

Ergebnisse von dem realistischen Brandversuch mit zwei Pkw und 12 MW Brandleistung zur Prüfung der neuartigen Entrauchungsanlage im 1.528 m langen Malbergtunnel in Bad Ems

Vorwort

In diesem Bericht werden dem geneigten Leser im Hinblick auf die im Brandfall sehr komplexen Vorgänge, die insbesondere beim Einsatz neuer Entrauchungsstrategien mit neu entwickelten Entrauchungsaggregaten und neuartigen, automatischen Steuerungen beherrscht werden müssen, alle verfügbaren Daten und Fakten möglichst detailliert und im richtigen Zusammenhang so dargestellt, wie sie dem Verfasser zur Verfügung standen, so dass diese dem möglichen Anwender bei seiner Arbeit an ähnlichen Tunnelprojekten als Fundstelle von größtmöglichem Nutzen sein mögen.

Der Bericht ist das Ergebnis einer Untersuchung und eines Gutachtens, das der Verfasser für den Landesbetrieb Mobilität Rheinland-Pfalz erstellt hat. Der Inhalt des vorliegenden Berichtes wurde dem Verfasser vom LBM zur Veröffentlichung freigegeben. Er darf somit kopiert und weitergegeben werden. Die Inhalte und Ergebnisse dürfen jedoch nicht verändert oder gekürzt werden. Der Bericht ist als das geistige Eigentum des Verfassers urheberrechtlich geschützt. Bei Verweisungen oder Referenzierungen ist deshalb immer die komplette Fundstelle zu benennen.

Abschließend möchte der Verfasser den Mitarbeitern des Projektes vom Landesbetrieb Mobilität Rheinland-Pfalz für deren freundliche Unterstützung und Hilfe bei der Beschaffung von Unterlagen und Photos danken sowie dem Büro „industry soft“ für die Bereitstellung von Daten aus der Lüftungssteuerung, die in diesen Bericht eingeflossen sind.

Frankfurt am Main, den 17.07.2007

Inhaltsverzeichnis

	Seite
1. Zusammenfassung	3
2. Projektbeschreibung	4
3. Funktion der Lüftungssteuerung und Regelung	12
4. Messung der Lufttrübung mit Photometern	17
5. Messung der Brandgastemperatur mit einem Brandsensorkabel	19
6. Überwachung der Deckentemperatur mit Pt100-Fühlern	20
7. Rauchdetektion mittels Kamera und Videobildauswertung	20
8. Messung der CO-Gaskonzentration mit elektrochemischen Sensoren	21
9. Messung der Rauchgastemperatur mit Sonometern	23
10. Messung der Strömungsgeschwindigkeit mit Sonometern	25
11. Auswertung der Versuchsergebnisse	30
12. Wirksamkeit der Entrauchungsanlage	35
13. Vorprüfung der Entrauchungsanlage	36
14. Weitere Ergebnisse	37
15. Kosten des realistischen Brandversuchs	41
16. Nachrüstungsmaßnahmen	42
17. Photodokumentation und Videodokumentation des Brandversuchs	48

Ergebnisse aus einem realistischen Brandversuch mit zwei Pkw und 12 MW Brandleistung im B260 Malbergtunnel in Bad Ems

Von: *Dipl.-Ing. Hinrich Rottmann*
Ingenieurbüro für sichere Tunnel durch
Tunnellüftung + Tunnelentrauchung

1. Zusammenfassung

In Bad Ems wurde Ende 2006 der 1.528 m lange Malbergtunnel in offener Bauweise mit nur einer Röhre für den Gegenverkehr fertig gestellt. Dieser Tunneltyp stellte für den Fall eines Fahrzeugbrandes außergewöhnliche Anforderungen an die Planung und Ausführung der lufttechnischen Anlagen, um die Sicherheit der Tunnelnutzer und die der Einsatzkräfte zu jedem Zeitpunkt und an jedem Ort im Tunnel zu gewährleisten.

Es wurden deshalb auf Basis internationaler Forschungs- und Versuchsergebnisse neuartige technische Lösungen entwickelt, deren Komponenten vorab in umfangreichen Werksprüfungen bei den jeweiligen Herstellern auf ihre Eignung für den Entrauchungseinsatz getestet wurden und die abschließend, in einem realistischen Brandversuch mit zwei Pkw und 12 MW Brandleistung, ihre Bewährungsprobe zu bestehen hatten.

Der Test zeigte, dass die Tunnellüftung und Tunnelentrauchung zuverlässig und wie geplant funktionierten. Insbesondere konnte die Rauchausbreitung auf einen 100 m langen Bereich zwischen zwei Entrauchungsstationen begrenzt und eine stabile Schichtströmung über eine halbe Stunde, vom Brandbeginn bis zum Löscheinsatzende, und im gesamten Bereich aufrecht erhalten werden. In dieser Zeit waren die Einsatzkräfte, die beidseitig in 20 m Abstand vom Brandort als Eingreifreserve postiert waren, zu keinem Zeitpunkt durch die Rauchsicht gefährdet, so dass sie den Brand von Anfang bis Ende aus nächster Nähe verfolgen konnten.

Die Rauchausbreitung wurde durch ein neu entwickeltes System der Brandfrüherkennung und Rauchgasabsaugung kontrolliert, bei dem die Absaugung automatisch der Rauchausbreitung folgt.

Dafür wurde mit stufenlos regelbaren Strahlventilatoren in jeder Tunnelhälfte möglichst die gleiche Luftströmung von jedem Portal zum Brandort erzeugt und diese dynamisch mit der jeweiligen Temperatur und Strömungsgeschwindigkeit auf 14 Displays in der TLZ dargestellt.

Zur Entrauchung waren von den verfügbaren 94 Entrauchungsventilatoren mit einer Gesamtabsaugleistung von $1.316 \text{ m}^3/\text{s}$ maximal 30 ERV immer gleichzeitig einsetzbar, mit einer möglichen Absaugleistung von insgesamt $420 \text{ m}^3/\text{s}$, so dass ggf. auch eine kalorische Brandleistung von 200 MW zu beherrschen gewesen wäre.

Die Rauchsicht hatte bei diesem Versuch eine Mächtigkeit von etwa 1,0 m, so dass nach dem Brand nur wenige Ausstattungsteile an der Decke zu erneuern waren, da alle Einbauten, die unterhalb von 4 m über Fahrbahnoberkante montiert waren, vom Brandrauch unberührt und funktionsfähig blieben (bei einem Lkw-Brand ist jedoch mit einer mächtigeren Rauchsichtdicke zu rechnen).

Ferner waren die Fluchttreppenhäuser im Entrauchungsbetrieb durch den im Tunnel erzeugten Unterdruck von etwa -10 Pa gegen jede Verrauchung geschützt (etwa -40 Pa bei 30 Ventilatoren).

Mit dem realistischen Brandversuch von 2 Pkw konnte weltweit erstmalig eine sofortige, automatische und vollständige Rauchabsaugung mit stabiler Rauchsichtung und völlig rauchfreier Atmosphäre in allen Flucht- und Rettungswegen nachgewiesen und der Sicherheitsstandard für zukünftige Tunnel neu definiert werden.

Die Notwendigkeit einer Überprüfung und Neubewertung der überkommenen Regelungen und Maßnahmen zur Tunnelsicherheit erscheint hiermit angezeigt.

2. Projektbeschreibung

Der Tunnel ist 1.528 m lang, mit 1 Pannenbucht in Tunnelmitte, 6 Fluchttreppenhäusern und 1 Betriebsgebäude, das etwa 500 m östlich vom Westportal liegt (siehe Plan 1).

Er besteht aus einer Röhre mit Rechteckquerschnitt von 9,5 m Breite und 5,0 m Höhe, in der 2 getrennte Fahrstreifen zur Aufnahme des Gegenverkehrs vorhanden sind (siehe Plan 2).

Aufgrund seiner Lage in dem engen Flusstal der Lahn und dessen dichter Bebauung musste der Tunnel bei offener Bauweise in den Hangfuß des Malbergs gegraben und dabei unter einem Gleis der Lokalbahn (Lahntalbahn) und einer Anliegerstraße (Villenpromenade) entlang geführt werden.

Zur Unterbringung der Sicherheitstechnik wurden in der Pannenbucht und in den Nischen der Strahlventilatoren und des Abluftventilators jeweils eine Elektronische und - bei jeder zweiten - eine Hydrantennische eingerichtet (siehe Plan 3).

Aufgrund eines früheren Lüftungsgutachtens wurde die Tunnellüftung als einseitige Längslüftung mit Strahlventilatoren konzipiert, um die Abgase immer nur in die Richtung zum Westportal zu bewegen, wo sie von einem Abluftventilator und einem Abluftkamin in 40 m Höhe über SOK, am bewaldeten Hang des Malbergs, ausgeblasen werden (siehe Plan 4).

Nach der Planfeststellung ergaben sich jedoch 2001 infolge der alpinen Tunnelbrände neue Sicherheitsanforderungen, die nachträglich den Einbau einer zusätzlichen Entrauchungsanlage verlangten.

Für deren Umsetzung musste der Verfasser deshalb völlig neue Lösungen finden, um das angestrebte Sicherheitsniveau zu erreichen und die landschaftsgestalterischen Vorgaben zu erfüllen.

Im Ergebnis wurden 94 Entrauchungsschächte vorgesehen, die sich unauffällig in die Landschaft und in das Straßenbild einpassten und dabei der Kontur des wiederhergestellten Hanges folgten.

Für die Rauchabsaugung wurden jeweils 6 Schächte zu einer Entrauchungsstation zusammengefasst und quer zur Tunnelachse angeordnet, um den Rauch über die gesamte Tunnelbreite abzusaugen.

Dort, wo die Bahngleise und die Anliegerstraße über dem Tunnel lagen, mussten die Schächte jedoch längsseitig des Tunnel angeordnet werden, so dass die Zahl der Schächte dort für jede Station verdoppelt wurde, um die Wirksamkeit der Rauchabsaugung sicherzustellen.

Alle Schächte wurden mit dem gleichen, freien Querschnitt von jeweils 1,25 x 1,25 m in die Tunneldecke eingelassen und mit angepassten Höhen von 2,5 m bis 8,0 m ins Freie geführt.

In jedem Schacht wurde ein hitzegeprüfter Entrauchungsventilator (der bei 400°C über 90 Minuten unter Vollast geprüft wurde) mit 14 m³/s Fördermenge und 7,5 kW Nennleistung eingebaut.

Für jeden Motor wurde ein Sanftanlauf zur Begrenzung der Stromaufnahme für ein gleichzeitiges Einschalten mehrerer Ventilatoren berücksichtigt.

Zum Schutz der Anlieger vor Lärm und Abgasen aus dem Tunnel wurden alle Schächte mit Abdeckungen versehen, die als Klappen ausgeführt wurden, um sie beim Start der Entrauchungsventilatoren automatisch öffnen zu können.

Die Klappen wurden mit einem drehmomentstarken Elektromotor und Schwenkhebelantrieb versehen, der die Klappen auch gegen eine erhebliche Schneelast innerhalb von 18 Sekunden vollständig auffährt. Die Klappenantriebe und Motoren wurden zudem einem Hitzekammertest unterzogen.

Ferner wurde jede Ansaugöffnung in der Tunneldecke mit einer Flammensperre gegen Flammenüberschläge ins Freie gesichert, um bei einem großen Brand im Tunnel etwaige unkontrollierte Sekundärbrände im Freien sicher zu verhindern.

Für die Steuerung der einseitigen Tunnellängslüftung und zur automatischen Entrauchung wurden vom Verfasser neuartige Regelanlagen und Meßsysteme sowie Analysemethoden zur Brandfalldiagnose entwickelt.

Diese sollten das Betriebspersonal bei der Überwachung des Tunnels entlasten und in der kritischen frühen Phase eines Brandes die zeitaufwendigen und fehlerträchtigen Lagebeurteilungen und Entscheidungsfindungen durch das Personal durch eine vorprogrammierte und sehr schnelle Steuerung mit allen erforderlichen Sicherheitsschaltungen zur Tunnellüftung und Tunnelentrauchung ersetzen.

Hierzu wurden vom Verfasser u. a. 13 Strahlventilatoren mit jeweils 11 kW Motorleistung eingesetzt, deren Drehzahlen stufenlos mittels FU von 300 Upm bis 3000 Upm regelbar sind und die in Verbindung mit einer genauen Messung der Strömungsgeschwindigkeit mit Ultraschallmessgeräten die exakte Kontrolle der Luftströmung von den Portalen zum Brandort ermöglichen.

Mit den regelbaren Ventilatoren wurden auch bedeutende Energieeinsparungen möglich, weil sie vorwiegend im unteren Drehzahlbereich und bei minimaler Leistung von 1,0 kW bis 1,5 kW betrieben werden, wobei der Hersteller etwaige kritische Resonanzdrehzahlen zu beachten hatte.

Aus strömungstechnischen Gründen wurde eine Steuerung gewählt, in der alle Strahlventilatoren im Regelbetriebsfall immer simultan und synchron, also mit gleicher Drehzahl, betrieben werden.

Es wurden ferner 14 CO-Gaskonzentrationsmesser, 14 Lufttrübungsmessgeräte und 14 Strömungsmessgeräte eingebaut, die die erforderlichen Daten für die Luftqualitätsregelung und für die schnelle und sichere Brandfrüherkennung und Steuerung der Entrauchungsanlage liefern.

Dabei verlangten die unterschiedlichen Lüftungs- und Entrauchungsanlagen völlig unterschiedliche Regelstrategien, die im Brandfall, gerade im Zeitpunkt der Umschaltung von dem einen in den anderen Modus, besonders hohe Anforderungen stellten, um eine sich rasch ausbreitende Rauchschicht nicht sofort durch einen automatischen Einsatz der Strahlventilatoren zu verwirbeln.

Es handelte sich also um neuartige Systeme mit sehr komplexen und zeitkritischen Vorgängen der Steuerung, die nur in einem realistischen Brandversuch zu testen waren, um den erforderlichen Nachweis der Eignung und Funktionstüchtigkeit für die geforderte Sicherheit zu erbringen und auch mögliche Schwächen aufzuzeigen, die einer Nachbesserung bedürften.

Für den Test wurden zwei Pkw ausgewählt, ein Opel Monza 2,5 (Benziner) und ein Ford Sierra Kombi (Diesel), die beide halb voll getankt und mit jeweils 2 Reservereifen als Zusatzbrandlast (je einer im Front und einer im Kofferraum) am Brandort aufgestellt wurden, wobei die 2 Reservereifen die kalorische Brandleistung auf etwa 7 MW pro Fahrzeug erhöhten.

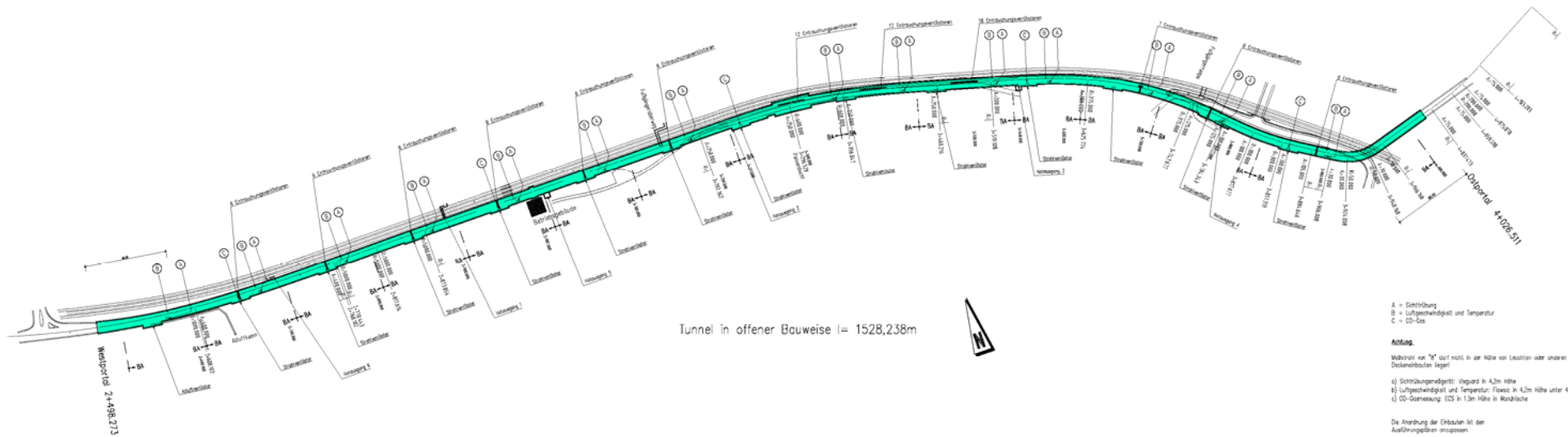
Da die beiden Fahrzeuge ihren Vollbrand jedoch etwas zeitversetzt erreichten, wurde für diesen Versuch nur von einer maximalen Brandleistung von etwa 12 MW ausgegangen.

Der Brandplatz wurde in Höhe der Wendebucht der Anliegerstraße eingerichtet (siehe Plan 5).

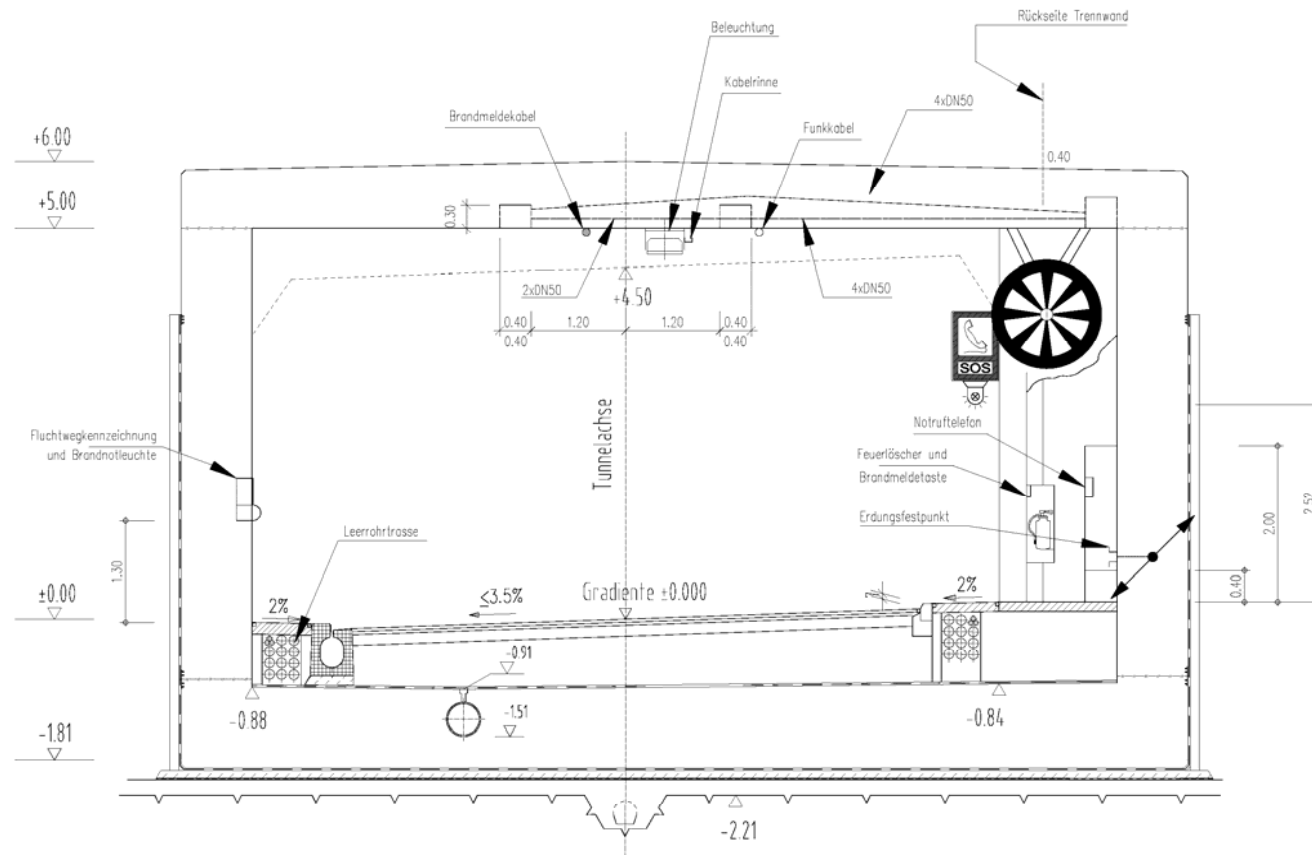
Die Beobachtung des Versuches erfolgte direkt am Brandort durch die lokale FFW, die mit PA-Geräten und Wärmebildkameras ausgestattet war, als auch in der TLZ im Betriebsgebäude an den 14 Displays, an denen die Strömungen und Temperaturen in den einzelnen Tunnelabschnitten leicht erkennbar dargestellt wurden, sowie im Freien bei den aktivierten Entrauchungsstationen.

Zur Vermeidung von Brandschäden war die Tunneldecke zwischen 2 Entrauchungsstationen komplett mit Hitzeschutzplatten aus Aestuver verkleidet, ebenso die beiden Tunnelwände mit jeweils einem 1 m hohen Streifen, der jeweils an die Tunneldecke anschloss.

