

Brandkurven für den baulichen Brandschutz von Straßentunneln

**Berichte der
Bundesanstalt für Straßenwesen**

Brücken- und Ingenieurbau Heft B 67

The logo for the Bundesanstalt für Straßenwesen (BAST) is displayed in a stylized, lowercase, green font with a white outline. The letters are bold and rounded, giving it a modern and professional appearance.

Brandkurven für den baulichen Brandschutz von Straßentunneln

von

Jürgen Blossfeld

**Berichte der
Bundesanstalt für Straßenwesen**

Brücken- und Ingenieurbau Heft B 67

bast

Die Bundesanstalt für Straßenwesen veröffentlicht ihre Arbeits- und Forschungsergebnisse in der Schriftenreihe **Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen**. Die Reihe besteht aus folgenden Unterreihen:

A - Allgemeines
B - Brücken- und Ingenieurbau
F - Fahrzeugtechnik
M - Mensch und Sicherheit
S - Straßenbau
V - Verkehrstechnik

Es wird darauf hingewiesen, dass die unter dem Namen der Verfasser veröffentlichten Berichte nicht in jedem Fall die Ansicht des Herausgebers wiedergeben.

Nachdruck und photomechanische Wiedergabe, auch auszugsweise, nur mit Genehmigung der Bundesanstalt für Straßenwesen, Stabsstelle Presse und Öffentlichkeitsarbeit.

Die Hefte der Schriftenreihe **Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen** können direkt beim Wirtschaftsverlag NW, Verlag für neue Wissenschaft GmbH, Bgm.-Smidt-Str. 74-76, D-27568 Bremerhaven, Telefon: (04 71) 9 45 44 - 0, bezogen werden.

Über die Forschungsergebnisse und ihre Veröffentlichungen wird in Kurzform im Informationsdienst **BAST-Info** berichtet. Dieser Dienst wird kostenlos abgegeben; Interessenten wenden sich bitte an die Bundesanstalt für Straßenwesen, Stabsstelle Presse und Öffentlichkeitsarbeit.

Impressum

Bericht zum Forschungsprojekt F 1100.2306000 des Arbeitsprogrammes der Bundesanstalt für Straßenwesen:
Brandkurven für den baulichen Brandschutz von Straßentunneln

Herausgeber

Bundesanstalt für Straßenwesen
Brüderstraße 53, D-51427 Bergisch Gladbach
Telefon: (0 22 04) 43 - 0
Telefax: (0 22 04) 43 - 674

Redaktion

Stabsstelle Presse und Öffentlichkeitsarbeit

Druck und Verlag

Wirtschaftsverlag NW
Verlag für neue Wissenschaft GmbH
Postfach 10 11 10, D-27511 Bremerhaven
Telefon: (04 71) 9 45 44 - 0
Telefax: (04 71) 9 45 44 77
Email: vertrieb@nw-verlag.de
Internet: www.nw-verlag.de

ISSN 0943-9293
ISBN 978-3-86509-935-8

Bergisch Gladbach, August 2009

Kurzfassung – Abstract

Brandkurven für den baulichen Brandschutz von Straßentunneln

Brandkurven stellen Temperatur-Zeit-Verläufe für die Bemessung des baulichen Brandschutzes dar. Im Rahmen des Forschungsprojektes war die Frage zu klären, ob die bei Brandversuchen ermittelten Temperatur-Zeit-Verläufe auf deutsche Straßentunnel übertragen werden können und welche Konsequenzen hieraus resultieren würden.

Die Untersuchungen haben ergeben, dass sich die von den ZTV-ING Teil 5 vorgegebene Brandkurve mit ihrer Temperatur in der Vollbrandphase und ihrer Branddauer innerhalb der Bandbreite verwendeter Brandkurven befindet und als Einzige für Straßentunnel eine Abkühlungsphase vorgibt.

Von Änderungen der Brandkurve in den ZTV-ING Teil 5 wäre zuallererst die Tunnelschale betroffen. Zusätzlich wären gesonderte Untersuchungen des Brandverhaltens von Fugenkonstruktionen erforderlich. Außerdem wäre die Eignung von Dübeln für Lüfter und Brandschutzplatten für eine geänderte ZTV-ING-Kurve nachzuweisen.

Der Schwerpunkt des Projektes lag in der Auswertung von Brandversuchen in Tunneln. Dabei konnte herausgearbeitet werden, dass die Versuchsobjekte hinsichtlich ihrer baulichen und betrieblichen Verhältnisse nicht mit modernen Straßentunneln vergleichbar sind und die erhaltenen Temperatur-Zeit-Verläufe nicht für die Bemessung des baulichen Brandschutzes von Straßentunneln herangezogen werden können. Damit liegen bisher keine wissenschaftlich abgesicherten Erkenntnisse vor, die eine Änderung der bisherigen ZTV-ING-Kurve rechtfertigen.

Mit Verweis auf die Empfehlungen von ITA/PIARC wird empfohlen, in Fällen, bei denen ein lokales Versagen des Tunnels infolge Brands zu einem Verlust des gesamten Tunnels und/oder zu einem Verlust der Standsicherheit eines angrenzenden Bauwerkes führt, ein höheres Niveau für den Schutz des Tunnelbauwerkes als bisher vorzusehen.

Fire curves for the structural fire protection of road tunnels

Fire curves are temperature/time progressions used to design measures for structural fire protection. The question posed as part of the research project was whether the temperature/time progressions resulting from fire tests are transferable to German road tunnels and what the consequences of such a step would be.

Investigations have shown that the fire curve specified in Part 5 of the ZTV-ING contains a temperature of the fully developed fire and a fire duration that fit within the band width of commonly used fire curves. Besides the ZTV-ING curve is the only one showing a cooling phase for road tunnels.

The inner lining would be most affected by any changes in the fire curve given in Part 5 of the ZTV-ING. In addition, a separate investigation of the fire behaviour of joint constructions would be required. The suitability of anchor bolts used for ventilation and fire protection boards would also have to be proven if the ZTV-ING curve is changed.

The focus of the project was on the evaluation of fire tests in tunnels. It was found that the structural and operational conditions of the test locations cannot be compared with modern road tunnels and that the temperature/time progressions obtained cannot be used to design the structural fire protection for road tunnels. This means that there are no scientifically proven results that would justify any amendment of the current ZTV-ING curve.

With reference to the recommendations of ITA/PIARC, it is recommended that in cases in which local tunnel failure as a result of a fire leads to the loss of the entire tunnel and/or to the loss of stability of an adjoining structure, a higher level of protective measures for the tunnel structure than previously should be foreseen.

Inhalt

1	Einleitung	7	3.5	Tunnelbetriebstechnik	26
1.1	Allgemeines	7	3.5.1	Allgemeines	26
1.2	Anlass und Zielsetzung	7	3.5.2	Lüftungsanlage	26
1.3	Vorgehen	7	3.5.3	Brandschottungen	26
			3.5.4	Befestigungsmittel und Aufhängekonstruktionen	26
2	Ansätze für Brandkurven im Tunnelbau	8	4	Auswertung von Bränden und Brandversuchen in Tunneln	27
2.1	Allgemeines	8	4.1	Brände	27
2.2	Nationale Ansätze für Brandkurven	9	4.2	Brandversuche	28
2.2.1	ZTV-ING-Kurve	9	4.2.1	Ofenegg-Tunnel (CH)	28
2.2.2	Kurve des Eisenbahn-Bundesamtes	10	4.2.2	Zwenberg-Tunnel (A)	32
2.2.3	Einheits-Temperatur-Zeit-Kurve	11	4.2.3	PWRI-Versuche (JP)	39
2.3	Internationale Ansätze für Brandkurven	12	4.2.4	Repparfjord-Tunnel (N)	39
2.3.1	Hydrocarbon-Kurve	12	4.2.5	Memorial-Tunnel (USA)	50
2.3.2	Erhöhte Hydrocarbon-Kurve	13	4.2.6	Benelux-Tunnel (NL/B)	53
2.3.3	Rijkswaterstaat-Kurve	13	4.2.7	Runehamar-Tunnel (N)	57
2.3.4	Modifizierte Rijkswaterstaat-Kurve	14	4.2.8	Vergleichende Betrachtung	64
2.3.5	ISO-Kurve	15	5	Bewertung der vorhandenen Brandkurven	66
2.3.6	ITA/PIARC-Empfehlungen	15	5.1	Allgemeines	66
2.4	Vergleichende Betrachtung	17	5.2	Flüssigkeitsbrände	66
3	Bauliche Brandschutzanforderungen in Deutschland	17	5.3	Brände von Straßenfahrzeugen und deren Ladung	67
3.1	Allgemeine Grundsätze	17	5.3.1	Versuche im Repparfjord-Tunnel	67
3.2	Schalenskonstruktion	18	5.3.2	Versuche im Runehamar-Tunnel	67
3.2.1	Geschlossene Bauweise	18	5.4	Übertragbarkeit von Versuchsergebnissen auf deutsche Straßentunnel	70
3.2.2	Offene Bauweise	19	5.4.1	Allgemeines	70
3.2.3	Maschinelle Schildvortriebsverfahren	21	5.4.2	Memorial-Tunnel	70
3.3	Fugenkonstruktion	23	5.4.3	Repparfjord-Tunnel	70
3.3.1	Allgemeines	23	5.4.4	Runehamar-Tunnel	70
3.3.2	Geschlossene Bauweise	23	6	Auswirkungen von Änderungen der nationalen Brandkurve	71
3.3.3	Offene Bauweise	23	6.1	Allgemeines	71
3.3.4	Maschinelle Schildvortriebsverfahren	24	6.2	Tunnelkonstruktion	71
3.4	Konstruktiver Innenausbau	24	6.2.1	Allgemeines	71
3.4.1	Allgemeines	24	6.2.2	Beschleunigter Temperaturanstieg in der Erwärmungsphase	71
3.4.2	Flucht- und Verbindungstüren	24	6.2.3	Erhöhte Temperatur für die Dauer der Vollbrandphase	72
3.4.3	Kabel und Leitungen	25			
3.4.4	Entwässerungsanlagen	25			

6.2.4	Verlängerte Vollbrandphase	72
6.2.5	Verlängerung der Abkühlungsphase	73
6.3	Fugen	73
6.3.1	Allgemeines	73
6.3.2	Geschlossene Bauweise	73
6.3.3	Offene Bauweise	74
6.3.4	Maschinelle Vortriebsverfahren	74
6.4	Konstruktiver Innenausbau	74
6.5	Tunnelbetriebstechnik	75
6.5.1	Lüftung	75
6.5.2	Brandschottungen	75
6.5.3	Befestigungsmittel und Aufhängekonstruktionen	75
6.6	Prüftechnische Untersuchungen von Bauteilen	76
7	Schlussfolgerungen und Empfehlungen	77
7.1	Ansätze für Brandkurven	77
7.2	Brände und Brandversuche	77
7.3	Konsequenzen infolge von Änderungen der nationalen Brandkurve	77
7.4	Empfehlungen für die Fortschreibung des Regelwerkes	78
8	Zusammenfassung	79
9	Literatur	79
9.1	Regelwerke	79
9.2	Sonstige	81

1 Einleitung

1.1 Allgemeines

Die verheerenden Brände der vergangenen Jahre in alpenquerenden Straßentunneln haben zu hohen Personen- und Sachschäden sowie infolge der zum Teil langen Sperrungen zu weiteren hohen volkswirtschaftlichen Schäden geführt. Seit diesen Ereignissen wird dem Brandschutz in Straßentunneln eine besondere Bedeutung und eine hohe öffentliche Aufmerksamkeit zuteil. Weiterhin haben die Brände gezeigt, dass Straßentunnel nicht nur hochrangige Bauwerke, sondern auch neuralgische Punkte im Straßennetz darstellen. Der Brandschutz von Straßentunneln ist in einen baulichen und einen betrieblichen Brandschutz zu untergliedern. Der bauliche Brandschutz zielt auf den Erhalt des Tunnelbauwerkes ab. Durch die Umsetzung der Anforderungen des baulichen Brandschutzes soll sichergestellt werden, dass das Tunnelbauwerk der Brandeinwirkung so widersteht, dass die Tragsicherheit im Brandfall gewährleistet ist und es anschließend mit verhältnismäßigem Aufwand wieder in Betrieb genommen werden kann. Der betriebliche Brandschutz hat hingegen den Personenschutz zum Ziel, d. h., er soll die Selbstrettung der Tunnelnutzer und die Fremdrettung durch die Ereignisdienste sicherstellen sowie die Brandbekämpfung unterstützen. Die Bemessung des baulichen Brandschutzes von Straßentunneln basiert in der Regel auf Temperatur-Zeit-Verläufen, die vereinfachend „Brandkurven“ genannt werden. Für Straßentunnel im Geschäftsbereich des Bundesministeriums für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung (BMVBS) ist die anzuwendende Brandkurve in den „Zusätzlichen Technischen Vertragsbedingungen und Richtlinien für Ingenieurbauten“ (ZTV-ING) Teil 5 „Tunnelbau“ festgelegt.

1.2 Anlass und Zielsetzung

Im europäischen Ausland existieren Brandkurven, die höhere Maximaltemperaturen und/oder längere Branddauern aufweisen und damit höhere Anforderungen an den baulichen Brandschutz als nach den ZTV-ING Teil 5 stellen. Außerdem sah sich die Europäische Union durch die Brände in Straßentunneln veranlasst, in ihrem 5. Rahmenforschungsprogramm eine Reihe von Forschungsvorhaben, darunter das Vorhaben „Cost-effective, sustainable and innovative UPgrading methods for fire safety in

existing TUNNELS“ (UPTUN) zu initiieren. Im Rahmen von UPTUN wurden u. a. in einem stillgelegten Straßentunnel in Norwegen Brandversuche mit simulierten Lkw-Ladungen durchgeführt. Bei diesen Versuchen wurde die von der Brandkurve in den ZTV-ING Teil 5 vorgegebene Maximaltemperatur überschritten. Zusätzlich haben zurückliegende Tunnelbrände gezeigt, dass bei der Verwicklung mehrerer Lkw längere Branddauern als nach der Brandkurve in den ZTV-ING Teil 5 vorgesehen und auch während der UPTUN-Versuche ermittelt auftreten können.

Das Ziel des Projektes besteht daher mit Blick auf die Bestrebungen nach einer Harmonisierung der Brandkurven in Europa in der Untersuchung, ob die empirisch ermittelten Brandkurven bzw. bei durch Brandversuchen gemessenen Temperatur-Zeit-Verläufe auf deutsche Straßentunnel übertragen werden können und welche Konsequenzen sich hieraus ergeben würden.

1.3 Vorgehen

Für den vorliegenden Bericht wurden nationale und internationale Ansätze für Brandkurven recherchiert, wobei vorrangig Ansätze für Straßentunnel berücksichtigt wurden. Die Ergebnisse der Recherche werden durch Anwendungsbeispiele und eine vergleichende Betrachtung der Ansätze ergänzt.

Als Grundlage für die weiteren Betrachtungen wird ein Überblick über die derzeitigen nationalen Anforderungen an den baulichen Brandschutz von Straßentunneln gegeben. Die Anforderungen an die Schalenkonstruktion werden dabei anhand ausgeführter Forschungsvorhaben erläutert.

Die Auswertung von Bränden und Brandversuchen in Tunneln bildet den Schwerpunkt der Untersuchungen. Es werden die bedeutenden Brände in Straßentunneln in einer Übersicht zusammengestellt und hinsichtlich der verursachenden Fahrzeuge, der resultierenden Branddauern und der Auswirkungen auf die Tunnelnutzer und das Tunnelbauwerk ausgewertet. Da eine Vielzahl von Brandversuchen in Tunneln existiert, wurde für die Untersuchungen der Fokus auf solche Versuche gelegt, bei denen ein Bezug zum baulichen Brandschutz von Straßentunneln besteht und mindestens bauteilbezogene Temperaturmesswerte verfügbar waren. Bei der Beschreibung und Auswertung der Versuche wurde angestrebt, die originalen Ver-

suchsberichte bzw. Primärliteratur zu verwenden, um verlässliche Aussagen zur vorliegenden Fragestellung zu erhalten.

Im Anschluss an die Auswertung der Brände und Brandversuche werden die vorhandenen Ansätze für Brandkurven den Ergebnissen von Brandversuchen gegenübergestellt und untersucht, ob diese auf deutsche Straßentunnel übertragen werden können.

Es wird gezeigt, welche Auswirkungen aufgrund von Änderungen der in den ZTV-ING Teil 5 definierten Brandkurve auf die Tunnelschale zu erwarten sind. Mit Verweisen auf die Beschreibung des derzeitigen nationalen Standes des baulichen Brandschutzes wird dargelegt, welche weiteren Konsequenzen sich bei Änderungen der ZTV-ING-Kurve ergeben können.

Abschließend werden die gewonnenen Schlussfolgerungen dargelegt und begründet sowie Empfehlungen für die Fortschreibung des Regelwerkes gegeben.

2 Ansätze für Brandkurven im Tunnelbau

2.1 Allgemeines

Ein Brand stellt eine räumlich und zeitlich unkontrollierte, selbstständige Verbrennung dar. Bei einem Brand werden Wärme, Rauch und Brandgase, oft begleitet durch Flammen und/oder Glimmen, freigesetzt [R 3].

Ein Brand entwickelt sich im Allgemeinen in mehreren Phasen. Nach der Zündung des Brandgutes entwickelt sich zunächst ein Schwelbrand. In Räumen staut sich der entstehende Rauch bei fehlenden Öffnungen unter der Decke auf. Die Luft im Brandraum wird nun durch die Wärmestrahlung des Schwelbrandes und den Rauch weiter aufgeheizt. Die Oberfläche von vorhandenem, aber noch nicht brennendem Brandgut pyrolysiert aus und zündet bei einer gewissen Brandtemperatur schlagartig ohne Zündflamme („Flash over“), woraus ein Vollbrand mit einer weiteren Erhöhung der Brandtemperatur resultiert. Der Brand verharrt je nach Brandgut und Sauerstoffzufuhr auf dem erreichten Temperaturniveau, bis er durch die Vernichtung des Brandgutes und/oder die einsetzenden Löscharbeiten abklingt.

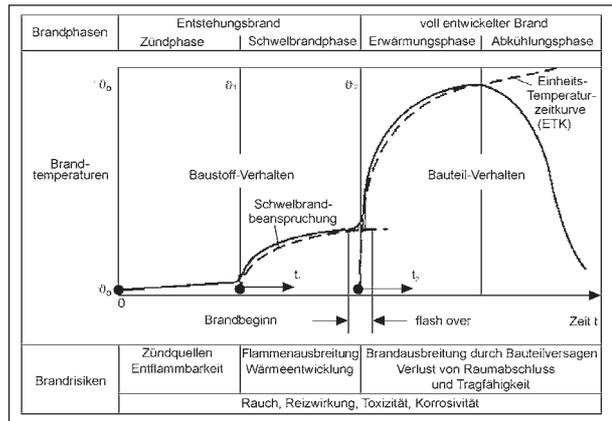


Bild 2-1: Idealisierter Brandverlauf für den Hochbau [1]

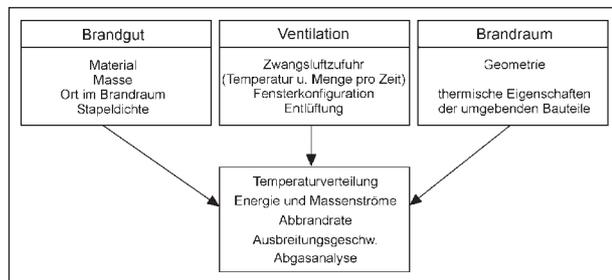


Bild 2-2: Einflüsse auf den Brandverlauf in Industriehallen [2]

Eine idealisierte Darstellung der einzelnen Phasen, Temperaturen und Risiken gibt Bild 2-1 für Brände im Hochbau wieder. Bild 2-1 ist zu entnehmen, dass in der Phase des Entstehungsbrandes der Brandverlauf vom Baustoffverhalten dominiert wird, während nach dem Übergang zum voll entwickelten Brand das Verhalten des Bauteils bzw. der Baukonstruktion dominiert.

Der Brandverlauf variiert hinsichtlich Brandtemperaturen und Zeitdauer in Abhängigkeit vom Brandgut und den vorhandenen Randbedingungen, wie z. B. bauliche Situation des Brandraumes und Sauerstoffzufuhr. Einen Überblick über wesentliche Einflussgrößen auf einen Brand in Industriehallen gibt Bild 2-2.

Die Brandeinwirkung auf die Konstruktion von Straßentunneln wird durch speziell definierte Temperatur-Zeit-Kurven bzw. Temperatur-Zeit-Verläufe beschrieben, die vereinfachend „Brandkurven“ genannt werden. Brandkurven dienen als Grundlage für die Bemessung der Konstruktion und die Festlegung von Flucht- und Rettungsmöglichkeiten im Brandfall. Brandkurven stellen somit theoretische „Bemessungsbrände“ dar. Im Weiteren werden Brandkurven idealisierend in die Erwärmungs-, die Vollbrand- und die Abkühlungsphase untergliedert. Unter der Vollbrandphase wird dabei ein zeitliches

Verharren des voll entwickelten Brandes auf einem konstanten Temperaturniveau verstanden.

2.2 Nationale Ansätze für Brandkurven

2.2.1 ZTV-ING-Kurve

In den ZTV-ING Teil 5 „Tunnelbau“ [R 2] wird unabhängig von der Bauweise für die brandschutztechnische Bemessung der Tunnelkonstruktion die Brandkurve nach Bild 2-3 zugrunde gelegt.

Die Brandkurve in den ZTV-ING Teil 5 ist durch eine rasche Erwärmungsphase gekennzeichnet. Innerhalb von 5 min werden 1.200 °C erreicht. Der Vollbrand dauert bei dieser Temperatur für 25 min an, bevor sich eine linear verlaufende Abkühlungsphase von 110 min Dauer anschließt. Die gesamte Branddauer beträgt somit 140 min.

Durch die ZTV-ING-Kurve werden mit der Festlegung der Abkühlungsphase nach 30 min Brandlasten zwischen 100.000 MJ bis 150.000 MJ und maximale Brandleistungen zwischen 90 MW und 100 MW abgedeckt [5, 39]. Das Auftreten von größeren Brandlasten bzw. Brandleistungen, wie z. B. durch einen Tanklastwagen, muss durch eine rasche Abführung auslaufender brennbarer Flüssigkeiten mittels geeigneter Entwässerungsanlagen unterbunden werden (siehe Kapitel 3.4.4).

Die Entstehung der Brandkurve lässt sich bis in die 1980er Jahre zurückverfolgen. Publikationen vom Beginn der 1980er Jahre [3, 4, 7] bringen für die brandschutztechnische Bemessung von Straßentunneln eine Brandkurve nach Bild 2-4 als ein mögliches Beispiel.

Die Brandkurve in Bild 2-4 weist einen Temperaturanstieg innerhalb von etwa 10 min auf ca. 1.200 °C auf, die etwa für 50 min gehalten werden, bevor sich eine linear verlaufende, etwa 105 min andauernde Abkühlungsphase anschließt. Die Branddauer beträgt insgesamt etwa 165 min. Diese Brandkurve besitzt, verglichen mit der heutigen Brandkurve in den ZTV-ING Teil 5 (siehe Bild 2-3), eine etwa doppelt so lange Erwärmungsphase, einen ausgerundeten Verlauf beim Übergang von der Erwärmung zur Vollbrandphase und eine doppelt so lange Dauer der Vollbrandphase. Bei der Dauer der Abkühlungsphase unterscheiden sich die Brandkurven nur geringfügig. Die Temperaturmaxima beider Brandkurven befinden sich auf dem gleichen Niveau. Bei diesem Vergleich sind allerdings die Aus-

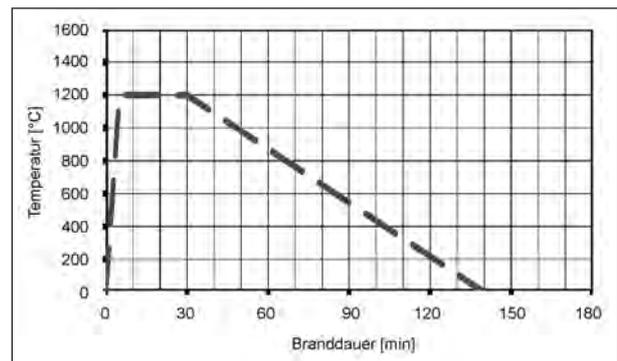


Bild 2-3: Brandkurve nach den ZTV-ING Teil 5 [R 2]

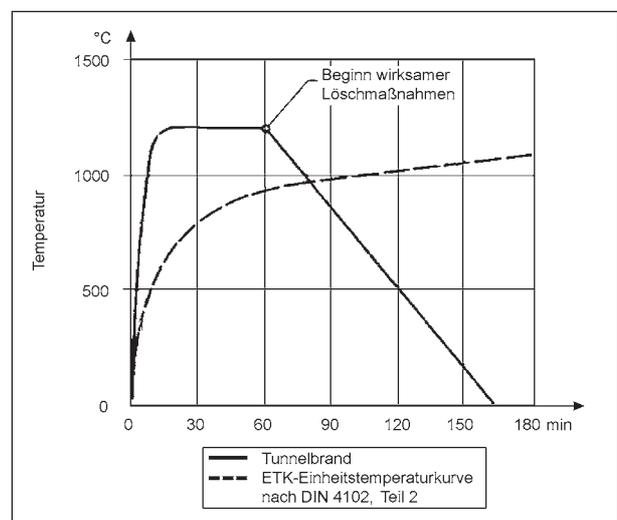


Bild 2-4: Beispiel für eine Brandkurve für Straßentunnel [3, 4, 7]

führungen in [4, 7] zu berücksichtigen, wonach bei der Festlegung des zeitlichen Verlaufes der Brandkurve Zeitabschnitte für die Alarmierung und das Eintreffen der Feuerwehr sowie den Beginn eines wirksamen Löschangriffes angemessen abzuschätzen sind. Dies hat zur Folge, dass insbesondere die Dauer der Vollbrandphase für die Anfang der 1980er Jahre vorgeschlagene Brandkurve als einzelfallabhängig und nicht als allgemeingültig zu betrachten war.

In den 1985 erstmals erschienenen „Richtlinien für die Ausstattung und den Betrieb von Straßentunneln“ (RABT) war dann die Brandkurve mit ihrem heute bekannten, durchgehend linearen Verlauf enthalten. In der Literatur wird sie teilweise noch immer als „RABT-Kurve“ bezeichnet. Die damalige „RABT-Kurve“ ist in Bild 2-5 dargestellt.

Die damalige „RABT-Kurve“ unterscheidet sich von der heutigen Brandkurve in den ZTV-ING Teil 5 [R 2] in der Definition der Branddauer. Bei der heutigen Brandkurve in den ZTV-ING Teil 5 ist die Dauer der einzelnen Brandphasen eindeutig festgelegt (siehe

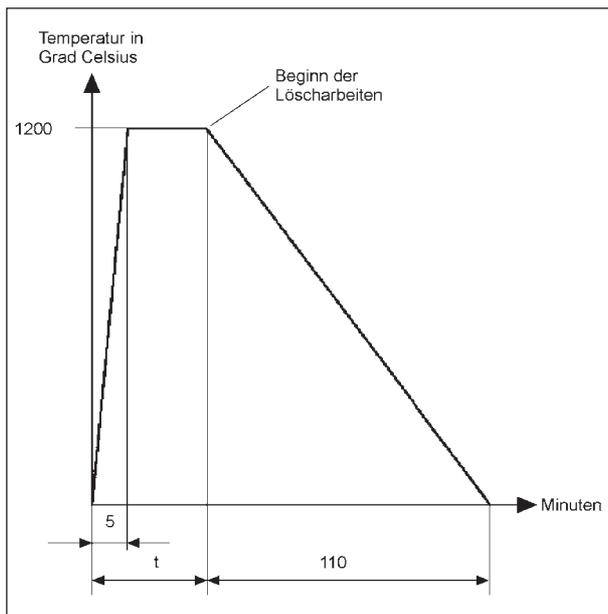


Bild 2-5: Brandkurve in den RABT 1985 [R 5a]

Bild 2-3). Nach der damaligen „RABT-Kurve“ wurden zwar ebenfalls in 5 Minuten 1.200 °C erreicht, die Dauer der Vollbrandphase war jedoch mit „ $t = 5 \text{ min}$ “ an die Dauer der Erwärmungsphase gebunden (siehe Bild 2-5). Die Zeit „ t “ war nach den RABT folgendermaßen definiert:

„Die Zeit t umfasst die Dauer bis zum Beginn der Löscharbeiten. Diese ist für den Einzelfall unter Berücksichtigung der Alarmzeit und der Anfahrzeit der Feuerwehr abzuschätzen.“

In dieser Definition finden sich somit teilweise die bereits mitgeteilten Argumente aus [4, 7] wieder.

Zur Anwendung der Brandkurve wurde in der RABT von 1985 [R 5a] ausgeführt:

„In Tunneln, in denen Transporte gefährlicher Güter zugelassen sind, soll zumindest ein beschränkter baulicher Brandschutz angestrebt werden. In Unterwassertunneln ist immer ein baulicher Brandschutz vorzusehen. ... Für die Bemessung der Brandschutzmaßnahmen ist in der oberen Hälfte des Verkehrsraumes der in Bild 5.2.2.2/1 (siehe Bild 2-5, Anm. d. Verf.) angegebene Temperaturverlauf zu berücksichtigen.“

Die RABT wurden 1994 überarbeitet, wobei der bisherige Unterabschnitt „Bauliche Brandschutzmaßnahmen“ vollkommen neu strukturiert und zu wesentlichen Teilen einschließlich der Brandkurve in die „Zusätzlichen Technischen Vertragsbedingungen und Richtlinien für den Bau von Straßentunneln“ (ZTV-Tunnel) übernommen wurde. Die ZTV-

Tunnel Teil 1 „Geschlossene Bauweise“ wurden 1995 herausgegeben. 1999 folgten die ZTV-Tunnel Teil 2 „Offene Bauweise“. Im Jahr 2003 wurden schließlich die ZTV-Tunnel in die „Zusätzlichen Technischen Vertragsbedingungen und Richtlinien für Ingenieurbauten“ (ZTV-ING) Teil 5 „Tunnelbau“ [R 2] überführt.

Die Brandkurve in den ZTV-ING Teil 5 wurde im Rahmen des EU-Projektes EUREKA EU 499 (FIRETUN-Fires In Transport Tunnels) durch Brandversuche mit Straßenfahrzeugen verifiziert (siehe Kapitel 4.2.4).

Außer in Deutschland, wo die ZTV-ING-Kurve für Straßentunnel unabhängig von der Bauweise des Tunnels und von der Art des Verkehrs angewendet wird, ist sie in der Schweiz für Straßentunnel in SIA 197-2 [R 13] als eine mögliche Brandkurve dargestellt.

2.2.2 Kurve des Eisenbahn-Bundesamtes

Die Richtlinie „Anforderungen des Brand- und Katastrophenschutzes an den Bau und den Betrieb von Eisenbahntunneln“ [R 10] wurde von Fachleuten aus den Bundesländern, der Arbeitsgemeinschaft der Berufsfeuerwehren in der BRD, der Deutschen Bahn AG und des Eisenbahn-Bundesamtes (EBA) erarbeitet. Sie wird in der Fachliteratur meist als „EBA-Richtlinie“ bezeichnet [10, 11].

In der Richtlinie [R 10] sind Art und Umfang der baulichen und betrieblichen Sicherheitsmaßnahmen beschrieben, die nach dem Stand der Technik notwendig sind, um in Eisenbahntunneln die Selbstrettung der Reisenden und des Eisenbahnpersonals sowie den Einsatz der Rettungsdienste zu ermöglichen.

Nach der Richtlinie sind bei Tunneln und Notausgängen für die Baustoffe und die Konstruktion folgende Grundsätze einzuhalten [R 10]:

- Erstellung:
 - nach den Regeln der Technik,
 - entsprechend ihrer vorgesehenen Verwendung,
 - standsicher und aus nicht brennbaren Stoffen,
- keine Gefährdung von Personen im Brandfall durch lokale Ausbrüche der Tunnelauskleidung und
- Zugrundelegung des zeitlichen Temperaturverlaufes nach Tabelle 2-1.

Bild 2-6 zeigt den Verlauf der EBA-Kurve [R 10]. Zusätzlich ist in Bild 2-6 die Kurve nach den ZTV-ING Teil 5 [R 2] eingetragen. Der Darstellung kann entnommen werden, dass sich beide Kurven nur in der Dauer der Vollbrandphase voneinander unterscheiden. Die Vollbrandphase dauert bei der ZTV-ING-Kurve 25 min, während sie bei der EBA-Kurve 55 min dauert. Die jeweils linear verlaufende Erwärmungsphase und Abkühlungsphase sind bei beiden Kurven mit 5 min bzw. 110 min Dauer gleich definiert.

Dem Sachstandsbericht der ÖVBB [10] zufolge wurde die EBA-Kurve basierend auf der früheren „RABT-Kurve“ (siehe Bild 2-5) entwickelt. Die EBA-Kurve wurde im Rahmen des EU-Projektes EUREKA EU 499 (FIRETUN-Fires In Transport Tunnels) durch Brandversuche mit Fernreisezugwagen verifiziert.

Die EBA-Kurve wird in Deutschland beim Bau und Betrieb von neuen Eisenbahntunneln angewendet [R 10]. Bei bestehenden Eisenbahntunneln ist unter dem Aspekt des rechtlichen Bestandsschutzes zu prüfen, inwieweit die Anforderungen der Richtlinie sinngemäß anzuwenden sind.

Die EBA-Kurve wird auch außerhalb von Deutschland angewendet. Zum Beispiel wurde sie für die Prüfung des baulichen Brandschutzes der Tübinge für den Fushimi-Tunnel in Kyoto (Japan) verwendet [40].

Dem Sachstandsbericht [10] zufolge bestehen Überlegungen, die EBA-Kurve in Österreich zur Einhaltung der Mindestvorgabe für unterirdische

Branddauer [min]	0	5	60	170
Temperatur [°C]	0	1.200	1.200	0

Tab. 2-1: Verlauf der EBA-Kurve [R 10]

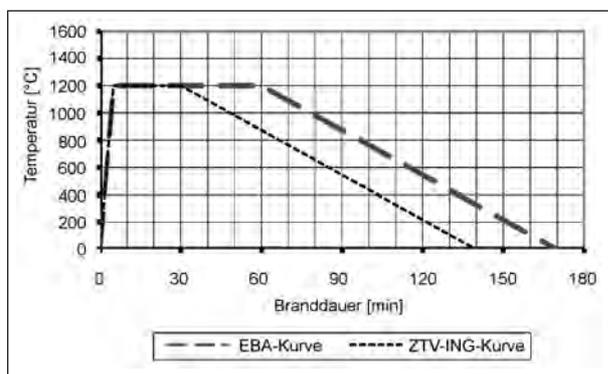


Bild 2-6: Verlauf der EBA-Kurve [R 10]

Bahnhöfe an Hochgeschwindigkeitsstrecken nach der TSI-Richtlinie-Teilsystem Infrastruktur [R 16] anzuwenden [10].

2.2.3 Einheits-Temperatur-Zeit-Kurve

Die Einheits-Temperatur-Zeit-Kurve (ETK) wurde in den 1920er Jahren aus den Erfahrungen mit Raumbränden im Hochbau abgeleitet [1]. Der ETK liegt ein Feststoffbrand ohne Entzündungs-, Schmelbrand- und Abkühlungsphase zugrunde (vgl. Bild 2-1).

Die ETK ist in DIN 4102-2 [R 8b] nach folgender Gleichung definiert:

$$\vartheta - \vartheta_0 = 345 \log_{10} (8t + 1) \quad (\text{Gl. 2-1}).$$

In Gl. 2-1 bedeuten:

ϑ Brandraumtemperatur [K],

ϑ_0 Temperatur der Probekörper bei Versuchsbeginn [K] und

t Zeit [min].

Für den Fall $\vartheta = \vartheta_0$ ist der Verlauf der ETK in Bild 2-7 im Vergleich zur ZTV-ING-Kurve dargestellt.

Die ETK stellt eine offene Brandkurve mit unbegrenztem Temperaturmaximum dar. Aus Bild 2-7 ist zu erkennen, dass nach der ETK Temperaturen von 1.000 °C nach ca. 90 min und von 1.100 °C nach ca. 180 min werden. Temperaturen von 1.200 °C erreicht die ETK nach Gl. 2-1 erst nach ca. 360 min. Im Vergleich hierzu hat sich nach der ZTV-ING-Kurve die Vollbrandphase mit einer Temperatur von 1.200 °C bereits nach 5 min entwickelt.

Die ETK wird im deutschen Straßentunnelbau für die Prüfung der brandschutztechnischen Anforder-

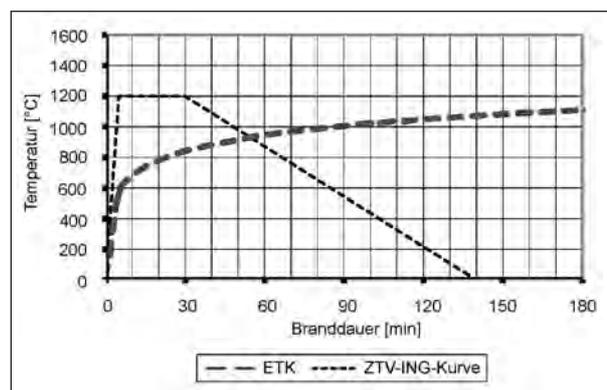


Bild 2-7: Verlauf der Einheits-Temperatur-Zeit-Kurve (ETK) [R 8b]

rungen von Flucht- und Verbindungstüren angewendet (siehe Kapitel 3.4.2). Darüber hinaus ist die ETK in zahlreichen nationalen und internationalen Normen und Regelwerken als Brandkurve enthalten (siehe auch Kapitel 2.3.5).

2.3 Internationale Ansätze für Brandkurven

2.3.1 Hydrocarbon-Kurve

Die Hydrocarbon-(HC-)Kurve wurde in den 1970er Jahren für Kohlenwasserstoffbrände in Industrie- und Off-Shore-Anlagen entwickelt [10, 22]. Die näheren Umstände der Entwicklung sind nicht bekannt. Der Kurvenverlauf der HC-Kurve ist in DIN EN 1991-1-2 [R 12] folgendermaßen definiert:

$$\Theta_g = 1.080 (1 - 0,325 e^{-1,67 t} - 0,675 e^{-2,5t}) + 20$$

(Gl. 2-2).

In Gl. 2-2 bedeuten:

Θ_g Gastemperatur im Brandabschnitt bzw. Brandofen [°C] und

t Zeit [min].

Die HC-Kurve ist in Bild 2-8 dargestellt. In Bild 2-8 wurde zusätzlich die ZTV-ING-Kurve aufgenommen.

Der Vergleich der Kurven in Bild 2-8 ergibt, dass beide in den ersten Minuten des Brandes einen ähnlich steilen Temperaturanstieg aufweisen. Im weiteren Brandverlauf weist die ZTV-ING-Kurve jedoch einen steileren Anstieg und ein höheres Temperaturmaximum auf. Die ZTV-ING-Kurve erreicht ihr Temperaturmaximum von 1.200 °C nach 5 min, während die HC-Kurve ihr Temperaturmaximum von 1.100 °C nach 30 min erreicht. Die HC-Kurve

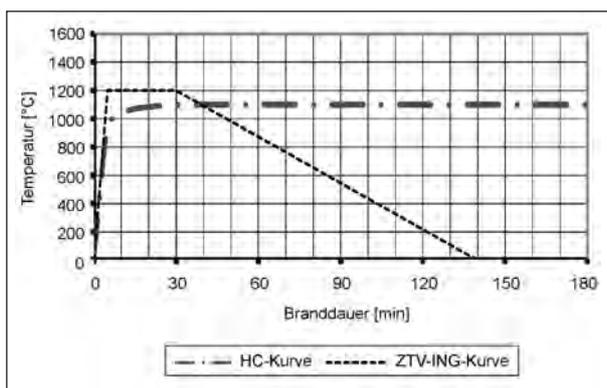


Bild 2-8: Verlauf der Hydrocarbon-Kurve (HC) [R 12]

weist gegenüber der ZTV-ING-Kurve keine Abkühlungsphase auf. Bei der HC-Kurve handelt es sich um eine so genannte „offene“ Brandkurve, während die ZTV-ING-Kurve eine so genannte „geschlossene“ Brandkurve darstellt.

In [10] wird angegeben, dass die HC-Kurve für Brände in begrenzten, längeren eingleisigen Eisenbahntunneln anwendbar sei. Qualitativ könne der Verlauf der HC-Kurve auch für bestimmte Feststoffbrände als repräsentativ angesehen werden, wenn die Phase der Brandentstehung fortgelassen wird. Diesen Angaben kann nicht uneingeschränkt gefolgt werden, da zwar in einem eingleisigen Eisenbahntunnel hohe Brandlasten zur Verfügung stehen können, diese aber, wie auch die Sauerstoffzufuhr zum Brand, begrenzt sind. Die Ausbildung der HC-Kurve als offene Brandkurve spricht jedoch dafür, dass bei konstanter Sauerstoffzufuhr, Brandgut unbegrenzt zur Verfügung steht und ein wirksamer Löschangriff unterbleibt.

Die HC-Kurve findet u. a. in folgenden Ländern bzw. Regelwerken Anwendung [10, 41]:

- in der Europäischen Union
 - bei Entwurf, Berechnung und Bemessung von Tragwerken und Bauteilen von Gebäuden gem. EC 1 [R 12],
- in Frankreich
 - für Eisenbahntunnel der staatlichen SNCF,
- in Österreich
 - für Eisenbahntunnel im Zuge von Hochleistungsstrecken,
 - in der ÖVBB-Richtlinie „Erhöht brandbeständiger Beton für unterirdische Verkehrsbauteile“ [R 18] als Untergrenze eines Temperatur-Zeit-Bereiches für Fälle ohne detaillierte Untersuchung und in Verbindung mit festgelegter Temperatureindringkurve,
- in Schweden
 - bei Straßen- und Eisenbahntunneln (Passagierverkehr: t = 120 min, Güterverkehr ohne Gefahrgut: t = 180 min),
- beim Internationalen Eisenbahnverband
 - im UIC-Kodex 779-9-August-2003 – Infrastruktur [R 19].

In Österreich wird eine Variation der HC-Kurve für zweistreifige Straßentunnel mit Längsluftgeschwindigkeiten von maximal 1,5 m/s verwandt. Anstelle des Faktors 1.080 wird dabei nur der Klammerausdruck in Gl. 2-2 mit 1.180 multipliziert, sodass Maximaltemperaturen von 1.200 °C erreicht werden. Die Kurve wird in RVS 09.01.45 [R 17] als HC_s bezeichnet.

Für die Anwendung der HC-Kurve in Schweden ist zu ergänzen, dass bei der Bemessung von Straßentunneln nach der Branddauer von 120 min bzw. 180 min eine Abkühlungsphase von 600 °C/h (10 °C/min) zu berücksichtigen ist [41]. Diese Abkühlungsgeschwindigkeit entspricht in etwa derjenigen, die durch die ZTV-ING-Kurve vorgegeben wird (rd. 11 °C/min).

2.3.2 Erhöhte Hydrocarbon-Kurve

Die erhöhte Hydrocarbon-Kurve (HC_{inc} , inc = increased) wurde basierend auf der HC-Kurve speziell für Brände in Tunneln entwickelt, um den aus dem Gütertransport resultierenden höheren Brandlasten besser gerecht zu werden [1]. Hierzu wurde der Klammerausdruck in Gl. 2-2 nicht mit 1.080, sondern mit 1.280 multipliziert, sodass sich der Verlauf der HC_{inc} -Kurve wie folgt ergibt:

$$\Theta_g = 1.280 (1 - 0,325 e^{-1,67t} - 0,675 e^{-2,5t}) + 20$$

(Gl. 2-3).

Die Formelzeichen und Einheiten in Gl. 2-3 entsprechen denen in Gl. 2-2. Die Hintergründe für die Ableitung des Faktors 1.280 sind nicht bekannt.

Bild 2-9 veranschaulicht den Verlauf der HC_{inc} -Kurve. Der Verlauf der HC_{inc} -Kurve gleicht qualitativ dem der HC-Kurve. Der Unterschied zwischen beiden Kurven besteht im Temperaturmaximum. Die HC-Kurve erreicht nach 30 min ihr Tempera-

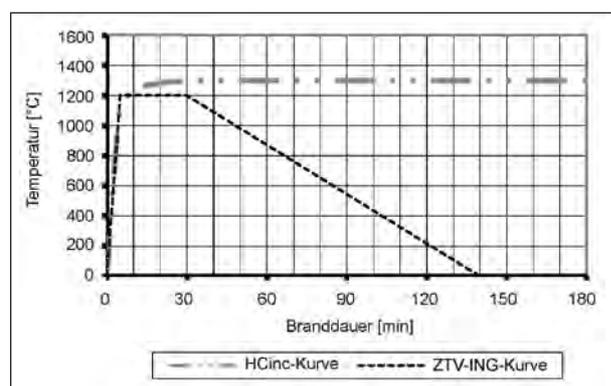


Bild 2-9: Verlauf der erhöhten Hydrocarbon-Kurve [10]

turmaximum von 1.200 °C, während die HC_{inc} -Kurve im gleichen Zeitraum ihr Temperaturmaximum von 1.300 °C erreicht. Als Vergleichsmaßstab ist in Bild 2-9 ebenfalls die ZTV-ING-Kurve eingetragen. HC_{inc} - und ZTV-ING-Kurve besitzen in den ersten ca. 5 min einen ähnlich steilen Temperaturanstieg. Im weiteren Verlauf weist die HC_{inc} -Kurve gegenüber der ZTV-ING-Kurve ein höheres Temperaturmaximum auf, das über die gesamte Branddauer konstant bleibt.

Den Ausführungen in [1] zufolge kann die HC_{inc} -Kurve stellvertretend für Benzin- und Diesellachenbrände angewendet werden. Sie kann auch qualitativ für bestimmte Feststoffbrände, wenn z. B. der Brand zusätzlich durch hohe Längsluftgeschwindigkeiten und hohen Sauerstoffanteil angefacht wird, verwendet werden.

Für die HC_{inc} -Kurve bestehen folgende Anwendungsbeispiele bzw. -empfehlungen [10, 22]:

- in der Schweiz
 - für Bahntunnel nach SIA 197-1,
 - für Straßentunnel nach SIA 197-2 bei Last- und Tankwagenverkehr mit $t = 120$ min bzw. 180 min bei hohem Tankwagenanteil [R 13],
- in Österreich
 - für zweistreifige Straßentunnel mit Längsluftgeschwindigkeiten von mehr als 1,5 m/s bis 5 m/s gem. RVS 9.01.45 [R 17],
 - für Eisenbahntunnel im Zuge von Hochleistungsstrecken,
 - in der ÖVBB-Richtlinie „Erhöht brandbeständiger Beton für unterirdische Verkehrsbauwerke“ [R 18] als Obergrenze eines Temperatur-Zeit-Bereiches für Fälle ohne detaillierte Untersuchung und in Verbindung mit festgelegter Temperatureindringkurve,
- in Frankreich
 - für den Eisenbahntunnel Mt d’Ambin,
 - für Straßentunnel mit Lkw-Verkehr,
- in den ITA/PIARC-Empfehlungen für Straßentunnel (siehe Kapitel 2.3.6).

2.3.3 Rijkswaterstaat-Kurve

In [10] wird berichtet, dass die Rijkswaterstaat-Kurve (Abk.: RWS-Kurve) aus Brandversuchen in einem maßstäblichen Modelltunnel abgeleitet

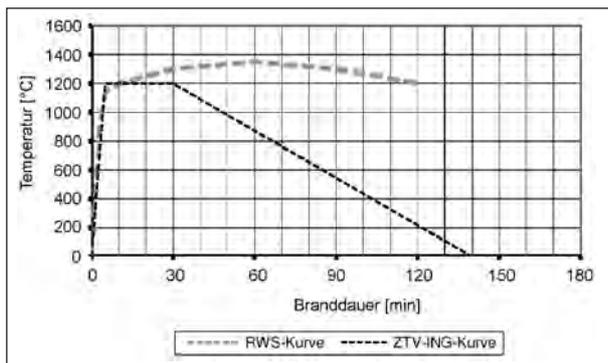


Bild 2-10: Verlauf der Rijkswaterstaat-Kurve [10]

wurde. Der Modelltunnel besaß Querschnittsabmessungen von 2 m x 2 m und eine Länge von 8 m. Im Rahmen dieser Versuche wurden 45.000 l Benzin in 4 Behältern verbrannt. Die höchsten gemessenen Temperaturen betragen 1.350 °C mit einzelnen Spitzen bis 1.370 °C. Explosionsartige Verbrennungsvorgänge, wie sie durch Bildung eines explosiven Dampf-Luft-Gemisches auftreten können, wurden nicht untersucht.

Die RWS-Kurve ist in Bild 2-10 abgebildet. Nach der Darstellung in [10] wurde bei der Ableitung der RWS-Kurve angenommen, dass ein Tankfahrzeug mit einem Fassungsvermögen von 50 m³, das zu 90 % mit Kohlenwasserstoff gefüllt ist, in Brand gerät und das Brandgut von 45.000 l Benzin und/oder Diesel nach 2 h verbrannt ist. Warum die RWS-Kurve dennoch als offene Brandkurve, d. h. ohne Abkühlungsphase, definiert wurde, ist nicht bekannt [10].

Der Vergleich der RWS-Kurve mit der ZTV-ING-Kurve in Bild 2-10 ergibt, dass beide Kurven in den ersten 5 min einen ähnlich steilen Anstieg aufweisen. In dieser Zeit erreicht die ZTV-ING-Kurve bereits ihr Temperaturmaximum von 1.200 °C, wohingegen die Temperatur bei der RWS-Kurve darüber hinaus innerhalb weiterer 25 min mit flacherem Anstieg als zuvor bis auf 1.350 °C ansteigt und anschließend bis zum Ende der Branddauer auf 1.200 °C abfällt.

Die RWS-Kurve findet u. a. Anwendung [10, 41]:

- in den Niederlanden
 - bei Straßen- und Eisenbahntunneln, die für Gefahrguttransporte zugelassen sind,
- in der Schweiz
 - für Bahntunnel nach SIA 197-1,
 - für Straßentunnel nach SIA 197-2 bei Last- und Tankwagenverkehr mit $t = 120$ min [R 13],

- in Österreich
 - in den ÖVBB-Richtlinien „Faserbeton“ [R 20] und „Innenschalenbeton“ [R 21],
 - berücksichtigt in den Temperatureindringungskurven der ÖVBB-Richtlinie „Erhöht brandbeständiger Beton für unterirdische Verkehrsbauwerke“ [R 18],
- beim Öresund-Tunnel zwischen Kopenhagen (DK) und Malmö (S),
- in Schweden für Eisenbahntunnel unter Gewässern und Bauwerken,
- in den ITA/PIARC-Empfehlungen für Straßentunnel (siehe Kapitel 2.3.6).

Für die Anwendung der RWS-Kurve in den Niederlanden ist als zusätzliche Anforderung anzufügen, dass die Temperatur der tragenden Bewehrung 250 °C sowie die Temperatur in der Kontaktfläche zwischen Innenschalenbeton und Brandschutzverkleidung 380 nicht überschreiten dürfen [22].

