Ein-Aus-Schaltungen realisiert, was immer zu sehr unbefriedigenden Lösungen und in der Folge zu unwirtschaftlichen Überdimensionierungen dieser Anlagen geführt hat.

Das Problem der Konzentrationsverlagerung wird im Anhang dargestellt (Anlage C / Abb. 15).

Die beigefügten Diagramme zeigen, wie die Konzentration im Tunnelast bei verringerter Luftgeschwindigkeit ansteigt und bei erhöhter Luftgeschwindigkeit abnimmt.

Die Konzentrationsänderungen finden dabei praktisch nur in Richtung der mittig gelegenen zentralen Abluftstation statt, aber nicht an den Portalen.

Es ist daher zulässig, die Portalkonzentration zu vernachlässigen, solange dort keine Strömungsumkehr stattfindet.

Zur Verhinderung der Portalemission und zum Abgleich der Luftströmung in den beiden Tunnelästen eignen sich die vorgesehenen Strahlventilatoren, wenn diese mit einer intelligent programmierten SPS und einer stufenlosen Drehzahlregelung ausgestattet werden.

Für die stufenlose Drehzahlregelung werden Frequenzumformer eingesetzt, die z. B. einen Synchronbetrieb aller STV, ohne Schaltpausen, ermöglichen.

Die Blasrichtung und Drehrichtung der STV müssen für diesen Zweck voll reversierbar sein.

Für die Regelung der Luftgeschwindigkeit in den beiden Tunnelästen sind die nach RABT erforderlichen Strömungsmessgeräte vorzusehen.

Geeignet sind hierfür nur Ultraschallmessgeräte (Sonometer) mit hoher Auflösung im Bereich kleiner Strömungsgeschwindigkeit (0,1 bis 5 m/s) und kurzen Messzyklen im Sekundenbereich.

Zur Beherrschung allfälliger Messwertausreißer (Lkw-Wirbel) sind redundante Geräte und Filteralgorithmen (Tiefpassfilter und Mittelwertbildung) für das Programm der SPS erforderlich.

Da die Störeinflüsse auf die Luftströmung im Wesentlichen von den Fahrzeugen herrühren, ist deren Einfluss als Störgröße auf den Regler aufzuschalten.

Die Aufschaltung erfolgt unter Nutzung der Verkehrsdaten, die an den Induktionsschleifen erfasst und in der SPS ausgewertet werden (Anzahl, Fahrzeugtyp, Geschwindigkeit, Richtung).

Die Daten müssen dazu direkt von der Streckenstation oder vom Verkehrsrechner an die SPS übergeben werden, da das langsame TLS-Protokoll dafür ungeeignet ist.

Im Ergebnis müssen sich dann in dem einen Tunnelast eine positive und in dem anderen Ast eine gleich große negative Strömungsgeschwindigkeit im Tunnel einstellen, wie es in dem bei-

gefügten Beispiel von einer Strömungsmessung und Regelung aus dem B 260 Malbergtunnel in Bad Ems zu sehen ist ([Anlage C / Abb. 16](#)).

Ähnliche Lüftungssteuerungen sind z. B. 1991 im B 294 Kirchbergtunnel in Schiltach und 1997 im B 33-Sommerbergtunnel in Hausach mit stufenlos drehzahlregelbaren Abluftventilatoren und 2006 im B 260 Malbergtunnel in Bad Ems mit stufenlos drehzahlregelbaren Strahlventilatoren realisiert worden.

5 Auslegung der Abluftfilter

Mit dem Einbau von Abluftfiltern soll eine hochwirksame Reinigung der Tunnelabluft und eine nachhaltige Reduzierung der Abluftmenge und des erforderlichen Energieeinsatzes erreicht werden, um einen sauberen und wirtschaftlichen Betrieb der Tunnellüftung zu ermöglichen.

Als Schadstoffe werden hier der Feinstaub und die Stickoxide betrachtet und untersucht, wobei andere Schadstoffe nicht ausgeschlossen werden sollen, die aber wegen der erwarteten geringen Konzentration unkritisch sind und unter den zulässigen Grenzwerten bleiben.

Für die Abscheidung von Feinstaub und Stickoxiden sind zwei verschiedene Filter erforderlich: Der erste Filter reinigt die Tunnelabluft von Feinstaub, Aerosolen und Ruß und schützt dadurch auch den zweiten Filter vor einer Verschmutzung von dessen feinen Poren.

Der Filter soll insbesondere den Staub $< 10 \mu\text{m}$ (d. h. PM_{10} , $\text{PM}_{2,5}$ und $\text{PM}_{0,5}$) abscheiden.

Der zweite Filter dient neben der Abscheidung von anderen Schadstoffen wie H_2S und SO_2 insbesondere der Oxidation von NO in NO_2 und dessen Abscheidung als neutrales Salpetersalz.

Es findet auch eine Oxidation von CO in CO_2 statt, das leider nicht abgeschieden werden kann.

CO_2 ist zwar der Hauptbestandteil der Motorabgase, ist aber als natürlicher Bestandteil der Atmosphäre in normalen Konzentrationen völlig unschädlich und im Filter bereits vorhanden und daher nicht adsorbierbar.

Die Berechnung und Auslegung des Staubfilters erfolgt mit der im Aktions- und Luftreinhalteplan für die Stadt Schwäbisch Gmünd im Tunnel erwarteten Feinstaubmenge von 660 kg/a.

Von dieser Gesamtemission könnten theoretisch 10% für die Nachtzeit abgezogen werden, wenn die Abluftanlage nicht in Betrieb ist.

Andererseits muss aber mit einer Sedimentierung der größeren Partikel während der Nachtzeit gerechnet werden, die mit Betriebsbeginn am nächsten Morgen von dem einsetzenden Verkehr wieder aufgewirbelt werden und so doch noch in den Abluftfilter gelangen.

Aus der vorgenannten Staubmenge und der gewählten Abluftmenge errechnen sich für einen Betrieb ohne Filter - und alternativ mit Filter - die in der Anlage dargestellten Staubkonzentrationen am Kaminkopf (Anlage D / Tab. 3).

Ohne Filter beträgt die Staubkonzentration am Kaminkopf $150 \mu\text{g}/\text{m}^3$ bei $300 \text{ m}^3/\text{s}$ und mit Feinstaubfilter $6,34 \mu\text{g}/\text{m}^3$ bei $56 \text{ m}^3/\text{s}$.

Der Filterauslegung liegt ein Wirkungsgrad von 99,5% zugrunde (Fa. Ecovac nennt einen Wirkungsgrad gemäß Prüfbescheid von 99,9%, bei einer Partikelgröße von $0,2 \mu\text{m}$ bis $2,0 \mu\text{m}$).

Die Berechnung und Auslegung des Gasfilters erfolgt gemäß Emissionshandbuch des UBA mit dem Emissionsfaktor für NO_x für das Jahr 2015 und für flüssigen Außerortsverkehr (AO2) bei 8% SLV-Anteil (Schwerlastverkehr).

Hieraus ergibt sich eine NO_x -Emission von 16,7 kg/d oder 6,1 t/a, die abzuscheiden ist.

Für die zusätzliche Abscheidung von SO_2 muss die Aufnahmekapazität um 10% erhöht werden.

Aus der vorgenannten NO_x -Emission und der gewählten Abluftmenge errechnen sich für einen Betrieb ohne Filter - und alternativ mit Filter - die in der Anlage dargestellten Stickoxidkonzentrationen am Kaminkopf (Anlage D / Tab. 4).

Ohne Filter beträgt die Stickoxidkonzentration am Kaminkopf somit $1.110 \mu\text{g}/\text{m}^3$ bei $300 \text{ m}^3/\text{s}$ und mit Absorptionsfilter nur noch $168 \mu\text{g}/\text{m}^3$ bei $56 \text{ m}^3/\text{s}$.

Der Filterauslegung liegt ein Wirkungsgrad von 97% zugrunde (Fa. Ecovac nennt einen Filterwirkungsgrad von 99,5% im Bereich von 15% bis 95% rel. Luftfeuchte, der aber am Ende der einjährigen Einsatzzeit, zum Zeitpunkt der Erschöpfung, auf 90% fallen kann).

Für die Abscheidung des Stickstoffdioxids und des Schwefeldioxids werden etwa 40 t Filtermaterial pro Jahr benötigt.

Die Wirksamkeit der Filter kann damit als gesichert gelten.

Die Filterbatterien absorbieren außer den gasförmigen Schadstoffen auch das Betriebsgeräusch des Abluftventilators, so dass der Schalldämpfer vor dem Abluftkamin mit weniger Dämpfung und weniger Druckverlust (zur Energieeinsparung) ausgelegt werden kann.

Die Nutzungsdauer der Filter wird mit 20 Jahren angesetzt.

6 Lüftungssystemvarianten

Der Abluftkamin ist mit 6,2 m Innendurchmesser für eine Ausblasgeschwindigkeit von 12 m/s gemäß Planfeststellungsbeschluss von 1996 vorgegeben worden, um eine Mindestluftmenge von 300 m³/s und eine Maximalluftmenge von 500 m³/s auf eine Quelhöhe von 515 m üNN zu blasen, entsprechend einer Blashöhe des Abluftstrahls von mindestens 65 m über den Kaminkopf.

Hierbei ist zu berücksichtigen, dass für den zweiten Bauabschnitt mit einer zweiten Röhre zwei Portalabsaugungen notwendig werden, für die die Abluftanlage dann ebenfalls mit 500 m³/s gefahren werden soll.

Für den Betrieb der ersten Röhre ergibt sich dann bei einer Mindestluftmenge von 300 m³/s im 6,2 m Kamin eine zu geringe Strömungsgeschwindigkeit von 9,9 m/s, für die gemäß Erläuterungsbericht zur Planfeststellung eine Blende von 5,35 m Durchmesser am Kaminkopf angesetzt werden soll, um die Ausblasgeschwindigkeit auf 12 m/s in der Blende und auf 15 m/s nach der Blende (im Freistrah) zu beschleunigen.

Hier sind deshalb Vergleichsrechnungen für die in der Planfeststellung vorgesehenen Betriebsfälle mit 500 m³/s und 300 m³/s und für die Abluftfilteranlage mit 56 m³/s durchgeführt und im Anhang E und F dargestellt worden.

In der Anlage E (Anlage E für PM₁₀) werden die Feinstaubkonzentration und in der Anlage F (Anlage F für NO_x) die Stickoxidkonzentration im Abluftstrahl untersucht.

Für den Abluftfreistrah wird eine konische Aufweitung mit entsprechender Konzentrationsabnahme der Schadstoffe angesetzt, wobei angenommen wird, dass der Freistrah ab einer Strahlendgeschwindigkeit von 1,2 m/s durch Seitenwind umgelenkt und zurückgelenkt wird.

Dieses soll keine Immissionsberechnung ersetzen, es kann jedoch einen einfachen und anschaulichen Vergleichsmaßstab zur Bewertung der unterschiedlichen Konzentrationen und Strahlquerschnitte liefern, die auch für eine flächige Immissionsbelastung ursächlich sind.

Gemäß Vorgabe aus der Planfeststellung sind zuerst die drei folgenden Fälle untersucht worden:

A-1: Amts-Entwurf mit einem 6,2 m Kamin, mit 5,53 m Blende und 300m³/s (1 Röhre)

Dieser zeigt bei einem Strahlenddurchmesser von 126 m eine PM₁₀-Konzentration von 0,95 µg/m³ und eine NO_x-Konzentration von 7,1 µg/m³ im Auflösebereich des Freistrahles (nach 230 m).

A-2: Amts-Entwurf mit einem 6,2 m Kamin, mit 5,53 m Blende und 500m³/s (1 Röhre)

Dieser zeigt bei einem Strahlenddurchmesser von 211 m eine PM₁₀-Konzentration von 0,21 µg/m³ und eine NO_x-Konzentration von 1,5 µg/m³ im Auflösebereich des Freistrahles (nach 384 m).

A-3: Amts-Entwurf mit einem 6,2 m Kamin, ohne Blende und mit 500m³/s (2 Röhren)

Dieser zeigt bei einem Strahlenddurchmesser von 172 m eine PM₁₀-Konzentration von 0,47 µg/m³ und eine NO_x-Konzentration von 3,5 µg/m³ im Auflösebereich des Freistrahles (nach 570 m).

Durch den Einbau der Abluftfilter werden nach den Angaben der Fa. Ecovac die Feinstaubkonzentration PM₁₀ um 99,5% und die Stickoxidkonzentration NO_x im Mittel um 97% reduziert.

Dadurch entfällt die Notwendigkeit, die Abluft bis in eine Höhe von 515 m üNN zu blasen.

Dem folgend sind 6 Varianten mit Abluftfiltern untersucht worden:

V-1: Variante mit einem 6,2 m Kamin, Abluftfiltern, 2,44 m Düse und 56m³/s (1 Röhre)

Diese Variante geht von einem 6,2 m Kamin aus und berücksichtigt statt der Blende eine Düse von etwa 2,44 m Durchmesser (hydraulisch), mit zwei Seitenklappen am Kaminkopf, die im Brandfall von einem externen Stellmotor am Kaminfuß ganz aufgefahen werden, um den vollen Kaminquerschnitt für die Rauchabführung freizugeben.

Diese Düse ermöglicht bei geringem Druckverlust und geringer Geräuschbildung eine Strahlgeschwindigkeit von 12 m/s und damit eine höhere Blasweite als bei der Blende.

Das ergibt bei einem Strahlenddurchmesser von 124 m eine PM₁₀-Konzentration von 0,06 µg/m³ und eine NO_x-Konzentration von 1,7 µg/m³ im Auflösebereich des Freistrahles (nach 162 m).

V-2: Variante mit einem 6,2 m Kamin und Abluftfiltern, mit 56 m³/s (1 Röhre)

Diese Variante geht ebenfalls von einem 6,2 m Kamin aus, es wird jedoch auf den Einbau einer Blende oder Düse verzichtet, da die gereinigte Tunnelabluft keine Belastung für die Umwelt darstellt und deshalb auch mit der geringen Strahlgeschwindigkeit von 1,9 m/s ausgeblasen werden kann.

Das ergibt bei einem Strahlenddurchmesser von 20 m eine PM₁₀-Konzentration von 1,49 µg/m³ und eine NO_x-Konzentration von 30,6 µg/m³ im Auflösebereich des Freistrahles (nach 86 m).

V-3: Variante mit einem 5,0 m Kamin und Abluftfiltern, mit 56 m³/s (1 Röhre)

Diese Variante reduziert den Kamin auf 5,0 m, weil dieser bei einer gereinigten Tunnelabluftmenge von 56 m³/s nicht mehr für die 300 m³/s Mindestlüftung, sondern nur noch für die Brandentrauchung mit 275 m³/s ausgelegt werden muss.

Das ergibt bei einem Strahlenddurchmesser von 24 m eine PM₁₀-Konzentration von 1,12 µg/m³ und eine NO_x-Konzentration von 29,7 µg/m³ im Auflösebereich des Freistrahles (nach 80 m).

V-4: Variante mit einem 3,5 m Kamin und Abluftfiltern, mit 56 m³/s (1 Röhre)

Bei dieser Variante wird die Entrauchungsleistung des Abluftkamins reduziert, indem diese im Brandfall auf zusätzliche Brandgasventilatoren an den Fluchttreppenhäusern Ost und West (in Portalnähe) verteilt wird, so dass der Abluftkamin nicht mehr für eine Entrauchung mit 275 m³/s sondern nur noch für 137,5 m³/s auszulegen ist.

Der Kamin reduziert sich dadurch auf 3,5 m Durchmesser, während an den Fluchttreppenhäusern niedrige Abluftkamine gleichen Durchmesser vorgesehen werden, die nicht höher als die Fluchttreppenhäuser sind.

Das ergibt bei einem Strahlenddurchmesser von 34 m eine PM₁₀-Konzentration von 0,27 µg/m³ und eine NO_x-Konzentration von 7,1 µg/m³ im Auflösebereich des Freistrahles (nach 114 m).

V-5: Variante mit einem 5,0 m Kamin und Abluftfiltern, mit 112 m³/s (2 Röhren)

Diese Variante geht von einem 5,0 m Kamin aus, um die doppelte Abluftmenge von 112 m³/s zu berücksichtigen, die mit der Errichtung und Einbindung einer zweiten Röhre erforderlich wird.

Dies ist möglich, weil dann bei Richtungsverkehr nicht mehr die Brandgasventilatoren sondern die Stahlventilatoren für die Entrauchung im Brandfall eingesetzt werden.

Die Fahrzeugemission bleibt bei der Aufteilung auf zwei Röhren jedoch gleich, so dass hier eine Vorverdünnung der Schadstoffe vor dem Eintritt in den Filter erfolgt.

Das ergibt bei einem Strahlendurchmesser von 48 m eine PM₁₀-Konzentration von 0,14 µg/m³ und eine NO_x-Konzentration von 3,7 µg/m³ im Auflösebereich des Freistrahles (nach 158 m).

Diese Variante nutzt den Deckenkanal der ersten Röhre zur Rückführung der Tunnelabluft aus der zweiten Röhre, mit einer Absaugung am Ostportal der zweiten Röhre.

Alternativ kann die Abluft der zweiten Röhre auch durch die erste Röhre zum Westportal der ersten Röhre geführt werden, so dass am Westportal die gesamte Tunnelabluft abgesaugt wird und der Deckenkanal in der Osthälfte der ersten Röhre als Frischluftkanal genutzt werden kann.

Eine solche Abluftrückführung durch die Parallelröhre existiert bereits seit 1994 im B61 Tunnel des Ostwestfalendamms in Bielefeld.

V-6: Variante mit zwei 3,5 m Kaminen und Abluftfiltern, mit je 56 m³/s (2 Röhren)

Diese Variante berücksichtigt ebenfalls die Errichtung einer zweiten Röhre, es wird jedoch zur Abführung der doppelten Abluftmenge von 2x56 m³/s eine zweite Abluftstation mit Abluftfilter am Ostportal vorgesehen, so dass der Kamin auf 3,5 m reduziert werden kann.

Am Fluchttreppenhaus Ost (in Portalnähe) wird die zweite Abluftstation mit einem Kurzkamin von 3,5 m Durchmesser für 56 m³/s errichtet, der nicht höher als das Fluchttreppenhaus ist.

Dies ist möglich, weil dann bei Richtungsverkehr nicht mehr die Brandgasventilatoren sondern die Stahlventilatoren für die Entrauchung im Brandfall eingesetzt werden.

Die Fahrzeugemission bleibt bei der Aufteilung auf zwei Röhren jedoch gleich, so dass hier eine Vorverdünnung der Schadstoffe vor dem Eintritt in den Filter erfolgt.

Das ergibt bei einem Strahlendurchmesser von 34 m eine PM₁₀-Konzentration von 0,13 µg/m³ und eine NO_x-Konzentration von 3,6 µg/m³ im Auflösebereich des Freistrahles (nach 114 m).

In der beigefügten Anlage G sind die folgenden Lüftungssysteme schematisch dargestellt:

Amtsentswurf A-1 (Anlage G / Abb. 17),

Lüftungsvariante V- 4 (Anlage G / Abb. 18),

Lüftungsvariante V- 5 (Anlage G / Abb. 19),

Lüftungsvariante V- 6 (Anlage G / Abb. 20).

7 Wahl des günstigsten Abluftsystems

Die Variante 4 ermöglicht die größten Kosteneinsparungen beim Bau eines sehr schlanken Vertikalschachtes mit freistehendem Kamin von nur 3,5 m Innendurchmesser, bei sehr geringen Schadstoffimmissionen (das sind die Konzentrationen in der Umgebung des Kamins) und bei minimalem Energieverbrauch, wenn für die Entrauchung im Brandfall jeweils ein zusätzlicher Brandgasventilator an den Kopfenden des Abluftkanals (in Portalnähe an den Fluchttreppenhäusern) vorgesehen wird.

Gleichzeitig entfällt bei dieser Variante das aufwendige Frischluftrohr am Kamin, da die Frischluft für die Kaverne sehr einfach über den Fluchtstollen herangeführt werden kann.

Die Frischluft wird hier auch zur Fremdkühlung der Brandgasventilatoren genutzt und garantiert im Brandfall einen besseren und zuverlässigeren Hitzeschutz als die „Zertifikats-Motoren“ des Amtsentwurfs.

Der schlanke Kamin wirkt auch weniger störend als der 7,0 m dicke Kamin des Amtsentwurfs.

Der konstante Volllastbetrieb des Abluftventilators garantiert eine stetige und gleich bleibende Tunnelluftströmung und Tunnelluftqualität, gleichzeitig werden die teuren und verlustbehafteten Frequenzumrichter der zwei 400 kW-Motoren des Amtsentwurfs eingespart.

Durch die lufttechnische Trennung der Abluftfilteranlage von der Entrauchungsanlage kann auf die aufwendigen Hitzetests und Brandschutzmaßnahmen für den Abluftventilator und die Abluftfilter verzichtet werden, lediglich die Absperrklappen sind für 400°C über 120 Minuten geprüft worden.

Bei Ausfall der Abluftfilteranlage wird mit den Brandgasventilatoren ein Notbetrieb gefahren.

Der direkte saugseitige Anschluss der Abluftanlage an die Tunnelröhre vermeidet überflüssige Deckenklappenwege und reduziert die Druckverluste und Stromaufnahme der Abluftanlage.

Die Einhausung der Abluftfilteranlage und die luftdichte Kanalverbindung des Abluftventilators mit dem Tunnel und dem Abluftkamin vermeiden die extremen Ventilator drücke in der Kaverne (Abluftzentrale), die anderenfalls den ungehinderten Zugang zur Kaverne während des Abluftbetriebes unmöglich machen, wie es beim Amtsentwurf der Fall ist.

Die Funktion der Abluftanlage ist schematisch in der Anlage H dargestellt ([Anlage H / Abb. 21](#)).

In der Darstellung sind noch beide Brandgasventilatoren berücksichtigt, von denen aber einer durch zwei externe Brandgasventilatoren an den Kopfstationen des Tunnels ersetzt werden sollte, um den Kamin auf 3,5 m Durchmesser zu verschlanken und die Brandentrauchung über den Deckenkanal substantiell zu verbessern.

Die luftdichte Kanalverbindung von der Abluftdecke im Tunnel zu den Brandgasventilatoren und zum Abluftkamin verhindert im Brandfall die im Amtsentwurf mögliche Verrauchung und Hitzeeinwirkung auf die Einrichtungen in der Kaverne.

In der Abluftkaverne können dann alle Zusatz- und Hilfsanlagen platzsparend untergebracht werden, wie z. B. die NO_x-Messgeräte, Differenzdruckmessgerät, Schwingungsmessgerät, Schalt- und Steuerschränke mit SPS-Regelung und Buskoppler zur Leittechnik, Druckluftstation mit Kompressor, Druckspeicher und Schnellschlussventilsteuerung für die Druckluftblasanlage.

Ein 3,0 m breiter Transport- und Revisionsgang zwischen der Abluftfilteranlage und der Entrauchungsanlage ermöglicht den einfachen Transport der Kaminbefahranlage vom Tunnel in den

Kamin und zurück, um so die jährliche Kaminrevision durchführen zu können, während ein solcher Transportweg in dem Amtsentwurf nicht berücksichtigt worden ist.

Der Verzicht auf die im Amtsentwurf vorgesehene Drosselblende am Kaminkopf verringert die Druckverluste der Abluftanlage und vermeidet die Bildung von störenden Austrittswirbeln und Strömungsgeräuschen am Kaminkopf.

Mit dem Einbau des Absorptionsfilters erfolgt eine zusätzliche Schalldämpfung für die Fortluft.

Die stufenlose Drehzahlregelung der Strahlventilatoren ermöglicht eine optimale Kontrolle und Regelung der Strömungsgeschwindigkeit und Schadstoffkonzentration im Tunnel und verhindert den Austritt von Schadstoffen aus den Portalen, während der Amtsentwurf von einer einfachen Stufenschaltung der Strahlventilatoren ausgeht, die immer mit hohen Anlaufströmen, Anfahrwirbeln, hohem Energieverbrauch und Zwangspausen der Ventilatoren verbunden ist und die zu instabilen Strömungsverhältnissen und Konzentrationsverteilungen im Tunnel führt.

Variante 4 eignet sich auch zur späteren Erweiterung des Tunnels um eine zweite Röhre.

Variante 6 setzt deshalb für den Bau der zweiten Röhre auf Variante 4 auf und ermöglicht so, bei doppelter Abluftmenge, eine Vorverdünnung der Tunnelabluft und die geringsten Schadstoffimmissionen bei geringsten Bau- und Betriebskosten.

Mit dem Bau der zweiten Röhre kann bei der Variante 6 auch auf den Bau einer sehr teuren Zwischendecke für die Abluft verzichtet werden, wenn die Abluft der zweiten Röhre nicht zur Tunnelmitte zurückgeführt werden muss, sondern direkt an der Portalabsaugung, in der Nähe des Ostportals, in einer zweiten Abluftfilterstation gereinigt und ins Freie geblasen wird.

8 Beschreibung einer Abluftfilteranlage

Die Anordnung der Abluftfilter ist schematisch in der Anlage ([Anlage H / Abb. 22](#)) dargestellt.

Die Auslegung der Abluftanlage mit Feinstaubfilter und Absorptionsfilter erfolgt für die erste Tunnelröhre mit 56 m³/s Abluft.

Es wird ein Feinstaubfilter zur Reinigung der Abluft von Feinstaub, Ruß, Schwermetallen und Aerosolen mit 99,9% Wirkungsgrad bei einer Partikelgröße von 0,2 µm bis 2,0 µm vorgesehen.

Der Feinstaubfilter erhält eine automatische Druckluftabreinigung mit Staubsammler und Aus-trag mit elektrischer Förderschnecke und Zelleradschleuse in einen „Bigbag“ (großer Müllsack).

Dem Feinstaubfilter wird ein Absorptionsfilter und Oxidator mit aktivierter, imprägnierter Ton-erde nachgeschaltet, zur Reinigung der Tunnelabluft von NO_x, H₂S, SO₂ und CO, mit einem durchschnittlichen Wirkungsgrad für die NO_x-Abscheidung von 97% bei 15% bis 95% rel. Luft-feuchte (die Abluft ist nach dem Ventilator immer wärmer und trockener als im Tunnel und da-durch niemals 100% feucht).

Zur Absorption von NO_x und SO₂, die in Salpeter und Sulfat umgewandelt und in die Tonerde eingelagert werden, sind 40 t Filtermaterial notwendig, die bei dem erwarteten Verkehrsauf-kommen von 19.600 Kfz/d mit 8,5% SLV-Anteil einmal pro Jahr komplett ausgetauscht werden.

Das Filtermaterial ist nicht brennbar und nach einer Deaktivierung des Oxidators deponierfähig.

Die Abluftanlage wird aus brandschutztechnischen Gründen und zum Betrieb des Ventilators im optimalen Betriebspunkt konsequent von der Entrauchungsanlage getrennt und betrieben.

Die Abluftanlage erhält einen Abluftventilator, der mit einem 75 kW Motor täglich von 5:00 bis 20:00 Uhr (15 Stunden pro Tag) mit voller Leistung gefahren wird.

Die Abluftanlage wird durch die bereits im Amtsentwurf vorgesehenen 14 Strahlventilatoren er-gänzt, die den notwendigen Strömungsabgleich in den beiden Tunnelästen herstellen.

Die Strahlventilatoren sind dafür stufenlos in der Drehzahl regelbar und in der Blas- und Dreh-richtung umkehrbar auszuführen.

Die Motorleistung der vorgesehenen 14 Strahlventilatoren DN630 beträgt ca. 15 kW (geschätzt).

Im Regelbetrieb werden die STV durchschnittlich nur mit halber Drehzahl betrieben, so dass de-ren Leistungsaufnahme insgesamt nur ca. 50 kW beträgt.

Ferner ist eine Schutzbelüftung des Abluftfiltergehäuses mit Frischluft aus dem Fluchtstollen vorgesehen, die bei einem Brandalarm aus dem Tunnel automatisch einen Hilfsventilator zur Überdruckbelüftung des Filtergehäuses aktiviert und die Tunnelabluftanlage auf der Tunnelseite und auf der Kaminseite automatisch mit elektrisch angetriebenen Absperrklappen verschließt.

Die Absperrklappen sind hitzebeständig für 400°C über 2 Stunden von der MPA-NRW geprüft, mit einer Lecklufrate < 0,05 m³/h/m² bei 3.000 Pa Differenzdruck und sind komplett aus korro-sionsbeständigem Werkstoff gefertigt (Rahmen und Lamellen aus 1.4571 nach DIN 17400, La-mellenlager, Achsen und Stellhebel aus 1.4351 nach DIN 17400).

Für die Schutzbelüftung ist ein Ventilator mit 0,9 m³/s bei 2.000 Pa Differenzdruck vorgesehen.

Es wird empfohlen, die Schutzbelüftung aus dem Fluchtstollen auch zur Fremdbelüftung und zur Kühlung der Brandgasventilatoren einzusetzen, da dies die einzig bewährte und zuverlässigste Lösung für den Entrauchungsbetrieb bei einem Fahrzeugbrand im Tunnel ist.