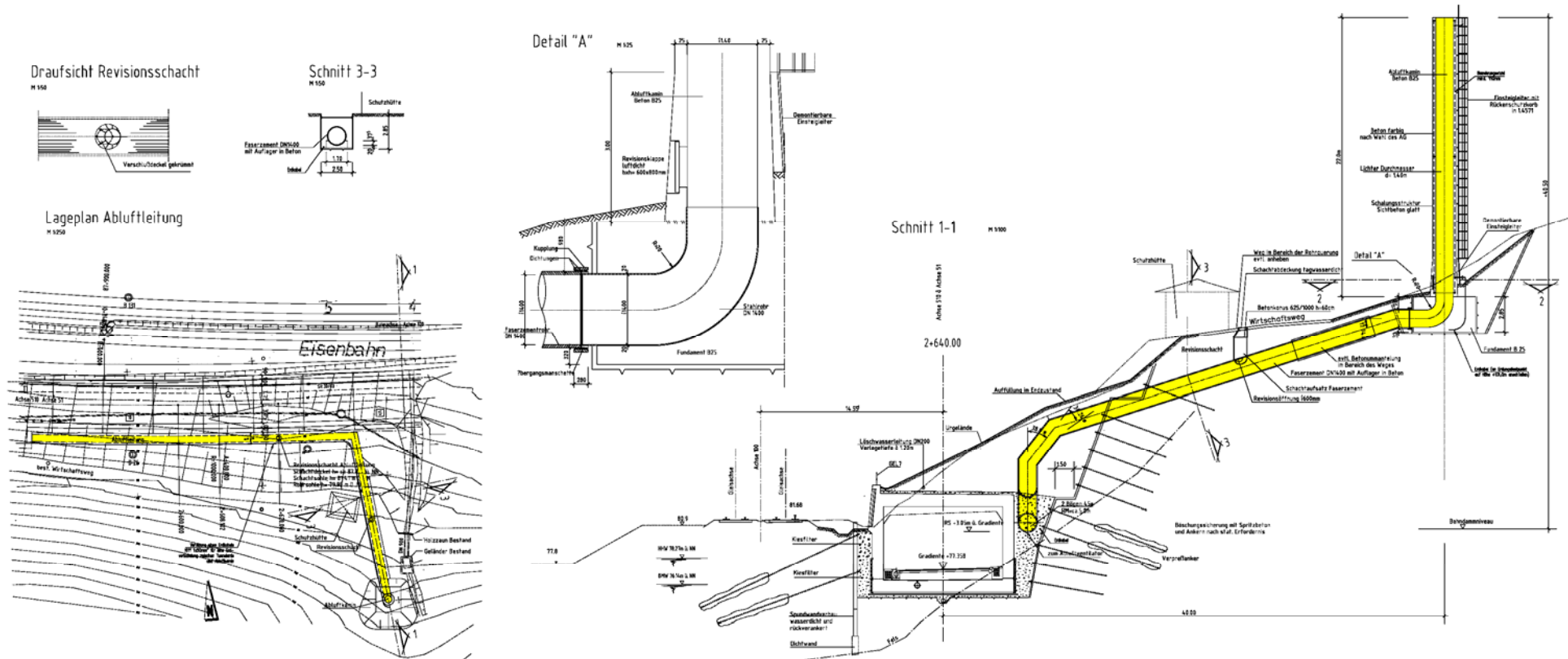
Am Brandort selbst wurden die Wände in voller Höhe auf 10 m Länge gegen die Strahlungswärme verkleidet und alle Wandfugen und Dichtungen abgedeckt. Die Fahrzeuge wurden zum Schutz des Asphaltbelages in ein 10 cm hohes Sandbett aus feuchtem Kabelsand von 10,0 x 9,5 m gestellt



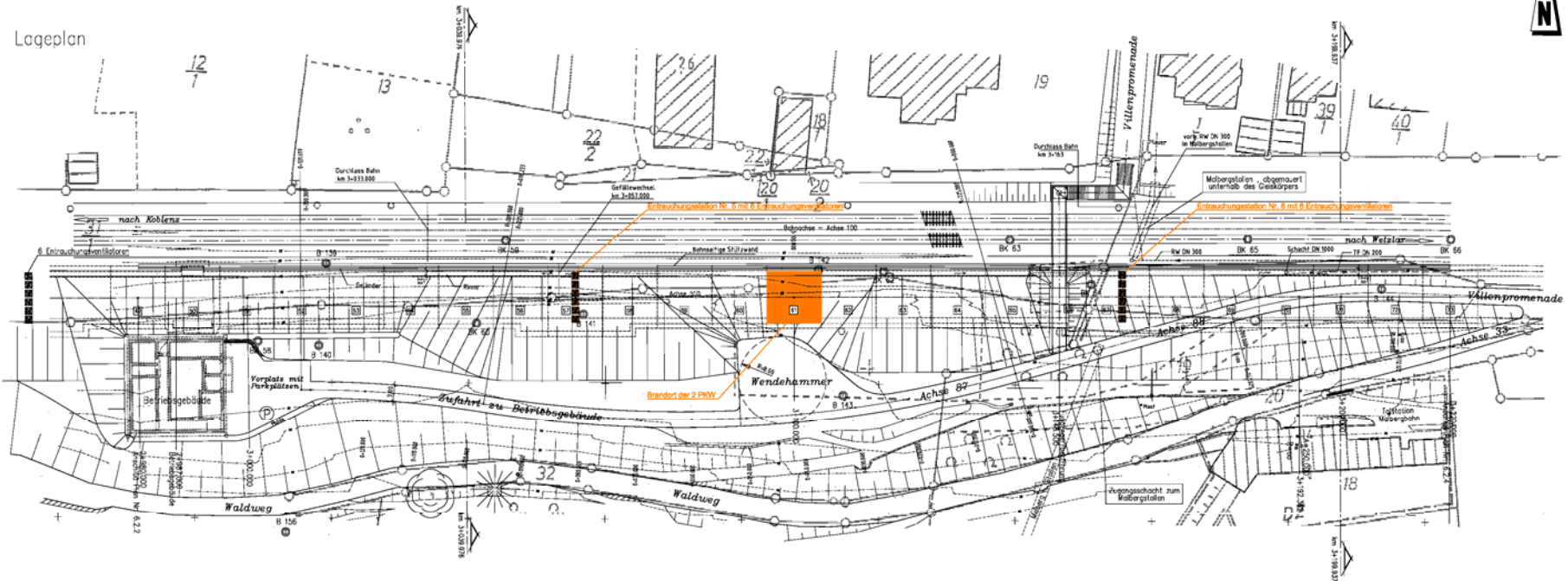
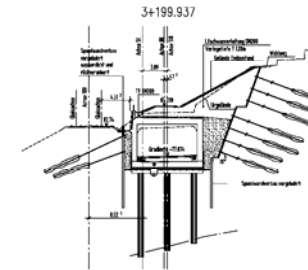
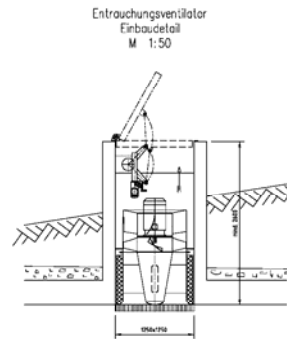
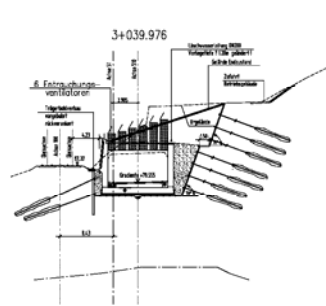
Plan 1: Übersichtslageplan des B260 Malbergtunnels in Bad Ems



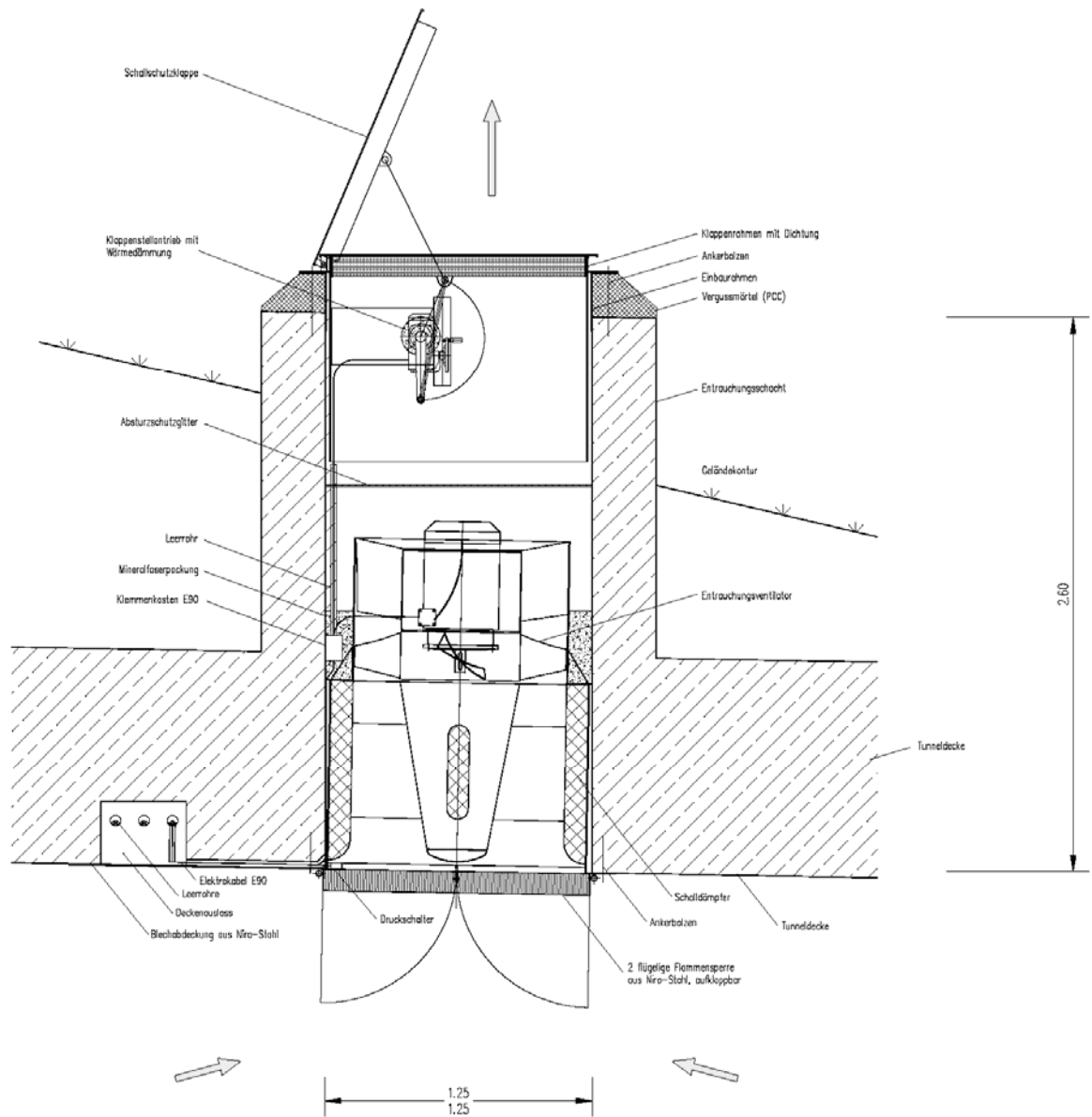
Plan 2: Querschnitt mit Installationsnische für Strahlventilator, Hydrant, Notruf, MSR-, Elektro-, Video- und Funkanlagen



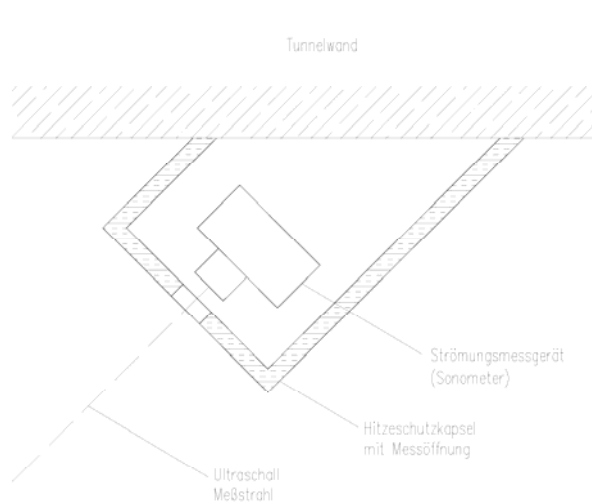
Plan 4: Abluftkaminanlage am Westportal (Kaminkopfhöhe = 40 m über SOK)



Plan 5: Lage des Brandversuches im Block 61 (BMA Nr. 6), nahe unter dem Wendehammer in der Anliegerstraße



Plan 6: Einbauzeichnung des Entrauchungsaggregates im Entrauchungsschacht



Plan 7: Einbauzeichnung des Sonometers mit einer Hitzeschutzkapsel an der Tunnelwand

3. Funktion der Lüftungssteuerung und Regelung

Die Steuerung und Regelung erfüllt in diesem Tunnel folgende Aufgaben:

- den Regelfall einer einseitigen Längslüftung zum Abluftkamin am Westportal,
- den Brandfall mit Entrauchungsventilatoren und Strömungsabgleich zwischen den Portalen.

Es handelt sich dabei um zwei völlig unterschiedliche Systeme und Betriebsweisen, die nicht nur in ihrer jeweiligen Funktion sondern vor allem auch bei dem Wechsel von dem einen in den anderen Betriebsfall besondere Anforderungen an die Steuerung und Regelung der Anlage stellen.

Für den sofortigen Wechsel der Funktion vom Regelfall zum Brandfall wurde deshalb ein automatisches System erforderlich, das unabhängig von menschlicher Beobachtungsgabe und irgendwelchen subjektiven Bewertungs- und Entscheidungsprozessen innerhalb von Sekunden die notwendigen Schaltungen vollzieht, um die sonst unvermeidbare und unumkehrbare Verwirbelung der Rauchschicht - und damit auch eine finale Gefährdung der Tunnelnutzer - zu verhindern.

Mit den bisherigen Systemen zur Branddetektion war das nicht möglich, da die verschiedenen, linearen Sensorsysteme dafür zu langsam und zu spät reagierten.

Auch die Rauchererkennung durch Auswertung von Videobildern war dafür nicht geeignet, da die Systeme empfindlich auf Störeinflüsse im Tunnel reagierten und viele Fehlalarme produzierten.

Der Verfasser hat deshalb schon im Jahr 2001 ein neues sicheres System zur Brandfrüherkennung entwickelt und der Entwurfs- und Ausführungsplanung für diesen Tunnel zugrunde gelegt.

Dieses System nutzt die im Tunnel zur Messung der Lufttrübung ohnehin vorhandenen Photometer zur schnellen Rauchdetektion und zur Bildung eines Voralarms schon im Stadium eines Entstehungsbrandes, der die Strahlventilatoren der Längslüftung sofort ausschaltet und automatisch die Entrauchungsanlage startet.

Aber auch diese Geräte sind nicht ganz frei von Störeinflüssen und reagieren bei lokalen Staubaufwirbelungen und senkrechten Lkw-Auspuffendrohren ggf. auch mit einem Voralarm.

Zur Klärung der für den Brandfall wichtigen Frage, ob es sich dabei im jeweiligen Einzelfall um eine lokale Staubaufwirbelung, ein Auspuffendrohr oder um einen Entstehungsbrand handelt, wurde vom Verfasser eine Differentialdiagnose eingeführt, die unter Zuhilfenahme weiterer geeigneter Sensoren und Detektoren sehr schnell die Frage klärt, ob ein Brand vorliegt oder nicht.

Dazu wurden die im Tunnel ohnehin vorhandenen CO-Konzentrationsmesser (ECS) und die zur Strömungsmessung vorhandenen Sonometer sowie das Brandsensorkabel als Temperaturmesser und Kriterienlieferanten für die Brandfalldiagnose genutzt.

Jedes dieser Meßsysteme liefert im Brandfall einen eigenen Voralarm an das Diagnosesystem.

Aber jedes dieser Systeme ist auch nicht ganz frei von lokalen Störeinflüssen.

Erst durch ein Diagnoseprogramm ist eine schnelle und sichere Bewertung und Selektion der einzelnen Voralarme zur automatischen Branderkennung möglich.

Hinweis: Selbstverständlich löst das Sensorkabel bei Erreichen der Alarmschwelle unabhängig vom Diagnosesystem weiterhin einen eigenen externen Brandalarm aus, der jedoch beim Einsatz des Diagnosesystems erst sehr viel später verfügbar war, als das Ergebnis aus dem Diagnoseverfahren (siehe die in diesem Bericht mitgeteilten Versuchsergebnisse).

Für die Brandfrüherkennung wurde deshalb vom Verfasser die Notwendigkeit einer Bestätigung des ersten Voralarms durch einen zweiten, aus einem vom ersten Voralarm völlig unabhängigen System, als Kriterium für die Auslösung eines externen Brandalarms eingeführt.

Hierzu waren nur solche Voralarme geeignet und zu berücksichtigen, die gleichzeitig (im selben Zeitintervall von 3 Minuten) und aus demselben Brandmeldeabschnitt von zwei unterschiedlichen Meßsystemen geliefert wurden, um dadurch alle Störeinflüsse von wandernden Staub- oder Abgaswolken bewegter Fahrzeuge sicher auszuschließen.

Zur Lokalisierung des Brandortes wurde der Tunnel in jeweils 100 m lange Brandmeldeabschnitte aufgeteilt, denen jeweils ein Strahlventilator, eine Entrauchungsstation, ein Photometer, ein Sonometer, ein ECS, ein Thermoelement (wird nachgerüstet) und ein Sensorkabelabschnitt zugeordnet wurden, wie in der nachstehenden Tab. 1 gezeigt.

EN0	EN1	EN2	EN3	EN4	EN5	EN6	EN7	EN8	EN9	EN10	EN11	EN12	EN13
BMA 1	BMA 2	BMA 3	BMA 4	BMA 5	BMA 6	BMA 7	BMA 8	BMA 9	BMA 10	BMA 11	BMA 12	BMA 13	BMA 14
CO1	CO2	CO3	CO4	CO5	CO6	CO7	CO8	CO9	CO10	CO11	CO12	CO13	CO14
TR1	TR2	TR3	TR4	TR5	TR6	TR7	TR8	TR9	TR10	TR11	TR12	TR13	TR14
TS1	TS2	TS3	TS4	TS5	TS6	TS7	TS8	TS9	TS10	TS11	TS12	TS13	TS14
TE1	TE2	TE3	TE4	TE5	TE6	TE7	TE8	TE9	TE10	TE11	TE12	TE13	TE14
TK1	TK2	TK3	TK4	TK5	TK6	TK7	TK8	TK9	TK10	TK11	TK12	TK13	TK14

Tabelle 1: Verteilung der Messgeräte von West nach Ost (Brandort war im BMA6 = EN05)

Legende:

- EN = Elektronische
- BMA = Brandmeldeabschnitt
- CO = ECS-Sensor zur Messung der CO-Gaskonzentration
- TR = Photometer zur Messung der Lufttrübung
- TS = Sonometer mit Hitzeschutzkapselung, zur Messung der Lufttemperatur und der Luftströmung
- TE = Thermoelement zur Messung der Rauchgastemperatur (wird mit Hitzeschutzkapsel nachgerüstet)
- TK = Sensorkabel zur Messung der Kabeltemperatur

Aus den einzelnen Voralarmen wird durch eine automatische Analyse mittels Differentialdiagnose die Brandfrüherkennung gewonnen und ein Brandalarm abgesetzt.

Die hohe *Redundanz* (alle Messgeräte sind vierzehnmal vorhanden) und die hohe *Diversität* (es sind vier verschiedene Meßsysteme zur schnellen Brandfrüherkennung und ein weiteres zur Branderkennung vorhanden) ergibt ein außerordentlich hohes Sicherheitsniveau der Anlage.

Des Weiteren wurde für die Steuerung der Lüftung und der Entrauchung die SPS redundant vorgesehen, um bei einem SPS-Ausfall automatisch mit der mitlaufenden SPS weiterfahren zu können.

Die mitlaufende SPS wird zu diesem Zweck ständig mit den Daten aus der führenden SPS versorgt.

Desgleichen wurde der Rechner der Leittechnik zu diesem Zweck ebenfalls redundant vorgesehen.

Für jedes Meßsystem wurden geeignete Auslösewerte festgelegt, die folgende Funktion haben:

CO-Konzentration zur Kontrolle	TR-Lufttrübung zur Kontrolle	TS-Lufttemp. zur Kontrolle	TE-Rauchtemp. zur Kontrolle	TK-Kabeltemp. zur Kontrolle
der <i>Sollwertabweichung</i> für die einseitige Längslüftung mit Strahlventilatoren				
der <i>Grenzwertüberschreitung</i> für eine Tunnelspernung				
ergibt einen Voralarm zur Steuerung der automatischen Entrauchung im jeweiligen BMA				
Das zeitliche Zusammentreffen verschiedener Voralarme im gleichen Brandmeldeabschnitt führt automatisch zu einem Brandalarm aus diesem BMA			ergibt jeweils einen Hauptalarm und führt zum Brandalarm aus diesem BMA	

Tabelle 2: Funktionen der einzelnen Meßstellen

Das Prinzip zur Anlagensteuerung und zur Datenanalyse wird in den nachfolgenden Schemata Nr. 1 und 2 dargestellt (diese Schemata zeigen nur das Grundprinzip, ohne die zugehörigen Subroutinen).

Zu einem Sicherheitskonzept gehört jedoch auch immer die Untersuchung und Darstellung der Abläufe, die bei einem Teil- oder Totalausfall verschiedener Sicherheitssysteme zu erwarten sind.

Hierzu wurden exemplarisch die Fälle eines Ausfalls aller nicht hitzebeständigen Messeinrichtungen (siehe die weiter hinten folgenden Schemata Nr. 3 und 4) und des Totalausfalles aller Messeinrichtungen für einen BMA (siehe die Schemata Nr. 5 und 6) dargestellt, um zu zeigen, dass die Entrauchung auch noch nach einem Ausfall der Automatik durch die dann erfolgende Freigabe der Handbedienebene in der TLZ gewährleistet ist.

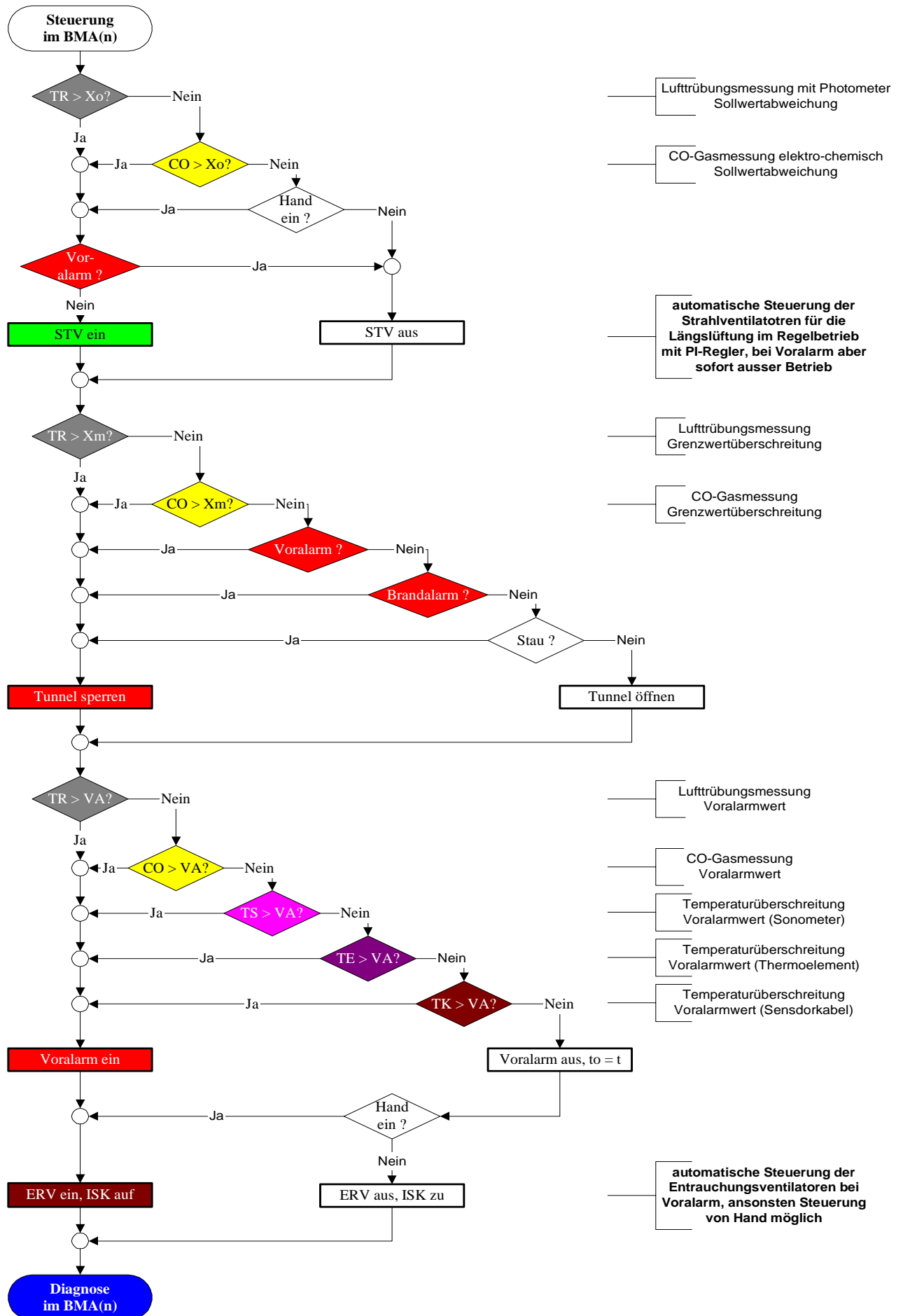
Da dieses System bisher weltweit einmalig ist und äußerst zeitkritische Abläufe enthält, musste dieses in einem realistischen Brandversuch mit einem Fahrzeugbrand von zwei Pkw über 30 Minuten getestet werden, um die notwendige Bestätigung für dessen sichere Funktion zu erhalten.

