

Entrauchung von Straßentunneln – Möglichkeiten, Grenzen und Perspektiven des anlagentechnischen Brandschutzes

M. Wehner⁽¹⁾, E. Krokos⁽¹⁾

⁽¹⁾HBI Haerter Beratende Ingenieure, Heidenheim, Deutschland

ABSTRACT: Es wird ein Überblick über die Möglichkeiten, Grenzen und Perspektiven des bei der anlagentechnischen Brandschutzes bei der Entrauchung von Straßentunneln gegeben. Die Wirkung der baulichen und technischen Einrichtungen auf die Sicherheit im Brandfall wird erläutert. Wirkungsweise, Anwendungsbereich und Einsatzmöglichkeiten unterschiedlicher Lüftungssysteme werden detailliert beschrieben. Die Einflussmöglichkeiten aufgrund der zeitlichen Brandabläufe werden exemplarisch an einem 1,1 km langen Gegenverkehrstunnel dargestellt. Szenarien ohne Lüftungseinsatz, mit punktueller bzw. verteilter Rauchabsaugung werden gegenübergestellt. Die Einsatzgrenzen der technischen Einrichtungen werden anhand der Kriterien Branderkennung, Brandleistung und menschlichen Verhaltensweisen anhand von konkreten Beispielen verdeutlicht. Die Chancen zur weiteren Verbesserung der Sicherheit für Tunnelnutzer und Einsatzkräfte werden anhand des Einsatzes von Wassernebelanlagen, mobilen Löscheräten und Gebläsen sowie der Schulung von Nutzern und Einsatzkräften erörtert. Die heutige Anlagentechnik im Straßentunnel ist umfangreich und leistungsfähig. Die Tunnellüftung liefert bei situationsgerechtem Einsatz einen wesentlichen Beitrag zur Sicherheit. Branddetektion, Lüftungssystem und Ansteuerung müssen optimal aufeinander abgestimmt werden. Eine absolute Sicherheit gegen Katastrophen ist auch bei Einsatz von noch mehr Technik nicht möglich. Der Einfluss auf das menschliche Verhalten bietet hingegen große Chancen für eine Sicherheitserhöhung.

1 Einleitung

Die Sicherheit der Verkehrsteilnehmer bei einem Brand in einem Straßentunnel hängt stark von den technischen Einrichtungen und vom Konzept der Entrauchung ab. Nach den Bränden in den Tunneln Montblanc (24.03.1999, 39 Todesopfer), Tauern (29.05.1999, 12 Todesopfer) und Gotthard (24.10.2001, 11 Todesopfer) mit großen Todesopferzahlen (vgl. Voeltzel und Dix 2004) wurden auf europäischer Ebene Mindestanforderungen an die Sicherheit von Tunneln im transeuropäischen Straßennetz festgelegt (vgl. Richtlinie 2004/54/EG). Weiterhin wurden verschiedene nationale Regelwerke überarbeitet und dabei die Anforderungen an die technische Ausrüstung wesentlich erhöht z.B. die deutschen Richtlinien für die Ausstattung und den Betrieb von Straßentunneln (RABT 2006), die österreichische Projektierungsrichtlinie für Betriebs- und Sicherheitseinrichtungen (RVS 2008) und die schweizerische Richtlinie „Lüftung der Strassentunnel“ (ASTRA 2008). Die Kosten für die technische Ausrüstung haben bei Neuprojekten gegenüber früheren Planungen stark zugenommen. Überdies wurden und werden zahlreiche Nachrüstungen zur Anpassung der Anlagentechnik an das neue Niveau der Sicherheitsanforderungen durchgeführt. In Deutschland wurde ein umfassendes Nachrüstungsprogramm für die bestehenden Tunnel an Bundesfernstraßen mit einem Gesamtumfang von ca. 950 Mio. Euro aufgelegt, das sowohl bauliche als auch betriebstechnische Maßnahmen zur Erhöhung der Sicherheit umfasst. Dieses soll bis zum Jahr 2015 abgeschlossen sein (Colditz 2011).

Die Planungen von Neuanlagen und Nachrüstungen der Sicherheitseinrichtungen sind meist sehr komplex und umfassen unterschiedliche Gewerke und Fachgebiete. Die Maßnahmen betreffen bauliche, elektro- oder lüftungstechnische Einrichtungen. Zunehmend werden auch Wassernebelanlagen zur Brandbekämpfung und deren Wirkung und Einsatz untersucht und diskutiert (SOLIT 2012). Oft können bei der Planung von Sicherheitseinrichtungen im Hinblick auf die eingesetzte Technik, deren Funktion und auch den notwendigen Kosten sehr unterschiedliche Lösungen gefunden werden. Die

Abwägung und Beurteilung der verschiedenen Möglichkeiten erfordern neben den Fachkenntnissen auf dem jeweiligen Gebiet einen guten Überblick über die verschiedenen Techniken zur Erhöhung der Sicherheit im Brandfall. Weiterhin sind aber auch Kenntnisse über die Einschränkungen und Einsatzgrenzen der jeweiligen Sicherheitseinrichtungen wesentlich.

Lüftungsanlagen werden für den Normalbetrieb und den Brandfall vorgesehen und dimensioniert. Insbesondere der Brandfall in einem Straßentunnel und die Lüftungstechnischen Maßnahmen zur Ent Rauchung stellen stets hohe Anforderungen an die Fachkenntnis der Planer. Im Folgenden werden daher Wirkungsweise, Anwendungsbereich und Einsatzmöglichkeiten unterschiedlicher Lüftungssysteme detailliert beschrieben. Anhand von Szenarien wird auf die Einflussmöglichkeiten aufgrund der zeitlichen Abläufe eingegangen. Die Einsatzgrenzen der Tunnellüftung werden anhand der Kriterien Branderkennung, Brandleistung und menschlicher Verhaltensweisen verdeutlicht. Weiterhin wird auf die Chancen zur weiteren Verbesserung der Sicherheit für Tunnelnutzer und Einsatzkräfte anhand des Einsatzes von Wassernebelanlagen, mobilen Löschgeräten und Gebläsen sowie der Schulung von Nutzern, Betreibern und Einsatzkräften eingegangen.