Die Tunnelabluftanlage erhält einen Ansaugschalldämpfer und einen Fortluftschalldämpfer.

Die Schalldämpfer bestehen aus korrosionsbeständigem Aluminium (AlMg3) nach ZTV-KOR, mit abriebfesten, nicht brennbaren Kulissen und akustisch transparenter Lochblechabkleidung.

Der Ansaugschalldämpfer wird durch ein Welldrahtgitter aus Edelstahl 1.4401 geschützt und direkt an die Tunnelwand in der Pannenbucht angesetzt, um einen kurzen Strömungsweg und geringe Druckverluste zu ermöglichen.

Der Fortluftschalldämpfer wird an die Kavernenabschlusswand vor dem Abluftkamin angesetzt.

Im Tunnel soll der Schalldruckpegel des Abluftventilators nicht mehr als 65 dB(A) im Bereich der Pannenbucht erreichen, so dass der Gesamtschalldruckpegel im Tunnel, zusammen mit den Strahlventilatoren, unter 75 dB(A) bleibt, um im Ereignisfall die Kommunikation und Sicherheit der Tunnelnutzer nicht zu gefährden.

Dies gilt insbesondere bei Pannen, Havarien und Stausituationen, wenn sich Personen auf der Fahrbahn befinden, die nur durch die Wahrnehmung des Fahrzeuggeräusches vor einem heranahenden Fahrzeug gewarnt werden können, und bei Lautsprecheransagen, die nur bei ausreichend niedrigem Hintergrundgeräusch verständlich sind, und bei der Kommunikation der verschiedenen Einsatzdienste im Tunnel, die sich auch untereinander verständigen können müssen.

Die Schalldämpfer werden deshalb für einen Schalldruckpegel von 65 dB(A) ausgelegt, gemessen in 3 m Abstand unter 45° zur Strömungsachse.

Auf der Fortluftseite ergibt sich damit tagsüber, in 1 m Abstand vom Kaminkopf, ein Schalldruckpegel, der aufgrund der Vorschalldämpfung im Absorptionsfilter noch um ein paar Dezibel unter 65 dB(A) liegt und nachts ganz abgeschaltet sein wird.

Die Verbindungskanäle zwischen Schalldämpfern, Klappen, Ventilator und Filter werden strömungsgünstig und korrosionsbeständig aus Stahlblech mit Oberflächenschutz nach ZTV-KOR hergestellt (z. B. mit 80 µm Feuerverzinkung und mit 160 µm Haft-, Grund- und Deckanstrich auf Polymerbasis), desgleichen das Ventilatorgehäuse mit Flanschen, Füßen und Motorhalterung sowie das Filtergehäuse und die Filtereinbauten (Rahmen, Stützen, Schnecke und Zellrad-schleuse), sofern sie nicht aus korrosionsbeständigem Stahl 1.4571 hergestellt sind (Druckluftdüsen, Druckluftleitung und Halter der Filterpatronen) oder aus Kunststoff (z. B. aus PP-hart für die Absorptionsfilterpatronen).

Das luftdichte Filtergehäuse nimmt sowohl den Feinstaubfilter als auch den Absorptionsfilter auf und wird für die Wartungs- und Revisionsarbeiten mit einer luftdicht schließenden Tür, einer Innenbeleuchtung und einem Notausschalter für den Abluftventilator versehen.

Das Ventilatorlaufrad besteht aus korrosionsbeständigem Aluminium (AlMg3) nach ZTV-KOR, mit Schaufelfußverstärkung (Stahlkernimplantat) oder aus Stahl mit Oberflächenschutz nach ZTV-KOR.

Der Ventilator erhält Federschwingungsdämpfer und elastische Verbindungsstutzen, sowie eine Revisionsöffnung, eine Nachschmiereinrichtung, einen externen Klemmkasten und eine Schwingungsüberwachung für den Ventilator und eine Temperaturüberwachung für den Motor.

Für den energiesparenden Betrieb des Ventilators wird vorausgesetzt, dass der Baulastträger am Fuß des Abluftkamins strömungsgünstige und korrosionsbeständige Luftleitbleche einbaut (ähn-

lich wie im Kirchbergtunnel bei Schiltach oder im Sommerbergtunnel bei Hausach), die zum Zweck der jährlich erforderlichen Revision des Kaminschachtes leicht demontierbar und herausziehbar sein müssen.

Die Überwachung der Filterfunktion erfolgt auf der Reinluftseite (nach dem Absorptionsfilter) mit einem NO_x-Analysator (spektroskopische IR-Messung) in 19“-Einschubtechnik, mit NO₂-Konverter (zur Reduktion des NO₂ in NO), Messgassonde, Faltenbalgmessgaspumpe (EPDM), Messgasansaugfilter, thermoelektrischem Kondensationstrockner (Peltierkühler), Schrankgehäuse, digitalen und analogen Ein- und Ausgängen und potentialfreien Relaiskontakten für die Programmierung, Überwachung und Messwertfernübertragung in die Leittechnik und zur Fernabfrage seitens des Betreibers.

Die automatische Pulsluftreinigung des Feinstaubfilters erfolgt differenzdruckgesteuert mit einem Druckluftkompressor mit 15 kW Anschlussleistung, mit integriertem Drucklufttrockner (Adsorptionstrockner), Öl/Wasserseparator, Zyklonabscheider mit Kondensatableiter, 1000 Ltr. Druckluftbehälter nach AD-Regelwerk, TÜV-geprüft, Druckluftleitung und Druckluftdüsen mit elektrischen Schnellschlussventilen und Steuerschrank.

Die Steuerung und Überwachung der Abluftanlage einschließlich Abluftventilator, Absperrklappen, Stellmotoren, Druckluftanlage und NO_x-Messung erfolgt mit Sicherungen, Hauptschaltern, Wahlschaltern, Schützen, Schaltrelais, SPS und Buskopplern in Schalt- und Steuerschränken, die einschließlich Verdrahtung, Verkabelung und Erdung in der Abluftzentrale aufgestellt werden.

Die Energieeinspeisung und die Anschaltung der Überwachungsanlagen an die Tunnelleittechnik erfolgen durch den Baulastträger.

Die Abluftanlage mit den Abluftfiltern wird von der Fa. Ecovac als komplette, funktionsfähige und anschlussfertige Anlage geliefert, montiert, in Betrieb gesetzt und gewartet.

Zur Wartung gehören der jährliche Austausch und die Entsorgung des verbrauchten Absorptionsfiltermaterials und der verzinkten Filterpatronen des Feinstaubfilters.

Elektro- und Verschleißteile werden von der Fa. Ecovac während der Gewährleistungsfrist für den Baulastträger kostenlos ausgetauscht.

Die Fa. Ecovac liefert die komplette Abluftfilteranlage zwischen Tunnelpannenbucht und Abluftkamin als anschlussfertige und betriebsbereite Einheit.

Die Fa. Ecovac liefert, transportiert, montiert und richtet die Anlage komplett ein.

Die Fa. Ecovac liefert alle erforderlichen Unterlagen, die zur Erlangung der Genehmigung für die Errichtung, den Betrieb und die Abfallentsorgung der Anlage erforderlich sind.

Die Fa. Ecovac liefert die vollständige anlagentechnische und sicherheitstechnische Dokumentation der Anlage, die für den einwandfreien und sicheren Betrieb der Anlage erforderlich ist.

Die Fa. Ecovac weist das Betriebspersonal des Tunnels in die Bedienung der Abluftanlage ein und gibt ihm eine umfassende Schulung in Fragen der Bedienung und Störungsbeseitigung.

9 Betriebskosten einer Abluftfilteranlage

Der elektrische Energiebedarf der Abluftfilteranlage berücksichtigt folgende Verbraucher:

- 1 Abluftventilator mit	75 kW	an 15 h/d an 365 d/a =	410.625 kWh/a
- 14 Strahlventilatoren mit	15 kW zu 15%	an 15 h/d an 365 d/a =	172.462 kWh/a
- 1 Druckluftkompressor mit	15 kW zu 10%	an 15 h/d an 365 d/a =	<u>8.213 kWh/a</u>
Summe des Elektroenergiebedarfs:			591.300 kWh/a

- Die Energiekosten der Abluftfilteranlage betragen bei 0,35 €/kWh: **206.955,00 €a**
- Der Filteraustausch umfasst den jährlichen Austausch und die Entsorgung des Absorptionsmaterials und der verzinkten Feinstaubfilterpatronen, sowie Wartungsarbeiten, pauschal: **420.000,00 €a**

10 Betriebskosten der Lüftungsanlage gemäß Amtsentwurf

Der elektrische Energiebedarf der Lüftungsanlage berücksichtigt folgende Verbraucher:

- 2 Abluftventilatoren mit 400 kW zu 50% an 15 h/d an 365 d/a = 2.190.000 kWh/a

Hier wird eine Reduktion von 50% unterstellt, da dass RP-S von einer „verkehrs- und windabhängigen“ stufenlosen Drehzahlregelung im „Normalbetrieb“ ausgeht, was jedoch im Widerspruch zur planfestgestellten Minimalluftmenge und Mindestblasgeschwindigkeit am Kaminkopf steht. Es besteht auch Klärungsbedarf zu den Druckverlusten im Ansaugkanal, der im Brandfall bei 275 m³/s und 24 m/s zu extrem hohen und unüblichen Ansaugeschwindigkeiten und Antriebsleistungen führt.

- 14 Strahlventilatoren mit 15 kW zu 50% an 15 h/d an 365 d/a = 574.875 kWh/a
- Summe des Elektroenergiebedarfs: **2.764.875 kWh/a**

Die Energiekosten der Lüftungsanlage betragen bei 0,35 €/kWh: **967.706,00 €a**

11 Betriebskosteneinsparung mit einer Abluftfilteranlage

- Energiekosten für die Lüftungsanlage gemäß Amtsentwurf: **967.706,00 €a**
 - abzüglich der Energiekosten für die Abluftfilteranlage und der **-206.955,00 €a**
 - Kosten für Wartung, Austausch und Entsorgung des Filtermaterials: **-420.000,00 €a**
- Summe der Betriebskosteneinsparungen (einschließlich 19% MwSt.): **340.751,00 €a**

12 Mehrkosten für den Einbau einer Abluftfilteranlage

Die Kosten für den Einbau der Abluftfilteranlage werden auf Basis von Angaben der Fa. Ecovac wie folgt geschätzt:

1	Feinstaubfilter für 56 m ³ /s Tunnelabluft mit 99,9% Abscheidegrad bei PM _{2,5} , komplett mit automatischer Druckluftabreinigung und Staubaustragsystem	550.000,--
1	Absorptionsfilter für 56 m ³ /s Tunnelabluft mit 97% Abscheidegrad bei NO _x , komplett mit Füllung und NO _x -Überwachung	850.000,--
1	gemeinsames, strömungsgünstiges Filtergehäuse mit Tür, Beleuchtung und Notausschalter	150.000,--
1	Abluftventilator für 56 m ³ /s Tunnelabluft mit 75 kW-Motor	90.000,--
2	Schalldämpfer für 56 m ³ /s mit 30 dB ED bei 250 Hz	70.000,--
2	hitzebeständige Absperrklappen mit Stellantrieben für Einbau in den Abluftkanal	50.000,--
1	Satz Verbindungskanäle zwischen Tunnel, Filter, Ventilator, Schalldämpfern, Klappen und Kamin	100.000,--
1	Ventilator für die Filterschutzbelüftung mit 0,9 m ³ /s und 3 kW	15.000,--
1	Schaltschrank und Steuerschrank mit Verdrahtung, Verkabelung und allen erforderlichen Einbauten	25.000,--
-	Dokumentation, Einregulierung und Inbetriebsetzung der Anlage	30.000,--
-	Gemeinkosten, Versicherungen, Baustelleneinrichtung, Büro	30.000,--
-	Fahrt- und Reisekosten, Übernachtungen, Tagesgelder	10.000,--
-	Ingenieurhonorare, Planungsleistungen	<u>30.000,--</u>
	Summe:	2.000.000,--
	19% MwSt.	<u>380.000,--</u>
	Gesamtkosten:	€2.380.000,--

Mit der vorgenannten Energieeinsparung würde sich der Einbau der Abluftfilteranlage somit innerhalb von 7 Jahren amortisieren.

Für die Finanzierung mit 7% Zins ergeben sich Finanzierungskosten von: € 1.000.000,--

Auf Basis einer jährlichen Zahlung von €1.000.000,-- können damit die Kosten für die Anschaffung, den Betrieb und die Finanzierung gedeckt werden.

Die Finanzierung läuft dabei über 10 Jahre.

Anschließend steht die jährliche Zahlung weitere 10 Jahre für den Betrieb, den Erhalt und die Erneuerung der Anlage zur Verfügung.

Die Nutzungsdauer der Anlage wird mit 20 Jahren angesetzt.

13 Minderkosten beim Einbau einer Abluftfilteranlage

Mit dem Einbau der Abluftfilteranlage entstehen nicht nur Mehrkosten bei deren Anschaffung, sondern es lassen sich auch Minderkosten realisieren.

Die Minderkosten liegen im Bereich der Nachbargewerke, so dass deren Höhe hier nicht angegeben werden kann, sondern vom RP-S zu ermitteln sind.

Es sind dabei die folgenden Einsparpotentiale zu berücksichtigen:

- Mit dem Einbau der Abluftfilteranlage kann die Drosselblende am Kaminkopf entfallen.
- Mit dem Einbau einer Frischluftversorgung von dem benachbarten Fluchtstollen bis in die Kaverne kann das im Abluftkamin geplante 125 m lange Rohr DN1200 entfallen und durch ein kurzes Rohr unter der Tunnelfahrbahn ersetzt werden.
- Der 157 m hohe Abluftschacht und Kamin kann von 6,2 m Innendurchmesser auf 5,0 m verringert werden, wenn dieser nur für die zentrale Brandfallentrauchung des Tunnels dimensioniert werden muss
- Der Abluftkamin kann bis auf 3,5 m verringert werden, wenn die Brandfallentrauchung zu gleichen Teilen auf den Kamin und jeweils einen Brandgasventilator an den beiden Fluchttreppenhäusern Ost und West aufgeteilt wird.
- Für die Brandgasventilatoren an den Treppenhäusern sind entsprechende kurze Schächte zur Aufnahme der Ventilatoren sowie Kabel für die Energieversorgung vorzusehen.
- Mit dem Einbau der Abluftfilteranlage können die Frequenzumformer für die geplante stufenlose Regelung der beiden 400 kW Motoren im Normalbetrieb entfallen, da diese dann nur noch für die Brandfallentrauchung eingesetzt werden.
- Stattdessen werden 14 kleine Frequenzumformer für die stufenlose Drehzahlregelung der 15 kW Strahlventilatoren benötigt, mit SPS-Programmierung zur Strömungsregelung.

Im Hinblick auf die Kostenexplosion bei den Baukosten infolge der Hinzunahme eines Fluchtstollens stellt sich auch die Frage, in welchem Verhältnis die Kosten zum Nutzen stehen.

Mit dem zusätzlichen Fluchtstollen soll u. a. eine Zufahrtmöglichkeit für Rettungsfahrzeuge geschaffen werden, was anderswo inzwischen längst als nutzlos erkannt und verworfen wurde, weil die Fahrzeuge im Fluchtstollen nicht wenden können und zu wenig Platz ist, um an den entgegenkommenden Flüchtenden vorbei zu fahren.

Mit dem Fluchtstollen sollen ferner zusätzliche Querschläge in Abständen von 250 bis 300 m als Fluchtwege aus dem Tunnel vorgesehen werden, deren Nutzen äußerst gering ist, da ein mangelhaft entrauchter Tunnel auch mit kurzen Fluchtwegabständen immer noch ein zu großes Risiko darstellt, wenn die Sichtweite durch den Rauch auf 1 bis 2m reduziert ist und die Flüchtenden nicht nur ihre Orientierung sondern mit drei Atemzügen auch das Bewusstsein verlieren.

Das Risiko ist hier nur durch eine sehr schnelle und sehr wirksame automatische Entrauchungsanlage zu minimieren, wie das bereits 2006 im B260 Malbergtunnel in Bad Ems realisiert und demonstriert worden ist.

Das Risiko wird dadurch um etwa 2 Größenordnungen verringert, während bei den Fluchttunneln nur ein Faktor 2 angenommen werden kann, was keinen nennenswerten sicherheitstechnischen Gewinn darstellt (Risiken werden deshalb auch nur im logarithmischen Maßstab dargestellt).

Andererseits sind die Mehrkosten einer leistungsfähigen Entrauchungsanlage geradezu vernachlässigbar gering, verglichen mit den extremen Mehrkosten für den langen Fluchttunnel und die Querstollen.

Als Vorbild einer guten Lösung bietet sich hier die vierte Elbröhre an, bei der die Fluchtwege im Abstand von 1000 m angeordnet werden konnten, in Kombination mit einer sehr leistungsfähigen Entrauchungsanlage.

Auf Schwäbisch Gmünd übertragen würde dies bedeuten, dass statt der 6 Fluchtstollen nur einer in Tunnelmitte erforderlich ist, ergänzt und flankiert um die beiden Fluchttreppenhäuser.

Auf den teuren Fluchttunnel könnte dann ganz verzichtet werden.

Dafür wären die Tunnelnutzer und die Einsatzkräfte im Brandfall im Tunnel wesentlich sicherer und besser geschützt unterwegs.

14 Zusammenfassung

Die Machbarkeit und die Wirtschaftlichkeit für den Einbau einer Filteranlage zur Reinigung der Tunnelabluft von Feinstaub und Stickoxiden konnte für den B 29 Tunnel in Schwäbisch Gmünd dargestellt werden.

Die von der Fa. Ecovac angebotene Technik erscheint geeignet, das Ziel einer Minimierung der Immissionsbelastung durch den Abluftkamin am Lindenfirst und einer signifikanten Energieeinsparung gegenüber der geplanten Lüftungsanlage zu erreichen.

Es ergeben sich folgende Minderungen und Einsparungen:

- **Der Feinstaub PM_{2,5} wird um 99,9% reduziert**
- **Die Stickoxide NO_x werden um 97% reduziert**
- **Der Energieverbrauch wird um 79% reduziert**
- **Die CO₂-Emissionen (el.) werden um 79% reduziert**
- **Die Betriebskosten werden um 35% auf 65% reduziert**
- **Das Geräusch aus dem Kamin wird reduziert.**

Hinzu kommen mögliche weitere Einsparpotentiale im Bereich der Nachbargewerke (Kamin, Frischluftrohr, Deckenkanal der 2. Röhre und Fluchtstollen) sowie eine mögliche Verbesserung des Landschaftsbildes bei einem schmaleren Abluftkamin.

Frankfurt am Main, den 25. Mai. 2008

Dipl.-Ing. Hinrich Rottmann

15 Anhang

Im Anhang befinden sich folgende Anlagen:

- Anlage A: Dokumente zum Sachverhalt
- Anlage B: Auslegung der Tunnellüftung
- Anlage C: Kontrolle der Luftströmung
- Anlage D: Abluftfilterauslegung
- Anlage E: Abluftkaminvarianten für Feinstaub PM₁₀
- Anlage F: Abluftkaminvarianten für Stickoxide NO_x
- Anlage G: Lüftungssystemvarianten
- Anlage H: Funktionsschema und Anordnung
- Anlage I: 3D-Poster von der Fa. Ecovac

Anlage A

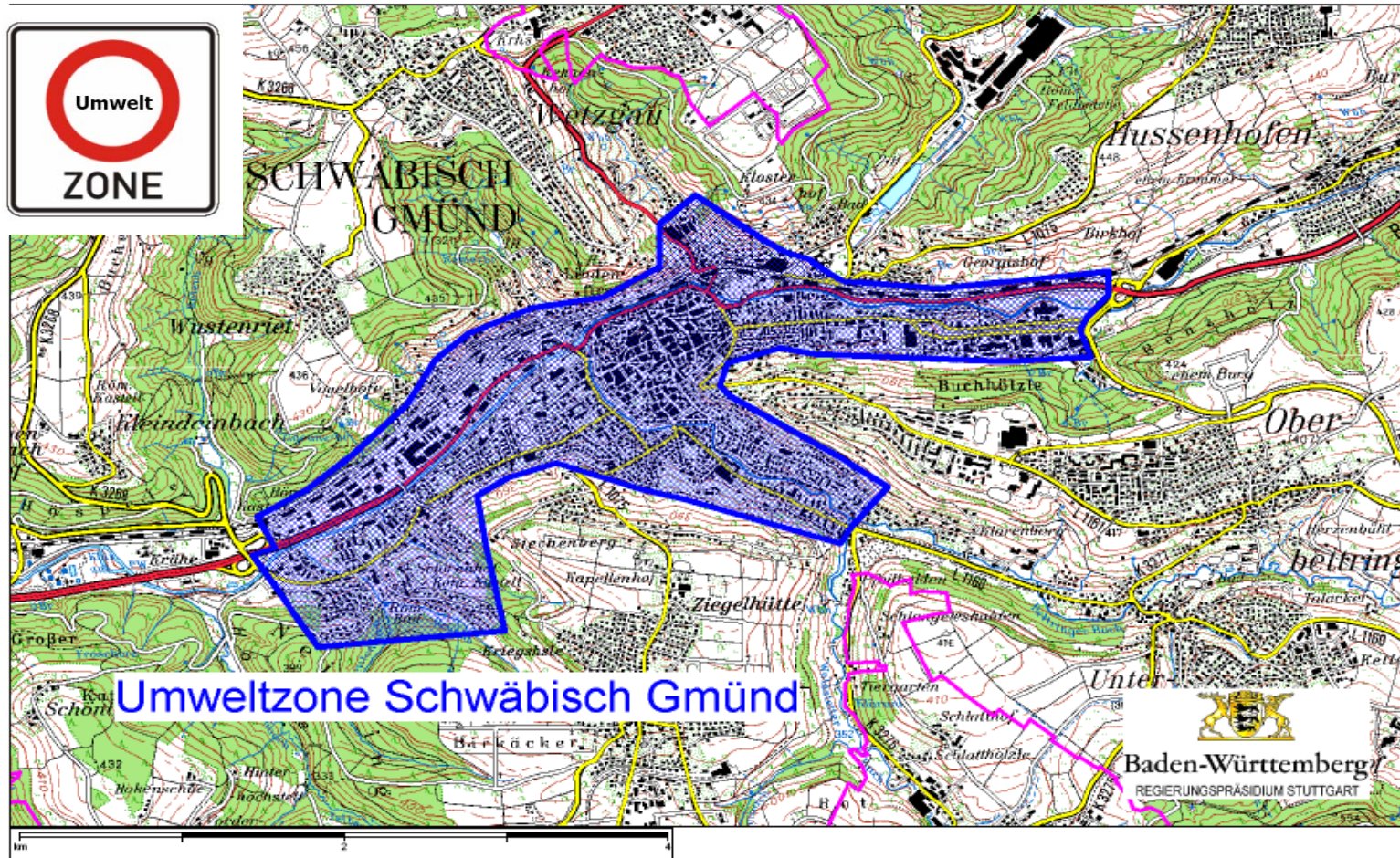
Sachverhalt

- Abb. 1 Luftbild der Stadt Schwäbisch Gmünd, Lage im Remstal
- Abb. 2 Umweltschutzzone, gültig ab 01.03.2008
- Abb. 3 EU-Abgasgrenzwerte für die Fahrzeugemissionen
- Abb. 4 Verkehrsprognose für 2010, Tunnel der B29 gestrichelt
- Abb. 5 Schadstofftrends in Stuttgart (Feinstaub und Stickstoffdioxid)
- Abb. 6 Zusatzimmissionen durch NO₂ vom Abluftkamin
- Abb. 7 Windrose von Schwäbisch Gmünd
- Abb. 8 Kaminabluffahne und Auslegung des Kamins mit Zusatzblende
- Abb. 9 Übersichtslageplan (2005) zum Tunnelentwurf
- Abb. 10 Regelquerschnitt (2005) zum Tunnelentwurf
- Abb. 11 Abluftzentrale (2005) zum Tunnelentwurf
- Abb. 12 Abluftfilterstation für Calle 30, Túnel Sur Madrid
- Abb. 13 Feinstaubprüfprotokoll des BIA zum Prüfzeugnis Nr. 200423074/6210

Zitate aus Veröffentlichungen im Internet (hier in gekürzter Wiedergabe)



Zitate aus Veröffentlichungen im Internet (hier in gekürzter Wiedergabe)






Top. Karte 1:50000 Baden-Württemberg
© Landesvermessungsamt Baden-Württemberg, Bundesamt für Kartographie und Geodäsie 2003

Zitate aus Veröffentlichungen im Internet (hier in gekürzter Wiedergabe)

EU - Abgasgrenzwerte für die Fahrzeugemissionen

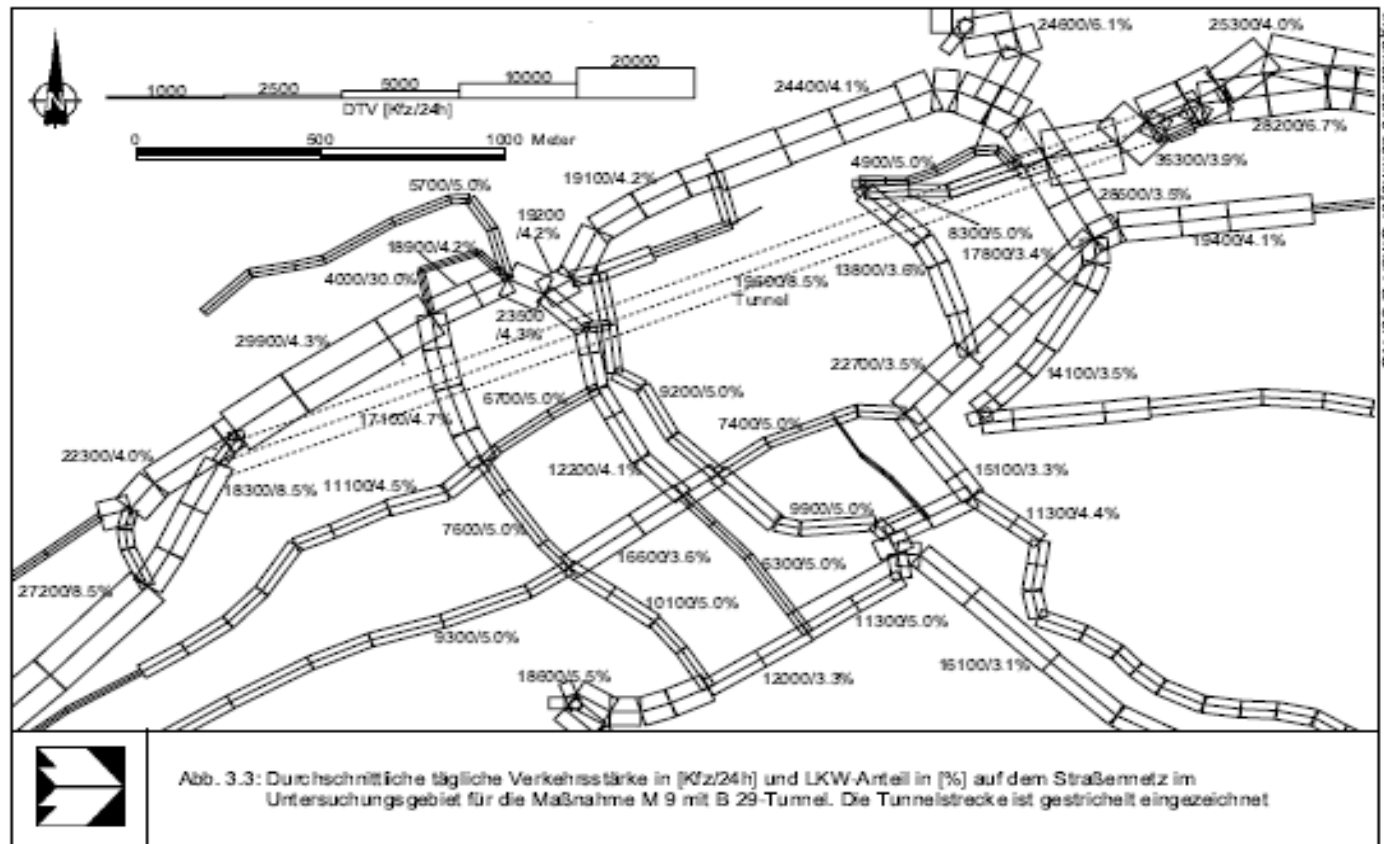
Emissionsgrenzwerte für Partikel und NO_x mit Geltungsjahr

		Euro 1	Euro 2	Euro 3	Euro 4	Euro 5
PKW	Jahr	1993	1996/97	2000	2005	
	Partikel [g/km]	0.14	0.08	0.05	0.025	-
	Jahr	1992	1996	2000	2005	-
	NO _x Diesel [g/km]	-	-	0.50	0.25	-
	NO _x Benzin [g/km]	-	-	0.15	0.08	-
LKW	Jahr	1992/93	1995/96	2000/01	2005	2008
	Partikel [g/kWh]	0.4	0.15	0.10	0.02	0.02
	Jahr	1992	1998	2000	2005	2008
	NO _x [g/kWh]	9.0	7.0	5.0	3.5	2.0