Anmerkungen:

Andere Testanordnungen mit Benzinpfannen waren dafür nicht geeignet, weil diese bei ihrer schnellen Rauch- und Hitzeentwicklung für Entstehungsbrände völlig untypisch sind und unrealistische Ergebnisse für das Sensorkabel und die Bildauswertung liefern (die maximale Rauchentwicklung und die Höchsttemperatur werden dort schon nach 1 Minute erreicht, wofür ein Entstehungsbrand in der Regel mehrere Minuten benötigt).

Ebenso wenig waren dafür Propangasfeuer geeignet, da diese mit ihrer sehr vollständigen Gasverbrennung nicht die typischen, aber das Strömungsbild maßgeblich bestimmenden Rauchgase und deren Absinkverhalten simulieren können.

Schema 1: Vereinfachter Ablaufplan zur Steuerung der Tunnellüftung und Entrauchung



Schema 2: Vereinfachter Ablaufplan zur Diagnose des Brandfalls im Brandmeldeabschnitt n



4. Messung der Lufttrübung mit Photometern

Zur Messung und Überwachung der Lufttrübung und Sichtweite wurden 14 nebelkompensierte Photometer in 100 m Abständen an der Tunneldecke installiert, mit denen die Lufttrübung nach dem Streulichtmeßverfahren gemessen wurde.

In dem nachstehenden Bild 1 sind die Trendkurven der Lufttrübung von 7 Meßstellen aus der westlichen Tunnelhälfte exemplarisch für fünf aufeinander folgende Werktage (Mo-Fr) dargestellt, wie sie in diesem Tunnel für die Längslüftung im Regelbetrieb charakteristisch waren.

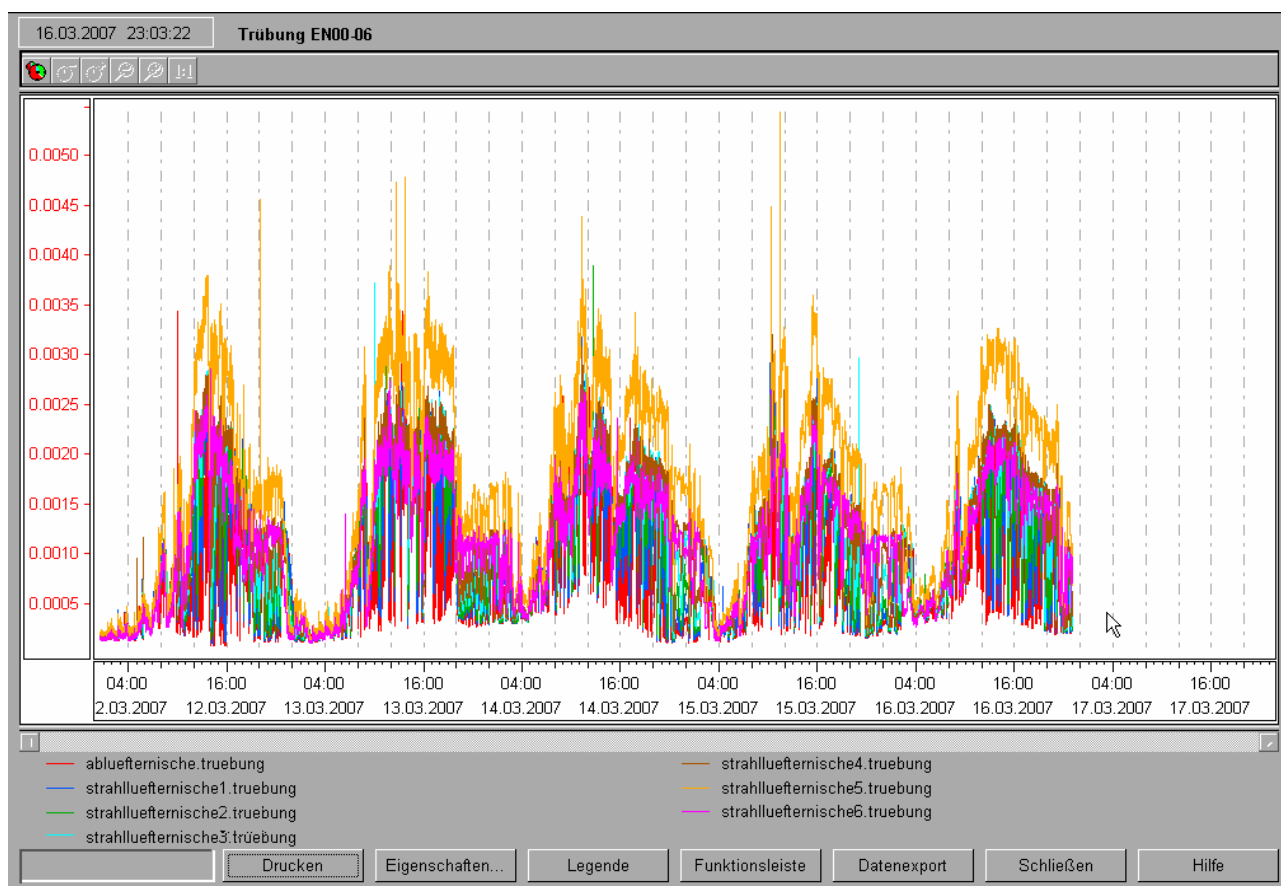


Bild 1: Trendkurven der Lufttrübung im Regelbetrieb bei einseitiger Längslüftung

Die Werte zeigten die Abhängigkeit der Lufttrübung vom täglichen Verkehrsaufkommen sowie die Verteilung der Trübungsfaktoren im Tunnel (die Dimension der Trübung = Lichtauslöschung ist als Faktor einer negativen Potenz mit „1/m“ angegeben), mit folgenden Besonderheiten:

Die Regellüftung erfolgte hier zum Schutz des Ostportals vor Fahrzeugabgasen immer nur als einseitige Längslüftung in Richtung zum Abluftkamin am Westportal.

Aufgrund des vorherrschenden Westwindes traten die höchsten Trübungsfaktoren jedoch nicht am Westportal auf, sondern sie verschoben sich zur Tunnelmitte hin (in den Bereich der Nische Nr.5).

Im regelmäßigen Tagesgang der Lufttrübung traten außerdem gelegentlich sehr hohe Meßspitzen von 0,015/m auf, die kurzzeitig (nur für wenige Sekunden) z. B. durch Feinstaub hervorgerufen wurden, der bei hoher Fahrt- oder Luftgeschwindigkeit im Tunnel aufwirbelte.

Es wären jedoch auch länger andauernde Maxima der Lufttrübung möglich, wenn im stockenden Verkehr zu viel Ruß von Dieselfahrzeugen freigesetzt würde.

Die o. g. Trendkurven aus dem normalen Tagesgang unterschied sich jedoch grundlegend von den Verhältnissen, wie sie im Brandfall auftraten.

Zum Vergleich sollen hierfür die Trendkurven aus dem nachstehenden Bild 2 dienen, die aus den Meßwerten des Brandversuches gewonnen wurden.

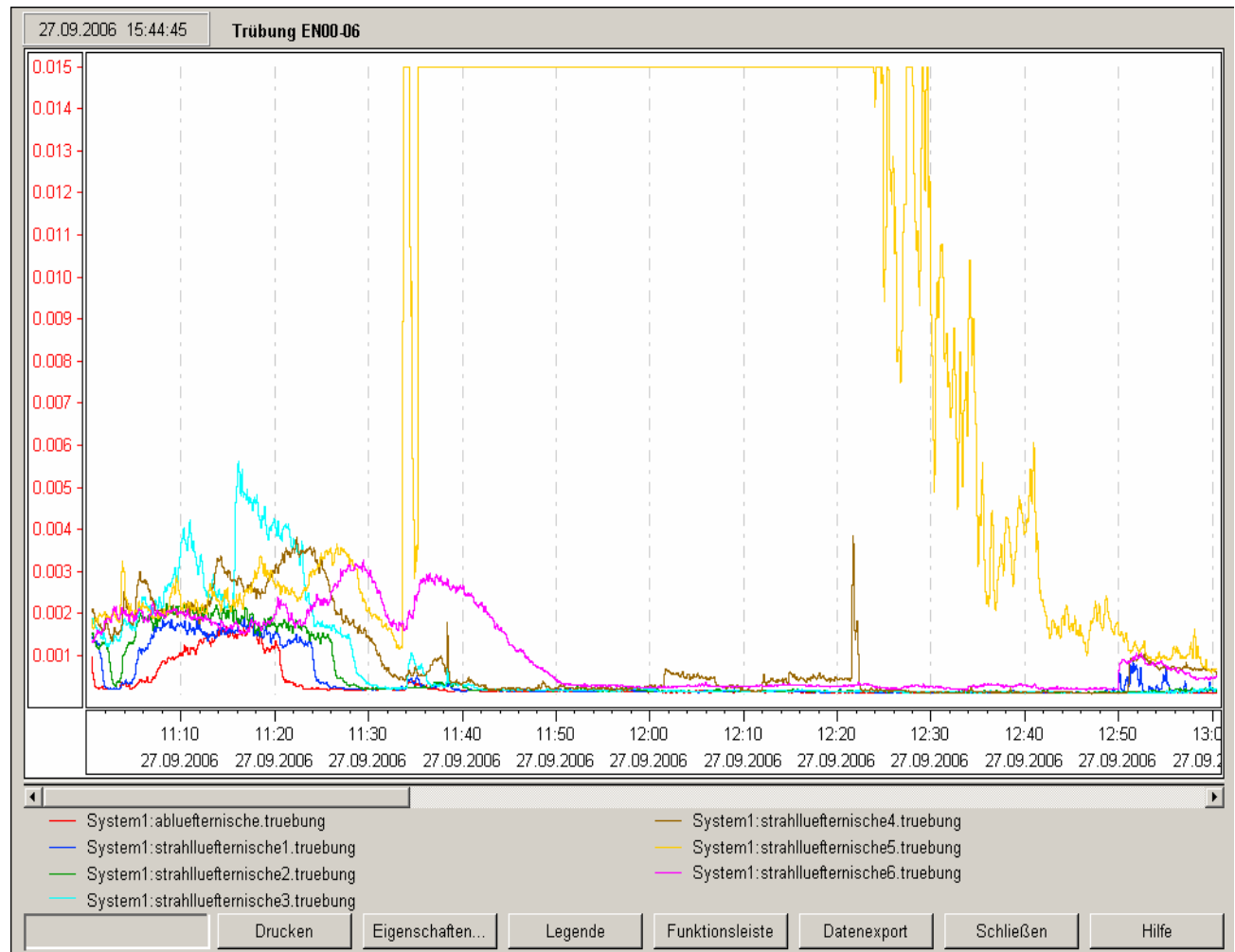


Bild 2: Trendkurven der Lufttrübung im Brandversuch

In dem Bild 2 sind die Trendkurven der Lufttrübung von 7 Meßstellen (MS) aus der westlichen Tunnelhälfte dargestellt, von denen 5 MS westlich vom Brandort, eine MS (EN5) direkt im Brandmeldeabschnitt BMA 6 und eine MS (EN6) östlich vom Brandort im BMA7 gelegen waren. Hierbei lag die erste Meßstelle (EN0) nahe zum Westportal und im Einflussbereich des Abluftkamins. Die weiteren Meßstellen hatten jeweils etwa 100 m Abstand voneinander.

Jede einzelne Meßstelle war jeweils der nächstgelegenen Entrauchungsstation zugeordnet, mit der sie einen Überwachungs- und Entrauchungsabschnitt bildete. Z. B. befand sich die Meßstelle EN5 im BMA5 in 30 m Abstand westlich vom Brandort und in der Nähe der Strahlventilatornische Nr.5 und der Entrauchungsstation Nr.5.

Die o. g. Trendkurven zeigten nach dem Brandbeginn einen sofortigen, steilen Anstieg der Lufttrübung (die *Initialzündung* mit der *Brandfackel* erfolgte um *11:33:02 Uhr*), mit folgendem Verlauf:

- An der Meßstelle EN5 wurde der *Sollwert* für den Lufttrübungsfaktor von *0,005/m* nach **37⁰⁰** erreicht und darauf automatisch die *Längslüftung* mit den 13 Strahlventilatoren aktiviert.
- An der Meßstelle EN5 wurde der *Grenzwert* für den Lufttrübungsfaktor von *0,010/m* nach **39⁰⁰** erreicht und darauf automatisch die *Tunnelsperrung* aktiviert.
- An der Meßstelle EN5 wurde der *Voralarm* für den Lufttrübungsfaktor von *0,015/m* nach **42⁰⁰** erreicht und darauf automatisch die nächstgelegene *Entrauchungsstation Nr.5* mit 6 Entrauchungsventilatoren und den zugehörigen Immissionsschutzklappen aktiviert, gleichzeitig wurden

alle Strahlventilatoren der *Längslüftung* deaktiviert (nach **5“** Betriebszeit), um jede Rauchwirbelung zu vermeiden (einzelne Strahlventilatoren wurden nach Brandalarmgabe etwas später im brandfernen Bereich für den Strömungsausgleich zwischen den Portalen wieder hinzugeschaltet).

- Zum *Auffahren* der Klappen und *Hochfahren* der Entrauchungsventilatoren waren weitere **18“** nötig, so dass die volle *Absaugleistung* an der Entrauchungsstation Nr.5 innerhalb von **60“** nach der Erstzündung des Brandes erreicht wurde.
- An der Meßstelle EN5 wurde der maximale *Meßbereich* des Meßgerätes von *0,015/m* nach **45“** für die Dauer von 50' überschritten (es werden dann Werte bis 2/m erreicht). Dieser kehrte erst nach Beendigung des Löscheinsatzes und Absaugung der Rauch- und Wasserdampfschicht zurück (der *Löscheinsatz* dauerte von *12:01:20 Uhr bis 12:02:20 Uhr*). Das Gerät war danach zwar geschwärzt, aber noch unbeschädigt und voll funktionstüchtig.
- Nach Abschluß der Löscharbeiten benötigte die vollständige *Rauchentfernung ca. 1 Stunde*.
- Der *Brandalarm* wurde um *12:47:00 Uhr* zurückgesetzt und die *Längslüftung* nahm automatisch wieder ihren Betrieb auf.

Anmerkungen:

Die automatische Deaktivierung der Entrauchungsstation erfolgt immer erst dann, wenn alle Meßwerte (CO, Trübung und Temperatur) in dem jeweiligen Entrauchungsabschnitt wieder unter den Voralarmwerten liegen, während die Aufhebung der Tunnelsperrung erst nach einer zusätzlichen, manuellen Zurücksetzung des Brandalarms durch die Einsatzleitung vor Ort möglich ist.

Die welligen Meßwerte im Bild 2 wurden vor Brandbeginn durch das Aufstellen der TLF (Tanklöschfahrzeuge) verursacht, deren Abgase mit der im Tunnel vorhandenen natürlichen *Grundströmung* von *0,3 m/s* von West nach Ost drifteten (durch den *Westwind* auf das Portal).

5. Messung der Brandgastemperatur mit einem Brandsensorkabel

Zur Brandalarmauslösung wurde ein 1520 m langes Sensorkabel an der Tunneldecke installiert.

Das Sensorkabel verfügte über 304 Thermochips als Temperatursensoren, die im Kabel in regelmäßigen Abständen von jeweils 5 m eingebaut waren.

Die einzelnen Sensoren wurden den 14 Brandmeldeabschnitten (BMA) gruppenweise zugeordnet.

Die Kabelisolierung schützte die Sensoren vor Beschädigung und Korrosion, wodurch die Temperaturerfassung jedoch erheblich verzögert und gedämpft wurde.

Die Meßdaten zeigten deshalb nach Brandbeginn einen verzögerten und im Betrag reduzierten Anstieg der Kabelinnentemperatur, mit folgendem Verlauf:

- Das *Sensorkabel* im *BMA 6* sendete beim Erreichen eines Temperaturanstiegs $\Delta T > 2,8 K$ nach **5'04“** einen *Voralarmwert* an die BMZ und ZLT, der in Kombination mit dem anstehenden Voralarm aus der Lufttrübung den *Brandalarm* zur *Alarmierung* der Einsatzdienste auslöste.
- Das *Sensorkabel* im *BMA 6* sendete beim Erreichen der *Alarmtemperatur* von $50^{\circ}C$ nach **11'22“** einen weiteren *Brandalarm* (sog. *Hauptalarm*) an die BMZ und ZLT (dessen Aktivierung erfolgte aber bereits durch die Voralarme der Lufttrübung und des Sensorkabels).
- Das *Sensorkabel* im *BMA 7* löste beim Erreichen eines Temperaturanstiegs $\Delta T > 2,8 K$ nach **7'42“** einen *Voralarm* aus, der darauf automatisch die nächstgelegene Entrauchungsstation Nr.5 mit 6 Entrauchungsventilatoren und den zugehörigen Immissionsschutzklappen aktivierte.
- *Totalausfall* des *Sensorkabels* bei $160^{\circ}C$ Kabeltemperatur infolge *Hitzeinwirkung* nach **19'**.

Anmerkung:

Das Sensorkabel fiel damit im weiteren Brandverlauf für die automatische Steuerung der Entrauchung völlig aus und musste nach dem Ende des Versuchs auf 35 m Länge *erneuert* werden.

6. Überwachung der Deckentemperatur mit Pt100-Fühlern

Zur Überwachung der Temperatur an der Betonoberfläche wurden oberhalb des Brandortes drei elektrische Widerstandstemperaturfühler (Pt100) an der Tunneldecke, zwischen Betonoberfläche und Brandschutzverkleidung angebracht. Letztere bestand aus 25 mm dicken Aestuverplatten.

Die Meßstellen hatten einen Abstand von jeweils 10 m.

Die Meßdaten zeigten nach Brandbeginn einen verzögerten und im Betrag reduzierten Anstieg der Temperatur, mit folgendem Verlauf:

- Zum Brandbeginn betrug die Oberflächentemperatur an der Betondecke 21/20/20°C.
- An der mittleren Meßstelle, die direkt über dem Brandort lag, wurde nach **21'** kurzzeitig eine max. *Betonoberflächentemperatur* von 67°C gemessen.
- An der 1. und 3. Meßstelle wurden nach 40' für einige Minuten 31,3°C und 28,0°C gemessen.

Die Tunneldecke war also zu keinem Zeitpunkt durch den Brandversuch gefährdet.

7. Rauchdetektion mittels Kamera und Videobildauswertung

In dem Tunnel wurden zur lückenlosen Überwachung 54 Videokameras an der Tunnelwand installiert, deren Bilder laufend von Programmen zur automatischen *Ereignisdetektion* ausgewertet wurden.

Von den Kameras befanden sich zwei in der Nähe des Brandortes (ca. 50 m Abstand):

- Die Kamera S8 an der Südwand im BMA 4, nach Osten in den BMA 5 blickend und
- die Kamera N16 an der Nordwand im BMA 5, nach Westen in den BMA 5 blickend,

die auf den Brandversuch wie folgt reagierten:

- Die *Kamera S8* meldete *Rauch* nach **0'50"**.
- Die *Kamera N16* lieferte *verrauchte Bilder* nach **6'30"**.
- Die *Kamera N16* meldete *Rauch* nach **7'30"**.
- Die *Kamera N16* erblindete im *Rauch* nach **11'30"**.
- Die *Kamera S8* lieferte *stark verrauchte Bilder* nach **11'**.

Anmerkungen:

Das System lieferte viele *Fehlalarme* wegen „Rauchtrübung“: In der halben Stunde vor der Brandzündung z. B. *sechsmal* von verschiedenen Standorten. Diese *Fehlalarme* könnten durch Lichtreflexe in den Windschutzscheiben der Fahrzeuge oder ähnliche Effekte ausgelöst worden sein.

Die Ereignisdetektion per Bildauswertung war damit nicht für die automatische Tunnelentrauchung geeignet, so dass deren *Voralarme* nur zur Schaltung der Kamerabilder auf die Ereignismonitore genutzt werden konnten, während die Funktionen der Tunnellüftung und der Tunnelentrauchung sowie die des Brandalarms und der Tunnelsperrung davon völlig unabhängig blieben.

Mögliche Sicherheitsprobleme, die aus dem Betrieb, der Wartung und der Instandhaltung der Videoanlage entstehen könnten, wurden somit durch die strikte Trennung der Videoanlage von den sicherheitsrelevanten Funktionen zur Brandalarmbildung und Tunnelentrauchung vermieden.

Hinzu kam, dass die Kameras im Brandfall sehr schnell erblindeten und damit für die Einsatzführung vor Ort wertlos waren.

Ferner wurden in jeder Fahrtrichtung 10 Doppelinduktionsschleifen zur Stauererkennung und zur Zeitlückenmessung für die Verkehrsbeeinflussung installiert, so dass diese von den Kameras und eventuellen Kameraausfällen vor Ort ebenfalls völlig unabhängig war.

8. Messung der CO-Gaskonzentration mit elektrochemischen Sensoren

Zur CO- und Rauchgasdetektion wurden 14 CO-Gaskonzentrationsmesser mit elektro-chemischen Sensoren in 100 m Abständen an der Tunneldecke installiert (CO ist etwas leichter als die Umgebungsluft), mit denen der CO-Gehalt in der Luft- und in der Rauchgasströmung gemessen wurde.

In dem nachstehenden Bild 3 sind die Trendkurven der CO-Konzentration von 7 Meßstellen aus der westlich gelegenen Tunnelhälfte exemplarisch für fünf aufeinander folgenden Werktagen (Mo-Fr) dargestellt, wie sie in diesem Tunnel für die Längslüftung im Regelbetrieb charakteristisch waren.