In Schweden ist bei der Bemessung von Eisenbahntunneln unter Gewässern und Bauwerken zusätzlich eine Abkühlungsphase von 600 °C/h (10 °C/min) im Anschluss an die Branddauer von 120 min zu berücksichtigen [41]. Diese Abkühlungsgeschwindigkeit entspricht in etwa derjenigen, die durch die ZTV-ING-Kurve vorgegeben wird (rd. 11 °C/min).

2.3.4 Modifizierte Rijkswaterstaat-Kurve

Nach Aussage in [10] hat die Konzeption der RWS-Kurve (siehe Kapitel 2.3.3) PIARC dazu veranlasst, für Straßentunnel eine Brandkurve auf Basis der RWS-Kurve vorzuschlagen. Hierbei werden die bei der RWS-Kurve nach einer Branddauer von 2 h erreichten 1.200 °C für eine weitere Stunde konstant gehalten. Dieser Vorschlag wird im Weiteren als modifizierte RWS-Kurve bezeichnet und ist in Bild 2-11 dargestellt.

Die modifizierte RWS-Kurve findet u. a. Anwendung:

- in der Schweiz
 - für Straßentunnel nach SIA 197-2 bei hohem Tankwagenanteil mit $t = 180$ min [R 13],
- in den ITA/PIARC-Empfehlungen für Straßentunnel (siehe Kapitel 2.3.6).

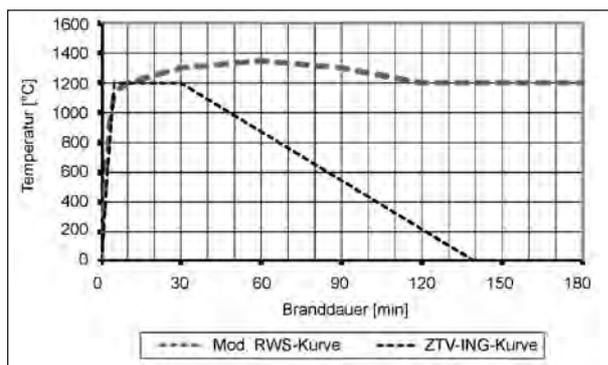


Bild 2-11: Verlauf der modifizierten Rijkswaterstaat-Kurve [10]

2.3.5 ISO-Kurve

Die ISO- und die ETK sind eng miteinander verwandt. Die ISO-Kurve unterscheidet sich von der ETK-Kurve (siehe Kapitel 2.2.3) lediglich darin, dass bei der ISO-Kurve die Temperatur der Probekörper unberücksichtigt bleibt.

Die ISO-Kurve ist in ISO 834-1 [R 4] nach folgender Gleichung definiert:

$$T = 345 \log_{10}(8t + 1) + 20 \quad (\text{Gl. 2-4})$$

In Gl. 2-4 bedeuten:

T durchschnittliche Ofentemperatur [°C] und

t Branddauer [min].

In der Fachliteratur wird weitestgehend die Ansicht vertreten, dass die ETK bzw. die ISO-Kurve für die Anwendung als Tunnelbrandkurve nur bedingt, d. h. für Tunnel ohne Güter- und Gefahrguttransporte (z. B. [10, 22, 39]), repräsentativ ist. Praktisch wird die ETK bzw. die ISO-Kurve bei der brandschutztechnischen Bemessung seltener für die Tunnelkonstruktion selbst, sondern häufig für den konstruktiven Innenausbau oder betriebstechnische Ausstattungselemente angewendet.

Für die ISO-Kurve können folgende Anwendungsbeispiele gegeben werden [10, 22, 39, 41, 42]:

- Schweiz
 - Bahntunnel nach SIA 197-1 und den Richtlinien bzw. Vorgaben der SBB-Alptransit,
 - Straßentunnel nach SIA 197-2 [R 13] bei Personen- und Lieferwagenverkehr mit $t = 60$ min,
 - für Lüftungskanäle und Zwischendecken von Straßentunneln nach SIA 197-2 [R 13] mit $t = 30$ min,

- Österreich
 - für Straßentunnel als Mindestanforderung gem. RVS 09.01.45 [R 17],
 - für den Innenausbau von Straßentunneln gem. RVS 09.01.23 [R 22],
 - für den Bahntunnel Ebelsberg,
- Italien
 - für Eisenbahntunnel,
- Frankreich
 - für Eisenbahntunnel der staatlichen SNCF,
 - für Straßentunnel mit Pkw-Verkehr,
- Belgien
 - für Verkehrstunnel, durch die keine Gefahrgüter transportiert werden,
- Tschechien
 - für die unbewehrten Blöcke des TERN-Straßentunnels Libouchec (CZ),
- Schweden
 - für Flucht-/Verbindungstüren in Verkehrstunneln ($t = 60$ min),
 - in den ITA/PIARC-Empfehlungen für Straßentunnel (siehe Kapitel 2.3.6),
 - Internationaler Eisenbahnverband,
 - im UIC-Kodex 779-9-August-2003 – Infrastruktur [R 19].

2.3.6 ITA/PIARC-Empfehlungen

Die World Road Federation (PIARC) und die International Tunneling Association (ITA) haben gemeinsam Richtlinien für den Brandschutz in Straßentunneln erarbeitet [43]. Die Richtlinien sollen dazu dienen, Straßentunnel zu klassifizieren und Verfahren zum baulichen Brandschutz zu entwickeln. In Abhängigkeit der Verkehrsart und der möglichen Konsequenzen im Falle eines Bauwerksversagens werden von ITA/PIARC Brandkurven für die Tunnelkonstruktion bzw. für Sekundärkonstruktionen empfohlen (siehe Tabelle 2-2a/b). PIARC ist dabei der Auffassung, dass die RWS-Kurve und die HC_{inc} -Kurve ein vergleichbares Niveau des baulichen Brandschutzes repräsentieren, sodass die Anwendung einer der beiden Kurven empfohlen wird.

Verkehrsart	Bauweise/Situation			
	Absenverfahren, unter Bauwerken	Gebirge, nicht standfest	Gebirge, standfest	Offene Bauweise
Pkw/ Van	ISO 60 min	ISO 60 min	2)	2)
Lkw/ Tankwagen	RWS/HC _{inc} 120 min ¹⁾	RWS/HC _{inc} 120 min ¹⁾	3)	3)

1) 180 min können bei hohem Anteil von Tankwagen mit brennbaren Gütern erforderlich werden.
 2) Standsicherheit ist kein Kriterium (außer bei progressivem Versagen). Andere Kriterien können erfordern: ISO 60 min für die meisten Fälle. Kein Brandschutz, wenn dieser verglichen mit den Instandsetzungskosten nach einem Brand zu aufwändig wäre.
 3) Standsicherheit ist kein Kriterium (außer bei progressivem Versagen). Andere Kriterien können erfordern: RWS/HC_{inc} 120 min, wenn erhöhte Brandschutzanforderungen aufgrund des Bauwerksschutzes (z. B. Tunnel unter Bauwerk) oder eine herausgehobene Bedeutung im Straßennetz vorliegen. ISO 120 min für die meisten Fälle, wenn damit ein verhältnismäßig ökonomischer Bauwerksschutz erreicht wird. Kein Brandschutz, wenn dieser verglichen mit den Instandsetzungskosten nach einem Brand zu aufwändig wäre.

Tab. 2-2a: ITA/PIARC-Empfehlungen für die Tunnelkonstruktion [43]

Verkehrsart	Sekundärkonstruktionen ⁴⁾			
	Lüftungskanäle ⁵⁾	Notausgänge ins Freie	Notausgänge in Nachbarröhren	Schutzräume ⁶⁾
Pkw/ Van	ISO 60 min	ISO 30 min	ISO 60 min	ISO 60 min
Lkw/ Tankwagen	ISO 120 min	ISO 30 min	RWS/HC _{inc} 120 min	RWS/HC _{inc} 120 min ⁷⁾

4) Andere Sekundärstrukturen sollten projektabhängig festgelegt werden.
 5) Bei Querlüftung
 6) Schutzräume sollten Verbindung zum Freien besitzen.
 7) Eine längere Zeit kann erforderlich werden, falls ein hoher Anteil von Lkw mit brennbaren Gütern vorliegt und eine Evakuierung aus den Schutzräumen innerhalb von 120 min nicht möglich ist.

Tab. 2-2b: ITA/PIARC-Empfehlungen für Sekundärkonstruktionen [43]

Der gemeinsame Ansatz von ITA/PIARC wurde von der ITA WG 6 „Repair and maintenance of underground structures“ weiterentwickelt, in dem die Klassifizierung der Straßentunnel nach der Verkehrsart weiter untergliedert wurde [43]:

Kategorie 1: nur Pkw, keine Lkw,

Kategorie 2: Lkw,

Kat.	Anzahl verwickelter Kfz	Bauweise/Situation			
		Absenktunnel	Gebirge, nicht standfest	Gebirge, standfest	Offene Bauweise
1	1-2	ISO 60 min	ISO 60 min	2)	2)
1	> 3	ISO 60 min	ISO 60 min	2)	2)
2	1-2	RWS/HC _{inc} 2 h	RWS/HC _{inc} 2 h	3)	3)
2	> 3	RWS/HC _{inc} 3 h	RWS/HC _{inc} 3 h	3)	3)

2), 3) siehe Tabelle 2-2a

Tab. 2-3a: ITA-Empfehlungen für die Tunnelkonstruktion [43]

Kat.	Anzahl verwickelter Kfz	Sekundärkonstruktionen			
		Lüftungskanäle	Ausgänge ins Freie	Ausgänge in Nachbarröhren	Schutzräume
1	1-2	ISO 60 min	ISO 30 min	ISO 60 min	ISO 60 min
1	> 3	ISO 60 min	ISO 30 min	ISO 60 min	ISO 60 min
2	1-2	ISO 2 h	ISO 30 min	RWS/HC _{inc} 2 h	RWS/HC _{inc} 2 h
2	> 3	ISO 2 h	ISO 30 min	RWS/HC _{inc} 2 h	RWS/HC _{inc} 2 h

Tab. 2-3b: ITA-Empfehlungen für Sekundärstrukturen [43]

Kategorie 3: Tankwagen mit brennbaren Gütern,

Kategorie 4: Sonderfälle, Absenktunnel.

Zusätzlich wird beim Ansatz der ITA die Anzahl der am Unfall beteiligten Fahrzeuge berücksichtigt.

Die Empfehlungen der ITA sollen sowohl für neu zu bauende als auch für bestehende Straßentunnel angewendet werden (siehe Tabelle 2-3a/b).

Die ITA WG 6 ist außerdem der Auffassung, dass angesichts der Verschiedenartigkeit der Straßentunnel das sinnvollste Vorgehen für den baulichen Brandschutz darin besteht, „Grenzwerte“ für die Maximaltemperatur von Baustoffen bzw. von Bauelementen nach zweistündiger Einwirkung der spezifischen Brandkurve vorzuschlagen. Aus der Vielzahl der von ITA WG 6 angegebenen Anforderungen werden im Folgenden nur Anforderungen mit-

geteilt, die sich auf Baustoffe und Bauelemente beziehen, die für den endgültigen Ausbau von deutschen Straßentunneln in Frage kommen [43]:

- Beton: max. 380 °C Oberflächentemperatur,
- Betonfertigteile: max. 200 °C bis 250 °C Oberflächentemperatur,
- Tragglieder und Deckenabhängungen:
 - aus Stahl oder Gusseisen: max. 550 °C,
 - aus Edelstahl: max. 800 °C,
- Brandschutzbekleidungen dürfen durch Wasser nicht geschädigt werden,
- alle Baustoffe sollen nicht toxisch und nicht entflammbar sein.

Die Anforderungen an die Oberflächentemperaturen von Beton und Betonfertigteilen können bei Anwendung von üblichen Brandkurven für die Tunnelkonstruktion (siehe Kapitel 2.2.1, 2.2.2 und 2.3.1 bis 2.3.4) nur durch die Verwendung von Brandschutzbekleidungen eingehalten werden.

2.4 Vergleichende Betrachtung

Die in den vorangegangenen Kapiteln dargestellten und beschriebenen Brandkurven sind vergleichend in Bild 2-12 zusammengestellt. Bild 2-12 lässt die Unterschiede der einzelnen Brandkurven hinsichtlich des Brandverlaufes, in der Dauer bis zum Erreichen der Maximaltemperatur sowie in der Dauer der maximalen Temperatureinwirkung erkennen. Mit Ausnahme der ZTV-ING-Kurve und der EBA-Kurve handelt es sich um offene Brandkurven, d. h. ohne Definition einer Abkühlungsphase.

Die RWS-Kurve erreicht mit 1.350 °C die höchste Maximaltemperatur von allen Brandkurven. Die zweithöchste Maximaltemperatur weist mit 1.300 °C die HC_{inc}-Kurve auf, danach folgen mit 1.200 °C die ZTV-ING-Kurve bzw. die EBA-Kurve und mit 1.100 °C die HC-Kurve. Außerdem ist zu erkennen, dass die genannten Brandkurven in den ersten 5 min einen ähnlich raschen Temperaturanstieg besitzen. In Tabelle 2-4 ist die Geschwindigkeit des Temperaturanstieges innerhalb der ersten 5 min dargestellt. Hierfür wurden eine Ausgangstemperatur von 20 °C und ein linearer Anstieg vorausgesetzt. Nach Tabelle 2-4 weisen diese Brandkurven eine Temperaturzunahme von rd. 200 K/min auf. Die ZTV-ING-Kurve hat nach 5 min bereits ihr Ma-

Brandkurve	Temperatur [°C]		Lineare Temperaturzunahme [K/min]
	Brandbeginn	Nach 5 min	
ZTV/EBA	20	1.200	236
RWS/mod RWS	20	1.140	224
HC	20	948	186
HC _{inc}	20	1.120	220
ETK/ISO	20	576	111

Tab. 2-4: Temperaturzunahme innerhalb der ersten 5 min bei Brandkurven

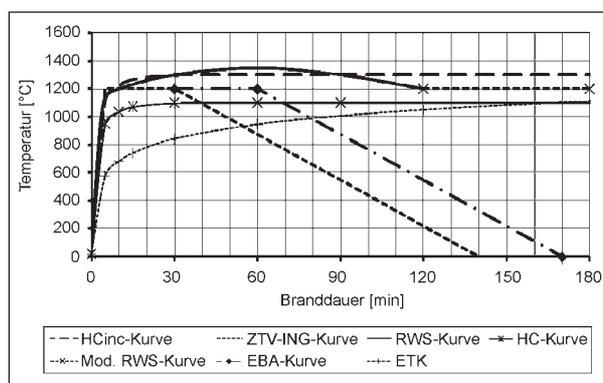


Bild 2-12: Überblick über Brandkurven für Tunnelbauwerke

ximum erreicht (siehe Bild 2-12). Bei der HC-Kurve und der HC_{inc}-Kurve wird dieses nach einem weiteren, allerdings weniger starken Temperaturanstieg nach ca. 30 min erreicht. Bei der RWS-Kurve vollzieht sich nach 5 min ein deutlicherer Temperaturanstieg, bis nach 60 min das Maximum erreicht wird.

Die ETK unterscheidet sich hinsichtlich der Temperaturzunahme deutlich von den anderen Brandkurven. Der Temperaturanstieg vollzieht sich bei ihr deutlich langsamer, denn erst nach ca. 170 min erzielt sie das Temperaturniveau der HC-Kurve, das diese bereits nach 5 min erreicht hat.

3 Bauliche Brandschutzanforderungen in Deutschland

3.1 Allgemeine Grundsätze

Tunnel stellen aufgrund ihrer Lage im Straßennetz, ihrer Abmessungen und ihrer Nutzung Bauwerke mit besonderen Ansprüchen an einen sicheren und wirtschaftlichen Bau und Betrieb dar.

Als Straßentunnel werden in Deutschland alle dem Straßenverkehr dienenden Bauwerke bezeichnet,

die unterhalb der Erd- oder Wasseroberfläche liegen und in geschlossener Bauweise hergestellt werden bzw. deren Länge bei Herstellung in offener Bauweise länger als 80 m ist [R 1]. Ab einer Länge von 80 m gelten ebenfalls folgende Bauwerke als Straßentunnel:

- teilabgedeckte unter- und oberirdische Bauwerke, z. B. mit längsgeschlitzten Decken und Rasterdecken,
- oberirdische Einhausungen, z. B. für Lärmschutzzwecke,
- Kreuzungsbauwerke mit anderen Verkehrswegen und
- Galeriebauwerke.

Nach der Art und Weise des Vortriebs, der Sicherung und des Ausbaus werden im Straßentunnelbau in Deutschland folgende Bauweisen unterschieden:

- geschlossene Bauweise (Spritzbetonbauweise),
- offene Bauweise und
- maschinelle Schildvortriebsverfahren.

In Deutschland sind die Anforderungen des baulichen Brandschutzes von Straßentunneln in den „Zusätzlichen Technischen Vertragsbedingungen und Richtlinien für Ingenieurbauten“ (ZTV-ING) Teil 5 „Tunnelbau“ festgelegt [R 2]. Um einen ausreichenden baulichen Brandschutz sicherzustellen, ist demnach unabhängig von der Bauweise die Tunnelkonstruktion stets so auszuführen, dass bei Brandeinwirkung

- keine Schäden auftreten, die die Standsicherheit gefährden,
- keine bleibenden Verformungen der Konstruktion entstehen, die die Gebrauchstauglichkeit einschränken,
- die Dichtigkeit weitgehend gewährleistet bleibt.

Die spezifischen Anforderungen an den baulichen Brandschutz sind in den ZTV-ING Teil 5 „Tunnelbau“ [R 2] in Abhängigkeit von der Bauweise geregelt. Hierdurch besteht die Möglichkeit, die brandschutztechnischen Anforderungen an die einzelnen Bauweisen anzupassen und diese aus technischer und wirtschaftlicher Sicht zu optimieren.

3.2 Schalenkonstruktion

3.2.1 Geschlossene Bauweise

Für die brandschutztechnische Bemessung von Straßentunneln, die in geschlossener Bauweise hergestellt werden, ist nach den ZTV-ING Teil 5 Abschnitt 1 [R 2a] die Brandkurve in Bild 2-3 zu verwenden. Der hieraus resultierende bauliche Brandschutz ist entweder durch die Einhaltung konstruktiver Anforderungen oder durch rechnerische Nachweisverfahren sicherzustellen.

Die erforderlichen konstruktiven Maßnahmen sind gem. ZTV-ING Teil 5 Abschnitt 1 [R 2a] darauf auszurichten, dass die tragende Bewehrung unter Einwirkung der Brandkurve nach Bild 2-3 nicht über 300 °C erwärmt wird. Um diese Anforderung einzuhalten, geben die ZTV-ING Teil 5 Abschnitt 1 [R 2a] für die bei dieser Bauweise üblichen Gewölbequerschnitte ein Nennmaß der Betondeckung zur Tunnelinnenseite von 60 mm bei einer Innenschalendicke von mindestens 35 cm vor. Das Nennmaß der Betondeckung von 60 mm ist ebenfalls bei Zwischendecken für die dem Verkehrsraum zugewandten Seiten zu realisieren. In der Zwischendecke ist zum Schutz vor Betonabplatzungen zusätzlich eine verzinkte Mattenbewehrung (N 94) mit einem Mindestmaß der Betondeckung von 20 mm anzuordnen und an der tragenden Bewehrung zu befestigen. Die ZTV-ING Teil 5 Abschnitt 1 [R 2a] gehen davon aus, dass die genannten konstruktiven Maßnahmen für den baulichen Brandschutz der Konstruktion ausreichend sind und nur im Ausnahmefall rechnerische Nachweise erforderlich sind.

Die wesentlichen Grundlagen, Randbedingungen und Anforderungen für die brandschutztechnische Bemessung von Straßentunneln in geschlossener Bauweise wurden im Rahmen eines Forschungsvorhabens ermittelt und zusammengestellt [5]. Im Folgenden werden die wesentlichen Schlussfolgerungen des Forschungsvorhabens dargestellt:

Die Beschränkung der Temperatur der tragenden Bewehrung auf 300 °C nach den ZTV-ING ist damit zu begründen, dass bei einer Erwärmung über diesen Wert hinaus die Bewehrung hohe Dehnungen als Folge der Brandeinwirkung erfährt, wodurch die Konstruktion nach dem Erkalten unverträglich hohe plastische Verformungen aufweist. Die Temperaturabhängigkeit der Spannungs-Dehnungs-Beziehungen für einen Betonstahl BSt 500 S verdeutlicht Bild 3-1.

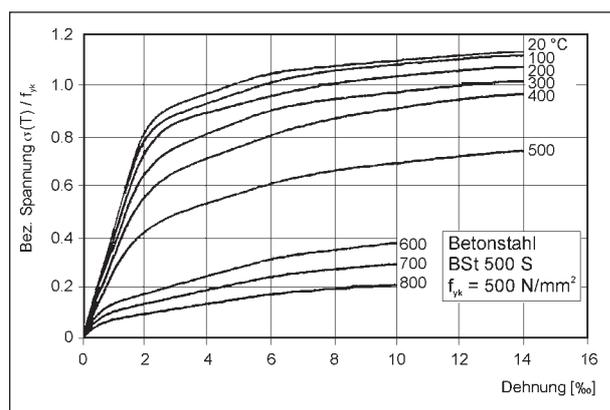


Bild 3-1: Spannungs-Dehnungs-Beziehungen für Betonstahl BSt 500 S [5]

Bild 3-1 ist zu entnehmen, dass die Ausdehnung des elastischen Bereiches der Spannungs-Dehnungs-Beziehungen von der Temperatur abhängt. Unter Annahme einer Streckgrenzausnutzung bei der Bemessung für den Gebrauchszustand („kalter“ Zustand) von 60 % ist die Temperatur des Betonstahls auf ca. 300 °C zu begrenzen, um plastische Dehnungen, mit deren Eintreten ab einer Dehnung von 2 ‰ zu rechnen ist, weitgehend auszuschließen.

Den Schutz der tragenden Bewehrung vor zu starker Erwärmung soll eine ausreichende Betondeckung realisieren. Für die Ermittlung der erforderlichen Betondeckung wurde im Rahmen des Forschungsvorhabens die Temperaturverteilung in einem Stahlbetonbauteil aus Beton B 25, auf das die Brandkurve nach Bild 2-3 einseitig einwirkt, numerisch ermittelt und durch Vergleich mit den bei Brandversuchen gemessenen Temperaturen kontrolliert. Den Temperaturverlauf infolge der definierten Brandeinwirkung gibt Bild 3-2 wieder. Bei dem Parameter „u“ in Bild 3-2 handelt es sich um den Abstand zwischen der beflamten Bauteiloberfläche und der Achse der tragenden Bewehrung. Bei der Ausführung einer Bewehrung von Tunnelinnenschalen mit üblichen Stabdurchmessern von 6 mm bis 12 mm ergibt sich bei einer Betondeckung $\text{nom } c = 60 \text{ mm}$ der Achsabstand $u = 63 \text{ mm}$ bis 66 mm.

Bild 3-2 ist zu entnehmen, dass für die genannten Achsabstände der tragenden Bewehrung die Temperatur infolge Einwirkung der Brandkurve der ZTV-ING Teil 5 [R 2] unter 300 °C verbleibt. Diese Aussage trifft jedoch nur zu, wenn keine Betonabplatzungen auftreten, durch die sich der Achsabstand u zur beflamten Seite des Bauteils auf weniger als die noch ausreichenden 50 mm verringern könnte.

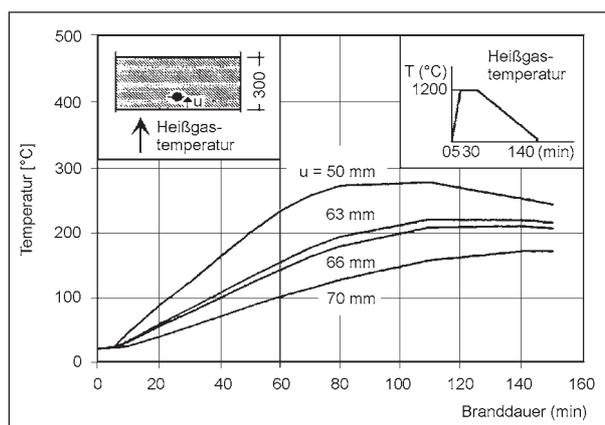


Bild 3-2: Temperaturverlauf in einer Tunnelinnenschale bei einseitiger Brandeinwirkung [5]

Dies soll bei der Zwischendecke durch den Einbau der verzinkten Mattenbewehrung sichergestellt werden.

Als Detail aus Bild 3-2 ist weiterhin zu entnehmen, dass die höchste Temperatur in der tragenden Bewehrung erst erreicht wird, wenn die Brandtemperatur bereits abklingt.

3.2.2 Offene Bauweise

Für die brandschutztechnische Bemessung von Straßentunneln in offener Bauweise ist nach den ZTV-ING Teil 5 Abschnitt 2 [R 2b] die Brandkurve in Bild 2-3 zugrunde zulegen.

Der erforderliche bauliche Brandschutz ist bei Rechteckquerschnitten sowohl durch die Einhaltung konstruktiver Maßnahmen als auch durch rechnerischen Nachweis sicherzustellen. Für Gewölbequerschnitte, die bei größeren Überschüthöhen angewendet werden, gelten die ZTV-ING Teil 5 Abschnitt 1 [R 2a] (siehe Kapitel 3.2.1).

Als konstruktive Maßnahmen sind für die Betondeckung der Bewehrung zur Tunnelinnenseite ein Nennmaß von 60 mm und ein Mindestmaß von 55 mm zu realisieren. In der Decke ist zum Schutz gegen Betonabplatzungen zusätzlich zur tragenden Bewehrung eine verzinkte Mattenbewehrung (N 94) mit einem Mindestmaß der Betondeckung von 20 mm auszuführen [R 2b].

Der rechnerische Nachweis untergliedert sich in einen „vereinfachten rechnerischen Nachweis“ und einen „genaueren rechnerischen Nachweis“ [R 2b]. Der vereinfachte rechnerische Nachweis darf für ein- und zweizellige Rahmen mit Bauteildicken von 0,80 m bis 1,60 m und einer maximalen Stützweite

von 16 m geführt werden. Hierzu ist ein Temperaturunterschied von 50 K in Wand und Decke bei voller Steifigkeit des Bauteilquerschnittes in Zustand I anzusetzen. Der Nachweis der Tragfähigkeit ist für außergewöhnliche Bemessungssituationen nach DIN-Fachbericht 101 [R 6] zu führen. Für den Fall abweichender Bauteilquerschnitte und Systeme ist ein genauere rechnerischer Nachweis zu führen, bei dem die reale Erwärmung des Bauteilquerschnittes und die Steifigkeitsveränderung zu berücksichtigen sind. Der genauere rechnerische Nachweis wird ebenfalls erforderlich, wenn aus dem vereinfachten Nachweis ein wesentlich höherer Bewehrungsgrad als für die Lastfälle des Gebrauchszustandes („Kaltbemessung“) resultiert. Eine genauere Spezifikation, wann ein höherer Bewehrungsgrad vorliegt, erfolgt allerdings nicht.

Die Anforderungen an die brandschutztechnische Bemessung nach den ZTV-ING Teil 5 Abschnitt 2 [R 2b] wurden ebenfalls im Rahmen eines Forschungsvorhabens FE 15.263 R95E [6] erarbeitet. Im Rahmen des Forschungsvorhabens wurde insbesondere der vereinfachte rechnerische Nachweis abgeleitet, der im Folgenden kurz erläutert wird.

Für Straßentunnel in offener Bauweise kommen als statische Systeme üblicherweise ein- oder zweizellige Rahmen aus Stahlbeton mit oder ohne Sohle zur Anwendung. Durch Brandeinwirkung entstehen in diesen statisch unbestimmten Systemen Zwangsmomente, die einen Anstieg der Momente in den Rahmenknoten und gleichzeitig eine Verringerung der Momente im Feldbereich hervorrufen. Durch den Anstieg der negativen Momente in den Rahmenknoten kann die außen liegende, kaum erwärmte Bewehrung bis zum Fließen gebracht werden. Das thermisch bedingte Zwangsmoment M_T in einem Rahmenknoten kann folgendermaßen abgeschätzt werden:

$$M_T = \kappa_s \cdot \beta_T \cdot (EI)_0 \cdot \alpha_T \cdot \Delta T / h \quad (\text{Gl. 2-5}).$$

In Gl. 2-5 bedeuten:

κ_s Systembeiwert für den eingespannten Stab ($\kappa_s = 1,0$),

β_T temperaturabhängige Biegesteifigkeitsabminderung ($\beta_T = (EI)_T / (EI)_0$),

EI_0 Biegesteifigkeit des Betonquerschnittes im Zustand I [KNm^2],

α_T linearer Temperatureausdehnungskoeffizient ($\alpha_T = 10^{-5} \text{ 1/K}$),

ΔT linearisierter Temperaturgradient [K] und

h Dicke des Bauteilquerschnittes [m].

Bei dem Forschungsvorhaben [6] wurde für Stahlbetonquerschnitte, wie sie für Straßentunnel in offener Bauweise üblich sind, das thermisch bedingte Zwangsmoment infolge Einwirkung der Brandkurve nach den ZTV-ING Teil 5 [R 2] unter Berücksichtigung der nichtlinearen Temperaturverteilung im Bauteilquerschnitt und der nichtlinearen Materialgesetze berechnet. Dabei hat sich gezeigt, dass ein Rahmenknoten über die gesamte Branddauer eine annähernd konstante maximale Momententragfähigkeit und somit auch ein annähernd konstantes Zwangsmoment aufweist. Eine Auswertung der Zwangsmomente und des Produktes aus Steifigkeitsabminderung und Temperaturgradient $\beta_T \cdot \Delta T$ für übliche Bauteildicken und die Verwendung eines Betons B 25 ($E_0 = 30 \cdot 10^6 \text{ KN/m}^2$) zeigt Tabelle 3-1.

Aus Tabelle 3-1 geht hervor, dass das Produkt $\beta_T \cdot \Delta T$ für übliche Bauteildicken in der Größenordnung von 50 K bis 54 K liegt. Hieraus wurde der Vorschlag abgeleitet, den rechnerischen Nachweis für den Lastfall „Brand“ vereinfachend zu führen, indem das Produkt $\beta_T \cdot \Delta T \approx 50 \text{ K}$ gesetzt wird. Weiterhin hat sich gezeigt, dass diese Näherung auch für den Fall von Betonabplatzungen beibehalten werden kann. Für die hierzu erforderliche numerische Analyse wurde angenommen, dass an der beflamnten Bauteiloberfläche jeweils nach 3 min, 10 min und 30 min Branddauer eine 3 cm dicke Betonschicht abplatzt. Durch die Betonabplatzungen reduziert sich das Zwangsmoment, da sich die zur Verfügung stehende Betondruckzone und damit der Hebelarm der inneren Kräfte verringern. Z. B. verringern sich für eine Querschnittsdicke von 0,90 m das Zwangsmoment von -1.000 kNm/m (s. Tabelle 3-1) auf -700 kNm/m und das Produkt $\beta_T \cdot \Delta T$ von rd. 50 K auf rd. 43 K.

Zur Verifizierung des vereinfachten rechnerischen Nachweises wurden für übliche Straßentunnelquerschnitte die mit einem FEM-Programm und mit dem

h [m]	M_T [kNm/m]	$\beta_T \cdot \Delta T$ [K]
0,80	-800	51
0,90	-1.000	50
1,20	-1.950	54
1,60	-3.450	54

Tab. 3-1: Auswertung der thermisch bedingten Zwangsmomente nach Gl. 2-5 [6]

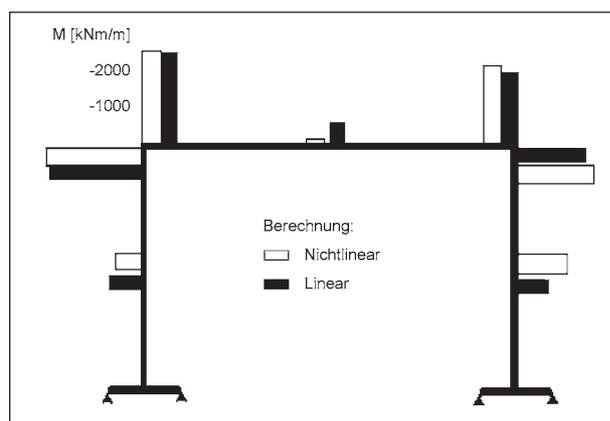


Bild 3-3: Exemplarischer Vergleich der Biegemomente aus nichtlinearer und linearer Berechnung nach 120 min Branddauer [6]

beschriebenen vereinfachten rechnerischen Nachweis ermittelten Schnittkraftverteilungen infolge Brandeinwirkung gegenübergestellt. Die Schnittgrößen wurden hierfür infolge eines Temperaturgradienten von $\Delta T = 200$ K bei abgeminderter Steifigkeit des Betonquerschnittes $\beta_T = 0,25 \cdot (EI)_0$ mit den Schnittgrößen aus den Gebrauchslasten, d. h. Eigen- und Verkehrslasten, überlagert. Es ergab sich eine befriedigende Übereinstimmung der Biegemomente für die maßgebenden Stellen. Exemplarisch hierfür ist in Bild 3-3 für einen einzelligen Rahmen ohne Sohle ein Vergleich der Biegemomente nach 120 min Branddauer bei nichtlinearer (FEM-Berechnung) und linearer Berechnung (vereinfachter rechnerischer Nachweis) gegenübergestellt.

3.2.3 Maschinelle Schildvortriebsverfahren

Für Straßentunnel, die mittels maschinellem Schildvortrieb aufgeföhren werden, wurden die ZTV-ING Teil 5 Abschnitt 3 [R 2c] neu erarbeitet. Für die brandschutztechnische Bemessung der schildvortriebenen Tunnel ist ebenfalls die in Bild 2-3 dargestellte Brandkurve der ZTV-ING Teil 5 [R 2] zu verwenden. Der Abschnitt 3 unterscheidet nach den erforderlichen Brandschutzmaßnahmen in ein- und zweischaligen Konstruktionen.

Für zweischalige Konstruktionen sind für die Innenschale die Regelungen für die Geschlossene Bauweise nach den ZTV-ING Teil 5 Abschnitt 1 [R 2a] einzuhalten (siehe Kapitel 3.2.1). Darüber hinaus sind für zweischalige Konstruktionen keine zusätzlichen Brandschutzmaßnahmen erforderlich.

Bei einschaligen Konstruktionen sind die Tübbinge mit einer Mindestdicke von 30 cm auszuführen. An den Oberflächen der Tübbinge ist ein Mindestmaß

der Betondeckung von 40 mm und an den Stirnflächen von 20 mm einzuhalten. Das Vorhaltemaß beträgt 5 mm. Zusätzlich dienen die für die Aufnahme von Lasten infolge Fahrzeuganpralls auszuföhrenden Anprallwände aus Stahlbeton auch dem Brandschutz der Tunnelkonstruktion. Die Anprallwände sind zu diesem Zweck mit einem Mindestmaß der Betondeckung von 60 mm herzustellen. Der Firstbereich über den Anprallwänden ist im Regelfall mit Brandschutzplatten auszukleiden. Alternativ können anstelle der Brandschutzplatten auch andere Brandschutzsysteme, z. B. so genannter „Brandschutzbeton“ mit Fasern aus Polypropylen (Abkürzung: PP), ausgeschrieben werden. Die Wirksamkeit des alternativen Brandschutzsystems ist allerdings derzeit noch für den Einzelfall nachzuweisen.

Für die Festlegung der brandschutztechnischen Anforderungen an die einschaligen Konstruktionen wurde ebenfalls ein Forschungsvorhaben [8] durchgeführt. In dem Forschungsvorhaben wurden verschiedene Brandschutzsysteme hinsichtlich ihrer Wirksamkeit infolge Einwirkung der Brandkurve nach den ZTV-ING Teil 5 [R 2] (siehe Bild 2-3) rechnerisch untersucht und ihrer bautechnischen Vor- und Nachteile bewertet. Die wesentlichen Ergebnisse des Vorhabens werden im Weiteren mitgeteilt:

Für die Beurteilung der Wirksamkeit der Brandschutzsysteme wurden die Temperaturverteilungen im Bauteilquerschnitt infolge Einwirkung der Brandkurve nach den ZTV-ING Teil 5 [R 2] für einen Tübbing ohne Brandschutzbekleidung als Referenz sowie für mit Brandschutzbekleidungen geschützte Tübbinge berechnet. Die thermischen Materialkennwerte für den Beton wurden dem EC 2 [R 7] entnommen und für Brandschutzbekleidungen bei Anbietern erfragt bzw. aus vorliegenden Ergebnissen von Brandversuchen ermittelt. Für die Berechnungen wurden die Dicke der Tübbinge mit 40 cm und die Dicke der Brandschutzbekleidungen mit 2,5 cm angesetzt. Der Achsabstand der tragenden Bewehrung von der beflaminten Bauteiloberfläche ergibt sich somit unter Berücksichtigung der geforderten Betondeckung und eines Stabdurchmessers von 10 mm zu 6,5 cm.

Bild 3-4 zeigt die berechnete Temperaturverteilung über die Höhe des Bauteilquerschnittes für einen unbedeckten Tübbing (Referenz). In Bild 3-5 ist die entsprechende Temperaturverteilung für einen mit einer Brandschutzplatte bedeckten Tübbing dargestellt.

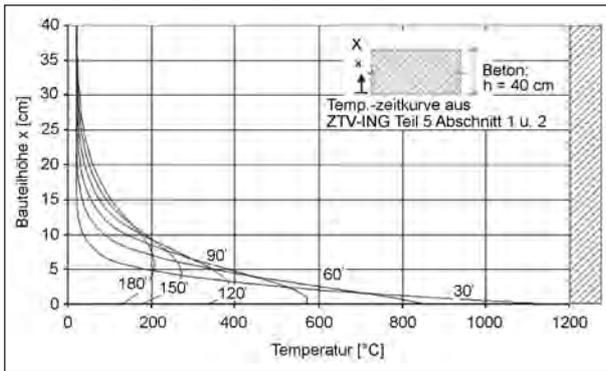


Bild 3-4: Temperaturverteilung über die Querschnittshöhe für einen unbekleideten Tübbing [8]

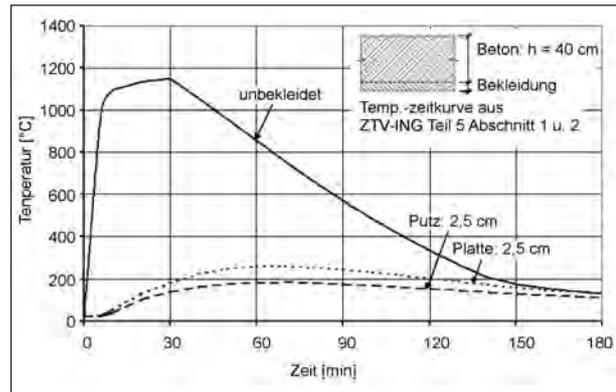


Bild 3-6: Temperatur-Zeit-Verlauf an der Tübbingoberfläche [8]

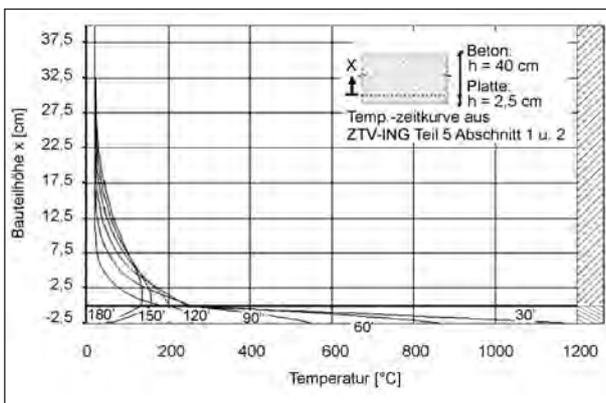


Bild 3-5: Temperaturverteilung über die Querschnittshöhe für einen Tübbing mit Plattenbekleidung [8]

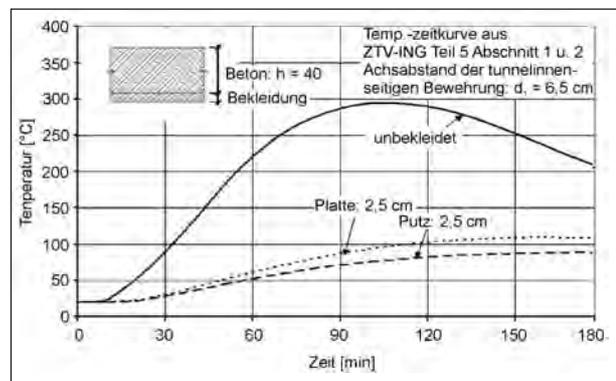


Bild 3-7: Temperatur-Zeit-Verlauf auf Achshöhe der tunnelinnenseitigen Bewehrung [8]

Bild 3-4 und Bild 3-5 ist zu entnehmen, dass nach Beginn der Abkühlphase, d. h. nach einer Branddauer von 30 min (vgl. Bild 2-3), die Temperaturfront innerhalb des Bauteilquerschnittes weiter voranschreitet. Beim unbekleideten Tübbing ist dieser Vorgang am deutlichsten bei den Branddauern von 90 min und 120 min zu erkennen (siehe Bild 3-4). Beim Tübbing mit Plattenbekleidung ist dieser Vorgang am deutlichsten bei 180 min Branddauer zu beobachten, wobei hier die Brandeinwirkung bereits vollständig abgeklungen ist (siehe Bild 2-3 und Bild 3-5). Bild 3-4 kann weiterhin entnommen werden, dass die Brandeinwirkung den unbekleideten Tübbing innerhalb des 6,5 cm messenden Achsabstandes der tunnelinnenseitigen Bewehrung von der beflamten Bauteiloberfläche am stärksten beansprucht. Beim Tübbing mit Plattenbekleidung wird während der Branddauern von 30 min bis 120 min der Querschnittsbereich der Brandschutzplatte am stärksten durch die Brandeinwirkung beansprucht (siehe Bild 3-5), bevor sich für die Branddauern 150 min und 180 min das Temperaturmaximum von rd. 120 °C bzw. rd. 150 °C in den Übergangsbereich Brandschutzplatte/Tübbing verschiebt.

Der Temperatur-Zeit-Verlauf an der Oberfläche des Tübbings ohne und mit Brandschutzbekleidung ist in Bild 3-6 dargestellt. Die Temperatur an der unbekleideten Tübbingoberfläche steigt infolge der Brandeinwirkung rasch an und erreicht nach 30 min ihr Maximum von ca. 1.150 °C. Der Temperaturanstieg der bekleideten Tübbingoberfläche erfolgt dagegen deutlich verzögert, sodass das Temperaturmaximum erst während der Abkühlungsphase nach einer Branddauer von ca. 70 min erreicht wird und für die untersuchte Brandschutzplatte ca. 180 °C und für den untersuchten Brandschutzputz ca. 260 °C beträgt (siehe Bild 3-6).

Der Temperatur-Zeit-Verlauf auf Achshöhe der tunnelinnenseitigen Bewehrung ist in Bild 3-7 wiedergegeben. Das Temperaturmaximum für den unbekleideten Tübbing beträgt an dieser Stelle ca. 295 °C und wird nach ca. 110 min erreicht. Der Temperatur-Zeit-Verlauf für den bekleideten Tübbing erfolgt dagegen auch hier zeitlich stark verzögert und bleibt mit Maxima von ca. 90 °C für den untersuchten Brandschutzputz bzw. ca. 110 °C für die untersuchte Brandschutzplatte sehr deutlich unterhalb des Maximums für den Tübbing ohne Bekleidung.

Aus den dargestellten Berechnungsergebnissen kann geschlussfolgert werden, dass bei Einwirkung der Brandkurve nach den ZTV-ING Teil 5 [R 2] im Bereich der Betondeckung eines unbekleideten Tübbings Temperaturen von über 300 °C auftreten. Nach den Ausführungen im Abschlussbericht [8] ist in diesem Bereich von einer irreversiblen Verringerung der Betondruckfestigkeit auszugehen. Dies ist allerdings hinnehmbar, da dieser Bereich nach einem Brandereignis ohnehin instand zu setzen ist. Die tragende Bewehrung ist durch die Betondeckung ausreichend geschützt, da die Temperatur auf Achshöhe der tunnelseitigen Bewehrung auch ohne Bekleidung unterhalb von 300 °C bleibt und somit auch bei vollständig ausgelastetem Bewehrungsstahl keine plastischen Verformungen auftreten. Dies gilt unter der Voraussetzung, dass während der Brandeinwirkung keine explosionsartigen Betonabplatzungen (sog. „Spalling“) auftreten. Diese Voraussetzung wird umgesetzt, indem die Tübbinge oberhalb der Anprallwände mit Brandschutzplatten bekleidet werden, wodurch der das „Spalling“ auslösende rasche Temperaturanstieg infolge Brandeinwirkung für den Tübbing wirkungsvoll vermindert werden kann. Außerdem kann der Beton mittlerweile selbst durch betontechnologische Maßnahmen, wie z. B. Zugabe von PP-Fasern und ausgewählten Gesteinskörnungen, resistent gegenüber dem „Spalling“ ausgebildet werden. Dies ist in ZTV-ING Teil 5 Abschnitt 3 [R 2c] als mögliche Alternative zur Plattenbekleidung vorgesehen. Für eine Beschreibung des Abplatzverhaltens von Beton bei Brandeinwirkung und der Wirkungsweise des Brandschutzbetons wird auf [44] verwiesen.

3.3 Fugenkonstruktion

3.3.1 Allgemeines

Die konstruktive Durchbildung von Fugen ist in den „Richtzeichnungen für Ingenieurbauten (RiZ-ING)“ [R 9] geregelt. Für Raumfugen in Decken und Wänden sind nach den ZTV-ING Teil 5 [R 2] unabhängig von der Bauweise des Tunnels Fugeneinlagen der Baustoffklasse A (nicht brennbar) nach DIN 4102 [R 8a] zu verwenden.

Fugen unterhalb der Fahrbahn sind unabhängig von der Bauweise des Tunnels und der Ausbildung durch die Überbauung mit den Schichten des Straßenaufbaus vor Brandeinwirkung geschützt.

3.3.2 Geschlossene Bauweise

Für Tunnel in geschlossener Bauweise ist die Ausbildung von Fugen in den Richtzeichnungen T Fug 10 und T Fug 11 dargestellt [R 9].

Die Ausführung von Fugen bei Tunneln ohne außen liegende Abdichtung ist in Richtzeichnung T Fug 10 behandelt. Die Mindestdicke der Innenschale beträgt in diesem Fall 40 cm. Das Fugenband ist in Schalenmitte ($d/2$) anzuordnen. Unter der Annahme, dass sich in Pressfugen infolge Einwirkung der Brandkurve nach den ZTV-ING Teil 5 [R 2] annähernd eine Temperaturverteilung wie im Betonquerschnitt einstellt, ist von einer Maximaltemperatur für das 20 cm von der beflamten Oberfläche entfernt liegende Fugenband von rd. 65 °C auszugehen (siehe Bild 3-4). Bei Raumfugen kann sich aufgrund der Fugeneinlage aus Kunststoff eine höhere Temperatur als bei Pressfugen ergeben. Die Fugenbandtemperatur im Gebrauchszustand darf nach [R 11] -20 °C bis +40 °C, bei nichtdrückendem Wasser bis +60 °C betragen. Bei Pressfugen wird das Fugenband die Brandeinwirkung vermutlich noch überstehen. Bei Raumfugen würde das Fugenband voraussichtlich beschädigt werden und wäre im Zuge der Instandsetzung zu ersetzen.

Die Ausbildung von Fugen bei außen liegender Abdichtung regelt Richtzeichnung T Fug 11. Die Innenschale ist mindestens 35 cm stark herzustellen. Ein Fugenband ist nicht vorgesehen. Wird wie zuvor angenommen, dass bei Brandeinwirkung in den Pressfugen annähernd eine Temperaturverteilung wie im Betonquerschnitt eintritt, beträgt die Maximaltemperatur auf der erdseitigen Oberfläche der Innenschale rd. 30 °C (siehe Bild 3-4). Eine Gefahr für die außen liegende Abdichtung entsteht dadurch nicht. Bei Raumfugen kann sich die Temperaturverteilung aufgrund der Fugeneinlage aus Kunststoff zwar ungünstiger darstellen, eine Gefahr für die Abdichtung wird dadurch nicht gesehen, da die Produkte im Zuge der üblichen Eignungsprüfung längerfristig mit Temperaturen von bis zu 100 °C beaufschlagt werden.

3.3.3 Offene Bauweise

Für Tunnel in offener Bauweise sind Fugen unterhalb der Fahrbahn nach Richtzeichnung T Fug 1 und Fugen in Wänden und Decken nach Richtzeichnung T Fug 2 auszuführen [R 9].

Die Pressfugen werden planmäßig ohne Fugenöffnung hergestellt, daher können bei Brandeinwir-

kung keine Heißgase in die Fuge eindringen und das Fugenband beschädigen [6]. Geringe herstellungsbedingte Fugenöffnungen werden sich bei Brandeinwirkung infolge thermischer Ausdehnung schließen. Das Fugenband ist nach den Zeichnungen [R 9] in der erdseitigen Querschnittshälfte mindestens 30 cm von der Wand- bzw. Deckenoberfläche entfernt einzubauen. Von einer thermischen Unversehrtheit des Dehnfugenbandes kann ausgegangen werden, sofern ein Abstand des Dehnfugenbandes zur beflamten Tunneloberfläche von mindestens 10 cm eingehalten wird [6].

Bei Raumbanden wird durch die Fugeneinlage sichergestellt, dass keine Heißgase in die Fuge eindringen und das Fugenband beschädigen können [6]. Die Einbaulage für das Fugenband stellt sich wie bei den Pressfugen dar [R 9]. Bei Einhaltung eines Mindestabstandes zur beflamten Tunneloberfläche von mindestens 10 cm wird das Dehnfugenband unversehrt bleiben [6].

Die Erfüllung der Voraussetzung für die thermische Unversehrtheit der Dehnfugenbänder ist bei beiden Fugenarten aufgrund der bei dieser Bauweise üblichen Wand- bzw. Deckenstärken gegeben (siehe Kapitel 3.2.2).

3.3.4 Maschinelle Schildvortriebsverfahren

Bei einschaligen schildvorgetriebenen Tunneln wird die Dichtigkeit in den Tübbingfugen durch spezielle Dichtungsrahmen sichergestellt, die üblicherweise gebirgsseitig angeordnet werden. Bei Tübbing, die mit einer Brandschutzbekleidung versehen sind, ist auch der Dichtungsrahmen ausreichend vor Brandeinwirkung geschützt.