Schadstoff- gruppe 2	Schadstoff- gruppe 3	Schadstoff- gruppe 4
		

Kennzeichnungsverordnung: Schadstoffgruppen und Plaketten

Zitate aus Veröffentlichungen im Internet (hier in gekürzter Wiedergabe)

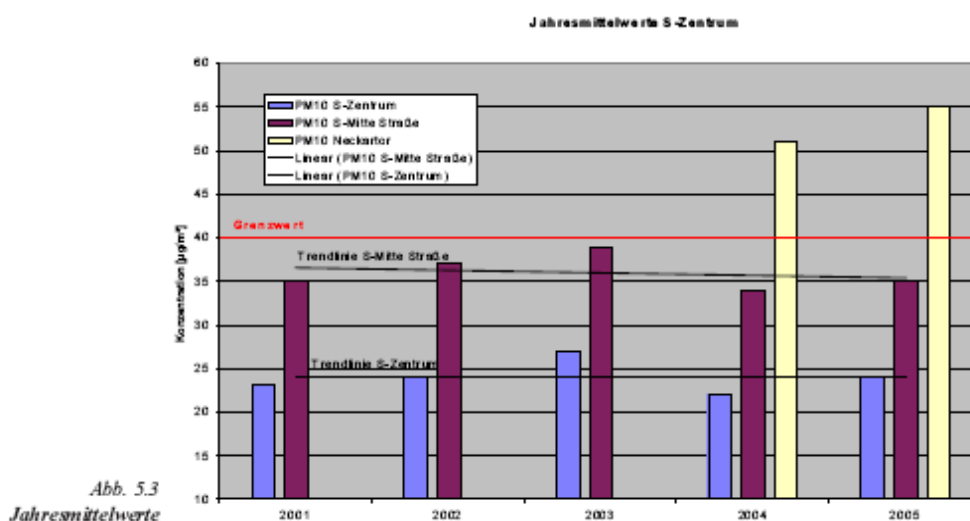


Quelle: Gesamtverkehrsplan Raum Schwäbisch Gmünd, Verfasser: Brenner + Münnich, 1998

Zitate aus Veröffentlichungen im Internet (hier in gekürzter Wiedergabe)

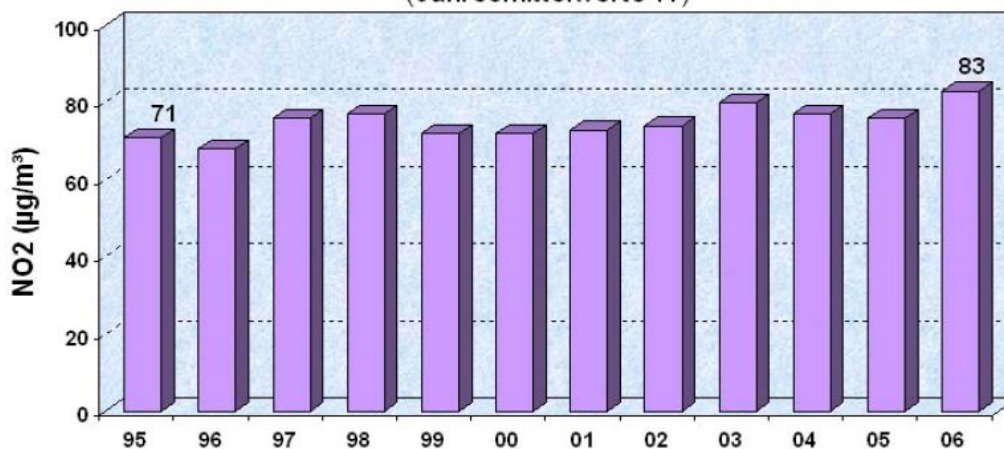
Schadstofftrends in Stuttgart

Feinstaub PM₁₀ von 2001 bis 2005



Stickstoffdioxid NO₂ von 1995 bis 2006

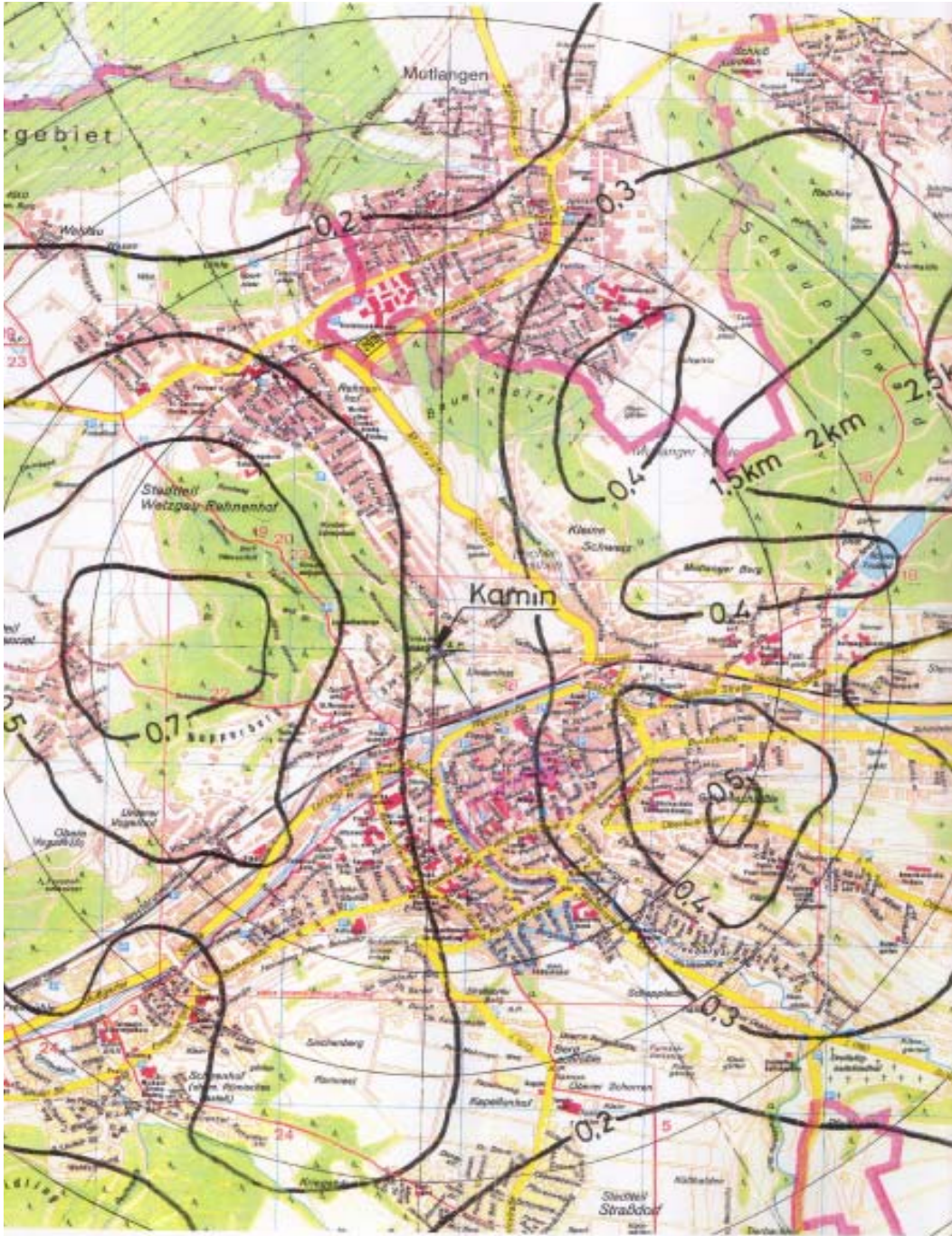
Langzeitentwicklung Stickstoffdioxid (µg/m³)
 1995 - 2006 in Stuttgart - Mitte - Straße
 (Jahresmittelwerte I1)



Quelle: LUBW, Grafik: AfU Stuttgart, Abt. 36-4

NO₂-Zusatzimmission durch Tunnelablufft

Zitate aus dem Erläuterungsbericht



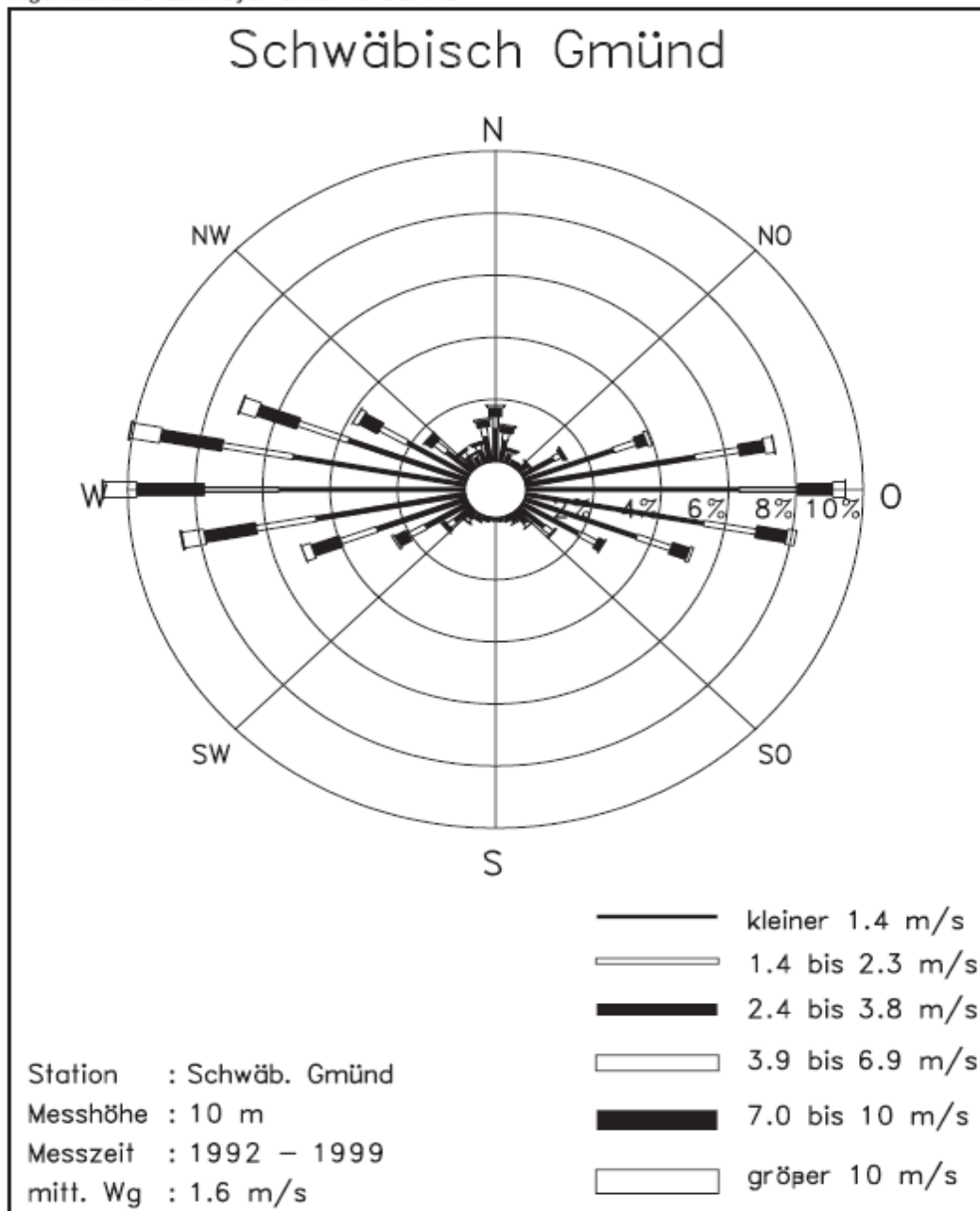
Mittlere jährliche NO₂-Zusatzbelastung (µg/m³)

Quelle: Schadstoffgutachten von 1992 (mit Windrichtungen von der MS Stöten)

Windrose für Schwäbisch Gmünd

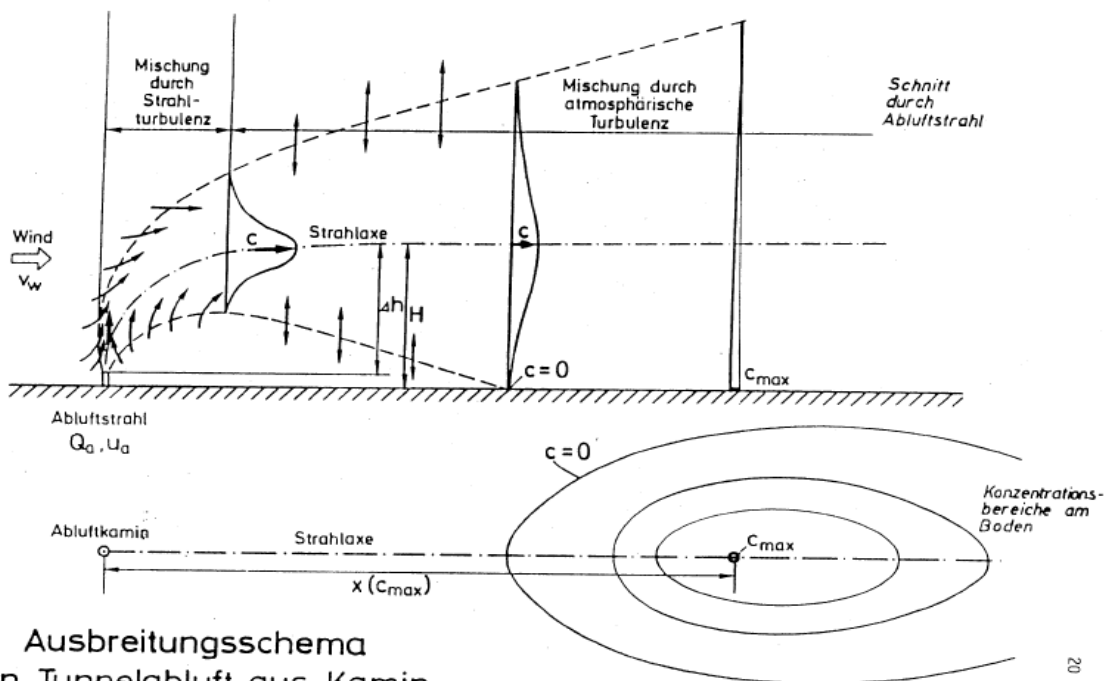
Zitate aus Veröffentlichungen im Internet (hier in gekürzter Wiedergabe)

Ingenieurbüro Lohmeyer GmbH & Co. KG



Quelle: Windrichtungs- und Windgeschwindigkeitsverteilung an der Meßstation Schwäbisch Gmünd (Deutscher Wetterdienst - DWD)
Der Meßort liegt in der Regel 10 m über Grund. Im Bereich der Bebauung und der tiefer liegenden Portale wird deshalb nur mit einer mittleren Windgeschwindigkeit von 1 m/s gerechnet (gilt für Tallage).

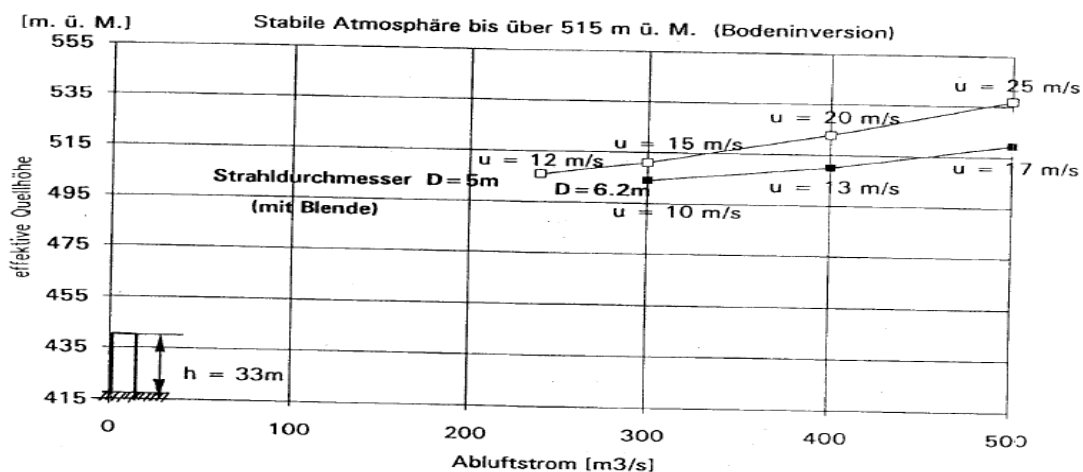
Kaminablufffahne



Ausbreitungsschema
 von Tunnelablufft aus Kamin

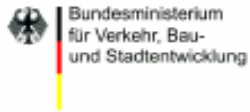
Zitate aus den Unterlagen zur Planfeststellung von 1996

Auslegung des Kamins mit Zusatzblende

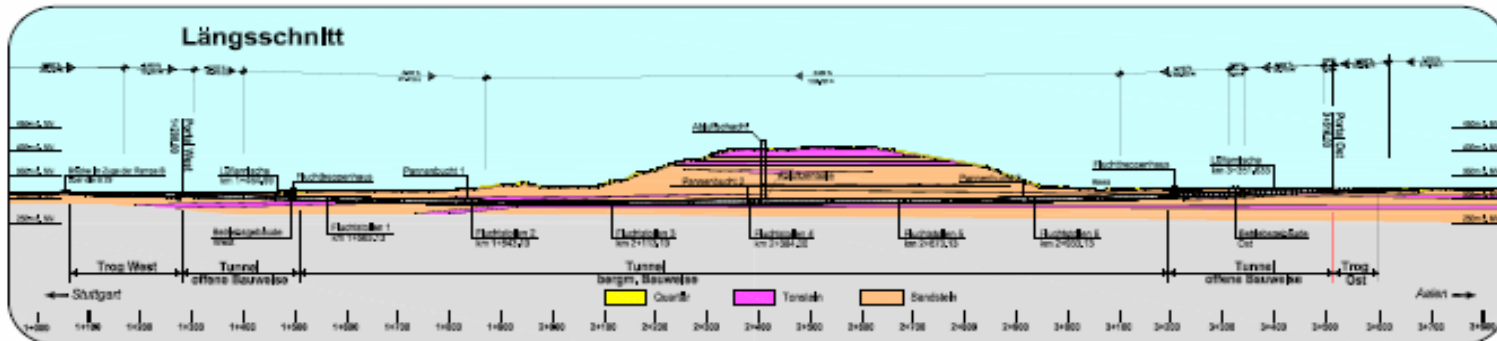


Errechnete effektive Quellhöhen für stabil geschichtete Atmosphäre

Übersichtslageplan (2005) zum Tunnelentwurf

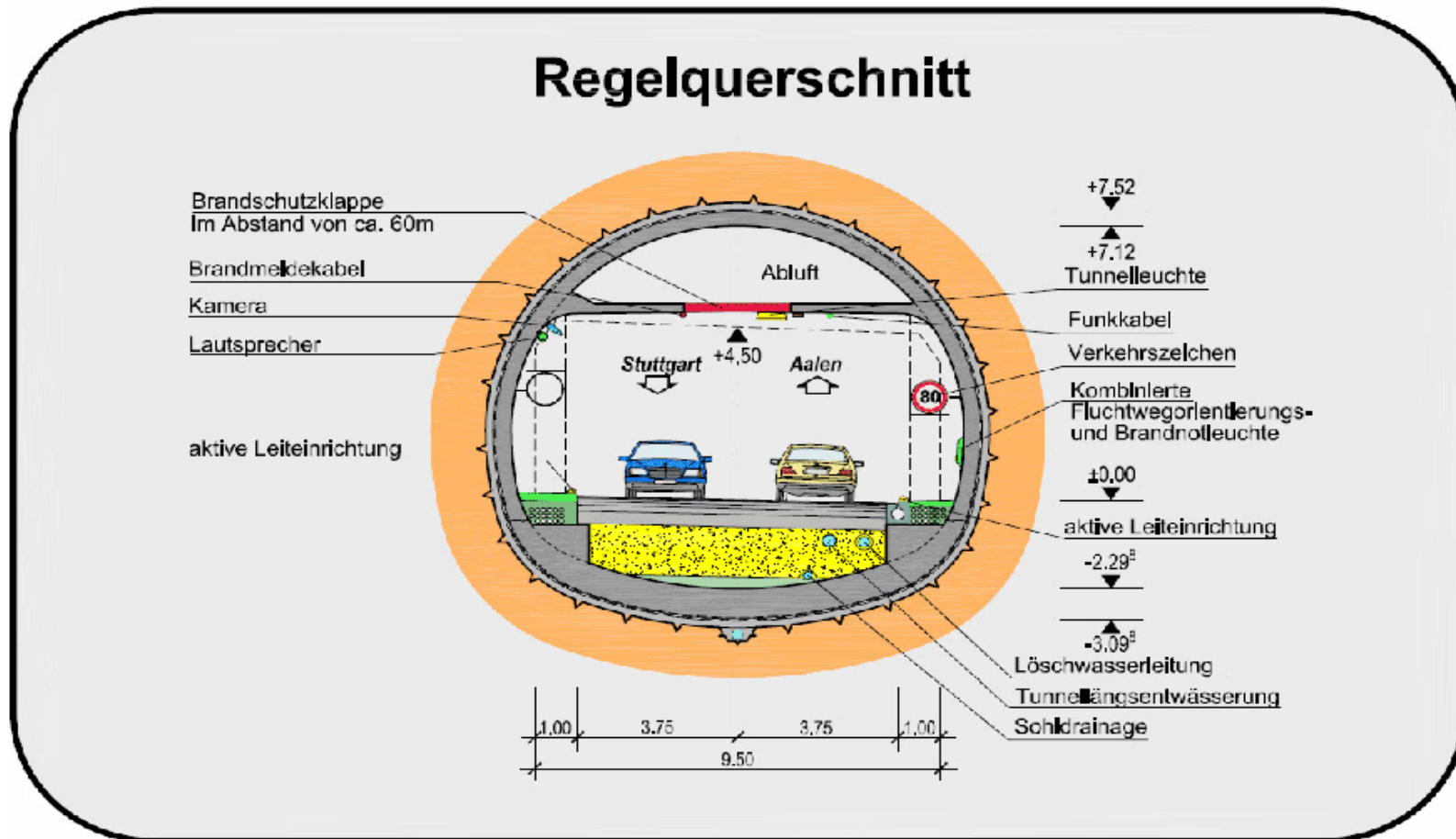


Ortsdurchfahrt B29 Schwäbisch Gmünd Tunnel Schwäbisch Gmünd Gesamtübersicht



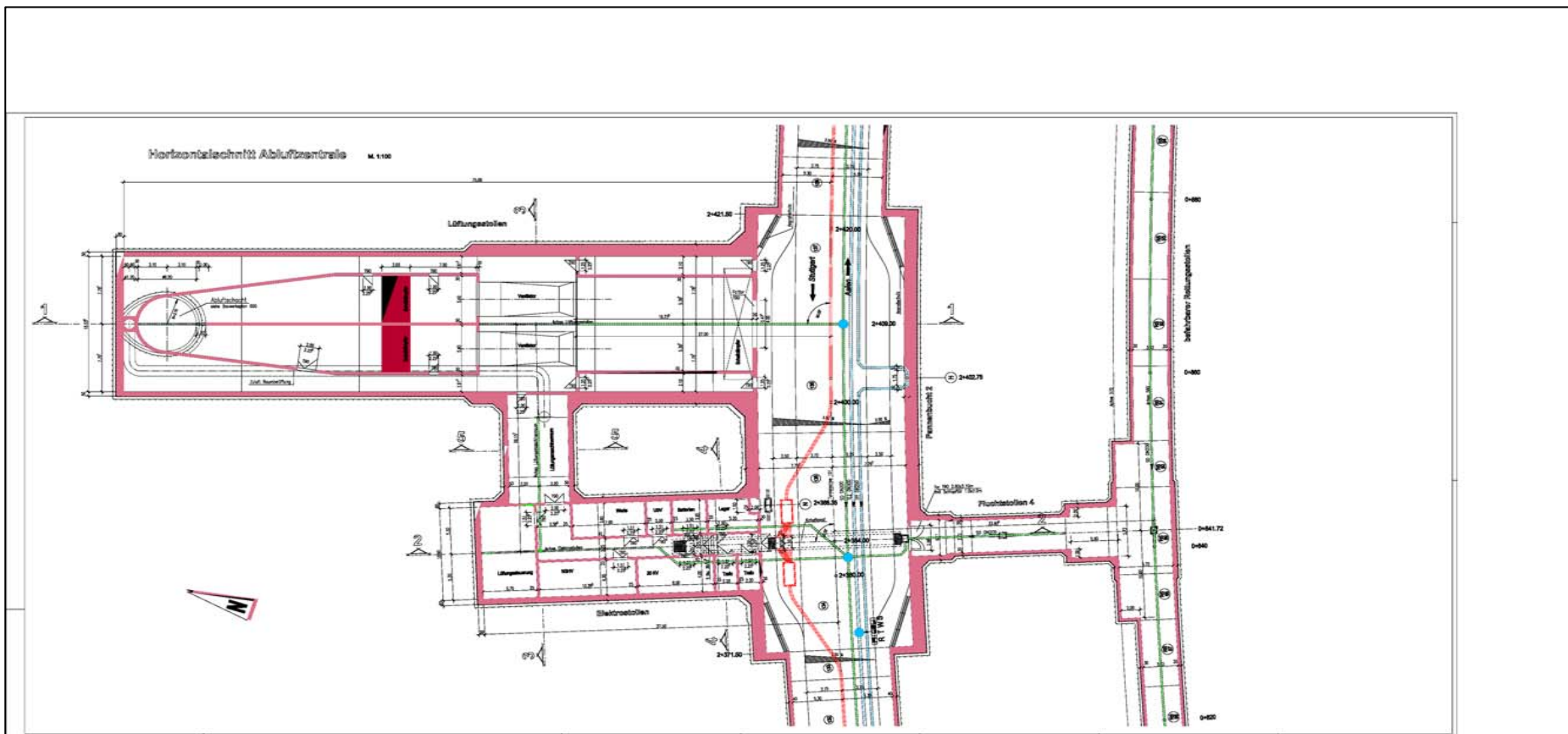
Regelquerschnitt (2005) zum Tunnelentwurf

Zitate aus Veröffentlichungen im Internet (hier in gekürzter Wiedergabe)



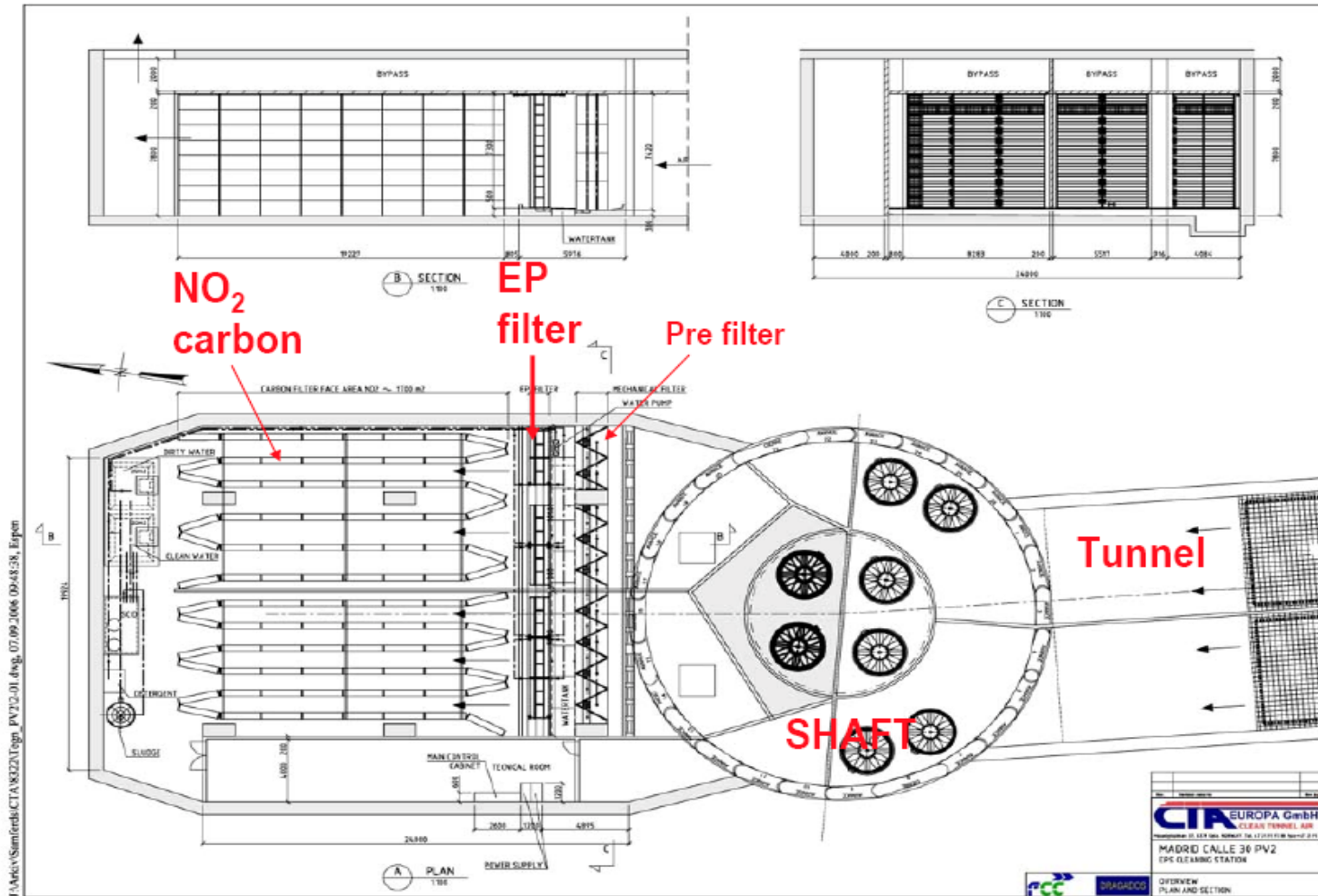
Abluftzentrale (2005) zum Tunnelentwurf

Zitate aus Veröffentlichungen im Internet (hier in gekürzter Wiedergabe)



Abluftfilterstation für Calle 30 Túnel Sur Madrid

Zitate aus Veröffentlichungen im Internet (hier in gekürzter Wiedergabe)



Feinstaub-Prüfprotokoll des BIA

zum Prüfzeugnis Nr. 200423074/6210 vom 14.10.2004

BIA
Berufsgenossenschaftliches
Institut für
Arbeitsschutz

Seite 5 zum Prüfzeugnis Nr. 200423074/6210 vom 14.10.2004
Page of Test Certificate No.