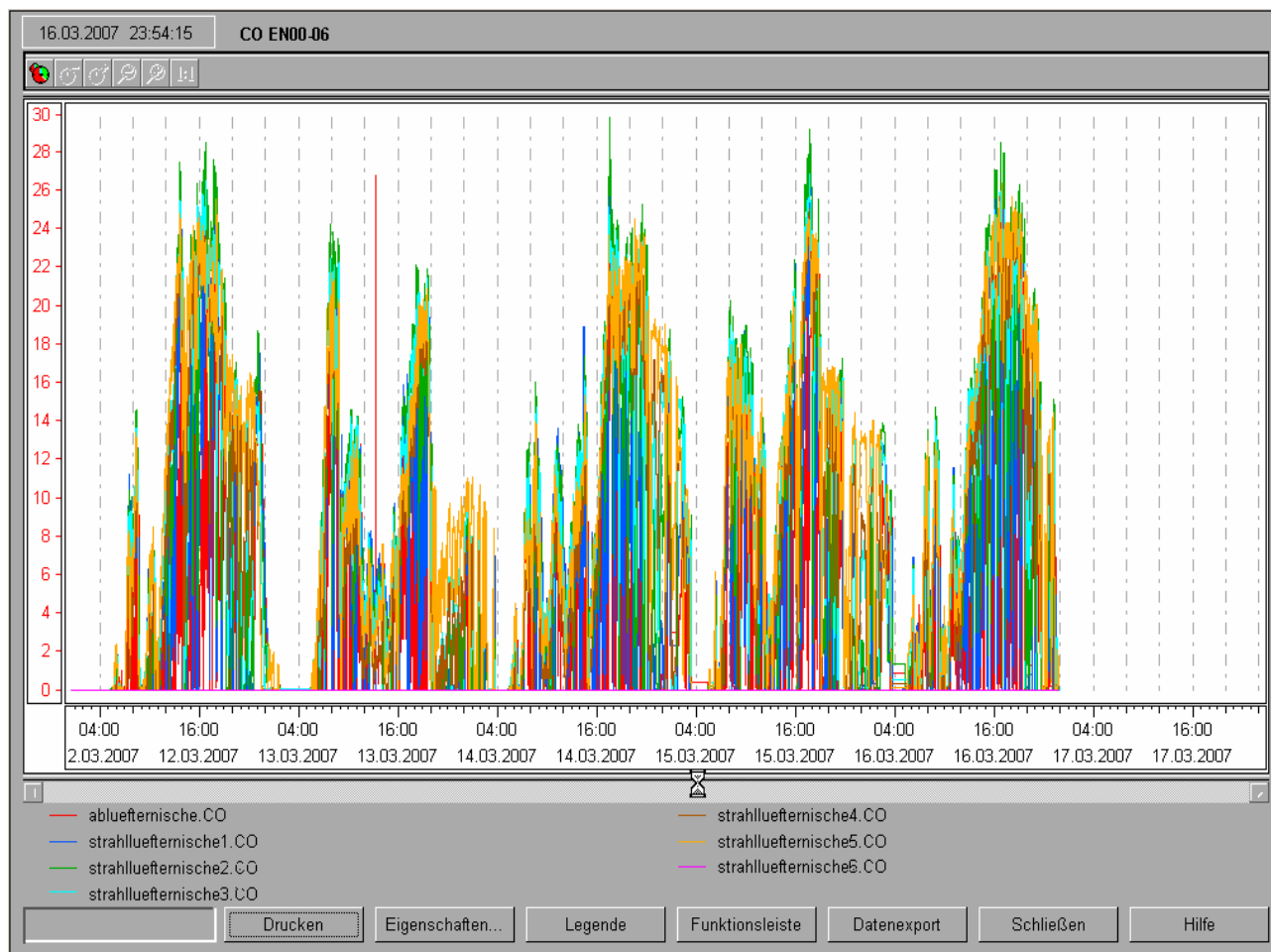


Bild 3: CO-Gaskonzentration im Regelbetrieb bei einseitiger Längslüftung

Die Werte zeigen die Abhängigkeit der CO-Konzentration vom täglichen Verkehrsaufkommen sowie die Verteilung der CO-Konzentration im Tunnel (die Dimension der CO-Konzentration ist in „ppm“ angegeben), mit folgenden Besonderheiten:

Die Regellüftung erfolgte hier zum Schutz des Ostportals vor Fahrzeugabgasen immer nur als einseitige Längslüftung in Richtung zum Abluftkamin am Westportal. Aufgrund des vorherrschenden Westwindes traten die höchsten CO-Konzentrationen jedoch nicht am Westportal auf, sondern sie verschoben sich zur Tunnelmitte hin (z. B. in den Bereich der Nischen EN2 und EN3).

Die örtlichen Spitzen der CO-Konzentration waren somit gegen die der Luftrübung etwas versetzt.

Das Gleiche galt für die fehlende zeitliche Koinzidenz, weil die Spitzen der CO-Konzentration z. T. erst 6 Stunden nach den Maximalwerten der Luftrübung auftraten.

Daraus war zu ersehen, dass sich die CO-Gase in der Tunnelluftströmung anders verhielten und anders ausbreiteten als der Feinstaub und der Dieselrauch (durch die sehr unterschiedlichen Teilchengrößen und Molgewichte bedingt).

Außerdem traten im regelmäßigen Tagesgang der Lufttrübung gelegentlich einzelne Meßspitzen auf, die insbesondere von einem - meist kurzen - Ampelrückstau vor dem Westportal herrührten.

Derzeit liegen die täglichen Maxima der CO-Konzentration bei einem DTV von nur 8000 Fz/Tag bei 20 ppm bis 30 ppm und im Einzelfall bei 45 ppm. Dies zeigt sehr deutlich, dass die CO-Gaskonzentration im Tunnel trotz verbesserter Abgasreinigung mit Katalysatoren an den Fahrzeugmotoren auf keinen Fall zu vernachlässigen ist.

Auf die CO-Konzentrationsmessung kann deshalb im Tunnel überhaupt nicht verzichtet werden, zumal im Staufall sonst immer mit wesentlich höheren und - bei längerer Exposition - auch kritischen, weil toxischen, CO-Konzentrationen gerechnet werden müsste.

Die Trendkurven aus dem o. g. normalen Tagesgang unterschieden sich jedoch grundlegend von den Verhältnissen, wie sie im Brandfall auftraten. Als Vergleich sollen hierfür die Trendkurven aus dem nachstehenden Bild 4 dienen, die aus den Meßwerten des Brandversuches gewonnen wurden.

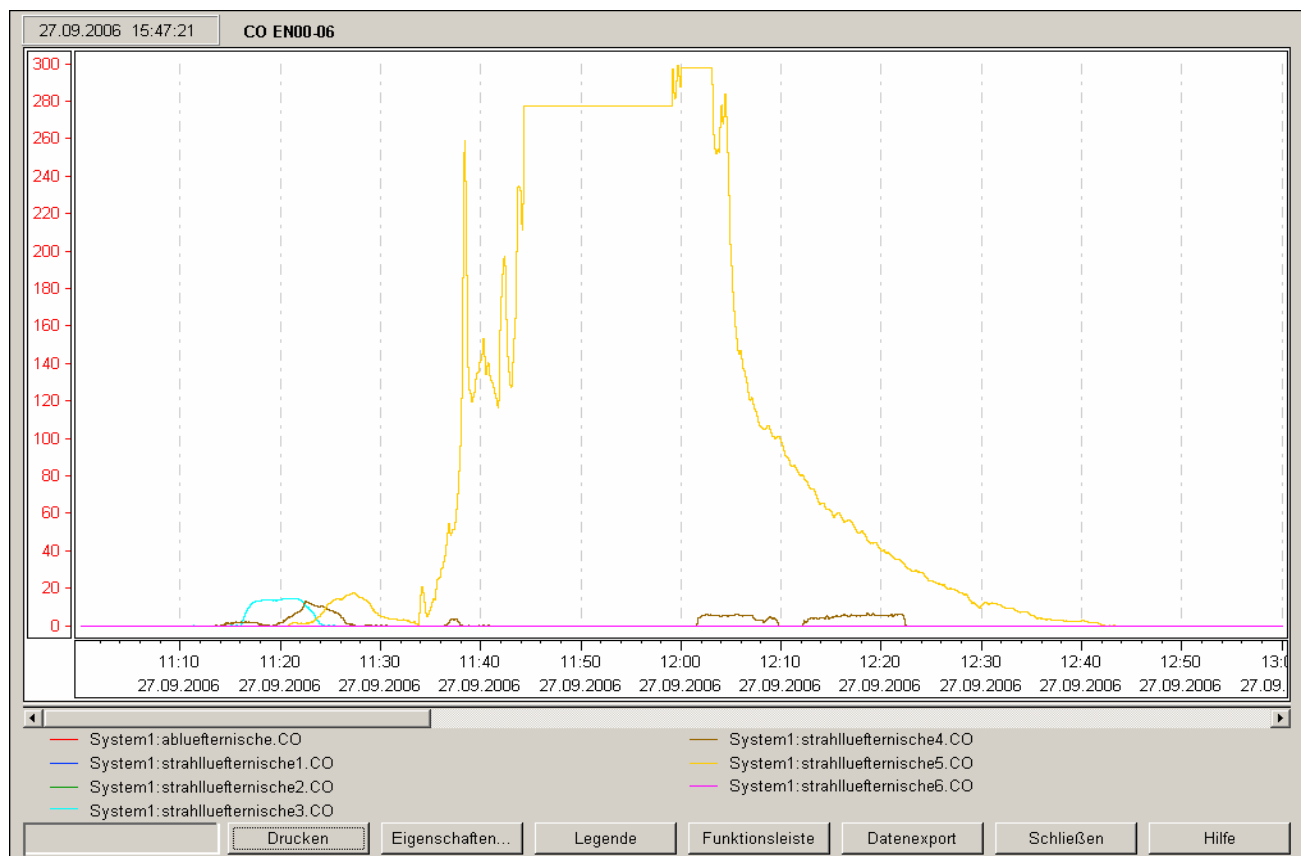


Bild 4: CO-Gaskonzentration im Brandversuch

In dem Bild 4 sind die Trendkurven der CO-Konzentration von 7 Meßstellen aus der westlichen Tunnelhälfte dargestellt, von denen 5 MS westlich vom Brandort, eine MS (EN5) direkt im BMA6 und eine MS (EN6) östlich vom Brandort im BMA7 gelegen waren.

Hierbei lag die erste Meßstelle (EN0) nahe zum Westportal und im Einflussbereich des Abluftkamins. Die weiteren Meßstellen hatten jeweils etwa 100 m Abstand voneinander.

Jede einzelne Meßstelle war jeweils der nächstgelegenen Entrauchungsstation zugeordnet, mit der sie einen Überwachungs- und Entrauchungsabschnitt bildete. Z. B. befand sich die MS EN5 im BMA6 in 30 m Abstand westlich vom Brandort und in der Nähe der Strahlventilatornische Nr.5 und der Entrauchungsstation Nr.5.

Die o. g. Trendkurven zeigten nach dem Brandbeginn einen sofortigen, quadratischen Anstieg der CO-Konzentration (die *Initialzündung* mit der Brandfackel erfolgte um *11:33:02 Uhr*), mit folgendem Verlauf:

- An der Meßstelle EN5 wurde der *Sollwert* der CO-Gaskonzentration von *45 ppm* zum automatischen Starten der *Längslüftung* nach *3'0"* erreicht (deren Aktivierung - und die darauf folgende Deaktivierung - erfolgten aber bereits durch Überschreitung des Sollwertes und des Voralarmwertes von der Lufttrübung).
- An der Meßstelle EN5 wurde der *Grenzwert* der CO-Konzentration von *100 ppm* für die automatische *Tunnelsperrung* nach *3'20"* erreicht (deren Aktivierung erfolgte aber bereits durch die Überschreitung des Grenzwertes von der Lufttrübung).
- An der Meßstelle EN5 wurde der *Voralarmwert* von *150 ppm* zur automat. Aktivierung der nächstgelegenen *Entrauchungsstation* Nr.5 und zur Abschaltung der Längslüftung nach *5'08"* erreicht (deren Aktivierung - und die darauf folgende Deaktivierung - erfolgten aber bereits durch die Überschreitung der Voralarmwerte von der Lufttrübung und dem Sensorkabel).
- Die CO-Messung war damit gleich schnell wie das Sensorkabel (nur 4" Unterschied).
- An der Meßstelle EN5 erfolgte nach 6' - beim *Brandübergang* vom Motorraum auf die Fahrzeugkabine - für 4' eine kurzzeitige Abschwächung der CO-Konzentration bis auf 120 ppm.
- An der Meßstelle EN5 wurde nach *26'* der maximale *Meßbereich* des Meßgerätes von *300 ppm* für die Dauer von 3' überschritten. Dieser kehrte erst nach dem Löscheinsatz zurück. Das Gerät war danach zwar beschädigt, aber noch voll funktionstüchtig.
- Nach Abschluß der Löscharbeiten dauerte die vollständige *CO-Gasentfernung ca. 1/2 Stunde*.
- Der *Brandalarm* wurde um *12:47:00 Uhr* zurückgesetzt und die Längslüftung nahm automatisch wieder ihren Betrieb auf.

Anmerkungen:

Die automatische Deaktivierung der Entrauchungsstation erfolgt immer erst dann, wenn alle Messwerte (CO, Trübung und Temperatur) in dem jeweiligen Entrauchungsabschnitt wieder unter den Voralarmwerten liegen, während die Aufhebung der Tunnelsperrung erst nach einer zusätzlichen, manuellen Zurücksetzung des Brandalarms durch die Einsatzleitung vor Ort möglich ist.

Die welligen Messwerte im Bild 2 wurden vor Brandbeginn durch das Aufstellen der TLF (Tanklöschfahrzeuge) verursacht, deren Abgase mit der im Tunnel vorhandenen natürlichen *Grundströmung* von *0,3 m/s* von West nach Ost drifteten (durch den *Westwind* auf das Portal).

Von den Messgeräten Nr.6 und Nr.12 (s. die Nulllinien) standen keine Daten zur Verfügung.

9. Messung der Rauchgastemperatur mit Sonometern

Zur Messung der Rauchgastemperatur wurden die 14 Sonometer genutzt, die ohnehin zur Messung der Luftströmung im Tunnel in 100 m Abständen an der Tunnelwand installiert wurden (s. a. den nächsten Abschnitt), um mit dem berührungslosen Ultraschallmeßverfahren die Temperatur der Rauchgasströmung in jedem BMA zu messen und zu überwachen.

Die gemessenen Temperaturen wurden gleichzeitig - für jeden BMA einzeln und dynamisch - auch auf 14 TFT-Displays in der TLZ im Betriebsgebäude dargestellt. Dazu wurde die Hintergrundfarbe des jeweiligen Displays (nach EGA-Standard) automatisch der gemessenen Temperatur im logarithmischen Maßstab angepaßt, so dass die Temperatur- und Rauchgasverteilung im Tunnel und der Brandort selbst sofort für den Einsatzleiter auf dem Blindschaltbild erkennbar waren..

Hinweis:

Die Temperaturmessung mittels Ultraschall basiert auf der Laufzeitänderung der Ultraschallsignale

bei geänderter Gasdichte, die eine Funktion der Gastemperatur ist.

Die Sonometer sind damit als schnelle Temperaturmesser ebenfalls zur Voralarmbildung geeignet.

Dieses funktioniert insbesondere bei *Entstehungsbränden* sehr gut, solange die Gasströmung nur wenig dichten Rauch mit sich führt und die entstehende Rauchsicht den Meßstrahl nicht mit einer stark veränderten Gemischzusammensetzung (durch hochmolekulare Anteile) „ausbremst“.

Die Geräte sind durch ihre Anordnung für die Querschnittsmessung im Tunnel auch unempfindlich gegen lokale „Hotspots“ (z. B. von heißen Auspuffendrohren), während *Sensorkabel* in solchen Fällen schon Fehlalarme auslösen können.

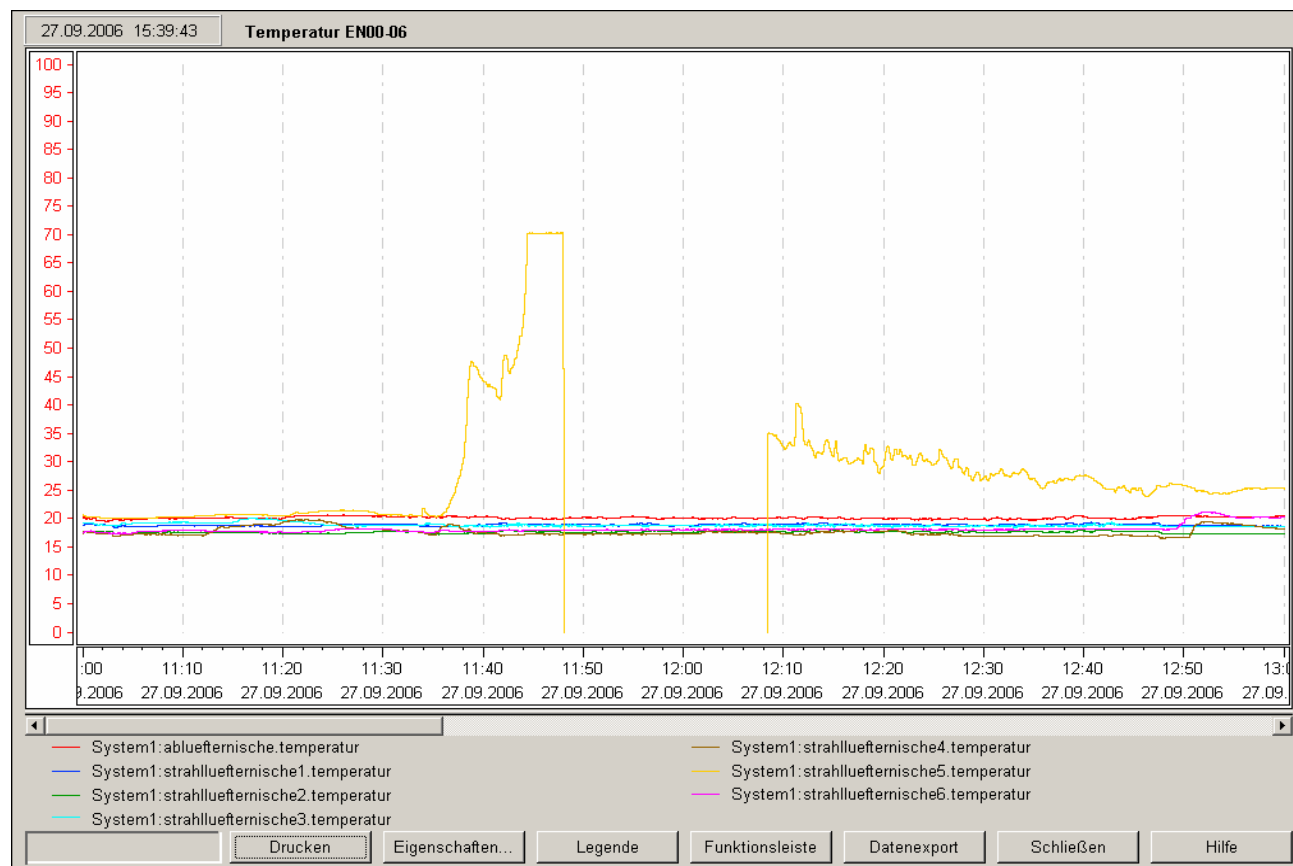


Bild 5: Luft- und Gastemperatur im Brandversuch

In dem Bild 5 sind die Trendkurven der Luft- und Rauchgastemperatur von 7 Meßstellen aus der westlichen Tunnelhälfte dargestellt, von denen 5 MS westlich vom Brandort, eine MS (EN5) direkt im BMA6 und eine MS (EN6) östlich vom Brandort im BMA7 gelegen waren. Hierbei lag die erste Meßstelle (EN0) nahe zum Westportal und im Einflussbereich des Abluftkamins. Die weiteren Meßstellen hatten jeweils etwa 100 m Abstand voneinander.

Jede einzelne Meßstelle war jeweils der nächstgelegenen Entrauchungsstation zugeordnet, mit der sie einen Überwachungs- und Entrauchungsabschnitt bildete. Z. B. befand sich die MS EN5 im BMA6 in 25 m Abstand westlich vom Brandort und in der Nähe der Strahlventilatornische Nr.5 und der Entrauchungsstation Nr.5.

Vor, während und nach dem Brandversuch zeigten die o. g. Trendkurven eine gleichmäßige Temperaturverteilung von 18°C bis 20°C im Tunnel (außerhalb des 100m langen Brandabschnitts).

Nach dem Brandbeginn zeigten die Trendkurven einen sofortigen, quadratischen Anstieg der Gastemperatur in der Nähe des Brandortes im BMA 6 (die Initialzündung mit der Brandfackel erfolgte um 11:33:02 Uhr), mit folgendem Verlauf:

- An der Meßstelle EN5 wurde der *Voralarmwert* von 40°C zum automatischen Start der nächst-

gelegene Entrauchungsstation Nr.5 und zur Abschaltung der Längslüftung nach 5'24" erreicht (deren Aktivierung - und die darauf folgende Deaktivierung - erfolgten aber bereits nach Überschreitung des Sollwertes und des Voralarmwertes von der Lufttrübung).

- Diese Temperaturmessung war damit etwa gleich schnell wie das Sensorkabel (20" langsamer).
- An der Meßstelle EN5 wurden nach 15' alle Messwerte, die über 70°C lagen, durch das Vordringen der Rauchgasschicht in die 0,8 m unterhalb der Tunneldecke liegende Meßebebene verfälscht (bedingt durch das hohe Molgewicht der Rauchgase). Brauchbare Meßwerte erschienen erst wieder nach 20' bei reduzierter Brandleistung. Da das Gerät mit einer Hitzeschutzkapselung versehen war, blieb es aber bis zum Ende des Versuchs unbeschädigt und voll funktionsfähig (die Messung der Strömungsgeschwindigkeit war durch den Übergang in der Gaszusammensetzung nicht beeinträchtigt, da die Gemischänderung darauf keinen Einfluss hatte).

Anmerkungen:

Bei größeren Brandleistungen, als die hier getestet, ist mit umfangreichen *Totalausfällen* (Sensorkabel, Photometer, Kameras und CO-Gaskonzentrationsmesser) zu rechnen.

Für diesen Fall werden zur Sicherstellung der Funktionalität der automatischen Entrauchungsanlage 14 *Thermoelemente* nachgerüstet, die speziell in heißen und dichten Rauchgasen bis 1.200°C einsetzbar und gegen die Tunnelatmosphäre korrosionsbeständig sind.

Da diese Thermoelemente als Spotmessung eingesetzt werden und damit empfindlich für warme Abgase aus Auspuffendrohren sind, können sie die vorgenannte Querschnittsmessung zur Erkennung von Entstehungsbränden jedoch nicht ersetzen, sondern nur ergänzen.

Folglich werden die Meßwerte der Thermoelemente erst dann für die automatische Steuerung der Tunnelentrauchung relevant, wenn diese signifikant über denen aus der Messung mit den Sonometern liegen (siehe den „Temperaturabsturz“ im Bild 5).

10. Messung der Strömungsgeschwindigkeit mit Sonometern

Zur Messung der Strömungsgeschwindigkeit im Tunnel und deren Richtung wurden 14 Sonometer in 100 m Abständen an der Tunnelwand (in 0,8 m Abstand zur Tunneldecke) installiert, um aus den Laufzeitunterschieden der Ultraschallsignale die Strömungsgeschwindigkeit und deren Richtung in jedem BMA zu messen und zu überwachen.

Die gemessenen Strömungsgeschwindigkeiten und Strömungsrichtungen wurden gleichzeitig - für jeden BMA einzeln und dynamisch – auch auf 14 TFT-Displays in der TLZ im Betriebsgebäude in ihrer Richtung und Geschwindigkeit durch entsprechend ausgerichtete und in ihrer Geschwindigkeit veränderliche Richtungspfeile dargestellt., so dass die aktuellen Strömungen in allen BMA sofort für den Einsatzleiter auf dem Blindschaltbild übersichtlich erkennbar waren.

Hinweis:

Die Geschwindigkeitsmessung mittels Ultraschall basiert auf der Laufzeitänderung der Ultraschallsignale bei einer Querströmung des Mediums durch den Meßstrahl.

Die Geräte verfügen über eine hohe Auflösung, so dass sie speziell für die Kontrolle und Regelung niedriger Strömungsgeschwindigkeiten ab 0,1 m/s im Tunnel, z. B. mittels stufenlos in der Drehzahl regelbarer Strahlventilatoren, geeignet sind.

Für diesen Tunnel wurden alle Geräte in Spezialausführung mit einer wartungsarmen und korrosionsbeständigen Membran aus Titan ausgerüstet und mit Gehäusen in einer Sonderanfertigung aus 25 mm starken Aestuverplatten als Hitzeschutz verkleidet, um im Brandfall den Funktionserhalt der Meßgeräte für den sicheren Entrauchungsbetrieb und den automatischen Strömungsausgleich im Tunnel mit Strahlventilatoren zu gewährleisten.

Zur Unterdrückung von Meßspitzen, die in der Regel bei der Passage von Lkw an den Meßstellen

entstehen, wurden bewährte Filteralgorithmen verwendet, die der Verfasser bereits vor 15 Jahren für die Steuerung der Lüftung in den Tunnelanlagen von Schiltach und Hausach eingeführt hatte.

In dem nachstehenden Bild 6 sind die Trendkurven der Luftgeschwindigkeit von 7 Meßstellen aus der östlichen Tunnelhälfte exemplarisch für einen normalen Werktag (Do.) dargestellt, wie sie in diesem Tunnel für die Längslüftung im Regelbetrieb charakteristisch waren.