Bei Brandversuchen mit unbedeckten Tübbing wurden auf Höhe der gebirgsseitig angeordneten Dichtungsrahmen infolge Einwirkung der EBA-Kurve [R 10] je nach Tübbingdicke und Fugenausbildung Maximaltemperaturen in der Größenordnung von 50 °C bis 80 °C gemessen [9]. In [8] wird für den Dichtungsrahmen eine Temperatur von 50 °C als ungefährlich eingestuft. Die EBA-Kurve [R 10] weist gegenüber der Kurve nach den ZTV-ING Teil 5 [R 2] eine etwa doppelt so lange Dauer der Vollbrandphase auf (vgl. Bild 2-6). Für entsprechend gestaltete Fugen kann daher angenommen werden, dass sich bei Einwirkung der Brandkurve nach den ZTV-ING Teil 5 [R 2] eine Maximaltemperatur am Dichtungsrahmen einstellen wird, die sich im unteren Bereich der genannten Bandbreite befindet und der Dichtungsrahmen somit nicht beschädigt wird.

3.4 Konstruktiver Innenausbau

3.4.1 Allgemeines

Nach den ZTV-ING Teil 5 [R 2] werden bei Straßentunneln an den Innenausbau brandschutztechnische Anforderungen unabhängig von der Bauweise gestellt.

Für den Innenausbau dürfen nur Baustoffe der Baustoffklasse A (nicht brennbar) nach DIN 4102-1 [R 8a] verwendet werden, wobei die Baustoffklasse durch ein Prüfzeugnis einer anerkannten Materialprüfanstalt nachzuweisen ist [R 2]. Baustoffe, die diese Anforderung nicht erfüllen, sind durch zusätzliche Maßnahmen vor Brandeinwirkung zu schützen. Weiterhin dürfen durch Baustoffe bei Brandeinwirkung keine Stoffe freigesetzt werden, die das Bauwerk oder Personen schädigen.

3.4.2 Flucht- und Verbindungstüren

Flucht- und Verbindungstüren sollen in erster Linie die Selbstrettung der Tunnelnutzer im Brandfall gewährleisten. In diesem Zeitraum müssen sie Fluchtwege rauchfrei halten und die Brandausbreitung unterbinden.

Türen, die Brandabschnitte voneinander trennen, müssen daher der Feuerwiderstandsklasse T 90 gemäß DIN 4102-2 [R 8b] genügen [R 2]. Die Anforderung an die Feuerwiderstandsklasse bedeutet, dass ein Prototyp der Tür, bestehend aus mindestens zwei Probekörpern, bei Einwirkung der Einheits-Temperatur-Zeit-Kurve (siehe Kapitel 2.2.3) über eine Branddauer von mindestens 90 min seine Aufgabe, d. h. Raumabschluss, erfüllen muss. Die Anforderungen an den Raumabschluss sind für eine Tür (nichttragendes Bauteil) nach DIN 4102-2 [R 8b] folgendermaßen definiert:

- Die Erwärmung auf der dem Feuer abgekehrten Seite beträgt für jeden Messpunkt ≤ 180 K bzw. im Mittel ≤ 140 K.
- An keiner Stelle der dem Feuer abgekehrten Seite dürfen Flammen auftreten oder sich ein angehaltener Wattebausch entzünden.
- Die Tür darf unter ihrem Eigengewicht nicht zusammenbrechen.

Die für Straßentunnel geforderten Flucht- und Verbindungstüren unterscheiden sich hinsichtlich des Brand- und Rauchschutzes von denen im Hochbau [45]. Bisher liegen keine allgemeinen bauaufsichtlichen Zulassungen für Flucht- und Verbindungs-

türen in Straßentunneln vor und die für den Hochbau können nicht ohne weiteres übertragen werden [45]. Aus diesen Gründen ist derzeit der Nachweis der Verwendbarkeit von Flucht- und Verbindungstüren für den Einzelfall zu erbringen.

3.4.3 Kabel und Leitungen

Zum Schutz von Kabeln und Leitungen vor Brandeinwirkungen bzw. zur Verhinderung der Brandausbreitung auf Nachbarräume sind folgende Anforderungen umzusetzen [R 2]:

- für Längsverkabelungen:
 - Verlegung in Leerrohren,
 - Umhüllung mit Beton,
- Kabelschlitze:
 - geeignete Abdeckung,
- Durchführungen durch „feuerbeständige“ Bauteile, wie Decken und Wände:
 - geeignete Abdichtung.

3.4.4 Entwässerungsanlagen

In deutschen Straßentunneln werden üblicherweise Berg- und Fahrbahnwasser getrennt abgeleitet. Alle Entwässerungsanlagen werden durch eine hydraulische Berechnung dimensioniert.

Die Fahrbahnentwässerung besitzt im Regelfall folgende Bestandteile:

- Fahrbahnoberfläche mit Quer- und Längsneigung (Gradiente),
- Schlitzrinnen ggf. mit Hochbord,
- Entwässerungsleitungen,
- Schächte,
- ggf. Hebeanlagen und
- Gewässerschutzanlagen, wie Rückhaltebecken, Leichtflüssigkeitsabscheider u. a.

An die Fahrbahnentwässerung werden neben entwässerungstechnischen zusätzlich brandschutztechnische Anforderungen gestellt, da diese auslaufende brennbare Flüssigkeiten rasch ableiten soll und im Brandfall durch thermische Einwirkungen beansprucht wird. Daher werden in den ZTV-ING Teil 5 [R 2] folgende konstruktive Anforderungen gestellt:

- Schlitzrinnen, Rohre und Schächte entsprechen Baustoffklasse A (nicht brennbar) nach DIN 4102 [R 8a],
- Schlitzrinnen:
 - Mindestsohlgefälle 0,5 %,
 - Abschottung hinter jeder Abzweigung zur Längsentwässerungsleitung,
 - Anschlüsse an die Längsentwässerungsleitung über Siphon oder Schacht mit Tauchwand mit Höchstabstand von 50 m,
- Längsentwässerungsleitung:
 - Mindestdurchmesser 300 mm,
 - Mindestsohlgefälle 0,5 %,
- Schachtabdeckungen, tagwasserdicht und verriegelbar.

Die konstruktiven Anforderungen an die Entwässerungsanlagen sollen gewährleisten, dass austretende brennbare Flüssigkeiten rasch abgeführt werden und die Brandeinwirkung auf die Konstruktion auch im Falle eines havarierten Tanklastwagens durch die ZTV-ING-Kurve abgebildet werden kann (siehe Kapitel 2.2.1).

In Bild 3-8 ist beispielhaft die Detailausbildung der Fahrbahnentwässerung für einen Tunnel in offener Bauweise nach den RiZ-ING [R 9] dargestellt. In diesem Fall ist die Schlitzrinne über einen Siphon (siehe „gusseisernes Abflussrohr“ in Bild 3-8) an den Entwässerungsschacht und damit an die Längsentwässerungsleitung angeschlossen.

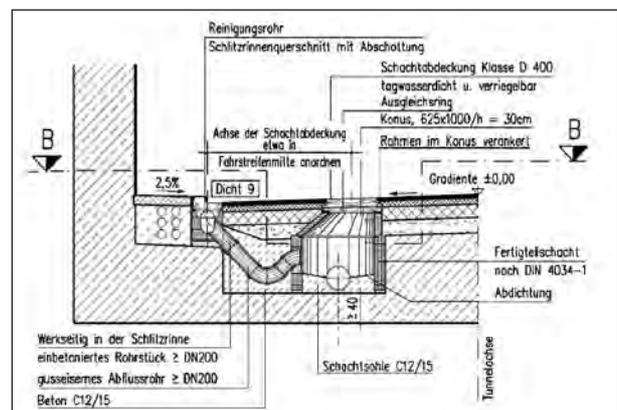


Bild 3-8: Tunnel in offener Bauweise, Schnitt durch die Fahrbahnentwässerung gem. T Was 1 [R 9]

3.5 Tunnelbetriebstechnik

3.5.1 Allgemeines

Die Anforderungen an die betriebstechnische Ausstattung von deutschen Straßentunneln sind in den „Richtlinien für die Ausstattung und den Betrieb von Straßentunneln“ (RABT) [R 5b] geregelt. Regelungen der RABT, die für das Vertragsverhältnis zwischen Auftragnehmer und Auftraggeber bei der Bauausführung von Bedeutung sind, sind in den ZTV-ING Teil 5 „Tunnelbau“ Abschnitt 4 „Betriebstechnische Ausstattung“ [R 2d] enthalten. Hierbei handelt es sich hauptsächlich um Materialanforderungen und Prüfungen.

3.5.2 Lüftungsanlage

3.5.2.1 Dimensionierung für den Brandfall

Die Dimensionierung der Lüftung für den Brandfall wird in den RABT [R 5b] behandelt. Der Dimensionierung ist demnach ein Lkw-Brand zugrunde zu legen. In Abhängigkeit der Lkw-Fahrleistung im Tunnel wird hierzu eine Bemessungsbrandleistung von mindestens 30 MW vorgegeben. Die Bemessungsbrandleistung ist in den RABT definiert als die Leistung, die während des gesamten Brandes nur für eine kurze Zeitdauer von wenigen Minuten erreicht oder überschritten wird. Bei höheren Lkw-Fahrleistungen (über 4.000 Lkw * km/Tag und Röhre) ist zu berücksichtigen, dass ein Brand auch mehrere Fahrzeuge erfassen kann. Hierdurch kann sich eine Steigerung der Bemessungsbrandleistung auf bis zu 100 MW ergeben.

3.5.2.2 Anlagenteile

Die in den RABT [R 5b] enthaltenen Anforderungen an die Temperaturfestigkeit von Absaugventilatoren und -klappen sowie Strahlventilatoren sind in Tabelle 3-2 zusammengestellt.

Anlagenteil	Temperatur [°C]	Dauer der Temperatureinwirkung [min]
Absaugventilatoren (Absaugung direkt aus Fahrraum)	400	90
Absaugventilatoren (Absaugkanal mit Betonwandung)	250	90
Strahlventilatoren (inkl. Anschlüsse, Zuleitungen im Fahrraum)	250	90
Strahlventilatoren (kurze Abstände o. > 30 MW)	≤ 400	90

Tab. 3-2: Anforderungen an die Temperaturfestigkeit der Lüftungsanlage nach den RABT [R 5b]

In den ZTV-ING Teil 5 Abschnitt 4 [R 2d] wird für die Regelfälle der Anwendung von Strahlventilatoren und Rauchabsaugklappen ein Funktionserhalt unter Wärmebelastung gefordert. Strahlventilatoren müssen demnach ihre Funktion unter Vorgabe einer Wärmebelastung von 250 °C ihre Funktion uneingeschränkt für mindestens 90 min erfüllen. Rauchabsaugklappen müssen unter einer Wärmebelastung von 400 °C mindestens 90 min uneingeschränkt funktionieren. Die Einhaltung dieser Anforderungen ist durch ein Prüfzeugnis einer anerkannten Materialprüfanstalt nachzuweisen.

3.5.3 Brandschottungen

Nach den ZTV-ING Teil 5 Abschnitt 4 [R 2d] müssen Brandschottungen eine Feuerwiderstandsdauer von mindestens 90 min nach DIN 4102-12 [R 8c] aufweisen. Die Prüfzeugnisse einer amtlichen Materialprüfanstalt sind auf Verlangen vorzulegen. Zusätzlich muss eine allgemeine bauaufsichtliche Zulassung vorliegen.

3.5.4 Befestigungsmittel und Aufhängekonstruktionen

Für Befestigungsmittel im Beton werden in den ZTV-ING Materialanforderungen gestellt. In den ZTV-ING Teil 5 Abschnitt 4 [R 2d] wird zusätzlich gefordert, dass die erforderliche Tragfähigkeit und Einbindetiefe der Befestigungsmittel bzw. Verankerung auch für die Zustände bei und nach Brandeinwirkung nachgewiesen werden. Eine Konkretisierung der Brandeinwirkung erfolgt nicht. Hierzu ist anzumerken, dass an dieser Stelle eine Schnittstelle zur Tunnelkonstruktion vorliegt. Dübel zur Befestigung von Lüftern werden von den Herstellern nach der ZTV-ING-Kurve (siehe Bild 2-3) geprüft. Dübel zur Befestigung von Brandschutzplatten werden ebenfalls nach der ZTV-ING-Kurve geprüft.

Aufhängekonstruktionen werden zur Anbringung von Verkehrszeichen, Leuchten u. dgl. verwendet. An Aufhängekonstruktionen werden in den ZTV-ING Teil 5 Abschnitt 4 [R 2d] konstruktive Anforderungen gestellt. Der lichte Raum muss demnach im Brandfall vollständig frei bleiben und darf nicht durch abgestürzte oder herunterhängende Bau- und Anlagenteile eingeschränkt werden. Die Vorgabe, dass Strahlventilatoren durch Fangvorrichtungen zu sichern sind, resultiert hingegen nicht aus dem Brandfall, sondern aus dem Regelbetrieb.

4 Auswertung von Bränden und Brandversuchen in Tunneln

Schlussfolgerungen für den baulichen Brandschutz in deutschen Straßentunneln zu ziehen.

4.1 Brände

In Tabelle 4-1a/b wird ein Überblick über bedeutende Brände in Straßentunneln gegeben. Der Überblick soll dazu dienen, die dargestellten Ansätze für Brandkurven mit realen Bränden in Straßentunneln zu vergleichen und nach Einbeziehung der Ergebnisse von ausgewerteten Brandversuchen

Der Überblick in Tabelle 4-1a/b zeigt, dass bei den hier zusammengestellten größeren Bränden mit schwerwiegenden Auswirkungen am Ort der Brandentstehung stets ein oder mehrere Lkw oder seltener ein Bus vorhanden waren. Die hierdurch vorhandene Brandlast führte zu Branddauern von 24 min bis 4 Tagen. Bei Vorhandensein von einem bis zwei Lkw und/oder einem Bus am Ort der

Jahr	Tunnel u. Länge	Ort	Verursachende Fahrzeuge	Brandursache	Branddauer	Auswirkungen		
						Personen	Fahrzeuge	Bauwerk
1949	Holland 2.550 m	New York, USA	1 Lkw mit Kohlenstoffbisulfit	Herunterfallende Ladung	4 h	66 Verletzte	10 Lkw, 13 Pkw	Schwere Schäden 200 m
1968	Moorfleet 245 m	Hamburg, D	1 Lkw mit Kunststoff	Reifenbrand	1 h 30 min	Keine	1 Lkw-Anhänger	Schwere Schäden Decke 300 m ² , Schäden Wand u. Beleuchtung, Schließung einer Röhre 5 Mon.
1975	Guadarrama 3.330 m	Guadarrama, E	1 Lkw mit Kiefernharz	k. A.	2 h 45 min	Keine	1 Lkw	Schwere Schäden 210 m
1976	B6 430 m	Paris, F	1 Lkw mit Kunststoff	k. A.	1 h	12 Leichtverletzte	1 Lkw	Schäden 150 m
1978	Velsen 770 m	Velsen, NL	2 Lkw, 4 Pkw	Auffahrunfall	1 h 20 min	5 Tote, 5 Verletzte	2 Lkw, 4 Pkw	Schwere Schäden 30 m
1979	Nihonzaka 2.045 m	Shizuoka, JP	4 Lkw, 2 Pkw	Auffahrunfall	4 Tage	7 Tote, 2 Verletzte	127 Lkw, 46 Pkw	Schwere Schäden 1.100 m
1980	Kajiwara 740 m	JP	2 Lkw (davon 1 Lkw mit Farbe)	Kollision mit Tunnelwand u. Überschlag	1 h 20 min	1 Toter	2 Lkw	Schäden 280 m
1982	Caldecott 1.083 m	Oakland, USA	1 Pkw, 1 Bus, 1 Tanker mit Benzin	Auffahrunfall	2 h 40 min	7 Tote, 2 Verletzte	3 Lkw, 1 Bus, 4 Pkw	Schwere Schäden 580 m
1983	Frejus 12.868 m	Modane, F/I	1 Lkw mit Kunststoff	Getriebeschaden	1 h 50 min	Keine	1 Lkw	Schwere Schäden 200m
1984	Felbertauern 5.130 m	A	1 Bus	Blockierende Bremsen	1 h 30 min	Keine	1 Bus	Schäden an Decke u. Ausstattung 100 m
1984	Gotthard 16.321 m	Göschenen, CH	1 Lkw mit Kunststoff	Motorbrand	24 min	Keine	1 Lkw	Schwere Schäden 30 m
1987	Gumefens 340 m	Bern, CH	1 Lkw	Massenunfall	2 h	2 Tote	2 Lkw, 1 Van	Leichte Schäden
1993	Serra a Ripoli 442 m	Bologna, I	1 Pkw, 1 Lkw mit Papier	Kontrollverlust über Fahrzeug	2 h 30 min	4 Tote, 4 Verletzte	4 Lkw, 11 Pkw	Schwere Schäden an Innenschale
1993	Frejus 12.870 m	Modane, F/I	1 Lkw	Motorbrand	2 h	Keine	1 Lkw	k. A.
1994	Gotthard 16.322 m	Göschenen, CH	1 Sattelzug mit Fahrrädern	Blockierendes Rad	2 h	Keine	1 Sattelzug	Schwere Schäden an Decke, Fahrbahn u. Ausstattung 50 m, Schließung 2,5 Tage

k. A. = keine Angabe

Tab. 4-1a: Überblick über bedeutende Brände in Straßentunneln [1, 22, 46, R 14]

Jahr	Tunnel u. Länge	Ort	Verursachende Fahrzeuge	Brandursache	Branddauer	Auswirkungen		
						Personen	Fahrzeuge	Bauwerk
1994	Huguenot 4.000 m	Südafrika	1 Bus	Getriebebrand	1 h	1 Toter, 28 Verletzte	1 Bus	Schäden an Ausstattung
1995	Pfänder 6.719 m	A	1 Lkw, 1 Van, 1 Pkw	Kollision	1 h	3 Tote (bei Kollision)	1 Lkw, 1 Van, 1 Pkw	Schwere Schäden an Decke u. Ausstattung, Schließung 2,5 Tage
1996	Isola delle Femmine 150 m	Sizilien, I	1 Tanker mit Flüssiggas, 1 Kleinbus	Auffahrunfall	k. a.	5 Tote, 34 Verletzte	1 Tanker, 1 Kleinbus, 18 Pkw	Schäden an Innenschale u. Beleuchtung
1997	Gotthard 16.322 m	Göschenen, CH	1 Lkw (Pkw-Transporter)	Motorbrand	1 h 20 min	Keine	1 Lkw	Schwere Schäden 100 m
1999	Mt. Blanc 11.600 m	F/I	1 Lkw	Unbekannt	53 h	39 Tote	23 Lkw, 1 Klein-Lkw, 9 Pkw, 1 Krad	Schwere Schäden 900 m, Schließung 3 Jahre
1999	Tauern 6.400 m	A	Massenunfall	Auslaufen von Farbe u. Lack	15 h	12 Tote	16 Lkw, 24 Pkw	Schließung 3 Mon.
2000	Seljestads 1.272 m	N	Massenunfall	Motorbrand	45 min	6 Verletzte	1 Lkw, 6 Pkw, 1 Krad	Schwere Schäden
2001	Gotthard 16.322 m	Göschenen, CH	2 Lkw	Kollision	2 Tage	11 Tote	13 Lkw, 10 Pkw	Schwere Schäden 230 m, weitere Schäden 700 m, Schließung 2 Mon.
2005	Frejus 12.900 m	Modane, F/I	1 Lkw beladen mit Reifen	Motorbrand	k. a.	2 Tote, 21 Verletzte	4 Lkw	Schäden an Ausstattung auf 10 km
2006	Viamala 760 m	Thusis, CH	1 Pkw, 1 Bus	Kollision	1 h 20 min	9 Tote	1 Reisebus, 2 Pkw	Schäden an Elektroinstallation, Schließung 9 Tage

k. A. = keine Angabe

Tab. 4-1b: Überblick über bedeutende Brände in Straßentunneln [22, 32, 33, R14]

Brandentstehung betrug die Branddauer in der Mehrzahl der Fälle allerdings 1 h bis 2 h. Die Schwere der Brandauswirkungen scheint dabei nicht (primär) von der Art der Ladung abzuhängen (Gefahrgüter oder nicht als Gefahrgüter zu deklarierende Waren).

Weiterhin ist zu erkennen, dass sich bereits vor den verheerenden Bränden der jüngeren Vergangenheit Brände mit zum Teil schwerwiegenden Folgen für Menschen, Fahrzeuge und Tunnelbauwerk ereignet haben. In den Tunneln St. Gotthard, Frejus und Mt. Blanc (nicht in Tabelle 4-1a/b enthalten) haben sich bereits vor den Bränden der Jahre 1999 bis 2001 Brände ereignet, die nicht zu den später eingetretenen schwerwiegenden Auswirkungen führten.

4.2 Brandversuche

4.2.1 Ofenegg-Tunnel (CH)

4.2.1.1 Anlass und Zielsetzung

Die Eidgenössische Kommission für Sicherheitsmaßnahmen in Straßentunneln hat am 18. Oktober 1964 beschlossen, zur Abklärung von Fragestellungen im Zusammenhang mit Sicherheitsvorschriften in Straßentunneln Untersuchungen vorzunehmen. Die durchgeführten Versuche sind in einem Schlussbericht der Kommission [12] beschrieben. Die für die vorliegende tunnelbautechnische Fragestellung relevanten Informationen werden im Folgenden wiedergegeben.

Die Versuche sollten im Hinblick auf Brände von flüssigen Treibstoffen in Straßentunneln über folgende Fragen Aufschluss geben:

- Zeitliche Entwicklung der Lufttemperaturen und der Gaskonzentrationen (CO, CO₂, O₂),

- zeitliche und räumliche Entwicklung von Sichtverhältnissen, Rauch und Brandgasen,
- Einfluss des Ein- und Ausschaltens einer Lüftung bzw. einer stationären Löschanlage auf den Brandverlauf und
- effektive Löschmethoden und Löscheinsätze.

4.2.1.2 Versuchsobjekt

Die hierzu geplanten Versuche wurden im Mai 1965 im alten Bahntunnel „Ofenegg“ bei Wesen am Walensee durchgeführt. Der Versuchstunnel ist in einem Bogen trassiert, der in etwa von Osten nach Westen verläuft. Bogenradius und Längsneigung sind nicht bekannt. Der Versuchstunnel verfügt über ein Portal auf der Westseite. Das östliche Portal ist zugemauert. Die nutzbare Tunnellänge beträgt 189,25 m. Von Nordwesten, also vom Walensee her, binden zwei Fensterstollen in den Versuchstunnel ein. Der Versuchstunnel besitzt einen hufeisenförmigen Querschnitt mit einer Gesamtfläche von ca. 25,5 m² und einer lichten Fläche von ca. 23 m². Das Tunnelgewölbe ist teilweise gemauert, teilweise betoniert. Die maximale lichte Höhe beträgt 6,00 m und die Breite auf der Sohle 4,00 m (siehe Bild 4-1).

4.2.1.3 Versuchsdurchführung

Für die Versuchsdurchführung wurde auf der Tunnelsohle eine provisorische Lüftungsanlage installiert, die den Betrieb als Längs- oder Halbquerlüftung ermöglichte. Die Frischluftzufuhr erfolgte durch zwei Axialgebläse mit einer Nennleistung von je 20 m³/s.

Für die Aufnahme des Brandstoffes wurde zwischen den beiden Fensterstollen eine 25 m lange, 3,80 m breite und 0,40 m tiefe Betonwanne eingebaut. Der westliche Wannenrand befand sich 131,25 m vom Portal entfernt. Als Brandstoff wurde Reinbenzin verwendet, das in der nordwestlichen Wannenecke elektrisch gezündet wurde. Für die Aufnahme kleinerer Brandstoffmengen wurde die Wanne durch Lehmwälle entsprechend unterteilt. Über der Wanne wurde im Bereich des Tunnelscheitels eine behelfsmäßige „Berieselungsanlage“ montiert. Die Anlage wurde durch eine Motorpumpe mit einer Förderleistung von max. 30 l/s aus dem Walensee gespeist. Das durchgeführte Versuchsprogramm ist in Tabelle 4-2 zusammengestellt.

Im Versuchstunnel wurden insgesamt acht Messprofile eingerichtet. Davon befanden sich sechs zwischen dem westlichen Wannenrand und dem Portal, eines über der Betonwanne ein weiteres

Versuch Nr.	Datum	Benzinmenge [l]	Brandfläche [m ²]	Lüftung			„Berieselung“ Wasserzufuhr [l]
				System	Frischluftzufuhr [m ² /s]	Mittlere Luftgeschwindigkeit [m/s]	
Vorversuch	17.05.65	80	6,6	-	-	-	-
1	18.05.65	100	6,6	-	-	-	-
2	18.05.65			Halbquerlüftung	15	0,7	-
2a	20.05.65			Längslüftung	39	1,7	-
3	18.05.65	500	47,5	-	-	-	25.000
5	19.05.65			-	-	-	-
6	19.05.65			Halbquerlüftung	15	0,7	-
7a	21.05.65			Längslüftung	39	1,7	-
7	20.05.65			-	-	-	16.000 bis 17.000
9	21./22.05.65	1.000	95	-	-	-	-
10	28./29.05.65			Halbquerlüftung	6	0,3	-
11	24./25.05.65			-	-	-	18.000

- = Kein Einsatz

Tab. 4-2: Durchgeführtes Versuchsprogramm [12]

zwischen der Betonwanne und dem zugemauerten Portal. In ausgewählten Messprofilen wurden folgende Parameter registriert:

- Lufttemperaturen,
- CO-, CO₂-, O₂-Gehalt,
- Sichtverhältnisse,

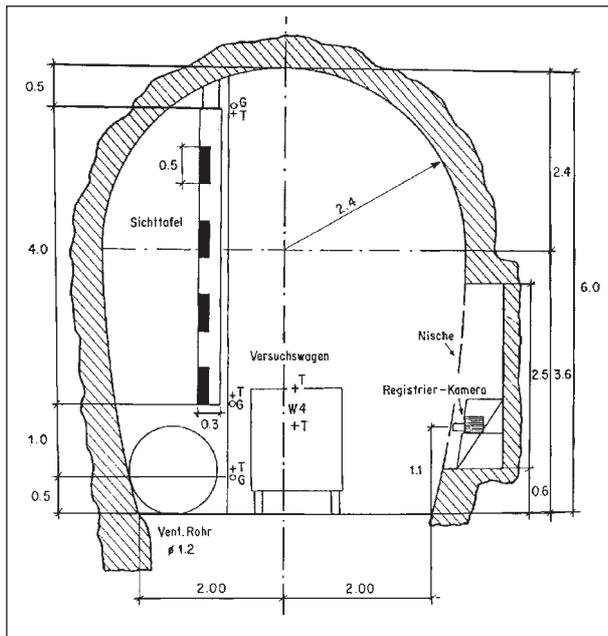


Bild 4-1: Tunnelquerschnitt bei Messprofil 1 mit: G = Gas-Probenahme-Stelle, T = Thermoelement, W4 = Versuchswagen Nr. 4 [12]

- Luftgeschwindigkeiten am Portal und
- Oberflächentemperatur des Tunnelscheitels.

Außerdem wurden zwischen der Betonwanne und dem Portal vier Versuchswagen (ausrangierte Pkw) sowie verschiedene Versuchsmaterialien (Holz, Fleisch, Haare, Stoffe) angeordnet. Bei den Versuchswagen wurden die Luft- und Oberflächentemperaturen und an den Versuchsmaterialien die Auswirkungen von Rauch- und Hitze ermittelt.

In Bild 4-1 sind die Querschnittsverhältnisse und Messeinrichtungen im Messprofil 1 dargestellt. Das Messprofil befindet sich 79,25 m vom westlichen Rand der Betonwanne und 52,25 m vom Portal entfernt.

4.2.1.4 Versuchsergebnisse

In Tabelle 4-3 sind ausgewählte Ergebnisse der Versuche, die Branddauer und die Maximaltemperaturen 0,5 m unter dem Scheitel, 0,5 m über der Sohle und an der Scheiteloberfläche einschließlich ihres Eintritts nach Brandbeginn, zusammengestellt. Als Zeitnullpunkt für alle Messungen wurde die Rückmeldung der Zündposten über den Brandbeginn gewählt. Hieraus resultieren die Zeitspannen für die Branddauern.

In den Bildern 4-2 bis 4-3 sind für den Versuch Nr. 9 die zeitliche Entwicklung der Lufttemperaturen im

Versuch Nr.	Branddauer [min]	Maximaltemperaturen								
		0,5 m unter Scheitel [°C]	Abstand zum westl. Wannennrand [m]	Eintritt nach [min]	0,5 m über Sohle [°C]	Abstand zum westl. Wannennrand [m]	Eintritt nach [min]	Scheiteloberfläche [°C]	Abstand zum westl. Wannennrand [m]	Eintritt nach [min]
1	2,5-3	720	0,8	2	270	0,8	2	120	11,6	2
2	3-4	755	0,8	2	330	0,8	1	150	11,6	3
2a	3-4	320	11,6	2	1.030	0,8	3	105	k. a.	k. a.
3	n. b.	960	0,8	2	275	0,8	2	150	-10,7	3
5	5-6	1.200	11,6	2	500	0,8	2	560	11,6	3
6	6-7	1.170	11,6	2	710	0,8	3	380	11,6	3
7a	3-4	1.310	0,8	1,5	ca. 1.000	0,8	2	640	11,6	2
7	n. b.	990	11,6	1	570	0,8	2	230	11,6	2
9	12-13	1.010	-10,7	0,5	510	0,8	1	770	11,6	6
10	13-14	880	11,6	6	k. A.	k. A.	k. A.	660	11,6	k. A.
11	n. b.	800	0,8	0,5	500	0,8	0,5	350	11,6	0

n. b. = nicht bestimmbar, k. A. = keine Angabe

Tab. 4-3: Maximaltemperaturen im Scheitel- und Sohlbereich sowie an der Scheiteloberfläche [12]

Messprofil 6 (Abstand zum westlichen Wannrand 0,8 m) und die zeitliche Entwicklung der Oberflächentemperaturen im Scheitel im Messprofil 5 (Abstand zum westlichen Wannrand 11,6 m) aufgetragen.

Zu den in Tabelle 4-3 und den Bildern 4-2 bis 4-3 angegebenen Branddauern ist anzumerken, dass damals unter den gegebenen Bedingungen keine direkte Beobachtung der Brände möglich war und daher auf Näherungen zurückgegriffen werden musste. Bei den Versuchen mit Berieselungsanlage (Versuche Nr. 3, 7 und 11) konnte keine Branddauer angegeben werden, da hier Gasschwaden nachzündeten (Angabe: n. b.). Bei Versuch Nr. 11 ereignete sich nach ca. 19 min eine so starke Verpuffung, dass die behelfsmäßige Lüftungsanlage beschädigt und drei Personen durch umherfliegende Trümmer verletzt wurden. Die behelfsmäßige Lüftungsanlage musste daraufhin repariert werden und stand für den Versuch Nr. 10 nur mit eingeschränkter Leistung zur Verfügung (siehe Tabelle 4-2). Nach den Ausführungen im Schlussbericht erfolgte die Ver-

brennung der Brandstoffmengen bis einschließlich 500 l nahezu vollständig, während bei den Versuchen mit 1.000 l Benzin größere Mengen Benzin und andere brennbare Rückstände zurückblieben. Dies spiegeln auch die in Tabelle 4-3 angegebenen Maximaltemperaturen wider. Bei den Versuchen mit 500 l Benzin wurden demnach Temperaturen von maximal 1.310 °C erreicht, während bei den Versuchen mit 1.000 l Benzin Temperaturen von maximal 1.010 °C gemessen wurden.

Die Ausführungen im Schlussbericht vermitteln teilweise den Eindruck von Unvollkommenheit bei Planung und Ausführung der Versuche. Dem ist jedoch entgegenzuhalten, dass die Versuche im Ofenegg-Tunnel als die ersten systematischen und großmaßstäblichen Versuche über Brände in Straßentunneln gelten können und zum damaligen Zeitpunkt hierzu kaum Erfahrungen verfügbar waren. Die Versuche im Ofenegg-Tunnel veranschaulichen die zu erwartenden Verhältnisse im Falle eines Flüssigkeitsbrandes in einem Tunnel. Insbesondere durch die Versuche mit 500 l und 1.000 l Benzin konnte der (heute bekannte) typische Brandverlauf in einem Tunnel mit den damit verbundenen Gefahren für Tunnelnutzer und Tunnelkonstruktion

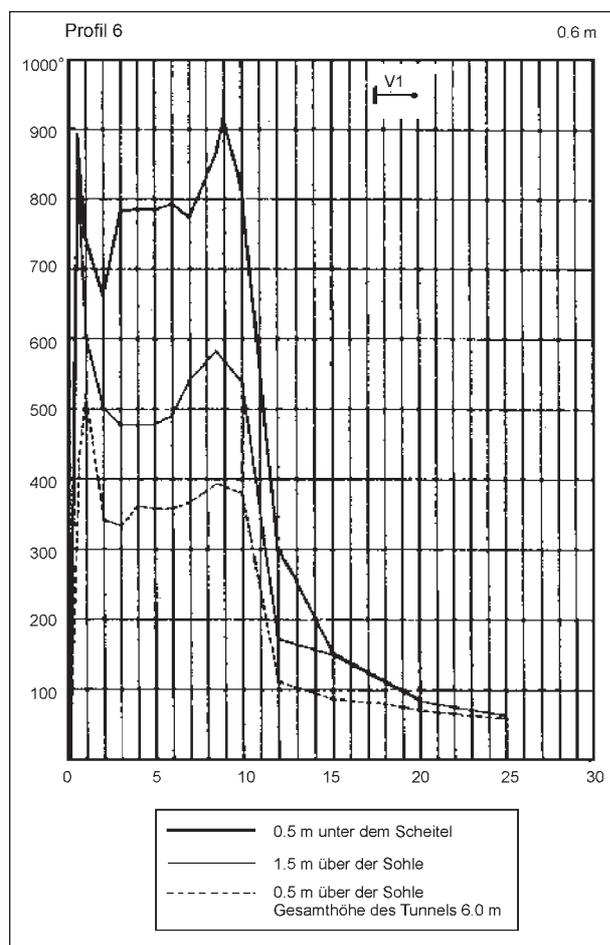


Bild 4-2: Zeitliche Entwicklung der Lufttemperaturen bei Versuch 9 [12]

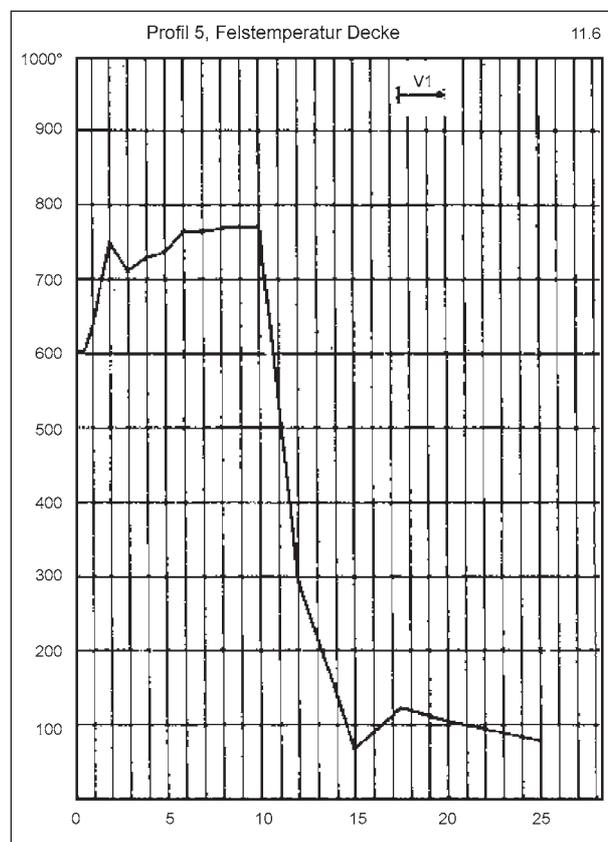


Bild 4-3: Zeitliche Entwicklung der Oberflächentemperaturen im Scheitel bei Versuch 9 [12]

beobachtet werden. Im Schlussbericht der Kommission wurde der Brandverlauf folgendermaßen charakterisiert:

- „Anfangsphase“: rasch ansteigende Temperaturen und Gaskonzentrationen, Dauer 1,5 min bis 2,5 min,
- „Mittelphase“: Gleichgewichtszustand zwischen zuströmender Frischluft und Brandintensität, Dauer von Benzinmenge abhängig, bei 1.000 l deutlich ausgeprägt,
- „Endphase“: rascher Temperaturabfall, Dauer 5 min bis 6 min.

Hinsichtlich der tunnelbautechnisch relevanten Parameter Temperatur und Branddauer kann aus heutiger Sicht den Ergebnissen in Tabelle 4-3 bzw. aus dem Schlussbericht entnommen werden, dass

- der Temperaturanstieg in Brandnähe am größten war,
- der Temperaturanstieg umso rascher erfolgte, je größer die Benzinmenge war. Am deutlichsten wurde dies bei der Steigerung von 500 l auf 1.000 l,
- Maximaltemperaturen 0,5 m unter dem Scheitel zwischen 320 °C und 1.310 °C, 0,5 m über der Sohle zwischen 270 °C und 1.030 °C und an der Scheiteloberfläche zwischen 105 °C und 770 °C gemessen wurden,
- die Temperaturmaxima im Scheitel- und im Sohlbereich innerhalb weniger Minuten eintraten,
- die Temperaturfront von 400 °C im Scheitelbereich kurzzeitig bis zum Portal hinaus vorstieß (Entfernung zum westlichen Wannrand 124 m),
- die Versuchsfahrzeuge mit Abständen von 4 m bis 5 m bzw. 10 m bis 11 m vom westlichen Wannrand ca. 1 min bis 3 min nach Zündung der Benzinmengen von 500 l bzw. 1.000 l zu brennen begannen. Zu Beginn der Fahrzeugbrände wurden Temperaturen von mind. 390 °C auf dem Dach und mind. 84 °C im Innern gemessen,
- der Brand der Versuchsfahrzeuge nach dem Abflauen des Wannbrandes einsetzte,
- die Temperaturen im rückwärtigen Teil des Versuchstunnels langsamer anstiegen und geringere Maximalwerte erreichten.

Im Schlussbericht wurde damals bereits auf die Fragestellung der Übertragbarkeit der Versuchser-

gebnisse auf Straßentunnel hingewiesen. Für den grundsätzlichen Brandverlauf und die Gas- und Temperaturentwicklung in Brandnähe wurde dies bejaht, wenngleich man sich auch der Bedeutung des jeweiligen Einzelfalles bewusst war. Die Einflussparameter auf einen Brand im Tunnel wurden aufgezeigt. Für die Abklärung der einzelnen Einflussparameter und die Gas- und Temperaturentwicklung in größerer Entfernung vom Brandherd wurde auf das Erfordernis weiterer Versuche verwiesen. Weiterhin wurden im Schlussbericht Überlegungen angestellt, wie die Abbrandgeschwindigkeit und damit die Branddauer in einem Tunnel berechnet werden könnten. Abschließend gab die Kommission im Schlussbericht Empfehlungen, um Treibstoffbränden in Tunneln vorzubeugen bzw. um deren Auswirkungen zu begrenzen.

4.2.2 Zwenberg-Tunnel (A)

4.2.2.1 Anlass und Zielsetzung

Das Bundesministerium für Bauten und Technik der Republik Österreich hat im Februar 1974 die Ingenieurgesellschaft Lässer-Feizlmayr (ILF) mit der Durchführung des Forschungsauftrages „Brandversuch in einem Tunnel“ beauftragt. Die Durchführung und Auswertung des Forschungsauftrages wurden in einem Forschungsbericht [13] zusammengestellt und veröffentlicht. Der Forschungsbericht wird im Weiteren mit Blick auf die vorliegende tunnelbautechnische Fragestellung ausgewertet.

Die Ziele des Forschungsauftrages sind in drei Themenblöcke zu untergliedern:

- Ermittlung der Auswirkungen eines Tunnelbrandes auf Menschen,
- Verbesserung der Selbst- und Fremdretrungsmöglichkeiten durch Optimierung der Tunnelkonstruktion und der Betriebsweise der Lüftung,
- Ermittlung der Auswirkungen eines Tunnelbrandes auf die Tunnelkonstruktion und Tunnelbetriebstechnik.

Der Schwerpunkt des Forschungsauftrages lag in der Abklärung der Frage, wie die bei einem Tunnelbrand entstehenden Verhältnisse durch die Lüftungsanlage beeinflusst werden können.

4.2.2.2 Versuchsobjekt

Als Versuchsobjekt wurde der stillgelegte Zwenberg-Tunnel der Österreichischen Bundesbahnen

bei Penk/Mölltal in Kärnten ausgewählt. Im Zeitraum Dezember 1974 bis Januar 1975 wurden insgesamt 30 Brandversuche durchgeführt.

Der Versuchstunnel befindet sich auf ca. 900 m Seehöhe. Er ist in nordwest-südöstlicher Richtung trassiert und weist auf seiner Länge von 390 m zwei Kurven mit Radien von 200 m auf. Der Versuchstunnel besitzt im Ulmenbereich beidseitig in Abständen von ca. 50 m 7 Nischen mit Abmessungen von 2 x 1 x 2 m (siehe Bild 4-5). Die Längsneigung steigt um 2,18 % vom Süd- zum Nordportal an. Das Nordportal liegt in einem steilen Felshang oberhalb des Zwenbergbaches, über den eine Brücke führt. Das Südportal liegt in der Nähe des Bahnhofes Penk ca. 30 m von der unter Verkehr befindlichen Trasse entfernt. Der Tunnelquerschnitt ist hufeisenförmig.

4.2.2.3 Versuchsdurchführung

Für die Durchführung des Versuchsprogramms wurden in größerem Umfang bauliche Veränderungen vorgenommen. Im Scheitelbereich wurde eine Zwischendecke mit Trennwand eingebaut. Von der ursprünglich vorhandenen Gesamtquerschnittsfläche von 24 m² entfielen anschließend je 2 m² auf den Frischluft- und den Abluftkanal und 20 m² auf den Verkehrsraum. Die Zwischendecke wurde im Brandherdbereich auf einer Länge von 50 m mit einem 3 cm starken Brandschutzputz versehen. Der Versuchstunnel wurde mit einer Lüftungsanlage ausgestattet, mit der die Systeme Querlüftung, Halbquerlüftung und Längslüftung simuliert werden konnten. Bei allen Versuchen ohne Längslüftung wurden der Verkehrsraum sowie der Frischluft- und Abluftkanal am Südportal durch eine Holzwand verschlossen. Die Förderleistung des Frischluft- und des Abluftventilators betrug 30 m³/s. Beide wurden beim Nordportal auf die dort verstärkte Zwischendecke gestellt und gegen die Kanalwände abgeschottet. Die Frischluft wurde in Abständen von 6 m in den Verkehrsraum eingeblasen. Hierfür wurden zwei Möglichkeiten realisiert:

1. Einblasung von „unten“ ca. 60 cm über dem Boden durch Sekundärkanäle aus Blech oder
2. nach teilweiser Entfernung der Sekundärkanäle auf Höhe der Konsole von „oben“.

Die Abluft wurde ebenfalls alle 6 m durch Ablufthauben abgeführt. Für die Versuche mit Längslüftung wurde vor dem Südportal ein weiterer Ventilator mit einer Förderleistung von 50 m³/s aufgestellt.

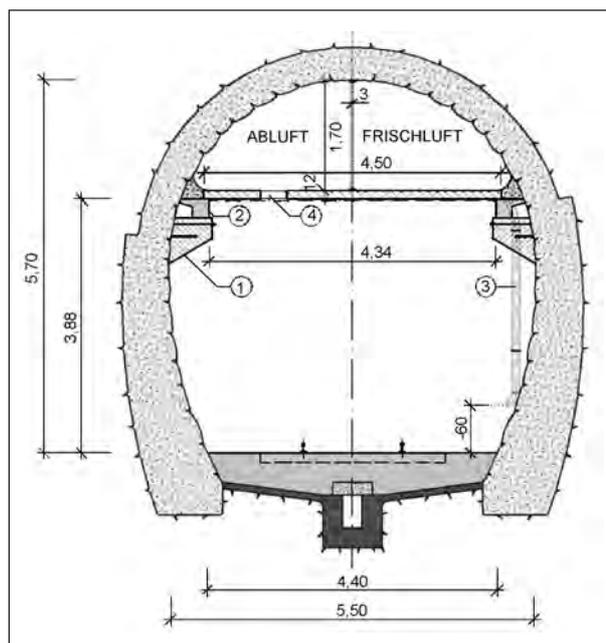


Bild 4-4: Querschnitt des Versuchstunnels außerhalb des Brandherds mit: 1 = Konsole, 2 = Fertigteilträger, 3 = Sekundärkanal, 4 = Abluftöffnung [13]

Zur Realisierung der geplanten maximalen Längsströmung im Tunnel von 7 m/s wurde mit diesem Ventilator ein Treibstrahl erzeugt, der durch einen 18 m langen Windkanal aus Holz geleitet wurde, wodurch die Förderleistung auf die erforderlichen 140 m³/s erhöht werden konnte. Bild 4-4 zeigt den Querschnitt des umgebauten Versuchstunnels außerhalb des Brandherds.

Der Brandherd wurde in einer Entfernung von 108 m vom Südportal eingerichtet (siehe Bild 4-5). In seiner Umgebung wurde die vorhandene Gleisanlage entfernt. Als Brandherd wurden vier Betonfertigteile mit Abmessungen von 6,0 x 1,3 m aufgestellt. Jedes Fertigteil besaß in Längsrichtung drei Wannen mit Abmessungen von jeweils 1,0 x 1,7 x 0,05 m (Fassungsvermögen je ca. 80 l). Die maximal zur Verfügung stehende Brandfläche betrug somit 20,4 m². Der Brandherd wurde von einem Tank im Bereich des Südportals über Versorgungsleitungen gespeist. Die Zündung erfolgte elektrisch von der Messbaracke aus.

Im Zwenberg-Tunnel wurden sieben Messquerschnitte installiert. Einen Überblick über die Anordnung der Messquerschnitte gibt Bild 4-5. Während der Versuche wurde in ausgewählten Messquerschnitten die zeitliche Entwicklung folgender Parameter erfasst:

- Rauch- und Lufttemperaturen,

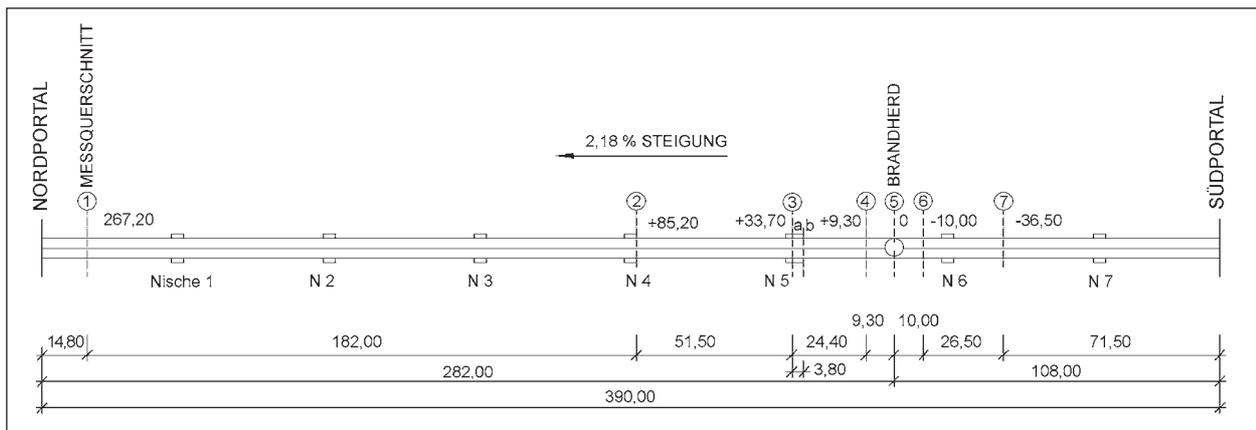


Bild 4-5: Anordnung der Messquerschnitte im Versuchstunnel [13]

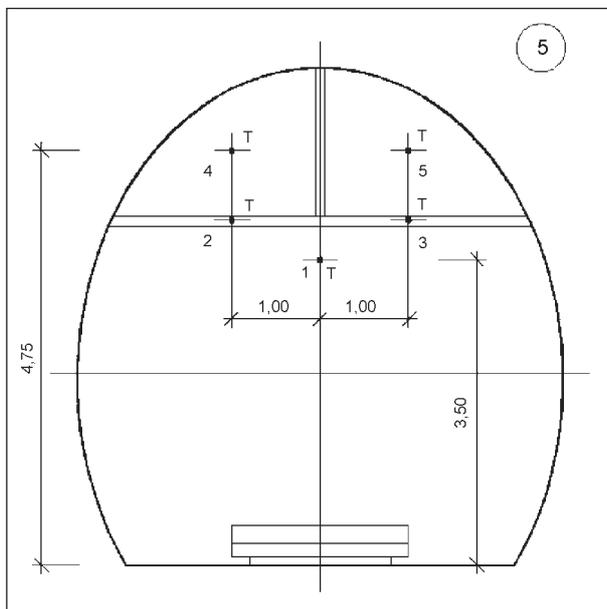


Bild 4-6: Messquerschnitt 5 [13]

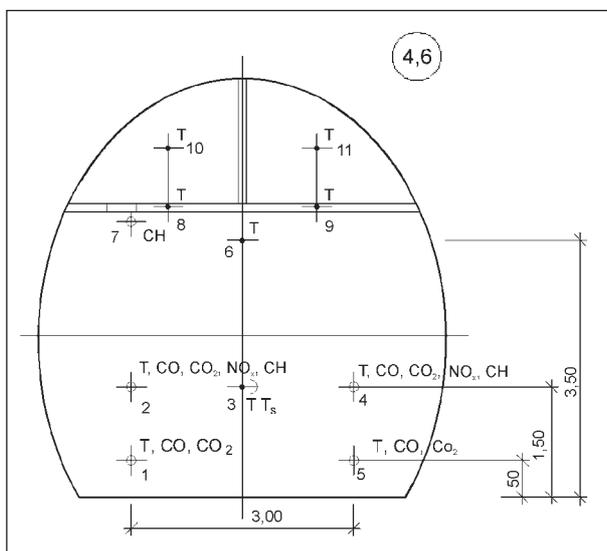


Bild 4-7: Messquerschnitte 4 und 6 [13]

- Luft- und Rauchgasgeschwindigkeiten,
- Ruß- und Rauchgaskonzentrationen (CO , CO_2 , O_2 , CH , NO_x) sowie
- Sichtverhältnisse.

In den Bildern 4-6 und 4-7 ist die Ausbildung der Messquerschnitte 4, 5 (Brandherd) und 6 dargestellt.

Die Temperaturmessungen wurden in sieben Messquerschnitten mit insgesamt 63 Messstellen durchgeführt. Die Messungen erfolgten mit NiCr-Ni-Thermoelementen, die je nach den zu erwartenden Temperaturen mit drei verschiedenen Umhüllungen ausgeführt wurden. Die einzelnen Thermoelemente waren über Ausgleichsleitungen mit Thermostaten verbunden, von denen in Sand verlegte Messkabel zur Messbaracke führten.