7.4. Prüfergebnisse

Mittlerer Durchlassgrad: 0,06 % (sechs Messungen)
Standardabweichung: 0,01 %

Bei einer Filterflächenbelastung von 200 m²/m³·h entsprechend einer Filteranströmgeschwindigkeit von 0,056 m/s ist der Durchlassgrad sicher < 0,10 % (s. Pkt. 5 der Grundsätze zur Prüfung).
Die Anforderungen an die Filtermaterialabscheideleistung der Staubklasse "M" werden erfüllt.

8. **Durchflusswiderstand**
Der Durchflusswiderstand des Filtermaterials wird vor der Quarzstaubprüfung ermittelt.

8.1 Filterflächenbelastung: 200 m²/m³·h

8.2 Anströmgeschwindigkeit: 0,056 m/s

8.3 Prüfergebnis

Mittlerer Durchflusswiderstand: 100 Pa (6 Messungen)

9. **Luftdurchlässigkeitsprüfung:** 400 m²/m³·h

Die Luftdurchlässigkeit des Filtermaterials wird bei einem Differenzdruck von 200 Pa vor der Quarzstaubprüfung ermittelt.

10. **Flächengewichtsprüfung:** 110 g/m²

11. **Kennzeichnung**

Die Anforderungen werden erfüllt.

Berufsgenossenschaftliches Institut
für Arbeitsschutz – BIA –
Im Auftrag


Christian Sollik

Dieses Prüfprotokoll darf nur vollständig und zusammen mit den Seiten 1 bis 3 des Prüfzeugnisses veröffentlicht werden.
This Test Protocol must only be published in full wording and in connection with pages 1 to 3 of the Test Certificate.
Die ermittelten Ergebnisse gelten nur für die geprüften Objekte.
The test results apply to the tested object only.

BIA
Berufsgenossenschaftliches
Institut für
Arbeitsschutz

Seite 4 zum Prüfzeugnis Nr. 200423074/6210 vom 14.10.2004
Page of Test Certificate No.

Prüfprotokoll Test protocol

1. **Prüfgrundlage:** DIN EN 60335-2-69 Anhang AA (08/99); Änderung zu IEC 60335-2-69, DIN IEC 61194/CD (05/99); Beschluß Nr.019 des Ernährungsausschusses der Prüfstellen im "EK 33"; BIA-Grundsätze zur Prüfung von Filtern für die Verwendung in staubbeseitigenden Maschinen und Geräten (Ausgabe 01/2003).

2. **Art der Prüfung:** Typprüfung

3. **Antragsteller:** DONALDSON COORDINATION CENTER

4. **Prüfmuster:** Filtermaterial

4.1 Bauart: Filtermaterial 1-logig

4.2 Bezeichnung: 1004-449

4.3 Kennzeichnung: 1004-449

5. **Staubklasse:** "M"

6. **Herstellerangaben Filtermaterial**

6.1 Material und Art: Baumwolle / Rayon Vlies

6.2 Flächengewicht: 115 g/m²

6.3 Luftdurchlässigkeit: 400 m²/m³·h bei 200 Pa

6.4 Anströmseite: unlinierte Seite

6.5 Farbe: blau, einseitig liniert

7. **Durchlassgradprüfung Filtermaterial**

7.1 Filterflächenbelastung: 200 m²/m³·h

7.2 Anströmgeschwindigkeit: 0,056 m/s

7.3 Anforderung Staubklasse "M"

Maximal zulässiger Durchlassgrad: < 0,10 %

Dieses Prüfprotokoll darf nur vollständig und zusammen mit den Seiten 1 bis 3 des Prüfzeugnisses veröffentlicht werden.
This Test Protocol must only be published in full wording and in connection with pages 1 to 3 of the Test Certificate.
Die ermittelten Ergebnisse gelten nur für die geprüften Objekte.
The test results apply to the tested object only.

Anlage B

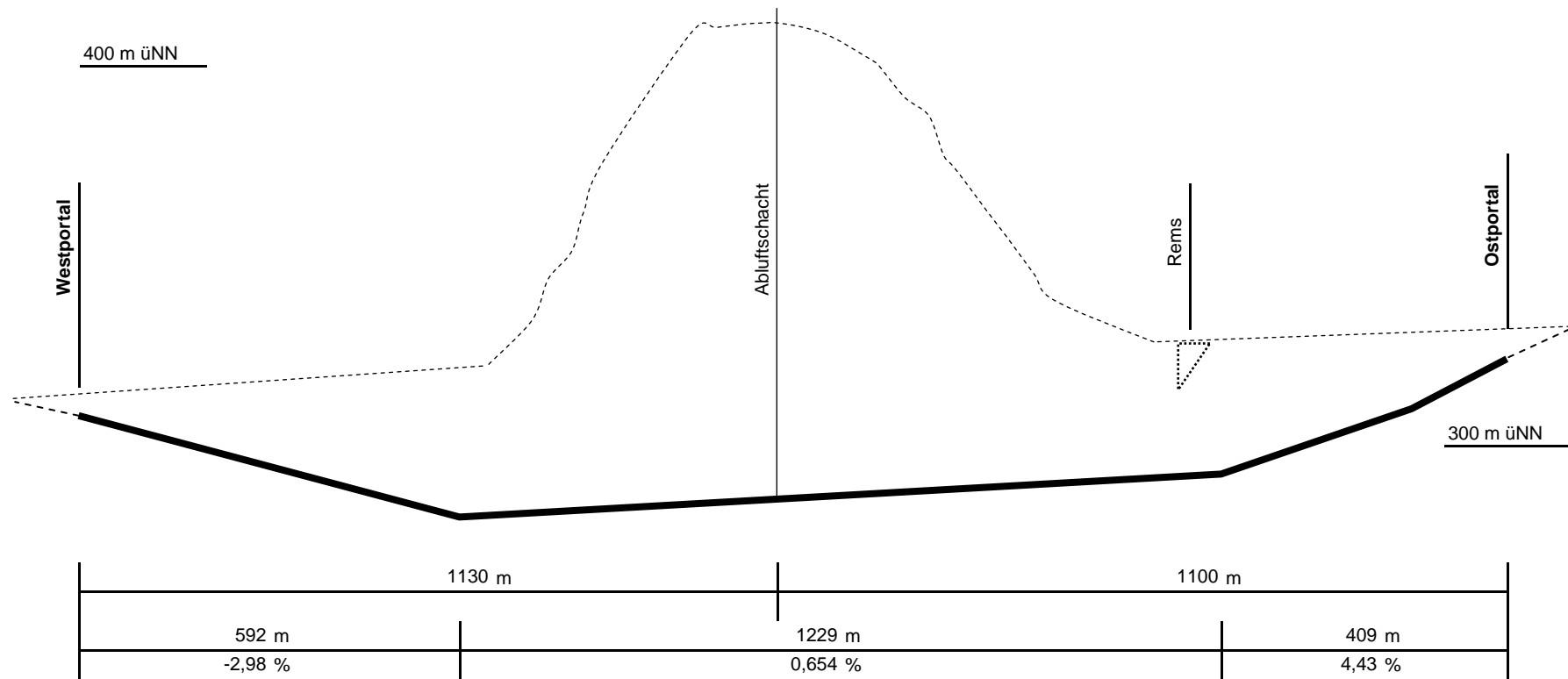
Auslegung der Tunnellüftung

Abb. 14 Schemaskizze des Tunnels zur Berechnung des Frischluftbedarfs

Tab. 1 Fahrzeugabgase bei einseitig stockendem Verkehr im Tunnel

Tab. 2 Fahrzeugabgase bei ungehindert fließendem Verkehr im Tunnel

Schemaskizze des Tunnels zur Berechnung des Frischluftbedarfs nach RABT 2006



Berechnung der Luftmenge für den Regelbetrieb der Lüftung, für eine Röhre mit Gegenverkehr, für das Prognosejahr 2015, nach RABT 2006		flüssiger Verkehr			stockender Verkehr			Summen
		in FR Aalen			in FR Stuttgart			
		FR-Ost	FR-Ost	FR-Ost	FR-West	FR-West	FR-West	
von	km	1+280,00	1+872,00	3+101,00	1+280,00	1+872,00	3+101,00	2.230,00
bis	km	1+872,00	3+101,00	3+510,00	1+872,00	3+101,00	3+510,00	
Länge	m	592,00	1.229,00	409,00	592,00	1.229,00	409,00	
mittlere Gradiente	%	-2,98	0,654	4,43	2,98	-0,654	-4,43	
mittlere Höhenlage der Fahrbahn üNN ca:	m		300			300		
DTV-Wert in 2015:	Fz/d	19600						
Anteil SLV:	%	8,5						
Dieselanteil bei Pkw (hoch geschätzt):	%	50,0						
Verkehrsgeschwindigkeit (wird durch die Lkw bestimmt):	km/h	60			10			
Spv-Prognose:	Fz/h	1078			1078			2156
Pkw-Prognose:	Fz/h	986			986			1973
Dkw-Prognose:	Fz/h	493			493			986
Lkw-Prognose:	Fz/h	92			92			183
Anzahl Otto-Pkw im Tunnel:	Pkw	4,9	10,1	3,4	29,2	60,6	20,2	128
Anzahl Diesel-Pkw im Tunnel:	Dkw	4,9	10,1	3,4	29,2	60,6	20,2	128
Anzahl 40t-Lkw im Tunnel:	Lkw	0,9	1,9	0,6	5,4	11,3	3,7	24
Anzahl aller Fz im Tunnel:	Fz	10,6	22,1	7,3	63,8	132,5	44,1	280
CO-Gas-Emission von Otto-Pkw:	m ³ /h	0,12	0,37	0,31	0,74	1,35	0,33	3,2
CO-Gas-Emission von Diesel-Pkw:	m ³ /h	0,05	0,10	0,05	0,13	0,27	0,09	0,7
CO-Gas-Emission von 40t Lkw zu 75% beladen = 30 t:	m ³ /h	0,03	0,11	0,05	0,19	0,30	0,06	0,7
Summe der CO-Gas-Emission:	m ³ /h	0,21	0,58	0,41	1,06	1,91	0,48	4,6
zulässige CO-Gas Konzentration:	ppm	70	70	70	70	70	70	
erf. Luftmenge bei 5 ppm CO-Gas-Vorbelastung:	m ³ /s	0,88	2,47	1,77	4,53	8,17	2,06	19,9
Dieseleruß-Emission von Otto-Pkw:	m ² /h	7,3	15,2	5,0	15,5	32,1	10,7	
Dieseleruß-Emission von Diesel-Pkw:	m ² /h	34,7	96,4	46,7	74,0	125,0	41,6	
Dieseleruß-Emission von 40t-Lkw:	m ² /h	34,3	82,0	37,7	147,6	247,4	70,0	
Summe der Dieseleruß-Emission:	m ² /h	76,3	193,6	89,5	237,1	404,6	122,3	
zulässige Lufttrübung:	1/m	0,007	0,007	0,007	0,007	0,007	0,007	
erforderliche Luftmenge bei 0,001 Trübungsvorbelastung:	m ³ /s	3,5	9,0	4,1	11,0	18,7	5,7	
Im ungünstigsten Fall erforderliche Luftmenge:	m ³ /s		16,6			35,4		52,0

Berechnung der Luftmenge für den Regelbetrieb der Lüftung, für eine Röhre mit Gegenverkehr, für das Prognosejahr 2015, nach RABT 2006		flüssiger Verkehr			flüssiger Verkehr			Summen
		in FR Aalen			in FR Stuttgart			
		FR-Ost	FR-Ost	FR-Ost	FR-West	FR-West	FR-West	
von	km	1+280,00	1+872,00	3+101,00	1+280,00	1+872,00	3+101,00	2.230,00
bis	km	1+872,00	3+101,00	3+510,00	1+872,00	3+101,00	3+510,00	
Länge	m	592,00	1.229,00	409,00	592,00	1.229,00	409,00	
mittlere Gradiente	%	-2,98	0,654	4,43	2,98	-0,654	-4,43	
mittlere Höhenlage der Fahrbahn üNN ca:	m		300			300		
DTV-Wert in 2015:	Fz/d	19600						
Anteil SLV:	%	8,5						
Dieselanteil bei Pkw (hoch geschätzt):	%	50,0						
Verkehrsgeschwindigkeit (wird durch die Lkw bestimmt):	km/h	60			60			
Spv-Prognose:	Fz/h	1078			1078			2156
Pkw-Prognose:	Fz/h	986			986			1973
Dkw-Prognose:	Fz/h	493			493			986
Lkw-Prognose:	Fz/h	92			92			183
Anzahl Otto-Pkw im Tunnel:	Pkw	4,9	10,1	3,4	4,9	10,1	3,4	37
Anzahl Diesel-Pkw im Tunnel:	Dkw	4,9	10,1	3,4	4,9	10,1	3,4	37
Anzahl 40t-Lkw im Tunnel:	Lkw	0,9	1,9	0,6	0,9	1,9	0,6	7
Anzahl aller Fz im Tunnel:	Fz	10,6	22,1	7,3	10,6	22,1	7,3	80
CO-Gas-Emission von Otto-Pkw:	m ³ /h	0,12	0,37	0,31	0,33	0,29	0,06	1,5
CO-Gas-Emission von Diesel-Pkw:	m ³ /h	0,05	0,10	0,05	0,06	0,09	0,03	0,4
CO-Gas-Emission von 40t Lkw zu 75% beladen = 30 t:	m ³ /h	0,03	0,11	0,05	0,08	0,08	0,02	0,4
Summe der CO-Gas-Emission:	m ³ /h	0,21	0,58	0,41	0,46	0,47	0,11	2,2
zulässige CO-Gas Konzentration:	ppm	70	70	70	70	70	70	
erf. Luftmenge bei 5 ppm CO-Gas-Vorbelastung:	m ³ /s	0,88	2,47	1,77	1,98	2,00	0,48	9,6
Dieseleruß-Emission von Otto-Pkw:	m ² /h	7,3	15,2	5,0	7,3	15,2	5,0	
Dieseleruß-Emission von Diesel-Pkw:	m ² /h	34,7	96,4	46,7	57,7	83,1	23,6	
Dieseleruß-Emission von 40t-Lkw:	m ² /h	34,3	81,9	37,7	52,7	73,0	22,4	
Summe der Dieseleruß-Emission:	m ² /h	76,3	193,4	89,5	117,6	171,3	50,9	
zulässige Lufttrübung:	1/m	0,005	0,005	0,005	0,005	0,005	0,005	
erforderliche Luftmenge bei 0,001 Trübungsvorbelastung:	m ³ /s	5,3	13,4	6,2	8,2	11,9	3,5	
Im ungünstigsten Fall erforderliche Luftmenge:	m ³ /s		24,9			23,6		48,5

Anlage C

Kontrolle der Luftströmung

Abb. 15 Kontrolle der Luftströmung und der Konzentrationsverteilung

Abb. 16 Beispiel Tunnelströmung mit stufenlos drehzahlregelbaren STV

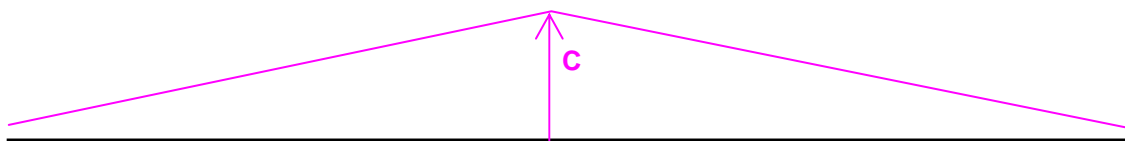
Kontrolle der Luftströmung und des Konzentrationsanstieges

Konzentrationsprofil der Schadstoffe bei einer symmetrischen Luftströmung im Tunnel:

Symmetrische Zuströmung der Frischluft von den beiden Portalen zum Abluftschacht, dadurch symmetrischer Konzentrationsanstieg der Schadstoffe von den Portalen bis zur Tunnelmitte hin und Absaugung über mehrere Klappen in Tunnelmitte als Abluft-Halbquerlüftung (AL-HQ). Durch Überlüftung bleiben die Konzentration C immer unter den zulässigen Sollwerten von 100%, z. B.

$V = 100.000 \text{ m}^3/\text{h}$ im linken Tunnelast
 $v = 0,56 \text{ m/s}$ im linken Tunnelast
 $C = 86,6 \%$ im linken Tunnelast

$V = 100.000 \text{ m}^3/\text{h}$ im rechten Tunnelast
 $v = -0,56 \text{ m/s}$ im rechten Tunnelast
 $C = 86,6 \%$ im rechten Tunnelast

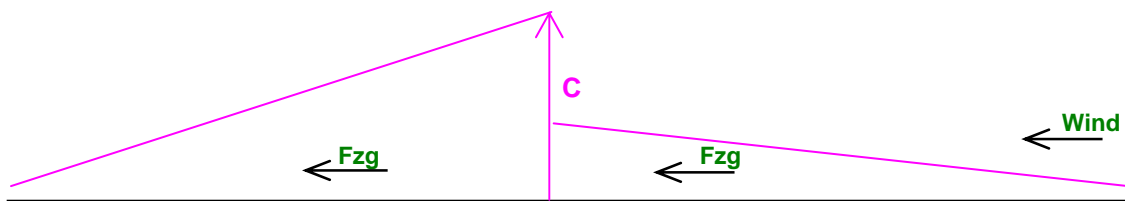


Konzentrationsprofil der Schadstoffe bei einer durch Fahrzeuge oder Wind gestörten Strömung:

Asymmetrische Zuströmung der Frischluft von den beiden Portalen zum Abluftschacht, verursacht durch äußeren Windeinfluß oder durch einseitige Fahrzeugbewegungen im Tunnel, dadurch sehr ungleiche Luftmengen und Konzentrationsverteilungen der Schadstoffe im Tunnel, z. B.

$V = 65.000 \text{ m}^3/\text{h}$ im linken Tunnelast
 $v = 0,37 \text{ m/s}$ im linken Tunnelast
 $C = 133 \%$ im linken Tunnelast

$V = 135.000 \text{ m}^3/\text{h}$ im rechten Tunnelast
 $v = -0,76 \text{ m/s}$ im rechten Tunnelast
 $C = 64,2 \%$ im rechten Tunnelast

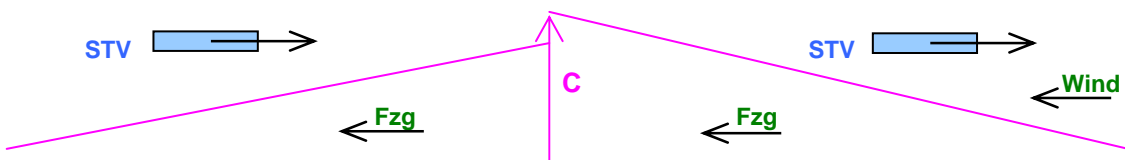


Konzentrationsprofil der Schadstoffe bei einer durch Strahlventilatoren kontrollierten Strömung:

Annähernd symmetrische Zuströmung der Frischluft von den Portalen zum Abluftschacht, kontrolliert durch den stetigen Einsatz von stufenlos regelbaren Strahlventilatoren, dadurch sehr ausgeglichene Luftmengen und Konzentrationsverteilungen der Schadstoffe im Tunnel, z. B.

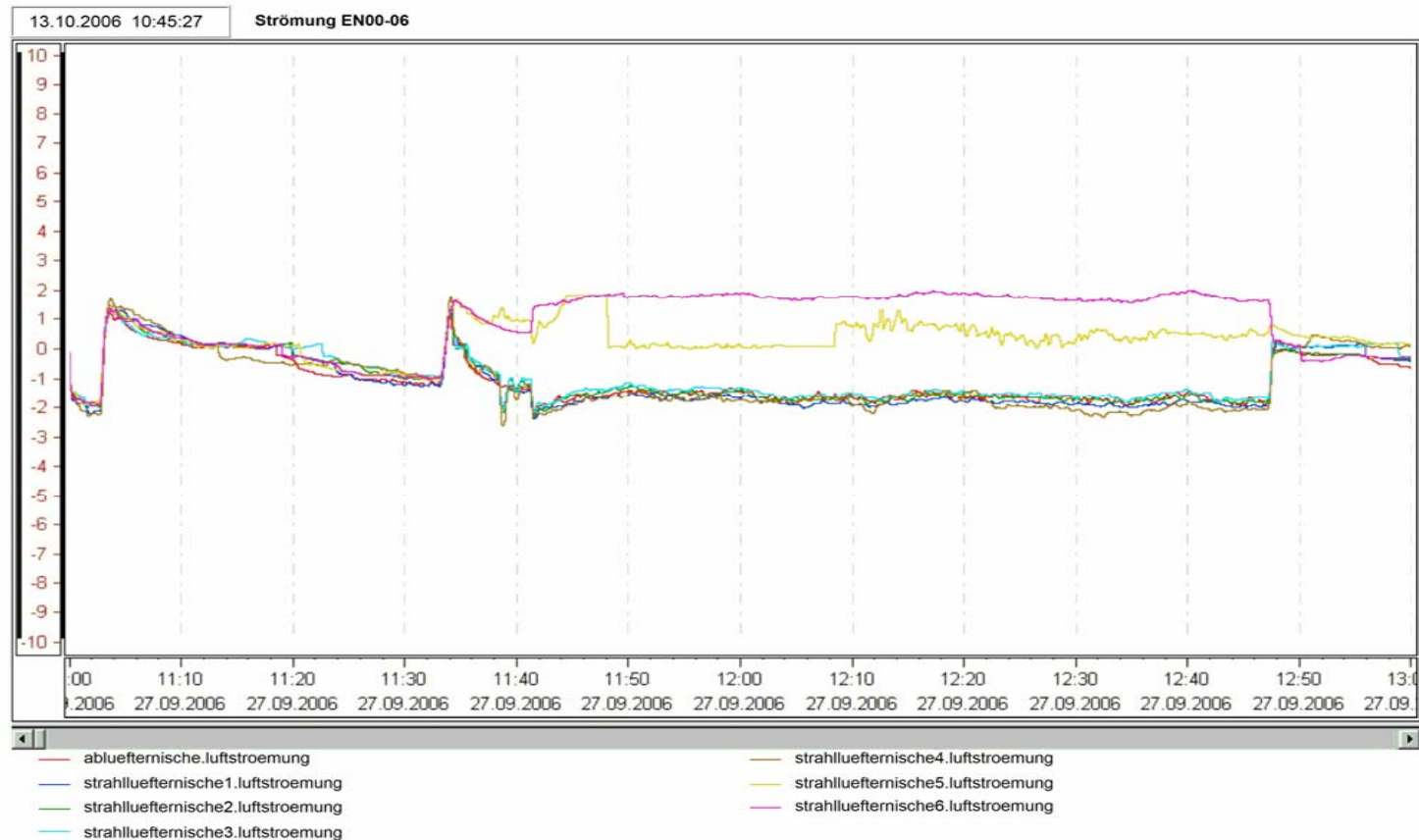
$V = 110.000 \text{ m}^3/\text{h}$ im linken Tunnelast
 $v = 0,62 \text{ m/s}$ im linken Tunnelast
 $C = 78,7 \%$ im linken Tunnelast

$V = 90.000 \text{ m}^3/\text{h}$ im rechten Tunnelast
 $v = -0,51 \text{ m/s}$ im rechten Tunnelast
 $C = 96,2 \%$ im rechten Tunnelast



Der Einsatz der Strahlventilatoren erfordert eine sehr schnelle und präzise Regelung der Luftströmung, unter Einbeziehung der geförderten Kaminabluftmenge und der Verkehrsdaten aus dem Tunnel. In beiden Portalen muß die Strömung immer tünneleinwärts gerichtet sein, um den Austritt von Schadstoffen aus den Portalen ins Freie zu verhindern.

Luftströmung in einer Tunnelabluftanlage mit stufenlos drehzahlregelbaren Strahlventilatoren



Die obere Kurve zeigt die stabile Strömung im rechten Tunnelast. Die Strahlventilatoren waren dort von 11:42 bis 12:48 aktiviert.
Die mittlere Kurve zeigt die Strömung am Brandort. Dieser lag nicht in Tunnelmitte, sondern in 2/5-Tunnellängenabstand vom linken Portal.
Die unteren Kurven zeigen die stabile Strömung im linken Tunnelast, die von den STV symmetrisch zur oberen Kurve eingeregelt wurde.