Die Regellüftung erfolgte hier zum Schutz des Ostportals vor Fahrzeugabgasen immer nur als einseitige Längslüftung in Richtung zum Abluftkamin am Westportal.

Zusätzlich wurde im Bild 6 die jeweilige Drehzahl der stufenlos regelbaren Strahlventilatoren dargestellt, um die Wirkung der Strahlventilatoren auf die Strömung im Tunnel zu zeigen.

Da alle Strahlventilatoren simultan und synchron in derselben Drehzahl betrieben wurden, um optimale Ergebnisse und homogene Strömungsbilder zu erzielen, wurde hier nur eine Kurve gezeigt.

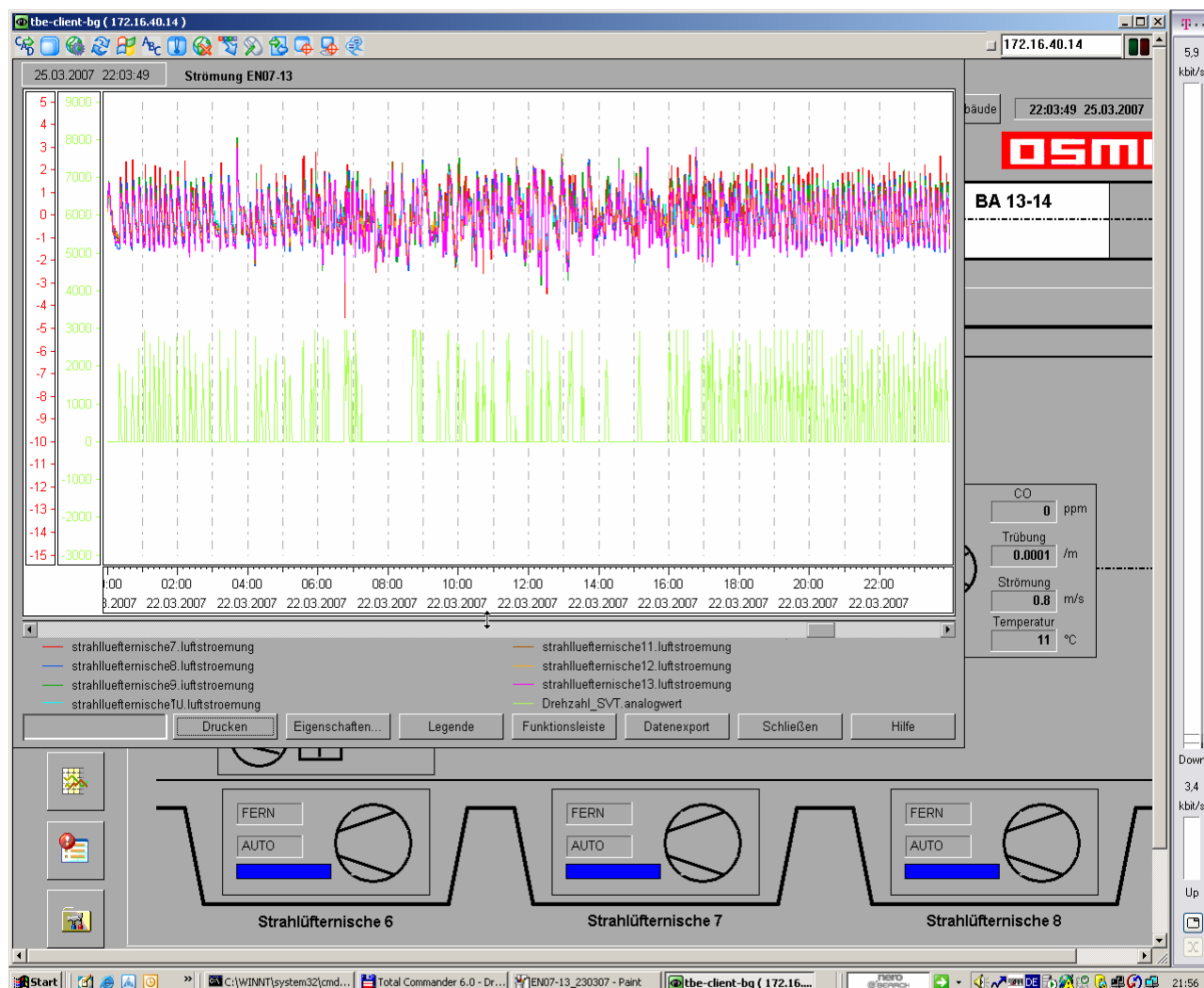


Bild 6: Strömungsgeschwindigkeit und Ventilator Drehzahl im Regelbetrieb (Längslüftung)

Die Werte im Bild 6 zeigten die Richtung und Größe der Strömung in Abhängigkeit vom täglichen Verkehrsaufkommen und vom Einsatz der Strahlventilatoren (die Dimension der Geschwindigkeit wurde in „m/s“ angegeben und die Dimension der Drehzahl der Strahlventilatoren in „Upm“), mit folgenden Besonderheiten:

Aufgrund der vorherrschenden Westwinde traten im Tunnel regelmäßig Rückströmungen mit 1 m/s bis 2 m/s in Richtung Ostportal auf, die zu lokalen Konzentrationserhöhungen führten, so dass die automatische Regelung der Luftqualität die Gas- und Staubwolken mit Hilfe der Strahlventilatoren mit 1 m/s bis 2 m/s in Richtung Westportal hinaus bewegen musste.

Für die Regelung wurden industrietübliche PI-Regler in Kaskadenschaltung eingesetzt, die über die Ventilatorzahl und die Strömungsgeschwindigkeit die Luftqualität regeln. Diese Schaltung wurde vom Verfasser bereits vor 12 Jahren für Tunnel in Schramberg und Bielefeld eingeführt.

Die CO-Konzentration und die Lufttrübung stellten dabei die Regelgrößen dar, die alle gleichzeitig über eine stetige Beeinflussung der Luftströmung mit den Strahlventilatoren kontrolliert wurden.

Die Sollwerte wurden dazu mit geeigneten Rampenfunktionen an die jeweiligen Strömungsverläufe und die entsprechenden lokalen Konzentrationen angepasst.

Durch den Einsatz bewährter, sicherer Regelkreise konnte somit auf jede Art Steuerung oder Schaltung auf Basis schematischer Methoden oder ungesicherter, spekulativer, historischer oder globaler Plausibilitätsprüfung verzichtet werden.

Bei der gewählten stufenlosen Drehzahlregelung wurden die Strahlventilatoren zur Energieeinsparung nur zu etwa $\frac{1}{4}$ im oberen Drehzahlbereich mit >1450 Upm betrieben und zu $\frac{3}{4}$ im unteren Bereich mit <1450 Upm. Dabei reduzierten sich die Leistungsaufnahme im unteren Drehzahlbereich auf 1,0 kW bis 1,5 kW pro Ventilator und der Schalldruckpegel auf weniger als 55 dB(A).

Die Ventilatoren durften dabei jedoch nicht in Bereichen mit ausgeprägter kritischer Drehzahl und Resonanz betrieben werden.

Im Regelbetrieb ergab sich daraus für den Tunnel eine *pulsierende Stoßlüftung*.

Die Trendkurven aus dem normalen Tagesgang unterschieden sich jedoch grundlegend von den Verhältnissen, wie sie im Brandfall auftraten. Als Vergleich sollen hierfür die Trendkurven aus den nachstehenden Bildern 7 und 8 dienen, die aus den Messwerten des Brandversuches gewonnen wurden und die den Unterschied verdeutlichen.

In dem nachstehenden Bild 7 sind die Trendkurven der Luftströmung von 7 Meßstellen aus der westlichen Tunnelhälfte dargestellt, von denen 5 MS westlich vom Brandort, eine MS (EN5) direkt im BMA 6 und eine MS (EN6) östlich vom Brandort im BMA7 gelegen waren. Hierbei lag die erste Meßstelle (EN0) nahe zum Westportal und im Einflussbereich des Abluftkamins. Die weiteren Meßstellen hatten jeweils etwa 100 m Abstand voneinander.

Jede einzelne Meßstelle war jeweils der nächstgelegenen Entrauchungsstation zugeordnet, mit der sie einen Überwachungs- und Entrauchungsabschnitt bildete. Z. B. befand sich die MS EN5 im BMA6 in 25 m Abstand westlich vom Brandort und in der Nähe der Strahlventilatornische Nr.5 und der Entrauchungsstation Nr.5.

In allen Fällen stammen die Werte von denselben Messgeräten.

Leider standen aus programmtechnischen Gründen die zugehörigen Daten mit den Ventilatorzahlen aus dem Versuch nicht zur Verfügung, so dass diese hier nicht gezeigt werden können.

Die Funktion des Strömungsabgleichs mittels Drehzahlregelung der an den Portalen gelegenen Strahlventilatoren hat jedoch einwandfrei funktioniert (s. a. die nachfolgenden Bilder).

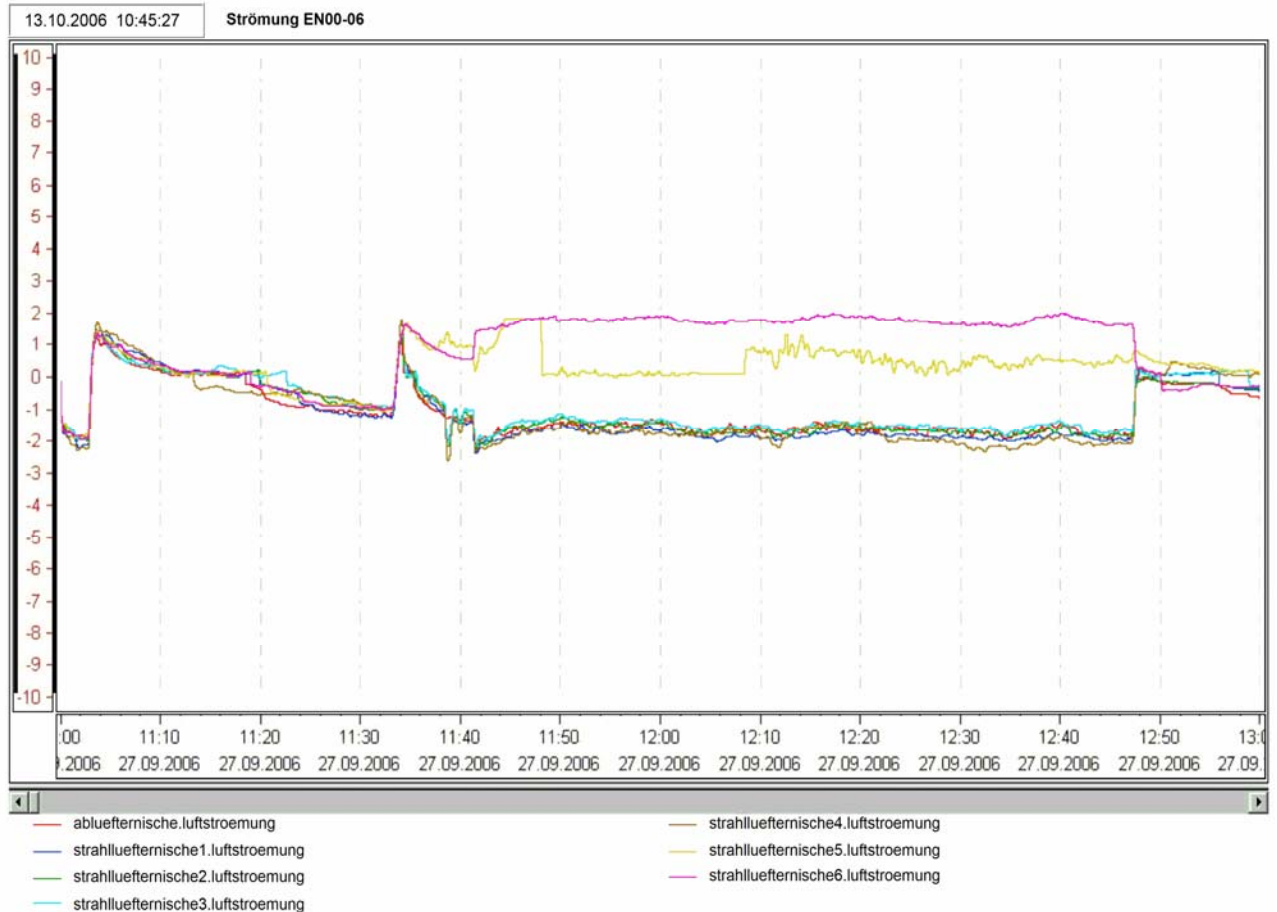


Bild 7: Strömungsgeschwindigkeit in der westlichen Tunnelhälfte beim Brandversuch

Die o. g. Trendkurven zeigen vor und nach dem Brandversuch die Betriebsweise der Längslüftung, bei der die Luftqualität mit den Strahlventilatoren geregelt wurde, die bei einer Überschreitung der vorgegeben Sollwerte die Lüftung in Richtung Westportal starteten (hier als positive Geschwindigkeit dargestellt) und dazu ggf. auch die natürliche Strömungsrichtung im Tunnel umkehren mussten (hier sichtbar um 11:03:00 Uhr und um 11:33:37 Uhr).

Mit dem Brandbeginn um 11:33:02 Uhr erfolgte dann durch den steilen Anstieg der Lufttrübung die sofortige Einschaltung der Längslüftung (um 11:33:37), um gleich darauf, nach 5 Sekunden, bei Erreichen des Voralarms, wieder abzuschalten (um 11:33:42 Uhr).

Zur gleichen Zeit (um 11:33:37) wurde die Entrauchungsstation Nr.5 nach dem Voralarm innerhalb von ca. 20 Sekunden auf ihre volle Leistung hochgefahren (bis 11:34:00). Darauf kehrte sich die Strömung in allen westlich vom Brandort gelegenen BMA1 bis BMA5 innerhalb von 7 Minuten um (untere Kurven mit negativem Signum).

Mit der Brandalarmgabe um 11:38:06 Uhr wurde die Strömung dann im westlichen Abschnitt (untere Kurven) durch die automatische Hinzuschaltung von einzelnen Strahlventilatoren an den Portalen nach ca. 4 Minuten auf -1,5 m/s bis -2,0 m/s in Richtung zum Brandort stabilisiert und mit der Gegenströmung im östlichen Abschnitt (obere Kurve) abgeglichen.

Gleichzeitig hielt die Strömung im östlich gelegenen BMA7 ihre Richtung bei (obere Kurve mit positivem Signum) und wurde nach der Brandalarmgabe und Hinzuschaltung von einzelnen Strahlventilatoren an den Portalen nach ca. 4 Minuten auf +1,5 m/s bis +2,0 m/s in Richtung zum Brandort stabilisiert und mit der Gegenströmung im westlichen Abschnitt (untere Kurven) abgeglichen.

Aus den Kurven ist auch zu erkennen, dass die Strömung im BMA6, im Bereich des Brandortes, nach Brandbeginn über 14,5 Minuten in westlicher Richtung zur Entrauchungsstation Nr.5 mit +1,5 m/s bis +2,0 m/s erhalten blieb (mittlere Kurve), um dann auf +0,5 m/s abzufallen.

Das Abfallen der Strömungsgeschwindigkeit am Brandort war hier auf die Hinzuschaltung der zweiten Entrauchungsstation Nr.6 zurückzuführen, wodurch die Brandgase im Tunnel, beginnend ab 11:41 Uhr, nach beiden Richtungen abgesaugt wurden und die Strömung vom Brandort zur westlich gelegenen Entrauchungsstation Nr.5 etwas stagnierte (die im selben BMA6 nach Osten gerichtete Strömung war zu dieser Zeit der nach Westen gerichteten vergleichbar, sie wurde aber bei dem Versuch nicht erfasst, weil dort keine MS vorhanden war).

Die Strömung entsprach damit der Leistung der 12 aktivierten Entrauchungsventilatoren von jeweils $14 \text{ m}^3/\text{s}$ (bei $47,5 \text{ m}^2$ Tunnelquerschnitt wären das „ohne“ Dichteänderung $<1,77 \text{ m/s}$).

Nach erfolgtem Löscheinsatz endeten die Voraussetzungen für den Brandalarm (für zu hohe CO und Temperaturwerte), es blieb nur noch die erhöhte Lufttrübung für einige Zeit als Voralarm, so dass die für den Strömungsabgleich aktivierten Strahlventilatoren an den Portalen abschalteten, wodurch sich um 12:08 Uhr im BMA6 eine Strömungsgeschwindigkeit in beide Richtungen vom Brandort mit etwa $+1,0 \text{ m/s}$ und $-1,0 \text{ m/s}$ einstellte (mittlere Kurve gilt für die westliche Strömung, die östliche wurde im selben BMA nicht gemessen), während die Strömungen in den benachbarten BMA mit $1,5$ bis $2,0 \text{ m/s}$ (obere Kurve) und $-1,5$ bis $-2,0 \text{ m/s}$ (untere Kurven) erhalten blieben.

Diese Strömungen waren bis zum Abschalten der Entrauchungsventilatoren (nach dem Weggang des Voralarms, d. h. nach der Entrauchung des Tunnels) um 12:47 Uhr konstant. Danach schaltete sich wieder die automatische Längslüftung des Tunnels mit den Strahlventilatoren ein.

Zur vollständigen Darstellung der Strömungsvorgänge werden im Bild 8 die Trendkurven der Luftströmung auch von den anderen 7 Meßstellen gezeigt, die östlich vom Brandort lagen. Sie zeigten im Brandversuch die gleiche stabile Strömung, wie die westlich gelegenen.

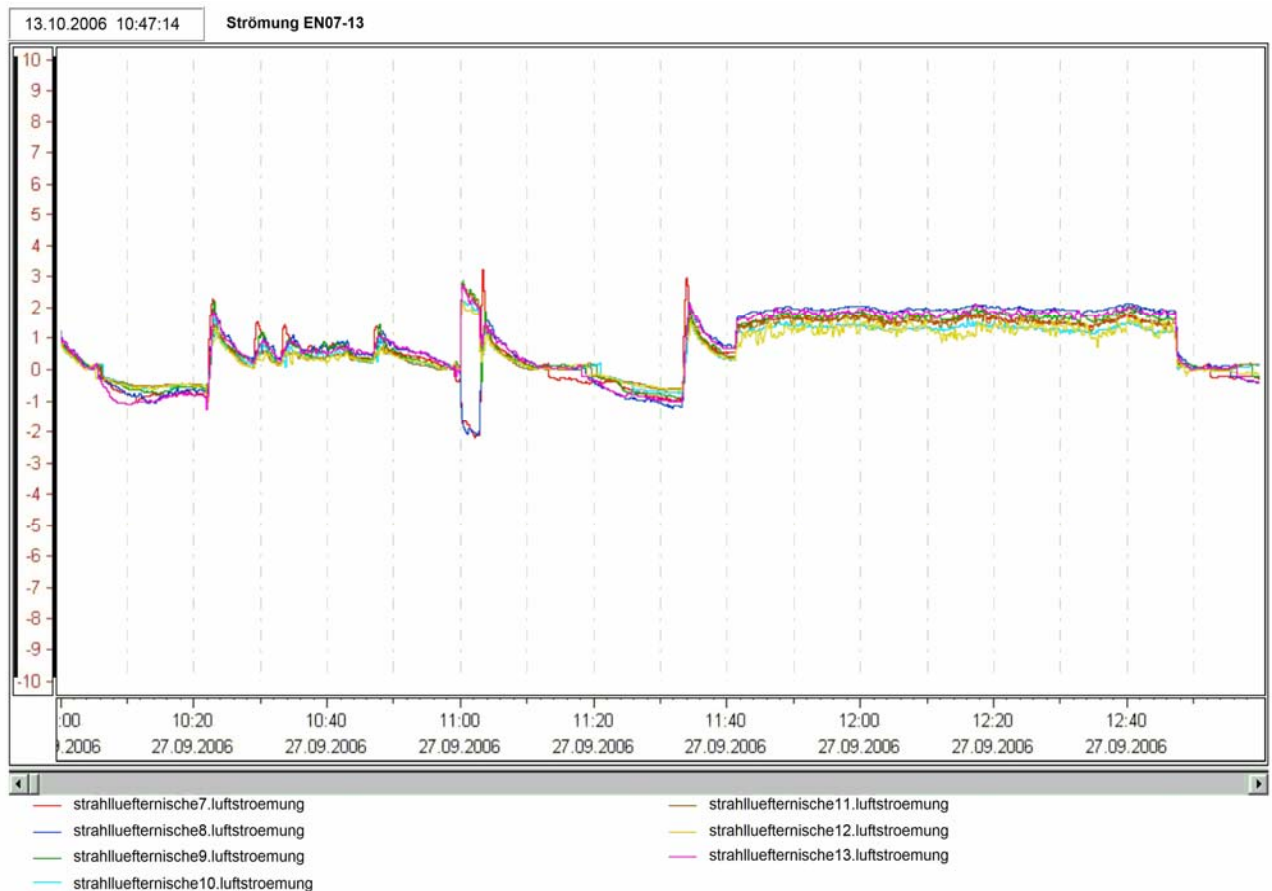


Bild 8: Strömungsgeschwindigkeit in der östlichen Tunnelhälfte beim Brandversuch

11. Auswertung der Versuchsergebnisse

Aus den vorgestellten Meßergebnissen ergeben sich folgende Bewertungen:

Videokameras im Tunnel

Die ursprünglich geplante Branddetektion per Videobildauswertung war in diesem Fall nicht für den geforderten frühzeitigen Start der Brandlüftungsautomatik oder eine sichere Brandalarmgenerierung geeignet, weil sie zahlreiche Rauchalarme produzierte, die von Störeinflüssen verursacht waren, wie im nachfolgenden Bild 9 aus den noch verfügbaren Datenaufzeichnungen dargestellt.

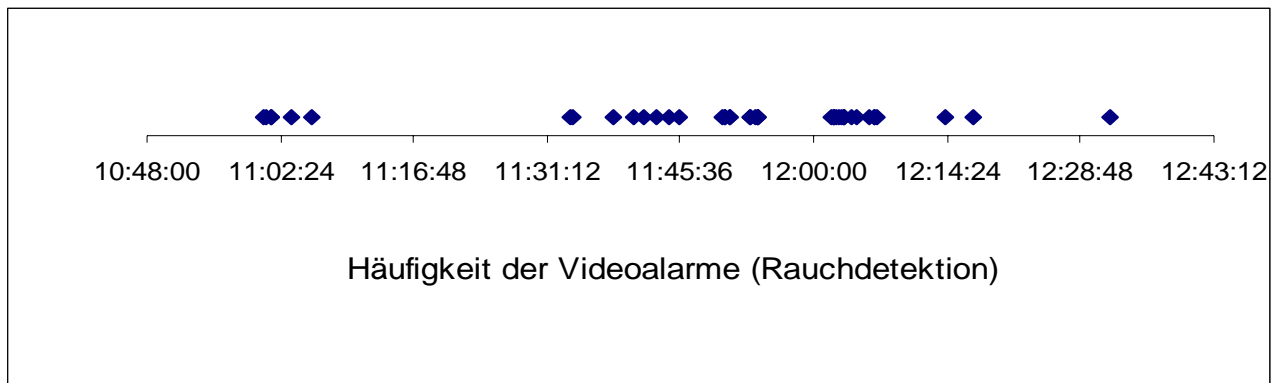


Bild 9: Rauchmeldungen der Videoereignisdetektion

Für die Steuerung der Tunnellüftung und Tunnelentrauchung oder die Auslösung der Tunnelspernung und des Brandalarms wurde die Rauchdetektion per Videobildauswertung deshalb nicht herangezogen, mit dem Ergebnis, dass es bisher, in den ersten sechs Monaten nach Freigabe des Tunnels, noch keinen einzigen Brandfehlalarm für die Einsatzkräfte gab.