In die Planung der Versuchsdurchführung flossen die Erfahrungen mit den Versuchen im Ofenegg-Tunnel (siehe Kapitel 4.2.1) ein. Das Konzept für die aktuellen Versuche wurde so aufgebaut, dass sich mit kleinen Bränden an einen größeren Brand (sog. „Normbrand“) herangetastet wird. Zusätzlich wurde das Versuchsprogramm nach dem Ausschlussprinzip aufgebaut, ohne zunächst die Brandstoffmenge zu verändern. Die Auswirkungen auf die Tunnelkonstruktion und Tunnelbetriebstechnik wurden am Ende der Versuchsreihe untersucht. Dieses Vorgehen besaß den Vorteil, dass der Versuchsumfang auf das wirtschaftlich vertretbare Maß beschränkt und das Risiko einer vorzeitigen Zerstörung der Versuchseinrichtung verringert wurde.

Im Rahmen des Forschungsauftrages wurden alle Versuche durch Ordnungsnummern, anhand derer die Kombination der variablen Parameter

- Ort der Frischlufteinblasung,
- Frischluft- und Abluftmenge,
- aufgezwungene Längsströmung sowie

Ort der Frischlufteinblasung U = unten O = oben X = keine Einblasung	Abluftleistung 1 = Nennleistung (30 m ² /s)	Frischlufleistung 1 = Nennleistung (30 m ² /s)	Künstlich erzeugte Längsströmung [m/s]	Verkehrsraum F = Frei A = Attrappen
U	1	1	7	F

Tab. 4-4: Erläuterung der Ordnungsnummern [13]

- Versperrung des Verkehrsraumes durch maßstabsgerechte Attrappen für Pkw und Lkw,

rasch ableitbar ist, gekennzeichnet. Die Systematik der Ordnungsnummern wird in Tabelle 4-4 an einem Beispiel erläutert.

Das durchgeführte Versuchsprogramm gibt Tabelle 4-5 wieder. Für die tunnelbautechnische Fragestellung relevante Ergebnisse sind in Tabelle 4-6 zusammengestellt. Zur besseren Nachvollziehbarkeit des Versuchsprogramms und der Ergebnisse werden im Folgenden einige Erläuterungen zur Versuchsdurchführung gegeben.

Versuch Nr.	Datum	Brandstoffmenge	Einblasung	Abluftleistung	Frischlufleistung	Künstl. Längsströmung [m/s]	Attrappen	Ordnungsnummer			
101	08.12.74	100 l Benzin	Unten	Voll	Voll	7	Ohne	U-1-1-7-F			
102	08.12.74	2,5				U-1-1-2,5-F					
103	09.12.74	0				U-1-1-0-F					
104	10.12.74	200 l Benzin	Keine	Voll	1/3	0	Ohne	U-1-1/3-0-F			
105	10.12.74					0		X-1-0-0-F			
106	11.12.74		Oben	1/3	0	O-1-1/3-0-F					
107	11.12.74		Oben	Voll	0	O-1-1-0-F					
203	01.09.75	200 l Benzin	Unten	Voll	1/3	0	Mit	U-1-1-0-A			
204	10.01.75		Keine			0		0	X-1-0-0-A		
205	10.01.75		Unten	0	Voll	0		U-0-1-0-A			
208	11.01.75		Keine	0	0	4		X-0-0-4-A			
213	11.01.75		Keine	0	0	2		X-0-0-2-A			
212	12.01.75		Keine	0	0	0		X-0-0-0-A			
214	13.01.75		Keine	0	0	0		X-0-0-0-A			
2000	13.01.75		2 m ³ Holz + 6 Pkw-Reifen	Unten	0	Voll		0	Mit	U-0-1-0-A	
209	14.01.75	200 l Benzin	Unten	Voll	Voll	2	Mit	U-1-1-2-A			
210	14.01.75					1/3		2	U-1-1/3-2-A		
211	15.01.75		Oben	Voll	Voll	2	Ohne	U-1-1-2-F			
215	16.01.75					0		0	O-1-1-2-F		
216	17.01.75					0		0	O-0-1-0-A		
207	17.01.75			Voll	1/3	0	0	Mit	O-1-1-0-A		
206	18.01.75								0	0	O-1-1/3-0-A
217	18.01.75								0	0	O-0-1/3-0-A
218	20.01.75		Keine	Voll	0	2	Mit	O-1-1/3-2-A			
219	20.01.75							0	2	X-1-0-2-A	
220	21.01.75		200 l Diesel	Keine	Voll	0	0	Mit	X-1-0-0-A		
221	21.01.75		200 l Benzin	Keine	Voll	0	2	Mit	X-1*-0-2-A		
301	22.01.75	400 l Benzin	Keine	Voll	0	0	Mit	X-1-0-0-A			
302	23.01.75							Oben	Voll	1/3	0
303	23.01.75		0	0	O-0-1/3-0-A						

Tab. 4-5: Durchgeführtes Versuchsprogramm [13]

Bei den Versuchen 101 und 102 handelte es sich um Vorversuche zum Test von Versuchseinrichtungen und Mannschaft sowie zur Festlegung des sogenannten „Normbrandes“ im Rahmen der Serie 100. Bei den Vorversuchen wurde die Brandstoffmenge von 100 l bzw. 200 l auf 4 Wannen aufgeteilt, sodass die Brandfläche jeweils 6,8 m² betrug. Für Versuch 102 ergibt sich eine Brandflächenbelegung von 29,4 l/m², die während des gesamten Versuchsprogramms beibehalten wurde.

Im Rahmen der Serie 200 wurde zusätzlich untersucht, welchen Einfluss eine Behinderung der Strömungsverhältnisse im Verkehrsraum auf die zu erfassenden Parameter besitzt. Hierzu wurden Pkw- und Lkw-Attrappen aus Hartfaserplatten angefertigt und in größerer Entfernung vom Brandherd mittels Rundeisens an der Zwischendecke aufgehängt. Zur Ermittlung der Abmessungen der Attrappen wurde ein Maßstabsfaktor verwendet. Hierzu wurde die Querschnittsfläche des Verkehrsraums im Ver-

Versuch Nr.	Ordnungsnummer	Branddauer [s]	Maximaltemperaturen								
			0,5 m über dem Boden		0,4 m unter der Zwischendecke		Bewehrung der Zwischendecke		Abluftkanal		
			[°C]	MQ	[°C]	MQ	[°C]	MQ	[°C]	MQ	
101	U-1-1-7-F	340	Nicht auswertbar								
102	U-1-1-2,5-F	430	Nicht auswertbar								
103	U-1-1-0-F	500	258	4	904	5	13	3a, 5	124	3a	
104	U-1-1/3-0-F	420	147		1.240		16	4	183	5	
105	X-1-0-0-F	400	132		1.320		19	5	150-180	2-6	
106	O-1-1/3-0-F	440	142		1.222		15	6, 7	Vgl. Nr. 105		
107	O-1-1-0-F	620	156		1.080		24	5	150	2-4	
203	U-1-1-0-A	530	200		856		24		Vgl. Nr. 103		
204	U-1-1/3-0-F	530	140		1.118		24		172	5	
205	X-1-0-0-A	425	150		1.254		38		Vgl. Nr. 105		
206	O-1-1-0-A	455	137		1.318		32		keine Angabe		
207	O-1-1/3-0-A	670	176		1.134		34		keine Angabe		
208	U-0-1-0-A	625	268		822		36		40	3a-7	
209	U-1-1-2-A	450	358		663		24		80	2	
210	U-1-1/3-2-A	480	298		563		26		4, 3a	Vgl. Nr. 209	
211	U-1-1-2-F	500	308		670		25		6	Vgl. Nr. 209	
212	X-0-0-2-A	500	340		623		26		5	80	3
213	X-0-0-4-A	480	312		312		29		3a	58	2
214	X-0-0-0-A	550	240	1.000	28	107	3a				
215	O-1-1-2-F	500	268	612	24	4	20		5		
216	O-0-1-0-A	590	483	893	28	3a	96		5		
217	O-0-1/3-0-A	680	210	1.165	46	5	keine Angabe				
218	O-1-1/3-2-A	540	336	623	26		92	2			
219	X-1-0-2-A	540	336	675	26		5	120-130	2-6		
220	X-1-0-0-A	780	76	723	25		118-132	2-6			
221	X-1*-0-2-A	530	320	643	28		160	2, 3a			
301	X-1-0-0-A	520	989	1.332	72		5	217	3a		
302	O-1-1/3-0-A	620	330	1.320	104		5	220	3a		
303	O-0-1/3-0-A	500	1.020	1.330	100		5	124	4		
2000	U-0-1-0-A	Ca. 3 h	Nicht auswertbar								

Tab. 4-6: Maximaltemperaturen [13]

suchstunnel zu dem Wert von 50 m^2 , die in einem Straßentunnel üblich sind, ins Verhältnis gesetzt. Hierdurch ergaben sich Attrappenflächen (Höhe x Breite) von $0,95 \times 0,95 \text{ m}$ für Pkw und von $2,85 \times 1,58 \text{ m}$ für Lkw.

Beim Versuch 2000 wurden die Strömungsverhältnisse durch Angehörige der Mannschaft visuell untersucht. Zur Ausschaltung der Explosionsgefahr wurden 2 m^3 Holz, 6 Pkw-Reifen und $0,5 \text{ m}^3$ Sägemehl durch 1 bis 2 l Benzin entzündet. Bei diesem Versuch erfolgte keine messtechnische Erfassung.

Bei der Serie 300 sollten die Kombinationen des Lüftungsbetriebs, mit denen zuvor die günstigsten Verhältnisse im Verkehrsraum erzielt wurden, bei größeren Brandstoffmengen überprüft werden. Hierzu wurde die Brandstoffmenge auf 400 l erhöht. Die Brandfläche betrug $13,6 \text{ m}^2$. Vor dem Versuch 302 wurde der Brandschutzputz im Bereich der Temperaturmessstellen der Messquerschnitte 4, 5 und 6 auf einer Fläche von jeweils 1 m^2 entfernt, um die Auswirkungen des Brandes auf die ungeschützte Zwischendecke feststellen zu können.

4.2.2.4 Versuchsergebnisse

Im Forschungsbericht wurden die Temperaturmessungen schwerpunktmäßig für den Boden-Kopf-Bereich innerhalb des Verkehrsraumes aufgetragen und ausgewertet. Diese Schwerpunktsetzung wurde vorgenommen, da die hauptsächliche Zielstellung des Forschungsauftrages in der Verbesserung der Verhältnisse für die Selbst- und Fremddretung lag.

Im Rahmen der Versuche wurden ca. 2.000 Temperatur-Zeit-Verläufe aufgezeichnet. Je nach Lage der Temperaturmessstellen haben sich dabei zwei Kurvenformen als charakteristisch abgezeichnet, die in Bild 4-8 dargestellt sind. Für alle frei angebrachten Temperaturmessstellen hat sich „Kurve 1“ mit einem ausgeprägten Maximum als charakteristisch herausgestellt. Für alle in Schutzröhrchen, Dosen, Fässern oder in der Zwischendecke installierten Temperaturmessstellen hat sich „Kurve 2“ als charakteristisch ergeben. „Kurve 2“ lässt in ihrem Verlauf gegenüber „Kurve 1“ einen zeitlich verzögerten Aufheizvorgang erkennen.

Im Forschungsbericht wird der zeitliche Ablauf der Benzinbrände beschrieben. Die Versuche zeigen demnach mit hoher Reproduzierbarkeit, dass der Benzinflächenbrand nach ca. 25 s voll entwickelt ist. Die Temperatur steigt im unmittelbaren Brand-

bereich steil an und erreicht ihre Maximalwerte nach 110 s bis 140 s, durchschnittlich 2 min nach Brandbeginn. Mit zunehmender Entfernung vom Brandherd erfolgt der Temperaturanstieg verzögert.

Zur Verdeutlichung der Auswirkung der Versuche auf die Tunnelkonstruktion und Tunnelbetriebstechnik sind in den Bildern 4-9, 4-10 und 4-11 exemplarisch Temperatur-Zeit-Verläufe für den Bereich unter der Zwischendecke, die Bewehrung der Zwischendecke und den Abluftkanal dargestellt.

Die maximalen Temperaturen an den einzelnen Bauteilen wurden bei den Versuchen der Serie 300, d. h. bei den Versuchen mit 400 l Benzin, ermittelt.

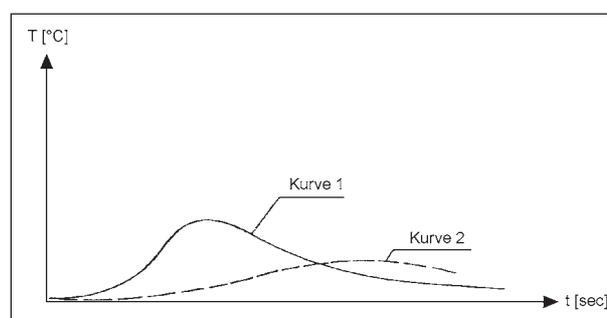


Bild 4-8: Charakteristische Temperatur-Zeit-Verläufe [13]

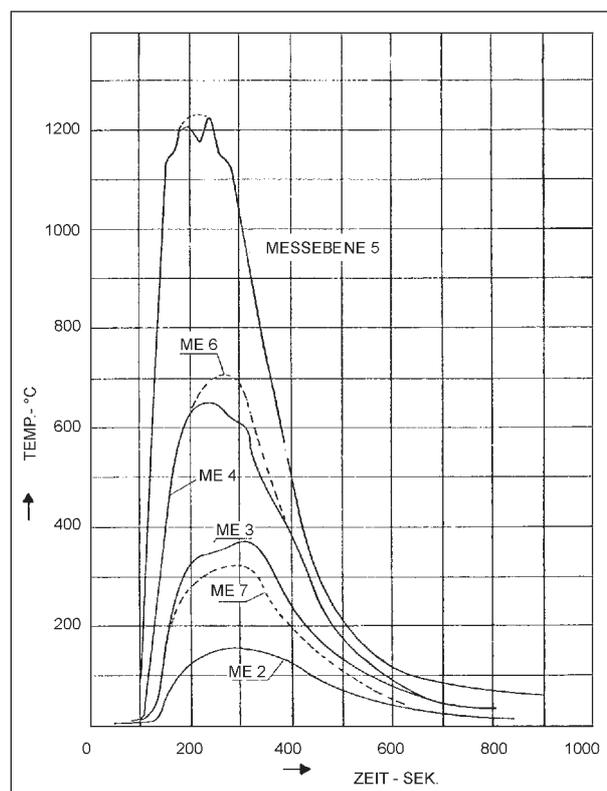


Bild 4-9: Temperaturverläufe unter der Zwischendecke in den Messquerschnitten 2 bis 7 bei Versuch 106 [13]

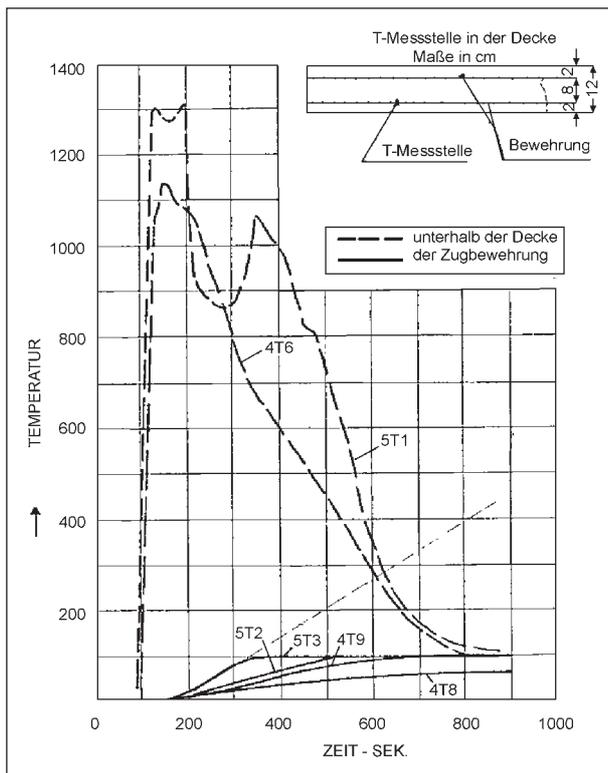


Bild 4-10: Temperaturverläufe unter der Zwischendecke und für deren Bewehrung in den Messquerschnitten 4 (4T6, 4T8, 4T9) und 5 (5T1, 5T2, 5T3) bei Versuch 302 [13]

Sie stellen sich laut Tabelle 4-6 folgendermaßen dar:

- Boden max. 1.020 °C bei Versuch 303,
- Zwischendecke max. 1.332 °C bei Versuch 301,
- Bewehrung der Zwischendecke max. 104 °C bei Versuch 302,
- Abluftkanal max. 220 °C bei Versuch 302.

Die genannten Maximaltemperaturen haben sich jeweils über dem Brandherd (MQ 5) oder in seiner Nähe (MQ 4, 3a) eingestellt. Die Maximaltemperatur am Abluftventilator (MQ 1) ist mit 88 °C bei Versuch 301 zu ergänzen.

Unterhalb der Zwischendecke werden bereits bei den Versuchen 104, 105, 106, 205, 206 mit 200 l Benzin maximale Temperaturen in der Größenordnung von 1.200 °C bis 1.300 °C erreicht (siehe Tabelle 4-6). Allerdings weisen die Versuche mit 200 l Benzin eine um etwa 50 s bis 220 s kürzere Branddauer auf als die mit 400 l. Die Versuche 205 und 301 weisen vergleichbare Lüftungsbedingungen auf und unterscheiden sich daher nur in der Brandstoffmenge. Versuch 105 und Versuch 205 sind ebenfalls vergleichbar. Deren Versuchsbedingun-

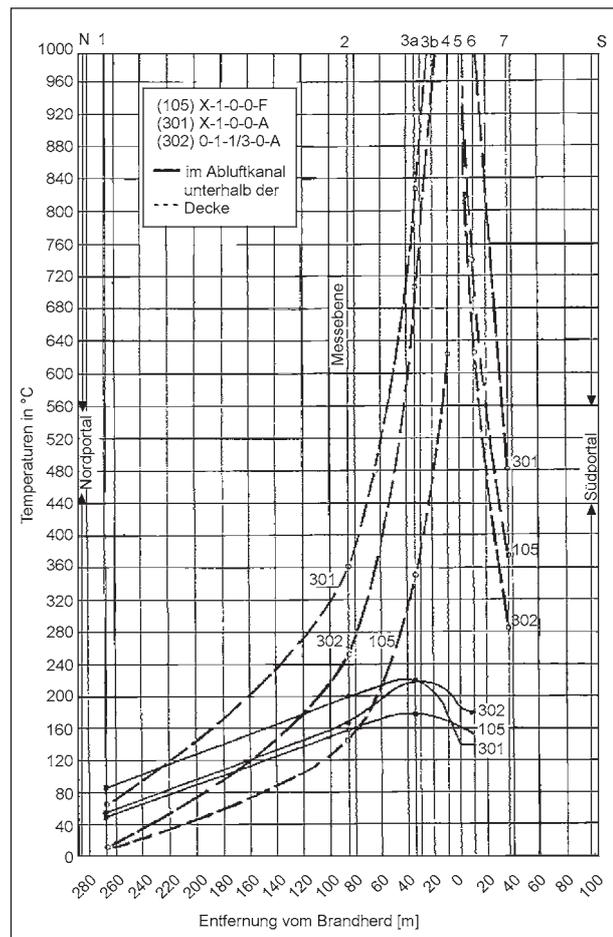


Bild 4-11: Temperaturverläufe im Abluftkanal und unter der Zwischendecke bei den Versuchen 105, 301, 302 [13]

gen unterscheiden sich lediglich in der Anordnung von Attrappen im Verkehrsraum. Die Versuche 106 und 302 sind ebenfalls hinsichtlich der Lüftungsbedingungen vergleichbar. Versuch 302 besitzt gegenüber 106 außer der doppelten Brennstoffmenge zusätzlich Attrappen im Verkehrsraum. Für die Versuche 104 und 206 fallen nicht sofort derartige Analogien auf. Bei allen Versuchen mit Maximaltemperaturen von mind. 1.200 °C unter der Zwischendecke wurde keine künstliche Längsströmung erzeugt. Der Vergleich zeigt, dass bei einem Brand unterschiedlicher Benzinmengen im selben Tunnel bei vergleichbaren Lüftungsbedingungen unter der Zwischendecke Temperaturen der gleichen Größenordnung auftreten können. Unterschiede sind hinsichtlich der Branddauer zu erwarten.

Die Auswirkungen der Versuche auf die Bau- und Betriebstechnik waren entgegen den ursprünglichen Erwartungen gering. Ab dem Versuch 103 wurden drei im Brandherdbereich befindliche Sekundärkanäle für die Lüftung mit Asbestplatten ge-

schützt. Der Brandschutzputz musste an mehreren Stellen ausgebessert werden. Bei der Serie 300 stellten sich deutlichere Schäden am Brandschutzputz der Zwischendecke ein. Bei Versuch 301 wurden 20 % der Putzfläche beschädigt und anschließend ausgebessert. Nach Versuch 303 war in den Bereichen ohne Brandschutzputz der Beton lokal in Tiefen von 1 cm bis 2 cm abgesprengt, sodass teilweise die Bewehrung (nom $c = 2$ cm) sichtbar wurde. Weiterhin wurden infolge des Versuches Nr. 303 die Abluftöffnungen im Brandherdbereich auf einer Länge von 15 m stark deformiert. Aus den Temperatur-Zeit-Verläufen in den Bildern 4-9 bis 4-11 und den Angaben der Branddauern in Tabelle 4-6 kann geschlussfolgert werden, dass als Ursache hierfür die kurze Einwirkdauer der Benzinbrände zu sehen ist.

Bei den Versuchen im Ofenegg-Tunnel haben sich die Versuchsfahrzeuge bei Oberflächentemperaturen von mind. 390 °C entzündet (siehe Kapitel 4.2.1). Bei den Versuchen mit 200 l hat sich diese Temperaturfront im Verkehrsraum ausgehend vom Brandherd bis ca. 34 m (MQ 3a) in Richtung Nordportal und bis ca. 10 m (MQ 6) in Richtung Südportal ausgebreitet. Bei den Versuchen mit 400 l betrug die Ausdehnung bis ca. 34 m Richtung Nordportal und bis ca. 37 m Richtung Südportal (MQ 7).

4.2.3 PWRI-Versuche (JP)

Das japanische Public Works Research Institute (PWRI) führte 1980 insgesamt 16 Versuche in einem speziellen 700 m langen Versuchstunnel und acht Versuche in einem 3.277 m langen Straßentunnel durch [22, 31]. Das Ziel der großmaßstäblichen Untersuchungen bestand hauptsächlich in der Ermittlung des Einflusses von Sprinkleranlagen auf die Brandentwicklung. Hierzu wurden mit Benzin gefüllte Wannen mit einer Oberfläche von 4 m² bzw. 6 m², sechs Pkw und sechs Busse entzündet. Während der Versuche wurden Temperaturen, Luftgeschwindigkeit, Gaskonzentrationen, Rauchausbreitung und Wärmestrahlung sowohl bei natürlicher Lüftung als auch bei aktivierter Längslüftung gemessen. Eine nennenswerte Temperaturerhöhung wurde lediglich in der Nähe des Brandherdes beobachtet. In [18] wurde die maximale Brandleistung eines Busbrandes mit 30 MW abgeschätzt, die innerhalb von 7 min erreicht wurde. Weitere für die Fragestellung relevante Ergebnisse liegen nicht vor.

4.2.4 Repparfjord-Tunnel (N)

4.2.4.1 Anlass und Zielsetzung

In den 1970er und 1980er Jahren nahmen in Europa die Anzahl und die Länge von Verkehrstunneln zu. Gleichzeitig wurden in diesem Zeitraum numerische Verfahren zur Berechnung des Trag- und Verformungsverhaltens von Tunneln unter Brandbeanspruchung und zur Brandausbreitung in Tunneln entwickelt. Aufgrund von Bränden mit Sach- und Personenschäden in Verkehrstunneln wurde es erforderlich, diese Verfahren zu vervollkommen und über die bisher durchgeführten Versuche hinaus experimentell abzusichern. Hierzu wurde vom Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz (iBMB) der TU Braunschweig ein Forschungsprojekt entwickelt, das mit Unterstützung der Studiengesellschaft für unterirdische Verkehrsanlagen e. V. (STUVA) aufgeweitet wurde. Im weiteren Verlauf entstand ab 1990 das europäische Kooperationsprojekt EUREKA PROJECT EU 499-Fires in Transport TUNNELS (FI-RETUN), an dem sich neben Deutschland Partner aus Finnland, Norwegen, Italien, Schweden, Österreich, der Schweiz, Frankreich und Großbritannien beteiligten. Im Rahmen dieses Projektes wurden zahlreiche Feld- und Laborversuche vorgenommen. Im Weiteren wird der Projektbericht [14] ausgewertet.

Das Kooperationsprojekt wurde konzipiert, um Informationen zu den folgenden Aspekten zu gewinnen:

- Brandablauf: zeitliche und räumliche Verteilung von Temperatur und Gasen, Abbrandraten, Brandleistung, Lüftungseinfluss,
- Möglichkeiten der Flucht, Rettung und Brandbekämpfung,
- Brandauswirkungen auf Bauteile: Wärmeübertragung Tunnel-Gestein, Brandkurven und Tragverhalten von Tunnelauskleidungssystemen,
- weitere Nutzung des Tragwerkes: Schäden, Resttragverhalten, Sanierungsmöglichkeiten,
- Theorieerweiterung: Grundsätze von Energie- und Massenbilanzen, Verbesserung von Rechenprogrammen zum Wärmehaushalt und zur Traglastberechnung,
- Bildung, Verteilung und Niederschlag von Schadstoffen.

4.2.4.2 Versuchsobjekt

Für den Großteil der Feldversuche wurde ein Versuchstunnel am Repparfjord in Nordnorwegen etwa 45 km südöstlich von Hammerfest ausgewählt. Der Versuchstunnel liegt etwa 200 km nördlich des Polarkreises auf einer Höhe von rund 200 m NN. Bei dem Versuchstunnel handelt es sich um einen Transportstollen auf dem Gelände eines ehemaligen Kupfertagebaues. Der Stollen verfügt über eine etwa in Nord-Süd-Richtung verlaufende Hauptröhre mit einer Länge von ca. 2,3 km. Die Hauptröhre besitzt durchgehend eine Längsneigung von weniger als 1 %. Ausgehend vom Nordportal zweigt in einer Entfernung von 863 m ein Seitenstollen ab. Am Südende der Hauptröhre befindet sich ein Schacht mit einer Querschnittsfläche von ca. 9 m². Die Hauptröhre besitzt ein Hufeisenprofil mit abgeflachter Decke. Die Querschnittsfläche variiert von ca. 30 m² bis ca. 38 m². Bild 4-12 gibt einen Überblick über die Ausdehnung des Stollens und seine Querschnittsabmessungen. Bild 4-13 zeigt die Schachtausbildung am Südende.

Der Stollen wurde im Fels aufgeföhren und besitzt unregelmäßige Wand- und Deckenoberflächen.

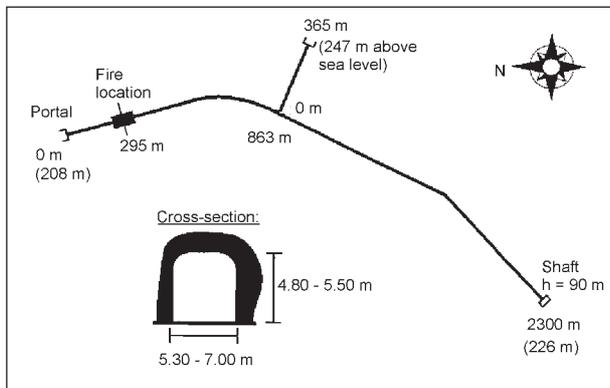


Bild 4-12: Grundriss und Querschnitt des Versuchstunnels [14]

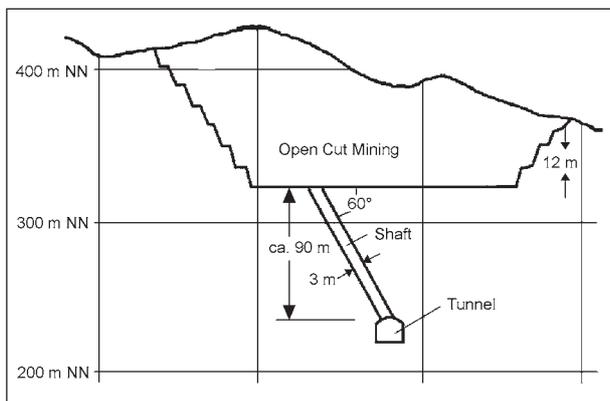


Bild 4-13: Schnitt durch den Tagebau im Schachtbereich [14]

Der Boden weist eine Betondecke auf. Einen Eindruck von den Querschnittsverhältnissen in der Hauptröhre vermitteln Bild 4-14 und Bild 4-15. Die Querschnitte sind nach der Aufstellung der Brandlast in der Hauptröhre stationiert (siehe Bild 4-12). Ausgehend von der Brandlast bei Station 0 m wird in Richtung des Schachtes am Südende positiv, in Richtung des Nordportals negativ gezählt.

4.2.4.3 Durchführung und Ergebnisse

4.2.4.3.1 Allgemeines

Zur Durchführung der Versuche wurden im Stollen bauliche Veränderungen vorgenommen. Die Brandlast wurde stets an der gleichen Position in der Hauptröhre 295 m vom Nordportal entfernt aufgebaut (siehe Bild 4-12). Zur Aufstellung der Mess-

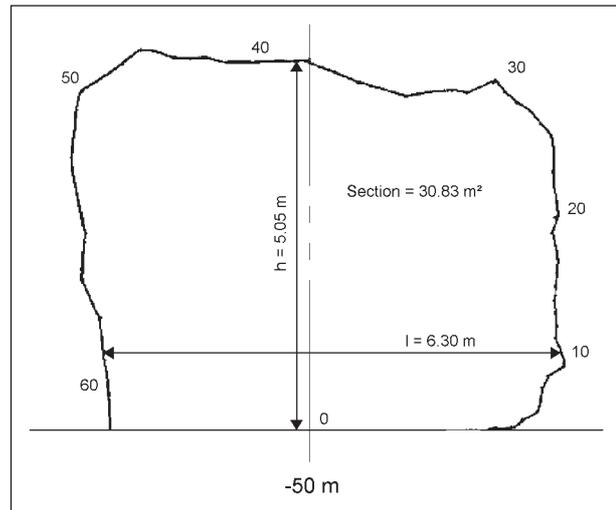


Bild 4-14: Querschnitt des Versuchstunnels bei Station -50 m [14]

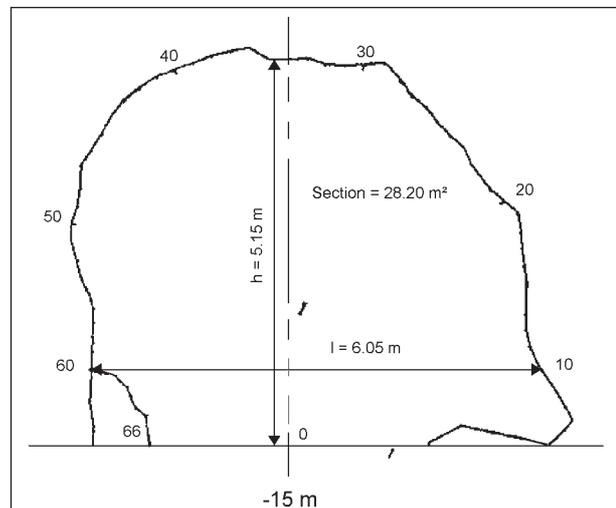


Bild 4-15: Querschnitt des Versuchstunnels bei Station -15 m [14]

container wurden mehrere Kammern ausgebrochen. Zum Schutz vor Brandeinwirkung wurde der Stollen von Station -35 m bis +50 m in einer Dicke von 15 cm bzw. 20 cm mit Stahlfaserspritzbeton ausgekleidet. Der Zugang zum Seitenstollen wurde bei den 1990 durchgeführten Versuchen offen gelassen, ab 1991 mit einer Plane und ab 1992 durch ein Tor verschlossen. Das in den Stollen durch Risse in Wand und Decke eintretende Wasser wurde in der Hauptröhre durch einen auf der Westseite angeordneten Kanal mit Kunststoffrohr abgeführt. Im Bereich der Kammern wurde der Kanal offen geführt. Die relative Luftfeuchtigkeit vor und nach den Versuchen war hoch und überstieg 80 % bis 95 %. In den Bereichen stärkerer Wasserzutritte wurden an Wänden und Decke Wellbleche befestigt. Im Zusammenhang mit Brandversuchen an Schienenfahrzeugen wurden im Bereich der Brandlast Kabel verlegt. An der östlichen Tunnelwand wurden zwischen -40 m und +10 m Kabel auf Stahlankern in Höhen von 0,5 m bis 4 m über dem Boden verlegt. An der westlichen Tunnelwand wurden von -25 m bis +25 m Kabel in Betonfertigteilen verlegt.

Für die Lüftung wurden zwei verschiedene Aufstellungen realisiert. Für die 1991 durchgeführten Versuche wurden drei gegenläufige Axialventilatoren mit je einem Schalldämpfer auf der Ansaug- und Ausblasseite eingesetzt. Die Ventilatorpaare wurden nebeneinander in ca. 2,5 m Höhe auf ein Gestell montiert, das vor jedem Versuch zur Station -265 m verfahren wurde. Durch die Ventilatorpaare mit einer Leistungsaufnahme von 2 x 15 kW bis 2 x 25 kW konnte im Stollen eine Luftströmung von max. 1 m/s erzeugt werden. Für die 1992 durchgeführten Versuche wurde das ausgetauschte Gebläse eines französischen Autobahntunnels verwendet. Das Gebläse wurde am Nordportal aufgestellt. Mit dem Gebläse konnten im Versuchstunnel auf Stufe 1 (Leistungsaufnahme 80 kW) Luftgeschwindigkeiten von ca. 3,5 m/s und auf der Stufe 2 (Leistungsaufnahme 380 kW) von ca. 7 m/s realisiert werden.

Die messtechnische Ausrüstung des Versuchstunnels wurde in den Versuchszeiträumen 1990, 1991 und 1992 jeweils unterschiedlich ausgeführt. Im Versuchszeitraum 1990 wurden das Messkonzept und die Funktion der Messinstrumente überprüft. Im Versuchszeitraum 1991 wurden die Messausrüstung komplettiert und erste Brandversuche mit Fahrzeugen durchgeführt. Im Versuchszeitraum 1992 erforderte die Einbeziehung weiterer EUREKA-

KA-Partner eine Ausweitung und Umstellung des Messkonzeptes. Von bestimmten Partnern wurden nun schwerpunktmäßig einzelne Tunnelabschnitte ausgerüstet, sodass der Versuchstunnel auf einer Länge von 1,8 km instrumentiert wurde. Im Bereich der Brandlast wurden die Messquerschnitte in Abständen von 10 m konzentriert, während in entfernteren Bereichen die Abstände auf 15 m, 20 m und darüber hinaus verringert wurden. Die folgenden Parameter wurden in ausgewählten Versuchen, Tunnelquerschnitten bzw. Bereichen messtechnisch erfasst:

- Temperatur,
- Gasgeschwindigkeit/-druck,
- Rauchdichte,
- Gaskonzentration (CO, CO₂, O₂, SO₂, C_nH_m, NO),
- Abbrandrate und
- Sichtverhältnisse.

Während eines Brandversuches kann durch kontinuierliche Erfassung des Masseverlustes die Abbrandrate ermittelt werden, mit Hilfe derer unter Berücksichtigung der Sauerstoffversorgung der Brandlast auf die Brandleistung geschlossen werden kann. Im Versuchszeitraum 1992 wurde der Masseverlust der Brandlast bei den Versuchen mit Holzkrippen und Mischbrandlasten durch eine Wiegebühne erfasst. Die Wiegebühne bestand aus zwei Stahlblechen, die an der Unterseite durch angeschraubte Stahlprofile ausgesteift waren. Die Bühne war auf drei Kraftmessdosen aufgelagert. Auf den Stahlplatten wurden 10 cm starke Porenbetonplatten verlegt, auf denen die Brandlasten aufgebaut wurden.

Im Versuchstunnel wurden von 1990 bis 1992 insgesamt 21 Brandversuche durchgeführt. Tabelle 4-7 gibt einen Überblick über die zeitliche Reihenfolge der Brandversuche, die Brandlasten, die Luftgeschwindigkeiten und die beteiligten EUREKA-Partner. Im Weiteren wird die Durchführung der Versuche geordnet nach den Brandlasten beschrieben und die für die vorliegende Fragestellung relevanten Ergebnisse mitgeteilt.

4.2.4.3.2 Versuche mit Holzkrippen

Für die Versuche wurden 1.534 kg (W11, W21), 962 kg (W31), 1.000 kg (W41) und 1.007 kg (W51) Fichtenholz verwendet. Die Brandlast variierte mit dem in

Zeile	Datum	Kurzbezeichnung	Brennbares Material		Luftgeschwindigkeit ²⁾ [m/s]	Federführende Partner ¹⁾	Beteiligte Partner ¹⁾	Bemerkungen
			Beschreibung	Brandlast [MJ]				
1	07.12.90	W11	Holzrippenbrand 1	27.500	0,3	D	-	
2	24.07.91	W21	Holzrippenbrand 2	27.500	0,3	D	-	
3	08.08.91	C11	Pkw	Ca. 6.000	0,3	D	-	
4	19.08.91	F31	U-Bahnwagen F3 (Stahl)	33.000	0,3	D	-	
5	29.08.91	F51	¹ / ₂ -Reisezugwagen F5	15.400	0,3	D	-	
6	04.09.91	F61	¹ / ₂ -Reisezugwagen F6	12.100	0,3	D	-	
7	23.08.92	B11	Bus	40.800	-0,3	D	A, S	Zusätzlich Erprobung Fluchtleitsysteme
8	28.08.92	W31	Holzrippenbrand 3	17.200	0,3	D	A, S	
9	30.08.92	W41	Holzrippenbrand 4	17.900	2,5	D	A, D	
10	31.08.92	W51	Holzrippenbrand 5	18.000	4,5	D	A, F	
11	13.09.92	FA3	Gekoppelter Reisezugwagen F2Al & F7 3. Zündung	57.500	6-8/3-4	D, I	A, F	Zusätzlich Prüfung Sicherheitskammer
12	25.09.92	FS2	Reisezugwagen F2St 2. Zündung	62.500	0,5	D, A	F	Weiterer Reisezugwagen als Attrappe
13	07.10.92	F11	Reisezugwagen F1	77.000	0,5	D, A	F, S	
14	14.10.92	F42	U-Bahnwagen F4 (Alu) 2. Zündung	41.400	0,5	D	A, F, S	
15	23.10.92	LF1	Mischbrandlast (LF TIR)	63.325	0,7	A, F	D, S	
16	27.10.92	H11	Heptanbrand 1		0,6-1,0	F, A	D	
17	28.10.92	H21	Heptanbrand 2		1,5-2,0	F, A	D	
18	29.10.92	H31	Heptanbrand 3.1		1,5-2,0	F, A	D	
19	29.10.92	H32	Heptanbrand 3.2		2,0-2,5	F, A	D	
20	04.11.92	C21	Kunststoff-Pkw	7.000	0,5	A	D, F	
21	12.11.92	HF1	Sattelzug	87.400	6-8/3-4	GB	A, D, F, N	

1) Aktiv in Norwegen beteiligte Partner aus:
A = Österreich, D = Deutschland, F = Frankreich, GB = Großbritannien, I = Italien, N = Norwegen, S = Schweden

2) Positiv = Luftströmung vom Nordportal zum Schacht orientiert

Tab. 4-7: Versuchsprogramm Repparfjord-Tunnel [14]

[14] angesetzten spezifischen Heizwert von 17.922 kJ/kg zwischen 17.200 MJ (W31) und 27.500 MJ (W11, W21).

Für die Versuche W11 und W21 wurden acht Stapel von je 15 Krippen übereinander errichtet. Die Krippen wurden so zusammengenagelt, dass der Luftanteil 50 Vol.-% betrug. Die Krippen wurden im Tunnelquerschnitt mittig auf einer Fläche von L/B = 2,00 m/4,00 m positioniert. Sie wurden an ihren Ecken auf 0,5 m hohen Porenbetonsteinen aufgelagert. Jede Krippe bestand aus sieben Lagen Holzplatten. Die Höhe der Stapel betrug 4,20 m und bei Berücksichtigung der Auflagerung ca. 4,7 m. Die verbleibende lichte Höhe bis zur Decke kann nach den in Bild 4-12 angegebenen Abmessungen

auf etwa 0,5 m geschätzt werden. Die Versuche W11 und W21 wurden ohne Lüftereinsatz und mit geschlossenem nördlichem Hubtor durchgeführt. Als Zündquelle wurden ca. 0,5 kg Isopropanol auf vier Stahlgefäße verteilt, unter den Eckstapeln angeordnet und unmittelbar nacheinander mit einer Propanflamme gezündet. Der Versuch W11 diente der Überprüfung des Messkonzeptes und der Funktion der Messeinrichtungen. Der Versuch W21 wurde zur Überprüfung des Probennahme- und Analysekonzeptes durchgeführt.

Für die Versuche W31, W41 und W51 wurden auf der Wiegebühne auf einer Fläche von 0,80 x 3,20 m insgesamt fünf Stapel von je 15 Krippen übereinander aufgebaut. Die verbleibende lichte Höhe kann

nicht angegeben werden, da die Höhe der Wiegebühne unbekannt ist. In Bild 4-16 sind die zur Zündung vorbereiteten Krippen für Versuch W31 dargestellt. Die Krippen bestanden bei Versuch W31 zu 30 Vol.-% aus Holz und zu 70 Vol.-% aus Luft. Bei Versuch W31 wurde das Gebläse nicht eingeschaltet und die Gebläseöffnung verschlossen. Bei Versuch W41 lief das Gebläse auf Stufe 1 bei zwei geöffneten Klappen im Druckrohr. Bei Versuch W51 lief das Gebläse bei geschlossenen Klappen auf Stufe 1. Als Zündquelle wurden ca. 1,2 kg Isopropanol auf fünf Stahlgefäße aufgeteilt, unter je einem Stapel angeordnet und innerhalb weniger Sekunden gezündet. Bild 4-17 zeigt das Überspringen des Brandes bei Versuch W51 zum vorderen Drittel der Brandlast während gleichzeitig die hinteren Krippen einstürzen.

Die Beobachtung eines gleichmäßigen Abbrands der Krippen wird nur für Versuch W31 mitgeteilt. Bei den Versuchen W41 und W51 wurden die vorderen Krippen erst durch den entwickelten Vollbrand gezündet (siehe Bild 4-17). Die Holzkrippen verloren ca. 16 min (W51) bis 29 min (W11) nach Zündung ihre Stabilität, stürzten ein und brannten auf dem Boden weiter. Bei Versuch W31 schlugen die Flammen im Bereich der Brandlast bis zur Decke, wodurch ein Messquerschnitt zerstört und auf einer Fläche von insgesamt ca. 30 x 30 cm² Spritzbeton in einer Stärke von 3 mm bis 5 mm herabfiel. Außerdem platzte der Betonboden bereichsweise auf. Betonabplatzungen im Decken- und Wandbereich wurden in geringem Umfang auch bei den Versuchen W41 und W51 festgestellt.

Die bei den Holzkrippenbränden unter der Decke bei Station +10 m und im Deckenmessstein über der Brandlast (Station ±0 m) gemessenen Maximaltemperaturen sind in Tabelle 4-8 zusammengestellt. In Bild 4-18 und Bild 4-19 ist die zeitliche Entwicklung der Temperatur unter der Decke bei Station +10 m bzw. in einem Deckenmessstein über der Brandlast aufgetragen.

Den Angaben in Tabelle 4-8 zufolge wurden bei den Holzkrippenbränden unter der Decke Temperaturen in der Größenordnung von 250 °C (W21) bis 500 °C (W11) erreicht. Im Deckenmessstein über der Brandlast wurden Temperaturen von 175 °C (W41) bis 600 °C (W31) erreicht. Die Maximaltemperaturen im Deckenbereich und im Messstein weisen untereinander jeweils deutliche Unterschiede auf. Die Ursachen hierfür sind darin zu suchen, dass die Holzkrippen nicht gleichmäßig abbrannten und/



Bild 4-16: Vorbereitete Holzkrippen für Versuch W31 [14]



Bild 4-17: Vollbrand während des Versuches W51 [14]

Versuch	Maximale Temperatur			
	Unter der Decke bei +10 m [°C]	Eintritt nach [min]	Im Deckenmessstein bei ±0 m [°C]	Eintritt nach [min]
W11	500	25	-	-
W21	250	40	-	-
W31	480	20	600	20
W41	440	15	175	20
W51	285	10	180	20

Tab. 4-8: Maximaltemperaturen im Deckenbereich bei Holzkrippenbränden [14]

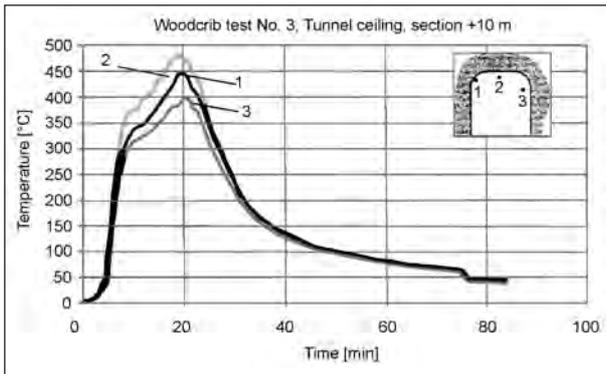


Bild 4-18: Temperaturverlauf unter der Decke bei Station +10 m [14]

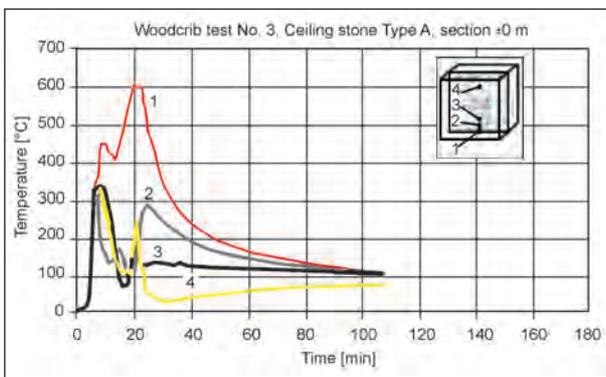


Bild 4-19: Temperaturverlauf im Deckenmessstein direkt über der Brandlast (±0 m) [14]

oder zu unterschiedlichen Zeitpunkten und in unterschiedlichem Umfang zusammenstürzten.

4.2.4.3.3 Versuch mit einer Mischbrandlast

Das Ziel dieses Versuches bestand in der quantitativen Ermittlung der Hitze- und Rauchausbreitung beim Brand eines Lkw in einem Tunnel. Die dadurch erhaltenen Ergebnisse sollten mit vorhandenen Empfehlungen verglichen werden. Da die Brandlast eines Lkw mit seiner Ladung variiert, wurde entschieden, anstelle eines tatsächlichen Lkw, wie im Versuch HF1 (siehe Kapitel 4.2.4.3.5), eine Brandlast zu verwenden, die als repräsentativ für das gesamte Fahrzeug angesehen werden kann. Als brennbare Materialien wurden Holz, Gummireifen und Kunststoffabfall mit einer Masse von insgesamt 2.844 kg verwendet. Die Zusammensetzung der Mischbrandlast gibt Tabelle 4-9 wieder. Im Bericht [14] wird die Brandlast mit 67.700 MJ angegeben. Dieser Wert ist jedoch nicht korrekt, denn der Anteil der Gummireifen an der Brandlast (Masse x Heizwert) wurde fehlerhaft berechnet. Die korrekte Brandlast beträgt 63.325 MJ (siehe Tabelle 4-9).

Material	Masse [kg]	Spezifischer Heizwert [kJ/kg]	Brandlast [MJ]
Holzplatten	2.212	17.922	39.643
Gummireifen	322	37.505	12.077
Kunststoff	310	37.435	11.605
Summe	2.844	-	63.325

Tab. 4-9: Zusammensetzung der Brandlast bei Versuch LF1 [14]

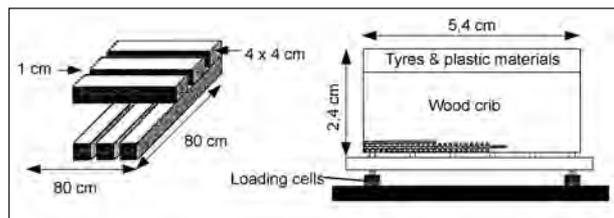


Bild 4-20: Aufbau der Brandlast für Versuch LF1 [14]

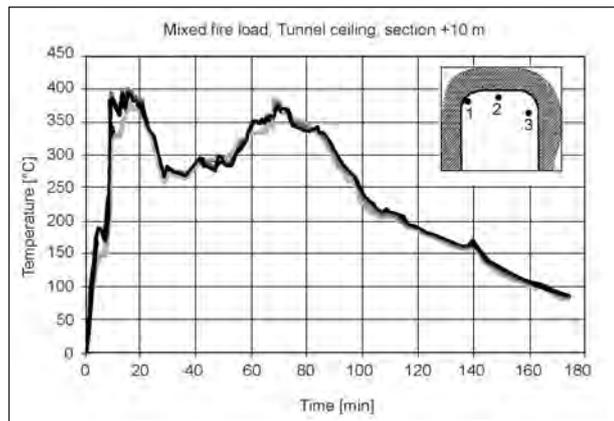


Bild 4-21: Temperaturverlauf unter der Decke bei Station +10 m [14]

Die Mischbrandlast wurde mit einer Breite von 2,4 m basierend auf Porenbetonblöcken auf den Wiegebühnen aufgebaut (siehe Bild 4-20). Die Holzplatten wurden so zusammengenagelt, dass sie einen Luftanteil von 50 Vol.-% aufwiesen. Als Zündquelle wurden ca. 3 l Isopropanol, das in fünf flache Stahlwannen gefüllt wurde, verwendet. Eine Wanne wurde mittig unter der Brandlast und die weiteren mittig unter jeder Seite angeordnet.

Während des Brandes stürzte ein Teil der Brandlast um. Die Brandlast ist vollständig verbrannt, lediglich Stahlreste der Nägel und Reifen sowie Holzkohle waren noch vorhanden. Bei den an der östlichen Tunnelwand auf Ankern verlegten Kabeln ist die Isolierung verbrannt. Bei dem Versuch wurde ein relativ gleichmäßiger Abbrand der Mischbrandlast beobachtet. Im Deckenbereich wurde innerhalb von 10 min die Maximaltemperatur von ca. 400 °C er-

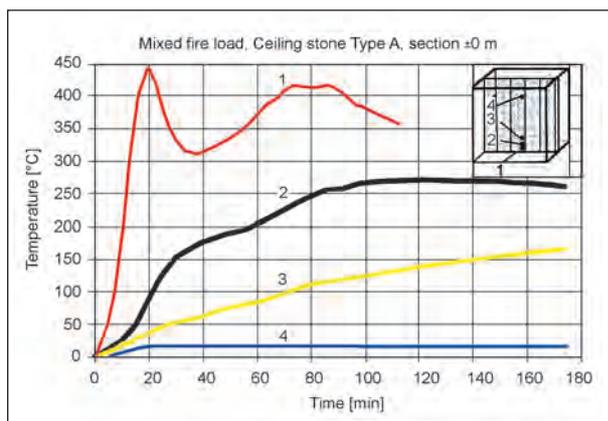


Bild 4-22: Temperaturverlauf im Deckenmessstein direkt über der Brandlast (± 0 m) [14]

reicht (siehe Bild 4-21). Im Deckenmessstein über der Brandlast wurde die Maximaltemperatur von ca. 450 °C nach 20 min gemessen (siehe Bild 4-22).