Anlage D

Abluftfilterauslegung

Tab. 3 Feinstaub PM_{10} in der Kaminabluft, mit und ohne Filter

Tab. 4 Stickoxid NO_x in der Kaminabluft, mit und ohne Filter

Feinstaubkonzentration (PM₁₀) in der Kaminabluft

PM₁₀ Feinstaub

PM ₁₀ -Emission im Tunnel:	660 kg/a	gem. Schadstoffgutachten (Lohmeyer)
DTV-Wert (2010):	19600 Kfz/d	gem. Verkehrsgutachten (Brenner+Münnich)
Tunnellänge:	2,23 km	
tägliche Fahrtstrecke:	43708 km/d	gesamte Fahrtstrecke aller Kfz im Tunnel
Feinstaubmenge pro Kfz:	41,4 mg/km	gemittelter Wert für Kollektiv aus Lkw und Pkw
Betriebszeit von 05:00 bis 20:00 Uhr:	15 h/d	gem. Lüftungsgutachten (SHB)

Planfeststellung:

planfestgestellte Abluftmenge:	300 m ³ /s	mit 5,53 m Blende, gem. Lüftungsgutachten (SHB)
Staubkonzentration in der Luft (2006):	36 µg/m ³	Jahresmittelwert, Lorcher Straße, gem. UM-LBW
Anstieg der Staubkonzentration:	0,11 mg/m ³	Staubanreicherung der Luft im Tunnel
mittlere Eintrittskonzentration:	0,15 mg/m ³	Staubgehalt der ungefilterten Abluft
mittlere Austrittskonzentration:	0,15 mg/m ³	Staubkonzentration am Kaminaustritt, ungefiltert
mittlere Strahlkonzentration:	12,0 µg/m ³	mittlere Endkonzentration auf Quellhöhe
mittlere Endkonzentration:	0,95 µg/m ³	mittlere Endkonzentration im Aufsetzgebiet
Relation zum Grenzwert (JMW):	2,4 %	wegen Windeinfluß zeitlich und lokal sehr begrenzt

Alle mittleren Konzentrationen ergeben sich aus dem über 15 Stunden gemittelten Verkehrsaufkommen

Alternative:

alternative Abluftmenge:	56 m ³ /s	mit 2,44 m Klappdüse (für Entrauchung im Brandfall)
Staubkonzentration in der Luft (2006):	36 µg/m ³	Jahresmittelwert, Lorcher Straße, gem. UM-LBW
Anstieg der Staubkonzentration:	598 µg/m ³	Staubanreicherung der Luft im Tunnel
mittlere Eintrittskonzentration:	634 µg/m ³	Staubgehalt der ungefilterten Abluft
Filterwirkungsgrad für PM ₁₀ :	0,99	Mindestwirkungsgrad des ECOVAC-Nanofilters
mittlere Austrittskonzentration:	6,34 µg/m ³	Staubkonzentration am Kaminaustritt, gefiltert
mittlere Strahlkonzentration:	0,64 µg/m ³	mittlere Endkonzentration auf Quellhöhe
mittlere Endkonzentration:	0,06 µg/m ³	mittlere Endkonzentration im Aufsetzgebiet
Relation zum Grenzwert (JMW):	0,15 %	wegen Windeinfluß zeitlich und lokal sehr begrenzt

Alle mittleren Konzentrationen ergeben sich aus dem über 15 Stunden gemittelten Verkehrsaufkommen

Grenzwert:

zulässiger Jahresmittelwert seit 2005:	40 µg/m ³	Grenzwert (JMW) für PM ₁₀ /Luft
zulässiger Tagesmittelwert seit 2005:	50 µg/m ³	(TMW) für maximal 35 Überschreitungen pro Jahr

Stickoxidkonzentration (NO_x) in der Kaminabluft

NO_x-Gase (NO + NO₂)

NO _x -Emission im Tunnel:	16,7 kg/d	für AO2 mit 8% SLV in 2015
DTV-Wert (2010):	19600 Kfz/d	gem. Verkehrsgutachten (Brenner+Münnich)
Tunnellänge:	2,23 km	
mittlere Fahrtgeschwindigkeit:	60 km/h	für Lkw gelten 60 km/h, für Pkw 80 km/h (SHB)
mittlere Anzahl Kfz im Tunnel:	97 Kfz	während des Abluftbetriebes
NO _x -Gase pro Kfz:	0,38 g/km	gemittelter Wert für Kollektiv aus Lkw und Pkw
Betriebszeit von 05:00 bis 20:00 Uhr:	15 h/d	gem. Lüftungsgutachten (SHB)

Planfeststellung:

planfestgestellte Abluftmenge:	300 m ³ /s	mit 5,53 m Blende, gem. Lüftungsgutachten (SHB)
NO _x -Konzentration in der Luft (2006):	80 µg/m ³	Jahresmittelwert, Lorcher Straße, gem. UM-LBW
Anstieg der NO _x -Konzentration:	1,03 mg/m ³	Abgasanreicherung der Luft im Tunnel
mittlere Eintrittskonzentration:	1,11 mg/m ³	NO _x -Gehalt der ungefilterten Abluft
mittlere Austrittskonzentration:	1,11 mg/m ³	Gaskonzentration am Kaminaustritt, ungefiltert
mittlere Strahlkonzentration:	88,5 µg/m ³	mittlere Strahlkonzentration auf Quellhöhe
mittlere Endkonzentration:	7,1 µg/m ³	mittlere Endkonzentration im Aufsetzgebiet
Relation zum Grenzwert (JMW):	17,8 %	wegen Windeinfluß zeitlich und lokal sehr begrenzt

Alle mittleren Konzentrationen ergeben sich aus dem über 15 Stunden gemittelten Verkehrsaufkommen

Alternative:

alternative Abluftmenge:	56 m ³ /s	mit 2,44 m Klappdüse (für Entrauchung im Brandfall)
NO _x -Konzentration in der Luft (2006):	80,0 µg/m ³	Jahresmittelwert, Lorcher Straße, gem. UM-LBW
Anstieg der NO _x -Konzentration:	5,52 mg/m ³	Abgasanreicherung der Luft im Tunnel
mittlere Eintrittskonzentration:	5,60 mg/m ³	NO _x -Gehalt der ungefilterten Abluft
Filterwirkungsgrad für NO _x :	0,97	mittlerer Wirkungsgrad des ECOVAC-Sorptionfilters
mittlere Austrittskonzentration:	168 µg/m ³	Gaskonzentration am Kaminaustritt, gefiltert
mittlere Strahlkonzentration:	16,8 µg/m ³	mittlere Strahlkonzentration auf Quellhöhe
mittlere Endkonzentration:	1,7 µg/m ³	mittlere Endkonzentration im Aufsetzgebiet
Relation zum Grenzwert (JMW):	4,3 %	wegen Windeinfluß zeitlich und lokal sehr begrenzt

Alle mittleren Konzentrationen ergeben sich aus dem über 15 Stunden gemittelten Verkehrsaufkommen

Grenzwert:

zulässiger Jahresmittelwert ab 2010:	40 µg/m ³	Grenzwert (JMW) für NO _x /Luft
zulässiger Tagesmittelwert ab 2010:	50 µg/m ³	(TMW) für maximal 35 Überschreitungen pro Jahr

Anlage E

Abluftkaminvarianten

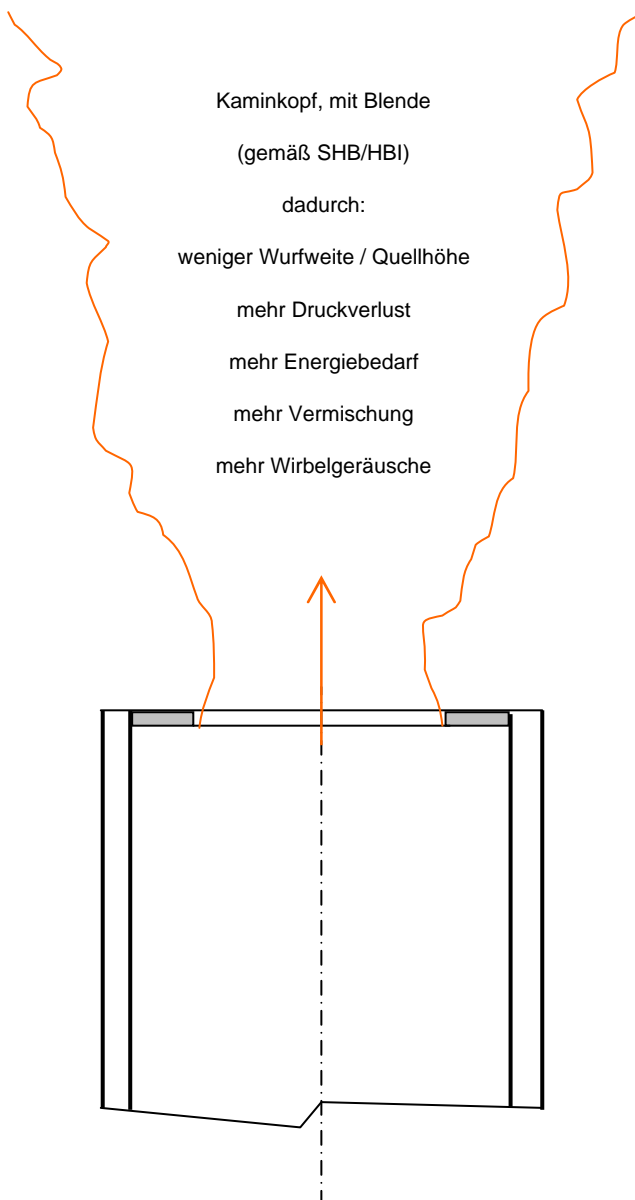
**Schadstoffkonzentration im Freistrahls bei
gereinigter und bei ungereinigter Abluft**

Schadstoff: Feinstaub PM₁₀

Gestaltung des Ausblaskopfes am Kamin

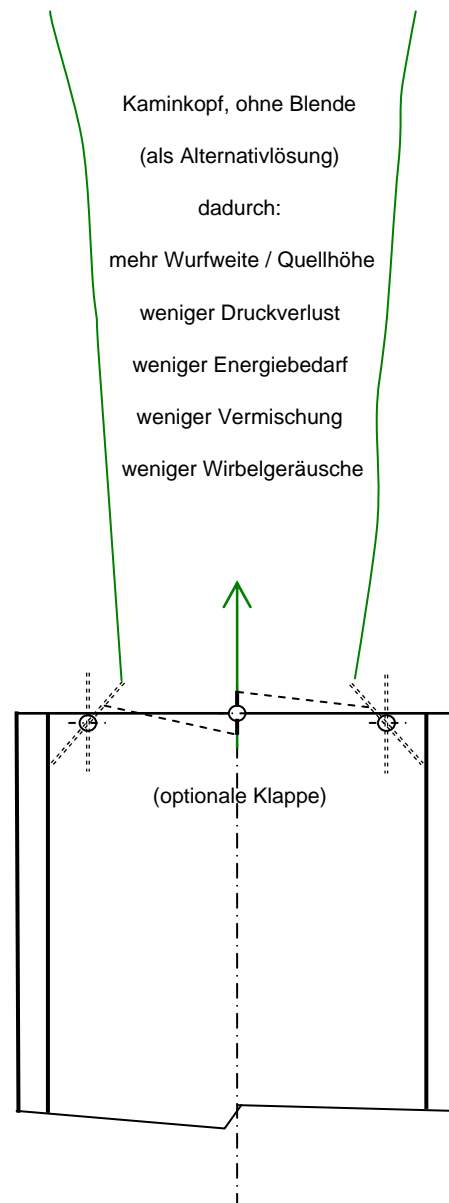
Amtsentswurf mit Blende

(Drossel)



Alternative ohne Blende

(Düse)



Option:

Im Kaminkopf können ggf. zwei verstellbare Leitbleche eingebaut werden, um den Düsenquerschnitt an die jeweilige Luftmenge im Regellüftungsbetrieb und im Brandfallentrauchungsbetrieb anzupassen. Der Stellmotor kann außen am Kaminfuß aufgestellt und per Kette mit der Klappe verbunden werden.

PM₁₀-Konzentration im ungereinigten Abluftstrahl

Schematische Darstellung der Luftführung bei einem Tunnel mit nur einer Röhre

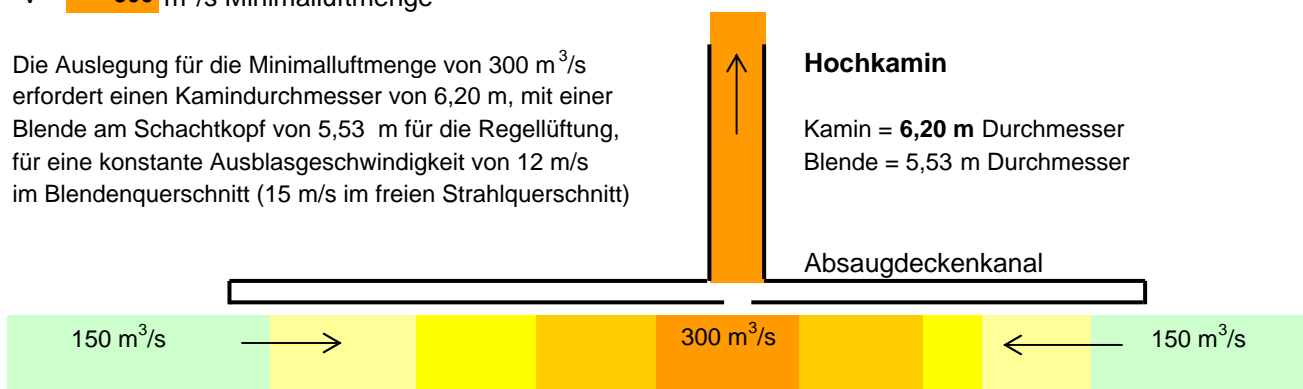
(vereinfachtes Luftschema, ohne Einbauten)

A-1: Amts-Entwurf mit 6,2 m Abluftkamin und 5,53 m Blende bei 300 m³/s Minimalluftmenge

Eine Röhre für Gegenverkehr mit Mittenabsaugung (Ablufthalbquerlüftung AL-HQ) und Abluftkamin mit Blende

V = 300 m³/s Minimalluftmenge

Die Auslegung für die Minimalluftmenge von 300 m³/s erfordert einen Kamindurchmesser von 6,20 m, mit einer Blende am Schachtkopf von 5,53 m für die Regellüftung, für eine konstante Ausblasgeschwindigkeit von 12 m/s im Blendenquerschnitt (15 m/s im freien Strahlquerschnitt)



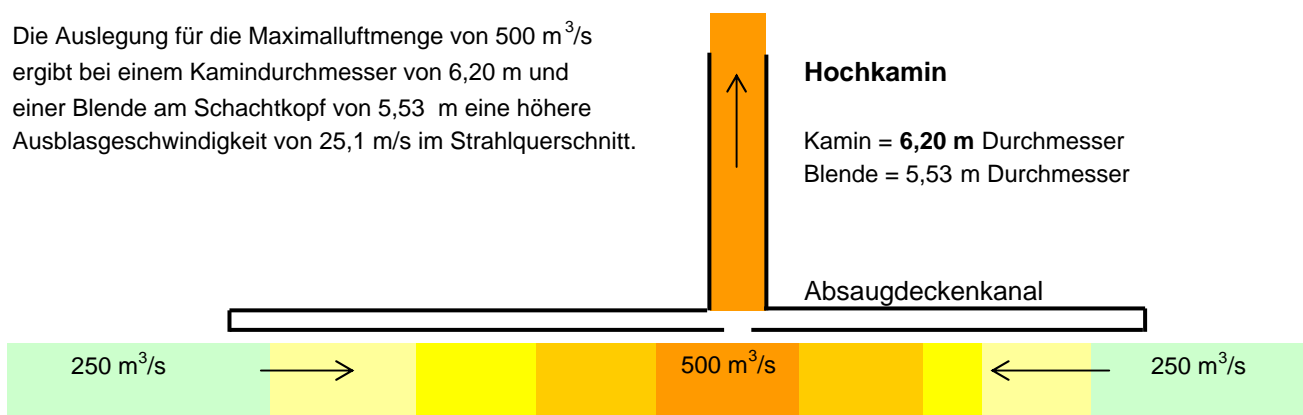
Hinweis: Die Strömungsgeschwindigkeit im Tunnel wird stufenweise mit Strahlventilatoren beeinflusst. Im Brandfall erfolgt die Entrauchung über Klappen im Deckenkanal und mit zwei Brandgasventilatoren.

A-2: Amts-Entwurf mit 6,2 m Abluftkamin und 5,53 m Blende, bei 500 m³/s Maximalluftmenge

Eine Röhre für Gegenverkehr mit Mittenabsaugung (Ablufthalbquerlüftung AL-HQ) und Abluftkamin mit Blende

V = 500 m³/s Maximalluftmenge

Die Auslegung für die Maximalluftmenge von 500 m³/s ergibt bei einem Kamindurchmesser von 6,20 m und einer Blende am Schachtkopf von 5,53 m eine höhere Ausblasgeschwindigkeit von 25,1 m/s im Strahlquerschnitt.



Hinweis: Die Strömungsgeschwindigkeit im Tunnel wird stufenweise mit Strahlventilatoren beeinflusst. Im Brandfall erfolgt die Entrauchung über Klappen im Deckenkanal und mit zwei Brandgasventilatoren.

PM₁₀-Konzentration im ungereinigten Abluftstrahl

Größe der Feinstaubkonzentration PM₁₀ im Strahlendquerschnitt

(Die Konzentrationen zeigen die Endkonzentrationen von PM₁₀ im konisch erweiterten Abluftstrahl)

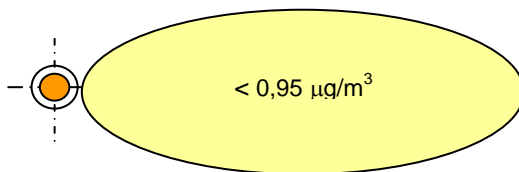
A-1: Amts-Entwurf mit 6,2 m Abluftkamin und 5,53 m Blende bei 300 m³/s Minimalluftmenge

Eine Röhre für Gegenverkehr mit Mittenabsaugung (Ablufthalbquerlüftung AL-HQ) und Abluftkamin mit Blende

$$V = 300 \text{ m}^3/\text{s} \quad C_A = 0,95 \text{ } \mu\text{g}/\text{m}^3$$

$$d = 6,20 \text{ m}$$

$$d_B = 5,53 \text{ m}$$



Hochkamin mit Blende

A-2: Amts-Entwurf mit 6,2 m Abluftkamin und 5,53 m Blende, bei 500 m³/s Maximalluftmenge

Eine Röhre für Gegenverkehr mit Mittenabsaugung (Ablufthalbquerlüftung AL-HQ) und Abluftkamin mit Blende

$$V = 500 \text{ m}^3/\text{s} \quad C_A = 0,21 \text{ } \mu\text{g}/\text{m}^3$$

$$d = 6,20 \text{ m}$$

$$d_B = 5,53 \text{ m}$$



Hochkamin mit Blende

PM₁₀-Konzentration im ungereinigten Abluftstrahl

Schematische Darstellung der Luftführung bei einem Tunnel mit zwei Röhren

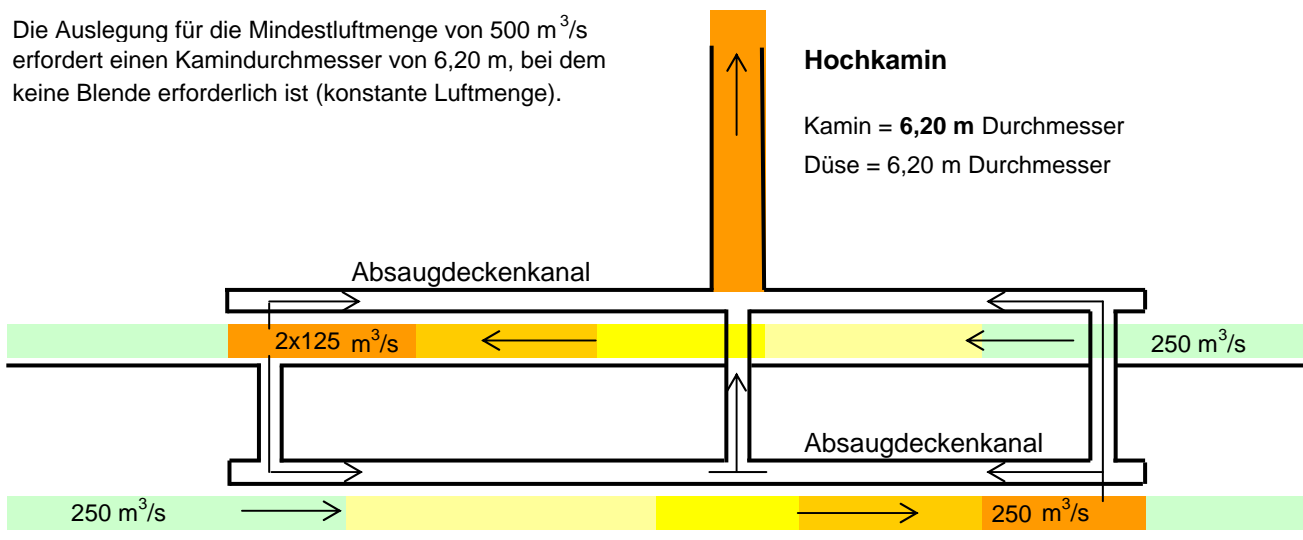
(vereinfachtes Luftschema, ohne Einbauten)

A-3: Amts-Entwurf mit 6,2 m Abluftkamin ohne Blende, bei 500 m³/s Regelluftmenge für 2 Röhren

Zwei Röhren für Richtungsverkehr mit Portalabsaugungen (Längslüftung LL) und Abluftkamin mit Blende

$V = 500 \text{ m}^3/\text{s}$ Diese Luftmenge ist an den Portalen abzusaugen, um die aus dem Tunnel ungehindert zuströmende Luft mit ihrer Schadstofffracht möglichst vollständig zu erfassen

Die Auslegung für die Mindestluftmenge von 500 m³/s erfordert einen Kamindurchmesser von 6,20 m, bei dem keine Blende erforderlich ist (konstante Luftmenge).



Hinweis: Die Strömungsgeschwindigkeit im Tunnel wird stufenweise mit Strahlventilatoren beeinflusst. Bei zwei Röhren erfolgt die Entrauchung nicht mehr über den Kamin, sondern nur mit den Strahlventilatoren (LL).

PM₁₀-Konzentration im ungereinigten Abluftstrahl

Größe der Feinstaubkonzentration PM₁₀ im Strahlendquerschnitt

(Die Konzentrationen zeigen die Endkonzentrationen von PM₁₀ im konisch erweiterten Abluftstrahl)

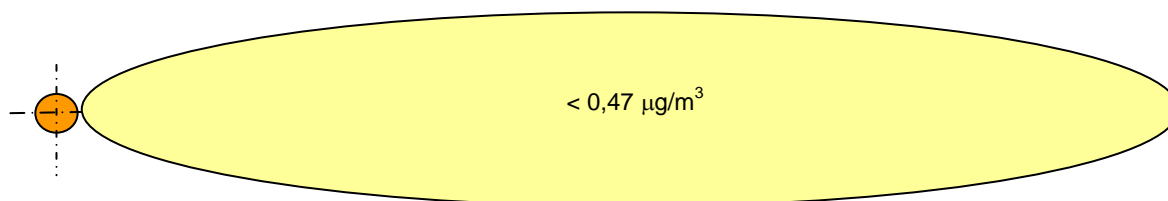
A-3: Amts-Entwurf mit 6,2 m Abluftkamin ohne Blende, bei 500 m³/s Regelluftmenge für 2 Röhren

Zwei Röhren für Richtungsverkehr mit Portalabsaugungen (Längslüftung LL) und Abluftkamin mit Blende

$$V = 500 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$C_A = 0,47 \text{ } \mu\text{g}/\text{m}^3$$

$$d = 6,20 \text{ m}$$



Hochkamin mit Düse

PM₁₀-Konzentration im gereinigten Abluftstrahl

Schematische Darstellung der Luftführung bei einem Tunnel mit nur einer Röhre

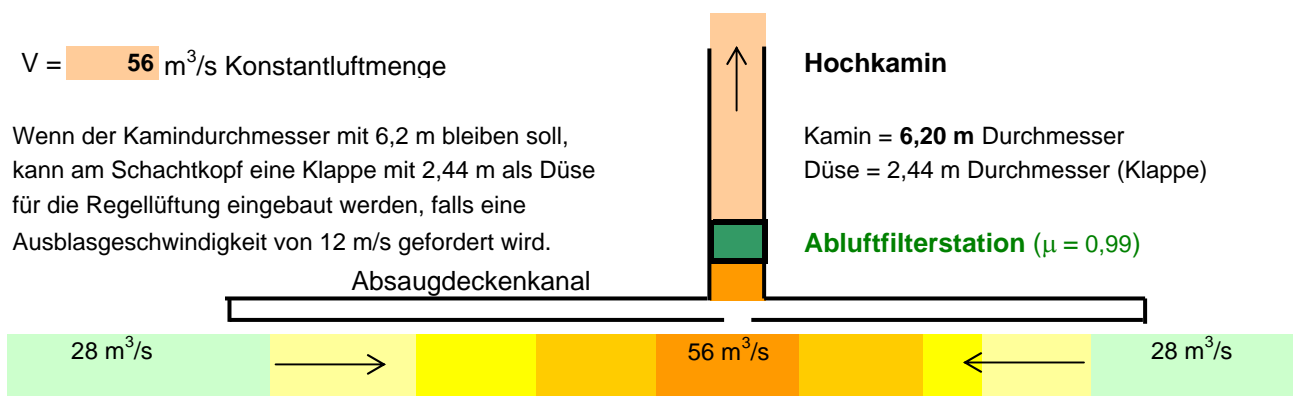
(vereinfachtes Luftschema, ohne Einbauten)

V-1: Alternative zum Amts-Entwurf, mit 6,2 m Abluftkamin, Luftfilter und 2,44 m Klappe

Eine Röhre für Gegenverkehr mit Mittenabsaugung (AL-HQ) und Abluftkamin mit Luftfilter, Düse und Klappe

$V = 56 \text{ m}^3/\text{s}$ Konstantluftmenge

Wenn der Kamindurchmesser mit 6,2 m bleiben soll, kann am Schachtkopf eine Klappe mit 2,44 m als Düse für die Regellüftung eingebaut werden, falls eine Ausblasgeschwindigkeit von 12 m/s gefordert wird.



Hinweise:

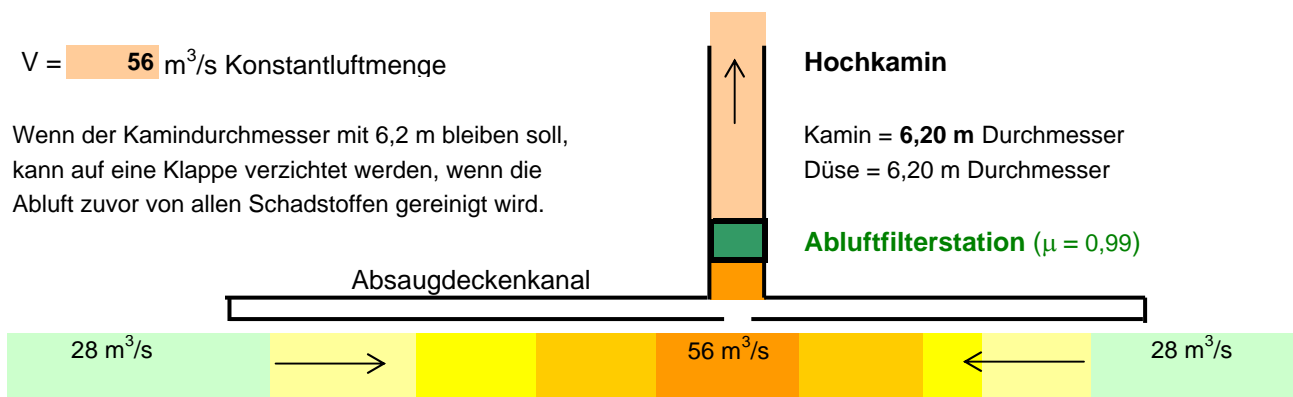
Die Strömungsgeschwindigkeit im Tunnel wird mit stufenlos regelbaren Strahlventilatoren kontrolliert. Der Abluftfilter enthält Filterpatronen mit einem Filtermedium aus nanofinen, synthetischen Fasern und Zellulosefasern, zur Abscheidung von 99,999% Feinstaub bei allen Feinstäuben > PM_{0,5} (> 0,5 μm). Im Brandfall erfolgt die Entrauchung über Klappen im Deckenkanal und mit zwei Brandgasventilatoren.

V-2: Alternative zum Amts-Entwurf, mit 6,2 m Abluftkamin und Luftfilter, ohne Klappe

Eine Röhre für Gegenverkehr mit Mittenabsaugung (AL-HQ) und Abluftkamin mit Luftfilter und Düse

$V = 56 \text{ m}^3/\text{s}$ Konstantluftmenge

Wenn der Kamindurchmesser mit 6,2 m bleiben soll, kann auf eine Klappe verzichtet werden, wenn die Abluft zuvor von allen Schadstoffen gereinigt wird.



Hinweise:

Die Strömungsgeschwindigkeit im Tunnel wird mit stufenlos regelbaren Strahlventilatoren kontrolliert. Der Abluftfilter enthält Filterpatronen mit einem Filtermedium aus nanofinen, synthetischen Fasern und Zellulosefasern, zur Abscheidung von 99,999% Feinstaub bei allen Feinstäuben > PM_{0,5} (> 0,5 μm). Im Brandfall erfolgt die Entrauchung über Klappen im Deckenkanal und mit zwei Brandgasventilatoren.