2 Technische Sicherheitseinrichtungen im Straßentunnel

Die Sicherheitseinrichtungen im Straßentunnel lassen sich in bauliche und technische Einrichtungen (Abbildung 1) einteilen. Unter den baulichen Einrichtungen erhöhen Seitenstreifen im Vergleich zu Pannenbuchten insbesondere im Tunnel wesentlich die Sicherheit. Notgehewege, Notausgänge und Rettungswege dienen vorwiegend der Selbstrettung von Personen, da das Eintreffen der Rettungsdienste vor Ort bei den meisten Tunneln mindestens 5 bis 10 Minuten in Anspruch nimmt. Die Entwässerung, insbesondere die siphonierte Schlitzrinne, dient der schnellen Ableitung von brennbaren Flüssigkeiten auf der Fahrbahn und reduziert im Brandfall das Risiko der Bildung von explosiven Gasgemischen.



Abbildung 1. Sicherheitseinrichtungen im Straßentunnel

Unter den technischen Einrichtungen dient die Beleuchtung im Tunnel im Brandfall der Orientierung von Verkehrsteilnehmern und Rettungskräften. Fliehende sollen möglichst schnell einen sicheren Ort aufsuchen können. Die Tunnellüftung hat im Brandfall die Aufgabe die Selbstrettung der fliehenden Personen zu unterstützen. Ziel ist die Verringerung der Gefahren durch Sichtbehinderung, giftige Rauchgase und Hitze im Fahrraum und auf den Rettungswegen. Weiterhin unterstützt die Tunnellüftung nach Abschluss der Rettungsphase die Brandbekämpfung und die Löscharbeiten der Feuerwehr und die Entrauchung des Tunnels. Die Einrichtungen zur Verkehrsbeeinflussung (z.B. Fahrstreifen-sperrung, Sperrung einer Fahrtrichtung, Vollsperrung etc.) sollen für einen sicheren Verkehrsablauf sorgen. Dadurch sollen Kollisionen, die einen Brand zur Folge haben können, vermieden werden. Wesentlich ist auch die schnelle und sichere Sperrung der Tunnelröhren gegen Einfahrt weiterer Fahrzeuge. Die Einrichtungen zur Kommunikation (Notrufstationen, Videoüberwachung, Tunnelfunk, Verkehrsfunk/ Radio, Lautsprecheranlagen und Video) dienen insgesamt der Information der Verkehrsteilnehmer und der gegenseitigen Verständigung von Überwachungspersonal und Einsatzkräften, der Standorterkennung von in Not geratenen Verkehrsteilnehmern und der Überwachung von Tunnelraum und Rettungswegen, sowie dem Nachvollziehen eines Ereignisses durch die automatische Aufzeichnung der Abläufe. Aufgrund der manuellen und automatischen Brandmeldeanlagen kann eine schnelle und automatische Auslösung von vordefinierten Brandprogrammen erfolgen. Die

Löscheinrichtungen (Feuerlöscher und Löschwasserversorgung) ermöglichen eine Brandbekämpfung durch Verkehrsteilnehmer und Feuerwehr.

3 Lüftungssysteme im Straßentunnel

Um die Lüftungsanforderungen im Brandfall zu erreichen, kommen verschiedene Lüftungssysteme zum Einsatz, die in Abbildung 2 skizziert sind. Der Anwendungsbereich der jeweiligen Lüftungssysteme ist in länderspezifischen Richtlinien geregelt. In der Schweiz werden die Parameter Verkehrsart (Richtungs- oder Gegenverkehr), Tunnellänge, Verkehrsmenge, Lkw-Anteil und die Längsneigung im Tunnel als Entscheidungsgrundlage verwendet. In Österreich sind die Verkehrsart, die Verkehrsmenge, die Stauhäufigkeit und die Tunnellänge entscheidend. In Deutschland bestimmen die Parameter Verkehrsart, Stauhäufigkeit und die Tunnellänge das Lüftungssystem. Komplexe Tunnelbauwerke erfordern oft Sonderlösungen und die Kombination verschiedener Lüftungssysteme.