Ferner ist festzuhalten, dass die für die Beobachtung und Überwachung des Brandverlaufs vorgesehene Videokamera in 50 m Abstand zum Brandort bereits 11,5 Minuten nach Zündung des Entstehungsbrandes völlig im Rauch erblindete, so dass der Brandort bis zum Ende der Löscharbeiten nicht mehr von der Tunnelleitzentrale aus einsehbar war.

Die Videokameras eignen sich somit nicht zum Brandfallmanagement, um z. B. Personen in der Nähe des Brandortes über Lautsprecher Anweisungen zu geben, weil die Kameras sie nicht sehen.

Bei größeren Bränden ist ferner mit dem technischen Totalverlust der Kameras im Bereich der heißen Rauchgasströmung zu rechnen, wenn die Kameras für die Verkehrsüberwachung an der Tunneldecke installiert werden.

Es empfiehlt es sich daher, die Kameras nicht für die Rauchdetektion einzusetzen, sondern nur zur Verkehrsüberwachung und dessen Lenkung, insbesondere an Gefahrenstellen, und zur Überwachung der Notausgänge, SOS-Nischen, Portale und Pannenbuchten.

CO-Gaskonzentrationsmessung

Die Messung der CO-Gaskonzentration während des laufenden Betriebes hat jedoch auch gezeigt, dass nach wie vor, selbst bei geringem bis mittlerem Verkehrsaufkommen, mit relevanten CO-Gaskonzentrationen zu rechnen ist, die vollständig überwacht und kontrolliert werden müssen, da anderenfalls gefährliche und fatale Folgen nicht auszuschließen wären.

Die Beschränkung auf eine einzige Referenzmeßstelle wäre deshalb durch nichts zu rechtfertigen.

Die Messungen haben ferner bestätigt, dass die Ausbreitung und Verteilung der CO-Gase und der Feinstaubwolken im Tunnel weder zeitlich noch örtlich zusammen auftreten.

Daraus folgt, dass aus dem Ergebnis von dem einen Meßsystem nicht auf das Ergebnis des anderen Systems geschlossen werden kann.

Dies ist ein weiterer wichtiger Grund, neben den Geräten zur Messung der Lufttrübung auch solche zur Messung der CO-Gaskonzentration in ausreichend geringen Abständen einzubauen.

Dabei sind die Sollwerte für die Regellüftung programmtechnisch der erwarteten CO-Konzentrationsverteilung anzupassen, um einen optimalen, d. h. energiesparenden und sicheren Betrieb bei der einseitigen Längslüftung zu ermöglichen.

Die CO-Konzentrationsmessung hat sich in dem Brandversuch auch als hervorragende Möglichkeit zur Brandfrüherkennung und zur Brandalarmauslösung bestätigt, wenn diese Messung in Kombination mit der Messung der Lufttrübung eingesetzt und mittels eines geeigneten Analyseverfahrens zur Brandfalldiagnose eingesetzt wird.

Im vorliegenden Brandversuch waren die Auslösewerte für den Brandalarm, sei es durch das Sensorkabel oder durch die Kombination von Lufttrübungs- und CO-Messung praktisch gleich schnell.

In dem nachstehenden Bild 10 ist das deutlich zu erkennen:

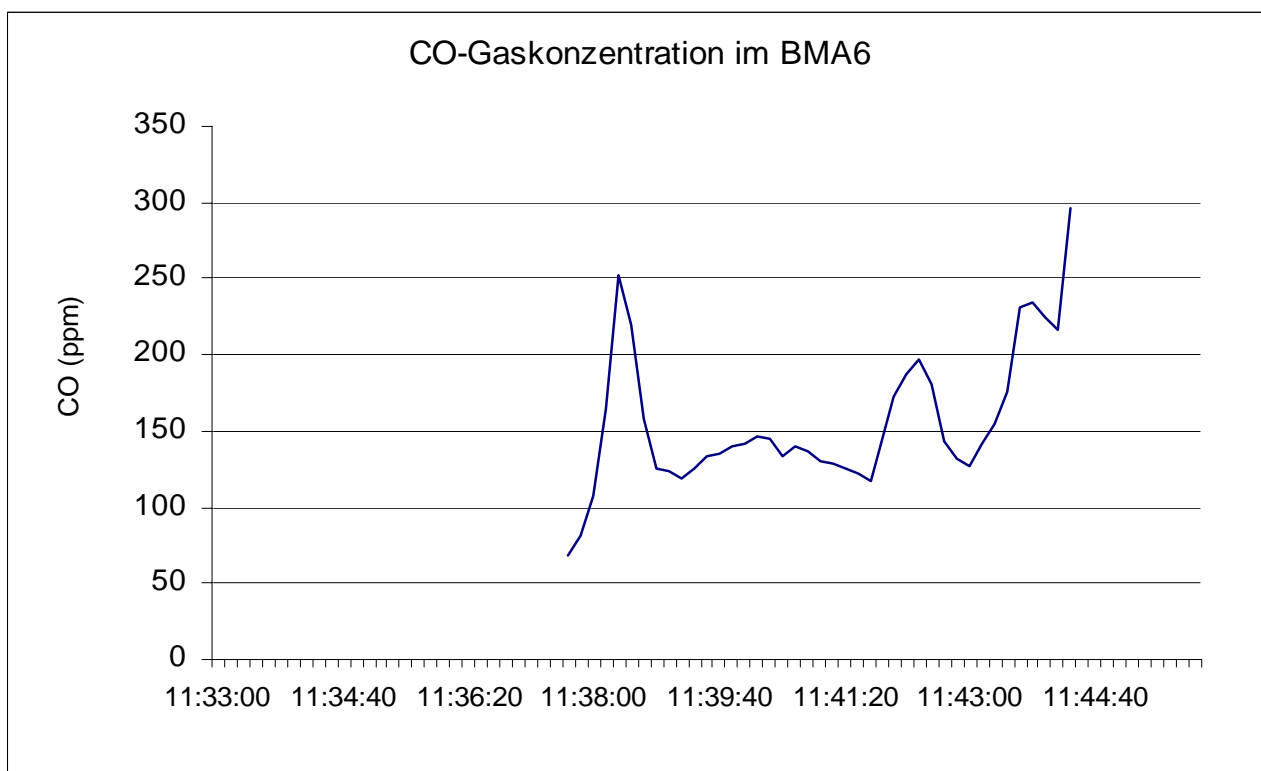


Bild 10: Anstieg der CO-Konzentration kurz nach der Zündung des Entstehungsbrandes

Mit der Inbrandsetzung der Fackel zur Zündung des Stützfeuers um 11:33:02 stieg die Gaskonzentration in 30 m Abstand vom Brandort rasch auf den Voralarmwert von 150 ppm an, der zusammen mit dem VA der Lufttrübungsmeßstelle einen automatischen Brandalarm generierte.

Zuvor waren bereits die Entrauchungsanlage und die Tunnelsperrung durch die Messung der Lufttrübung aktiviert worden.

Für die schnelle Rauchdetektion müssen die CO-Gasmesser an der Tunneldecke, bzw. in der Tunnelfirste installiert werden, weil das CO-Gas etwas leichter als die Umgebungsluft ist und bei seiner Erwärmung zusätzlichen Auftrieb erfährt, so dass es am frühesten immer am höchsten Punkt im Tunnelquerschnitt zu messen ist.

Bei größeren Bränden ist jedoch mit dem technischen Totalverlust der CO-Meßgeräte im Bereich der heißen Rauchgasströmung zu rechnen, was für die darauf folgende Phase zu berücksichtigen ist.

Für die Entrauchungsanlage werden dafür zusätzliche, hitzefeste Detektoren als Auffangsystem notwendig, die bei Totalausfall der anderen Systeme (welche insbesondere zur Brandfrüherkennung benötigt werden) den weiteren automatischen Betrieb der Tunnelentrauchung entsprechend der jeweiligen aktuellen Brandentwicklung und Rauchausbreitung gewährleisten.

Mit dem realistischen Brandversuch konnte auch die im Rauchgasstrom theoretisch erwartete Abhängigkeit der CO-Gaskonzentration von der Entwicklung der Brandstärke bestätigt werden.

Es zeigte sich, dass der zeitliche Verlauf der CO-Konzentration sehr gut mit der Brandentwicklung korrespondiert und damit ein Maß für die Brandleistung und die Brandstärke (MW/m^2) liefert.

Die Brandleistung ist grundsätzlich nicht nur von der Brandfläche sondern auch von dem eingesetzten Brennstoff, der Abbrandgeschwindigkeit und der Qualität der Verbrennung abhängig.

Im Tunnel vergrößert sich mit der Entwicklung des Entstehungsbrandes die Brandfläche mit der Zeit und die Abbrandgeschwindigkeit nimmt mit der Temperatur der Flammen und des angeheizten Brennstoffs zu, wodurch die Brandleistung und die Brandstärke steigen, gleichzeitig nimmt jedoch die Luftüberschusszahl und der Verbrennungswirkungsgrad ab, weil der Brandvorgang von der schlechteren Gemischaufbereitung (bei geringer Durchmischung der Brandgase mit der Tunnelluft) gebremst wird, wodurch vermehrt unverbrannte Gase (CO), Dämpfe, Aerosole und Ruß gebildet werden und die Konzentration, Dichte und Menge der Schadstofffracht in den Rauchgasen sich erhöht (zusätzlich zu der Staubbelastung mit Ascheteilchen).

An der Höhe der CO-Konzentration als Leitgröße ist deshalb auch in jeder Brandphase die aktuelle Brandstärke ablesbar.

Der Verlauf der CO-Gaskonzentration (Bild 4 auf S. 22) zeigt diesen Vorgang sehr deutlich.

Luftrübungsmessung

Die Geräte zur Messung der Luftrübung werden zur Steuerung der Tunnellüftung eingesetzt, um hinreichend gute Sichtverhältnisse im Tunnel zu gewährleisten.

Dabei sind die Sollwerte für die Regellüftung programmtechnisch der erwarteten Konzentrationsverteilung anzupassen, um einen optimalen, d. h. energiesparenden und sicheren Betrieb der einseitigen Längslüftung zu ermöglichen.

Gegen Störeinflüsse, die von aufgewirbelten Staubwolken im Tunnel oder durch Auspuffendrohre verursacht werden, ist die Lüftungssteuerung durch geeignete Filteralgorithmen zu schützen.

Die Geräte müssen außerdem durch eine interne elektrische Beheizung der Ansaugluft gegen evtl. Nebel einflüsse geschützt werden, um Fehlsteuerungen der Lüftungsanlage sicher auszuschließen.

Neuere Bauarten der Geräte kommen jetzt auch ohne die bisherigen, mechanischen Ansaugsysteme aus, wodurch sie nur noch sehr wenig Wartung benötigen.

Da die Geräte sehr schnell und schon auf geringe Rauchmengen reagieren, eignen sie sich hervorragend zur automatischen Steuerung der Tunnelentrauchung und, in Verbindung mit weiteren Meßsystemen, zur Analyse und Brandfalldiagnose.

Vom Verfasser wurden deshalb in 2001 für diesen Tunnel insgesamt 14 Geräte in 100 m Abständen vorgesehen, die in Kombination mit ebenso vielen CO-Meßgeräten und Temperaturmeßgeräten das neuartige System der Brandfrüherkennung und Tunnelentrauchung bildeten.

Im vorliegenden Brandversuch waren die Auslösezeiten für die Tunnelsperrung, die Tunnelentrauchung und den Brandalarm so schnell, wie bisher noch von keinem anderen System erreicht.

In dem folgenden Bild 11 ist das deutlich zu erkennen:

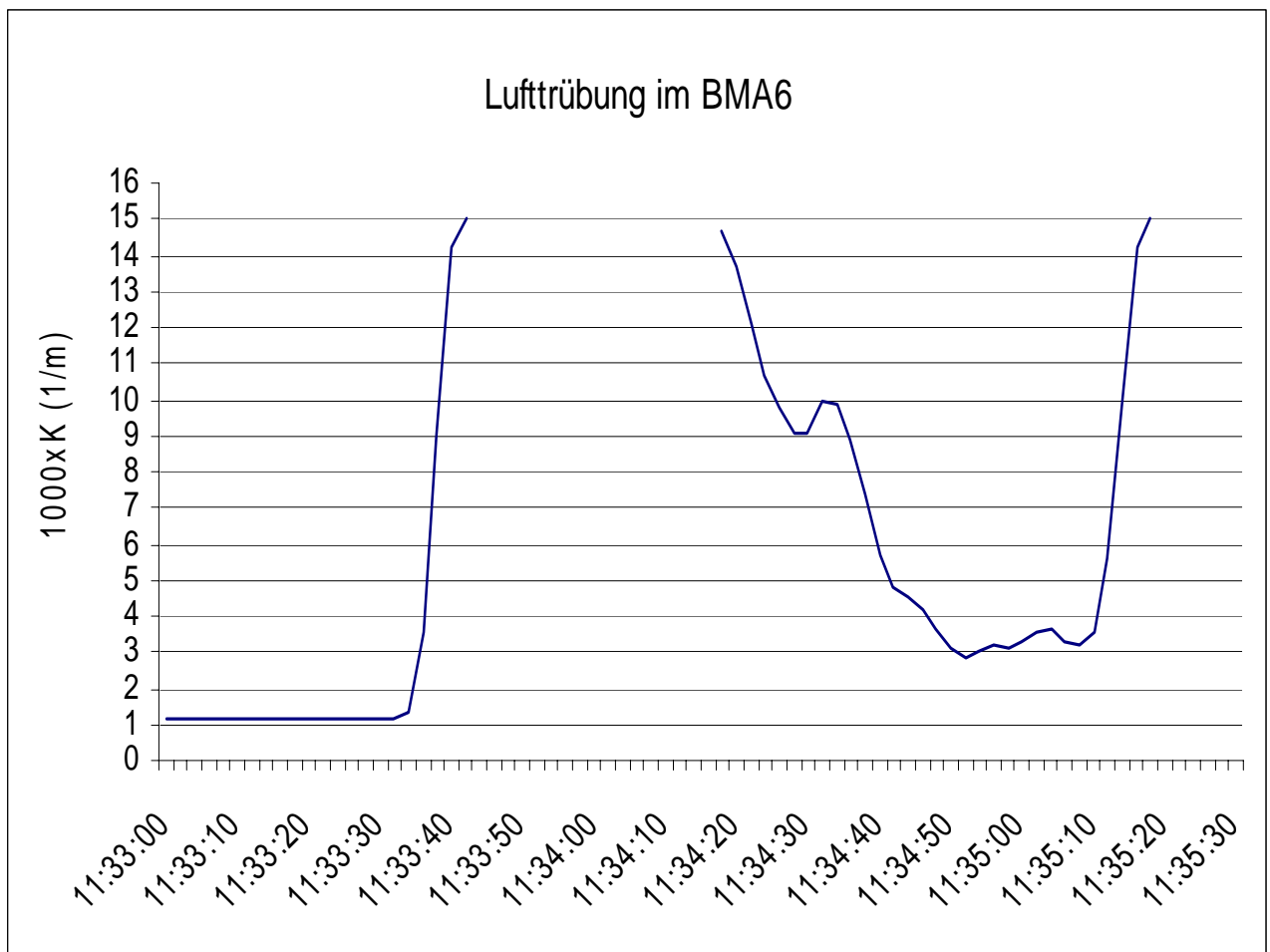


Bild 11: Anstieg der Luftrübung bei der Zündung des Entstehungsbrandes

Mit der Inbrandsetzung der Fackel zur Zündung des Stützfeuers um 11:33:02 stieg die Luftrübung in 30 m Abstand *westlich(!)* vom Brandort rasch auf den Voralarmwert von 0,015/m an, der zum automatischen Start der nächstgelegenen Entrauchungsstation führte (die Grundströmung im Tunnel war zu diesem Zeitpunkt mit 0,3 m/s von West nach Ost gerichtet!).

Zuvor hatte das Photometer den Tunnel bereits bei einem Trübungsfaktor von 0,010/m gesperrt.

Der Brandalarm für die Einsatzdienste wurde vom Photometer etwas später, im Zusammenwirken mit dem VA des Sensorkabels, abgesetzt.

Dieses geschah zeitgleich mit dem Eingang des VA von dem benachbarten CO-Meßgerät, so dass beide Messungen als gleichwertig zu betrachten sind, aber mit dem Unterschied, dass die CO-Meßgeräte ohnehin vorhanden sein müssen (siehe hierzu die vorherigen Ausführungen).

Für die schnelle Rauchdetektion müssen die Photometer (Trübungsmessgeräte), ebenso wie die CO-Meßgeräte, an der Tunneldecke, bzw. in der Tunnelfirste installiert werden, weil die heißen Rauchgase einen Auftrieb erfahren, wodurch sie am frühesten immer am höchsten Punkt im Tunnelquerschnitt zu messen sind.

Bei größeren Bränden ist jedoch mit dem technischen Totalverlust der Photometer im Bereich der heißen Rauchgasströmung zu rechnen, was für die darauf folgende Phase zu berücksichtigen ist.

Für die Entrauchungsanlage werden dafür zusätzliche, hitzefeste Detektoren als Auffangsystem notwendig, die bei Totalausfall der anderen Systeme (welche insbesondere zur Brandfrüherkennung benötigt werden) den weiteren automatischen Betrieb der Tunnelentrauchung entsprechend der jeweiligen aktuellen Brandentwicklung und Rauchausbreitung gewährleisten.

Brandsensorkabel

Das installierte Brandsensorkabel hat bei dem realistischen Brandversuch eines typischen Entstehungsbrandes mit zwei Pkw gezeigt, dass seine Brandalarmgabe gegenüber dem neuen System der Analyse zur Brandfalldiagnose erst sehr viel später einsetzte.

Für die Generierung eines belastbaren Hauptalarms benötigte das Kabel mehr als doppelt so viel Zeit (11 Minuten und 22 Sekunden), als das neuartige System mit 5 Minuten und 4 Sekunden.

Außerdem fiel das Kabel bei dem Brandversuch bereits nach 19 Minuten, bei einer Temperatur von nur 160°C völlig aus und stand damit für die folgende Brandphase nicht mehr zur Verfügung.

Die Vorteile des neuen Systems zur Brandfrüherkennung und zur Tunnelentrauchung soll deshalb das nachstehende Bild 12 mit den erzielten Zeiten verdeutlichen.

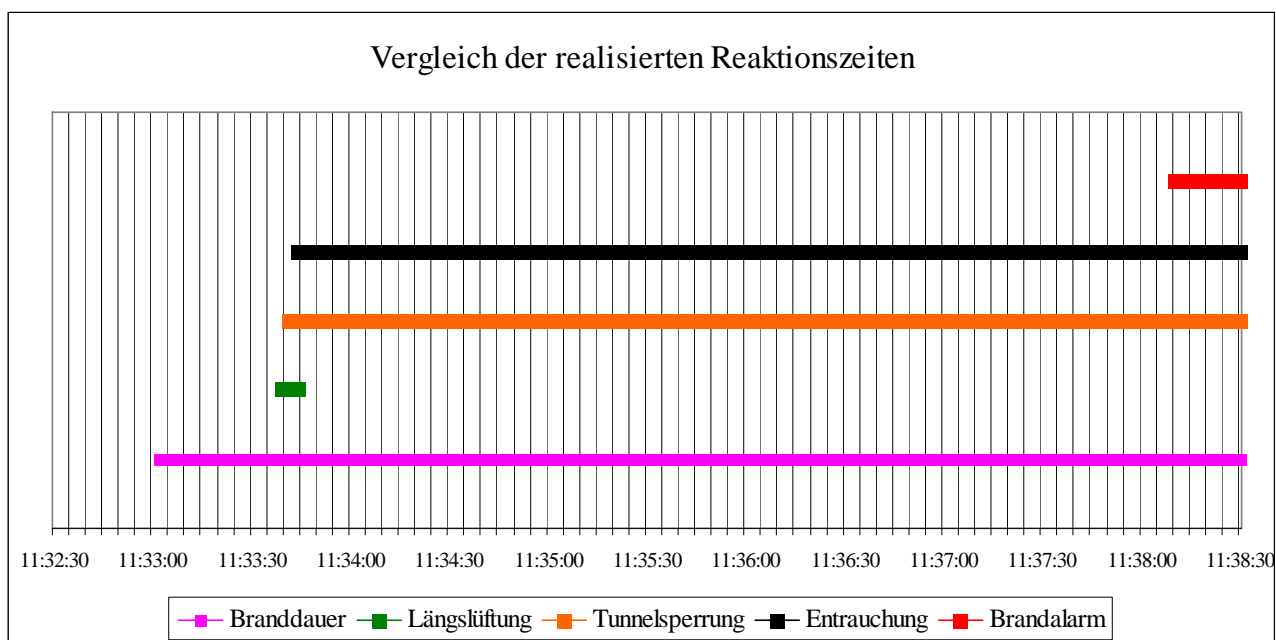


Bild 12: Erzielte Zeiten zur Branddetektion und zur Aktivierung der Tunnelentrauchung

Mit dem Einbau schneller und ausfallsicherer Systeme zur Brandfrüherkennung und zur Steuerung der Tunnelentrauchung kann somit auf die Sensorkabel verzichtet werden, die langsam reagieren und früh ausfallen.

Neben den beschriebenen Sensoren zur Brandfrüherkennung sind dann zusätzliche, hitzefest gekapselte Thermoelemente als Auffangsystem vorzusehen, die bei Totalausfall der anderen Systeme den weiteren automatischen Betrieb der Tunnelentrauchung entsprechend der jeweiligen aktuellen Brandentwicklung und Rauchausbreitung gewährleisten.

Strömungsmessung

Die Messung der Strömungsgeschwindigkeit mit Ultraschallmessgeräten (Sonometern) ergab in Verbindung mit den stufenlos regelbaren Strahlventilatoren hervorragende Ergebnisse der Strömungskontrolle, die mit einfacheren Schaltungen bisher nirgendwo erreicht wurden.

Dies ist im Brandfall für die Bildung und Aufrechterhaltung einer stabilen Schichtströmung von ganz entscheidender Bedeutung und konnte so auch in dem Brandversuch voll bestätigt werden.

Die Geräte wurden hier in 0,8 m Abstand zur Decke montiert, um die Rauchgasströmung gezielt zu kontrollieren und in der TLZ sichtbar zu machen

Hierzu wurden vom Verfasser neuartige Hitzeschutzkapselungen für die Geräte vorgesehen, um diese gegen die Einwirkung der heißen Rauchgasströmung zu schützen.

Die Kapselung wurde dazu u. a. mit einer kleinen Öffnung für den Meßstrahl versehen, was sich im Brandversuch voll bewährt hat.

Insbesondere konnten mit den Geräten und den Strahlventilatoren die beiden Strömungen von den Portalen zum Brandort exakt abgeglichen und ein Aufbrechen der stabilen Schichtströmungen in beiden Strömungsrichtungen vollständig verhindert werden.

Für den Regelbetrieb stellt die Messung der Strömungsgeschwindigkeit das Bindeglied zwischen der Luftqualitätsregelung und der Drehzahlregelung der Strahlventilatoren dar und sie war auch Voraussetzung für die zuverlässige Steuerung der einseitigen Längslüftung zum Abluftkamin am Westportal, um unzulässige Immissionsbelastungen am Ostportal zu verhindern.

Da schnell fahrende Lkw im Tunnel immer eine erhebliche Störgröße für die Strömungsmessung darstellen, wurden die vom Verfasser eingeführten und bewährten Filteralgorithmen bei der SPS eingesetzt, deren Zuverlässigkeit sich aus den Messkurven der Strömung ablesen lässt.

Gastemperaturmessung

Die vorgenannten Sonometer wurden vom Verfasser auch zur Messung der Rauchgastemperatur eingesetzt, um mit diesen ein weiteres Meßsystem für die Brandfrüherkennung zur Verfügung zu haben, das die Ergebnisse aus verschiedenen Meßsystemen vergleicht.