PM₁₀-Konzentration im gereinigten Abluftstrahl

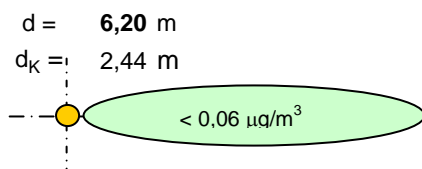
Größe der Feinstaubkonzentration PM₁₀ im Strahlendquerschnitt

(Die Konzentrationen zeigen die Endkonzentrationen von PM₁₀ im konisch erweiterten Abluftstrahl)

V-1: Alternative zum Amts-Entwurf, mit 6,2 m Abluftkamin, Luftfilter und Klappe 2,44 m

Eine Röhre für Gegenverkehr mit Mittenabsaugung (AL-HQ) und Abluftkamin mit Luftfilter, Düse und Klappe

$$V = 56 \text{ m}^3/\text{s} \quad C_A = 0,06 \text{ } \mu\text{g}/\text{m}^3$$

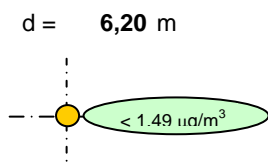


Hochkamin mit Düse und Abluftfilter
Düse mit Klappe (im Brandfall geöffnet)

V-2: Alternative zum Amts-Entwurf, mit 6,2 m Abluftkamin und Luftfilter, ohne Klappe

Eine Röhre für Gegenverkehr mit Mittenabsaugung (AL-HQ) und Abluftkamin mit Luftfilter und Düse

$$V = 56 \text{ m}^3/\text{s} \quad C_A = 1,49 \text{ } \mu\text{g}/\text{m}^3$$



Hochkamin mit Düse und Abluftfilter

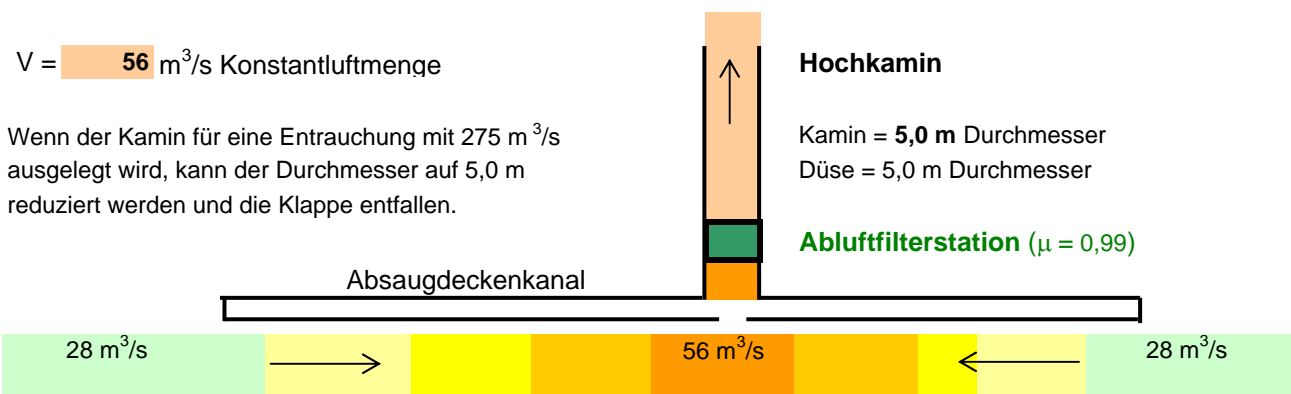
PM₁₀-Konzentration im gereinigten Abluftstrahl

Schematische Darstellung der Luftführung bei einem Tunnel mit nur einer Röhre

(vereinfachtes Luftschema, ohne Einbauten)

V-3: Alternative zum Amts-Entwurf, mit 5,0 m Abluftkamin und Luftfilter, ohne Klappe

Eine Röhre für Gegenverkehr mit Mittenabsaugung (AL-HQ) und Abluftkamin mit Luftfilter und Düse

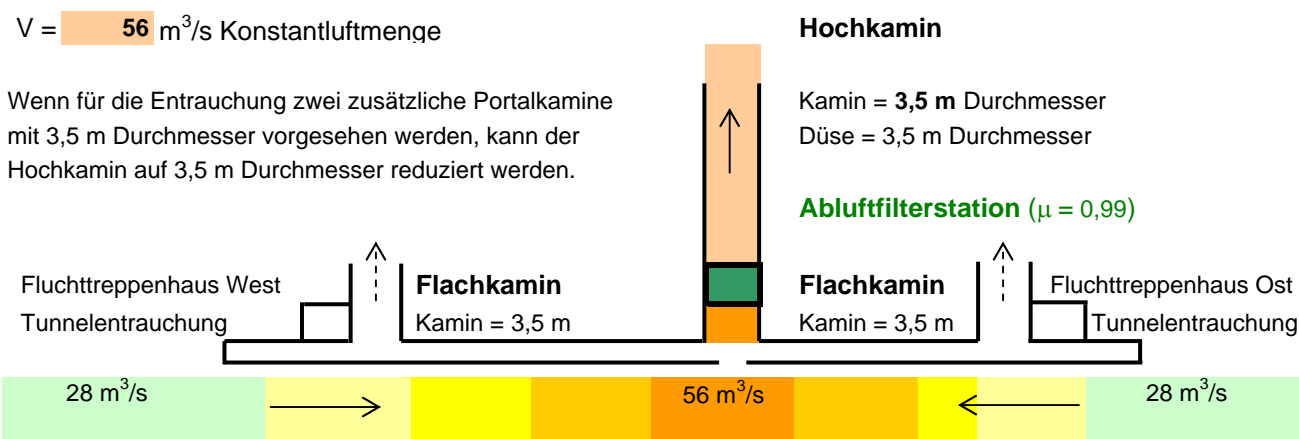


Hinweise:

Die Strömungsgeschwindigkeit im Tunnel wird mit stufenlos regelbaren Strahlventilatoren kontrolliert. Der Abluftfilter enthält Filterpatronen mit einem Filtermedium aus nanofeinen, synthetischen Fasern und Zellulosefasern, zur Abscheidung von 99,999% Feinstaub bei allen Feinstäuben > PM_{0,5} (> 0,5 μm). Im Brandfall erfolgt die Entrauchung über Klappen im Deckenkanal und mit zwei Brandgasventilatoren.

V-4: Alternative zum Amts-Entwurf, mit drei 3,5 m Abluftkaminen und einem zentralen Luftfilter

Eine Röhre für Gegenverkehr mit Mittenabsaugung (AL-HQ) und Abluftkamin mit Luftfilter und Düse



Hinweise:

Die Strömungsgeschwindigkeit im Tunnel wird mit stufenlos regelbaren Strahlventilatoren kontrolliert. Der Abluftfilter enthält Filterpatronen mit einem Filtermedium aus nanofeinen, synthetischen Fasern und Zellulosefasern, zur Abscheidung von 99,999% Feinstaub bei allen Feinstäuben > PM_{0,5} (> 0,5 μm). Im Brandfall erfolgt die Entrauchung über Klappen im Deckenkanal und mit zwei von drei Brandgasventilatoren.

PM₁₀-Konzentration im gereinigten Abluftstrahl

Größe der Feinstaubkonzentration PM₁₀ im Strahlendquerschnitt

(Die Konzentrationen zeigen die Endkonzentrationen von PM₁₀ im konisch erweiterten Abluftstrahl)

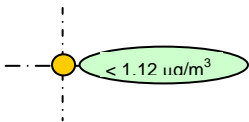
V-3: Alternative zum Amts-Entwurf, mit 5,0 m Abluftkamin und Luftfilter, ohne Klappe

Eine Röhre für Gegenverkehr mit Mittenabsaugung (AL-HQ) und Abluftkamin mit Luftfilter und Düse

$$V = 56 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$C_A = 1,12 \text{ } \mu\text{g}/\text{m}^3$$

$$d = 5,00 \text{ m}$$



Hochkamin mit Düse und Abluftfilter

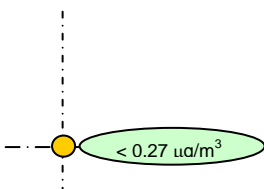
V-4: Alternative zum Amts-Entwurf, mit drei 3,5 m Abluftkaminen und einem zentralen Luftfilter

Eine Röhre für Gegenverkehr mit Mittenabsaugung (AL-HQ) und Abluftkamin mit Luftfilter und Düse

$$V = 56 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$C_A = 0,27 \text{ } \mu\text{g}/\text{m}^3$$

$$d = 3,50 \text{ m}$$



Hochkamin mit Düse und Abluftfilter

PM₁₀-Konzentration im gereinigten Abluftstrahl

Schematische Darstellung der Luftführung bei einem Tunnel mit zwei Röhren

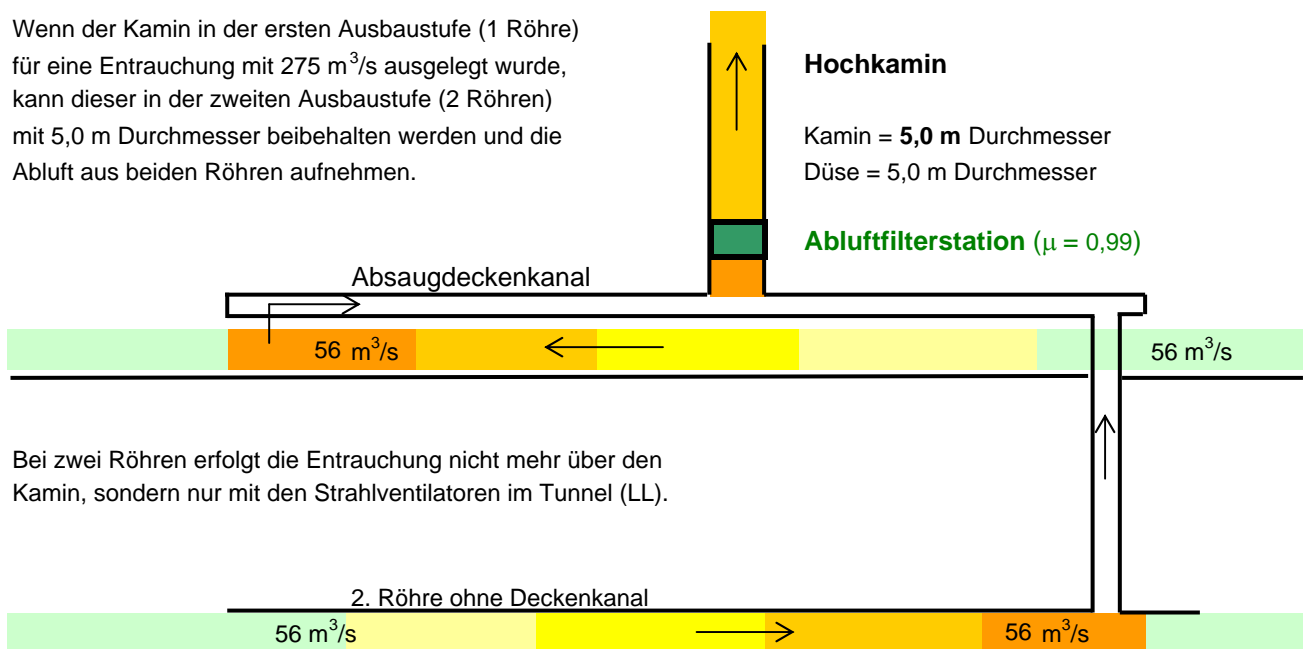
(vereinfachtes Luftschema, ohne Einbauten)

V-5: Alternative zum Amts-Entwurf, mit 5,0 m Abluftkamin und Luftfilter, ohne Klappe

Zwei Röhren für Richtungsverkehr mit Portalabsaugungen (LL) und Abluftkamin mit Luftfilter und Düse

$V = 112 \text{ m}^3/\text{s}$ Diese Luftmenge ist insgesamt an beiden Portalen abzusaugen, um die aus dem Tunnel zuströmende Luft mit ihren Schadstoffen möglichst vollständig zu erfassen

Wenn der Kamin in der ersten Ausbaustufe (1 Röhre) für eine Entrauchung mit $275 \text{ m}^3/\text{s}$ ausgelegt wurde, kann dieser in der zweiten Ausbaustufe (2 Röhren) mit 5,0 m Durchmesser beibehalten werden und die Abluft aus beiden Röhren aufnehmen.



Hinweise:

Die Strömungsgeschwindigkeit im Tunnel wird mit stufenlos regelbaren Strahlventilatoren kontrolliert. Der Abluftfilter enthält Filterpatronen mit einem Filtermedium aus nanofinen, synthetischen Fasern und Zellulosefasern, zur Abscheidung von 99,999% Feinstaub bei allen Feinstäuben > PM_{0,5} (> 0,5 μm). Im Brandfall erfolgt die Entrauchung mit den Strahlventilatoren des Tunnels (LL).

Im Unterschied zum Amtsentwurf wird bei dieser Variante kein Deckenluftkanal für die 2. Röhre benötigt. Die Frischluft muss dann über ein separates Rohr zugeführt werden.

PM₁₀-Konzentration im gereinigten Abluftstrahl

Größe der Feinstaubkonzentration PM₁₀ im Strahlendquerschnitt

(Die Konzentrationen zeigen die Endkonzentrationen von PM₁₀ im konisch erweiterten Abluftstrahl)

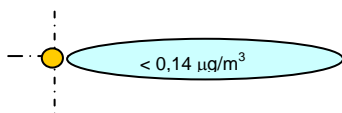
V-5: Alternative zum Amts-Entwurf, mit 5,0 m Abluftkamin und Luftfilter, ohne Klappe

Zwei Röhren für Richtungsverkehr mit Portalabsaugungen (LL) und Abluftkamin mit Luftfilter und Düse

$$V = 112 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$C_A = 0,14 \text{ } \mu\text{g}/\text{m}^3$$

$$d = 5,00 \text{ m}$$



Hochkamin mit Düse und Abluftfilter

PM₁₀-Konzentration im gereinigten Abluftstrahl

Schematische Darstellung der Luftführung bei einem Tunnel mit zwei Röhren

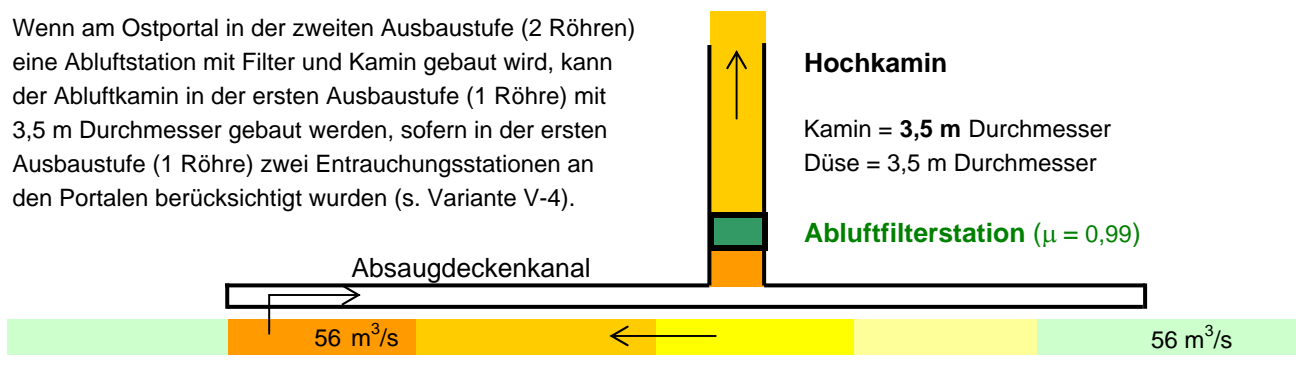
(vereinfachtes Luftschema, ohne Einbauten)

V-6: Alternative zum Amts-Entwurf, mit zwei 3,5 m Abluftkaminen und Luftfiltern

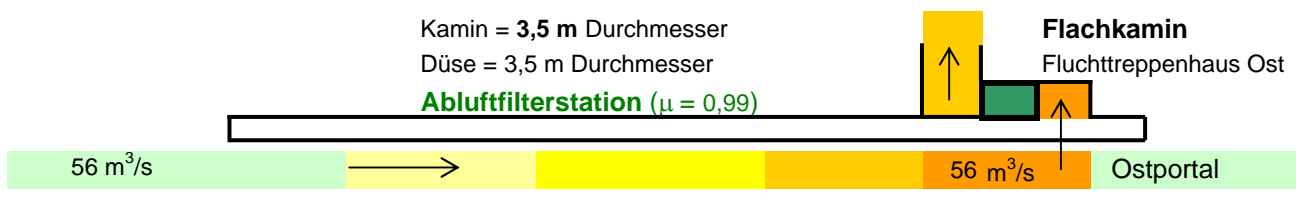
Zwei Röhren für Richtungsverkehr mit Portalabsaugungen (LL) und zwei Kaminen mit Abluftfiltern und Düsen mit einem Hochkamin für die Portalabsaugung am Westportal und einem Flachkamin für die Portalabsaugung am Ostportal

$V = 2 \times 56 \text{ m}^3/\text{s}$ Diese Luftmenge ist an den Portalen abzusaugen, um die aus dem Tunnel kontrolliert zuströmende Luft mit ihrer Schadstofffracht möglichst vollständig zu erfassen

Wenn am Ostportal in der zweiten Ausbaustufe (2 Röhren) eine Abluftstation mit Filter und Kamin gebaut wird, kann der Abluftkamin in der ersten Ausbaustufe (1 Röhre) mit 3,5 m Durchmesser gebaut werden, sofern in der ersten Ausbaustufe (1 Röhre) zwei Entrauchungsstationen an den Portalen berücksichtigt wurden (s. Variante V-4).



Bei zwei Röhren erfolgt die Entrauchung nicht mehr über den Kamin, sondern nur mit den Strahlventilatoren im Tunnel (LL).



Hinweise:

Die Strömungsgeschwindigkeit im Tunnel wird mit stufenlos regelbaren Strahlventilatoren kontrolliert. Der Abluftfilter enthält Filterpatronen mit einem Filtermedium aus nanofinen, synthetischen Fasern und Zellulosefasern, zur Abscheidung von 99,999% Feinstaub bei allen Feinstäuben > PM_{0,5} (> 0,5 μm). Im Brandfall erfolgt die Entrauchung mit den Strahlventilatoren des Tunnels (LL).

Im Unterschied zum Amtsentwurf wird bei dieser Variante kein Deckenluftkanal für die 2. Röhre benötigt. Die Frischluft muss dann über ein separates Rohr zugeführt werden.

PM₁₀-Konzentration im gereinigten Abluftstrahl

Größe der Feinstaubkonzentration PM₁₀ im Strahlendquerschnitt

(Die Konzentrationen zeigen die Endkonzentrationen von PM₁₀ im konisch erweiterten Abluftstrahl)

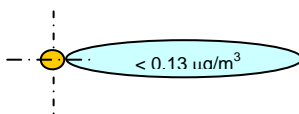
V-6: Alternative zum Amts-Entwurf, mit zwei 3,5 m Abluftkaminen und Luftfiltern

Zwei Röhren für Richtungsverkehr mit Portalabsaugungen (LL) und zwei Kaminen mit Abluftfiltern und Düsen mit einem Hochkamin für die Portalabsaugung am Westportal und einem Flachkamin für die Portalabsaugung am Ostportal

$$V = 56 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$C_A = 0,13 \text{ } \mu\text{g}/\text{m}^3$$

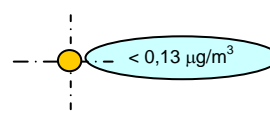
$$d = 3,50 \text{ m}$$



Hochkamin mit Düse und Abluftfilter

$$V = 56 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$d = 3,50 \text{ m}$$



Flachkamin mit Abluftfilter am Ostportal

Anlage F

Abluftkaminvarianten

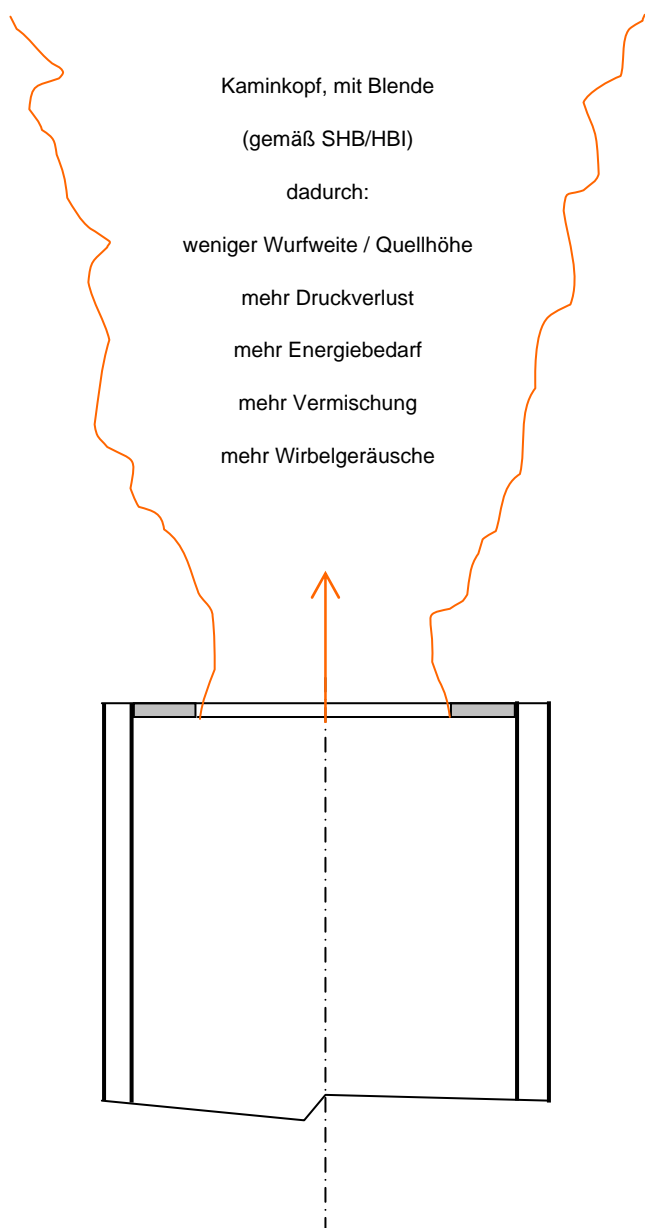
**Schadstoffkonzentration im Freistrahle bei
gereinigter und bei ungereinigter Abluft**

Schadstoff: Stickoxid NO_x

Gestaltung des Ausblaskopfes am Kamin

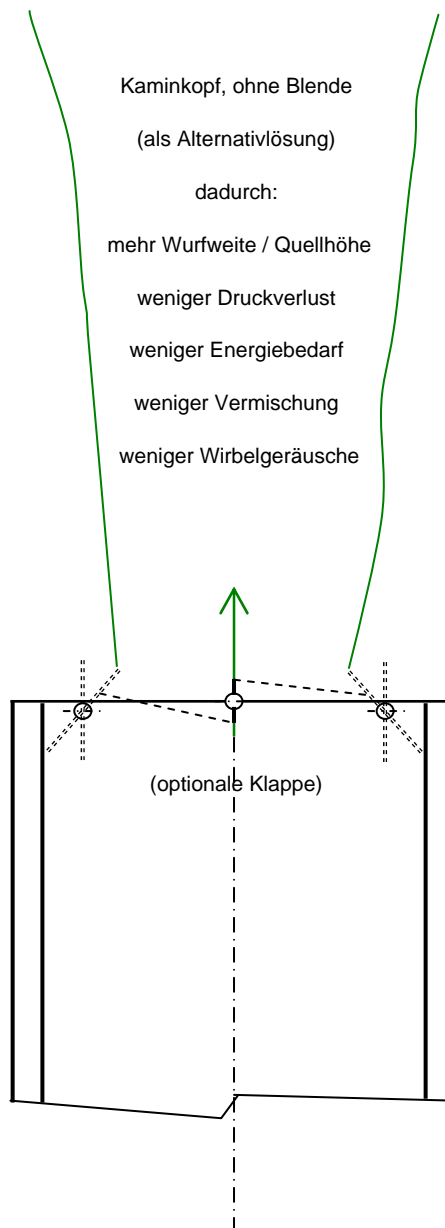
Amtsentwurf mit Blende

(Drossel)



Alternative ohne Blende

(Düse)



Option:

Im Kaminkopf können ggf. zwei verstellbare Leitbleche eingebaut werden, um den Düsenquerschnitt an die jeweilige Luftmenge im Regellüftungsbetrieb und im Brandfallentrauchungsbetrieb anzupassen. Der Stellmotor kann außen am Kaminfuß aufgestellt und per Kette mit der Klappe verbunden werden.

NO_x-Konzentration im ungereinigten Abluftstrahl

Größe der Stickoxidkonzentration NO_x im Strahlendquerschnitt

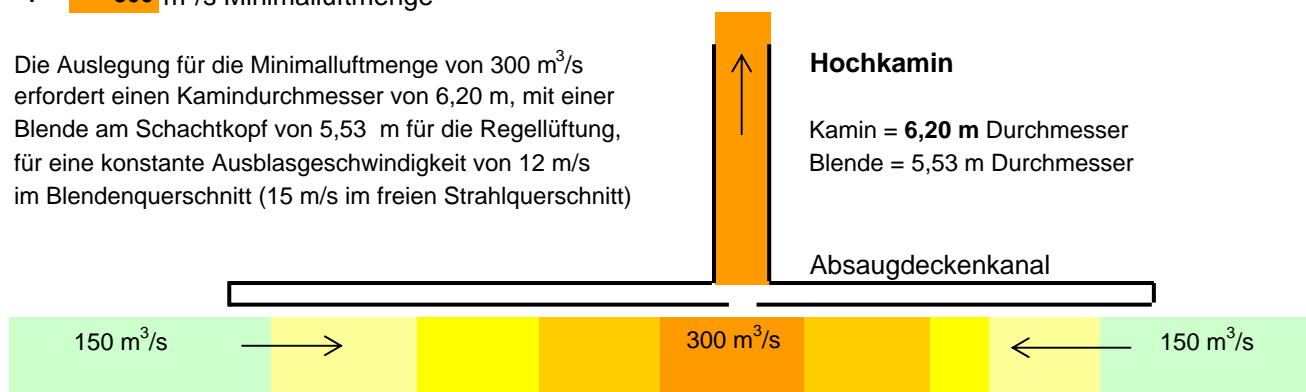
(Die Konzentrationen zeigen die Endkonzentrationen von NO_x im konisch erweiterten Abluftstrahl)

A-1: Amts-Entwurf mit 6,2 m Abluftkamin und 5,53 m Blende bei 300 m³/s Minimalluftmenge

Eine Röhre für Gegenverkehr mit Mittenabsaugung (Ablufthalbquerlüftung AL-HQ) und Abluftkamin mit Blende

$$V = 300 \text{ m}^3/\text{s} \text{ Minimalluftmenge}$$

Die Auslegung für die Minimalluftmenge von 300 m³/s erfordert einen Kamindurchmesser von 6,20 m, mit einer Blende am Schachtkopf von 5,53 m für die Regellüftung, für eine konstante Ausblasgeschwindigkeit von 12 m/s im Blendenquerschnitt (15 m/s im freien Strahlquerschnitt)



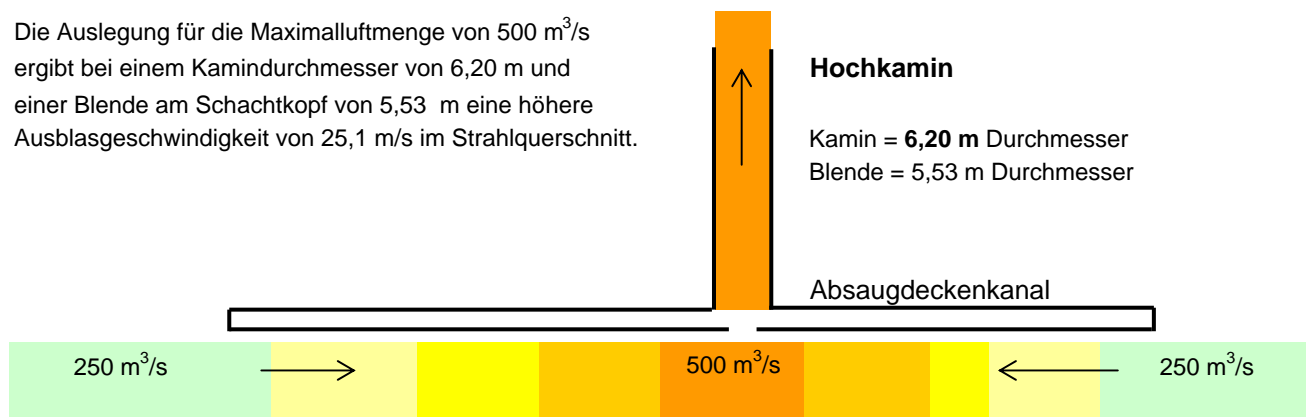
Hinweis: Die Strömungsgeschwindigkeit im Tunnel wird stufenweise mit Strahlventilatoren beeinflusst. Im Brandfall erfolgt die Entrauchung über Klappen im Deckenkanal und mit zwei Brandgasventilatoren.

A-2: Amts-Entwurf mit 6,2 m Abluftkamin und 5,53 m Blende, bei 500 m³/s Maximalluftmenge

Eine Röhre für Gegenverkehr mit Mittenabsaugung (Ablufthalbquerlüftung AL-HQ) und Abluftkamin mit Blende

$$V = 500 \text{ m}^3/\text{s} \text{ Maximalluftmenge}$$

Die Auslegung für die Maximalluftmenge von 500 m³/s ergibt bei einem Kamindurchmesser von 6,20 m und einer Blende am Schachtkopf von 5,53 m eine höhere Ausblasgeschwindigkeit von 25,1 m/s im Strahlquerschnitt.



Hinweis: Die Strömungsgeschwindigkeit im Tunnel wird stufenweise mit Strahlventilatoren beeinflusst. Im Brandfall erfolgt die Entrauchung über Klappen im Deckenkanal und mit zwei Brandgasventilatoren.