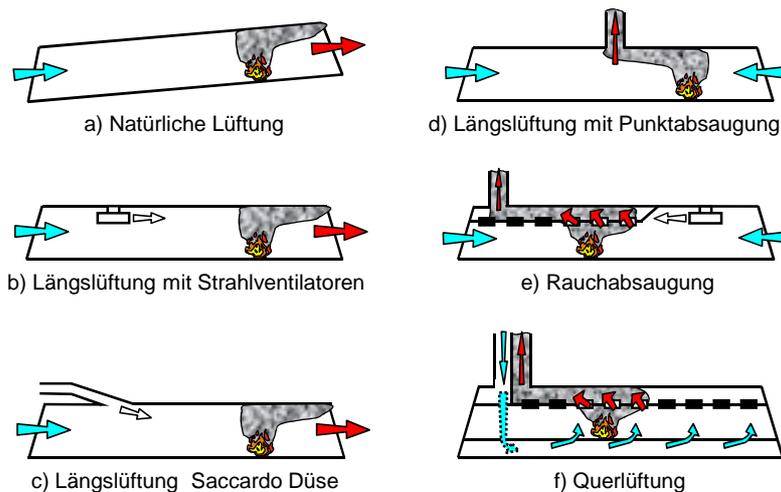


Abbildung 2. Lüftungssysteme in Straßentunneln

3.1 Natürliche Belüftung

Bei der natürlichen Belüftung (Abbildung 2a) erfolgt der Luftaustausch durch natürliche Wirkungen (Wind, Temperatur) den Wirkungen des Verkehrs (Kolbenwirkung der Fahrzeuge) und im Brandfall durch die Kaminwirkung infolge der heißen Brandgase. Für Tunnel mit einer sehr kleinen Länge und bei geringen Verkehrsmengen kommt im Brandfall diese Belüftung in Betracht. Die länderspezifischen maximalen Längen liegen in der Schweiz und in Österreich bei 500 - 700 m und in Deutschland für Gegenverkehrstunnel bei 400 m und für Richtungsverkehr bei 600 m. Auf die Strömungsverhältnisse und die Luftgeschwindigkeit im Tunnel kann kein aktiver Einfluss genommen werden, da keine Lüftungseinrichtungen vorhanden sind.

3.2 Mechanische Längslüftung mit Strahlventilatoren oder Saccardo-Düsen

Bei diesem Lüftungsprinzip (Abbildung 2b und 2c) erhält die Luftsäule einen Impuls, wodurch diese im Tunnel bewegt wird. Schadstoffe bzw. Rauchgase können einseitig abgeführt werden. Üblicherweise werden Strahlventilatoren reversibel ausgeführt, so dass beide Strömungsrichtungen realisiert werden können. Um bei der Ausführung mit Saccardo-Düsen einen Impuls in beide Richtungen zu ermöglichen, muss mindestens eine zweite Saccardo-Düse in Gegenrichtung installiert werden. Durch den Betrieb von Strahlventilatoren oder Saccardo-Düsen in entgegengesetzter Richtung kann in der Tunnelröhre ein Überdruck gegenüber der Umgebung oder einer parallelen Tunnelröhre aufgebaut werden. Dieser Lüftungsbetrieb wird verwendet, um geöffnete Querschläge und Rettungstollen im Brandfall rauchfrei zu halten.

Im Brandfall kommt die mechanische Längslüftung für Tunnel mit kleinen Längen in Betracht. Die maximalen Tunnellängen liegen in der Schweiz bei Richtungsverkehr und geringer Stauhäufigkeit bei 500 bis 3.000 m, bei Tunnel mit Richtungsverkehr und großer Stauhäufigkeit oder bei Gegenverkehr bei 500 bis 1.500 m. In Österreich sind bei Richtungsverkehr Längen von 500 bis 3.000 m und bei Gegenverkehr von 500 bis 2.000 m möglich. In Deutschland kann dieses Lüftungssystem bei Rich-

tungsverkehr mit nur ausnahmsweise stockendem Verkehr von 600 m bis 3.000 m und bei Gegenverkehr oder täglich stockendem Verkehr von 400 bis 1.200 m vorgesehen werden.

In Richtungsverkehrstunneln wird der entstehende Brandrauch durch eine ausreichend hohe Strömungsgeschwindigkeit in die Richtung des ausfahrenden Verkehrs abgetrieben. Damit kann der Bereich, in dem sich Fahrzeuge mit Personen aufgrund des Brandes aufstauen rauchfrei gehalten werden. Bei Gegenverkehrstunneln oder bei Vorliegen eines Staus von Fahrzeugen vor Beginn des Brandes befinden sich auf beiden Seiten des Brandortes Fahrzeuge und Personen im Tunnel. Daher wird in diesen Fällen eine kleine Luftströmungsgeschwindigkeit im Fahrraum angestrebt, um eine sogenannte Luft-/Rauchschichtung möglichst nicht zu zerstören. Damit soll den fliehenden Personen im Zeitraum der Selbstrettung eine überlebensfähige Atmosphäre bis zum nächsten Notausstieg gewährleistet werden. Die angestrebte Schichtung des Rauches ist von vielen Randbedingungen abhängig z.B. Luftströmungsgeschwindigkeit, Brandleistung, Rauchmenge, Tunnelquerschnitt, Fahrzeuge im Tunnel und deren Geschwindigkeit, Anteil der Lkw. Insbesondere ein im Rauchbereich im Tunnelquerschnitt vorhandener starker Luftstrahl zerstört augenblicklich eine vorhandene Luft-/Rauchschichtung. Daher dürfen Strahlventilatoren nicht im Bereich des Rauches arbeiten und Zuluftöffnungen sollen nicht im Deckenbereich angeordnet bzw. im Brandfall nicht betrieben werden.

3.3 Mechanische Längslüftung durch Punktabsaugung

Die mechanische Längslüftung durch Punktabsaugung (Abbildung 2d) erlaubt es im Brandfall an einer Stelle im Tunnel den Rauch abzusaugen. Die Luftsäule im Tunnel wird durch das Nachströmen in Richtung des Abluftschachtes bewegt. Sie stellt eine Alternative zum Längslüftungssystem mit Strahlventilatoren dar. Je nach Vorliegen von weiteren Druckkräften, ausgelöst beispielsweise durch Wind, Kaminwirkung aufgrund der heißen Brandgase oder Fahrzeugbewegungen können die Luftlängsgeschwindigkeiten in den beiden Tunnelästen rechts und links der Absaugstelle sehr unterschiedlich sein. Daher wird dieses Lüftungssystem häufig mit Strahlventilatoren in den beiden Tunnelästen kombiniert, um Einfluss auf die Luftlängsgeschwindigkeiten nehmen zu können.