4.2.4.3.4 Versuche mit Heptan

Als Brandstoff wurde n-Heptan verwendet, das zu 60 % bis 100 % aus Heptan besteht. Die weiteren Bestandteile sind Isomere. Der grundsätzliche Versuchsaufbau ist in Bild 4-23 dargestellt. Für die Versuche wurden kreisrunde Wannen aus Stahlblech verwendet, die auf einem dreieckigen Rahmen aus Stahlprofilen auf dem Boden platziert wurden. Die Regelung des Heptanzufusses erfolgte mit Hilfe eines Mastes in den Wannen, an dem mehrere Thermoelemente befestigt waren. Das unterste Thermoelement wurde zur Erfassung der Siedetemperatur ständig unter der Heptanoberfläche und das oberste Thermoelement innerhalb der Flammen gehalten. Die Zündung erfolgte elektrisch durch Fernsteuerung.

Insgesamt wurden vier Versuche mit Heptan durchgeführt. Die wesentlichen Versuchsbedingungen sind in Tabelle 4-10 zusammengestellt. Bei Annahme eines unteren Heizwertes von 44.600 kJ/kg bei 15 °C [15] ergeben sich Brandlasten von 18.732 MJ für Versuch H11, 28.098 MJ für Versuch H21 und 56.196 MJ für Versuch H32.

Bei Versuch H11 ereigneten sich ab der 33. Minute explosionsartige Betonabplatzungen, die ein teilweises Überlaufen der Brandwanne zur Folge hatten, wodurch der weitere Brandverlauf nicht mehr kontrolliert werden konnte. Um bei den weiteren Versuchen eine derartige Beeinflussung auszuschließen, wurde der Betonboden im Bereich unmittelbar hinter der Brandwanne durch Steinwolle-matten geschützt. Bei Versuch H21 führte nach

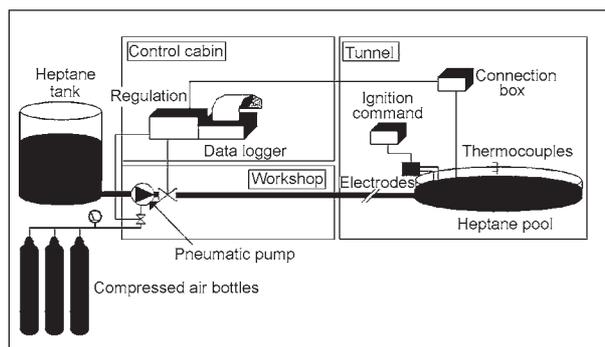


Bild 4-23: Versuchsaufbau Heptanbrände [14]

Versuch	Brandstoff		Lüftung [m/s]
	Verbrauch [l]	Fläche [m ²]	
H11	600	1	0-60 min: 0,5 60-90 min: 1,0
H21	900	1	0-45 min: 1,5 45-120 min: 2,0
H31	700	3	1,5
H32	1.800	3	0-45 min: 1,5 45-100 min: 3,0

Tab. 4-10: Versuchsbedingungen bei Heptanbränden [14]

Versuch	Max. Temperatur im Deckenbereich [°C]	Eintritt	
		Zeit [min]	Station
H11	ca. 200	15	± 0
H21	ca. 250	90	± 0
H32	ca. 400	k. A.	+8 bis +10

k. A. = keine Angabe

Tab. 4-11: Maximaltemperaturen im Deckenbereich bei Heptanversuchen [14]

91 min eine Verformung der Brandwanne zu einem teilweisen Überlaufen von Heptan, wodurch zusätzliche Flammen entstanden und die Thermolementleitung in Brand geriet. Versuch H31 wurde durch das Einfrieren der Brandstoffpumpe 35 min nach Zündung vorzeitig beendet. Versuch H31 wurde nach einer Unterbrechung von 2 h als Versuch H32 wiederholt und verlief ohne Zwischenfall. Nach Versuch H32 wurden 30 cm tiefe Betonabplatzungen beobachtet.

In Tabelle 4-11 sind die Maximaltemperaturen während der Heptanversuche zusammengestellt. Für die Versuche H11 und H21 sind die Werte vor dem Eintritt der Zwischenfälle angegeben.

Trotz der Zwischenfälle konnte insbesondere durch die Versuche H31 und H32 gezeigt werden, dass

unter den gleichen physikalischen Bedingungen Temperaturfelder grundsätzlich reproduzierbar sind. Hierin wurde die Grundlage für die Simulation von Tunnelbränden unter Verwendung von Feldmodellen gesehen.

4.2.4.3.5 Versuche mit Straßenfahrzeugen

Die Brandversuche mit insgesamt vier Straßenfahrzeugen bilden einen bedeutenden Bestandteil des Projektes, da bis dahin Brandversuche überwiegend mit flüssigen Brandstoffen in kurzen Tunnelabschnitten durchgeführt wurden. Durch die Versuche mit Straßenfahrzeugen sollten quantitative Daten über die Ausbreitung und Intensität von Hitze und Rauch bei (möglichst realen) Fahrzeugbränden in einem Tunnel gewonnen werden.

Mit Pkw wurden zwei Brandversuche durchgeführt. Für den Versuch C11 wurde ein in den frühen 1970er Jahren hergestellter Ford Taunus Kombi verwendet, dessen Brandlast auf 6.000 MJ geschätzt wurde. Der Pkw wurde bei Station ± 0 m mit dem Heck zum Nordportal aufgestellt. Als Zündquelle wurden ca. 0,4 kg Isopropanol in einem Stahlgefäß auf dem Fahrersitz angeordnet und gezündet. Durch den Brand wurde unter dem Fahrzeugdach innerhalb von ca. 2,5 min eine Maximaltemperatur von 1.000 °C erreicht. Nach ca. 10 min war ein deutlicher Temperaturabfall feststellbar. Nach ca. 25 min fielen die Temperaturen unter dem Fahrzeugdach unter 200 °C ab, sodass der Brand i. W. als beendet angesehen werden konnte. Der Pkw brannte nahezu vollständig aus. Die noch vorhandenen brennbaren Kunststoffreste besaßen ein Volumen von weniger als 1 l.

Für den zweiten Pkw-Versuch – Versuch C21 – wurde ein Pkw mit Kunststoffkarosserie verwendet. Hierbei handelte es sich um einen 1988 hergestellten Renault Espace J11-II. Der Pkw wurde mit Fahrtrichtung Süden aufgestellt. Mit dem in [14] angegebenen Heizwert von 5 MJ/kg ergibt sich bei einem Leergewicht des Pkw von 1.280 kg die Brandlast zu 6.400 MJ. Das Fahrzeug wurde zur Simulation eines Kabelbrandes elektrisch durch einen Transistor in der Konsole gezündet. Bei diesem Versuch lief das Gebläse auf niedrigster Stufe. Die Gebläseöffnung in der Druckwand war bis auf vier Schlitze mit je 5 cm Höhe verschlossen. Im Inneren und der näheren Umgebung des Fahrzeuges wurde nach knapp 10 min eine Maximaltemperatur von 900 °C erreicht. Nach ca. 40 min war im Innenraum ein deutlicher Temperaturabfall erkennbar.



Bild 4-24: Reisebus vor dem Versuch [14]

Nach ca. 60 min fielen die Temperaturen unter 200 °C, sodass der Brand i. W. als beendet betrachtet werden kann. Im Deckenmessstein über der Brandlast wurde nach ca. 30 min eine Maximaltemperatur von 100 °C gemessen. Der Pkw brannte vollkommen aus. Es blieben lediglich Stahlteile und Reste von Glasfasermatten erhalten.

Ein dritter Brandversuch wurde mit einem Reisebus durchgeführt. Für den Versuch B11 wurde ein 25 bis 35 Jahre alter Volvo-Bus verwendet (siehe Bild 4-24). Der Bus war 10,35 m lang und bot im 1,96 m hohen Fahrgastraum Platz für etwa 40 Sitze. Die Karosserie bestand im Wesentlichen aus Aluminium, die Ecken des Hecks aus glasfaserverstärktem Kunststoff (GFK). Weitere Angaben zum Bus, insbesondere zu den Abmessungen, liegen nicht vor. Zur Simulation von Reisegepäck wurde der Bus mit ca. 310 Holzlatten, wie sie für die Holzkrippenversuche (siehe Kapitel 4.2.4.3.2) verwendet wurden, beladen. Die vorhandene Brandlast wurde geschätzt und mit einem Zuschlag von 10 % versehen, sodass sich hierfür 40.800 MJ ergaben. Für die Zündung wurden ca. 1,5 kg Isopropanol in eine quadratische Stahlwanne gefüllt, auf der ersten Sitzreihe nach dem Fahrersitz platziert und gezündet. Das Gebläse wurde nicht eingeschaltet, die Öffnung in der Druckwand blieb offen.

Unter dem Dach des Busses wurde innerhalb von 15 min kurzzeitig eine Maximaltemperatur von 1.200 °C erreicht. Nach ca. 20 min war unter dem Fahrzeugdach ein deutlicher Temperaturabfall zu beobachten, sodass nach etwas mehr als 55 min 200 °C erreicht wurden und der Brand praktisch beendet war. Temperaturmesswerte von Messsteinen liegen nicht vor. Durch den Brand wurden im Bus Dach und Seitenwände bis zur Scheibenunterkante vollständig zerstört (siehe Bild 4-25). Die Seitenwand unter den Fenstern ist z. T. durchgebrannt. Im Innenraum blieben nur die metallischen Sitzgestel-



Bild 4-25: Reisebus nach dem Versuch [14]



Bild 4-26: Sattelzug vor dem Versuch [14]

le erhalten. Der Fußboden ist größtenteils durchgebrannt.

Die großmaßstäblichen Brandversuche wurden mit dem Versuch HF1 unter Verwendung eines Sattelzuges abgeschlossen. Das Hauptziel dieses Versuches bestand darin, belastbare Daten zum Brandverhalten eines in einen Tunnelbrand verwickelten Lkw (HF TIR) zu gewinnen und den Einfluss der Luftströmung auf Brandintensität und Rauchausbreitung zu untersuchen.

Der Sattelzug bestand aus einer zweiachsigen Zugmaschine und einem Anhänger mit hinterer Doppelachse (siehe Bild 4-26). Mit dem verkehrstüchtigen Fahrzeug wurden die aus Möbelstücken bestehende Brandlast, Wagenheber und die in Norwegen verbleibende Ausrüstung zum Versuchstunnel transportiert. Die Zugmaschine vom Typ Leyland DAF 95.310 ATi wurde erstmals 1988 zugelassen. Sie wies auf der Vorderachse Einfachbereifung und auf der Hinterachse Doppelbereifung auf. Die Kabine verfügte über einen Fahrersitz auf der linken Seite und einen Beifahrersitz auf der rechten Seite. Hinter den Sitzen befand sich eine Koje mit Schaumstoffmatratze und Vorhängen. Unter der Koje waren abschließbare Fächer angeordnet. Die Kabine war an Wänden und Decken mit Kunststoff verkleidet, der Boden mit Teppichboden und Gum-

mimatten bedeckt. Das Armaturenbrett aus gepresstem Kunststoff nahm die gesamte Breite der Kabine ein. Die Rückwand der Kabine war mit einer Scheibe aus Sicherheitsglas versehen. Der Dieselmotor war unter der Kabine in Längsrichtung angeordnet. Das Auspuffrohr wurde über die Kabine geführt. Der Tank war unter der Fahrerseite eingebaut. Auf der gegenüberliegenden Seite befanden sich die Batterieanlage (2 x 12 V) und der Zylinder der Druckluftbremsanlage. Der Abstand zwischen Fahrerkabine und Anhänger betrug ca. 1 m. Der Anhänger war nach vorn und zu den Seiten hin offen. Er besaß ein Fahrgestell aus Stahl mit einem 35 mm starkem Holzboden und einem Metallrahmen, der mit einer Stirnwand aus Blech abschloss. Als Wetterschutz diente eine abnehmbare Kunststoffplane, die mit Haken an den Seitenklappen aus Aluminium befestigt wurde. Der Anhänger war ca. 12,2 m und die Zugmaschine 3,96 m lang (Stoßstange bis Anhängerkupplung). Die Gesamtlänge des Zuges ergab sich zu 16,15 m. Der Anhänger wies eine Bodenhöhe von fast 4 m, die Zugmaschine von ca. 3,10 m auf. Das Innenmaß der Breite des Anhängers betrug 2,40 m. Der Anhänger wog 6,3 t, die Zugmaschine 6,75 t.

Die Brandlast setzte sich aus drei Hauptbestandteilen zusammen: der Innenausstattung der Fahrerkabine, dem brennbaren Material von Anhänger und Zugmaschine sowie der Anhängerladung. Da die Brandlast der Fahrerkabine nicht genau ermittelt werden konnte, wurde angenommen, dass diese etwa einem Pkw mittlerer Größe entspricht, und mit 7.000 MJ angesetzt. Die Anhängerladung sollte eine übliche, auf der Straße zu transportierende Ladung repräsentieren. Bei deren Auswahl lag das Hauptaugenmerk nicht auf der Ausnutzung der maximalen Zuladung, sondern darauf, eine leicht zu entzündende und leicht brennbare Ladung zusammenzustellen. Aus diesem Grund entschied man sich für eine Ladung aus neuen Möbelstücken, wie Matratzen, französischen Betten, Sofas, Stühlen und Kissen. Der Anhänger wurde so beladen, dass in der Mitte gerade genug Platz blieb, um die Thermolemente anzubringen. Außerdem verblieb zwischen Ladung und Plane ein Zwischenraum von ca. 20 cm bis 50 cm. In Bild 4-27 und Bild 4-28 ist die Anordnung der Thermolemente in der Fahrerkabine bzw. in der Ladung dargestellt.

Insgesamt waren nahezu 2 t Möbelstücke erforderlich, um den Anhänger zu beladen. Die Brandlast der Ladung wurde auf 42.750 MJ geschätzt. Für die Abschätzung der Gesamtbrandlast wurden außer-

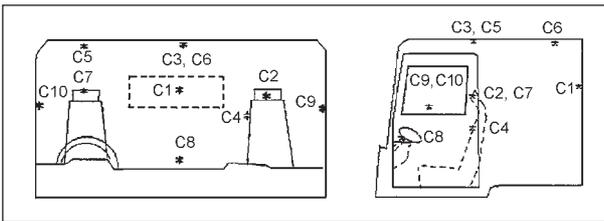


Bild 4-27: Anordnung der Thermoelemente in der Fahrerkabine [14]

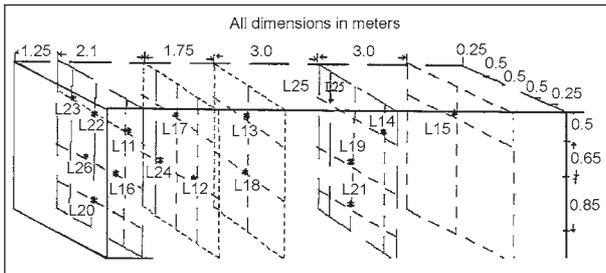


Bild 4-28: Anordnung der Thermoelemente in der Ladung [14]

dem der Holzboden des Anhängers, die Reifen des Zuges, der Tankinhalt von etwa 50 l Diesel sowie eine Pauschale für in der Zugmaschine außerhalb der Kabine vorhandene Leitungen, Isolierungen und Armaturen aus Kunststoff berücksichtigt. Die Abschätzung ergab eine Gesamtbrandlast von 87.400 MJ.

Der Sattelzug wurde mit Fahrtrichtung Nordportal so in den Versuchstunnel gefahren, dass sich die Mitte der Kombination bei Station ± 0 m befand (siehe Bild 4-29). Der Sattelzug wurde mit Wagenhebern angehoben und auf sechs Wiegezellen abgesetzt, um während des Versuches den Masseverlust zu ermitteln. 29 m vor dem Sattelzug wurde der Versuchstunnel durch eine Attrappe aus zwei Frachtcontainern blockiert. Die Container ruhten auf Metallböcken und besaßen Abmessungen von je 6 x 2,5 x 4 m. Durch diese Aufstellung sollte die Situation eines im Kanaltunnel zwischen Großbritannien und Frankreich verkehrenden Shuttlezuges wiedergegeben werden, bei dem der Sattelzug den ersten Lkw nach der Lokomotive darstellt. Dabei wurde angenommen, dass sich zwischen der Lok und dem Lkw ein Reisezugwagen für die Lkw-Fahrer und eine flache Ladeplattform befinden. Das Nordportal war versperrt und mit dem Druckrohr des Gebläses verbunden, um die Auswirkungen einer künstlichen Luftströmung zu beobachten. Bei Versuchsbeginn lief das Gebläse mit voller Leistung. Vor der Attrappe wurde eine Luftgeschwindigkeit von rd. 6 m/s, zwischen Lkw und Tunnelwänden von 10 m/s bis 16 m/s und hinter dem Lkw von 7,5 m/s gemessen.

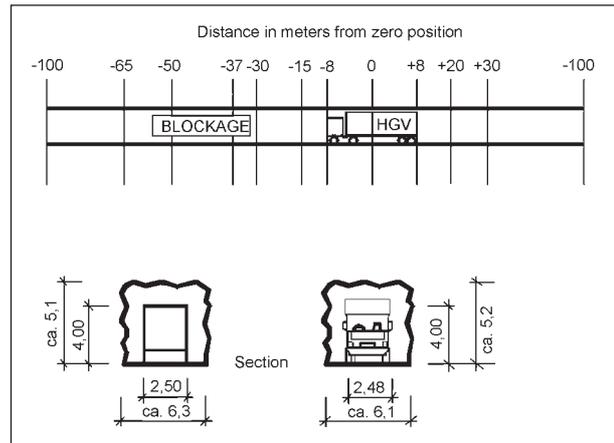


Bild 4-29: Anordnung von Sattelzug und Attrappen bei Versuch HF1 (Lkw-Höhe ohne Wiegezellen) [nach 14]

Für die Zündung wurde eine kleine, mit Heptan getränkte Holzkruppe auf den Fahrersitz gestellt. Das Sitzpolster wurde aufgeschnitten, zur Beschleunigung etwas Polypropylnol auf die Kruppe gegeben und nach erfolgter Zündung die Fahrertür geschlossen. Der Brand griff rasch auf den Fahrersitz, die Vorhänge und die Deckenverkleidung über. Obwohl das Fenster der Beifahrertür beschädigt war, erfolgte die Durchzündung erst infolge des Zerberstens der Windschutzscheibe nach 9 min. Anschließend zerbarsten die Seitenfenster und das Rückfenster der Kabine. Nach 11 min sprangen die Flammen aus der Kabine auf Plane und Ladung über. Nach 12 min bis 13 min war der Raum unter dem Lkw sowie zwischen Lkw und Tunnelwandung vollständig von Flammen ausgefüllt und der Brand somit voll entwickelt. Zu diesem Zeitpunkt wurde entschieden, die Lüftung zu drosseln. Hierzu musste das Gebläse abgeschaltet, die Öffnung in der Druckwand teilweise verschlossen und das Gebläse mit niedriger Drehzahl erneut gestartet werden. Nach 13,5 min wurde das Gebläse abgeschaltet, worauf Rauch- und Heißgase begannen, in Richtung Nordportal zu strömen. Nach 16,5 min wurde das Gebläse neu gestartet. Die Luftgeschwindigkeit vor dem Lkw betrug anschließend zwischen 2 m/s und 3,8 m/s und ca. 9 m/s hinter dem Lkw. Innerhalb von 2 min war der Bereich vor dem Lkw wieder rauchgasfrei. Nach 30 min ließ die Brandintensität deutlich nach. Der Brand dauerte noch weitere 30 min an. Nach 55 min bestanden nur noch kleine Flammennester, worauf der Brand nach 60 min für beendet erklärt wurde. Die gesamte Brandlast einschließlich aller brennbaren Bestandteile des Fahrzeuges ist vollständig verbrannt. Die Karosserie hat sich verformt und zur Seite geneigt. Sie lag nicht mehr auf den



Bild 4-30: Zugmaschine nach Versuch HF1 [14]

Wiegezellen, sondern auf dem Rahmen darunter. Dies deckt sich mit den Aufzeichnungen des Masseverlustes, wonach das Fahrzeug nach 10 min in Bewegung geraten und abgerutscht sein muss. Bild 4-30 zeigt die ausgebrannte Zugmaschine.

Durch die große Hitzeentwicklung wurden ebenfalls Teile der Messeinrichtung (Wasserabscheider, elektrische Leitungen und Anschlüsse, Kunststoffabdeckungen, Datalogger) und Computer in Mitleidschaft gezogen bzw. zerstört. Bei Station +10 m war der Kabelkanal aus Beton auf der westlichen Tunnelwand offen geblieben, wodurch die Kabel zum Teil geschmolzen waren. In Bereichen, in denen die Kabel durch Sand geschützt waren, blieben sie intakt.

Für die Fahrerkabine der Zugmaschine und für die Ladung sind in Bild 4-31 bzw. Bild 4-32 exemplarische Temperaturverläufe dargestellt. Bild 4-31 verdeutlicht den relativ langsamen Temperaturanstieg der ersten Minuten in der Kabine, bis nach 9 min die Windschutzscheide zerbarst, worauf die Temperaturen sehr rasch bis auf ca. 1.100 °C anstiegen. Zwischen der 13. Minute und der 16. Minute, während der Umstellung des Gebläses, ist ein Temperaturabfall erkennbar. Nach dem Wiederanschalten des Gebläses stiegen die Temperaturen wieder an. In Bild 4-32 ist zu erkennen, dass die Temperaturen in der Ladung nach ca. 11 min infolge des Überspringens des Brandes von der Kabine her anstiegen. Daraufhin wurden sehr rasch Temperaturen von ca. 1.100 °C erreicht. Der Temperaturabfall zwischen der 13. Minute und der 16. Minute ist wiederum auf die Umstellung des Gebläses zurückzuführen. Nach der 20. Minute ist ein allmähliches Absinken der Temperaturen bei Fortsetzung des Brandes erkennbar. Temperaturmesswerte von Messsteinen liegen nicht vor.

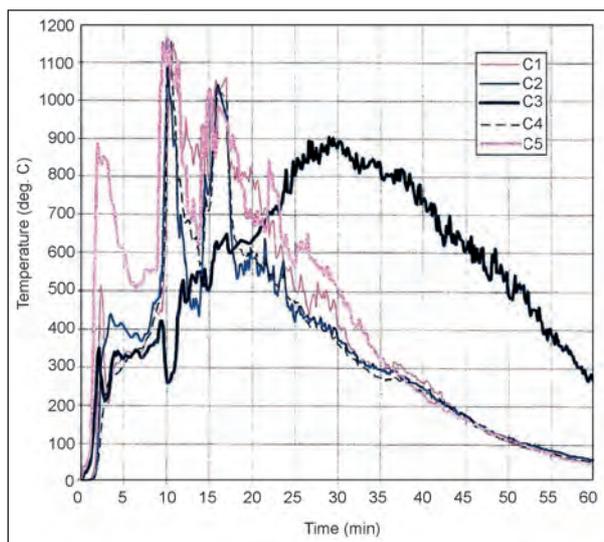


Bild 4-31: Temperaturverläufe in der Fahrerkabine (Lage der Thermoelemente siehe Bild 4-26) [14]

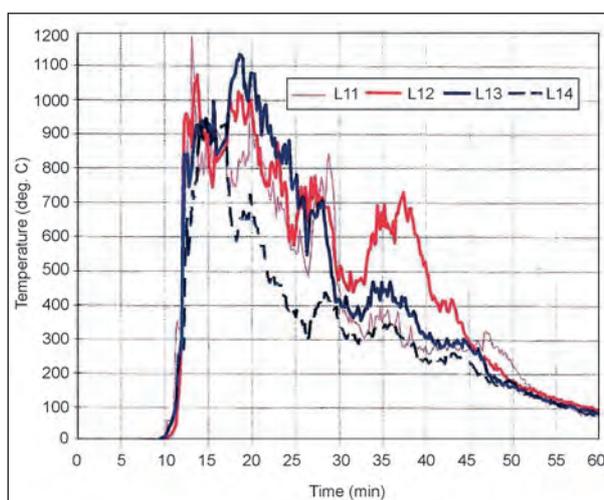


Bild 4-32: Temperaturverläufe in der Ladung (Lage der Thermoelemente siehe Bild 4-27) [14]

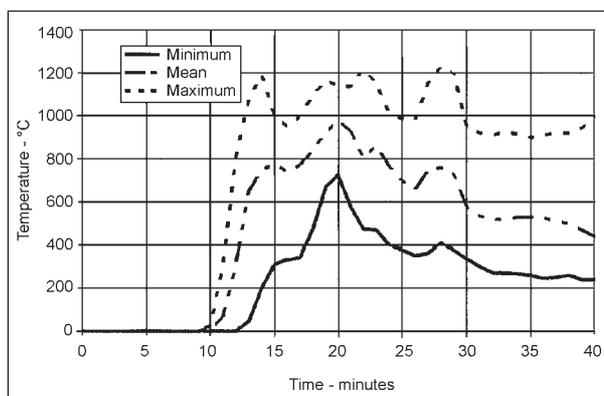


Bild 4-33: Maximale, mittlere und minimale Temperaturen in der Ladung [14]

In Bild 4-33 sind die über die 16 Thermoelemente der Ladung ermittelten maximalen, mittleren und minimalen Temperaturen aufgetragen. Aus dem

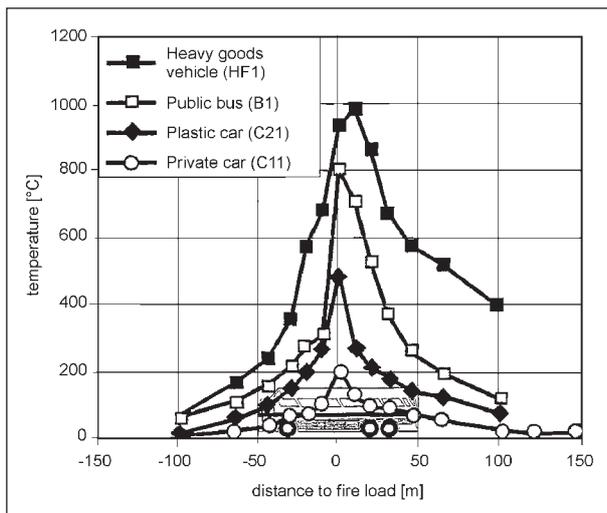


Bild 4-34: Maximaltemperaturen im Deckenbereich bei Versuchen mit Straßenfahrzeugen [14]

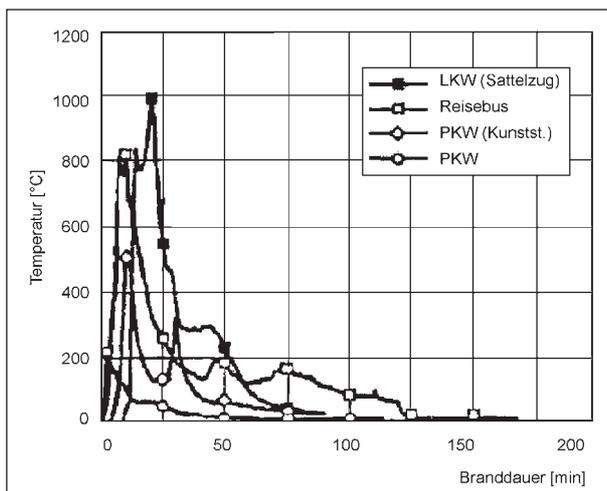


Bild 4-35: Zeitliche Entwicklung der Maximaltemperaturen im Deckenbereich bei Versuchen mit Straßenfahrzeugen [16]

Verlauf der maximalen und mittleren Temperaturen kann geschlossen werden, dass etwa von der 13. Minute bis zur 30. Minute ein relativ gleichmäßiger Abbrand der Ladung stattfand. In diesem Zeitraum erreichten die maximalen Temperaturen mindestens ca. 1.000 °C, kurzzeitig ca. 1.200 °C.

Die Temperaturbeanspruchung des Versuchstunnels infolge der Straßenfahrzeugbrände ist in den Bildern 4-34 bis 4-36 veranschaulicht. Bild 4-34 zeigt für die Versuche mit den Pkw (C11 und C21), dem Reisebus (B1) und dem Sattelzug (HF1) die Maximaltemperatur im Deckenbereich in Abhängigkeit von der Entfernung zur Brandlast. Beim Versuch mit dem Sattelzug wird im Deckenbereich über der Brandlast die höchste Temperatur von ca. 1.000 °C erreicht. Bei den Versuchen mit dem Rei-

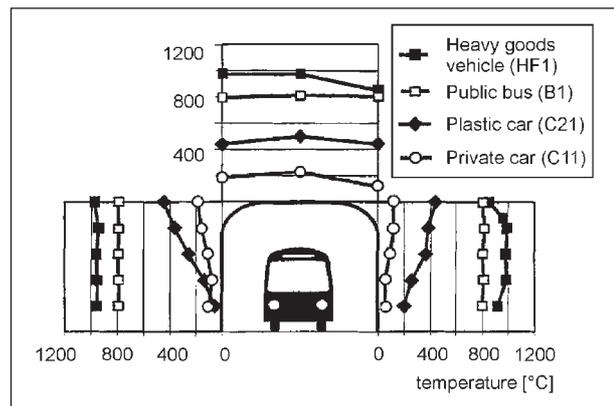


Bild 4-36: Maximaltemperaturen im Tunnelquerschnitt bei Versuchen mit Straßenfahrzeugen [14]

sebus und dem Pkw mit Kunststoffkarosserie werden im Deckenbereich Temperaturen von maximal 800 °C bzw. 500 °C erreicht. Beim Pkw mit Stahlkarosserie steigen die Temperaturen im Deckenbereich auf maximal 200 °C an. Es wird deutlich, dass sich die Maximaltemperaturen auf den brandlastnahen Bereich beschränken. In Bild 4-35 ist die zeitliche Entwicklung der in Bild 4-34 eingetragenen höchsten Temperaturwerte dargestellt. Aus Bild 4-35 kann entnommen werden, dass die Temperaturen bei Straßenfahrzeugbränden je nach Größe der vorhandenen Brandlast innerhalb weniger Minuten ein deutliches Maximum erreichten und bis zur 55. Minute auf Werte unter 200 °C abfielen.

Bild 4-36 gibt die Verteilung der Maximaltemperaturen im Tunnelquerschnitt wieder. Während bei den Pkw die Maximaltemperaturen vom unteren Wandbereich mit zunehmender Nähe zur Decke ansteigen, weisen sie beim Sattelzug und beim Reisebus im Decken- und Wandbereich dieselbe Größenordnung von 1.000 °C bzw. 800 °C auf.

4.2.5 Memorial-Tunnel (USA)

4.2.5.1 Anlass und Zielsetzung

Das Central Artery/Tunnel (CA/T) Project in Boston stellt eines der größten öffentlichen Bauvorhaben in den USA dar. Bei dem Projekt handelte es sich um den Neubau eines Highways, dessen 12 km lange Trasse mehr als zur Hälfte unterirdisch verläuft. Zu diesem Zeitpunkt existierten in den USA keine einheitlichen Anforderungen an die Lüftung im Brandfall. Zusätzlich ergab sich die Notwendigkeit, verlässliche Daten zum Verhalten von Hitze und Rauch bei großmaßstäblichen Bränden in Straßentunneln zu verfügen. Die Federal Highway Administration legte daraufhin in

Zusammenarbeit mit dem Massachusetts Highway Department und dem West Virginia Department of Transportation das „Memorial Tunnel Fire Ventilation Test Program“ (MTFVTP) auf. Das Ziel des Versuchsprogramms bestand darin, eine möglichst umfassende Datenbank über die Ausbreitung von Hitze und Rauch für Längs- und Querlüftungssysteme bei unterschiedlichen Randbedingungen zu gewinnen.

Durchführung und Auswertung des MTFVTP werden in einem umfangreichen Bericht mit einer Vielzahl von Versuchsdaten, die in unterschiedlichen Dateistrukturen und nicht in ISO-Einheiten vorliegen, beschrieben. Im Rahmen eines Forschungsvorhabens [15] wurde für ausgewählte Versuche des MTFVTP die Entwicklung von Temperaturen und Strömungsgeschwindigkeiten mit Hilfe einer numerischen Simulation nachgefahren. Hierzu mussten die Daten des MTFVTP umgewandelt und ausgewertet werden. Eine eigene Auswertung des MTFVTP war im Rahmen dieses Projektes nicht möglich. Sofern nicht anders gekennzeichnet, wurden daher die nachfolgenden Informationen zum MTFVTP i. W. dem Schlussbericht [15] entnommen.

4.2.5.2 Versuchsobjekt

Das MTFVTP wurde im Memorial-Tunnel durchgeführt. Der Memorial-Tunnel wurde im Zuge des West Virginia Turnpike, der Charleston mit Princeton verbindet, errichtet. Der 853 m lange Tunnel wurde 1954 eingeweiht. Der Memorial-Tunnel wurde als einbahniger Straßentunnel mit einem Gesamtquerschnitt von 60 m^2 ausgeführt. Seine Gradienten weist eine Steigung von 3,2 % vom Süd zum Nordportal auf. Der Tunnel war ursprünglich mit einem Querlüftungssystem mit oben liegendem Zu- und Abluftkanal ausgestattet, sodass ein Verkehrsraum von 36 m^2 zur Verfügung stand. Die Belüftung erfolgte ausgehend von einem Zuluftgebäude am Südportal, die Entlüftung über ein Abluftgebäude am Nordportal. Im Tunnel waren Zu- und Abluftkanal durch eine Wand voneinander getrennt, wobei sich die Querschnittsflächen von Portal zu Portal linear änderten. Über Öffnungen neben dem Fahrbahnrand wurde die Zuluft eingeblasen und die Abluft abgesaugt. Die Querschnittsverhältnisse im Memorial-Tunnel gibt Bild 4-37 wieder. Der Memorial-Tunnel wurde 1988 aufgegeben, da der Turnpike im Zuge der Nachrüstung auf Interstate-Niveau umtrassiert wurde.

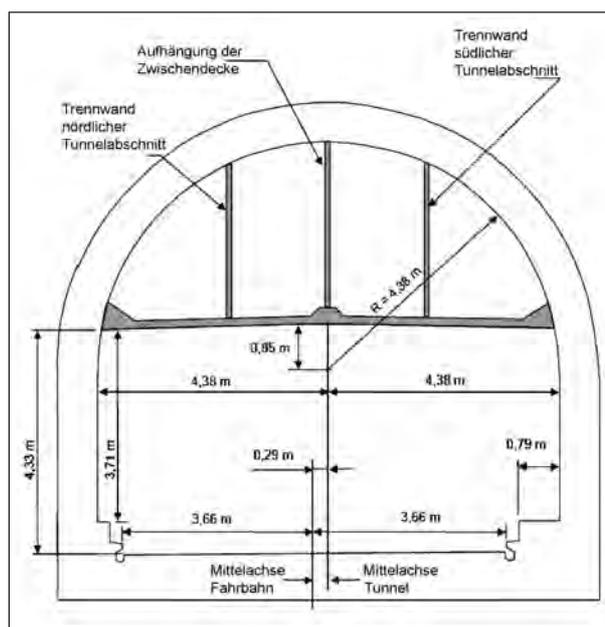


Bild 4-37: Querschnitt Memorial-Tunnel [15]

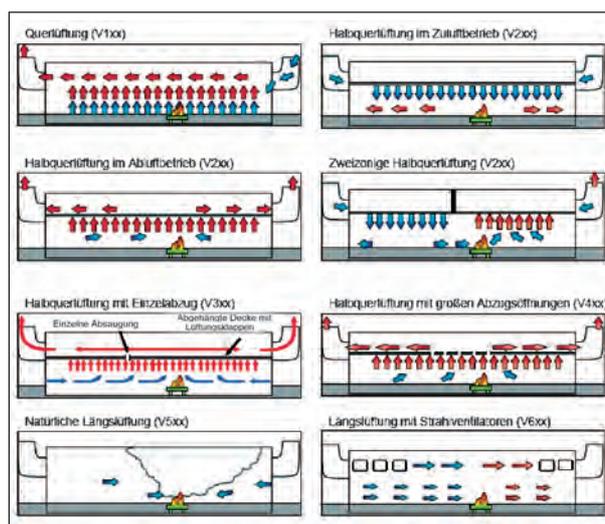


Bild 4-38: Untersuchte Lüftungssysteme [15]

4.2.5.3 Versuchsdurchführung

Im Vorfeld der Versuche wurde die im Bereich des Nordportals beschädigte Zwischendecke auf einer Länge von 61 m ersetzt und alle relevanten Bauteile, z. B. Zwischendecke einschließlich Aufhängung, Kammern für Messeinrichtungen, Kabel und Leitungen, durch Dämmung vor Temperatureinwirkungen geschützt [17]. Außerdem wurde die vorhandene Lüftungsanlage modifiziert. In den Lüfterkammern im Nord- und im Südportal wurden je drei Axialventilatoren eingebaut. Diese waren stufenlos regel- und umschaltbar und konnten einen Luftstrom von je $94,4 \text{ m}^3/\text{s}$ erzeugen. Um die getrennte Belüftung zweier Tunnelabschnitte zu ermöglichen, wurde die

Versuch Nr.	Brandleistung [MW]	Brandfläche [m ²]	Strömungsgeschwindigkeit im Verkehrsraum ¹⁾ [m/s]	Start der Lüftung [min]	Zuluftmenge [m ³ /s/n _{FS} /m]	Abluftmenge [m ³ /s/n _{FS} /m]	Temperatur	
							Innen [°C]	Außen [°C]
Querlüftung (A = 36 m ²)								
103	20	9	0	2	0,101	0,093	18,2	19
110	50	22,5	-0,41	0	0,101	0,093	17,2	25
Längslüftung (A = 60 m ²)								
615b	100	45	-0,61	2	-	-	7,5	5,1
625b ²⁾	100	45	1,14	0	-	-	14,7	28,5

1) Positiv = Strömung vom Nord- zum Südportal hin orientiert
2) Einsatz einer Schaumlöschanlage
A Querschnittsfläche des Verkehrsraumes

Tab. 4-12: Anfangs- und Randbedingungen ausgewählter Versuche [15]

Stirnwand des mittleren Lüftungskanals erneuert und mit Öffnungen versehen, ebenso seine Trennwände.

Das Versuchsprogramm umfasste 98 Brandversuche und wurde von September 1993 bis März 1995 durchgeführt. Hierbei wurden die in Bild 4-38 dargestellten Lüftungssysteme untersucht. Die in Bild 4-38 in Klammern angegebenen Abkürzungen entsprechen den einzelnen Versuchsbezeichnungen. Für die Versuche mit natürlicher Längslüftung und Längslüftung mit Strahlventilatoren wurde die Zwischendecke aus dem Tunnel entfernt, damit ein diesem System entsprechender Tunnelquerschnitt zur Verfügung stand. Für die Erzeugung einer Längsströmung wurden insgesamt 24 Strahlventilatoren in Dreiergruppen im Tunnelgewölbe installiert (siehe Bild 4-39).

Der Brandherd wurde 237 m vom Südportal und 616 m vom Nordportal entfernt eingerichtet. Hierzu wurden vier Brandwannen mit Flächen von 4,5 m², 9 m², 13,5 m² und 22,5 m² verwendet. Als Brandgut diente schwefelarmes Heizöl. Durch entsprechende Kombinationen der Wannen konnten Brandleistungen von 10 MW, 20 MW, 50 MW und 100 MW realisiert werden. Der Brandgutzufluss wurde so gesteuert, dass sich in den Wannen eine 5 cm dicke Heizölschicht über einer 15 cm dicken Wasserschicht befand [17]. Außer der Brandleistung wurden bei den Versuchen die Zu- und/oder Abluftmengen, die Luftgeschwindigkeiten in Brandherdnähe und die Aktivierungszeit der Lüftung variiert.

Über die Tunnellänge verteilt wurden insgesamt 15 Messquerschnitte („loops“) eingerichtet, in den folgende Parameter erfasst wurden:

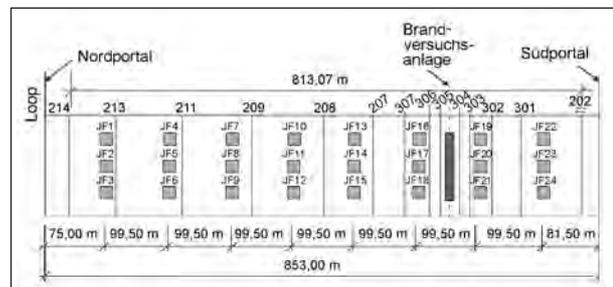


Bild 4-39: Anordnung der Strahlventilatoren [15]

- Strömungsgeschwindigkeit,
- Temperatur,
- Gaskonzentrationen (CO, CO₂, CH₄),
- Rauchausbreitung und Sichtverhältnisse.

Zur Berücksichtigung des Einflusses von stehenden Fahrzeugen auf die Strömungsverhältnisse wurden bei ausgewählten Versuchen Fahrzeugattrappen zwischen den Messquerschnitten 306 und 208 angeordnet (siehe Bild 4-39). Hierzu wurden rechteckige Stahlplatten in den Tunnel eingebracht. Bei den jeweiligen Versuchen wurden gleichzeitig alle 16 Attrappen eingesetzt.

Die Anfangs- und Randbedingungen von ausgewählten Versuchen sind in Tabelle 4-12 dargestellt. Bei den in Tabelle 4-12 aufgeführten Versuchen kamen keine Fahrzeugattrappen zum Einsatz.

4.2.5.4 Versuchsergebnisse

In Tabelle 4-13 sind die maximalen Durchschnittstemperaturen für den Decken- und Bodenbereich zusammengestellt. Die angegebenen Werte wurden den im Rahmen des Forschungsvorhabens

Versuch Nr.	Deckenbereich			Bodenbereich		
	Max. Temperatur [°C]	Eintritt nach [min]	Messquerschnitt	Max. Temperatur [°C]	Eintritt nach [min]	Messquerschnitt
Querlüftung (A = 36 m ²)						
103	1.368	7	205	583	30	205
110	1.365	5,5	305	387	3	305
Längslüftung (A = 60 m ²)						
615b	1.086	2	305	430	16	304
625b	1.067	23	304	387	25	203

Tab. 4-13: Maximale Durchschnittstemperaturen ausgewählter Versuche [15]

[15] umgewandelten Versuchsdateien des MTFVP entnommen.

Aus Tabelle 4-13 ist zu ersehen, dass die höchsten Temperaturen bei den Versuchen mit Querlüftung bei gleichzeitiger Verringerung des Verkehrsraumquerschnittes durch die Zwischendecke ermittelt wurden. Bei Versuch 103 wurden im Deckenbereich nach ca. 7 min Durchschnittstemperaturen von 1.368 °C ermittelt. Dieses Temperaturniveau wurde für ca. 14 min gehalten. Bei Versuch 110 wurden im Deckenbereich nach ca. 5,5 min ebenfalls Temperaturen dieser Größenordnung ermittelt und für eine Dauer von ca. 10 min gehalten. Temperaturen von mehr als 1.300 °C im Deckenbereich wurden auch bei Versuchen mit Halbquerlüftung bei gleichzeitiger Verringerung des Verkehrsraumquerschnittes durch die Zwischendecke ermittelt (Versuche 113a, 115a, 217a, 235, 309a, 312a und 319a). Diese Temperaturen wirkten jedoch über eine kürzere Dauer als bei den Versuchen 103 und 110 ein. Bei den Versuchen mit Längslüftung und ausgebauter Zwischendecke wurden im Deckenbereich kurzzeitig Durchschnittstemperaturen von maximal 1.086 °C ermittelt.

Die Durchschnittstemperaturen im Bodenbereich sind deutlich niedriger als im Deckenbereich und liegen in Größenordnungen von maximal 400 °C bis 600 °C.

Bei einigen Versuchen war im Boden- und/oder Deckenbereich auch keine nennenswerte Temperaturerhöhung festzustellen.

Die Temperatureinwirkungen auf die Ventilatoren blieben während des Versuchsprogramms relativ gering. Im Einlauf der Ventilatoren (Abstand zum Brandherd 213 m) wurden bei Brandleistungen von 20 MW maximal 107 °C, von 50 MW 124 °C und bei 100 MW 163 °C gemessen.

Die Bedeutung des MTFVP besteht darin, dass Strategien entwickelt wurden, durch deren Anwendung bzw. Kombination ein Ausgleich von Auftrieb und äußeren atmosphärischen Bedingungen erreicht und das Zurückströmen von Rauch bei Tunnelbränden (sog. „Backlayering“) wirkungsvoll verhindert werden kann. Das Ziel des Programms, die Datenlage zum Verhalten von Hitze und Rauch bei Bränden in Straßentunneln und damit die Bemessung von Lüftungsanlagen für den Brandfall zu verbessern, wurde ebenfalls erreicht.

4.2.6 Benelux-Tunnel (NL/B)

4.2.6.1 Anlass und Zielsetzung

In den vergangenen Jahren wurde in den Niederlanden eine Reihe von langen Verkehrstunneln geplant und realisiert. Gleichzeitig ereigneten sich in mehreren europäischen Verkehrstunneln verheerende Brände (siehe Kapitel 4.1). Brandversuche wurden bisher vornehmlich in Tunneln durchgeführt, die nicht den Querschnitts- und Verkehrsverhältnissen eines heute üblichen Verkehrstunnels entsprechen. Aus diesem Grund sah sich das niederländische Verkehrsministerium veranlasst, in diesem Zusammenhang auftretende Fragen zur realen Brandentwicklung, zum Selbststretungsverhalten der Tunnelnutzer und zu den Selbststretungsmöglichkeiten im Rahmen einer Serie von Großversuchen und Studien klären zu lassen. Die Durchführung und die Auswertung dieser Untersuchungen werden im Bericht des niederländischen Verkehrsministeriums [20] und einer weiteren Veröffentlichung [19] beschrieben. Soweit nicht anders gekennzeichnet, basieren die weiteren Ausführungen auf diesen Quellen. Die Untersuchungen erfolgten in den Jahren 2000/2001 und wurden von zahlreichen Beteiligten unterstützt. Im Einzelnen sollten folgende Fragestellungen untersucht werden:

- Ausbreitung von Hitze und Rauch und deren Auswirkung auf die Selbstrettung,
- Einfluss der Längslüftung auf Brandentwicklung, Brandleistung und Überlebensbedingungen,
- Auswirkungen einer Sprinkleranlage auf Brandentwicklung, Ausbreitung von Rauch und Dampf, Temperatur,
- Leistungsfähigkeit von Brandmeldesystemen,
- Sichtbarkeit von Fluchtwegmarkierungen und
- Genauigkeit von CFD-Simulationen.

Weiterhin sollten Einsatzkräfte Einblick in das Verhalten von Bränden in Tunneln erhalten.

4.2.6.2 Versuchsobjekt

Die Großversuche wurden im neu gebauten Zweiten Benelux-Tunnel durchgeführt. Der Benelux-Tunnel verbindet im Zuge der Autobahn A 4 das Nord- und das Südufer der Nieuwe Maas und befindet sich ca. 7 km westlich von Rotterdam entfernt. Der Zweite Benelux-Tunnel wurde im Absenkverfahren neben dem bestehenden Benelux-Tunnel hergestellt. Einen Überblick über die Nutzung der insgesamt sechs Tunnelröhren gibt Bild 4-40.

Der Innenausbau der vom Fahrzeugverkehr genutzten Tunnelröhren stellt sich folgendermaßen dar:

- Fahrbahnoberfläche: Gussasphalt,
- Wände bis $h = 0,9$ m: Betonbarrieren,
- Wände von $h = 0,9$ bis $3,6$ m: keramische Verkleidung,
- Wände ab $h = 3,6$ m und Decke: Brandschutzplatten ($d = 27$ mm).

Die Brandversuche wurden in der 840 m langen Röhre D des Tunnels durchgeführt. Die Röhre D ist für Richtungsverkehr konzipiert. Sie weist einen Rechteckquerschnitt von 9,80 m Breite und 5,10 m Höhe auf. Die Röhre besitzt eine maximale Längsneigung von 4,4 %. Der tiefste Punkt der Gradienten befindet sich auf halber Länge. Die Röhre verfügt über eine Längslüftung mittels an der Decke montierter Strahlventilatoren. Die Anordnung der Ventilatoren zeigt Bild 4-41.

4.2.6.3 Versuchsdurchführung

Für die Versuche wurden die Röhren C und D gesperrt sowie die dort vorhandene Beleuchtung und Kommunikationseinrichtungen ausgebaut. Der Brandherd wurde in Röhre D 265 m von der Nord-

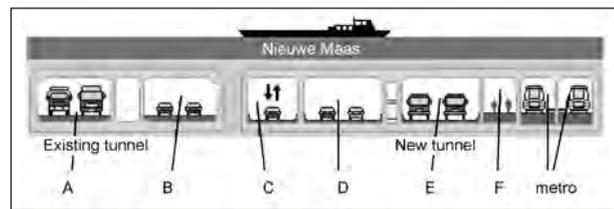


Bild 4-40: Überblick über die Nutzung des Zweiten Benelux-Tunnels [20]

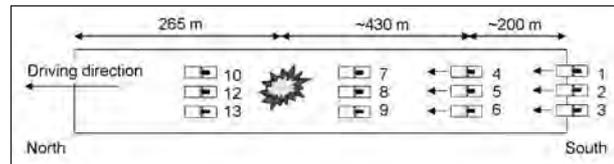


Bild 4-41: Anordnung der Strahlventilatoren [20]

ausfahrt entfernt in der in Fahrtrichtung rechten Fahrspur eingerichtet. Zum Schutz der Tunnelkonstruktion wurden Wände, Boden und Decke 35 m ober- und unterhalb des Brandherdes mit zusätzlichen Brandschutzplatten verkleidet. Die Straßenoberfläche wurde im Umkreis von 15 m um den Brandherd durch weitere Brandschutzplatten und eine Sandschicht geschützt. Die Messeinrichtungen wurden auf einer Länge von 200 m im Abstrom- und 100 m im Anstrombereich des Brandherdes installiert. Alle weiteren Einrichtungen wurden aus Sicherheitsgründen in der angrenzenden Röhre C untergebracht. Bei den Versuchen wurden die Ventilatoren 1 bis 6 (siehe Bild 4-41) so betrieben, dass stufenweise eine Luftgeschwindigkeit von 0 m/s bis maximal 6 m/s in Fahrtrichtung erreicht wurde. Aufgrund der schwierigen Windbedingungen wurde vor jedem Versuch die Schaltung der einzelnen Ventilatoren versuchstechnisch ermittelt.

Während der Versuche wurden folgende Parameter erfasst:

- Luft- und Rauchtemperatur,
- Brandleistung,
- Wärmestrahlung,
- Rauchausbreitung und -dichte,
- Luftgeschwindigkeit im Anstrom,
- Sichtverhältnisse und
- Gaskonzentration (nur CO-Gehalt).