NO_x-Konzentration im ungereinigten Abluftstrahl

Größe der Stickoxidkonzentration NO_x im Strahlendquerschnitt

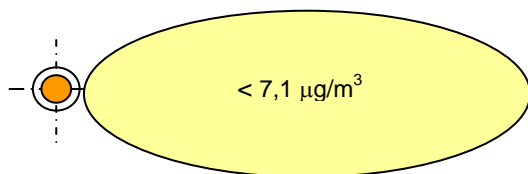
(Die Konzentrationen zeigen die Endkonzentrationen von NO_x im konisch erweiterten Abluftstrahl)

A-1: Amts-Entwurf mit 6,2 m Abluftkamin und 5,53 m Blende bei 300 m³/s Minimalluftmenge

Eine Röhre für Gegenverkehr mit Mittenabsaugung (Ablufthalbquerlüftung AL-HQ) und Abluftkamin mit Blende

$$V = 300 \text{ m}^3/\text{s} \quad C_A = 7,1 \text{ } \mu\text{g}/\text{m}^3$$

$$d = 6,20 \text{ m} \\ d_B = 5,53 \text{ m}$$



Hochkamin mit Blende

A-2: Amts-Entwurf mit 6,2 m Abluftkamin und 5,53 m Blende, bei 500 m³/s Maximalluftmenge

Eine Röhre für Gegenverkehr mit Mittenabsaugung (Ablufthalbquerlüftung AL-HQ) und Abluftkamin mit Blende

$$V = 500 \text{ m}^3/\text{s} \quad C_A = 1,5 \text{ } \mu\text{g}/\text{m}^3$$

$$d = 6,20 \text{ m} \\ d_B = 5,53 \text{ m}$$



Hochkamin mit Blende

NO_x-Konzentration im ungereinigten Abluftstrahl

Größe der Stickoxidkonzentration NO_x im Strahlendquerschnitt

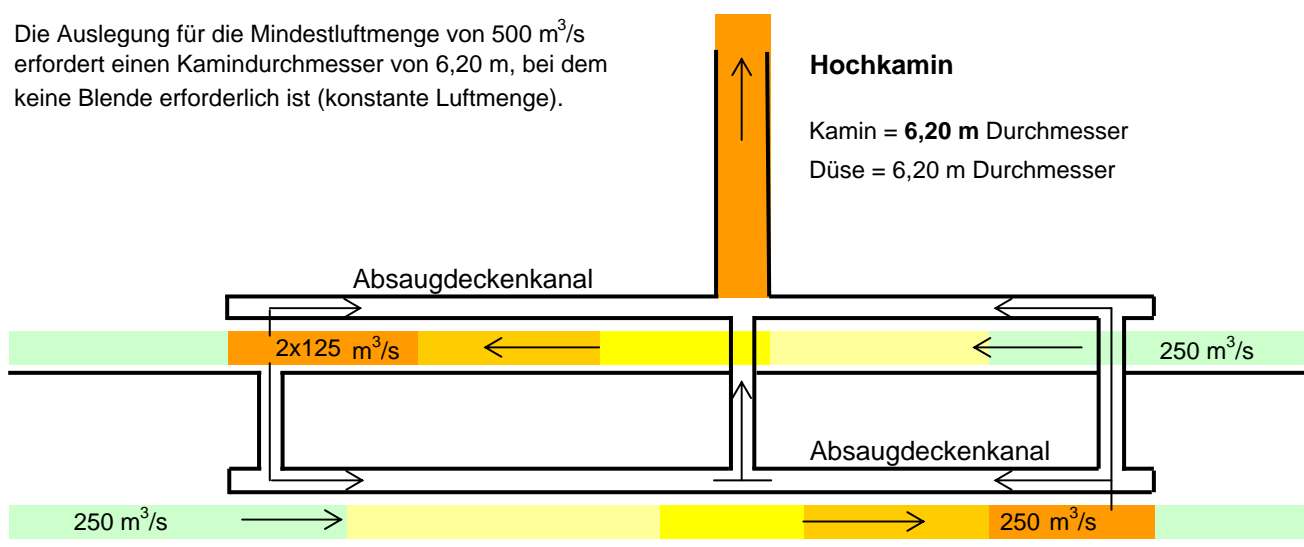
(Die Konzentrationen zeigen die Endkonzentrationen von NO_x im konisch erweiterten Abluftstrahl)

A-3: Amts-Entwurf mit 6,2 m Abluftkamin ohne Blende, bei 500 m³/s Regelluftmenge für 2 Röhren

Zwei Röhren für Richtungsverkehr mit Portalabsaugungen (Längslüftung LL) und Abluftkamin mit Blende

$V = 500 \text{ m}^3/\text{s}$ Diese Luftmenge ist an den Portalen abzusaugen, um die aus dem Tunnel ungehindert zuströmende Luft mit ihrer Schadstofffracht möglichst vollständig zu erfassen

Die Auslegung für die Mindestluftmenge von 500 m³/s erfordert einen Kamindurchmesser von 6,20 m, bei dem keine Blende erforderlich ist (konstante Luftmenge).



Hinweis: Die Strömungsgeschwindigkeit im Tunnel wird stufenweise mit Strahlventilatoren beeinflusst. Bei zwei Röhren erfolgt die Entrauchung nicht mehr über den Kamin, sondern nur mit den Strahlventilatoren (LL).

NO_x-Konzentration im ungereinigten Abluftstrahl

Größe der Stickoxidkonzentration NO_x im Strahlendquerschnitt

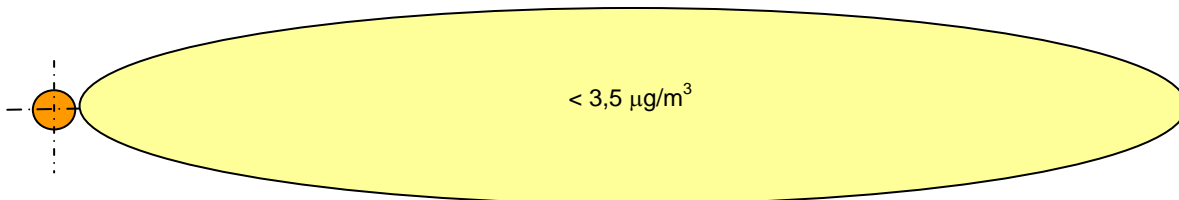
(Die Konzentrationen zeigen die Endkonzentrationen von NO_x im konisch erweiterten Abluftstrahl)

A-3: Amts-Entwurf mit 6,2 m Abluftkamin ohne Blende, bei 500 m³/s Regelluftmenge für 2 Röhren

Zwei Röhren für Richtungsverkehr mit Portalabsaugungen (Längslüftung LL) und Abluftkamin mit Blende

$$V = 500 \text{ m}^3/\text{s} \quad C_A = 3,5 \text{ } \mu\text{g}/\text{m}^3$$

$$d = 6,20 \text{ m}$$



Hochkamin mit Düse

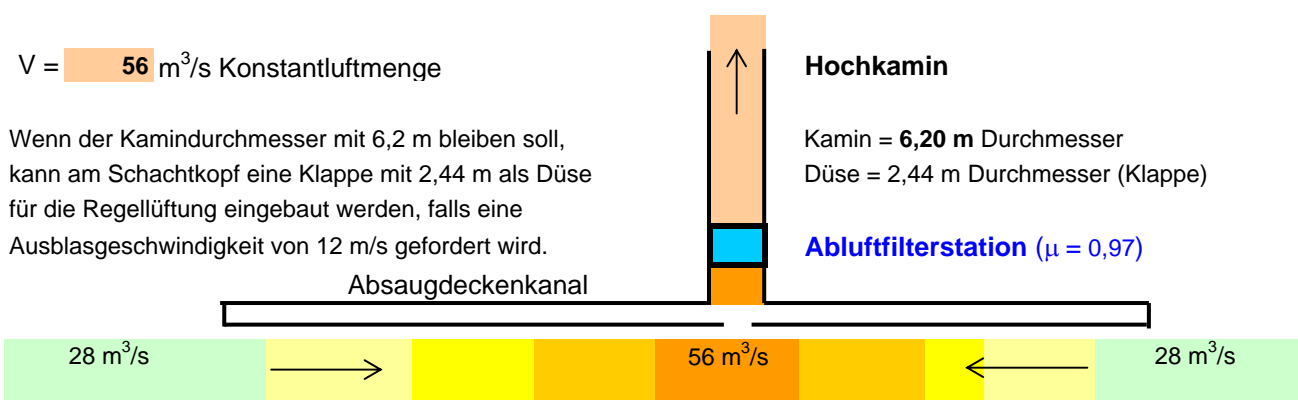
NO_x-Konzentration im gereinigten Abluftstrahl

Größe der Stickoxidkonzentration NO_x im Strahlendquerschnitt

(Die Konzentrationen zeigen die Endkonzentrationen von NO_x im konisch erweiterten Abluftstrahl)

V-1: Alternative zum Amts-Entwurf, mit 6,2 m Abluftkamin, Luftfilter und 2,44 m Klappe

Eine Röhre für Gegenverkehr mit Mittenabsaugung (AL-HQ) und Abluftkamin mit Luftfilter, Düse und Klappe

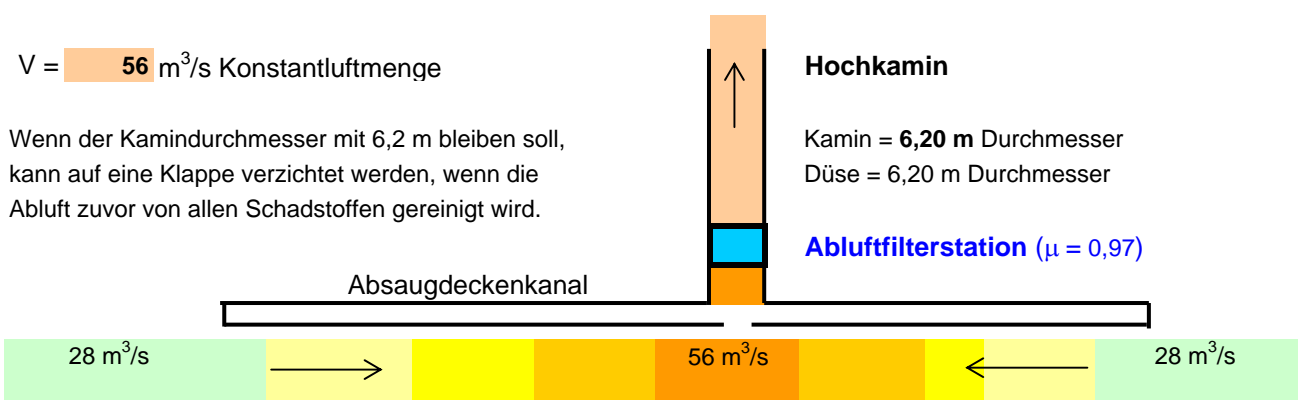


Hinweise:

Die Strömungsgeschwindigkeit im Tunnel wird mit stufenlos regelbaren Strahlventilatoren kontrolliert. Der Abluftfilter enthält als Sorptionsfilter neben der aktivierten Tonerde auch oxidierende und katalytisch wirkende Bestandteile, durch die der NO-Anteil sofort zu NO₂ oxidiert und in Salpeter umgewandelt wird. Im Brandfall erfolgt die Entrauchung über Klappen im Deckenkanal und mit zwei Brandgasventilatoren.

V-2: Alternative zum Amts-Entwurf, mit 6,2 m Abluftkamin und Luftfilter, ohne Klappe

Eine Röhre für Gegenverkehr mit Mittenabsaugung (AL-HQ) und Abluftkamin mit Luftfilter und Düse



Hinweise:

Die Strömungsgeschwindigkeit im Tunnel wird mit stufenlos regelbaren Strahlventilatoren kontrolliert. Der Abluftfilter enthält als Sorptionsfilter neben der aktivierten Tonerde auch oxidierende und katalytisch wirkende Bestandteile, durch die der NO-Anteil sofort zu NO₂ oxidiert und in Salpeter umgewandelt wird. Im Brandfall erfolgt die Entrauchung über Klappen im Deckenkanal und mit zwei Brandgasventilatoren.

NO_x-Konzentration im gereinigten Abluftstrahl

Größe der Stickoxidkonzentration NO_x im Strahlendquerschnitt

(Die Konzentrationen zeigen die Endkonzentrationen von NO_x im konisch erweiterten Abluftstrahl)

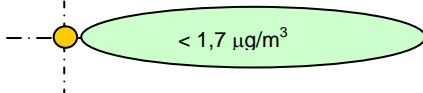
V-1: Alternative zum Amts-Entwurf, mit 6,2 m Abluftkamin, Luftfilter und Klappe 2,44 m

Eine Röhre für Gegenverkehr mit Mittenabsaugung (AL-HQ) und Abluftkamin mit Luftfilter, Düse und Klappe

$$V = 56 \text{ m}^3/\text{s} \quad C_A = 1,7 \text{ } \mu\text{g}/\text{m}^3$$

$$d = 6,20 \text{ m}$$

$$d_K = 2,44 \text{ m}$$



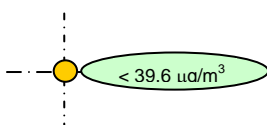
Hochkamin mit Düse und Abluftfilter
Düse mit Klappe (im Brandfall geöffnet)

V-2: Alternative zum Amts-Entwurf, mit 6,2 m Abluftkamin und Luftfilter, ohne Klappe

Eine Röhre für Gegenverkehr mit Mittenabsaugung (AL-HQ) und Abluftkamin mit Luftfilter und Düse

$$V = 56 \text{ m}^3/\text{s} \quad C_A = 39,6 \text{ } \mu\text{g}/\text{m}^3$$

$$d = 6,20 \text{ m}$$



Hochkamin mit Düse und Abluftfilter

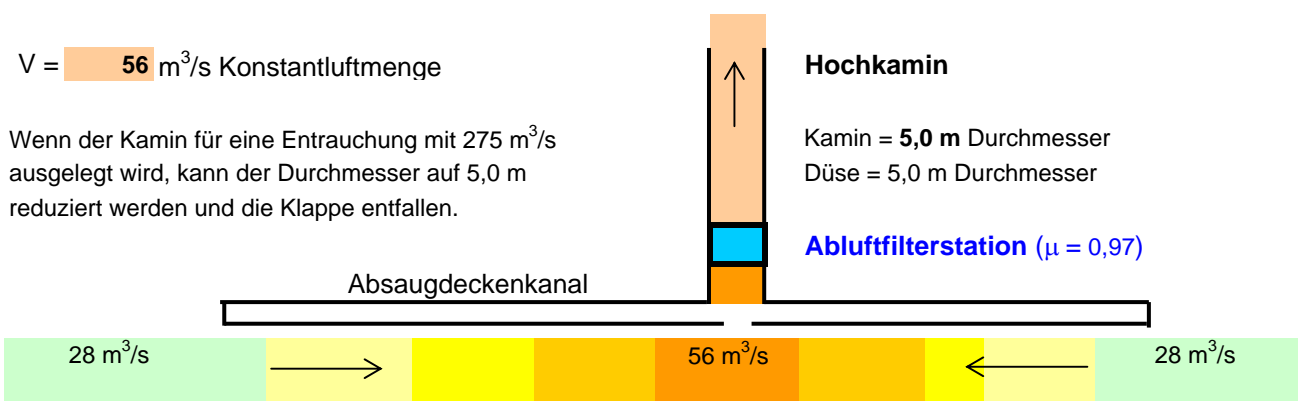
NO_x-Konzentration im gereinigten Abluftstrahl

Größe der Stickoxidkonzentration NO_x im Strahlendquerschnitt

(Die Konzentrationen zeigen die Endkonzentrationen von NO_x im konisch erweiterten Abluftstrahl)

V-3: Alternative zum Amts-Entwurf, mit 5,0 m Abluftkamin und Luftfilter, ohne Klappe

Eine Röhre für Gegenverkehr mit Mittenabsaugung (AL-HQ) und Abluftkamin mit Luftfilter und Düse

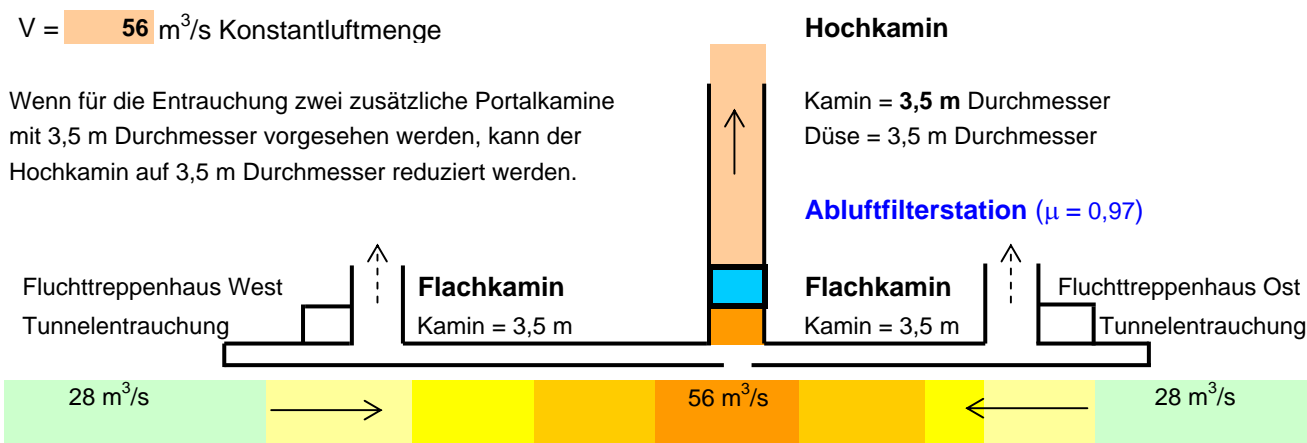


Hinweise:

Die Strömungsgeschwindigkeit im Tunnel wird mit stufenlos regelbaren Strahlventilatoren kontrolliert. Der Abluftfilter enthält als Sorptionsfilter neben der aktivierten Tonerde auch oxidierende und katalytisch wirkende Bestandteile, durch die der NO-Anteil sofort zu NO₂ oxidiert und in Salpeter umgewandelt wird. Im Brandfall erfolgt die Entrauchung über Klappen im Deckenkanal und mit zwei Brandgasventilatoren.

V-4: Alternative zum Amts-Entwurf, mit drei 3,5 m Abluftkaminen und einem zentralen Luftfilter

Eine Röhre für Gegenverkehr mit Mittenabsaugung (AL-HQ) und Abluftkamin mit Luftfilter und Düse



Hinweise:

Die Strömungsgeschwindigkeit im Tunnel wird mit stufenlos regelbaren Strahlventilatoren kontrolliert. Der Abluftfilter enthält als Sorptionsfilter neben der aktivierten Tonerde auch oxidierende und katalytisch wirkende Bestandteile, durch die der NO-Anteil sofort zu NO₂ oxidiert und in Salpeter umgewandelt wird. Im Brandfall erfolgt die Entrauchung über Klappen im Deckenkanal und mit zwei von drei Brandgasventilatoren.

NO_x-Konzentration im gereinigten Abluftstrahl

Größe der Stickoxidkonzentration NO_x im Strahlendquerschnitt

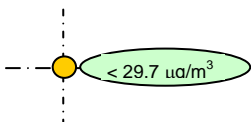
(Die Konzentrationen zeigen die Endkonzentrationen von NO_x im konisch erweiterten Abluftstrahl)

V-3: Alternative zum Amts-Entwurf, mit 5,0 m Abluftkamin und Luftfilter, ohne Klappe

Eine Röhre für Gegenverkehr mit Mittenabsaugung (AL-HQ) und Abluftkamin mit Luftfilter und Düse

$$V = 56 \text{ m}^3/\text{s} \quad C_A = 29,7 \text{ } \mu\text{g}/\text{m}^3$$

$$d = 5,00 \text{ m}$$



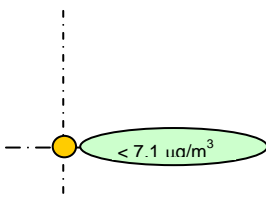
Hochkamin mit Düse und Abluftfilter

V-4: Alternative zum Amts-Entwurf, mit drei 3,5 m Abluftkaminen und einem zentralen Luftfilter

Eine Röhre für Gegenverkehr mit Mittenabsaugung (AL-HQ) und Abluftkamin mit Luftfilter und Düse

$$V = 56 \text{ m}^3/\text{s} \quad C_A = 7,1 \text{ } \mu\text{g}/\text{m}^3$$

$$d = 3,50 \text{ m}$$



Hochkamin mit Düse und Abluftfilter

NO_x-Konzentration im gereinigten Abluftstrahl

Größe der Stickoxidkonzentration NO_x im Strahlendquerschnitt

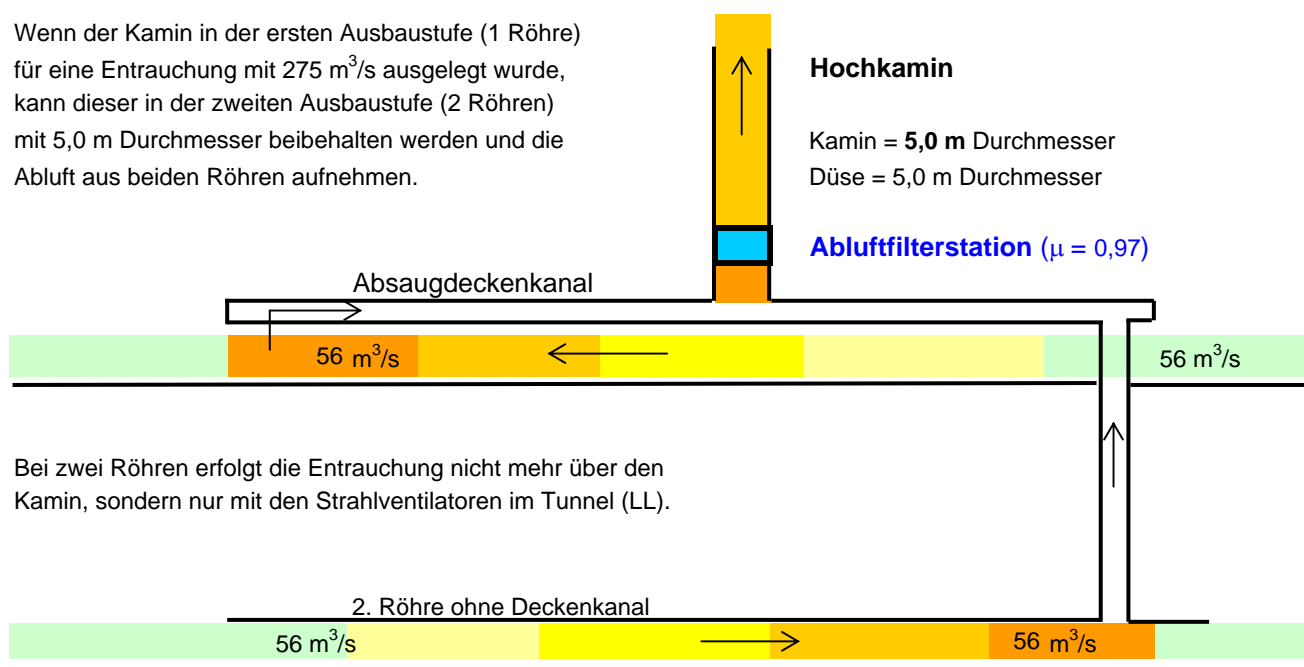
(Die Konzentrationen zeigen die Endkonzentrationen von NO_x im konisch erweiterten Abluftstrahl)

V-5: Alternative zum Amts-Entwurf, mit 5,0 m Abluftkamin und Luftfilter, ohne Klappe

Zwei Röhren für Richtungsverkehr mit Portalabsaugungen (LL) und Abluftkamin mit Luftfilter und Düse

$V = 112 \text{ m}^3/\text{s}$ Diese Luftmenge ist insgesamt an beiden Portalen abzusaugen, um die aus dem Tunnel zuströmende Luft mit ihren Schadstoffen möglichst vollständig zu erfassen

Wenn der Kamin in der ersten Ausbaustufe (1 Röhre) für eine Entrauchung mit $275 \text{ m}^3/\text{s}$ ausgelegt wurde, kann dieser in der zweiten Ausbaustufe (2 Röhren) mit 5,0 m Durchmesser beibehalten werden und die Abluft aus beiden Röhren aufnehmen.



Hinweise:

Die Strömungsgeschwindigkeit im Tunnel wird mit stufenlos regelbaren Strahlventilatoren kontrolliert. Der Abluftfilter enthält als Sorptionsfilter neben der aktivierten Tonerde auch oxidierende und katalytisch wirkende Bestandteile, durch die der NO-Anteil sofort zu NO₂ oxidiert und in Salpeter umgewandelt wird. Im Brandfall erfolgt die Entrauchung mit den Strahlventilatoren des Tunnels (LL).

Im Unterschied zum Amtsentwurf wird bei dieser Variante kein Deckenluftkanal für die 2. Röhre benötigt. Die Frischluft muss dann über ein separates Rohr zugeführt werden.

NO_x-Konzentration im gereinigten Abluftstrahl

Größe der Stickoxidkonzentration NO_x im Strahlendquerschnitt

(Die Konzentrationen zeigen die Endkonzentrationen von NO_x im konisch erweiterten Abluftstrahl)

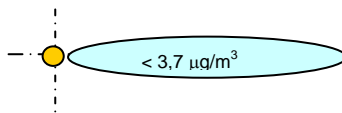
V-5: Alternative zum Amts-Entwurf, mit 5,0 m Abluftkamin und Luftfilter, ohne Klappe

Zwei Röhren für Richtungsverkehr mit Portalabsaugungen (LL) und Abluftkamin mit Luftfilter und Düse

$$V = 112 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$C_A = 3,7 \text{ } \mu\text{g}/\text{m}^3$$

$$d = 5,00 \text{ m}$$



Hochkamin mit Düse und Abluftfilter

NO_x-Konzentration im gereinigten Abluftstrahl

Größe der Stickoxidkonzentration NO_x im Strahlendquerschnitt

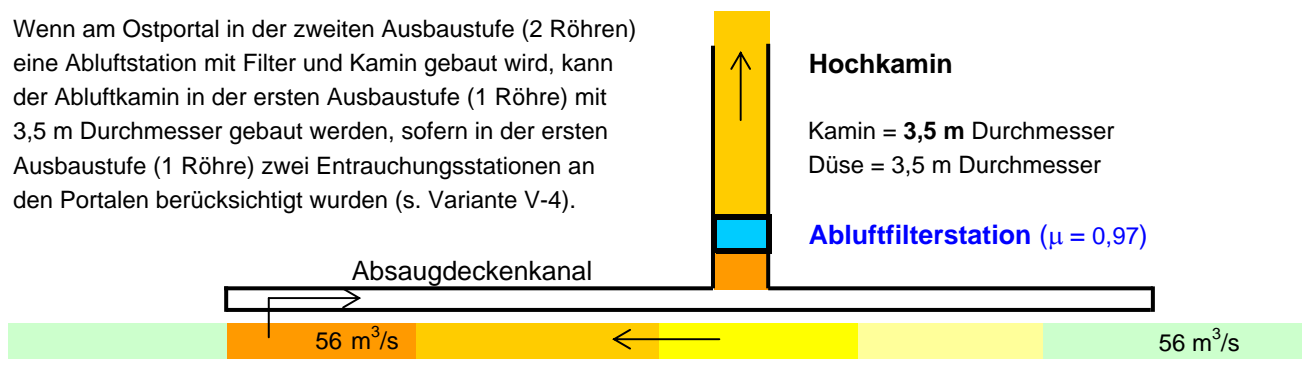
(Die Konzentrationen zeigen die Endkonzentrationen von NO_x im konisch erweiterten Abluftstrahl)

V-6: Alternative zum Amts-Entwurf, mit zwei 3,5 m Abluftkaminen und Luftfiltern

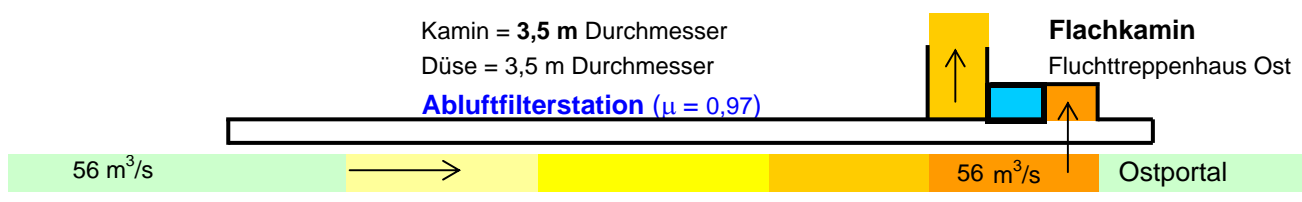
Zwei Röhren für Richtungsverkehr mit Portalabsaugungen (LL) und zwei Kaminen mit Abluftfiltern und Düsen mit einem Hochkamin für die Portalabsaugung am Westportal und einem Flachkamin für die Portalabsaugung am Ostportal

$V = 2 \times 56 \text{ m}^3/\text{s}$ Diese Luftmenge ist an den Portalen abzusaugen, um die aus dem Tunnel kontrolliert zuströmende Luft mit ihrer Schadstofffracht möglichst vollständig zu erfassen

Wenn am Ostportal in der zweiten Ausbaustufe (2 Röhren) eine Abluftstation mit Filter und Kamin gebaut wird, kann der Abluftkamin in der ersten Ausbaustufe (1 Röhre) mit 3,5 m Durchmesser gebaut werden, sofern in der ersten Ausbaustufe (1 Röhre) zwei Entrauchungsstationen an den Portalen berücksichtigt wurden (s. Variante V-4).



Bei zwei Röhren erfolgt die Entrauchung nicht mehr über den Kamin, sondern nur mit den Strahlventilatoren im Tunnel (LL).



Hinweise:

Die Strömungsgeschwindigkeit im Tunnel wird mit stufenlos regelbaren Strahlventilatoren kontrolliert. Der Abluftfilter enthält als Sorptionsfilter neben der aktivierten Tonerde auch oxidierende und katalytisch wirkende Bestandteile, durch die der NO-Anteil sofort zu NO₂ oxidiert und in Salpeter umgewandelt wird. Im Brandfall erfolgt die Entrauchung mit den Strahlventilatoren des Tunnels (LL).

Im Unterschied zum Amtsentwurf wird bei dieser Variante kein Deckenluftkanal für die 2. Röhre benötigt. Die Frischluft muss dann über ein separates Rohr zugeführt werden.