Der Vorteil dieses Lüftungssystems besteht in der Möglichkeit Rauch, Hitze und damit Brandenergie aus dem Tunnelraum entfernen und einen Tunnelast rauchfrei halten zu können. Aufgrund der notwendigen Geschwindigkeit in Richtung auf den Absaugort hin kann die Luft-/Rauchschichtung nachteilig beeinflusst werden.

In der schweizerischen Richtlinie ist dieses Lüftungssystem nicht mehr vorgesehen. In Österreich kann es im Längenbereich von 1.500 bis 3.000 m eingesetzt werden und in Deutschland ist es bei Richtungsverkehr mit nur ausnahmsweise stockendem Verkehr ab 3.000 m und bei Gegenverkehr oder täglich stockendem Verkehr von 600 bis 1.200 m als eines von drei Systemen vorgesehen.

3.4 Rauchabsaugung mit Zwischendecke

Bei diesem Lüftungssystem wird der Tunnel mit einer Zwischendecke über dem Fahrraum ausgerüstet. Der Rauchabzugskanal über der Zwischendecke wird mit einzeln steuerbaren Klappen ausgerüstet. Dieser Kanal ist an Abluftventilatoren angeschlossen (Abbildung 2e). Im Brandfall werden in der Nähe des Brandes die Klappen im Rauchabzugskanal geöffnet. Der Rauch wird lokal abgesaugt und über die Abluftventilatoren abgeführt. Im Portalbereich werden zusätzlich Strahlventilatoren installiert, durch deren Einsatz symmetrische Anströmungsbedingungen im Fahrraum von beiden Seiten angestrebt werden, um die Absaugwirkung zu optimieren. Für Straßentunnel mittlerer Länge wird oft dieses Lüftungssystem gewählt. Die Klappen werden auf einer Länge von 200 bis 300 m geöffnet.

In der Schweiz ist dieses Lüftungssystem bei Richtungsverkehr und geringer Stauhäufigkeit ab 2.000 m, bei Tunnel mit Richtungsverkehr und großer Stauhäufigkeit oder bei Gegenverkehr ab 700 m vorgesehen. In Österreich wird es ab 3.000 m eingesetzt. In Deutschland ist es bei Richtungsverkehr mit nur ausnahmsweise stockendem Verkehr ab 3.000 m und bei Gegenverkehr oder täglich stockendem Verkehr ab 1.200 m vorgesehen.

3.5 Querlüftung

Die Querlüftung besitzt zusätzlich zur Rauchabsaugung mit Zwischendecke einen weiteren Kanal um die Zuluft längenverteilt auf Straßenniveau einblasen zu können (Abbildung 2f). Dieser Zuluftkanal kann in sehr langen Tunneln für den Normalbetrieb erforderlich werden. Lange, ältere Straßentunnel

sind oft mit diesem System ausgerüstet. Im Brandfall wird neben der lokalen Rauchabsaugung dann auch die Zuluft, meist mit reduzierter Menge aktiviert. Die Absaugkapazität muss um die lokal zugeführte Zuluftmenge erhöht werden.

4 Einfluss der zeitlichen Abläufe im Brandfall

Das Verständnis der zeitlichen Abläufe während eines Brandes ist für die korrekte Beurteilung der Möglichkeiten zur Entrauchung außerordentlich wichtig. Zur Berechnung von Ereignisszenarien wurde das Computerprogramm SPRINT verwendet (vgl. Riess und Bettelini 1999, Riess et al. 2000 und Riess und Brandt 2010). Unter Berücksichtigung der Einflussgrößen Tunnelgeometrie, Wirkungen des Verkehrs (Kolbeneffekt und Staubbildung vor dem Brandort), Wind auf das Tunnelportal, Kamineffekt aufgrund der Brandleistung und der Reaktionen des Tunnelsystems, wie z.B. Sperrung der Einfahrten und die Aktivierung der automatischen Brandlüftungsprogramme wird die Tunnelaerodynamik berechnet.

Der Hugenwaldtunnel besitzt die in Tabelle 1 angegebenen technischen Daten. Das derzeit vorhandene Lüftungssystem für den Brandfall besteht aus einer Rauchabsaugung über eine große Absaugöffnung, die außermittig bei 665 m vom Westportal angeordnet ist. Dort sind zwei parallel arbeitende Axialventilatoren mit 2,9 m Laufraddurchmesser und einem maximalen Gesamtabluftvolumenstrom von 308 m³/s installiert. Weiterhin sind in den beiden Tunnelästen Strahlventilatoren angeordnet, um bei asymmetrischen Strömungsverhältnissen einen Ausgleich in den beiden Tunnelästen herzustellen. Es werden jeweils nur die Strahlventilatoren im nicht vom Brand betroffenen Tunnelast eingesetzt, um eine Verwirbelung des Rauches über den ganzen Tunnelquerschnitt zu verhindern.

Tabelle 1. Technische Daten des Hugenwaldtunnels

Eine Röhre im Gegenverkehr mit 1.109 m Länge	
Querschnittsfläche Fahrraum	68 m ²
Längsneigung	Durchgehende Steigung 2,24 % von West nach Ost
Tunnellüftung	Punktabsaugung bei 665 m mit 308 m ³ /s Absaugmenge und Strahlventilatoren in beiden Tunnelästen

4.1 Einfluss der Branderkennungszeit

In Abbildung 3 werden die Einflüsse der Branderkennungszeit bei einem Brand mit einer Brandleistung von 30 MW mit einem Anstieg der Brandleistung über 10 Minuten dargestellt. Es wird von ausgeglichenen meteorologischen Randbedingungen ausgegangen, d.h. kein Wind auf die Portale und kein Temperaturunterschied zwischen Tunnelinnerem und Umgebung vor dem Brand. Die Verkehrssituation unmittelbar vor Brandbeginn entspricht den Bedingungen in der Morgenspitzenstunde um ca. 7:00 Uhr mit 500 Kfz/h nach Osten und 1.500 Kfz/h nach Westen bei einem Lkw-Anteil von 9,7 % bei einer Fahrzeuggeschwindigkeit von 80 km/h.