4.2.6.3.1 Wannenbrände

Bei den Versuchen 1 bis 4 bestand der Versuchsaufbau aus vier Wannen (je $L \times B \times H =$



Bild 4-42: Durchführung eines Wannenbrandversuches [20]

1,80 m x 1,00 m x 0,10 m), die mit einem Abstand von 0,5 m zueinander aufgestellt wurden. Die Wannen verfügten über eine doppelte Hülle zur Wasserkühlung. Die Wannen wurden durch Zuleitungen vom Boden her gefüllt. Als Brandstoff wurde ein Gemisch aus 60 M.-% n-Heptan und 40 M.-% Toluol gewählt, um die Hitze- und Rauchentwicklung eines üblichen Fahrzeugbrandes zu erreichen. Die Brandleistung wurde durch den Brandgutzufluss und die Temperatur in den Wannen ermittelt. Die Zündung erfolgte manuell mit einer Fackel, nachdem die Wannen zu je einem Viertel gefüllt waren. Bei den Versuchen 1 und 2 wurde eine Wanne (siehe Bild 4-42), bei den Versuchen 3 und 4 alle vier Wannen benutzt. Während der Versuche wurde je ein Container im Anstrom- und im Abstrombereich des Brandherdes positioniert, um den Verkehr im Tunnel zu simulieren (siehe Bild 4-42).

4.2.6.3.2 Fahrzeug- und Frachtbrände

Bei diesen Versuchen wurde die Brandleistung über die Gewichtsabnahme der Brandlast ermittelt. Die Brandlast wurde dazu auf einer Wiegeplattform aufgestellt (siehe Bild 4-43), die auf vier Kraftmessdosen lagerte. Die Wiegeplattform besaß eine Grundfläche von 6 m x 4 m, ihre Oberfläche befand sich 0,40 m über der Straßenoberfläche.

Bei den Versuchen 5 bis 7 wurden drei Opel Kadett mit Modelljahr nach 1990 ausgewählt. Die Zündung erfolgte jeweils mittels einer kleinen Benzinwanne unter dem Fahrersitz.

Für Versuch 11 wurde ein Lieferwagen Citroën Jumper verwendet. Als Ladung wurden 18 EURO-Paletten aus Holz mit einem Gewicht von je 22 kg und drei Autoreifen zugegeben. Die Zündung erfolgte mittels einer Benzinwanne auf dem Fahrersitz.



Bild 4-43: Aufstellung für Pkw-Brandversuch [20]



Bild 4-44: Brandversuch mit Alu-Frachtraum [20]

Für die Versuche 8 bis 10 wurde eine Ladefläche vergleichbar mit der eines kleineren Lkw eingerichtet, die Außenabmessungen von L x B x H = 4,5 m x 2,4 m x 2,5 m besaß. Der Boden bestand aus Stahlblech, auf dem ein Rahmen aus Stahlprofilen montiert war. Über die Rahmenseiten wurde eine Kunststoffplane gespannt, die Rückseite blieb offen. Die Ladung wurde durch vier Stapel von je neun EURO-Paletten aus Holz simuliert. Zusätzlich wurde auf jedem Stapel ein Autoreifen platziert. Es wurde eine maximale Brandleistung von ca. 20 MW angestrebt. Die Zündung erfolgte durch zwei kleine Benzinwannen, die auf dem Boden seitlich zwischen den Stapeln angeordnet wurden.

Für die Versuche 12 und 13 wurden eine Ladefläche und eine Ladung wie in den Versuchen 8 bis 10 verwendet. Anstelle der Plane kamen Aluminiumbleche zum Einsatz. Die Rückseite blieb offen. Bild 4-44 zeigt die Durchführung eines solchen Versuches.

Bei Versuch 14 wurden vier Stapel von je neun EURO-Paletten aus Holz in je zwei Reihen nebeneinander aufgestellt. Die Ladung wurde nicht abge-

deckt. Zusätzlich wurden sechs Reifen zugegeben. Die Zündung erfolgte durch kleine Benzinwannen, die in die Mitte der beiden Reihen gestellt wurden.

Bei den Versuchen wurden im Anstrom- und Abstrombereich des Brandherdes verschiedene Attrappen aufgestellt, um Verkehrssituationen im Tunnel zu simulieren. Bei den Versuchen 5 bis 10 wurde in beiden Bereichen je ein Container auf 0,40 m hohe Stahlprofile gestellt (siehe Bild 4-43). Die Container entsprachen dem ISO-Standard (L x B x H = 6 m x 2,44 m x 2,59 m). Der geringste Abstand der Container zum Brandherdzentrum betrug 13 m. Bei den Versuchen 11 bis 14 wurde die Leistungsfähigkeit einer Sprinkleranlage untersucht. Dabei wurden im Anstrombereich des Brandherdes ein Container und im Abstrombereich ein leerer LPG-Tanker mit einem Fassungsvermögen von ca. 16 m³ aufgestellt (siehe Bild 4-44). Der Abstand des Tankers zum Brandherd betrug bei Versuch 11 ca. 10 m und bei den Versuchen 12 bis 14 ca. 5 m.

4.2.6.4 Versuchsergebnisse

Für die skizzierten Fragestellungen sind in den vorliegenden Quellen [19, 20] keine Temperaturverläufe über die Zeit dargestellt. Die Darstellung und Auswertung der Brandentwicklung basieren auf der Darstellung der über die Zeit erreichten Brandleistung. Eine solche Darstellung ist exemplarisch für die Frachtbrände in Bild 4-45 wiedergegeben.

Temperaturmesswerte werden in [19] gar nicht und in [20] lediglich für die Wannenbrände angegeben, um die mit CFD-Simulationen erreichten Prognosen bewerten zu können. Die Temperaturmesswerte werden dabei für die Tunnelmitte in Höhen von 2 m bzw. 5 m für eine maximale Branddauer von 1.000 s (ca. 17 min) mitgeteilt. Da der in [34] enthaltene Überblick über Ergebnisse von Brandversuchen in Tunneln auch die Versuche im Zweiten Benelux-Tunnel berücksichtigt, werden diese mit weiteren Versuchsergebnissen aus [19, 20] in Tabelle 4-14 zusammengestellt.

Bei den Brandversuchen im Zweiten Benelux-Tunnel wurden Deckentemperaturen von maximal 600 °C erreicht. Aus den Versuchsergebnissen in Bild 4-45 und Tabelle 4-14 kann außerdem geschlossen werden, dass die Lüftungsbedingungen einen maßgeblichen Einfluss auf die Brandentwicklung und Intensität sowie die Temperaturen im Deckenbereich nehmen. Besonders deutlich wird dies bei den Pkw-Brandversuchen (Versuche 6 und 7) und den Frachtbrandversuchen (Versuche 8 bis 10).

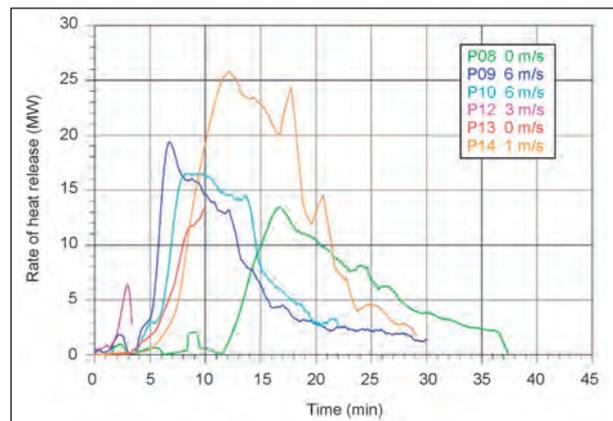


Bild 4-45: Brandleistungen bei Frachtbränden [20]

Bei Versuch 7 führt die starke Luftgeschwindigkeit zu einer Verzögerung der Brandentwicklung, sodass die maximale Brandleistung von 5 MW erst nach 38 min erreicht wird, während bei Versuch 6 mit geringer Luftgeschwindigkeit die maximale Brandleistung von 4 MW bereits nach 8 min erreicht wird (siehe Tabelle 4-14). Beide Versuche unterscheiden sich auch deutlich hinsichtlich der erreichten Maximaltemperatur im Deckenbereich. In Versuch 7 werden lediglich 110 °C und in Versuch 6 210 °C erreicht.

Versuch 10 stellt eine Wiederholung von Versuch 9 dar. Bei den Versuchen wird die maximale Brandleistung von 16 MW bzw. 19 MW innerhalb von 8 min bzw. 6,5 min erreicht. Bei Versuch 8 ist nur eine geringe Luftgeschwindigkeit vorhanden. Bei diesem Versuch verläuft die Brandentwicklung gegenüber Versuch 9 und 10 um den Faktor 2 zeitlich verzögert, denn die maximale Brandleistung von 13 MW wird erst nach 16 min erreicht. Allerdings wurde bei Versuch 8 mit 400 °C eine deutlich höhere Temperatur im Deckenbereich als mit 290 °C bzw. 300 °C bei den Versuchen 9 und 10 gemessen.

Während bei den Pkw-Brandversuchen eine starke Luftgeschwindigkeit zu einer Verzögerung der zeitlichen Brandentwicklung geführt hat, war bei den Frachtbrandversuchen das Gegenteil der Fall. Diese Aussagen können nicht ohne weiteres verallgemeinert werden, da für die Brandentwicklung zusätzlich die Lage der Zündquelle im Brandgut und zur Luftströmung ausschlaggebend ist. Als Gemeinsamkeit ist bei den Pkw- und Frachtbrandversuchen jedoch festzustellen, dass eine verringerte Luftgeschwindigkeit bei vergleichbarer Brandlast zu höheren Temperaturen im Deckenbereich geführt hat.

Die Brandentwicklung bei den Versuchen 12 und 13 wurde durch die Aktivierung der Sprinkleranlage frühzeitig abgebrochen.

Nr.	Versuch	Brandlast [MJ]	Mechan. Lüftung	Luftgeschwin- digkeit im Anstrom [m/s]	Sprinkler	Brandleistung		Maximale Deckentemperatur [°C]		
						Maximal- wert [MW]	Eintritt nach [min]	in Brandnähe [34]	in Tunnelmitte für $t \leq 1.000$ s [20]	
1	1 Wanne	k. A.	keine	1-1,5	aus	4	4	k. A.	150 (10 m Abstrom)	
2a	1 Wanne		aktiviert	0-5		3,5	5		145 (10 m An- u. Abstrom)	
2b	1 Wanne		aktiviert	2-5		3,5	7			
3a	4 Wannen		fast keine	0-1,7		12	9	470	400 (10 m Abstrom)	
3b	4 Wannen		aktiviert	1,7-5		12	18	250		
4	4 Wannen		aktiviert	1-5		12	10	k. A.		
5	Pkw		fast keine	0-2,5		k. A.	k. A.			
6	Pkw		fast keine	ca. 1,5		4	8			210
7	Pkw		aktiviert	4,5-6		5	38			110
8	36 Paletten + Plane		11.850	fast keine		0,5-1,8	aktiviert	13	16	k. A.
9	36 Paletten + Plane	aktiviert		4-6	19	6,5		290		
10	36 Paletten + Plane	aktiviert		ca. 5	16	8		300		
11	Lieferwagen	k. A.	fast keine	1-1,6	aktiviert	7	13	k. A.		
12	36 Paletten + Aluhülle	11.850	aktiviert	ca. 3		6	3			
13	36 Paletten + Aluhülle		aktiviert	0-3		13	10			
14	72 Paletten, offen	23.700	aktiviert	0-2,5		25	12			600

k. A. = keine Angabe

Tab. 4-14: Randbedingungen und Ergebnisse der Versuche [18, 19, 20]

4.2.7 Runehamar-Tunnel (N)

4.2.7.1 Anlass und Zielsetzung

Die Europäische Union sah sich durch die jüngsten Brände in Straßentunneln veranlasst, eine Reihe von Forschungsvorhaben, darunter das Vorhaben UPTUN, zu initiieren. Die Abkürzung UPTUN steht für „Cost-effective, sustainable and innovative UPgrading methods for fire safety in existing TUNnels“. Das Forschungsvorhaben zielt auf Verfahren zur Nachrüstung des baulichen Brandschutzes bestehender Tunnel ab. An dem Vorhaben waren insgesamt 41 Partner, an den Versuchen die niederländische TNO, das Swedish National Testing and Research Institute und die norwegische SINTEF NBL AS, beteiligt.

UPTUN beinhaltet u. a. die Untersuchung der Entwicklung und Ausbreitung von Sattelauflegerbränden in Tunneln, da deren Ladung entscheidenden Einfluss auf den Ausgang der Brände nahm (siehe Kapitel 4.1). Das Brandverhalten von Sattelaufle-

gern in Tunneln wurde bis dahin durch das Projekt EUREKA PROJECT EU 499-FIRETUN (siehe Kapitel 4.2.4) und die Brandversuche im Zweiten Benelux-Tunnel (siehe Kapitel 4.2.6) untersucht. Das Projekt UPTUN sollte eine systematische Untersuchung von Sattelauflegerbränden unter Variation des Brandgutes, der Brandgutzusammensetzung und der Lüftungsbedingungen erbringen. Zusätzlich sollte die Brandausbreitung zwischen einzelnen Fahrzeugen untersucht werden. Hierzu wurden kleinmaßstäbliche Brandversuche im Labor und großmaßstäbliche Brandversuche in einem aufgegebenen Straßentunnel durchgeführt.

4.2.7.2 Laborversuche

Zur Vorbereitung der großmaßstäblichen Versuche wurden mehrere Vorversuche unter einem Industriekalorimeter durchgeführt. Die Vorversuche dienten u. a. der Abschätzung der Brandlast, der Brandleistung sowie der Rauch- und Brandgasentwick-

Laborversuch	Max. Brandleistung [MW]	
	Im Labor ermittelt	Für Großversuche geschätzt
Holz- u. Kunststoffpaletten	7,75	24 x 7,75 = 186
Holzpaletten u. PUR-Matratzen	6,96	24 x 6,96 = 167
Kartons u. PS-Tassen	3,96	20 x 3,96 = 79
PUR = Polyurethan, PS = Polystyrol		

Tab. 4-15: Maximale Brandleistung bei Laborversuchen und Abschätzung für Großversuche [23]

lung der Brandgüter, die bei den späteren Großversuchen verwendet werden sollten [21].

Sattelaufleger transportieren eine Vielzahl von Gütern. Daher entschied man sich, Mischungen aus Zellulose (ca. 80 M.-%) und Kunststoff (ca. 20 M.-%) zu verwenden, die eine typische Ladung darstellen können. Folgende Ladungen wurden untersucht [23]:

1. Holz- und Kunststoffpaletten,
2. Holzpaletten und Matratzen aus Polyurethan,
3. Kartons mit Tassen aus Polystyrol.

Die Ladung wurde jeweils in 1,10 m Höhe auf zwei Holzpaletten ca. 1,5 m hoch aufgestapelt und durch zwei mit Heptan getränkte Faserplatten entzündet [23]. Die Menge des Brandgutes belief sich je nach Versuch auf 1/20 bis 1/24 der bei den späteren Großversuchen verwendeten Brandgutmenge für die Sattelauflegerladung. In Tabelle 4-15 ist die bei den Laborversuchen ermittelte maximale Brandleistung einschließlich der Abschätzung für die Großversuche angegeben.

4.2.7.3 Großversuche

4.2.7.3.1 Versuchsobjekt

Für die Durchführung der großmaßstäblichen Versuche wurde der Runehamar-Tunnel ausgewählt [21, 25]. Der Tunnel befindet sich an der norwegischen Westküste ca. 400 km von Oslo entfernt. Bei dem Tunnel handelt es sich um einen ehemaligen Straßentunnel mit zwei Fahrstreifen, der Anfang der 1960er Jahre im Gneis aufgeföhren wurde. Anfang der 1990er Jahre wurde der Tunnel aufgegeben, da die Straße im weiteren Verlauf durch Rutschungen unpassierbar wurde. Der Tunnel verläuft entlang eines Fjordes in Ost-West-Richtung und weist eine Länge von ca. 1.650 m auf. Seine Längsneigung beträgt 1 % bis 3 %. Die lichte Weite im Sohlbereich



Bild 4-46: Ostportal des Runehamar-Tunnels [24]



Bild 4-47: Tunnelröhre des Runehamar-Tunnels [25]

beträgt ca. 9 m, die lichte Höhe ca. 6 m. Die Querschnittsfläche beträgt etwa 50 m². Einen Eindruck von der baulichen Situation vermitteln Bild 4-46 und Bild 4-47.

4.2.7.3.2 Versuchsdurchführung

Im September 2003 wurden insgesamt vier Brandversuche mit Sattelauflegerladungen durchgeführt. Der Brandherd wurde in einer Entfernung von 563 m (Station 0 m) vom Westportal eingerichtet (siehe Bild 4-48). Im Brandherdbereich wurde auf einer Länge von 75 m ein Stahlgerüst errichtet, an dem Brandschutzplatten zum Schutz der Tunneldecke (von -21,5 m bis +53,5 m) und der Tunnelwände (von -12,5 m bis +26,5 m) vor Brandeinwirkung befestigt wurden [28]. In den Bereichen ohne Brandschutzplatten wurde das Gerüst durch eine keramische Abdeckung geschützt. Bild 4-50 zeigt die Anordnung des Gerüsts im Tunnelquerschnitt. Die durch die Brandschutzplatten vorgegebene Querschnittsfläche beträgt etwa 28 m².

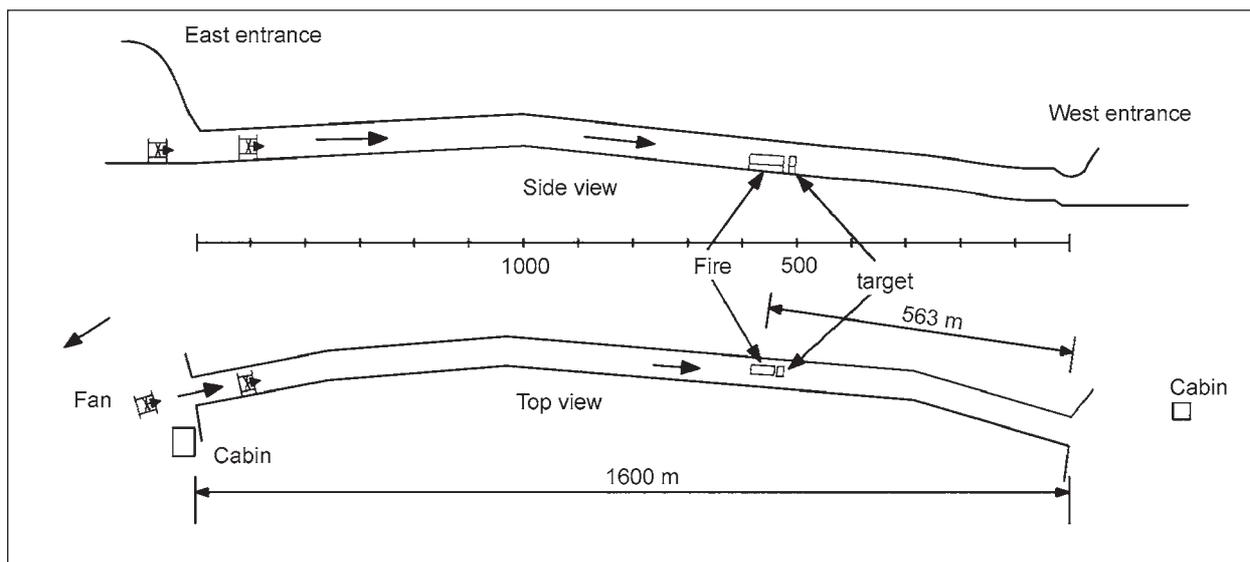


Bild 4-48: Positionierung von Ladung, Hindernis und Lüftern [29]

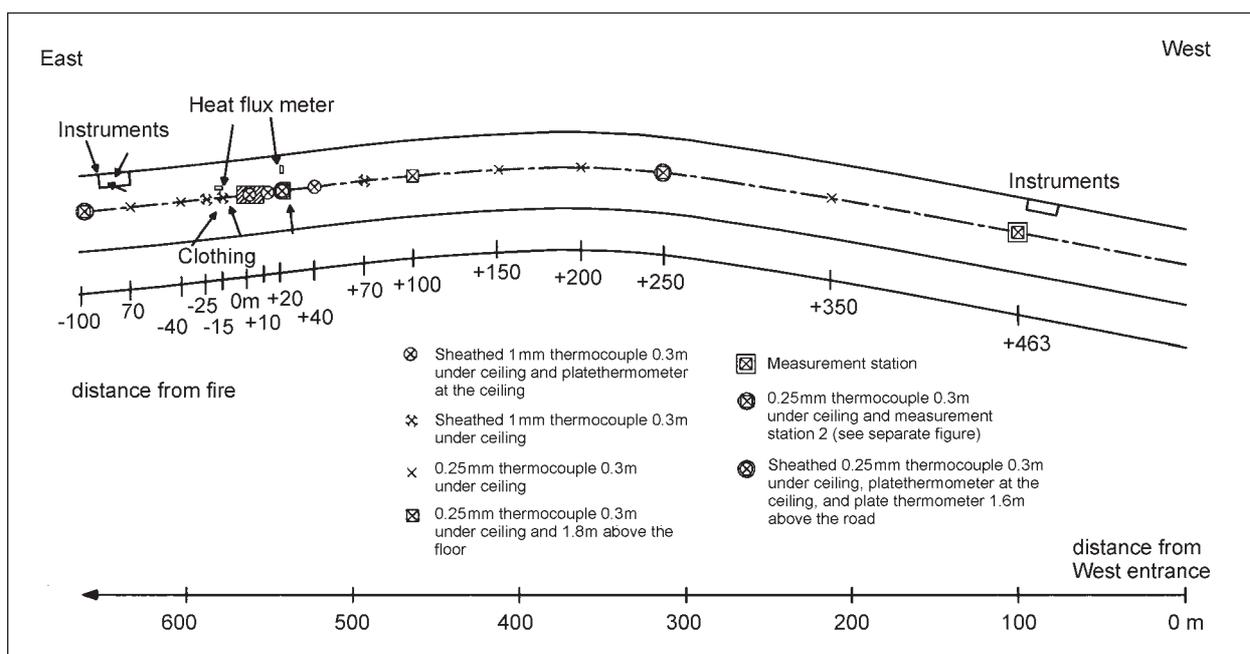


Bild 4-49: Überblick über die Messstationen [27]

Die Lüftung im Tunnel erfolgte durch zwei mobile Lüfter (siehe Bild 4-48). Ein Lüfter wurde 12 m vor dem Ostportal, der andere 50 m bis 60 m vom Ostportal entfernt im Tunnel aufgestellt [23]. Mit beiden Lüftern konnte eine Längsluftgeschwindigkeit von 3 m/s gemessen bei Station +458 m erzeugt werden. Die durchschnittliche Längsluftgeschwindigkeit betrug 1 min vor Zündung bei Station -50 m rd. 3 m/s.

Während der Brandversuche wurden folgende Parameter erfasst [21, 28]:

- Brandleistung,

- Gaskonzentrationen (O_2 , CO_2 , CO , HCN , Isozyanate),
- Gas- und Oberflächentemperaturen,
- Wärmestrahlung,
- Strömungsgeschwindigkeit,
- Rauchausbreitung und -dichte.

Die Messung der Gastemperaturen erfolgte in einem Bereich von 100 m in Strömungsrichtung vor (-100 m) bis 463 m in Strömungsrichtung nach dem Brandherd (+463 m) [27]. Als Messinstrumente wur-

den Thermolemente verwendet. Die Temperaturen wurden 0,3 m unter der Verkleidung aus Brandschutzplatten und an zwei Stationen zusätzlich 1,8 m über der Fahrbahn gemessen. An den Stationen 0 m, 10 m, 20 m und 40 m wurde im Deckenbereich zusätzlich je ein Plattenthermometer eingesetzt. Zur Ermittlung der Wärmestrahlung wurden in Brandherdnähe zwei Wärmestrahlungsmesser aufgestellt. Einen Überblick über die Anordnung der Messeinrichtungen im Tunnel gibt Bild 4-49.

Bei drei Versuchen wurden wie bei den Vorversuchen im Labor Mischungen aus Zellulose (ca. 80 M.-%) und Kunststoff (ca. 20 M.-%) verwendet. In einem weiteren Versuch wurden Möbel verwendet. Die Möbelladung wurde ausgewählt, um Vergleiche zum Sattelzugversuch des Projektes EU-REKA PROJECT EU 499 – FIRETUN (siehe Kapitel 4.2.4.3.5) durchführen zu können [27]. Tabelle 4-16 gibt einen Überblick über die Zusammenstellung der Ladung bei den einzelnen Versuchen. Die Ladung wurde jeweils auf einem Spanplattenregalsystem bestehend aus insgesamt zehn Elementen angeordnet und mit einer Plane aus Polyester abgedeckt, um einen Sattelaufleger nachzustellen [27]. Auf die Simulation eines Zugfahrzeuges wurde verzichtet, da dessen Anteil an der Gesamtbrandleistung mit weniger als 5 % und somit im Sinne der Zielsetzung als vernachlässigbar eingestuft wurde [21].

Die Gesamtabmessungen der Ladung betragen 10,45 m in der Länge, 4,50 m in der Höhe, 2,90 m in der Breite bei einer Bodenhöhe von 1,10 m [27]. Diese wurden bei allen Versuchen beibehalten. Die Ladung wurde etwa mittig im Tunnelquerschnitt aufgestellt (siehe Bild 4-50). Zusätzlich wurde bei den Versuchen T1 bis T3 in Strömungsrichtung ca. 15 m von der eigentlichen Ladung entfernt ein Hin-

dernis, bestehend aus einer Reihe der eigentlichen Ladung in voller Höhe, aufgebaut [23]. Das Hindernis sollte zur Untersuchung der Brandausbreitung auf benachbarte Fahrzeuge dienen. Außerdem wurden zu diesem Zweck bei einzelnen Versuchen an verschiedenen Stellen im Abstrombereich zusätzlich kleinere Objekte, wie Holzstücke, Kunststoffstäbe oder eine Holzpalette, angeordnet. Die Zusammensetzung des Hindernisses bei den einzelnen Versuchen ist in Tabelle 4-16 angegeben.

Die Zündung der Ladung erfolgte jeweils durch zwei mit Heptan getränkte Faserplattenwürfel, die an der angeströmten Frontseite zwischen die Lücke der unteren beiden Paletten gesteckt wurden (siehe „Ignition“ in Bild 4-51) [27].

Während des Versuches T1 lösten sich außerhalb des mit Brandschutzplatten geschützten Bereiches Felsstücke von der Tunnelwandung ab [27]. Im Abstrombereich war hiervon die gesamte Tunneldecke bis zum Westportal betroffen. Während des Versuches T2 durchschlugen schließlich Felsstücke die Brandschutzplatten. Daraufhin wurde

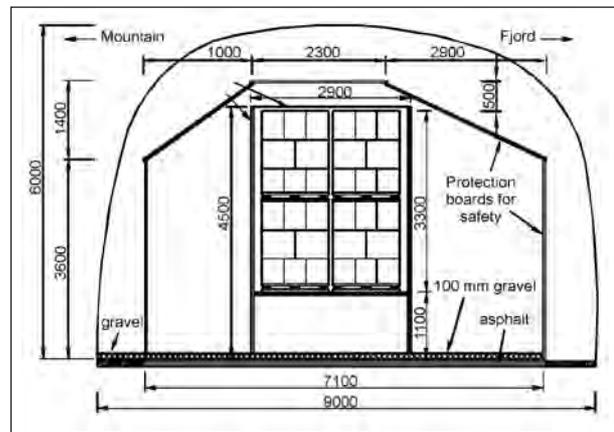


Bild 4-50: Anordnung der Ladung im Tunnelquerschnitt [28]

Versuch-Nr.	Beschreibung des Brandgutes für		Gewicht ¹⁾ [kg]		Brandlast [GJ]
	Ladung	Hindernis	Ladung	Hindernis	
T1	380 Holz- u. 74 Kunststoffpaletten (PE)	32 Holz- u. 6 Kunststoffpaletten (PE)	10.084	827	240
T2	216 Holzpaletten u. 240 PUR-Matratzen	20 Holzpaletten u. 20 PUR-Matratzen	6.317	536	129
T3	Möbel/Inventar, Spielzeug, 10 große Gummireifen	Sofa u. Armlehne	7.491 (+ 800 für Reifen)	215	152
T4	18.000 PS-Tassen in 600 Kartons u. 40 Holzpaletten	1.800 PS-Tassen in 40 Kartons u. 4 Holzpaletten	2.836	284	67

¹⁾ Angabe ohne Regalsystem (ca. 200 kg),
PE = Polyethylen, PUR = Polyurethan, PS = Polystyrol

Tab. 4-16: Beschreibung der Brandgüter für die Großversuche [23, 27]

aus Sicherheitsgründen bei Versuch T3 die Mitte der Ladung um 2 m in Anstromrichtung versetzt (von 0 m nach -2 m). Bei Versuch T4 wurde um weitere 5 m versetzt (nach -7 m). Die Anordnung der Thermoelemente blieb jedoch unverändert.

4.2.7.3.3 Versuchsergebnisse

In Bild 4-51 ist die Anordnung der Thermoelemente in der Ladung dargestellt. Bild 4-52 zeigt exemplarisch den Temperaturverlauf in der Ladung für die Versuche T1 und T3. Nach erfolgter Zündung zeigen die Thermoelemente in der Nähe der Zündquelle (siehe TC-03 u. TC-04 in Bild 4-51) eine Aufheizphase von wenigen Minuten an [30]. Bereits 10 min nach Zündung hat sich der Brand auf die gesamte Ladung erstreckt, wobei Temperaturen von 800 °C bis 1.000 °C erreicht wurden. Im weiteren Brandverlauf steigen bei den Versuchen T1 bis T3 die Temperaturen in der Ladung bis auf Werte von 1.100 °C und 1.200 °C (T1 nach 30 min) an. Nach etwa 20 min bis 25 min lassen die Thermoelemente nahe der Zündquelle ein Absinken der Temperaturen erkennen, das die von der Zündquelle entfernten Thermoelemente ebenfalls nach 40 min bis 45 min andeuten.

Die über dem Brandherd im Deckenbereich gemessenen Temperaturen sind in Bild 4-53 über die Zeit aufgetragen. In der Anfangsphase zeigen die Aufzeichnungen für die Versuche T2 bis T4 in Bild 4-53 einen ähnlichen Verlauf. Nach einer Verzögerung von wenigen Minuten, in denen sich die Ladung aufheizt und der Brand ausbreitet, steigen die Temperaturen innerhalb von ca. 10 min bis auf Maximalwerte von 1.281 °C (T3) bis 1.305 °C (T4) an. Kurz darauf ist ein beginnender Temperaturabfall erkennbar. Bei Versuch T1 vollzieht sich die zeitliche Temperaturentwicklung nach einer etwas stärkeren Verzögerung in ähnlicher Weise, wobei die Temperatur nach 10 min ein vorübergehendes Maximum von etwa 1.100 °C erreicht, anschließend

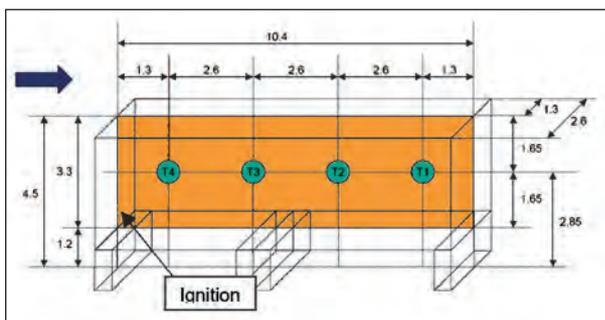


Bild 4-51: Anordnung der Thermoelemente in der Ladung [30]

auf etwa 700 °C abfällt und erneut auf Werte bis knapp 1.200 °C ansteigt. Ein Temperaturabfall ist bei Versuch T1 erst nach 30 min zu erkennen.

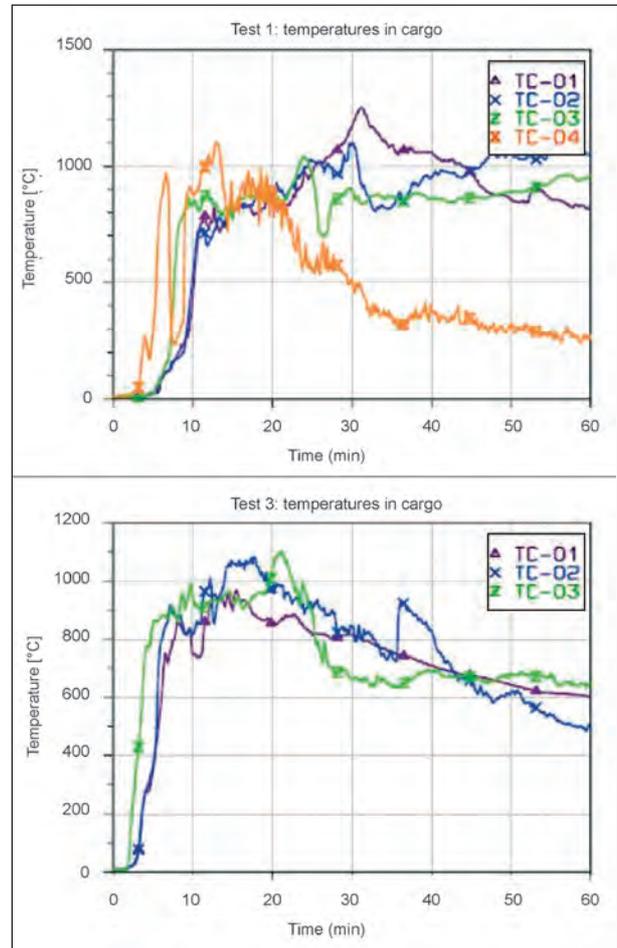


Bild 4-52: Temperaturverlauf in der Ladung für die Versuche T1 und T3 [30]

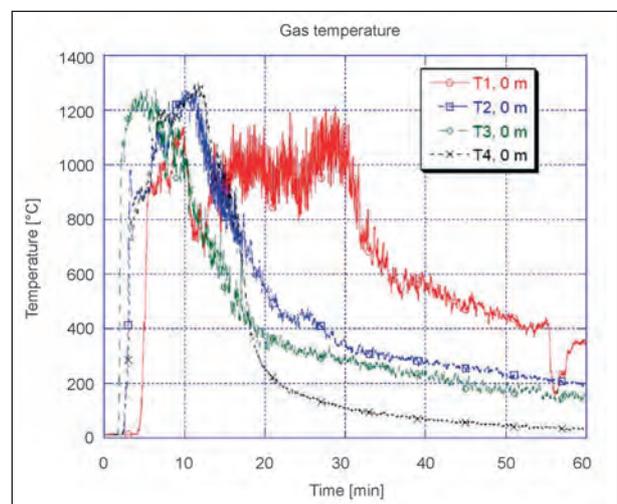


Bild 4-53: Temperaturen im Deckenbereich über dem Brandherd [27] (Aufgrund Versetzung der Ladung: T3, 0 m → +2 m, T4, 0 m → +7 m)

Der plötzliche Abfall der Deckentemperatur bei Versuch T1 nach 10 min (siehe Bild 4-53) wird damit erklärt, dass zu diesem Zeitpunkt die Palettenstapel zusammengestürzt sind und einen großen Haufen bilden [27]. Im Vorfeld wurde bereits erwartet, dass die höchsten Deckentemperaturen aufgrund der Länge und der Neigung sowie der Lüftung auf der Abstromseite der Ladung auftreten. Dieser Effekt hat sich bei Versuch T1 durch den Kollaps anscheinend so verstärkt, dass hier bei Station +10 m nach etwa 25 min die höchsten Deckentemperaturen bei den Versuchen von 1.365 °C erreicht wurden. In Bild 4-54 sind die zeitliche Temperaturentwicklungen bei Versuch T1 für die Stationen 0 m und +10 m gegenübergestellt.

Für den Versuch T1 ist die zeitliche Temperaturentwicklung im Deckenbereich für ausgewählte Stationen des Tunnels in Bild 4-55 und Bild 4-56 aufgetragen. Aus Bild 4-55 ist zu ersehen, dass in Strömungsrichtung in einer Entfernung von 150 m vom Brandherd über einen Zeitraum von ca. 20 min Temperaturen von ca. 400 °C auftraten. Selbst in Strömungsrichtung 458 m vom Brandherd entfernt herrschten über einen langen Zeitraum Temperaturen von ca. 100 °C. Wie aus Bild 4-56 zu erkennen ist, hat sich die Temperaturfront auch entgegen der Strömungsrichtung ausgebreitet. Temperaturen in der Größenordnung von 400 °C wurden bei Station -15 m für einen Zeitraum von ca. 20 min aufgezeichnet. Selbst bei Station -70 m wurden für einen beträchtlichen Zeitraum Temperaturen von über 100 °C gemessen. Durch die hohen Temperaturen werden die umfangreichen Felsabplatzungen im An- und Abstrombereich erklärbar. Die Ursache für die Ausbreitung der Temperaturfront entgegen die Längsluftströmung liegt in dem Zurückströmen des heißen Rauches (sog. „backlayering“), das durch die Reduzierung der Längsluftgeschwindigkeit auf Werte von bis zu 1,5 m/s bei zunehmender Brandentwicklung ausgelöst wurde [23].

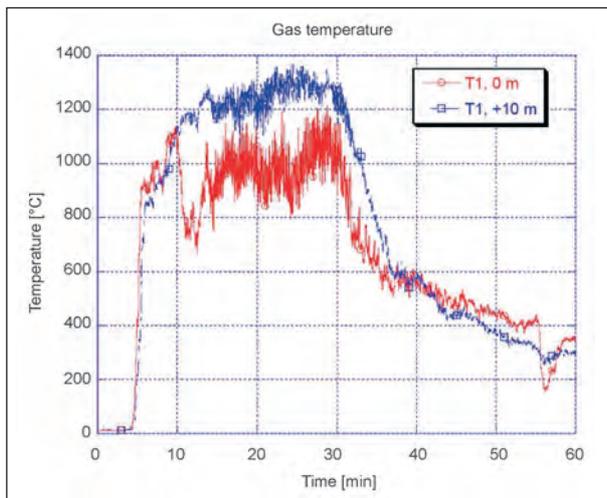


Bild 4-54: Temperaturen im Deckenbereich bei Versuch T1 [27]

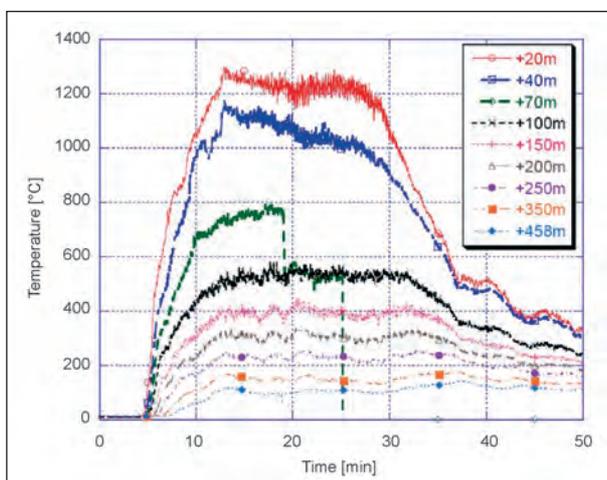


Bild 4-55: Temperaturverteilung im Abstrombereich [29]

Zur Abschätzung der thermischen Beanspruchung der Tunnelwand wurde für alle Versuche die Strahlungstemperatur im Brandherdbereich (T1, T2 und T4: 0 m, T3: +5 m) in 1 m Höhe über dem Boden ermittelt [30]. Aufgrund messtechnischer Gegebenheiten ist hier davon auszugehen, dass die Strahlungstemperatur um etwa 20 °C bis 50 °C über der Temperatur liegt, die an gleicher Stelle mittels Plattenthermometers gemessen worden wäre. Der zeitliche Verlauf der Strahlungstemperaturen ist in Bild 4-57 aufgetragen. Bild 4-57 kann entnommen werden, dass bei Versuch T1 über einen Zeitraum von rd. 30 min durchschnittliche Temperaturen von ca. 900 °C mit Spitzenwerten bis ca. 1.100 °C auftraten. Bei den anderen Versuchen befinden sich Durchschnitts- und Spitzentemperaturen auf einem

Temperaturentwicklung im Deckenbereich für ausgewählte Stationen des Tunnels in Bild 4-55 und Bild 4-56 aufgetragen. Aus Bild 4-55 ist zu ersehen, dass in Strömungsrichtung in einer Entfernung von 150 m vom Brandherd über einen Zeitraum von ca. 20 min Temperaturen von ca. 400 °C auftraten. Selbst in Strömungsrichtung 458 m vom Brandherd entfernt herrschten über einen langen Zeitraum Temperaturen von ca. 100 °C. Wie aus Bild 4-56 zu erkennen ist, hat sich die Temperaturfront auch entgegen der Strömungsrichtung ausgebreitet. Temperaturen in der Größenordnung von 400 °C wurden bei Station -15 m für einen Zeitraum von ca. 20 min aufgezeichnet. Selbst bei Station -70 m wurden für einen beträchtlichen Zeitraum Temperaturen von über 100 °C gemessen. Durch die hohen Temperaturen werden die umfangreichen Felsabplatzungen im An- und Abstrombereich erklärbar. Die Ursache für die Ausbreitung der Temperaturfront entgegen die Längsluftströmung liegt in dem Zurückströmen des heißen Rauches (sog. „backlayering“), das durch die Reduzierung der Längsluftgeschwindigkeit auf Werte von bis zu 1,5 m/s bei zunehmender Brandentwicklung ausgelöst wurde [23].

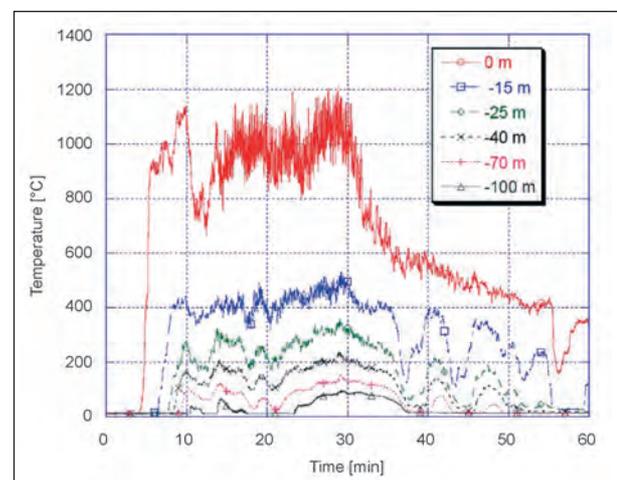


Bild 4-56: Temperaturverteilung im Anstrombereich [29]

niedrigeren Niveau. Bei den Versuchen T2 und T4 traten über einen Zeitraum von rd. 15 min Temperaturen von durchschnittlich ca. 800 °C auf, während die Spitzenwerte mit ca. 1.000 °C für T2 und ca. 850 °C für T4 angegeben werden können. Bei Versuch T3 betragen die durchschnittliche Temperatur für rd. 15 min noch ca. 700 °C und der Spitzenwert ca. 800 °C.

In Bild 4-58 ist die zeitliche Entwicklung der Brandleistung für die vier Versuche aufgetragen. Aus Bild 4-58 ist erkennen, dass der Versuch T1, der die höchste Brandlast (siehe Tabelle 4-16) und die höchste Temperatur im Deckenbereich ergab, auch die höchste maximale Brandleistung erreichte. Die in den einzelnen Versuchen erreichten maximalen Brandleistungen einschließlich der dafür benötigten Zeitdauer sind in Tabelle 4-17 aufgeführt. Der Vergleich der auf den Laborversuchen basierenden Abschätzung für die maximale Brandleistung

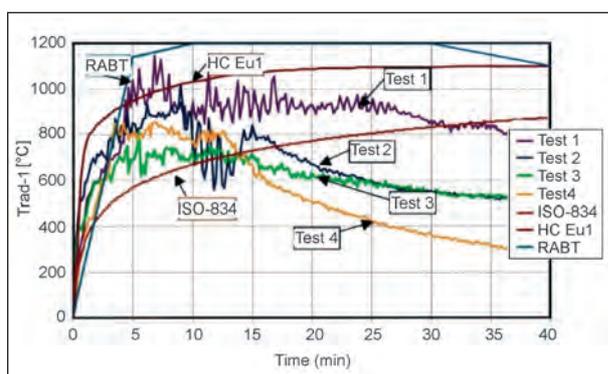


Bild 4-57: Strahlungstemperaturen im Brandherdbereich 1 m über dem Boden [30]

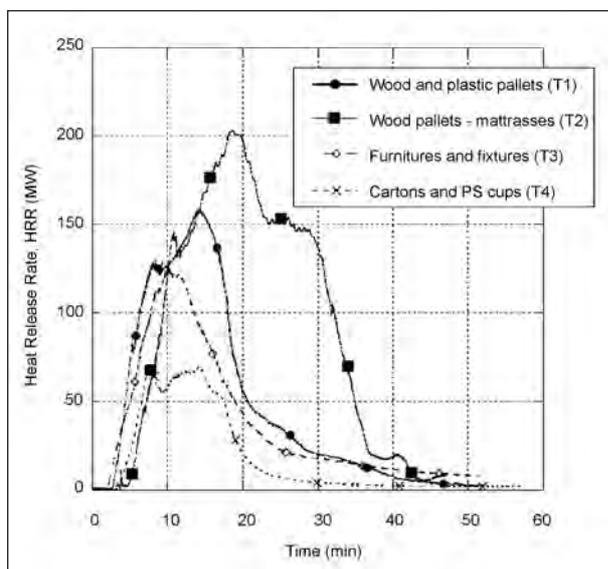


Bild 4-58: Zeitliche Entwicklung der Brandleistung [23]

(siehe Tabelle 4-15) und der bei den Großversuchen ermittelten maximalen Brandleistung (siehe Tabelle 4-17) zeigt unter Berücksichtigung des Brandgutes (siehe Tabelle 4-15 und Tabelle 4-16) eine gute Übereinstimmung in der Größenordnung. Die Zusammenstellung in Tabelle 4-17 zeigt weiterhin, dass zwar die höchste maximale Brandleistung bei Versuch T1 gemessen wurde, aber die schnellste Leistungszunahme bei Versuch T2 erreicht wurde.

Die Ergebnisse der Untersuchungen zur Brandausbreitung auf andere Fahrzeuge bzw. Objekte werden in [22] und ausführlicher in [28] mitgeteilt. Bei Versuch T3 wurde die Brandausbreitung auf das 22 m vom Zentrum der Ladung entfernte Hindernis auf Video aufgezeichnet. Danach wurde das Hindernis 4,5 min nach Zündung vom Brand erfasst. Die Deckentemperatur über dem Hindernis betrug zu diesem Zeitpunkt 516 °C. Videoaufzeichnung und Messergebnisse wurden benutzt, um den bei den Versuchen T1 und T2 erfolgten Brandübergreif abzuschätzen. Der Brandübergreif erfolgte demnach bei den drei Versuchen bei einer Brandleistung von 20 MW bis 40 MW, einer Längsluftgeschwindigkeit von 2 m/s bis 3 m/s und Deckentemperaturen von ca. 515 °C. Für Versuch T1 kann die Ausdehnung dieser Temperaturfront ausgehend vom Brandherd mit rd. 15 m entgegen der Luftströmung (siehe Bild 4-56) und mit rd. 100 m in Richtung der Luftströmung (siehe Bild 4-55) abgeschätzt werden. In [22] wird davon ausgegangen, dass bei einer großen Zahl von Sattelzugbränden die Flammen auf einen 20 m in Strömungsrichtung entfernten Sattelzug überspringen werden. Bei einem Pkw-Brand wird es für unwahrscheinlich gehalten, dass die Flammen auf einen anderen Pkw übergreifen, wenn dieser mehr als 5 m in Strömungsrichtung entfernt steht. In beiden Fällen wird eine Luftgeschwindigkeit zwischen 1 m/s und 4 m/s vorausgesetzt.

Versuch-Nr.	Maximale Brandleistung		Lineare Leistungszunahme [MW/min]
	Wert [MW]	Eintritt nach [min]	
T1	(Ø) 203	18,5	20,5
T2	(Ø) 158	14,3	29,0
T3	124,9	10,4	17,0
T4	70,5	7,7	17,7

Tab. 4-17: Maximale Brandleistung und lineare Leistungszunahme [23]

4.2.8 Vergleichende Betrachtung

In Tabelle 4-18a/b sind die wesentlichen Ergebnisse der beschriebenen Brandversuche (siehe Kapitel 4.2.1 bis 4.2.7) zusammengestellt. Bei der Zusammenstellung wurde eine grobe Untergliederung nach den verwendeten Brandgütern vorgenommen, um das unterschiedliche Abbrandverhalten zu berücksichtigen, da z. B. Flüssigkeiten zweidimensional und Holzrippen dreidimensional abbrennen. Als Kriterium für die Reihung der Brandversuche dienen, soweit bekannt, die vorhandenen Brandlasten. Für die Angabe der erreichten Maximaltemperaturen wurde zur Verallgemeinerung in einen Decken-, einen Wand- und einen Sohlbereich unterschieden. So z. B. werden als Deckenbereich Werte, die 0,5 m unter der Decke, auf der Deckenunterseite bzw. in der Decke ermittelt wurden, sub-

summiert. Ähnliches gilt für den Sohlbereich. Bei den einzelnen Versuchen sind jeweils die lichte Querschnittsfläche des Versuchsobjektes und ggf. die Strömungsgeschwindigkeiten angegeben. Die Strömungsgeschwindigkeiten können lediglich als Orientierungswerte betrachtet werden, da diese bei den einzelnen Versuchen zu unterschiedlichen Zeitpunkten ermittelt (vor/während des Versuches) und auf unterschiedliche Art und Weise ausgewertet wurden (Einzel-/Mittelwerte). Bei den Angaben zur Brandleistung ist zu beachten, dass Verfahren zu deren Ermittlung in größerem Umfang erstmals bei den Versuchen im Repparfjord-Tunnel angewendet wurden.