Die Messergebnisse zeigten, dass die Geräte die Erwartungen hinsichtlich der Brandfrüherkennung erfüllten, da sie fast ebenso schnell wie die CO-Meßgeräte reagierten und so als Redundanzsystem zu diesen nutzbar waren, was insbesondere bei einem künftigen Verzicht auf die Sensorkabel und bei möglichen Geräteausfällen anderer Systeme für die automatische Entrauchung bedeutsam ist.

Nach der Brandfrüherkennungsphase wurden die Messwerte jedoch durch die rapide anwachsende Mächtigkeit der Rauchgasschicht und die Zunahme der Rauchgasdichte verfälscht und unbrauchbar.

Für die Entrauchungssteuerung sind deshalb zusätzliche, hitzefeste Thermoelemente als Auffangsystem notwendig, die im weiteren Brandverlauf die Rauchgasausbreitung sicher erfassen, um den weiteren Automatikbetrieb und die Funktionalität der Entrauchungsanlage auch bei größeren Bränden und Ausfall der oben genannten Meßsysteme zu gewährleisten.

12. Wirksamkeit der Entrauchungsanlage

Mit den Sensoren konnte die Anlage während des Brandverlaufs sowohl auf eine schnelle Zunahme der Brandleistung und Rauchausbreitung als auch auf deren Abklingen reagieren, indem die jeweils nächstgelegene Entrauchungsstation automatisch hinzu- oder weggeschaltet wurde.

Dadurch wurde die Absaugleistung immer der jeweiligen Brandleistung und Rauchausbreitung angepasst und lokal auf die Rauchgasströmung konzentriert, um deren ungehinderte Ausbreitung und das Abdriften und Absinken von abgekühlten Rauchgasschwaden zu verhindern.

Beim gleichzeitigen Einsatz mehrerer Entrauchungsstationen stellte sich dadurch an den beiden Strömungsfronten eine hohe Luftgeschwindigkeit vom Portal in Richtung zum Brandort ein, wodurch die weitere Rauchausbreitung gebremst und auch zurückgeholt wurde.

Gleichzeitig ergab sich am Brandort, zwischen den nächstgelegenen Entrauchungsstationen, eine sehr geringe Luftgeschwindigkeit, wodurch die Rauchströmung an der Decke stabilisiert wurde.

Beide Effekte erzeugten die für die Flucht der Tunnelnutzer und den Löschangriff der Einsatzkräfte erforderliche Sicherheit, sowohl nahe am Brandort als auch in jedem beliebigen Abstand.

Bei dem Brandversuch wurde die Wirksamkeit dieses Konzeptes dadurch bestätigt, dass die westlich vom Brandort gelegene Entrauchungsstation Nr.5, als nächstgelegene Station, zuerst einschaltete und dass anschließend, knapp 8 Minuten später, zum Zeitpunkt des Vollbrandes des ersten Pkw, als die heißen Rauchgase gegen die erzeugte Luftströmung den östlich gelegenen BMA7 er-

reichten, dort die östliche vom Brandort und weiter entfernt gelegene Entrauchungsstation.Nr.6 automatisch hinzuschaltete.

Die Rauchausbreitung konnte dadurch in diesem Versuch auf eine Strecke von 100 m zwischen den beiden aktivierten Stationen begrenzt werden.

Gleichzeitig wurde über die gesamte Branddauer von ½ Stunde und den anschließenden Löschein-satz immer eine stabile Schichtung der Rauchgasströmung und des Wasserdampfes an der Decke erreicht (siehe die Photos im Anhang Seite 51 - 70).

Die Anlage würde darüber hinaus auch noch wesentlich größere Brandleistungen beherrschen.

Ggf. können maximal 30 Entrauchungsventilatoren immer gleichzeitig eingeschaltet werden (z. B. an 5 Stationen mit jeweils 6 ERV), die mit einer Absaugleistung von insgesamt 420 m³/h eine Zu-strömungsgeschwindigkeit von jeweils 4,42 m/s von den beiden Portalen in Richtung Brandherd erzeu-gen könnten (bei Volumenzunahme der heißen Gase wird die Geschwindigkeit jedoch geringer).

Die Anlage könnte damit auch noch kalorische Brandleistungen von etwa 200 MW kontrollieren.

Dieses ist weltweit bisher ohne Beispiel.

13. Vorprüfung der Entrauchungsanlage

Vor der Serienfertigung der Entrauchungsventilatoren wurden diese anhand eines kompletten Proto-typs im Werk des Herstellers in einer Hitzeprüfkammer erfolgreich auf ihre Eignung für den Ent-rauchungseinsatz über 90 Minuten bei 400°C im Vollastbetrieb getestet.

Ebenso wurden die Immissionsschutzklappen getestet, die als obere Abschlüsse auf den Entrauchungsschächten vorgesehen wurden, um die Anwohner im Regelbetrieb vor dem Lärm und den Abgasen aus dem Tunnel zu schützen und die im Entrauchungsbetrieb beim Start der Entrauchungsventilatoren automatisch von den eingebauten elektrischen Stellantrieben geöffnet werden.

Die Stellmotoren zum Öffnen der Klappen erhielten eine Hitzeschutzummantelung aus Mineralfasern und funktionierten einwandfrei über 15 Minuten bei 400°C (sie sollen dann nur öffnen).

Die Klappenantriebe wurden dabei für eine normierte Schneelast und eine sehr kurze Öffnungszeit von 18 Sekunden ausgelegt, um in kürzester Zeit die volle Absaugleistung im Tunnel zu erreichen.

Da bei großen Bränden die dann zu erwartende schlechte Verbrennung des Brennstoffs jedoch zu erhöhter Produktion von unverbrannten Gasen und Dämpfen im Rauchgas führt, muss dies zu län-geren Flammen führen, die außerhalb des Brandortes auch zu Sekundärbränden führen können, wenn sie im Freien an leicht entflammbares Material gelangen.

Um hier jedes Risiko auszuschließen, wurden die Ansaugöffnungen der Entrauchungsschächte mit Flammensperren versehen, die einen Flammendurchschlag bei Großbränden verhindern sollen.

Diese Flammensperren wurden ebenfalls anhand eines Prototyps im Werk des Herstellers, und zwar im eingebauten Zustand an einem kompletten, im Schacht montierten Entrauchungsaggregat, bei voller Absaugleistung und über einem 1 m² großen Ethanolfeuer, erfolgreich getestet.

Ferner wurde im Tunnel vor dem realistischen großen Brandversuch ein kleiner Brandversuch mit *Holzscheiten (Scheiterhaufen)* und etwas Verpackungsmaterial erfolgreich durchgeführt.

Dieser kleine Brandversuch zeigte bereits alle Merkmale eines *typischen Entstehungsbrandes* und war daher sehr viel aussagekräftiger für die Funktionsprüfung der Sensorik und Steuerung, als der anschließend noch zusätzlich durchgeführte, 2-minütige Sensorkabeltest mit 4 Benzinwannenfeuer.



Bild 13: Vorprüfung der Flammensperre an einem Entrauchungsventilator mit Klappe

14. Weitere Ergebnisse

Neben den Ergebnissen zur Tunnelentrauchung ergaben sich weitere Punkte, die zu erwähnen sind:

Sensorkabel

Das Sensorkabel fiel in dem realistischen Brandversuch sehr bald aus und sein Brandalarm kam erst sehr viel später, als der von dem hier vorgestellten System, das mit verschiedenen und redundanten Sensoren zur Brandfrüherkennung und zur Steuerung der Entrauchungsstationen arbeitet.

Auf das Sensorkabel und vergleichbare lineare Brandmeldesysteme kann deshalb bei Verwendung des hier vorgestellten neuen Systems nach Meinung des Verfassers verzichtet werden.

Lautsprecher

Die Lautsprechergehäuse waren aus Kunststoff und in etwa 0,8 m Abstand zur Decke montiert, so dass diese im Bereich der heißen Rauchgasströmung schnell erweichten und unbrauchbar wurden.

Der Verfasser hält es deshalb für richtig, die Lautsprecher künftig möglichst außerhalb der heißen Rauchgasschicht auf 2,5 m über OKF zu montieren, um auch noch während eines Brandes Ansagen im Fluchtbereich machen zu können.

Funkantenne

Die Funkantenne musste ebenso wie das Sensorkabel und die Elektrokabel an der Decke nach dem Brand erneuert werden, da diese durch die heißen Rauchgase unbrauchbar geworden waren.

Die E90-Kabel konnten zwar ihre Funktion erhalten, mussten aber trotzdem ausgetauscht werden.

Für die Funkantenne ergibt sich daher die gleiche Forderung wie für die Lautsprecher, nämlich dass

diese künftig durch eine Tieferlegung vor der Brandeinwirkung zu schützen ist.

Meßsysteme

Bei einem Meßsystem ohne Sensorkabel müssen die Abstände der Messgeräte an die jeweilige Länge der Entrauchungsabschnitte (und Brandmeldeabschnitte) angepasst werden, so dass sich für einen 100 m langen BMA etwa folgendes Meßschema ergibt:

2 Photometer in max. 50 m Abständen in den Viertelpunkten des BMA, an der Decke (bzw. Firste),

1 Thermoelement für 1200°C in der Mitte des BMA, hitzefest gekapselt an der Decke (bzw. Firste),

1 CO-Sensor in der Mitte des BMA, an der Decke (bzw. Firste),

1 Sonometer in der Mitte des BMA, an der Wand, quer durch den Tunnelquerschnitt messend und mit dickwandiger Hitzeschutzkapsel gegen die Brandeinwirkung geschützt.

Dynamische Prozeßvisualisierung

Die Gerätefunktionen und die Meßwerte sollten immer auf Einzeldisplays dargestellt werden, insbesondere die Luftströmung und deren Temperatur, weil nur damit eine optimale Einstellung der Steuerung und eine schnelle Übersicht über die Rauchausbreitung und die Funktion der Lüftungsanlage im Regelbetrieb und im Brandfall möglich ist.

Nachstehend folgen drei Beispiele für die dynamische Darstellung der Gasströmung und der Gas-temperatur im Tunnel sowie der zugehörigen Ventilator- und der Luftqualitätsmesswerte auf jeweils einem separaten TFT-Display für jeden BMA in der TLZ (Bilder Nr. 13, 14 und 15).

Auf den Displays werden die aktuellen Gastemperaturen im jeweiligen BMA als farblich angepasste Hintergrundfarbe dargestellt und die Gasströmungen als bewegte Richtungspfeile mit der gemessenen Geschwindigkeit, sowie die Ventilatorbetriebszustände und die Luftqualitätsmesswerte.

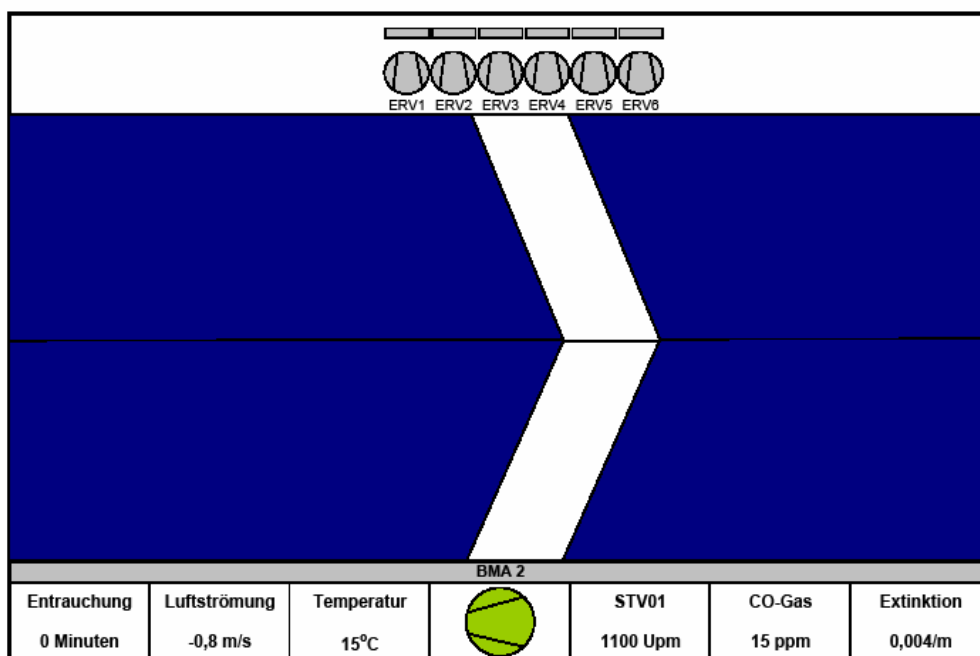


Bild 14: TFT-Display für den BMA 2 bei aktivem Strahlventilator für die Längslüftung

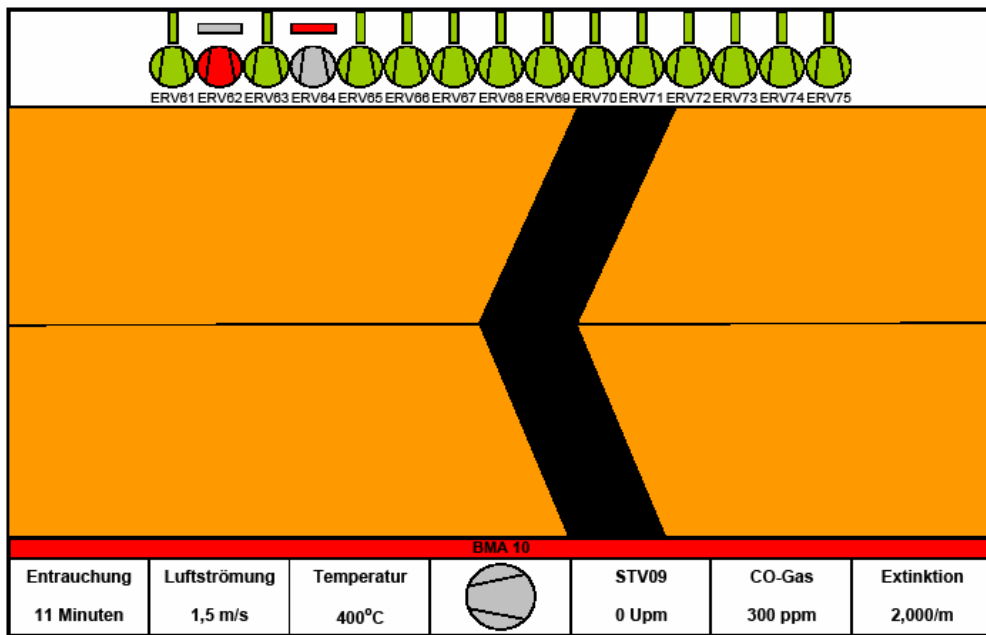


Bild 15: TFT-Display für den BMA 10, bei aktiven Entrauchungsventilatoren und geöffneten Immissionsschutzklappen für die Tunnelentrauchung (hier mit einem gestörtem ERV und einer gestörten ISK dargestellt) und mit Anzeige des Brandalarms im BMA 10.



Bild 16: Visualisierung der Strömung und Temperatur während des Brandversuches

Rauchfahne im Freien

Die Höhe der Rauchfahne aus den Entrauchungsschächten konnte anhand der Photos mit etwa 25 m ermittelt werden, was mit den theoretischen Überlegungen zur Freistrahlausbreitung sehr gut übereinstimmte.

Bei aufkommendem Westwind wurde die Rauchfahne jedoch schon in 10 m bis 15 m Höhe umgelenkt und mit der Windströmung weggetragen.

Zur Einschätzung der Rauchausbreitung im Freien wurden zuvor 3-D-Simulationen für einen Lkw-Brand im Tunnel mit 30 MW-Brandleistung durchgeführt, die keine unverträglichen Gaskonzentrationen an den nächstgelegenen Wohnhäusern ergaben.

Als Bewertungskriterium wurde die CO-Konzentration herangezogen, die im Brandrauch in der Regel die kritische Größe ist.

Das Ergebnis der Simulation zur Rauchausbreitung wird beispielhaft im folgenden Bild Nr. 16 als Auszug aus dem Gutachten dargestellt.

Zusätzlich wurde die Luftbelastung in der Nähe der Entrauchungsschächte mit einem Simultantest-Set, überwacht (siehe auch das im Anhang beigefügte Photo vom Brandversuch), der gemäß VfdB 10/01 bei den Feuerwehren als Standard zur Überwachung von Brandgasen eingesetzt wird (mit Prüfröhrchen für Kohlenmonoxid, Blausäure, Salzsäure, nitrose Gase und Formaldehyd) und der zeigte, dass für die Anlieger zu keiner Zeit eine Rauchgefährdung bestand.

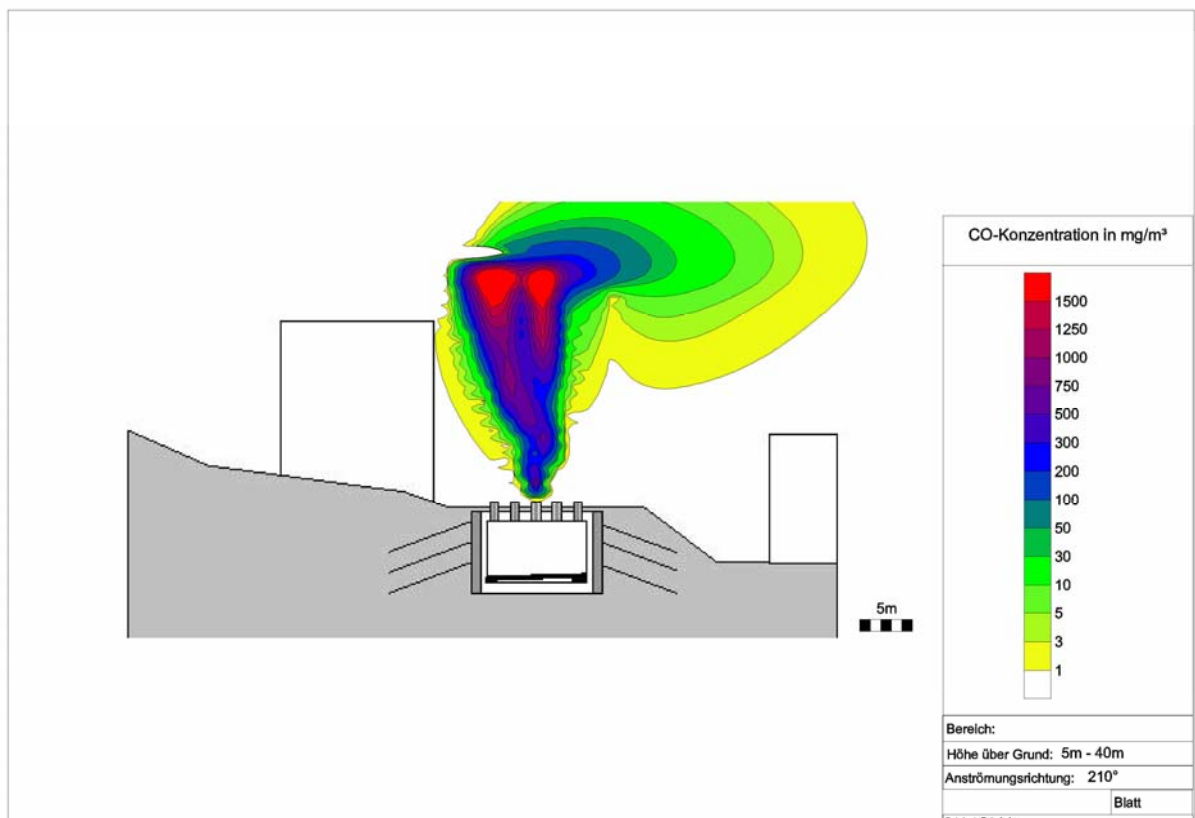


Bild 17: Simulation der Rauchgasausbreitung von einem 30 MW Lkw-Brand bei SW-Wind

Notausgänge und Fluchttreppenhäuser

Die hochwirksame und schnelle Entrauchung verhinderte während des Entrauchungsbetriebes jede Art von Rauchabsenkung oder Rauchübertritt in jene Bereiche, die für die Flucht der Tunnelnutzer und den Löschangriff der Einsatzkräfte im Tunnel generell vorhanden waren (z. B. Notgehwege).

Dies wird künftig völlig neue Strategien bei der Gestaltung von Sicherheitskonzepten ermöglichen, wenn im jeweiligen Einzelfall bei der Wahl des hier vorgestellten Systems die Notwendigkeit von Flucht- und Rettungsstollen, Treppenhäusern, Sprühwasseranlagen und zusätzlichen „Zweitritten“ in einer quantitativen Risikoanalyse zu bewerten ist.

Dieses muss auf Basis von belastbaren Kosten/Nutzen-Relationen mit Darstellung der im Einzelfall erzielbaren Sicherheitsgewinne (€) geschehen, um eine fundierte Entscheidungsgrundlage zu haben.

Ein rauchfreier Fluchtweg **innerhalb** des Tunnels wäre dann nicht nur sicherer, sondern u. U. auch kostengünstiger, als die vielen Fluchtstollen u. ä. Lösungen, wenn jene im Ereignisfall von den Flüchtenden wegen der schnellen Rauchausbreitung gar nicht erreicht werden können.

Generell breitet sich der Rauch schneller aus, als die Tunnelnutzer fliehen können, so dass die besten Fluchtstollen, Leuchten, Kameras, Funk- und Löschanlagen wenig nützen (s. Viamala-Brand).

Alle Anlagen, die den Rauch nicht völlig einfangen oder aus den Fluchtwegen entfernen können, tragen deshalb nur zu einer trügerischen *Scheinsicherheit* bei, wodurch sich letztendlich das gesamtgesellschaftliche Risiko überhaupt nicht verringert sondern eher noch erhöht.

Das Ziel muss deshalb die schnelle und vollständige Kontrolle und Entfernung der Rauchgase sein.

15. Kosten des realistischen Brandversuchs

Die Kosten für den Brandversuch wurden wie folgt angegeben:

- 100 m Brandschutzverkleidung der Tunneldecke über volle die Tunnelbreite und Verkleidung der beiden Tunnelwände mit je einem 1 m hohen Wandstreifen, sowie am Brandort selbst über die volle Wandhöhe, auf jeweils 10 m Länge sowie Verkleidung der frei liegenden Wandfugen und Dichtungen, abschließender Entsorgung und Restaurierung der Dübellöcher, gesamt: 92.500 €
- 10 cm hohes Sandbett mit feuchtem Kabelsand auf 10 m Tunnellänge und 9,5 m Tunnelbreite, als Fahrbahnschutz, mit Entsorgung, gesamt 500 €
- 2 Altfahrzeuge, Typ Opel und Ford, mit Tankfüllung und mit jeweils zwei Zusatzreifen, sowie Entsorgung, gesamt 1.000 €
- Reinigungsarbeiten im Tunnel nach dem Brandversuch, gesamt 1.500 €
- Prüfung der Lüftung und der Entrauchung nach dem Versuch, gesamt 1.000 €
- 1 CO-Gassensor (ECS) ersetzen, gesamt 800 €
- 35 m Brandsensorkabel ersetzen, gesamt 1.225 €
- 100 m Funkkabel ersetzen, gesamt 2.500 €
- 300 m Anschlusskabel-E90 der Tunnelleuchten ersetzen, gesamt 1.323 €
- Reinigungsarbeiten im Tunnel nach dem Brandversuch, gesamt 1.500 €
- Prüfung der Lüftung und der Entrauchung nach dem Versuch, gesamt 1.000 €
- Einsatz der lokalen FFW 3.006 €
- Gesamtkosten somit: **107.854 €**

16. Nachrüstungsmaßnahmen

Die Testergebnisse und die Messgeräteausfälle zeigten die Notwendigkeit einer Ergänzung der Entrauchungsautomatik, um bei einem eventuellen großen Lkw-Brand die automatische Entrauchung auch nach einem Ausfall der ECS, der Photometer, der Sonometer und des Sensorkabels aufrecht erhalten zu können.