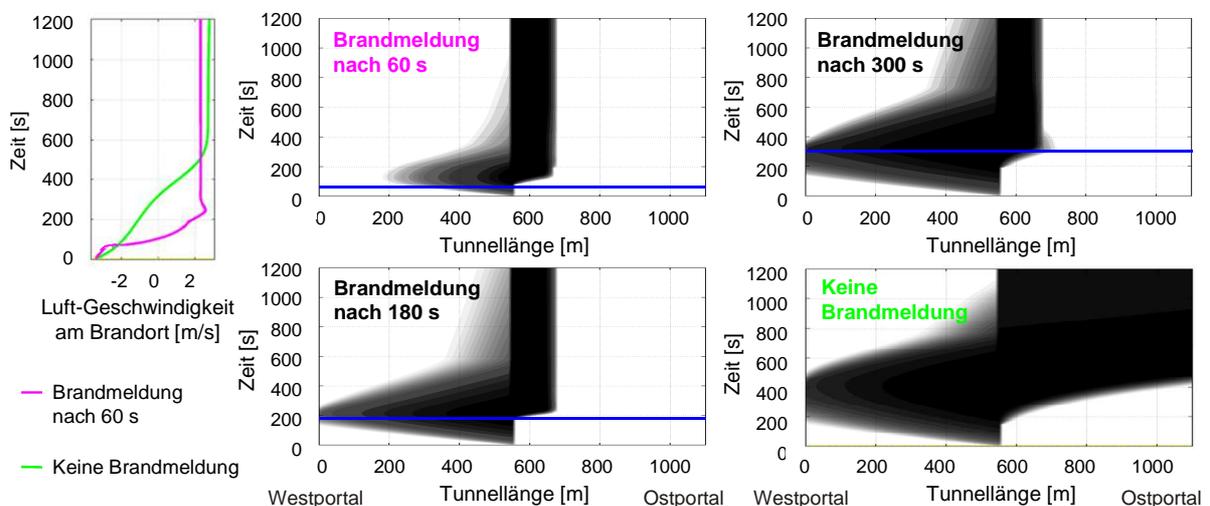


Abbildung 3. Rauchausbreitung im Hugenwaldtunnel bei unterschiedlichen Branderkennungszeiten

Zum Zeitpunkt 0 s beginnt der Brand in Tunnelmitte. Ab Brandausbruch fahren die Fahrzeuge, die den Brandherd bereits passiert haben, ungestört aus dem Tunnel aus. Die Fahrzeuge vor dem Brandherd stauen sich auf oder halten bereits an, wenn sie die Rauchfront erreichen. Die Luftgeschwindigkeit im Fahrraum ist zu Beginn der Simulation von der Kolbenwirkung der asymmetrischen Verkehrsaufteilung geprägt und beträgt rund 4 m/s nach Westen. Aus diesem Grund breitet sich der Rauch anfangs mit hoher Geschwindigkeit nach Westen aus und erreicht nach etwa 180 s das Westportal, wenn nicht vorher lüftungstechnisch eingegriffen wird. Die Kolbenwirkung des Verkehrs nimmt schnell ab und mit dem Anstieg der Brandleistung nimmt die Kaminwirkung in Richtung auf das Ostportal schnell zu, so dass ohne Lüftung zum Zeitpunkt von etwa 450 s der Rauch das Ostportal erreicht. Deutlich ist der Einfluss der Branddetektionszeit auf den Ausbreitungsbereich des Rauches erkennbar. Erst ab der Branddetektion wird aktiv Einfluss durch das Tunnelsystem genommen. Die Portale werden für die Einfahrt von Fahrzeugen gesperrt. Die Abluftanlage wird mit 308 m³/s eingeschaltet und die Strahlventilatoren im nicht betroffenen Tunnelast werden geregelt, um eine Sollgeschwindigkeit im Fahrraum zu erreichen.

Aufgrund der am Beginn sehr nachteiligen, asymmetrischen Verkehrsaufteilung kann nur bei außerordentlich schneller Reaktion des Lüftungssystems die rasche Ausbreitung des Rauches umgekehrt und dann die verrauchte Zone im Wesentlichen zwischen dem Brandort und der Absaugstelle gehalten werden. Bereits bei 180 s Branddetektionszeit erreicht der Rauch das Westportal. Zum „Zurückholen“ des ausgebreiteten Rauches werden die Strahlventilatoren im Ostast abhängig von der gemessenen Luftströmungsgeschwindigkeit im Tunnel geregelt betrieben, um im Westast eine nicht zu hohe Strömungs-Grundgeschwindigkeit von 2,2 m/s in Richtung auf die Absaugstelle zu erreichen. Dadurch soll eine vorhandene Luft-/Rauchschichtung möglichst erhalten werden, damit fliehende Personen bis zum nächsten Notausstieg gelangen können. Es erfordert daher relativ viel Zeit, bis die Rauchausbreitung wieder zurückgeführt werden kann. Vorteilhaft zeigt sich die Wirkung der Punktabsaugung indem eine Ausbreitung des Rauches auf den östlichen Tunnelast vermieden werden kann, solange die Branddetektionszeit unter 300 s bleibt. Neben der Beeinflussung der Ausbreitungszone des Rauches hilft die Regelung der Strömungsgeschwindigkeit das Einhalten einer kleinen Geschwindigkeit im vom Brand betroffenen Ast zu gewährleisten und erhöht die Chancen einer Luft-/Rauchschichtung deutlich.