Die Anzahl der Versuche, die in den einzelnen Versuchsobjekten durchgeführt wurden, ist begrenzt. Dennoch können aus der Zusammenstellung der

Brandversuch	Brandlast [GJ]	Branddauer [min]	Maximale Temperaturen [°C]/ Eintritt [min]				Maximale Brandleistung [MW]/Eintritt [min]
			Deckenbereich	Wandbereich	Sohlbereich	Abluftkanal	
Flüssigkeiten							
Ofenegg (A = 23 m ²), Nr. 2a: u = 1,7 m/s	3	3-4	(320/2)	-	1.030/3	-	-
Zwenberg (A = 20 m ²), Nr. 302	13	10	(1.320/3)	-	(330/k. A.)	220/k. A.	-
Zwenberg (A = 20 m ²), Nr. 301	13	9	1.332/k. A.	-	(989/k. A.)	(217/k. A.) Ventilator: 88/k. A.	-
Zwenberg (A = 20 m ²), Nr. 303	13	8	(1.330/k. A.)	-	1.020/k. A.	(124/k. A.)	-
Ofenegg (A = 23 m ²), Nr. 7a: u = 1,7 m/s	16	3-4	1.310/1,5	-	(1.000/2)	-	-
Repparfjord (A = 30-38 m ²), Nr. H32: u = 1,5-3 m/s	56	100	rd. 400/k. A.	-	-	-	10
Memorial (A = 36 m ²), Nr. 103: u = 0 m/s	-	42	1.368/7	-	583/30	-	28/24
Memorial (A = 60 m ²), Nr. 615b: u = -0,61 m/s	-	53	(1.086/2)	-	(430/16)	-	150/28
Memorial (A = 60 m ²), o. Nr.	-	-	-	-	-	Ventilator: 163/k. A.	100/k. A.
Benelux (A = 50 m ²), Nr. 3a: u = 0-1,7 m/s	-	-	470/k. A.	-	-	-	12/9

A = lichte Querschnittsfläche, u = Strömungsgeschwindigkeit, k. A. = keine Angabe, -- = nicht vorhanden bzw. nicht ermittelt, (...) = zusätzliche Information, d. h. kein Maximalwert des Versuchsprogramms

Tab. 4-18a: Zusammenstellung der Ergebnisse von Brandversuchen

Ergebnisse in Tabelle 4-18a/b mehrere Tendenzen abgeleitet werden.

Für Flüssigkeitsbrände haben sich bei vorgegebener, begrenzter Brandgutmenge (siehe Ofenegg Nr. 2a u. 7a, Zwenberg Nr. 301 u. 303) vergleichsweise kurze Branddauern von bis zu rd. 10 min ergeben. Im Deckenbereich wurden mit maximal 1.332 °C höhere Maximaltemperaturen als im Sohlbereich mit maximal 1.030 °C gemessen. Für den Wandbereich liegen keine Werte vor. Bei begrenzter Brandgutmenge wurden die Temperaturmaxima sehr rasch, d. h. innerhalb weniger Minuten, erreicht. Längere Branddauern und ggf. höhere Maximaltemperaturen im Deckenbereich von maximal 1.368 °C ergaben sich, wenn die Brandgutmenge durch Pegel gesteuert wurde (siehe Repparfjord Nr. H32, Memorial Nr. 103 u. 615b).

Bei Vernachlässigung der Brandlast kann festgestellt werden, dass bei Tunneln mit geringer Quer-

schnittsfläche größere Maximaltemperaturen im Deckenbereich gemessen wurden. In den Tunneln Ofenegg und Zwenberg mit einer lichten Querschnittsfläche von rd. 20 m² wurden maximale Deckentemperaturen von rd. 1.300 °C gemessen. Im Memoriantunnel bei einer lichten Querschnittsfläche von 36 m² wurde eine maximale Deckentemperatur von 1.368 °C ermittelt. Die Strömungsgeschwindigkeiten in den Versuchstunneln waren jeweils gering. Lediglich bei den Versuchen im Repparfjord-Tunnel war eine nennenswerte Strömungsgeschwindigkeit zu verzeichnen. Bei den Versuchen im Zwenberg-Tunnel erfolgte keine explizite Angabe von Messwerten.

Die Holzkrippenbrände heben sich durch eine längere Branddauer von den Flüssigkeitsbränden mit begrenzter Brandgutmenge ab. Für das Erreichen des Temperaturmaximums im Deckenbereich ist ebenfalls eine deutliche längere Zeitdauer als bei den Flüssigkeitsbränden erkennbar. Das angege-

Brandversuch	Brandlast [GJ]	Branddauer [min]	Maximale Temperaturen [°C]/Eintritt [min]				Maximale Brandleistung [MW]/Eintritt [min]
			Deckenbereich	Wandbereich	Sohlbereich	Abluftkanal	
Holzkrippen							
Repparfjord (A = 30-38 m ²), Nr. W31: u = 0,3 m/s	17	rd. 30	600/20	-	-	-	9/12
Straßenfahrzeuge und deren Ladung							
Benelux (A = 50 m ²), Nr. 6: u = 1,5 m/s	k. A.	rd. 20	210/k. A.	-	-	-	4/8
Repparfjord (A = 30-38 m ²), Nr. C21: u = 0,5 m/s	6	rd. 60	500/10	400/k. A.	rd. 200/k. A.	-	6/10
Benelux (A = 50 m ²), Nr. 14: u = 0-2,5 m/s	24	25-30	600/k. A.	-	-	-	25/12
PWRI, Bus-Versuch	k. A.	k. A.	300/k. A. (Sprinkler)	-	-	-	30/7
Repparfjord (A = 30-38 m ²), Bus, Nr. B11: u = 0,3 m/s	41	rd. 55	800/rd. 10	800	800	-	29/8
Repparfjord (A = 30-38 m ²), Nr. LF1: u = 0,7 m/s	63	rd. 120	450/20	-	-	-	17/15
Repparfjord (A = 30-38 m ²), Nr. HF1: u = 3-8 m/s	87	rd. 60	1.000/20	1.000/20	rd. 950/20	-	128/19
Runehamar (A = 28 m ² /50 m ²), Nr. T1: u = 2-3 m/s	240	60	1.365/rd. 25	1.100/7	-	-	203/19
A = Tunnelquerschnittsfläche, u = Strömungsgeschwindigkeit, k. A. = keine Angabe, - = nicht vorhanden bzw. nicht ermittelt							

Tab. 4-18b: Zusammenstellung der Ergebnisse von Brandversuchen

bene Temperaturmaximum trat bei einem Versuch mit geringer Strömungsgeschwindigkeit auf. Die Ausführungen in Kapitel 4.2.4.3.2 zeigen, dass Holzkrippen unterschiedlich abbrennen und zu unterschiedlichen Zeitpunkten einstürzen können. Die Ergebnisse von Brandversuchen mit Holzkrippen sind daher untereinander schwierig und bei Verwendung anderer Brandgüter sehr schwierig miteinander zu vergleichen.

Bei den Versuchen mit Straßenfahrzeugen bzw. deren Ladung werden die längsten Branddauern und größten Maximaltemperaturen durch Lkw bzw. deren Ladungen erzielt. Die Branddauern betragen hier maximal 1 h und die Maximaltemperaturen im Deckenbereich 1.365 °C, im Wandbereich 1.100 °C und im Sohlbereich rd. 950 °C. Die höchsten Maximaltemperaturen für den Decken- und Wandbereich wurden bei den Versuchen im Runehamar-Tunnel, bei denen auch die höchste Brandlast verwendet wurde, ermittelt. Die Maximaltemperaturen wurden je nach vorhandener Brandlast innerhalb eines Zeitraumes von rd. 10 min bis 25 min erreicht. Die Strömungsgeschwindigkeiten bei den einzelnen Versuchen zeigen eine große Bandbreite. Bei den Versuchen mit Straßenfahrzeugen wurde ein mit den Flüssigkeitsbränden vergleichbar hohes Temperaturniveau erreicht. Aus der Reihung der Versuche in Tabelle 4-18b kann vereinfachend abgeleitet werden, dass mit zunehmender Brandlast die Maximaltemperaturen und die maximalen Brandleistungen ansteigen. Zwischen der Brandlast und der Branddauer scheinen keine Tendenzen ableitbar zu sein, da Branddauern von ca. 1 h nicht nur von Lkw, sondern auch vom Bus (Nr. B 11) und dem Kunststoff-Pkw (Nr. C 21) im Repparfjord-Tunnel erreicht wurden. Für den Versuch Nr. LF1 im Repparfjord-Tunnel sind die genannten Zusammenhänge zwischen Brandlast und Maximaltemperaturen bzw. Brandleistungen nicht zu erkennen. Der Versuch mit der Mischbrandlast als simulierter Lkw-Ladung führt zu einer wesentlich längeren Branddauer als die anderen Versuche mit Straßenfahrzeugen. Der Vergleich des Versuches mit der Mischbrandlast mit dem in seiner Brandlast geringeren Busbrandversuch B11 zeigt, dass der Versuch mit der Mischbrandlast hinsichtlich Maximaltemperatur im Deckenbereich und maximaler Brandleistung hinter dem Busbrandversuch zurückbleibt. Die Gründe hierfür können u. a. in den Abmessungen, der Anordnung und der Zusammensetzung des Brandgutes gesehen werden. Nach diesen Gesichtspunkten handelt es sich bei dem Versuch mit der Mischbrandlast eher um einen modifizierten Holzkrippenversuch als um einen

Brandversuch mit einer (typischen) Lkw-Ladung. Als Ursache für die gegenüber dem Holzkrippenbrand W31 verringerte Maximaltemperatur im Deckenbereich kommt der Einsturz der Mischbrandlast in Betracht, während beim Holzkrippenbrand W31 die Flammen die Decke erreichten.

Allgemein kann festgestellt werden, dass die relevanten Parameter Maximaltemperatur einschließlich Dauer bis zu deren Erreichen sowie die Branddauer vor allem vom Brandgut und seiner Verfügbarkeit (begrenzte Menge oder kontinuierlicher Zufluss) sowie dessen Zusammensetzung und Anordnung im Tunnel und von der lichten Querschnittsfläche des Tunnels abhängen. Einen weiteren wesentlichen Einfluss übt die Strömungsgeschwindigkeit aus.

5 Bewertung der vorhandenen Brandkurven

5.1 Allgemeines

In Kapitel 4.2.8 wurde festgestellt, dass die höchsten Maximaltemperaturen in Straßentunneln bei Flüssigkeitsbränden in Tunneln mit geringer Querschnittsfläche und bei Bränden von simulierten Lkw bzw. deren Ladungen ermittelt wurden. Die längsten Branddauern wurden bei Versuchen mit Straßenfahrzeugen und deren Ladungen beobachtet. Im Folgenden werden die beschriebenen Ansätze für Brandkurven den Ergebnissen von Brandversuchen mit Flüssigkeiten und Lkw bzw. deren Ladungen gegenübergestellt.

5.2 Flüssigkeitsbrände

In Bild 5-1 sind die ersten 14 min des Verlaufes der ZTV-ING-, der HC-, der HC_{inc}- und der RWS-Kurve sowie die ETK aufgetragen. Für den Vergleich der Brandkurven mit einem Flüssigkeitsbrand ist exemplarisch der Verlauf des Versuches Nr. 302 aus dem Zwenberg-Tunnel aufgetragen (siehe Kapitel 4.2.2 und Bild 4-10). Der beginnende Temperaturanstieg des Versuches Nr. 302 wurde hierzu in den Koordinatenursprung verschoben. Kennzeichnend für den Versuch mit 400 l Benzin ist ein schlagartiger Temperaturanstieg innerhalb von weniger als 1 min auf 1.300 °C. Dieses Temperaturniveau wird für etwa 1 min gehalten, bevor die Temperatur kurzzeitig auf ca. 860 °C abfällt, um erneut auf ca. 1.060 °C anzusteigen, bevor die Temperaturen endgültig abfallen.

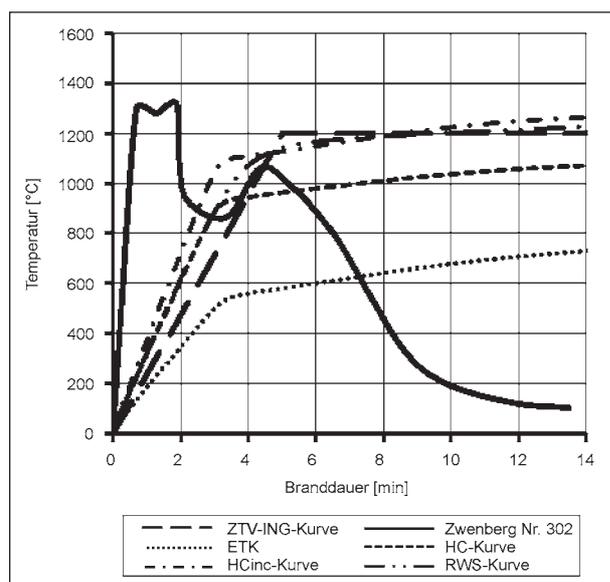


Bild 5-1: Vergleich vorhandener Brandkurven mit Versuch Nr. 302 aus dem Zwenberg-Tunnel

Die gesamte Branddauer beträgt etwa 10 min. Bild 5-1 kann entnommen werden, dass der schlagartige Temperaturanstieg der ersten zwei Minuten von keiner der aufgetragenen Brandkurven nachvollzogen wird. Der Wiederanstieg zwischen ca. 3 min und ca. 4 min wird hingegen gut von der ZTV-ING-Kurve abgebildet. Mit dem Einsetzen der Abkühlungsphase bei Versuch Nr. 302 befinden sich die dargestellten Brandkurven im Übergangsbereich von der Erwärmungs- zur Vollbrandphase. Ein vergleichbares Bild bieten die Versuche im Ofenegg-Tunnel. Bei den dortigen Versuchen wurden maximale Temperaturen von 1.310 °C 0,5 m unter der Decke, von 770 °C auf der Deckenoberfläche und im Sohlbereich von 1.030 °C erreicht. Die Zeitdauer für das Erreichen der Maxima betrug dabei zwischen 1,5 min und 6 min, die maximale Branddauer 14 min (siehe Kapitel 4.2.1). Bei den Versuchen im Memorial-Tunnel wurden im Deckenbereich maximal 1.368 °C gemessen (siehe Kapitel 4.2.5). Dieser Wert trat nach 7 min von insgesamt 42 min Branddauer ein. Bei den weiteren Versuchen mit Flüssigkeiten im Repparfjord-Tunnel und im Zweiten Benelux-Tunnel wurden geringere Maximaltemperaturen gemessen.

5.3 Brände von Straßenfahrzeugen und deren Ladung

5.3.1 Versuche im Repparfjord-Tunnel

In Bild 5-2 sind die zeitlichen Verläufe der im Deckenbereich ermittelten Maximaltemperaturen bei den durchgeführten Brandversuchen mit

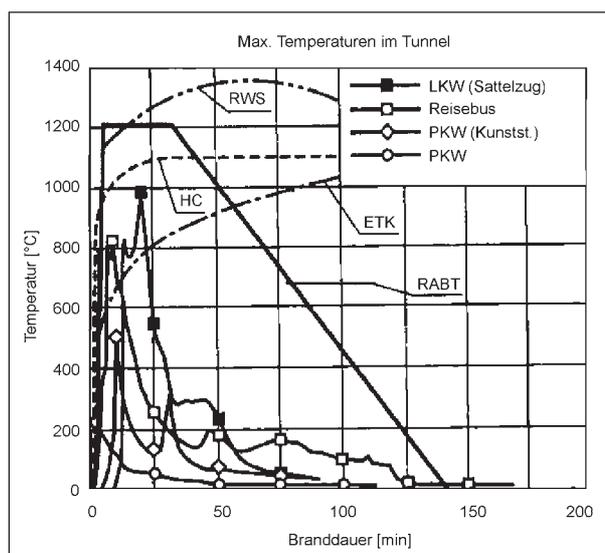


Bild 5-2: Vergleich vorhandener Brandkurven mit den im Repparfjord-Tunnel ermittelten Temperaturverläufen [38]

Straßenfahrzeugen dargestellt. Zusätzlich sind die RWS-, die HC- und die ZTV-ING-Kurve (ehem. „RABT-Kurve“) und die ETK aufgetragen. Gegenüber der Veröffentlichung in [38] wurde die Dauer der Vollbrandphase der „RABT-Kurve“ der der heute gültigen ZTV-ING-Kurve angeglichen.

Aus Bild 5-2 ist zu erkennen, dass die Erwärmungsphasen der Fahrzeuge gut durch die RWS-, die HC- und die ZTV-ING-Kurve abgebildet werden. In der Vollbrandphase weisen die Temperaturen zur HC-Kurve einen ausreichenden und zur RWS- sowie zur ZTV-ING-Kurve einen deutlichen Abstand auf. Das von der ETK in dieser Phase vorgegebene Temperaturniveau wird dagegen durch den Bus- und den Sattelzugbrand deutlich übertroffen. Die ZTV-ING-Kurve berücksichtigt als Einzige der Brandkurven eine Abkühlungsphase. Diese vollzieht sich rascher als von der ZTV-ING-Kurve vorgegeben, sodass die Branddauern in ausreichendem Abstand von der ZTV-ING-Kurve eingehüllt werden.

5.3.2 Versuche im Runehamar-Tunnel

Bei Brandversuchen mit Straßenfahrzeugen bzw. deren Ladungen wurden die höchsten Temperaturen im Deckenbereich während des Versuches T1 im Runehamar-Tunnel gemessen. In Bild 5-3 ist der bei diesem Versuch im Deckenbereich ermittelte, maßgebende Temperaturverlauf gemeinsam mit der ETK, der HC-, der RWS- und der ZTV-ING-Kurve aufgetragen. Der Beginn des Temperaturverlaufes bei Versuch T1 wurde für die folgenden Be-

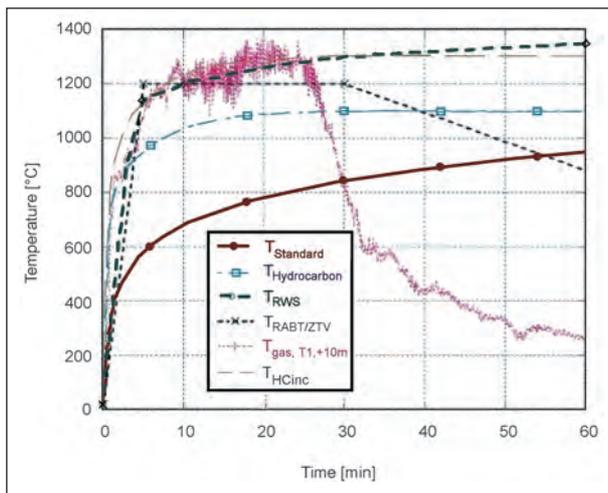


Bild 5-3: Vergleich vorhandener Brandkurven mit dem im Runehamar-Versuch T1 ermittelten Temperaturverlauf [nach 27]

trachtungen in den Koordinatenursprung verschoben. Nachträglich wurde die HC_{inc} -Kurve aufgenommen.

Der Darstellung in Bild 5-3 kann entnommen werden, dass der Versuch T1 einen sehr raschen Temperaturanstieg aufweist, der in den ersten 3 min gut mit der HC- und der HC_{inc} -Kurve harmoniert und den Anstieg der übrigen Kurven übertrifft. Danach steigen die Versuchstemperaturen über die HC-Kurve und auch die ZTV-ING-Kurve hinaus an und folgen in ihrer Tendenz mit z. T. deutlichen Schwankungen der RWS- bzw. der HC_{inc} -Kurve, bevor nach etwa 25 min die Abkühlungsphase einsetzt. Die Abkühlungsphase vollzieht sich in ihren ersten 10 min rascher als von der ZTV-ING-Kurve vorgegeben, danach verlangsamt sich der Temperaturabfall. Die Brandeinwirkung ist i. W. nach rd. 1 h abgeschlossen. Die ZTV-ING-Kurve stellt in diesem Zusammenhang die einzige Brandkurve dar, die eine Abkühlungsphase vorgibt und gleichzeitig die Branddauer mit ausreichendem Abstand einhüllt. Weiterhin wird deutlich, dass die ETK den hier durchgeführten Versuch in keiner Weise abbilden kann.

In Bild 5-4a/b sind die im Runehamar-Tunnel für den Deckenbereich ermittelten maßgebenden Temperaturverläufe sowie die ETK, die HC-, die RWS- und die ZTV-ING-Kurve dargestellt. Eine Verschiebung des Beginns der Temperaturverläufe im Koordinatenursprung wurde in Bild 5-4a/b nicht vorgenommen. Dennoch kann der Darstellung der ersten 30 min in Bild 5-4a entnommen werden, dass die Versuche T2 bis T4 nach anfänglicher Verzögerung ebenfalls einen sehr raschen Temperaturanstieg aufweisen. Den schnellsten Temperaturanstieg

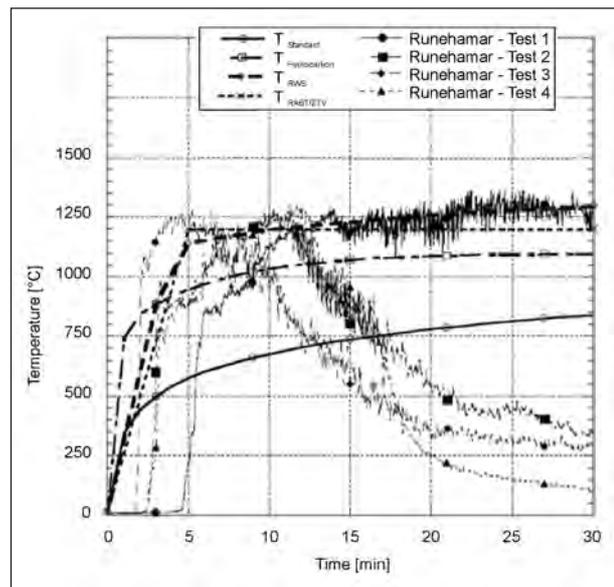


Bild 5-4a: Vergleich vorhandener Brandkurven mit den im Runehamar-Tunnel in den 30 min ermittelten Temperaturverläufen [18]

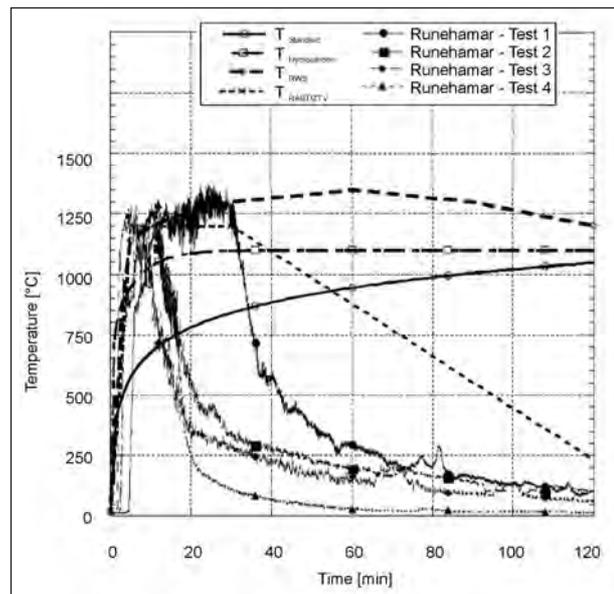


Bild 5-4b: Vergleich vorhandener Brandkurven mit den im Runehamar-Tunnel innerhalb von 120 min ermittelten Temperaturverläufen [18]

zeigt jedoch Versuch T3, wo nach einer Verzögerung von rd. 2 min die Temperatur in den folgenden 3 min bis auf 1.281 °C ansteigt, um nach wenigen Minuten wieder abzufallen. Ein derartig steiler Temperaturanstieg wird von keiner der vorhandenen Brandkurven abgebildet. Beispielsweise erreichen die ZTV-ING-Kurve nach 3 min eine Temperatur von 720 °C, die RWS-Kurve von 890 °C und die HC_{inc} -Kurve von 1.047 °C.

Die Darstellung der Temperaturverläufe und der Brandkurven über 120 min in Bild 5-4b zeigt, dass

der Brand am längsten bei Versuch T1 andauert, wo nach ca. 30 min (inkl. Anfangsverzögerung) die Abkühlungsphase einsetzt. Die einzelnen Abkühlungsphasen werden von der ZTV-ING-Kurve eingeschlossen, während die anderen Kurven mit Ausnahme der RWS-Kurve von noch weiter ansteigenden bzw. konstanten Temperaturen ausgehen. Bei der RWS-Kurve sinkt die bei 60 min erreichte Maximaltemperatur von 1.350 °C auf 1.200 °C bei 120 min ab, wodurch jedoch keine Abkühlungsphase definiert wird.

In der Literatur wird häufig der bei Versuch T1 ermittelte Temperaturverlauf im Deckenbereich (siehe Bild 5-3) als Maßstab für einen Vergleich mit vorhandenen Brandkurven herangezogen. In [22, 34] wird die Auffassung vertreten, dass dieser Temperaturverlauf nach der anfänglichen Verzögerung am besten mit der HC-Kurve und nach den ersten 3 min mit der RWS-Kurve harmoniert. Weiterhin wird in [22, 34] eine auf dem Versuch T1 basierende „Runehamar-Kurve“ abgeleitet, die aus einer entsprechenden Kombination von HC- und RWS-Kurve besteht und mathematisch durch folgende Summenformel abgebildet wird:

$$T = 20 + \sum_{i=1}^N n_i r_i (1 - e^{-k_i t})^{n_i - 1} e^{-k_i t} \quad (\text{Gl. 5.1}).$$

In Gl. 5-1 bedeuten:

T Temperatur [°C] und

t Zeit [min].

Für $N = 2$ werden in [22, 34] die Parameter n , r und k wie folgt angegeben: $n_1 = 1,2$, $r_1 = 1.920$ °C, $k_1 = 0,00385$ min⁻¹, $n_2 = 30$, $r_2 = 300$ °C und $k_2 = 0,65$ min⁻¹. In Bild 5-5 ist der Verlauf der „Runehamar-Kurve“ für $N = 2$ aufgetragen. Zusätzlich sind vorhandene Brandkurven dargestellt.

Für den Vergleich der „Runehamar-Kurve“ mit den vorhandenen Brandkurven können sinngemäß die Ausführungen zu Bild 5-4a/b herangezogen werden. Aus Bild 5-5 ist zu erkennen, dass die „Runehamar-Kurve“ im Zeitraum von ca. 10 min bis 60 min in Analogie zu den Messwerten bei Versuch T1 die RWS-Kurve geringfügig übersteigt. Eine Abkühlungsphase, wie sie sich auch bei Versuch T1 einstellt, wird auch bei der „Runehamar-Kurve“ nicht berücksichtigt.

Im Wandbereich wurden im Runehamar-Tunnel die höchsten Temperaturen während des Versuches T1 ermittelt. Über einen Zeitraum von rd. 30 min wurden hier Temperaturen von durchschnittlich 900 °C,

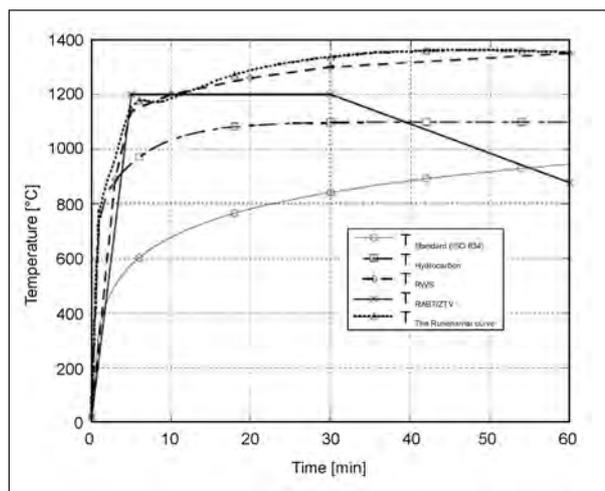


Bild 5-5: Vergleich der „Runehamar-Kurve“ mit vorhandenen Brandkurven [22]

kurzzeitig von maximal 1.100 °C gemessen (siehe Bild 4-57). Wie aus Bild 4-57 hervorgeht, wird bei Versuch T1 der Temperaturanstieg der ersten 3 min am besten von der HC-Kurve und im Weiteren am besten von der ZTV-ING-Kurve wiedergegeben. Von der ZTV-ING-Kurve werden außerdem die Maximaltemperaturen und die beginnenden Abkühlphasen eingehüllt, was bei der HC-Kurve und der ETK nicht der Fall ist. Eine Aussage zur Abdeckung der fortgesetzten Abkühlungsphase und damit der Einwirkungsdauer ist basierend auf Bild 4-57 nicht möglich, da die Darstellung nach 40 min abgeschnitten ist.

Für den Sohlbereich wurden bei den Versuchen im Runehamar-Tunnel keine Temperaturverläufe ermittelt. Da im Runehamar-Tunnel an der Wand in 1 m Höhe über der Sohle um rd. 200 °C bis 250 °C geringere Maximaltemperaturen als im Deckenbereich gemessen wurden, kann angenommen werden, dass sich die Maximaltemperaturen im Sohlbereich einschließlich ihres Verlaufes nur geringfügig von denen des Wandbereiches unterscheiden. Diese Annahme wird durch den Lkw- und den Busbrandversuch im Repparfjord-Tunnel gestützt, wo im Decken-, Wand- und Sohlbereich ähnliche Temperaturverläufe ermittelt wurden, die sich in ihren Maximalwerten nur um maximal rd. 50 °C bis rd. 200 °C unterscheiden (siehe Bild 4-36).

5.4 Übertragbarkeit von Versuchsergebnissen auf deutsche Straßentunnel

5.4.1 Allgemeines

Mit Blick auf die Übertragbarkeit von Versuchsergebnissen auf deutsche Straßentunnel ist grundsätzlich festzustellen, dass entweder die Versuchsobjekte nicht der baulichen Situation deutscher Straßentunnel oder die verwendeten Brandlasten nicht den infolge Lkw-Verkehr zu erwartenden Brandlasten entsprechen. Bei den Versuchsobjekten, die mit deutschen Straßentunneln verglichen werden können, handelt es sich um den Zweiten Benelux-Tunnel und die Objekte des PWRI. Die weiteren Versuchsobjekte weichen z. B. in den Querschnittsabmessungen, in der Ausbildung der Wandoberfläche und/oder der betriebstechnischen Ausstattung deutlich von deutschen Straßentunneln ab. Von den Versuchen im Zweiten Benelux-Tunnel und in den PWRI-Objekten liegen jedoch keine Temperatur-Zeit-Verläufe bezogen auf Bauteile vor. Außerdem mussten bei den Versuchen mit simulierten Ladungen im Zweiten Benelux-Tunnel Brandlasten verwendet werden, die der eines kleineren Lkw entsprechen, um das Bauwerk zu schonen. Ähnlich verhält es sich mit den Versuchsobjekten des PWRI, die nach den Versuchen weiterhin genutzt werden sollten.

5.4.2 Memorial-Tunnel

Bei den Versuchen im Memorial-Tunnel kann aufgrund der geplanten maximalen Brandleistungen von bis zu 100 MW davon ausgegangen werden, dass realistische Brandlasten verwendet wurden. Die Versuche haben die höchsten Temperaturen ergeben, die bisher bei Brandversuchen in Tunneln gemessen wurden. Bevor mögliche Konsequenzen für deutsche Straßentunnel abgeleitet werden können, müssen allerdings das Versuchsobjekt und die Versuchsbedingungen eingehender untersucht werden. Beim Memorial-Tunnel handelt es sich um einen stillgelegten Straßentunnel. Die höchsten Temperaturen wurden bei den Versuchen mit Zwischendecke ermittelt. In diesem Zustand weist der Verkehrsraum des Tunnels eine Breite von ca. 8,8 m und eine Höhe von ca. 4,3 m auf (siehe Bild 4-37). Für den Verkehrsraum steht eine Querschnittsfläche von 36 m² zur Verfügung (siehe Kapitel 4.2.5.2). Bei deutschen Straßentunneln ist nach den RABT [R 5b] für den Kfz-Verkehr eine

lichte Höhe von 4,50 m zu realisieren. Der kleinste Regelquerschnitt nach den RABT, der RQ 10,0 T, weist eine Gesamtbreite des lichten Raumes von 9,00 m auf, sodass hier die Fläche des lichten Raumes ca. 41 m² beträgt. Der Memorial-Tunnel besitzt somit ohne Zwischendecke geringere Abmessungen und eine geringfügig kleinere Querschnittsfläche als der kleinste Regelquerschnitt nach den RABT. Weiterhin wurde bei den Versuchen der Brandgutzufuss zu den Wannen kontinuierlich gesteuert, wodurch u. a. längere Branddauern als bei den Versuchen mit begrenzter Brandgutmenge im Ofenegg- und im Zwenberg-Tunnel erzielt wurden. Vor einer Übertragung der im Memorial-Tunnel ermittelten Temperatur-Zeit-Verläufe auf deutsche Straßentunnel muss der Einfluss dieser Aspekte genauer untersucht werden. Dabei muss auch berücksichtigt werden, dass im Memorial-Tunnel ohne Zwischendecke, aber bei höheren maximalen Brandleistungen deutlich geringere Maximaltemperaturen im Deckenbereich ermittelt wurden.

5.4.3 Repparfjord-Tunnel

Die im Repparfjord-Tunnel bei Brandversuchen mit Straßenfahrzeugen (siehe Kapitel 4.2.4.3.5) ermittelten zeitlichen Verläufe der Maximaltemperaturen werden von der ZTV-ING-Kurve auf der sicheren Seite liegend eingehüllt (siehe Bild 5-2). Dennoch können die dort ermittelten Ergebnisse nicht ohne weiteres auf deutsche Straßentunnel übertragen werden, da der Repparfjord-Tunnel eine geringere Breite und starke Unregelmäßigkeiten in der Querschnittsfläche sowie in der Ausbildung der Wand- und Deckenoberflächen aufweist (siehe Bilder 4-14, 4-15 und 4-29). Weiterhin herrschten während der Versuche extreme klimatische Verhältnisse (hohe Feuchtigkeit, Frost). Bei diesem Programm wurden die höchsten Temperaturen während des Brandversuches mit dem Sattelzug ermittelt. Das diesem Versuch zugrunde liegende Szenario entsprach jedoch nicht den Verkehrsverhältnissen eines deutschen Straßentunnels. Wie der Vergleich mit den Versuchen im Runehamar-Tunnel zeigt, können Lkw wesentlich größere Brandlasten als von der Mischbrandlast und dem Sattelzug abgebildet darstellen.

5.4.4 Runehamar-Tunnel

Die Versuche im Runehamar-Tunnel haben bei Verwendung wirklichkeitsnaher Brandlasten für Lkw-

Ladungen zu Temperaturen geführt, die in ihrer Höhe mit denen von Flüssigkeitsbränden verglichen werden können. Beim Runehamar-Tunnel handelt es sich um einen stillgelegten Straßentunnel, der mit seinen Abmessungen (siehe Kapitel 4.2.7.3) mit deutschen Straßentunneln verglichen werden kann. Vor einer Ableitung von Konsequenzen aus den Versuchen für deutsche Straßentunnel müssen jedoch das Versuchsobjekt und die Versuchsbedingungen genauer betrachtet werden. Hierzu zählt, dass die Tunnelwandung von der Felsoberfläche bzw. Spritzbetonflächen gebildet wird (siehe Bild 4-47), d. h., eine Innenschale, wie bei deutschen Straßentunneln üblich, ist nicht vorhanden. Weiterhin ist zu berücksichtigen, dass die Querschnittsfläche des Tunnels im Brandherdbereich durch den Einbau eines Stahlgerüsts einschließlich Brandschutzverkleidung von ursprünglich ca. 50 m² auf ca. 28 m² verringert wurde (siehe Bild 4-50). In der erstellten Einhausung wurde die Brandlast mit einer Höhe von ca. 4,50 m etwa mittig im Querschnitt positioniert, sodass in der Achse der Brandlast ein lichter Abstand zur Decke von 0,50 m verblieb, der zu den Rändern der Brandlast hin weiter abnimmt. Die Temperaturen wurden hier 4,7 m über der Fahrbahn bzw. 0,3 m unter der Decke der Einhausung und somit 0,2 m über der Brandlast gemessen. Es kann daher davon ausgegangen werden, dass sich sowohl die Messinstrumente als auch die Decke der Einhausung zumindest in der Vollbrandphase in sehr geringem Abstand zu bzw. in den Flammen selbst befanden. Die Ausführung der Einhausung im Brandherdbereich hat im Vergleich zum kleinsten Regelquerschnitt gemäß RABT [R 5b] zu einer Verringerung der lichten Breite und der lichten Querschnittsfläche um etwa ein Viertel geführt (vgl. Kapitel 5.4.2). Da die Breite und Höhe eines Tunnels und somit seine Querschnittsfläche für die Brandentwicklung und Brandausbreitung von Bedeutung sind, können die im Runehamar-Tunnel erzielten Ergebnisse zur Temperaturentwicklung nicht ohne weiteres auf deutsche Straßentunnel übertragen werden. Hierzu besteht weiterhin Klärungs- bzw. Forschungsbedarf. Dieser Bedarf wird mittlerweile von an den Versuchen Beteiligten, insbesondere für die Breite des Tunnels und das Verhältnis des Deckenabstandes der Brandlast zur Tunnelhöhe, bestätigt [28]. In diesem Zusammenhang ist auch die Ableitung einer „Runehamar-Kurve“ (siehe Kapitel 5.3.2) zu hinterfragen. Die „Runehamar-Kurve“ [22, 34] mag zwar den bei Versuch T1 bei +10 m ermittelten Temperaturverlauf im Deckenbereich für die Erwärmungs-

ungs- und Vollbrandphase mit ausreichender mathematischer Genauigkeit abbilden und in sofern eine interessante Information darstellen. Eine Übertragbarkeit dieser Kurve auf andere Straßentunnel und damit eine weitergehende Verallgemeinerung sind jedoch aufgrund der bei diesem Versuch beschriebenen Verhältnisse nicht sinnvoll.

6 Auswirkungen von Änderungen der nationalen Brandkurve

6.1 Allgemeines

Im Folgenden bleibt die Fragestellung, ob die Ergebnisse der jüngsten Brandversuche im Runehamar-Tunnel auf deutsche Straßentunnel übertragbar sind, unberücksichtigt. Stattdessen werden die möglichen Auswirkungen einer veränderten Brandkurve in den ZTV-ING aufgezeigt. Dazu werden die Ergebnisse aus den beschriebenen Brandversuchen verwendet (siehe Kapitel 5.2 und 5.3). Für reale Brände in Straßentunneln liegen in der Literatur grobe Abschätzungen der Brandlast und der maximalen Brandleistung (siehe z. B. [22]), jedoch keine Temperatur-Zeit-Verläufe vor, sodass hier lediglich eine Berücksichtigung der bei Bränden ermittelten Branddauer (siehe Kapitel 4.1) erfolgt.

6.2 Tunnelkonstruktion

6.2.1 Allgemeines

Als Grundlage der Diskussion werden Ergebnisse aus [36, 37] verwendet. Bei dem Forschungsvorhaben wurde das Tragverhalten von Tunnelquerschnitten unter Einwirkung der ZTV-ING-Kurve sowie verschiedener Modifikationen der Vollbrandphase der ZTV-ING-Kurve hinsichtlich Branddauer und Maximaltemperatur untersucht.

6.2.2 Beschleunigter Temperaturanstieg in der Erwärmungsphase

In einem gegenüber der ZTV-ING-Kurve beschleunigten Temperaturanstieg wird für das Bauwerk kein anderes Verhalten gesehen, sofern die Branddauer und die Maximaltemperatur während der anschließenden Vollbrandphase die Werte der ZTV-ING-Kurve nicht wesentlich übersteigen. Dies ist z. B. bei Flüssigkeitsbränden mit begrenztem Volumen der Fall, wie sie im Ofenegg- und Zwen-

berg-Tunnel untersucht wurden. Im Zwenberg-Tunnel wurden bei Versuchen mit Benzinmengen von bis zu 400 l auf der Bewehrung der Zwischendecke trotz geringerer Betondeckung von (nom $c = 2$ cm) und geringerer Deckenhöhe ($h = 3,9$ m) als in den ZTV-ING bzw. den RABT vorgesehen Temperaturen von maximal 104 °C gemessen. Durch die Anforderungen an die Ausführung der Fahrbahnentwässerung bei deutschen Straßentunneln wird gewährleistet (siehe Kapitel 3.4.4), dass auch größere Mengen auslaufender brennbarer Flüssigkeiten rasch abgeleitet werden. Die hydraulische und brandschutztechnische Wirksamkeit der aus Längs- und Querneigung, Schlitzrinne, Siphon und Sammelleitung bestehenden Fahrbahnentwässerung wurden unter der Voraussetzung einer entsprechenden Wartung in [35] grundsätzlich nachgewiesen.

6.2.3 Erhöhte Temperatur für die Dauer der Vollbrandphase

Gegenüber der ZTV-ING-Kurve erhöhte Temperaturen wurden z. B. bei den Brandversuchen mit simulierten Lkw-Ladungen im Runehamar-Tunnel ermittelt. Im Gegensatz zu den Brandversuchen mit Flüssigkeiten, die im Ofenegg- und Zwenberg-Tunnel durchgeführt wurden, waren die Versuche im Runehamar-Tunnel durch eine maximale Dauer der Vollbrandphase von ca. 25 min bei einer Gesamtbranddauer von rd. 60 min gekennzeichnet (siehe Bild 4-53 und Bild 5-3). Während der Vollbrandphase wurden Temperaturen im Deckenbereich von maximal 1.365 °C erreicht.

Für die Traglastuntersuchungen im Rahmen von [36, 37] wurden u. a. Temperatureindringkurven in die Tunnelinnenschale numerisch ermittelt. In Tabelle 6-1 sind für zwei ausgewählte Abstände von der beflamnten Tunneloberfläche die erreichten Maximaltemperaturen und ihr zeitlicher Eintritt unter Einwirkung der ZTV-ING-Kurve und einer modifizierten Brandkurve angegeben. Die modifizierte Brandkurve unterscheidet sich von der ZTV-ING-Kurve darin, dass innerhalb von 5 min 1.300 °C erreicht und für 25 min gehalten werden.

Aus der Zusammenstellung in Tabelle 6-1 geht hervor, dass infolge der ZTV-ING-Kurve auf der Oberfläche der Innenschale nach 33 min maximal 700 °C und in einer Tiefe von 6 cm nach 100 min maximal 300 °C erreicht werden. Diese Aussagen decken sich für den Abstand von 6 cm in der Größenordnung mit denen in Kapitel 3.2. Infolge der Einwir-

Abstand zur Tunnelinnenseite [cm]	ZTV-ING-Kurve T = 1.200 °C, 25 min		Mod. ZTV-ING-Kurve T = 1.300 °C, 25 min	
	Max. Temperatur [°C]	Eintritt nach [min]	Max. Temperatur [°C]	Eintritt nach [min]
0	700	33	735	30
6	300	100	320	110

Tab. 6-1: Temperatureindringung für die Tunnelinnenschale infolge ZTV-ING-Kurve und mod. ZTV-ING-Kurve [37]

kung der modifizierten Brandkurve wurden auf der Oberfläche der Innenschale um 35 K und in 6 cm Tiefe um 20 K höhere Temperaturen ermittelt, die innerhalb einer geringfügig kürzeren Zeit eintreten. Die Maximaltemperaturen auf der Oberfläche werden mit Einsetzen der Abkühlphase und in 6 cm Tiefe erst bei fortgeschrittener Abkühlphase erreicht. Dies zeigt, dass sich die Temperaturen an der Oberfläche mit Einsetzen der Abkühlungsphase verringern, sich aber ab einer bestimmten Tiefe vorerst weiter erhöhen. Nach Tabelle 6-1 ist davon auszugehen, dass bei einer Erhöhung der Temperatur in der Vollbrandphase von 1.200 °C auf 1.300 °C die nach den ZTV-ING vorgegebene maximale Temperatur von 300 °C auf der Außenseite der tragenden Bewehrung geringfügig überschritten wird.

6.2.4 Verlängerte Vollbrandphase

Die Notwendigkeit einer Verlängerung der Vollbrandphase der ZTV-ING-Kurve, bei der 1.200 °C über 25 min gehalten werden, kann aus den hier beschriebenen Ergebnissen von Brandversuchen nicht abgeleitet werden. Es sollte allerdings berücksichtigt werden, dass eine Verlängerung der Vollbrandphase zu einer Verlängerung der Branddauer insgesamt führt. Wie in Kapitel 4.1 ausgeführt, wurden für die Mehrzahl der Brände in Straßentunneln Branddauern von ca. 1 h bis 2 h ermittelt, wenn am Ort der Brandentstehung ein bis zwei Lkw und/oder ein Bus beteiligt waren. Mit einer Branddauer der ZTV-ING-Kurve von insgesamt 140 min wird die Länge dieser Branddauern ausreichend abgedeckt. Die Zusammenstellung in Tabelle 4-1a zeigt auch, dass einige wenige Brände, an denen am Ort der Brandentstehung ein Lkw und ggf. ein Bus vorhanden war, Branddauern von 2 h bis 4 h aufwiesen. Für diese Fälle kann auch von einer längeren Vollbrandphase ausgegangen werden. Anhand der Ergebnisse aus [37] wird in Tabelle 6-2 der Einfluss einer um 30 min und in Tabelle 6-3 einer um 60 min verlängerten Vollbrandphase auf die Temperatureindringung der Innenschale gezeigt.

Abstand zur Tunnelinnenseite [cm]	ZTV-ING-Kurve T = 1.200 °C, 25 min		Mod. ZTV-ING-Kurve T = 1.200 °C, 55 min	
	Max. Temperatur [°C]	Eintritt nach [min]	Max. Temperatur [°C]	Eintritt nach [min]
0	700	33	730	60
6	300	100	350	125

Tab. 6-2: Temperatureindringung für die Tunnelinnenschale infolge ZTV-ING-Kurve und mod. ZTV-ING-Kurve [37]

Abstand zur Tunnelinnenseite [cm]	ZTV-ING-Kurve T = 1.200 °C, 25 min		Mod. ZTV-ING-Kurve T = 1.200 °C, 85 min	
	Max. Temperatur [°C]	Eintritt nach [min]	Max. Temperatur [°C]	Eintritt nach [min]
0	700	33	750	90
6	300	100	380	140

Tab. 6-3: Temperatureindringung für die Tunnelinnenschale infolge ZTV-ING-Kurve und mod. ZTV-ING-Kurve [37]

Der Zusammenstellung in Tabelle 6-2 und Tabelle 6-3 kann entnommen werden, dass die Maximaltemperaturen an der Oberfläche und in 6 cm Tiefe infolge der verlängerten Vollbrandphase und gleichzeitig auch die Zeitdauer für deren Erreichen zunehmen. Offensichtlich wird auch, dass die Maximaltemperaturen in 6 cm Tiefe etwas stärker als an der Oberfläche selbst zunehmen. Die Maximalwerte werden wiederum an der Oberfläche kurz nach Einsetzen der Abkühlungsphase und in 6 cm Tiefe bei fortgeschrittener Abkühlungsphase erreicht.

Der Vergleich von Tabelle 6-1 und Tabelle 6-2 ergibt, dass sich durch die Verlängerung der Vollbrandphase um 30 min auf der Oberfläche etwa die gleichen Maximaltemperaturen einstellen, während in 6 cm Tiefe um 30 K höhere Maximaltemperaturen als bei Erhöhung der Temperatur in der Vollbrandphase auf 1.300 °C erreicht werden. Hierdurch wird sichtbar, dass durch eine 30-minütige Verlängerung der Temperatureinwirkung von 1.200 °C in der Vollbrandphase die Temperatur im Bereich der Betondeckung stärker ansteigt als bei einer Erhöhung der Temperatur in der Vollbrandphase auf 1.300 °C ohne Verlängerung der Vollbrandphase.

Die Ergebnisse in Tabelle 6-2 und Tabelle 6-3 zeigen weiterhin, dass bereits bei einer Erhöhung der Dauer der Vollbrandphase um 30 min die tragende Bewehrung deutlich über 300 °C erwärmt wird. Für den Fall, dass an der Temperaturanforderung von maximal 300 °C für die tragende Bewehrung festgehalten wird, werden hier zusätzliche konstruktive

Maßnahmen erforderlich. Hierfür kämen passive Brandschutzmaßnahmen, wie z. B. das Aufbringen von Brandschutzputzen oder -platten, in Betracht.

6.2.5 Verlängerung der Abkühlungsphase

Eine Verlängerung der Abkühlungsphase kann aus den beschriebenen Ergebnissen von Brandversuchen nicht abgeleitet werden. Eine deutlich ausgeprägte Abkühlungsphase ist bei den Versuchen mit Straßenfahrzeugen und deren Ladungen zu beobachten. Die für den Deckenbereich im Repparfjord- und im Runehamar-Tunnel aufgetragenen Temperatur-Zeit-Verläufe zeigen, dass dort die Abkühlungsphase insbesondere zu Beginn deutlich rascher abließ als von der ZTV-ING-Kurve abgebildet (siehe Bilder 5-3 und 5-4b). Insgesamt werden die durch Versuche ermittelten Abkühlungsphasen in ausreichendem Abstand von der ZTV-ING-Kurve eingehüllt. Anhand der in Tabelle 6-1 bis Tabelle 6-3 mitgeteilten Zwischenergebnisse aus [37] kann davon ausgegangen werden, dass eine Verlängerung der Abkühlungsphase zu einem weiteren Voranschreiten der Temperaturfront in der Innenschale führen würde und diese stärker thermisch beanspruchen würde.

6.3 Fugen

6.3.1 Allgemeines

Unter der Annahme, dass sich in Pressfugen in etwa eine Temperaturverteilung wie im Betonquerschnitt einstellt, können für die Diskussion der Auswirkungen einer modifizierten Brandkurve auf Pressfugen die aus [37] vorliegenden Temperatureindringungskurven für die Innenschale herangezogen werden.

6.3.2 Geschlossene Bauweise

Bei Tunneln ohne außen liegende Abdichtung kann für das mindestens 20 cm von der beflamten Innenschale entfernt liegende Fugenband einer Pressfuge [R 9] nur eine geringe Auswirkung unterschiedlicher Modifikationen der ZTV-ING-Kurve erkannt werden. Bei Einwirkung der ZTV-ING-Kurve auf die Innenschale wurden im Betonquerschnitt auf Höhe des Fugenbandes Maximaltemperaturen von knapp 100 °C ermittelt, die auch bei deutlicher Erhöhung von Temperatur und Dauer der Vollbrandphase gegenüber der ZTV-ING-Kurve (1.300 °C für 85 min) nur geringfügig überschritten

werden [37]. Die Größenordnung der hier ermittelten Temperaturen überschreitet die Temperaturen, die in Kapitel 3.3.2 für die Einwirkung der ZTV-ING-Kurve und den Gebrauchszustand bei nicht drückendem Wasser für das Fugenband angegeben wurden, um rd. 40 °C. Da die Prüfungen von Fugenbändern im Rahmen der Eignungsprüfung bei maximal 80 °C durchgeführt werden, kann nicht erwartet werden, dass das Fugenband seine Funktion auch nach einem Brand, der der ZTV-ING-Kurve folgt, uneingeschränkt erfüllen kann. Bei Raumfugen befindet sich das Fugenband ebenfalls mindestens 20 cm von der beflamten Oberfläche der Innenschale entfernt [R 9]. Die 2 cm breite Fuge ist mit einer nicht brennbaren Fugeneinlage verschlossen. Aufgrund der größeren Fugenbreite als bei der Pressfuge ist jedoch bereits bei Einwirkung der ZTV-ING-Kurve eine Beschädigung des Fugenbandes wahrscheinlich. Für das außen liegende Fugenabschlussband kann von einer Beschädigung ausgegangen werden.