NO_x-Konzentration im gereinigten Abluftstrahl

Größe der Stickoxidkonzentration NO_x im Strahlendquerschnitt

(Die Konzentrationen zeigen die Endkonzentrationen von NO_x im konisch erweiterten Abluftstrahl)

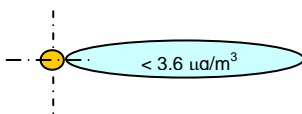
V-6: Alternative zum Amts-Entwurf, mit zwei 3,5 m Abluftkaminen und Luftfiltern

Zwei Röhren für Richtungsverkehr mit Portalabsaugungen (LL) und zwei Kaminen mit Abluftfiltern und Düsen mit einem Hochkamin für die Portalabsaugung am Westportal und einem Flachkamin für die Portalabsaugung am Ostportal

$$V = 56 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$C_A = 3,6 \text{ } \mu\text{g}/\text{m}^3$$

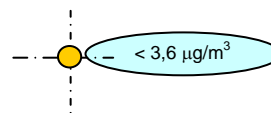
$$d = 3,50 \text{ m}$$



Hochkamin mit Düse und Abluftfilter

$$V = 56 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$d = 3,50 \text{ m}$$



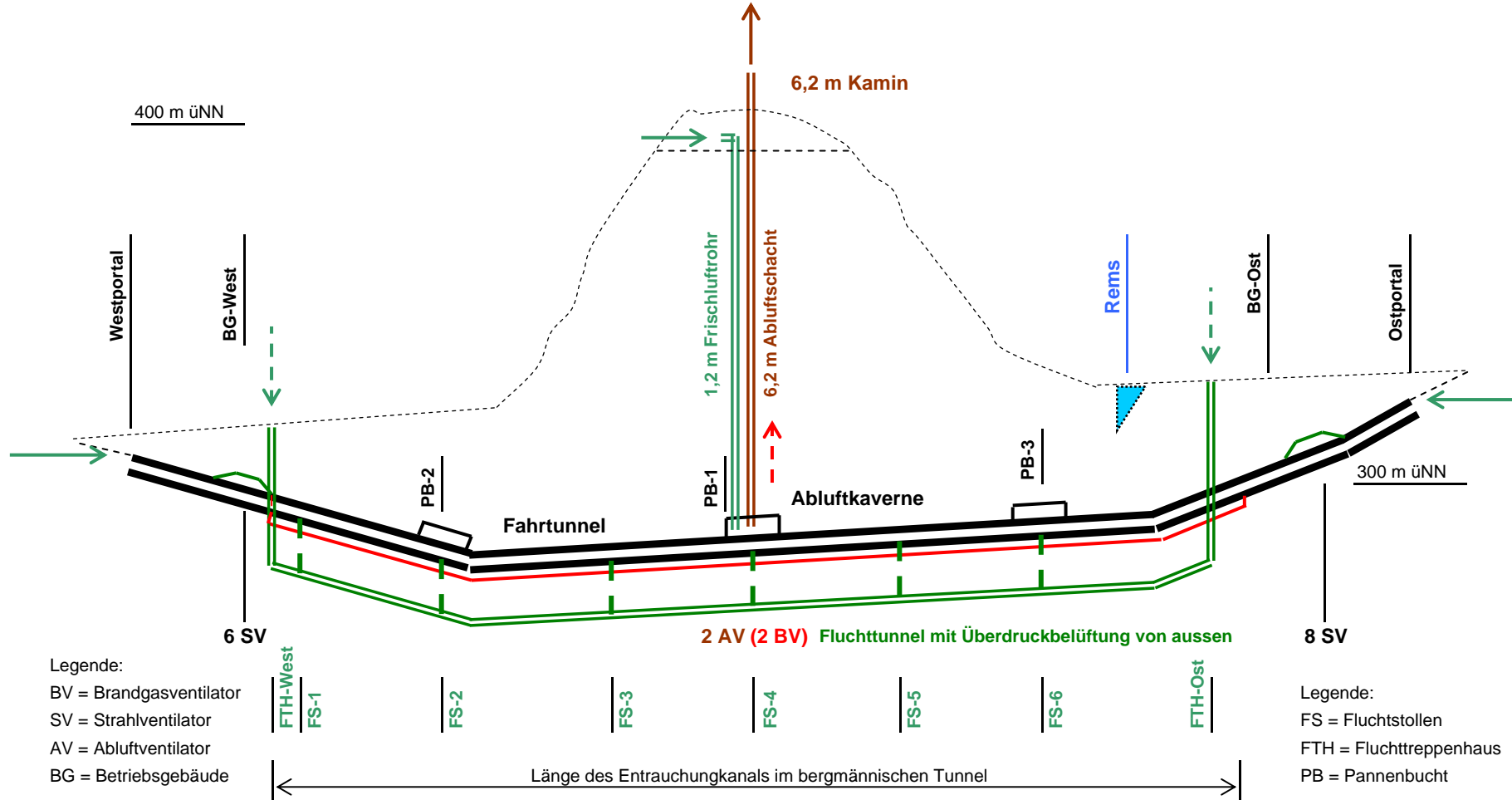
Flachkamin mit Abluftfilter am Ostportal

Anlage G

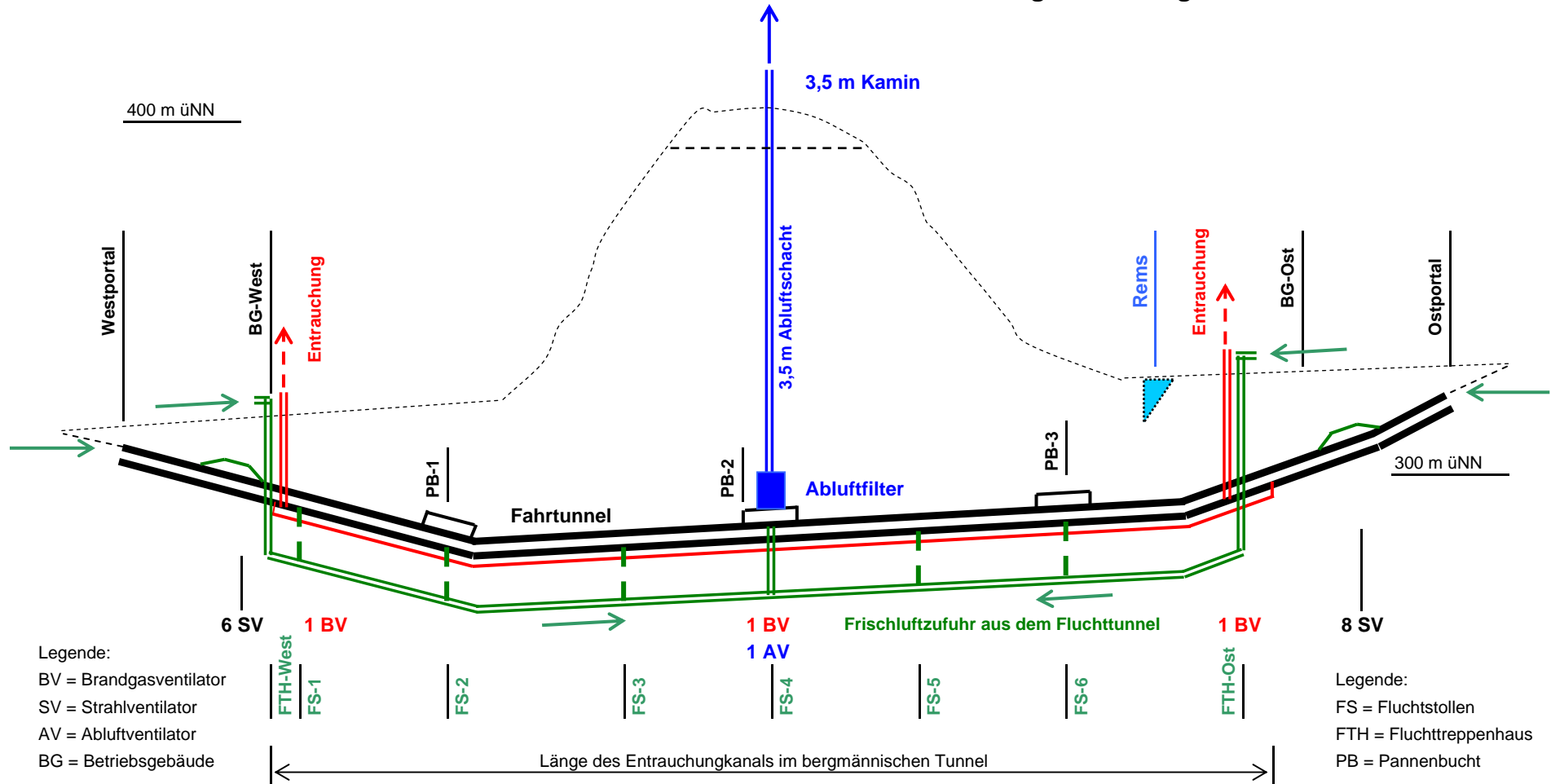
Lüftungssystem Varianten

- Abb. 17 Lüftungsschema des Amtsentwurfs A - 1 (eine Röhre) mit 6,2 m Kamin
- Abb. 18 Lüftungsschema der Variante V - 4 (eine Röhre) mit 3,5 m Kamin
- Abb. 19 Lüftungsschema der Variante V - 5 (zwei Röhren) mit 5,0 m Kamin
- Abb. 20 Lüftungsschema der Variante V - 6 (zwei Röhren) mit 3,5 m Kamin

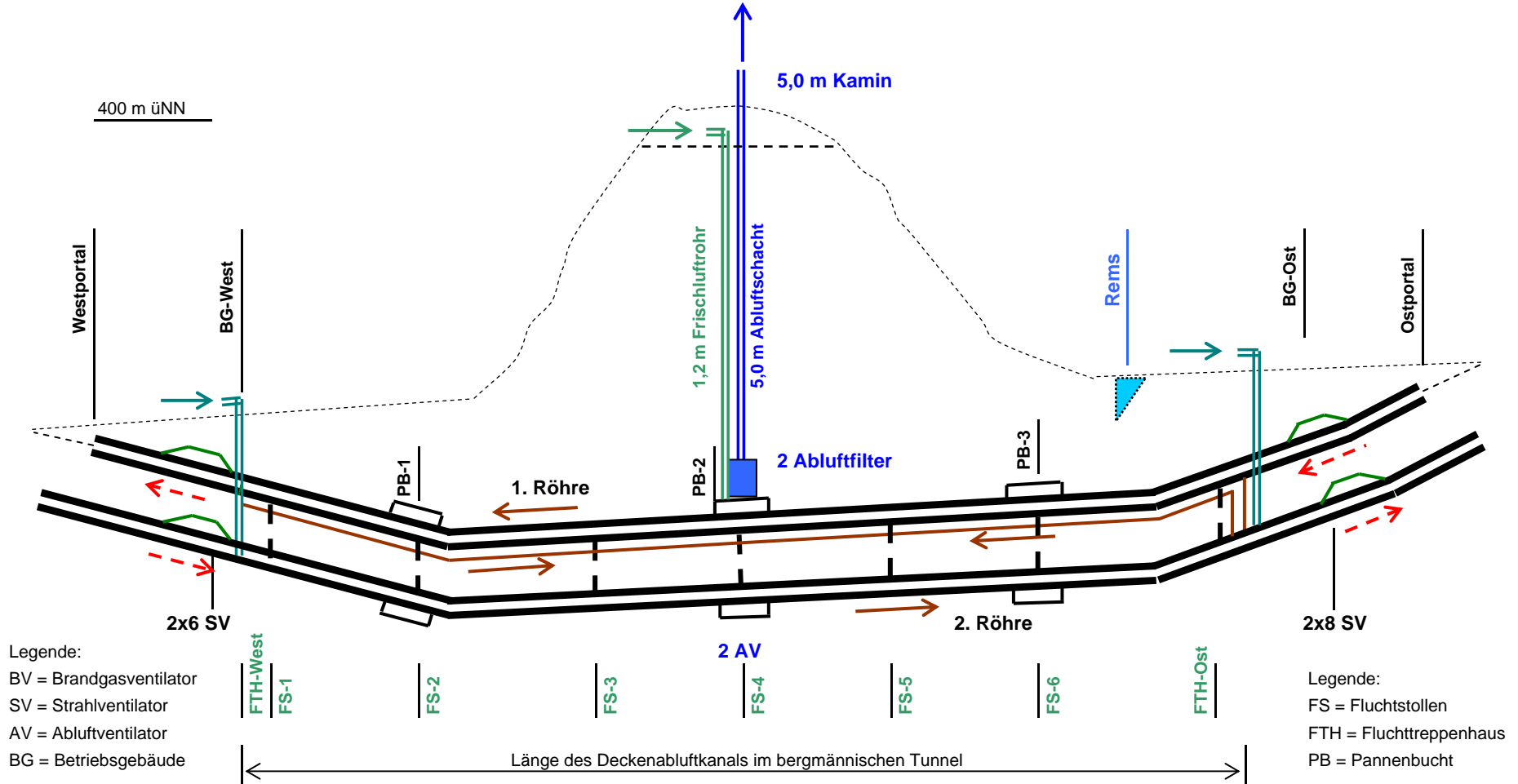
Amtsentswurf A-1 (eine Röhre) mit 6,2 m Kamin und parallelem 1,2 m Frischluftrohr für die Kaverne, mit zentraler Entrauchung über den Kamin und mit Überdruckbelüftung des Fluchtstollens



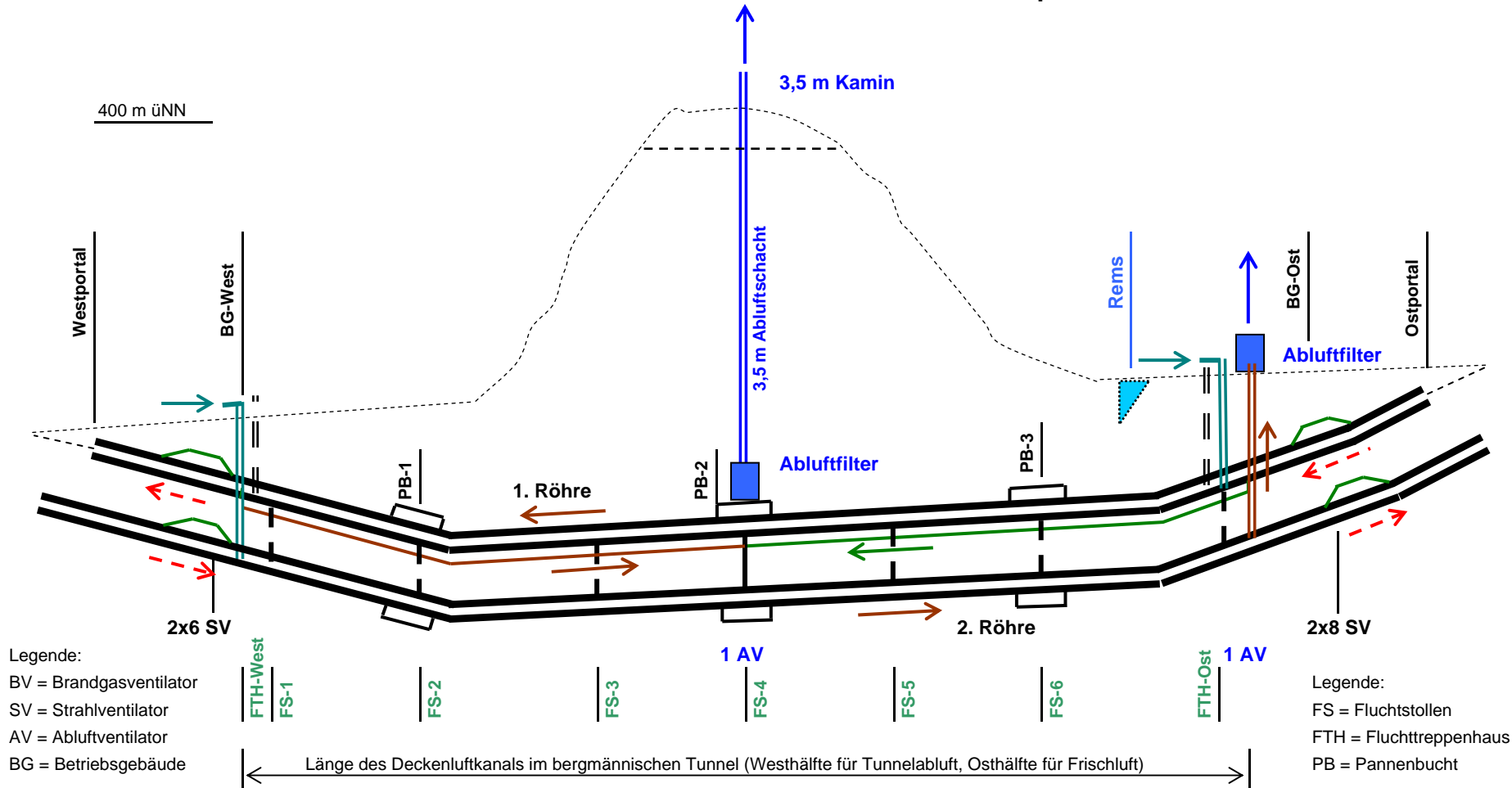
Variante V- 4 (eine Röhre) mit 3,5 m Kamin und Abluftfilter sowie mit zweiseitiger Entrauchung und Frischluftzufuhr aus dem Fluchttunnel für die Kaverne und zur Kühlung der Brandgasventilatoren



Variante V- 5 (zwei Röhren) mit 5,0 m Kamin und 2 Abluftfilterstationen je 56 m³/s sowie
 Längsentrauchung mit Strahlventilatoren und 1,2 m Frischluftrohr am Kamin



Variante V- 6 (zwei Röhren) mit zwei 3,5 m Kaminen und Abluftfiltern sowie Längsentrauchung mit Strahlventilatoren und Frischluft aus dem Deckenkanal vom Ostportal für die Kaverne



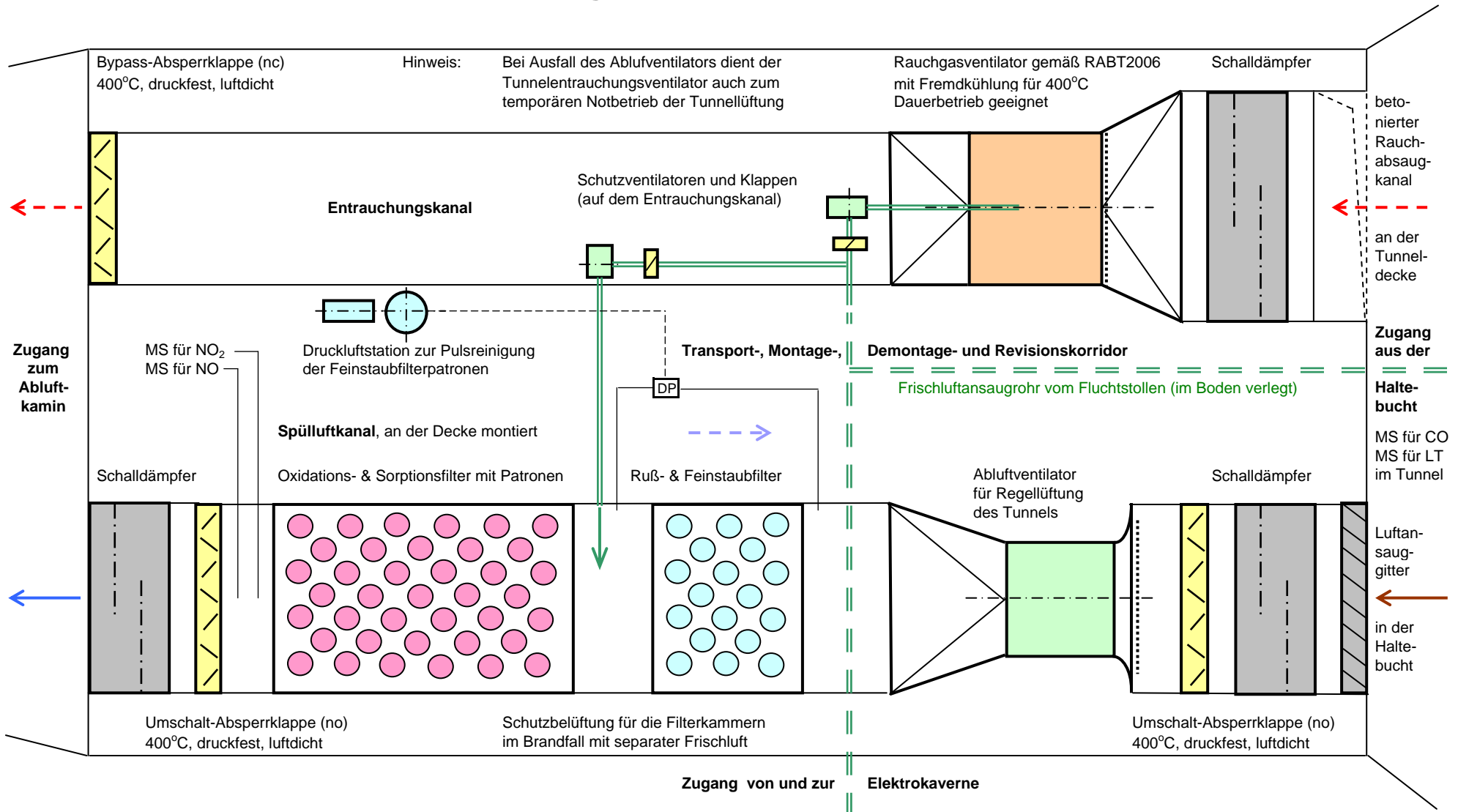
Anlage H

Funktionsschema und Anordnung

Abb. 21 Funktionsschema der Abluftanlage

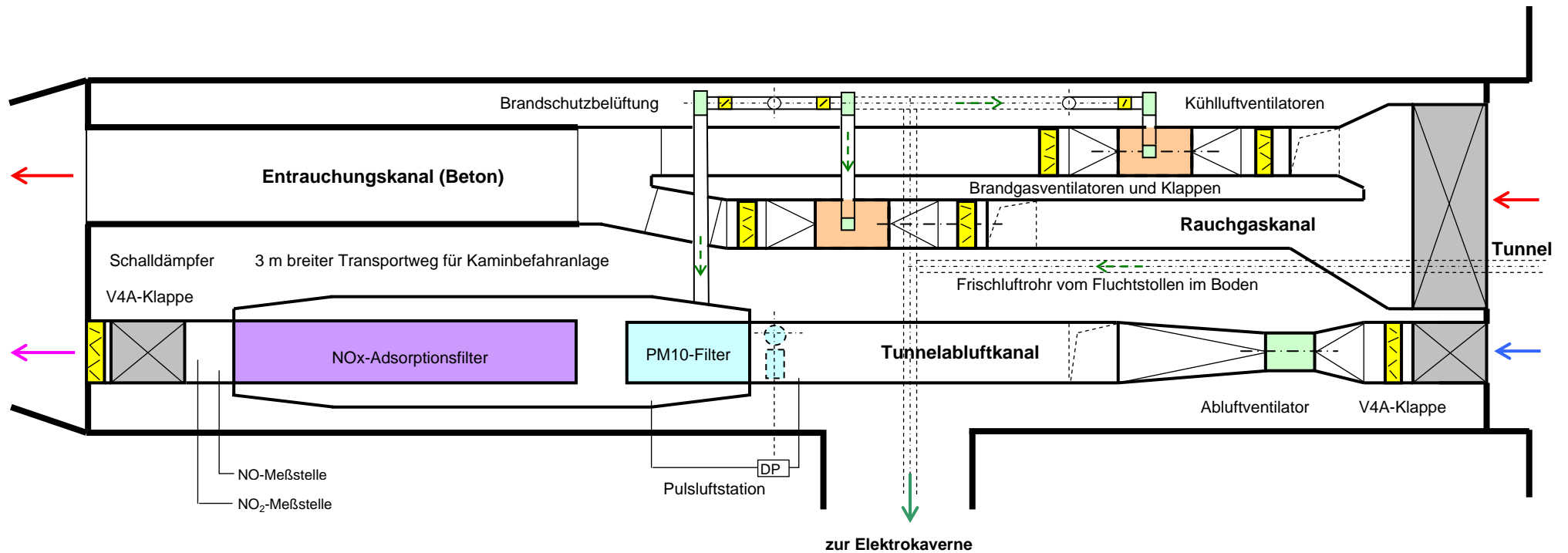
Abb. 22 Anordnungsschema der Abluftzentrale

Schematische Anordnung der Abluftfilterstation in der Lüfterkaverne



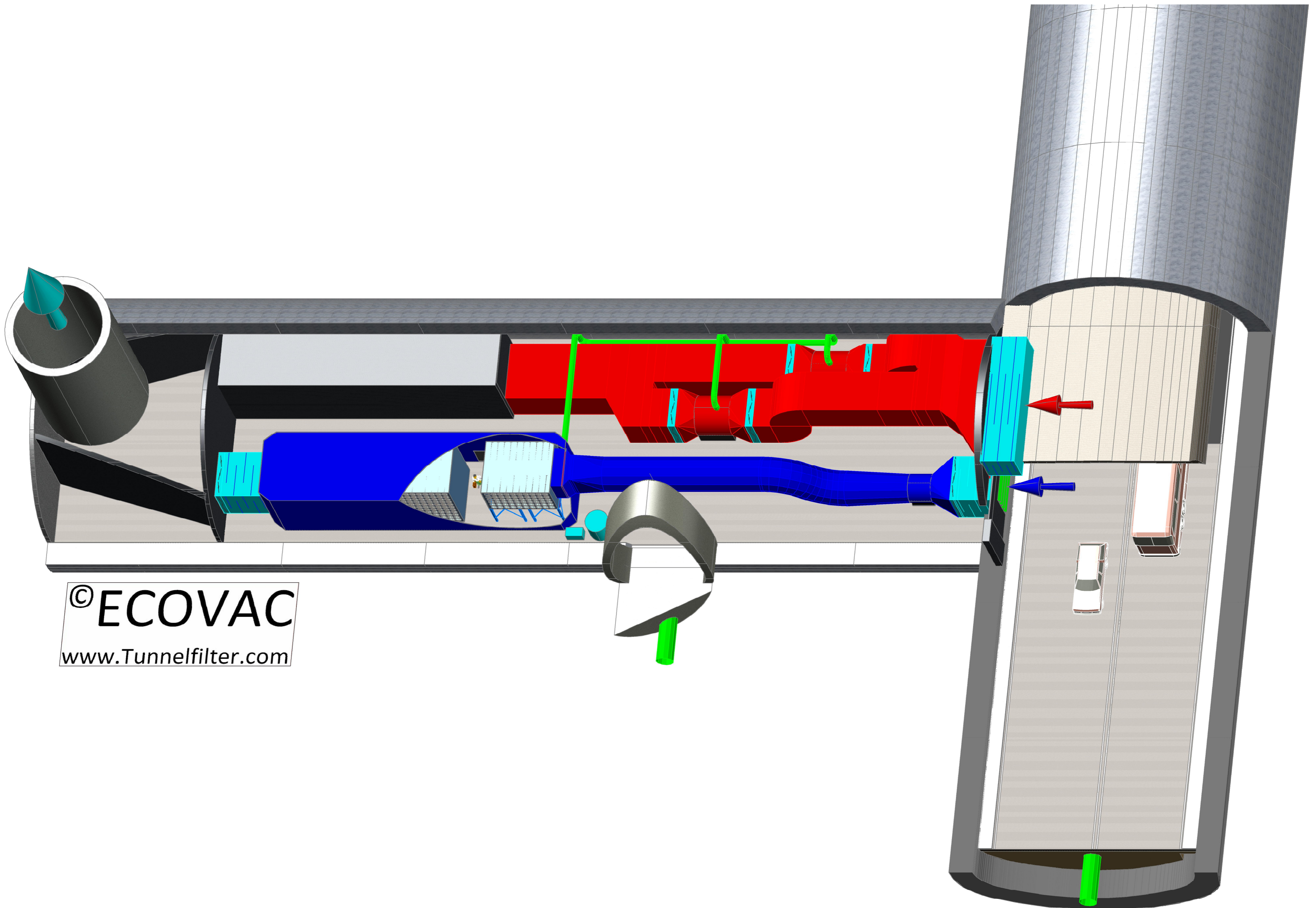
Anordnungsschema der Abluftfilterstation und der Entrauchungsventilatoren

(hier mit 2 Brandgasventilatoren, alternativ jedoch nur mit 1 BV und 2 BV an den Fluchttreppenhäusern)



Anlage I

3D-Poster von Fa. Ecovac



© ECOVAC
www.Tunnelfilter.com

Kontakt zum Verfasser:

Dipl.-Ing. Hinrich Rottmann
Ingenieurbüro für sichere Tunnel durch
Tunnellüftung und Tunnelentrauchung
Emil-von-Behring-Straße 71
60439 Frankfurt am Main
Tel. 069 / 95 73 60 11
Fax. 069 / 95 73 01 10
www.tunnellueftung.de
hinrich.rottmann@t-online.de