4.2 Einfluss der Brandleistung

In Abbildung 4 wird der Einfluss unterschiedlicher Brandleistungen (5, 30, 100 und 200 MW) gezeigt. Kleinere Brandleistungen führen naturgemäß zu einem kleineren Gefährdungspotential hinsichtlich der Ausdehnung der Rauchzone und der zeitlichen Dauer bis zur Wiedereingrenzung der Rauchzone. Weiterhin kann bei Überschreiten der Bemessungsbrandleistung von hier 30 MW die Rauchfreihaltung des östlichen Tunnelabschnittes nicht mehr sichergestellt werden.

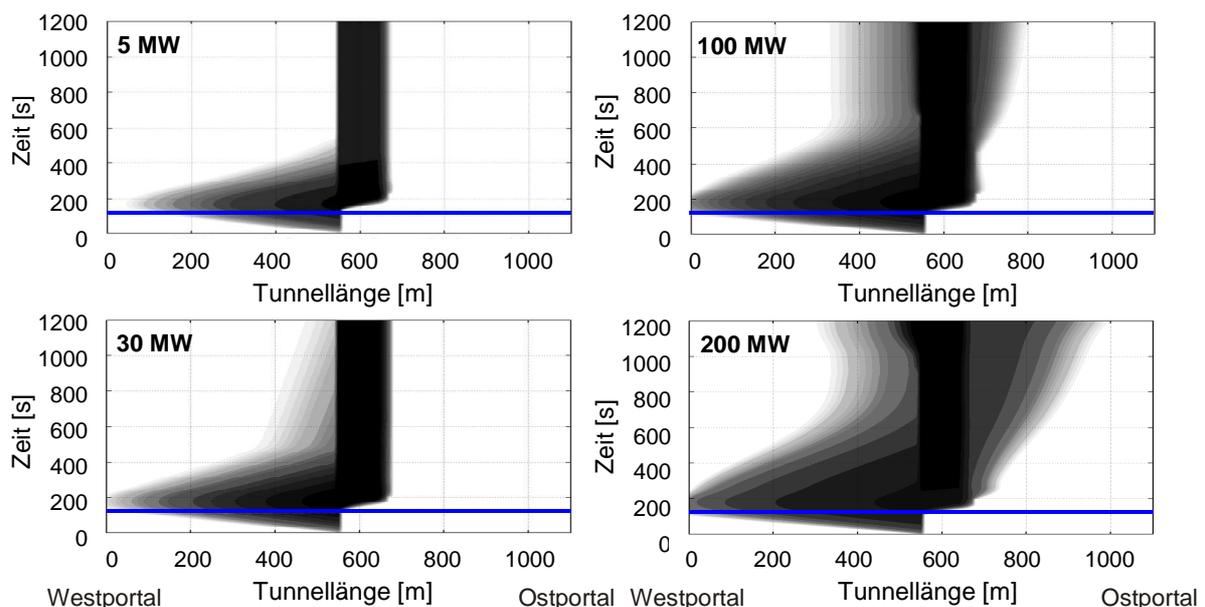


Abbildung 4. Rauchausbreitung im Hugenwaldtunnel bei unterschiedlichen Brandleistungen

Neben den Nachteilen bei der hier dargestellten Rauchausbreitung muss bei erhöhter Brandleistung auch mit höheren Temperaturen und größeren Freisetzungsmengen giftiger Gase gerechnet werden, die sowohl die Chancen der Personenselbst- und Fremdrettung als auch die Möglichkeiten der Brandbekämpfung einschränken.

4.3 Vergleich zweier Lüftungssysteme

Wehner und Brandt (2009) vergleichen am Hugenwaldtunnel die Punktabsaugung mit der verteilten Rauchausbreitung über eine Zwischendecke. Zum Vergleich dieser beiden Lüftungssysteme werden in Abbildung 5 die Rauchausbreitung für zwei jeweils untersuchte Brandorte (400 m, 555 m) gegenübergestellt. Es wird davon ausgegangen, dass kein Wind auf die Portale wirkt und vor dem Brand kein Temperaturunterschied zwischen Tunnelinnerem und Umgebung vorliegt. Die Verkehrssituation unmittelbar vor Brandbeginn und der Brandleistungsverlauf entsprechen den bisher gezeigten Darstellungen. Die Branddetektionszeit beträgt 120 s. Für den Brandort 400 m wird beim bestehenden Lüftungssystem nicht die Punktabsaugung aktiviert, sondern mit Hilfe der Strahlventilatoren der Rauch weiter in Richtung Westportal abgetrieben. Da hier eine kleine Geschwindigkeit von 1,5 m/s angestrebt wird, kann sich vom Brandort auch Rauch nach Osten hin ausbreiten (sog. Backlayering). Mit einer Zwischendecke kann der Rauch lokal auf den Absaugbereich von rund 240 m Länge begrenzt werden. Das Erreichen dieses Zustandes erfordert allerdings rund 10 Minuten, da im Rauchbereich eine kleine Geschwindigkeit angestrebt wird. Für den Brandort in Tunnelmitte (555 m) wird die Punktabsaugung aktiviert. Die Rauchkonzentrationen sind für das System mit Zwischendecke günstiger, da frühzeitig am Brandort Rauch und thermische Energie aus dem Fahrraum entfernt werden. Die endgültige Rauchausbreitungszone ist für diesen Brandort bei beiden Systemen ähnlich. Je weiter der Brand von der Absaugstelle entfernt ist, umso vorteilhafter ist das System mit Zwischendecke, da der Absaugbereich jeweils dem Brandort angepasst werden kann.