Bei Tunneln mit außen liegender Abdichtung stellen sich die Verhältnisse günstiger dar, da kein Fugenband und eine Innenschalendicke von mindestens 35 cm vorgesehen sind [R 9]. Für die außen liegende Abdichtung können bei Pressfugen nach [37] keine Auswirkungen unterschiedlicher Modifikationen der ZTV-ING-Kurve gesehen werden. Auch bei gegenüber der ZTV-ING-Kurve deutlich erhöhter Temperatur und Dauer der Vollbrandphase (1.300 °C für 85 min) bleibt die Maximaltemperatur auf der Außenseite der Innenschale knapp unterhalb von 50 °C. Bei Raumfugen werden sich aufgrund der Fugeneinlage vermutlich ungünstigere Temperaturen ergeben, ob diese bei den zuvor genannten Einwirkungen 100 °C, wie sie auch längerfristig bei der Eignungsprüfung der Abdichtung angewandt werden, übersteigen, kann nicht vorhergesagt werden. Für das Fugenabschlussband kann von einer Beschädigung ausgegangen werden.

Bei der geschlossenen Bauweise werden i. d. R. Pressfugen ausgeführt. Raumfugen kommen vor allem bei Übergängen von der offenen Bauweise bzw. von Trogbauwerken zur geschlossenen Bauweise zur Anwendung. Tunnel ohne außen liegende Abdichtung werden nur in Sonderfällen, bei denen dem Tunnel nur in geringem Umfang Wasser zufließt, ausgeführt. Sollte sich in einem derartig ausgeführten Tunnel ein Brand ereignen, wären u. U. im Zuge der Instandsetzung die Fuge einschließlich Fugenabschluss- und Dehnungsfugenband zu erneuern.

6.3.3 Offene Bauweise

Bei Pressfugen kann aufgrund der großen üblichen Bauteilabmessungen und der Einbaulage des Fugenbandes (siehe Kapitel 3.3.3) angenommen werden, dass dieses auch bei Temperatureinwirkungen, die die der ZTV-ING-Kurve übersteigen, nicht beschädigt wird. Für Raumfugen ist aufgrund der größeren Bauteildicke und damit der Dicke der Fugeneinlage die Möglichkeit einer Beschädigung des Fugenbandes günstiger als bei der geschlossenen Bauweise einzuschätzen. Wahrscheinlich ist hier ebenfalls eine Beschädigung des Fugenabschlussbandes. Für belastbare Aussagen bei Raumfugen sollten gesonderte Betrachtungen erfolgen.

6.3.4 Maschinelle Vortriebsverfahren

Bei zweischaligen und einschaligen Tübbingkonstruktionen mit Brandschutzbekleidung wird auch durch höhere und längere Temperatureinwirkungen als der ZTV-ING-Kurve keine Gefahr der Beschädigung des Dichtungsrahmens gesehen. Diese Gefahr besteht allerdings bei einschaligen Tübbingkonstruktionen ohne Brandschutzbekleidung, da bereits bei Einwirkung einer gegenüber der ZTV-ING-Kurve um 30 min verlängerten Vollbrandphase Temperaturen auftreten können, die für den Dichtungsrahmen nicht mehr verträglich sind (siehe Kapitel 3.3.4). Ein Versagen des Dichtungsrahmens hätte bei den für Schildvortriebe üblichen Baugrundverhältnissen Wassereintritte und ggf. Eintritt von Feinanteilen des Bodens zur Folge. Als Resultat könnte der Tunnel bis zur erfolgten Instandsetzung nicht betrieben werden. Hierzu werden weitere Untersuchungen empfohlen.

6.4 Konstruktiver Innenausbau

An Kabel, Leitungen und Entwässerungsanlagen werden konstruktive Anforderungen gestellt, um vor allem die Ausbreitung eines Brandes innerhalb des Tunnelbauwerkes sowie dessen Auswirkungen zu minimieren (siehe Kapitel 3.4). Daher ist es nicht möglich, die Auswirkungen einer veränderten Brandkurve auf diese Anlagen zu diskutieren. Es ist jedoch festzustellen, dass bei den Brandversuchen im Runehamar-Tunnel zu Untersuchungszwecken eingebaute Kabel nur beschädigt wurden, sofern sie nicht durch Betonfertigteile oder Sand geschützt waren (siehe Kapitel 4.2.4.3.3 und 4.2.4.3.5). Diese relativ einfachen Maßnahmen haben sich bereits als wirksam erwiesen.

An Flucht- und Verbindungstüren werden Anforderungen an die Feuerwiderstandsklasse nach DIN 4102-2 [R 2] gestellt (siehe Kapitel 3.4.2). Wie aus der Bewertung der unterschiedlichen Brandkurven in Kapitel 5 zu entnehmen ist, werden Brände von Lkw und deren Ladungen in Tunneln nicht von der ETK abgebildet. Eine Erhöhung der brandschutztechnischen Anforderungen an Flucht- und Verbindungstüren wird dennoch nicht für erforderlich gehalten, da diese lediglich für einen bestimmten Zeitraum die Ausbreitung des Brandes verhindern sollen, um die Selbstrettung der Tunnelnutzer zu ermöglichen. Diese Bauteile müssen nach einem Brand im Zuge der Instandsetzung erneuert werden.

6.5 Tunnelbetriebstechnik

6.5.1 Lüftung

6.5.1.1 Dimensionierung für den Brandfall

Bei dem Brandversuch mit einem Sattelzug im Repparfjord-Tunnel wurde eine maximale Brandleistung von ca. 128 MW erreicht. Bei den Versuchen mit simulierten Lkw-Ladungen im Runehamar-Tunnel wurden maximale Brandleistungen in der Größenordnung von 70 MW bis 203 MW ermittelt. Bereits eine Brandleistung von 100 MW kann zu Anforderungen an die Lüftungsanlage führen, die bau- und anlagentechnisch nicht mehr sinnvoll darzustellen sind und daher Kosten-Risiko-Abwägungen und ggf. Sonderregelungen erfordern [R 5b]. Da bei den zuvor genannten Versuchen jeweils nur ein Lkw bzw. eine Lkw-Ladung verwendet wurde, sollte in einer gesonderten Untersuchung geprüft werden, ob zusätzlich zu den in den RABT in Abhängigkeit von der Lkw-Fahrleistung vorgegebenen Bemessungsbrandleistungen für die Lüftung ggf. Sonderregelungen erforderlich werden können.

6.5.1.2 Anlagenteile der Lüftung

Von den Brandversuchen mit Flüssigkeiten im Zwenberg-Tunnel und im Memorial-Tunnel liegen Temperaturmesswerte aus der Lüftungsanlage vor. Bei den Versuchen im Zwenberg-Tunnel wurden im Abluftkanal eine Temperatur von maximal 220 °C und im Abluftventilator eine Temperatur von maximal 88 °C ermittelt (siehe Tabelle 4-18a). Im Memorial-Tunnel wurde bei einem Brand mit einer maximalen Brandleistung von 100 MW eine Temperatur von maximal 163 °C im Ventilator gemessen (siehe Tabelle 4-18a). Über die Dauer der Tempe-

atureinwirkung liegen keine Angaben vor. Die Maximaltemperaturen für die Ventilatoren liegen unter den in Tabelle 3-2 angegebenen Anforderungen an die Temperaturfestigkeit der Lüftungsanlage. Es sollte allerdings berücksichtigt werden, dass die Versuche im Zwenberg-Tunnel aufgrund der Begrenzung der Benzinmenge nur eine relativ kurze Branddauer aufwiesen. Bei den Versuchen im Memorial-Tunnel wurden durch die Steuerung des Brandgutzuflusses längere Branddauern erreicht. Bei beiden Versuchsserien dürften die Maximaltemperaturen im Abluftventilator auch durch dessen Entfernung zum Brandherd, beim Zwenberg-Tunnel ca. 280 m und beim Memorial-Tunnel 213 m, bedingt sein.

Bei den Brandversuchen mit Straßenfahrzeugen bzw. deren Ladungen liegen für den Zweiten Benux-Tunnel keine Ergebnisse von Temperaturmessungen in der Lüftungsanlage vor. Bei den Versuchen im Repparfjord-Tunnel und im Runehamar-Tunnel wurde die Lüftungsanlage für die Versuchsdurchführung so eingerichtet, dass keine Abluftkanäle und -ventilatoren erforderlich waren. Für die bei diesen Versuchen verwendeten, wirklichkeitsnahen Brandlasten wären Messergebnisse aus Lüftungsanlagen von Straßentunneln bzw. vergleichbaren Versuchsobjekten von besonderem Interesse.

6.5.2 Brandschottungen

Für Brandschottungen bestehen bisher Anforderungen an die Feuerwiderstandsdauer nach DIN 4102-12 [R 2d]. Diese sollen für eine Dauer von 90 min die Ausbreitung eines Brandes verhindern. Das Brandverhalten von Brandschottungen wurde im Rahmen der hier beschriebenen großmaßstäblichen Versuche nicht untersucht. Aus diesem Grund können keine Auswirkungen einer veränderten Brandkurve in den ZTV-ING Teil 5 [R 2] auf diese Bauteile aufgezeigt werden.

6.5.3 Befestigungsmittel und Aufhängekonstruktionen

Wie in Kapitel 3.5.4 ausgeführt, werden Dübel für Lüfter und für Brandschutzplatten nach der ZTV-ING-Kurve geprüft. Bei einer Änderung dieser Brandkurve wären diese Befestigungsmittel nach der veränderten Brandkurve zu prüfen.

An Aufhängekonstruktionen werden konstruktive Anforderungen gestellt (siehe Kapitel 3.5.4), daher

wären diese nicht von einer Änderung der nationalen Brandkurve in den ZTV-ING Teil 5 [R 2] betroffen.

6.6 Prüftechnische Untersuchungen von Bauteilen

Im Weiteren werden einige prüftechnische Aspekte aufgezeigt, die bei der Diskussion zur Harmonisierung europäischer Brandkurven bzw. der Modifikation der nationalen Brandkurve berücksichtigt werden sollten.

Bisher existieren für die brandschutztechnische Prüfung von Bauteilen keine einheitlich verbindlichen Prüfbedingungen und/oder Brandkurven, daher gibt in der Regel der Bauherr die Brandkurve und die Prüfbedingungen vor. Beide sollten an ein realistisches Brandszenario gekoppelt sein.

Aus prüftechnischer Sicht lässt sich ein beschleunigter Temperaturanstieg in der Erwärmungsphase relativ leicht umsetzen, da die durch die Brenner erzeugte Hitze vom Ofen als Wärmestrahlung reflektiert wird. Schwieriger ist hingegen ein Knick im Übergangsbereich von der Erwärmungs- zur Vollbrandphase, wie bei der ZTV-ING- und der EBA-Kurve vorhanden (siehe Bild 2-5 und 2-6), nachzuführen. Eine prüftechnische Herausforderung stellt ebenfalls die Realisierung der durch die ZTV-ING- und die EBA-Kurve vorgegebene Abkühlungsphase dar. Die innerhalb von 110 min vorzunehmende Abkühlung von 1.200 °C auf 0 °C wird praktisch durch Abstellen der Brenner und Einblasen von Kaltluft bei gleichzeitiger Steuerung von Hand vorgenommen. Das Abschneiden der Bauteile bei Brandversuchen wird maßgeblich vom Verhalten während der Abkühlungsphase bestimmt. Daher werden bei der Anwendung offener Brandkurven, wie z. B. der RWS- und der HC-Kurve, die Prüfbedingungen anhand von Probekörpern kalibriert.

Die von der European Federation of Producers and Contractors of Specialist Products for Structures (EFNARC) veröffentlichten „Specification and Guidelines for Testing of Passive Fire Protection for Concrete Tunnels Lining“ enthalten Empfehlungen für die Vorbereitung, Durchführung und Auswertung von Brandversuchen an passiven Brandschutzsystemen [R 15]. Zu den passiven Brandschutzsystemen im Sinne zählen der Empfehlungen Überzüge und Putze, Abdeckungen und Platten sowie die Innenschale selbst. Als Brandkurve werden von der EFNARC die RWS-Kurve und weitere Kurven,

Zeit nach Zündung [min]	Vorgegebene Ofentemperatur [°C]	Maximale Abweichung [± %]
0	< 501)	
5	1.150	≤10 min = 15 %
10	1.200	
30	1.300	≤ 30 min = 10 %
60	1.350	≥30 min = 5 %
90	1.300	
120	1.200	
1) Nicht anwendbar bei kleinen Öfen		

Tab. 6-4: Ofentemperaturen und -abweichungen nach den Empfehlungen der EFNARC [R 15]

u. a. die ZTV-ING-Kurve, empfohlen. Für die Versuchsdurchführung werden in Abhängigkeit der Zeit nach Zündung maximale Abweichungen der Ofentemperatur angegebenen (siehe Tabelle 6-4). Eine Anwendung der in Tabelle 6-4 vorgegebenen Abweichungen würde für Brandversuche unter Anwendung der ZTV-ING-Kurve bedeuten, dass die Temperatur zu Beginn der Vollbrandphase zwischen 1.020 °C und 1.380 °C und bei fortgeschrittener Vollbrandphase zwischen 1.080 °C und 1.320 °C schwanken dürfte. Angesichts der zuvor diskutierten Auswirkungen einer veränderten Brandkurve in den ZTV-ING Teil 5 [R 2] auf die Innenschale erscheinen die von der EFNARC empfohlenen Temperaturabweichungen großzügig. Um eine Abkühlung der Probekörper zu erreichen, wird von der EFNARC außerdem empfohlen, den Ofen nach 120 min abzuschalten und die Probekörper für mindestens eine weitere Stunde im Ofen zu belassen. Die Temperaturmessungen sollen so lange fortgesetzt werden, bis die Thermoelemente, die sich am nächsten an der Probekörperfläche befinden, einen Temperaturabfall unter 200 °C anzeigen oder 240 min nach Zündung vergangen sind. Dieses Vorgehen scheint bei offenen Brandkurven generell möglich zu sein. Die Anwendbarkeit bei geschlossenen Brandkurven, wie der ZTV-ING-Kurve, erscheint jedoch fraglich. Ein Vergleich von Probekörpern, die mit einer offenen und einer geschlossenen Brandkurve beansprucht werden, wird dadurch sehr erschwert.

Die Ausführungen sollen zeigen, dass es nicht ausreicht, eine Brandkurve für die brandschutztechnische Bemessung vorzugeben. Für deren prüftechnische Umsetzung bei der Untersuchung von Bauteilen sollten zusätzlich an die Brandkurve und die

Versuchstechnik angepasste Vorgaben für die Vorbereitung, die Durchführung und die Auswertung entwickelt werden.

7 Schlussfolgerungen und Empfehlungen

7.1 Ansätze für Brandkurven

Aus der Zusammenstellung der Ansätze für Brandkurven wird deutlich, dass die Brandkurven, von der ETK bzw. ISO-Kurve abgesehen, einen vergleichbar steilen Temperaturanstieg in der Erwärmungsphase aufweisen. In ihrem weiteren Verlauf jedoch unterscheiden sich die Brandkurven in der Temperatur und Dauer der Vollbrandphase sowie in der Ausprägung einer Abkühlungsphase. Es existieren einige Brandkurven, deren Temperaturen innerhalb der Branddauer der ZTV-ING-Kurve hinter dieser zurückbleiben. Ebenfalls existieren mehrere Brandkurven, die in der Vollbrandphase eine höhere Temperatur als die ZTV-ING-Kurve erreichen. Die ZTV-ING-Kurve und die EBA-Kurve stellen die einzigen Brandkurven dar, die von vornherein eine Abkühlungsphase und somit eine Branddauer vorgeben. In den internationalen Regelungen wird für die Anwendung von Brandkurven ohne Abkühlungsphase die Branddauer in der Regel auf 2 h oder 3 h begrenzt. In Einzelfällen werden zusätzlich Abkühlungsphasen vorgegeben. Die ZTV-ING-Kurve befindet sich mit einer Branddauer von 140 min innerhalb der genannten Bandbreite.

7.2 Brände und Brandversuche

In den vergangenen Jahrzehnten waren bei den bedeutenden Bränden in Straßentunneln am Ort der Brandentstehung stets ein oder mehrere Lkw, seltener ein Bus vorhanden. In der Mehrzahl dieser Fälle betrug die Branddauer 1 h bis 2 h, wenn am Ort der Brandentstehung ein bis zwei Lkw und/oder ein Bus vorhanden waren. Lediglich in vier Fällen trat bei einer derartigen Fahrzeugkonstellation eine längere Branddauer von 2,5 h bis 4 h auf.

Eine Bestätigung von vorhandenen Brandkurven ist durch die realen Brände in Straßentunneln nicht sinnvoll möglich. Unter anderem aus diesem Grund wurden seit Mitte der 1960er Jahre wiederholt großmaßstäbliche Brandversuche in Tunneln durchgeführt. Bei diesen Versuchen wurden in unterschied-

lichen Versuchsobjekten unterschiedliche Brandgüter entzündet und die sich einstellenden Temperaturen gemessen. Die unterschiedlichen Versuchsbedingungen führen dazu, dass die Ergebnisse dieser Versuche untereinander nicht ohne weiteres vergleichbar sind. Dennoch ergeben sich aus den Versuchen Impulse für die Weiterentwicklung des baulichen Brandschutzes in Straßentunneln.

Bei Brandversuchen mit Flüssigkeiten wurden steilere Temperaturanstiege und zum Teil höhere Temperaturen als von der ZTV-ING-Kurve vorgegeben erreicht. Für Flüssigkeitsbrände mit begrenzter Brandgutmenge hat sich gezeigt, dass das Tunnelbauwerk nicht gefährdet ist, da die Einwirkdauer der Temperaturen im Deckenbereich von maximal 1.332 °C gering war und die baulichen Brandschutzanforderungen deutscher Straßentunnel (Betondeckung, zusätzliche Matte in der Decke und Fahrbahntwässerung) auch bei größeren auslaufenden Brandgutmengen einen wirksamen Schutz darstellen. Bei den Versuchen mit Heizöl im Memorial-Tunnel sowie den jüngsten Versuchen mit Ladungen von Straßenfahrzeugen im Runehamar-Tunnel wurden steilere Temperaturanstiege in der Erwärmungsphase und höhere Temperaturen in der Vollbrandphase als nach der ZTV-ING-Kurve ermittelt. Der Memorial-Tunnel weicht in seinen Querschnittsabmessungen von deutschen Straßentunneln ab. Zusätzlich ist bei diesen Versuchen zu klären, welchen Einfluss die Steuerung des Brandgutzufusses auf die Ergebnisse hat. Der Runehamar-Tunnel weicht in der Umgebung des Brandherdes in seinen Querschnittsabmessungen und im Weiteren in der Ausbildung der Tunnelwandung von deutschen Straßentunneln ab. Die Ergebnisse dieser Versuche, bei denen in der Vollbrandphase im Deckenbereich Maximaltemperaturen von rd. 1.370 °C ermittelt wurden, können daher nicht ohne weitere Analysen auf deutsche Straßentunnel übertragen werden.

7.3 Konsequenzen infolge von Änderungen der nationalen Brandkurve

Anhand der Berechnungsergebnisse aus [36, 37] kann aufgezeigt werden, dass eine Verlängerung der Dauer der Vollbrandphase das Fortschreiten der Temperaturfront in der Tunnelschale stärker begünstigt als eine Erhöhung der Temperatur in der Vollbrandphase ohne Verlängerung. Für eine Verlängerung der Abkühlungsphase ist aufgrund der

hiermit verbundenen Verlängerung der Branddauer von einem ähnlichen Einfluss auszugehen. Bei einer rascheren Erhöhung der Temperatur in der Erwärmungsphase allein ist dagegen nur von einem untergeordneten Einfluss auf das Fortschreiten der Temperaturfront in der Tunnelschale auszugehen.

Die Ergebnisse aus [36, 37] zeigen außerdem, dass bereits bei einer Verlängerung der Vollbrandphase der ZTV-ING-Kurve um 30 min passive Brandschutzmaßnahmen für die Tunnelschale erforderlich werden, um die tragende Bewehrung vor zu großer thermischer Beanspruchung zu schützen. Bei einer Änderung der ZTV-ING-Kurve sind ebenfalls Fugenkonstruktionen zu betrachten. Das Systemverhalten von Raumbereinigungen bei der geschlossenen Bauweise und Dichtungsrahmen bei einschaligen Tübbingkonstruktionen maschineller Schildvortriebe ohne Brandschutzbekleidung sollte bei Einwirkungen, die die der ZTV-ING-Kurve übersteigen, näher untersucht werden. Auf Elemente des konstruktiven Innenausbaus werden sich Änderungen der ZTV-ING-Kurve nicht auswirken, da an diese konstruktive Anforderungen bestehen bzw. die ETK als Brandkurve anzuwenden ist. Dübel für Lüfter und Brandschutzplatten sind hingegen von Änderungen der ZTV-ING-Kurve betroffen. Für Brandschottungen ist die ETK als Brandkurve anzuwenden. Für Anlagenteile der Lüftung werden Zeitdauern für die Temperaturfestigkeit vorgegeben. Die genannten Elemente der Tunnelbetriebstechnik sind daher nicht von Änderungen der ZTV-ING-Kurve betroffen.

7.4 Empfehlungen für die Fortschreibung des Regelwerkes

Bei den beschriebenen Brandversuchen mit einem Lkw bzw. einer Lkw-Ladung wurden Brandleistungen erreicht, die über der Mindestbemessungsbrandleistung von 30 MW nach den RABT liegen. Daher sollte überprüft werden, ob hieraus Auswirkungen auf die Bemessung der Brandfalllüftung resultieren können. Weiterhin liegt von Temperaturmessungen in Lüftungsanlagen nur eine geringe Anzahl von Messwerten bei fehlenden Angaben zu deren Einwirkdauer vor. Die vorhandenen Messwerte wurden an Anlagenteilen mit relativ großen Abständen zum Brandherd ermittelt. Im Hinblick auf die Fortschreibung des Regelwerkes sollten bei künftigen Brandversuchen entsprechende Messwerte und Einwirkdauern ermittelt und ausgewertet werden.

Die Ausführungen zur prüftechnischen Untersuchung von Bauteilen verdeutlichen, dass ein Bedarf für eindeutige Regelungen zur Vorbereitung, Durchführung und Auswertung von Brandversuchen besteht, damit bei der Anwendung von ein und derselben Brandkurve auf vergleichbare Prüfkörper reproduzierbare Ergebnisse entstehen.

Mit Blick auf die derzeitigen Bestrebungen nach Harmonisierung der Brandkurven in Europa kann festgestellt werden, dass sich die in den ZTV-ING Teil 5 [R 2] enthaltene Brandkurve im Vergleich zu anderen für die Konstruktion von Straßentunneln verwendeten Brandkurven hinsichtlich der Temperatur in der Vollbrandphase und der Branddauer im unteren Bereich der vorhandenen Bandbreite befindet. Dabei muss jedoch berücksichtigt werden, dass die Brandkurven, die eine höhere Temperatur in der Vollbrandphase und/oder eine längere Branddauer als die ZTV-ING-Kurve aufweisen, bisher nicht für die Anwendung in Straßentunneln bestätigt werden konnten. Als Grund hierfür ist die mangelnde Übertragbarkeit der Ergebnisse von großmaßstäblichen Brandversuchen auf moderne Straßentunnel anzusehen. Die Versuchsobjekte weichen in ihren baulichen und betriebstechnischen Verhältnissen von modernen Straßentunneln ab. Zu dieser Fragestellung kann abschließend mitgeteilt werden, dass derzeit keine wissenschaftlich abgesicherten Ergebnisse aus Brandversuchen vorliegen, die Änderungen der in den ZTV-ING Teil 5 [R 2] enthaltenen Brandkurve für den baulichen Brandschutz von Straßentunneln rechtfertigen. Vielmehr ist im Zuge der Harmonisierung der Brandkurven in Europa eine Verifizierung der im Rahmen der jüngsten großmaßstäblichen Brandversuche ermittelten Temperatur-Zeit-Verläufe für moderne Straßentunnel einzufordern.

Weiterhin kann festgestellt werden, dass eine, wie von ITA/PIARC vorgeschlagene, Differenzierung der Brandkurven nach der Art des Verkehrs im Tunnel nur dort sinnvoll ist, wo aufgrund des ausschließlichen Pkw-Verkehrs geringere Anforderungen an den baulichen Brandschutz gestellt werden können. Im deutschen Bundesfernstraßenbereich existieren derzeit keine derartigen Tunnel, sodass eine entsprechende Differenzierung der baulichen Brandschutzanforderungen nicht sinnvoll ist.

In Anlehnung an den Vorschlag von ITA/PIARC sollte hingegen überlegt werden, ob in Fällen, bei denen ein lokales Versagen des Tunnels infolge

Brandbeanspruchung zu einem Verlust des gesamten Tunnels und/oder zu einem Verlust der Standsicherheit eines angrenzenden Bauwerkes führt, ein höheres Niveau für den Schutz des Tunnelbauwerkes angemessen ist. Derartige Folgen können bei Tunneln mit geringer Überdeckung unter Gewässern, Absenktunneln und Tunneln mit Überbauung nicht grundsätzlich ausgeschlossen werden. Für diese Bauwerke wird eine Einzelfallbetrachtung empfohlen, aus der eine Verlängerung der Vollbrandphase der ZTV-ING-Kurve resultieren könnte. Diese Empfehlung gründet sich auf dem beschriebenen Einfluss einer verlängerten Dauer der Vollbrandphase auf die thermische Beanspruchung der Tunnelinnenschale. Die Berücksichtigung einer mit den verheerenden Bränden der Jahre 1999 und 2001 vergleichbaren Branddauer (siehe Tabelle 4-1b) erscheint jedoch nicht zielführend, da ein Übersprung des Brandes auf weitere Fahrzeuge mit einem zeitlichen und räumlichen Abstand zur Brandentstehung eintritt. Die Tunnelkonstruktion erhält hierdurch die Möglichkeit, auf die Brandausbreitung mit der Aktivierung von Traglastreserven durch Umlagerungen zu reagieren. Außerdem würde durch den Ansatz eines fortschreitenden Brandes einer stetig zunehmenden Anzahl von Lkw ein „verheerendster Katastrophenfall“ geschaffen, der eine wirtschaftliche Bemessung und Ausführung von Straßentunneln in Frage stellt. Folglich wird dieser Fall auch bei den internationalen Regelungen durch eine Begrenzung der Branddauer auf maximal 3 h nicht in Betracht gezogen.

8 Zusammenfassung

Brandkurven stellen Temperatur-Zeit-Verläufe für die Bemessung des baulichen Brandschutzes dar. Im Rahmen des Projektes war die Frage zu klären, ob die bei Brandversuchen ermittelten Temperatur-Zeit-Verläufe auf deutsche Straßentunnel übertragen werden können und welche Konsequenzen sich hieraus ergeben würden.

Die Untersuchungen haben ergeben, dass sich die von den ZTV-ING Teil 5 vorgegebene Brandkurve mit ihrer Temperatur in der Vollbrandphase und ihrer Branddauer innerhalb der Bandbreite verwendeter Brandkurven befindet und als Einzige für Straßentunnel eine Abkühlungsphase vorgibt.

Von Änderungen der Brandkurve in den ZTV-ING Teil 5 wäre zuallererst die Tunnelschale betroffen.

Anhand vorliegender Berechnungsergebnisse konnte gezeigt werden, dass eine Verlängerung der Dauer der Vollbrandphase das Fortschreiten der Temperaturfront in der Tunnelschale stärker begünstigt als eine Erhöhung der Temperatur in der Vollbrandphase ohne Verlängerung. Bei einer rascheren Erhöhung der Temperatur in der Erwärmungsphase allein ist dagegen nur von einem untergeordneten Einfluss auf das Fortschreiten der Temperaturfront in der Tunnelschale auszugehen. Außerdem wären gesonderte Untersuchungen des Brandverhaltens von Fugenkonstruktionen sinnvoll. Weiterhin wäre die Eignung von Dübeln für Lüfter und Brandschutzplatten für eine geänderte ZTV-ING-Kurve nachzuweisen.

Durch die Auswertung von Brandversuchen in Tunneln konnte herausgearbeitet werden, dass die Versuchsobjekte hinsichtlich ihrer baulichen und betrieblichen Verhältnisse nicht mit modernen Straßentunneln übereinstimmen und die erhaltenen Temperatur-Zeit-Verläufe nicht ohne weitere Analysen für die Bemessung des baulichen Brandschutzes von Straßentunneln herangezogen werden können. Damit liegen bisher keine wissenschaftlich abgesicherten Erkenntnisse vor, die Änderungen der bisherigen ZTV-ING-Kurve erfordern.

In Anlehnung an die Empfehlungen von ITA/PIARC wird empfohlen, für Fälle, bei denen ein lokales Versagen des Tunnels infolge Brandbeanspruchung zu einem Verlust des gesamten Tunnels und/oder zu einem Verlust der Standsicherheit eines angrenzenden Bauwerkes führt, ein höheres Niveau für den Schutz des Tunnelbauwerkes vorzusehen. Derartige Folgen können bei Tunneln mit geringer Überdeckung unter Gewässern, Absenktunneln und Tunneln mit Überbauung nicht grundsätzlich ausgeschlossen werden. Für diese Bauwerke könnte nach Abwägung der objektspezifischen Randbedingungen eine Verlängerung der Vollbrandphase in Frage kommen.

9 Literatur

9.1 Regelwerke

[R 1] DIN 1076
Ingenieurbauwerke im Zuge von Straßen und Wegen – Überwachung und Prüfung. Ausgabe 11/1999

- [R 2] ZTV-ING Teil 5
Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen und Richtlinien für Ingenieurbauten – Teil 5: Tunnelbau. Bundesanstalt für Straßenwesen
- [R 2a] ZTV-ING Teil 5 Abschnitt 1
Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen und Richtlinien für Ingenieurbauten – Teil 5: Tunnelbau Abschnitt 1: Geschlossene Bauweise. Bundesanstalt für Straßenwesen, Stand 12/2007
- [R 2b] ZTV-ING Teil 5 Abschnitt 2
Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen und Richtlinien für Ingenieurbauten – Teil 5: Tunnelbau Abschnitt 2: Offene Bauweise. Bundesanstalt für Straßenwesen, Stand 12/2007
- [R 2c] ZTV-ING Teil 5 Abschnitt 3
Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen und Richtlinien für Ingenieurbauten – Teil 5: Tunnelbau Abschnitt 3: Maschinelle Schildvortriebsverfahren. Bundesanstalt für Straßenwesen, Stand 12/2007
- [R 2d] ZTV-ING Teil 5 Abschnitt 4
Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen und Richtlinien für Ingenieurbauten – Teil 5: Tunnelbau Abschnitt 4: Betriebstechnische Ausstattung. Bundesanstalt für Straßenwesen, Stand 12/2007
- [R 3] DIN EN ISO 13943
Brandschutz – Vokabular. Ausgabe 10/2000
- [R 4] ISO 834
Fire-resistance tests – Elements of building construction – Part 1: General requirements. First edition 1999-09-15
- [R 5a] RABT
Richtlinien für die Ausstattung und den Betrieb von Straßentunneln. Forschungsgesellschaft für das Straßen- und Verkehrswesen e. V. (FGSV 339), FGSV-Verlag, Ausgabe 1985
- [R 5b] RABT
Richtlinien für die Ausstattung und den Betrieb von Straßentunneln. Forschungsgesellschaft für das Straßen- und Verkehrswesen e. V. (FGSV 339), FGSV-Verlag, Ausgabe 2006
- [R 6] DIN-FB 101
DIN-Fachbericht 101 „Einwirkungen auf Brücken“. Deutsches Institut für Normung e. V. Beuth Verlag GmbH, 2. Auflage 2003
- [R 7] DIN V ENV 1992-1-2
Eurocode 2: Planung von Stahlbeton- und Spannbetontragwerken – Teil 1-2: Allgemeine Regeln – Tragwerksbemessung für den Brandfall. Ausgabe 05/1997
- [R 8a] DIN 4102-1
Brandverhalten von Baustoffen und Bauteilen – Teil 1: Baustoffe, Begriffe, Anforderungen und Prüfungen. Ausgabe 05/1998
- [R 8b] DIN 4102-2
Brandverhalten von Baustoffen und Bauteilen – Teil 2: Bauteile, Begriffe, Anforderungen und Prüfungen. Ausgabe 09/1977
- [R 8c] DIN 4102-12
Brandverhalten von Baustoffen und Bauteilen – Teil 12: Funktionserhalt von elektrischen Kabelanlagen. Ausgabe 11/1998
- [R 9] RiZ-ING
Richtzeichnungen für Ingenieurbauten. Bundesanstalt für Straßenwesen
- [R 10] Richtlinie des Eisenbahnbundesamtes
Richtlinie „Anforderungen des Brand- und Katastrophenschutzes an den Bau und Betrieb von Eisenbahntunneln“, Bonn 01.07.1997 mit Ergänzungen bis 01.11.2001, Download: www.eisenbahnbundesamt.de
- [R 11] DIN V 18197
Abdichten von Fugen in Beton mit Fugenbändern. Ausgabe 10/2005
- [R 12] DIN EN 1991-1-2
Eurocode 1 – Einwirkungen auf Tragwerke – Teil 1-2: Allgemeine Einwirkungen; Brandeinwirkungen auf Tragwerke. Ausgabe 09/2003
- [R 13] SIA 197-2
Projektierung Tunnel – Strassentunnel. Ausgabe 2004
- [R 14] PIARC 05.05.B
Fire and smoke control in road tunnels. PIARC Committee on road tunnels, working group No.6, 1999
- [R 15] EFNARC
Specification and guidelines for testing of passive fire protection for concrete tunnel linings. March 2006, www.efnarc.org
- [R 16] Richtlinien TSI
Technische Spezifikationen für die Interoperabilität des Teilsystem „Infrastruktur“ des transeuropäischen Hochgeschwindigkeitsbahnsystems gem. Artikel 6 Absatz 1 der Richtlinie 96/48/EG

- [R 17] RVS 09.01.45
Baulicher Brandschutz in Straßenverkehrsbauten. Österreichische Forschungsgesellschaft Straße, Schiene, Verkehr, Ausgabe 1. September 2006
- [R 18] ÖVBB (Hrsg.)
Erhöhter Brandschutz mit Beton für unterirdische Verkehrsbauwerke. Österreichische Vereinigung für Beton- und Bautechnik (ÖVBB), Ausgabe 2005
- [R 19] UIC-Kodex 779-9-E
Sicherheit in Eisenbahntunneln. Internationaler Eisenbahnverband, 1. Ausgabe August 2003
- [R 20] ÖVBB (Hrsg.)
Richtlinie Faserbeton. Österreichische Vereinigung für Beton- und Bautechnik (ÖVBB), Ausgabe März 2002
- [R 21] ÖVBB (Hrsg.)
Richtlinie Innenschalenbeton. Österreichische Vereinigung für Beton- und Bautechnik (ÖVBB), Ausgabe Oktober 2003
- [R 22] RVS 09.01.23
Bauliche Gestaltung – Innenausbau. Österreichische Forschungsgesellschaft Straße, Schiene, Verkehr, Ausgabe September 2001
- [5] HOSSER, D., RICHTER, E.: FE 15.236 R93E „Baulicher Brandschutz in Tunneln“. Abschlussbericht des Institutes für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz und der Amtlichen Materialprüfanstalt für das Bauwesen der TU Braunschweig im Auftrag des Bundesministers für Verkehr, Braunschweig Juni 1994 (unveröffentlicht)
- [6] HOSSER, D., RICHTER, E.: FE 15.263 R95E „Baulicher Brandschutz für Tunnel in offener Bauweise“. Abschlussbericht des Institutes für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz und der Amtlichen Materialprüfanstalt für das Bauwesen der TU Braunschweig im Auftrag des Bundesministers für Verkehr, Braunschweig März 1998 (unveröffentlicht)
- [7] KORDINA, K., MEYER-OTTENS, C.: Beton-Brandschutz-Handbuch. Beton-Verlag, 1. Auflage, Düsseldorf 1981
- [8] HOSSER, D., RICHTER, E., SCHNETGÖKE, R.: FE 15.365/2002/ERB „Bauliche Brandschutzanforderungen an einschalige Tübbingkonstruktionen“. Abschlussbericht des Institutes für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz und der Materialprüfanstalt für das Bauwesen der TU Braunschweig im Auftrag der Bundesanstalt für Straßenwesen. Braunschweig September 2004 (unveröffentlicht)
- [9] DORGARTEN, H.-W., DAHL, J., SCHAAB, A.: Brandresistente Tunnelkonstruktionen: Ergebnisse von Brandversuchen und Anwendungskriterien. In: Vorträge der STUVA-Tagung „Tunnel – Lebensadern der mobilen Gesellschaft“ 2003 in Dortmund, Studiengesellschaft für unterirdische Verkehrsanlagen e. V., Forschung + Praxis 40, Bauverlag BV GmbH, Gütersloh 2003
- [10] ÖVBB (Hrsg.): Sachstandsbericht Brandeinwirkungen – Straße, Eisenbahn, U-Bahn. Österreichische Vereinigung für Beton- und Bautechnik (ÖVBB), Ausgabe Juli 2005
- [11] VDV (Hrsg.): Brandschutz in Fahrzeugen und Tunneln des ÖPNV. Verband Deutscher Verkehrsunternehmen (VDV), Alba Fachverlag GmbH + Co. KG, Düsseldorf 2005
- [12] Kommission für Sicherheitsmaßnahmen in Straßentunneln: Schlussbericht der Versuche im Ofenegg-Tunnel vom 17.5.-31.5.1965

9.2 Sonstiges

- [1] KORDINA, K., MEYER-OTTENS, C., RICHTER, E.: Beton-Brandschutz-Handbuch. Verlag Bau + Technik, 2. Auflage, Düsseldorf 1999
- [2] HAGEN, E.: Der natürliche Brand bei unterschiedlichen Randbedingungen. In: Abschlusskolloquium Bauwerke unter Brandeinwirkung, Sonderforschungsbereich Brandverhalten von Bauteilen, TU Braunschweig, Braunschweig 19. und 20. März 1987
- [3] KORDINA, K.: Baulicher Brandschutz in Straßen- und U-Bahn-Tunneln. Bauingenieur 56 (1981), S. 189-191
- [4] RÖDER, K.: Brandschutzanforderungen an Straßentunnel. In: Vorträge der STUVA-Tagung „Unterirdisches Bauen – Gegenwart und Zukunft“ 1981 in Berlin, Studiengesellschaft für unterirdische Verkehrsanlagen e. V., Forschung + Praxis 27, Alba Verlag, Düsseldorf 1982

- [13] Bundesministerium für Bauten und Technik: Brandversuche in einem Tunnel. Schriftenreihe „Straßenforschung“, Heft 50 Teil 1 und 2, Wien 1976
- [14] Studiengesellschaft Stahlanwendung e. V. (Hrsg.): EUREKA-PROJECT EU 499: FIRETUN – Fires in Transport Tunnels – Report on Full-scale Tests. Verlags- und Vertriebsgesellschaft mbH, Düsseldorf 1995
- [15] STEINAUER, B.; MAYER, G., KÜNDIG, P.: FE 03.375/2004/FGB „Brandversuche in Straßentunneln – Vereinheitlichung der Durchführung und Auswertung“. Abschlussbericht des Institutes für Straßenwesen der RWTH Aachen und des Ingenieurbüros Kündig im Auftrag des Bundesministeriums für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung, Aachen/Zürich Januar 2007, Veröffentlichung im BAST-Bericht B 57, www.bast.de
- [16] RICHTER, E.: Heißgasentwicklung bei Tunnelbränden mit Straßen- und Schienenfahrzeugen – Vergleich gemessener und in Vorschriften enthaltener Temperatur-Zeit-Verläufe. In: Vorträge der STUVA-Tagung 1993 in Hamburg, Forschung + Praxis 35, Alba – Verlag
- [17] DANZIGER, N. H., LUCHIAN, S. F.: Memorial Fire Test. In: North American Tunneling, June 1993, p. 75-77
- [18] INGASON, H., LÖNNERMARK, A.: Recent achievements regarding measuring of time-heat and time-temperature development in tunnels. Safe & Reliable Tunnels, 1st International Symposium Prague 2004
- [19] LEMAIRE, T., KENYON, Y.: Large scale fire tests in the Second Benelux Tunnel. Fire Technology (42) 2006, p. 329-350
- [20] Directorate-General for Public Works and Water: Steunpunt Tunnelveiligheid Project “Safety Test” – Report on fire tests. August 2002, download: www.tunnelsafety.nl
- [21] INGASON, H., LÖNNERMARK, A.: Project description and planning of large-scale tests in Runehamar tunnel. Summary of large scale fire tests in the Runehamar Tunnel in Norway, conducted in association with the UPTUN Research Program, September 2003
- [22] LÖNNERMARK, A.: On the characteristics of fires in tunnels. Doctoral Thesis, Dept. of Fire Safety Engineering, Lund Institute of Technology, Lund University, Lund 2005, download: www.sp.se
- [23] INGASON, H., LÖNNERMARK, A.: Large-scale fire tests in the Runehamar Tunnel – Heat release rate (HRR). Summary of large scale fire tests in the Runehamar Tunnel in Norway, conducted in association with the UPTUN Research Program, September 2003
- [24] OCTAVIAN, A., WU, X.: Runehamar Tunnel fire test – UPTUN fire protection. International Symposium on Catastrophic Tunnel-Fires, Boras 20-21st November 2003
- [25] OPSTAD, K., WIGHUS, R.: Fire suppression systems for road tunnels (UPTUN). SINTEF Norwegian Fire Research Laboratory (NBL), International Symposium on Catastrophic Tunnel-Fires, Boras 20-21st November 2003
- [26] BREKELMANN, J. W. P. M., van GOODZWAARD, D.: Runehamar tests as part of the UPTUN-project. International Symposium on Catastrophic Tunnelfires, Boras 20-21st November 2003
- [27] INGASON, H., LÖNNERMARK, A.: Large-scale fire tests in the Runehamar tunnel – Gas temperature and radiation. Summary of large scale fire tests in the Runehamar Tunnel in Norway, conducted in association with the UPTUN Research Program, September 2003
- [28] LÖNNERMARK, A., INGASON, H.: Fire spread and flame length in large-scale tunnel fires. Fire Technology (42) 2006, p. 283-302
- [29] LÖNNERMARK, A.: Large-scale fire tests in the Runehamar Tunnel. International Symposium on Catastrophic Tunnel-Fires, Boras 20-21st November 2003
- [30] LEMAIRE, T.: Runehamar tunnel fire tests: radiation, fire spread and back layering. Summary of large scale fire tests in the Runehamar tunnel in Norway, conducted in association with the UPTUN Research Program, September 2003
- [31] CARVEL, A., BEARD, C. (Hrsg.): The handbook of tunnel fire safety. Thomas Telford Ltd., London 2005

- [32] MUNDWILER: Untersuchungsbericht zum Brand im Viamala-Tunnel 2006. Vortrag auf dem Seminar „S0210 – Sicherheit in Tunnelanlagen“ bei der DMT GmbH, Dortmund 18.-19. September 2007
- [33] N. N.: Nine dead in Swiss road tunnel collision. *Tunnels & Tunnelling International*, October 2006
- [34] LÖNNERMARK, A., INGASON, H.: Gas temperatures in heavy goods vehicle fires in tunnels. *Fire Safety Journal* 40 (2005), p. 506-527
- [35] LACROIX, D., CASALE, E., CWIKLINSKI, C., THIBOUD, A.: Full size testing of drainage systems for burning liquids in road tunnels. In: Vorträge der STUVA-Tagung 1995, Forschung + Praxis 36, Alba – Verlag
- [36] SCHMID, K.: FE 15.428/2006/ERB „Traglastuntersuchungen für Straßentunnel unter Einwirkungen verschiedener Brandkurven“. Vorabsendung vom 19.11.2007 zum Schlussbericht im Auftrag der Bundesanstalt für Straßenwesen (unveröffentlicht)
- [37] SCHMID, K.: FE 15.428/2006/ERB „Traglastuntersuchungen für Straßentunnel unter Einwirkungen verschiedener Brandkurven“. Vorabsendung vom 21.11.2007 zum Schlussbericht im Auftrag der Bundesanstalt für Straßenwesen (unveröffentlicht)
- [38] KORDINA, K.: Brandschäden und Entrauchungsprobleme bei langen Tunnelanlagen. *Bauingenieur* (73) 1998, S. 222-226
- [39] HOSSER, D., RICHTER, E., PALIGA, K.: Erfahrungen mit Bränden in Tunneln und Konsequenzen für den baulichen Brandschutz. In: Festschrift zum 60. Geburtstag von Györgi IVANYI, Reihe Betonbau in Forschung und Praxis, Verlag Bau und Technik, Düsseldorf 1999
- [40] ONO, K., OTSUKA, T.: Fire design requirement for various tunnel. KeyLecture 32nd ITA-World Tunnel Congress, Seoul 25th April 2006, download: www.ita-aites.org
- [41] LARSSON, K.: Fires in tunnels and their effect on rock – a review. Research report, Lulea University of Technology, 2006-10
- [42] MARIK, L., HOREJSI, J.: Detailed design for the final lining of the Libouchec Tunnel. In: *Tunnel* (Mag. of the Czech Tunnelling Com. & Slovak Tunnelling Ass.) 1/2006, p. 78-85
- [43] RUSSELL, H.: Guidelines for fire resistance in road tunnels. *Tunnels & Tunnelling International*, July 2005, p. 20-21
- [44] KAUNDINYA, I.: Kunststofffaserbeton zur Verbesserung des baulichen Brandschutzes von Straßentunneln. Bundesanstalt für Straßenwesen, AP-Bericht 2306002, Februar 2008 (unveröffentlicht)
- [45] SISTENICH, C., DECKER, W.: Erarbeitung einheitlicher Vorgaben für Türen und Tore in Notausgängen und Querschlägen von Straßentunneln, Bundesanstalt für Straßenwesen, AP-Bericht 04 231/B 3, Dezember 2005 (unveröffentlicht)
- [46] Bundesminister für Verkehr – Abteilung Straßenbau: Schäden an Brücken und anderen Ingenieurbauwerken – Ursachen und Erkenntnisse, Dokumentation 1982. Aufgestellt: Bund/Länder-Fachausschuß Brücken- und Ingenieurbau, Verkehrsblatt – Verlag

B 39: Bewegungen von Randfugen auf Brücken
Eilers, Wruck, Quaas € 13,00

2003

B 40: Schutzmaßnahmen gegen Graffiti
von Weschpfennig € 11,50

B 41: Temperaturmessung an der Unterseite orthotroper Fahr-
bahntafeln beim Einbau der Gussasphalt-Schutzschicht
Eilers, Küchler, Quaas € 12,50

B 42: Anwendung des Teilsicherheitskonzeptes im Tunnelbau
Städling, Krocker € 12,00

B 43: Entwicklung eines Bauwerks Management-Systems für das
deutsche Fernstraßennetz – Stufen 1 und 2
Haardt € 13,50

B 44: Untersuchungen an Fahrbahnübergängen zur Lärminderung
Hemmert-Halswick, Ullrich € 12,50

B 45: Erfahrungssammlungen:
Stahlbrücken – Schäden – wetterfeste Stähle Seile
Teil 1: Dokumentation über Schäden an Stahlbrücken
Teil 2: Dokumentation und Erfahrungssammlung mit Brücken aus
wetterfesten Stählen
Teil 3: Erfahrungssammlung über die Dauerhaftigkeit von Brü-
ckenseilen und -kabeln
Hemmert-Halswick € 13,00

2004

B 46: Einsatzbereiche endgültiger Spritzbetonkonstruktionen
im Tunnelbau
Heimbecher, Decker, Faust € 12,50

2005

B 47: Gussasphaltbeläge auf Stahlbrücken
Steinauer, Scharnigg € 13,50

2006

B 48: Scannende Verfahren der zerstörungsfreien Prüfung von
Brückenbauwerken
Holst, Streicher, Gardej, Kohl, Wöstmann,
Wiggenhauser € 15,00

B 49: Einfluss der Betonoberflächenvorbereitung auf die Haf-
tung von Epoxidharz
Raupach, Rößler € 13,50

B 50: Entwicklung eines Bauwerks-Management-Systems für
das deutsche Fernstraßennetz, Stufe 3
Holst € 13,50

B 51: Hydrophobierungsqualität von flüssigen und pastösen
Hydrophobierungsmitteln
Panzer, Hörner, Kropf € 12,50

B 52: Brückenseile mit Galfan-Überzug – Untersuchung der
Haftfestigkeit von Grundbeschichtungen
Friedrich, Staack € 14,50

B 53: Verwendung von selbstverdichtendem Beton (SVB) im
Brücken- und Ingenieurbau an Bundesfernstraßen
Tauscher € 14,50

B 54: Nachweis des Erfolges von Injektionsmaßnahmen zur
Mängelbeseitigung bei Minderdicken von Tunnelinnenschalen
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann kosten-
pflichtig unter www.nw-verlag.de heruntergeladen werden.
Rath, Berthold, Lähner € 12,50

2007

B 55: Überprüfung des Georadarverfahrens in Kombination
mit magnetischen Verfahren zur Zustandsbewertung von
Brückenfahrbahnplatten aus Beton mit Belagsaufbau
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann kosten-
pflichtig unter www.nw-verlag.de heruntergeladen werden.
Krause, Rath, Sawade, Dumat € 14,50

B 56: Entwicklung eines Prüfverfahrens für Beton in der Expo-
sitionsklasse XF2

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann kostenpflichtig
unter www.nw-verlag.de heruntergeladen werden.

Setzer, Keck, Palecki, Schießl, Brandes € 19,50

B 57: Brandversuche in Straßentunneln – Vereinheitlichung
der Durchführung und Auswertung

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann kostenpflichtig
unter www.nw-verlag.de heruntergeladen werden.

Steinauer, Mayer, Kündig € 26,50

B 58: Quantitative Risikoanalysen für Straßentunnel
Sistenich € 14,50

2008

B 59: Bandverzinkte Schutzplankenholme
Schröder € 12,50

B 60: Instandhaltung des Korrosionsschutzes durch Teiler-
neuerung - Bewehrung
Schröder € 13,50

B 61: Untersuchung von Korrosion an Fußplatten von Schutz-
plankenpfosten
Schröder, Staack € 13,00

B 62: Bewährungsnachweis von Fugenfüllungen ohne Unter-
füllstoff
Eilers € 12,00

B 63: Selbstverdichtender Beton (SVB) im Straßentunnelbau
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann kostenpflichtig
unter www.nw-verlag.de heruntergeladen werden.

Heunisch, Hoepfner, Pierson (†), Dehn, Orgass, Sint € 17,50

B 64: Tiefenabhängige Feuchte- und Temperaturmessung an
einer Brückenkappe der Expositionsklasse XF4
Brameshuber, Spörel, Warkus € 12,50

2009

B 65: Zerstörungsfreie Untersuchungen am Brückenbauwerk A1
Hagen/Schwerte

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann kostenpflichtig
unter www.nw-verlag.de heruntergeladen werden.

Friese, Taffe, Wöstmann, Zoega € 14,50

B 66: Bewertung der Sicherheit von Straßentunneln
Zulauf, Locher, Steinauer, Mayer, Zimmermann,
Baltzer, Riepe, Kündig € 14,00

B 67: Brandkurven für den baulichen Brandschutz von Straß-
entunneln
Blosfeld € 17,50

Alle Berichte sind zu beziehen beim:

Wirtschaftsverlag NW
Verlag für neue Wissenschaft GmbH
Postfach 10 11 10
D-27511 Bremerhaven
Telefon: (04 71) 9 45 44 - 0
Telefax: (04 71) 9 45 44 77
Email: vertrieb@nw-verlag.de
Internet: www.nw-verlag.de

Dort ist auch ein Kompletverzeichnis erhältlich.