Da bei einem Lkw-Brand die sehr hohen Temperaturen von 600°C bis 1200°C erfahrungsgemäß in einem sehr eng begrenzten Bereich, beidseitig um den Brandherd auftreten, ist davon auszugehen, dass in diesem Bereich neben den ECS, den Photometern und dem Sensorkabel auch die Sonometer schnell ausfallen werden, während in den direkt benachbarten BMA, bei reduzierter Hitze, nur die ECS und ggf. auch die Photometer ausfallen werden, während die hitzegekapselten Sonometer in ihrer Temperaturmessung, nicht jedoch in der Strömungsmessung beeinträchtigt sein werden.

Es wurde deshalb inzwischen für jeden BMA (Entrauchungsabschnitt) ein zusätzliches Thermoelement mit einem Messbereich bis 1200°C zur Nachrüstung vorgesehen.

Da dessen elektronischer Transmitter aber nur für Umgebungstemperatur bis max. 60°C einsetzbar ist, erhält deren Messkopf eine dickwandige Hitzeschutzkapselung, die in einem Glühofen bei 1200°C über 120 Minuten (F120) getestet werden soll, um die notwendige Sicherheit gegen einen vorzeitigen Ausfall bei einem Lkw-Brand zu erreichen.

Somit können die zusätzlichen Thermoelemente nach dem Ausfall der anderen Meßstellen die automatische Steuerung der Entrauchungsanlage in dem betroffenen BMA aufrechterhalten.

Es ist vorgesehen, dass die Messwerte der zusätzlichen Thermoelemente in die Brandfalldiagnose- und Steuerungsprogramme der Entrauchungsanlage eingebaut werden und diese ergänzen.

Das Schema der Differentialdiagnose zur Brandfrüherkennung wurde dafür entsprechend erweitert, wie zuvor in den Schemata Nr. 1 und Nr. 2 gezeigt.

Nachstehend folgt in den Schemata Nr. 3 und Nr. 4 eine Darstellung des speziellen Falles, bei dem bereits alle Sensoren eines BMA infolge Hitzeeinwirkung (oder durch mechanische Beschädigung, Alterung, Kabelbruch, usw.) ausgefallen sind, mit Ausnahme der neuen Thermoelemente.

Hierzu wurden in den Schemata Nr. 3 und Nr. 4 die ausgefallenen Meßstellen geschwärzt und deren ausgefallene Datenflusslinien entfernt, um so die Restfunktionen des Programms sichtbar zu machen (ausgefallene Messgeräte sollen in diesem Fall nur eine Null als Messwert liefern).

Dabei zeigte sich, dass die Entrauchung in dem betroffenen BMA solange in Betrieb bleibt, bis das dort noch aktive Thermoelement wieder auf eine Temperatur unterhalb des Voralarmwerts von z. B. 40°C abkühlt und so den Voralarmwert in dem betroffenen BMA zurücksetzt.

Zu diesem Zeitpunkt könnte aber noch sehr viel Rauch am Brandort und in dessen nächster Nähe vorhanden sein, der von den ausgefallenen Geräten nicht mehr detektiert würde.

Außerdem könnten die Entrauchungsventilatoren am Brandort infolge der Hitze ebenfalls ausgefallen sein, so dass die automatische Entrauchung dort nicht mehr greifen würde.

Für diesen Fall wurde die Steuerung der Entrauchung so angelegt, dass nach dem Weggang des Voralarms die Handbedienung zur Steuerung der dann noch verfügbaren Lüftung und Entrauchung für alle BMA automatisch freigegeben wird. Das entsprechende Bedientableau wurde dafür bereits in der TLZ vorgesehen und auch noch mit einem Schlüsselschalter für eine Notabschaltung der Automatik bei unvorhersehbaren Lagen ausgestattet (mit deutlichem Warnhinweis für den Brandfall).

Nachstehend folgt eine Darstellung der bei einem angenommenen Lkw-Brand funktionstüchtig verbliebenen Messgeräte als Tabelle Nr. 3 (die ausgefallenen Messstellen wurden geschwärzt):

BMA 1	BMA 2	BMA 3	BMA 4	BMA 5	BMA 6	BMA 7	BMA 8	BMA 9	BMA 10	BMA 11	BMA 12	BMA 13	BMA 14
CO1	CO2	CO3	CO4	CO5	CO6	CO7	CO8	CO9	CO10	CO11	CO12	CO13	CO14
TR1	TR2	TR3	TR4	TR5	TR6	TR7	TR8	TR9	TR10	TR11	TR12	TR13	TR14
TS1	TS2	TS3	TS4	TS5	TS6	TS7	TS8	TS9	TS10	TS11	TS12	TS13	TS14
TE1	TE2	TE3	TE4	TE5	TE6	TE7	TE8	TE9	TE10	TE11	TE12	TE13	TE14
TK1	TK2	TK3	TK4	TK5	TK6	TK7	TK8	TK9	TK10	TK11	TK12	TK13	TK14

Tabelle 3: Ausfall von Messgeräten bei einem angenommenen kleinen Lkw-Brand im BMA 6, unter Berücksichtigung einer begrenzten Rauchausbreitung durch die Entrauchungsanlage

Legende:

- EN = Elektronische
- BMA = Brandmeldeabschnitt
- CO = ECS-Sensor zur Messung der CO-Gaskonzentration
- TR = Photometer zur Messung der Lufttrübung
- TS = Sonometer mit Hitzeschutzkapselung, zur Messung der Lufttemperatur und der Luftströmung
- TE = Thermoelement zur Messung der Rauchgastemperatur (wird mit Hitzeschutzkapsel nachgerüstet)
- TK = Sensorkabel zur Messung der Kabeltemperatur

Voraussetzung für die Handbedienung ist demnach, dass zu dem angenommenen Zeitpunkt kein Voralarm mehr aus einem der BMA ansteht, weder am Brandort (z. B. nach Ausfall der dortigen Meßgeräte), noch in den benachbarten BMA, in denen die Rauchfreiheit ggf. bereits hergestellt worden sein kann (aufgrund der dort noch aktiven Meßgeräte und Entrauchungsventilatoren).

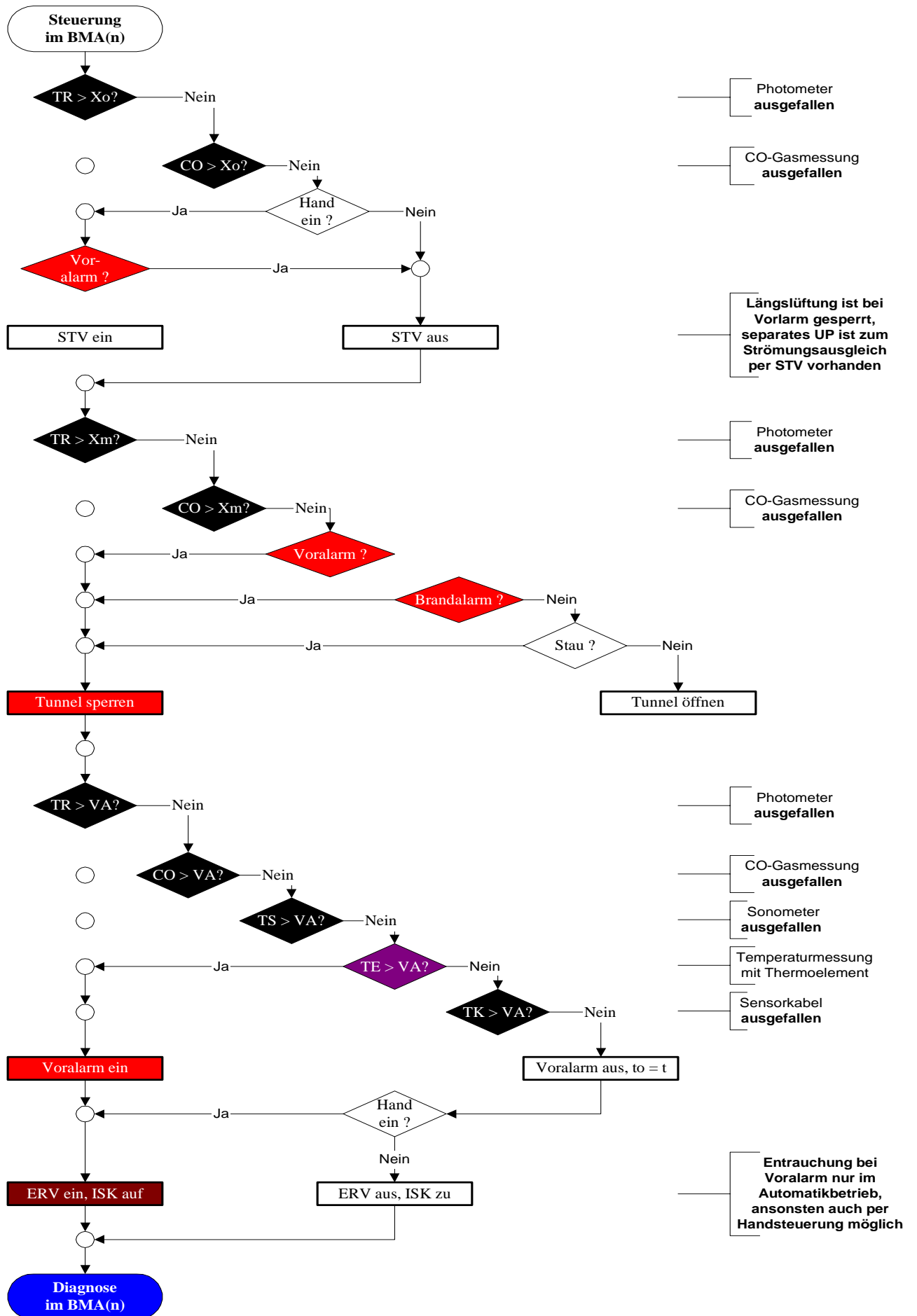
Der Automatikbetrieb endet somit erst bei Aufhebung des Voralarms, um bis dahin die automatische Entrauchung in allen vom Rauch betroffenen BMA zu gewährleisten.

Ein evtl. Totalausfall aller Meßstellen eines BMA ist in der folgenden Tabelle Nr. 4 und in den Schemata Nr. 5 und Nr. 6 dargestellt, um zu zeigen, dass auch in diesem Fall eine Handbedienung der Entrauchungsanlage möglich ist, wenn in allen benachbarten kein Voralarm mehr ansteht.

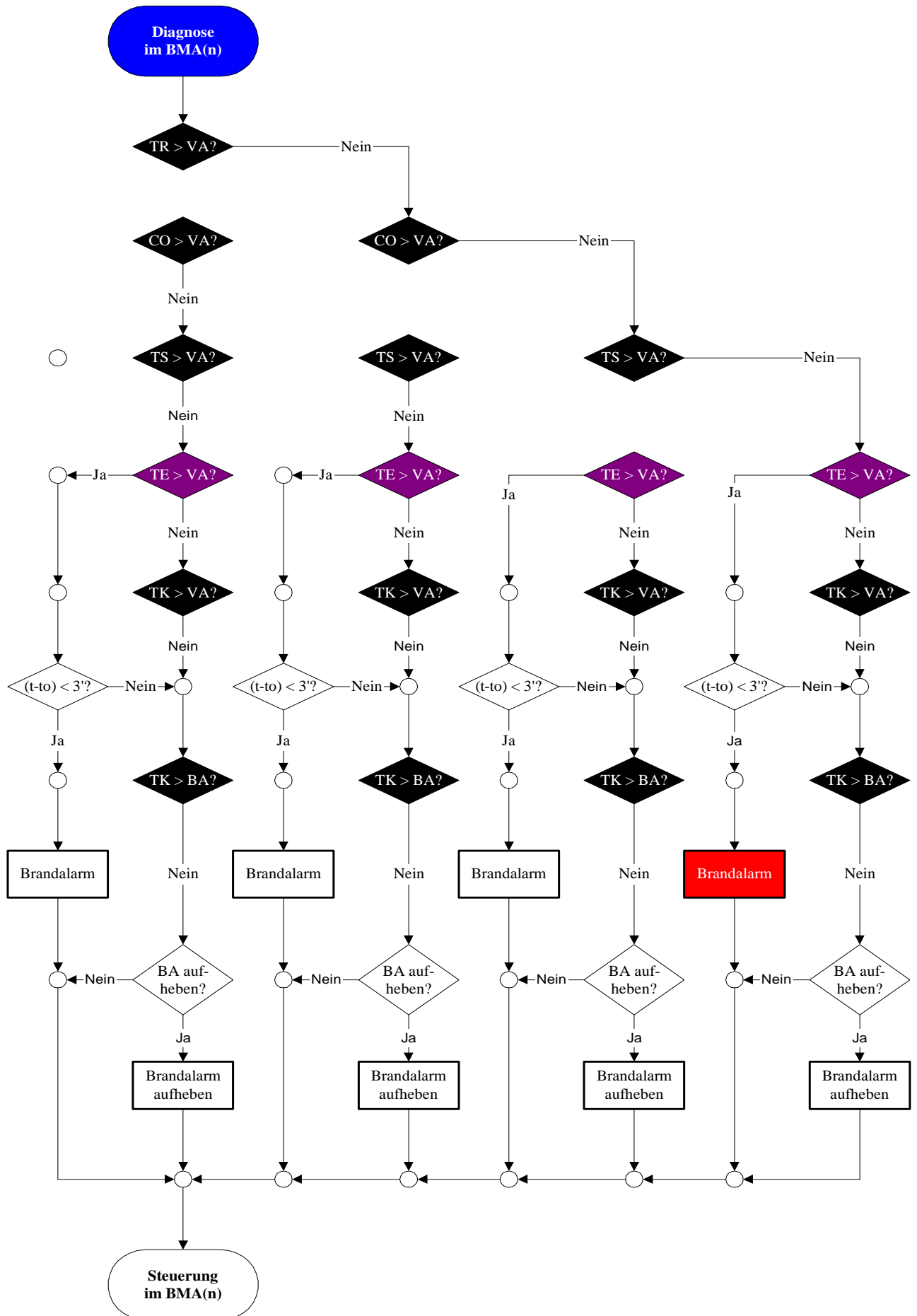
BMA 1	BMA 2	BMA 3	BMA 4	BMA 5	BMA 6	BMA 7	BMA 8	BMA 9	BMA 10	BMA 11	BMA 12	BMA 13	BMA 14
CO1	CO2	CO3	CO4	CO5	CO6	CO7	CO8	CO9	CO10	CO11	CO12	CO13	CO14
TR1	TR2	TR3	TR4	TR5	TR6	TR7	TR8	TR9	TR10	TR11	TR12	TR13	TR14
TS1	TS2	TS3	TS4	TS5	TS6	TS7	TS8	TS9	TS10	TS11	TS12	TS13	TS14
TE1	TE2	TE3	TE4	TE5	TE6	TE7	TE8	TE9	TE10	TE11	TE12	TE13	TE14
TK1	TK2	TK3	TK4	TK5	TK6	TK7	TK8	TK9	TK10	TK11	TK12	TK13	TK14

Tabelle 4: Ausfall von allen Messgeräten bei einem angenommenen großen Lkw-Brand im BMA 6

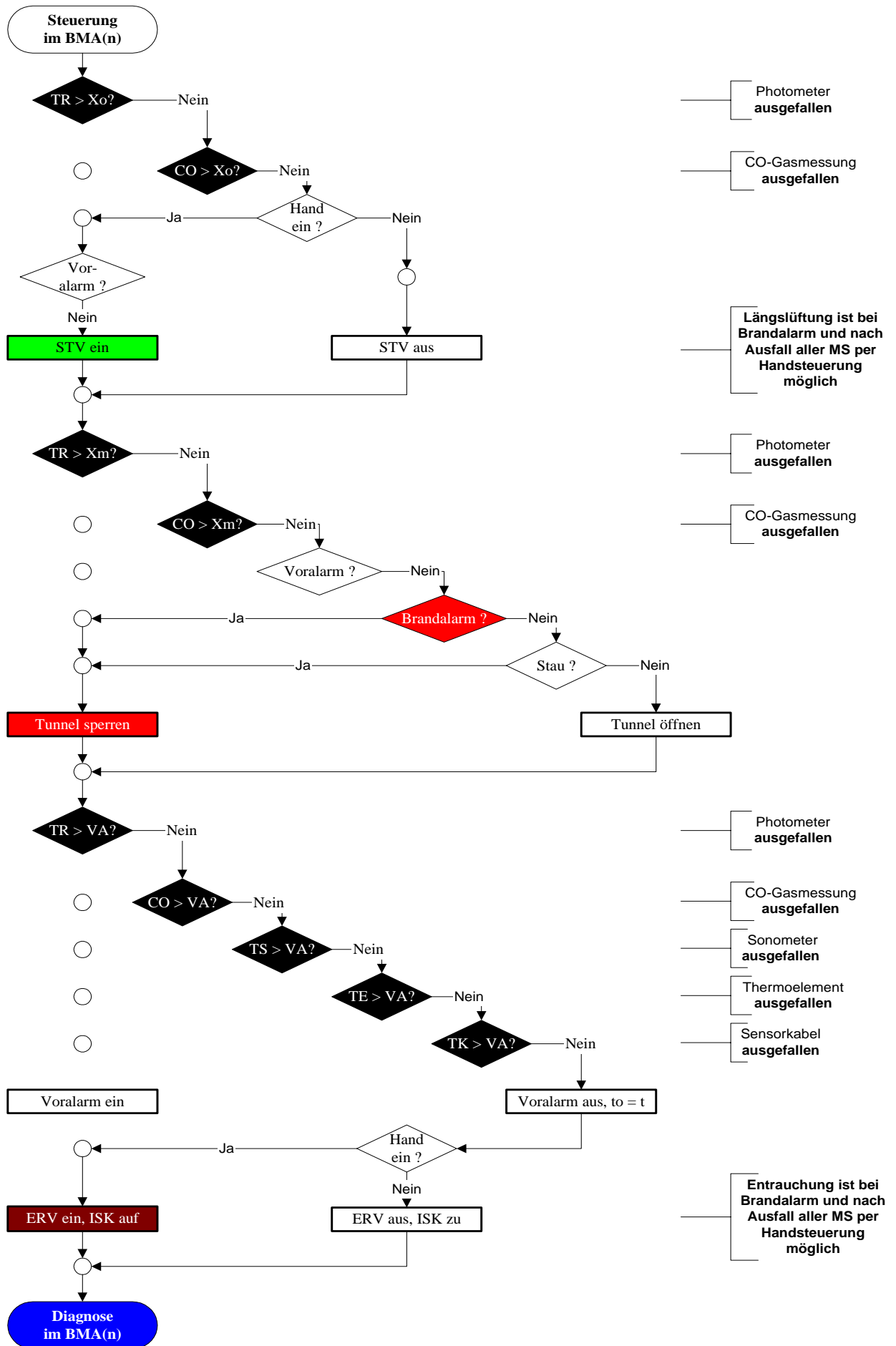
Schema 3: Vereinfachter Ablaufplan zur Steuerung der ERV nach Teilausfällen im BMA n



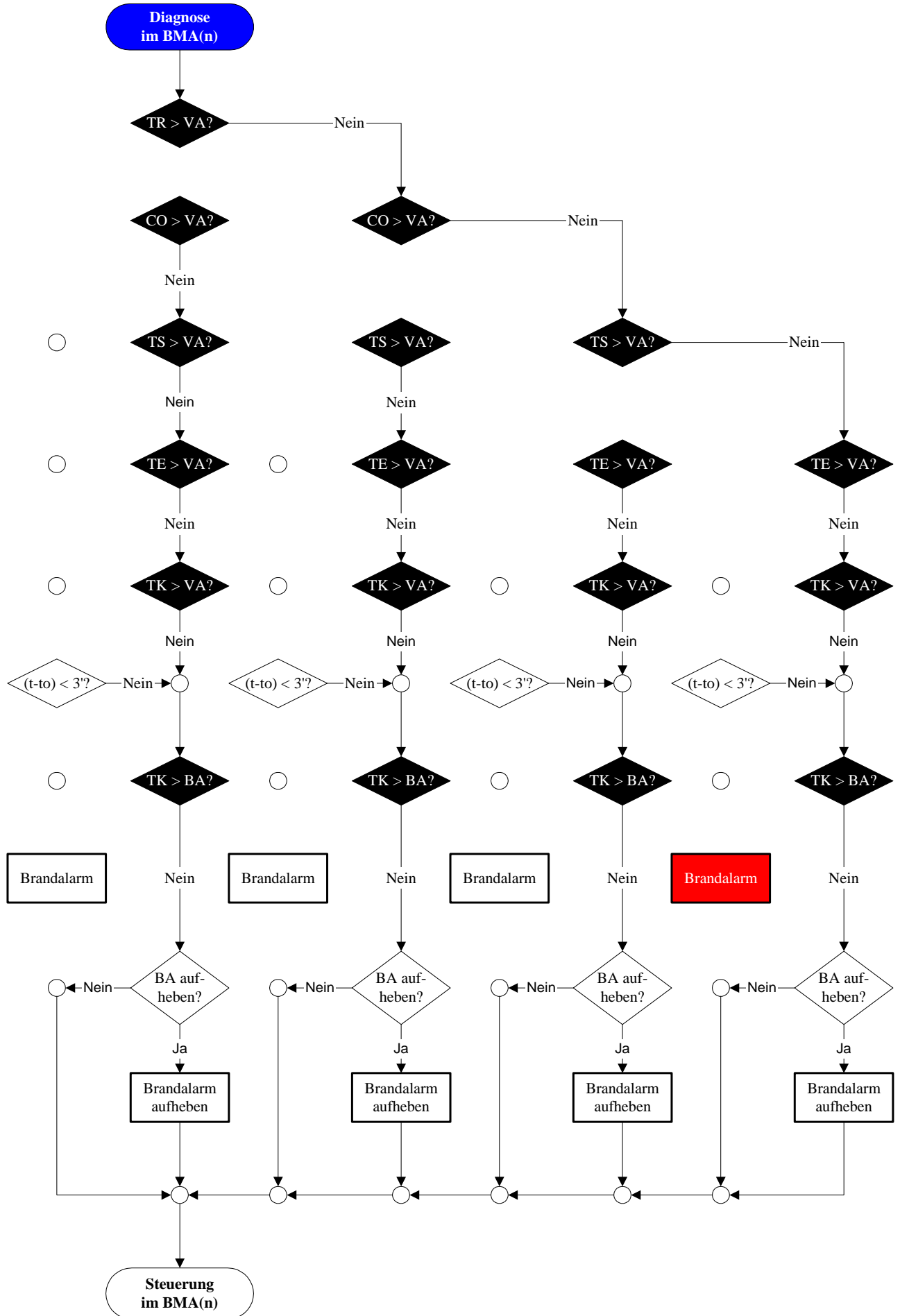
Schema 4: Vereinfachter Ablaufplan zur Brandalarmbildung nach Teilausfällen im BMA n



Schema 5: Vereinfachter Ablaufplan zur Entrauchung nach Totalausfall im BMA n



Schema 6: Vereinfachter Ablaufplan zum Brandalarmstatus nach Totalausfall im BMA n



17. Photodokumentation und Videodokumentation des Brandversuchs

Eine Photodokumentation des Versuchsablaufs steht als Anlage mit 40 Photos (Bilder 18 bis 57) auf den Seiten 50 bis 70 zur Verfügung.

Eine Videodokumentation des Versuchs steht auf Anfrage auf DVD ebenfalls zur Verfügung.

- **Photodokumentation, nachstehend als Farbdrucke**
- **Videodokumentation 4,7 GB auf DVD (auf Anfrage erhältlich)**

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