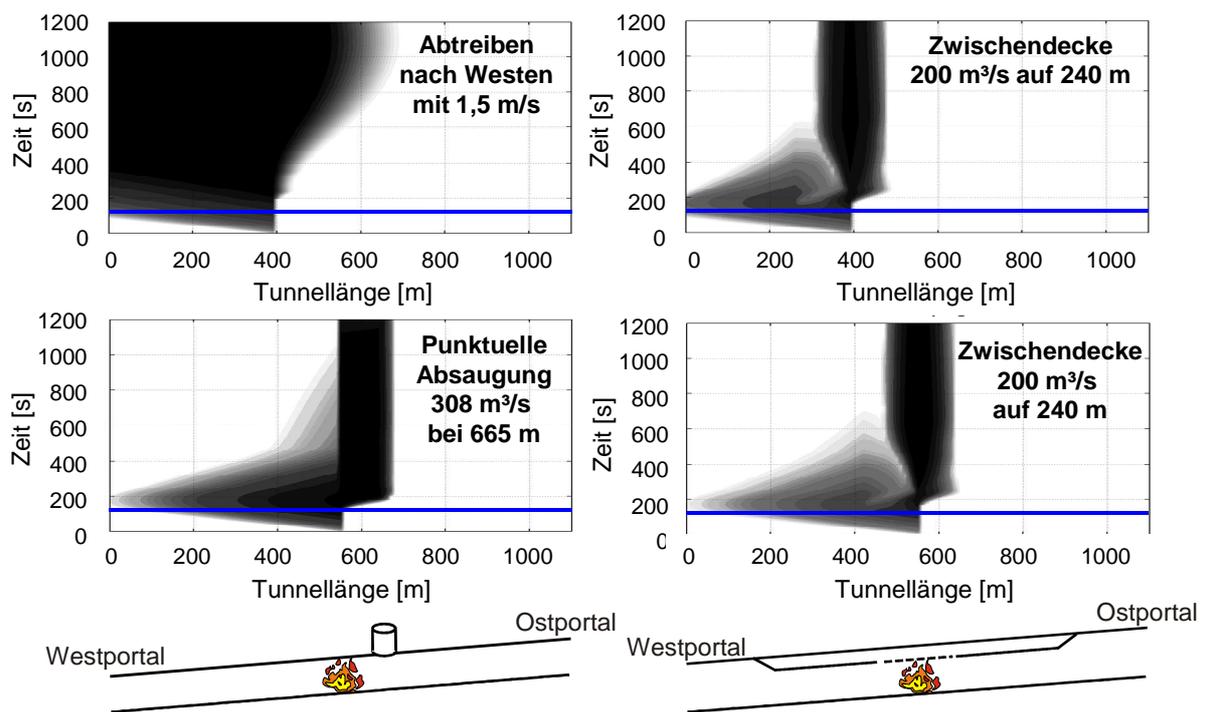


Abbildung 5. Rauchausbreitung im Hugenwaldtunnel bei unterschiedlichen Lüftungssystemen

5 Einfluss menschlichen Verhaltens

Neben technischen Grenzen der Tunnellüftung resultieren weitere Einschränkungen oft aus nicht angepassten menschlichen Verhaltensweisen. In simulierten Gefahrensituationen im Tunnel oder am Computer und bei echten Brandereignissen wurden Fehlverhalten beobachtet. Trotz der Sperrung durch eine rot anzeigende Signalanlage (Ampel) fahren weiter Fahrzeuge in den Tunnel ein und begeben sich damit in den Risikobereich. Es besteht die Gefahr der Nachahmung durch weitere Verkehrsteilnehmer. An einem im Tunnel erkennbar brennenden Fahrzeug wird vorbei in den sichtbar verrauchten Bereich gefahren. Neben der Gefährdung durch Rauchgase und eventuell erhöhten

Temperaturen riskieren diese Fahrer durch eine zunehmende Sichtbehinderung an der Weiterfahrt und eventuell auch an der Flucht gehindert zu werden. Obwohl ein brennendes Fahrzeug oder aus einem Fahrzeug quellender Rauch sichtbar sind, bleiben die Personen in ihrem Fahrzeug sitzen und setzen sich damit den Brandgefahren aus und können eventuell aufgrund der Verschlechterung der Sicht nicht mehr rechtzeitig fliehen. Aus Unkenntnis über die im Tunnel vorhandenen Einrichtungen werden diese oft nicht genutzt (Notrufeinrichtungen, Feuerlöscher, Brandmeldetaster, etc.). Hierdurch kann die Alarmierung verzögert und eine eventuell noch mögliche Brandbekämpfung verhindert werden. Oft wird das eigene Mobiltelefon zur Absetzung eines Notrufes verwendet. Dem Vorteil der vertrauten und schnellen Handhabung steht gegenüber, dass die Zuordnung des betroffenen Tunnels, der richtigen Röhre und des genauen Standortes erschwert sind.

6 Chancen zur weiteren Steigerung der Sicherheit

Trotz der großen Anstrengungen und der Investitionen der letzten Jahre werden beständig Vorschläge zur weiteren Steigerung des Sicherheitsniveaus in Straßentunneln diskutiert und vorgebracht. Bevor zusätzliche technische Einrichtungen vorgesehen werden können, sind die Wirkungen insbesondere im Zusammenhang mit den anderen Einrichtungen zu klären. Intensiv diskutiert werden derzeit Wassernebelanlagen zur Brandbekämpfung (SOLIT 2012). Die aus Großversuchen gewonnenen Erkenntnisse zur Reduktion von Brandleistung, Temperaturen und Konzentrationen von giftigen Rauchgasen sind vielversprechend. Damit können erhebliche Vorteile für den Schutz des Bauwerks und für die Einsatzbedingungen der Einsatzkräfte verbunden sein. Offen ist jedoch weiterhin die Frage, ob die Vorteile bei Einsatz einer Wassernebelanlage die Verschlechterung der Sichtverhältnisse für fliehende Personen kompensieren können. Auch die Wechselbeziehungen zwischen Tunnellüftung und Wassernebel für einen optimalen Einsatz beider Einrichtungen lassen noch viele Fragen offen.

Mobile Lösch- oder Wassernebelgeräte und Gebläse, die der Erleichterung der Brandbekämpfung dienen sollen, können hilfreich sein, soweit sie in den Einsatzkonzepten der Feuerwehren einbezogen sind. Die Vorteile für die Personenselbstrettung sind aufgrund der Eintreffzeiten der Feuerwehren von ca. 10 Minuten jedoch als begrenzt zu betrachten. Bei Gebläsen ist zu berücksichtigen, dass die stationären Einrichtungen im Tunnel auch für die Brandbekämpfung ausgelegt sind, und deutlich schneller zum Einsatz gebracht werden können.

Großes Potential wird bei der Schulung von Tunnelnutzern, Überwachungspersonal und Einsatzkräften gesehen. Die Maßnahmen, um den Verkehrsteilnehmern das richtige Verhalten für den Notfall nahezubringen sollten verstärkt werden. Möglich sind hier zum Beispiel, ein verstärkter Einsatz der Medien und der Werbung, Abhalten von Tagen des „offenen“ Tunnels mit der Möglichkeit die technischen Einrichtungen und das Bauwerk kennenzulernen, Notfallübungen und Simulationen mit freiwilligen Teilnehmern usw. Um Überwachungspersonal zu schulen und zu trainieren, bieten sich kürzlich entwickelte Tunnelsimulatoren an. Diese erlauben ohne Eingriff in den realen Tunnel das Üben von vielfältigen Abläufen und Notsituationen.

7 Zusammenfassung

Die Anlagentechnik im Straßentunnel ist umfangreich und leistungsfähig und liefert bei situationsgerechtem Einsatz einen wesentlichen Beitrag zur Sicherheit. Lüftungssystem, Ansteuerung und weitere Anlagen müssen optimal aufeinander abgestimmt werden. Eine absolute Sicherheit gegen Katastrophen ist auch bei Einsatz von noch mehr Technik nicht möglich. Der Einfluss auf das menschliche Verhalten bietet derzeit die größten Chancen für eine Steigerung der Sicherheit.

8 Referenzen

- ASTRA 2008. Bundesamt für Strassen, Eidgenössisches Departement für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK, Richtlinie Lüftung der Strassentunnel, Systemwahl, Dimensionierung und Ausstattung, ASTRA 13 001, Ausgabe 17.06.2009, V2.01
- Colditz, B. 2011. Nachrüstung von Tunneln im Bestand - eine ständige Herausforderung, Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung (BMVBS), Tagungsband, Symposium Straßentunnel in Deutschland - Neuheiten zur Sicherheit, 22. November 2011, Bundesanstalt für Straßenwesen, Bergisch Gladbach
- Directive 2004/54/EC of the European Parliament and of the Council of 29 April 2004 on minimum safety requirements for tunnels in the Trans-European Road Network

- RABT 2006. Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, Richtlinien für die Ausstattung und den Betrieb von Straßentunneln, RABT, Ausgabe 2006
- Riess, I., Bettelini, M. 1999. The Prediction of Smoke Propagation Due to Tunnel Fires, ITC Conference Tunnel Fires and Escape from Tunnels, Lyon, Mai 1999
- Riess, I., Bettelini, M., Brandt, R. 2000. Sprint – A Design Tool for Fire Ventilation, 10th International Symposium Aerodynamics and Ventilation of Vehicle Tunnels, Boston, November 2000
- Riess, I., Brandt, R. 2010. „ODEM“: A one-dimensional egress model for risk assessment, 5th International Conference 'Tunnel Safety and Ventilation' 3.-4. Mai 2010, Graz
- RVS 2008. Österreichische Forschungsgemeinschaft Straße und Verkehr, Arbeitsgruppe „Tunnelbau“, Arbeitsausschuss „Betriebs- und Sicherheitseinrichtungen“, Projektierungsrichtlinie, RVS 09.02.31, Ausgabe 1. August 2008
- SOLIT 2012. Safety of Life in Tunnels, Engineering guidance for a comprehensive evaluation of tunnels with fixed fire fighting systems, Version: 1.1; Status: July 2012, Cologne
- Voeltzel, A., Dix A. 2004. A comparative analysis of the Mont-Blanc, Tauern and Gotthard tunnel fires, Joint Issue ITA/PIARC of Route-Roads on Fire Safety in Tunnels.
- Wehner, M., Brandt, R. 2009. Nachrüstung einer Zwischendecke zur Rauchabsaugung aus Straßentunnel. Entscheidung mittels einer Risikobeurteilung, Forschung und Praxis, U-Verkehr und unterirdisches Bauen; 43 aus: Tunnel - Räume für zukunftssichere Mobilität. STUVA-Tagung in Hamburg, 1.-3. Dezember 2009, Bauverlag BV 2009, 218-226, ISBN 978-3-7625-3636-9, Köln