

Auswirkungen von Lang-Lkw auf die sicherheitstechnische Ausstattung und den Brandschutz von Straßentunneln

**Berichte der
Bundesanstalt für Straßenwesen**

Brückenbau Heft B 115

bast

Auswirkungen von Lang-Lkw auf die sicherheitstechnische Ausstattung und den Brandschutz von Straßentunneln

von

Georg Mayer
Sven Brennerger
Susanne Großmann

PTV Transport Consult
GmbH

**Berichte der
Bundesanstalt für Straßenwesen**

Brückenbau Heft B 115

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 bei der Carl Schünemann Verlag GmbH, Zweite Schlachtpforte 7, D-28195 Bremen, Telefon: (04 21) 3 69 03 - 53, bezogen werden.

Über die Forschungsergebnisse und ihre Veröffentlichungen wird in der Regel in Kurzform im Informationsdienst **Forschung kompakt** berichtet. Dieser Dienst wird kostenlos angeboten; Interessenten wenden sich bitte an die Bundesanstalt für Straßenwesen, Stabsstelle Presse und Öffentlichkeitsarbeit.

Ab dem Jahrgang 2003 stehen die **Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt)** zum Teil als kostenfreier Download im elektronischen BASt-Archiv ELBA zur Verfügung.
<http://bast.opus.hbz-nrw.de>

Impressum

Bericht zum Forschungsprojekt FE 15.0550/2011/ERB:

Auswirkungen von Lang-Lkw auf die sicherheitstechnische Ausstattung und den Brandschutz von Straßentunneln

Dieser Forschungsbericht wurde im Rahmen der interdisziplinären wissenschaftlichen Begleituntersuchung zum Feldversuch mit Lang-Lkw erstellt.

Fachbetreuung

Christof Sistenich

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

Fachverlag NW in der
Carl Schünemann Verlag GmbH
Zweite Schlachtpforte 7, D-28195 Bremen
Telefon: (04 21) 3 69 03 - 53
Telefax: (04 21) 3 69 03 - 48
www.schuenemann-verlag.de

ISSN 0943-9293

ISBN 978-3-95606-174-5

Bergisch Gladbach, Juni 2015

Kurzfassung – Abstract

Auswirkungen von Lang-Lkw auf die sicherheitstechnische Ausstattung und den Brandschutz von Straßentunneln

Die Aufrechterhaltung von Mobilität sowie der Schutz von Mensch und Natur vor den negativen Einwirkungen von Verkehr erfordern effiziente Lösungen zur Bewältigung des zunehmenden Güterfernverkehrs. Eine Möglichkeit zur Bewältigung des langfristig zunehmenden Straßengüterfernverkehrs wird in der Einführung größerer Transportfahrzeuge bzw. geänderter Fahrzeugkombinationen gesehen. Lang-Lkw weisen aufgrund der größeren maximalen Länge von 25,25 m unter Beibehaltung des bisher gültigen Gesamtgewichtes ein im Vergleich zu konventionellen Lkw vergrößertes Ladevolumen auf.

Im Rahmen dieses Forschungsvorhabens wurde untersucht, ob aufgrund des Einsatzes von Lang-Lkw erhöhte Anforderungen an die sicherheits- und brandschutztechnische Ausstattung von Straßentunneln zu stellen sind. Auf Basis von Recherchen zu Ladevolumen und -zusammensetzung wurden Brandleistungen und Rauchfreisetzungsraten von Lang-Lkw ermittelt, mit denen anhand von CFD-Simulationen verschiedener Brandszenarien die Berechnung von Rauch- und Temperatureinwirkung auf die Tunnelnutzer durchgeführt wurde. In einer anschließenden quantitativen Sicherheitsbewertung wurden szenarioabhängig Schadensausmaße und Eintrittshäufigkeiten der Situation eines nach RABT ausgestatteten Tunnels ohne Lang-Lkw-Verkehr vergleichend gegenübergestellt.

Ziel dieses Forschungsvorhabens war es, zu überprüfen, ob die bisher festgelegten Brandlasten für Brände in Straßentunneln auch für Lang-Lkw zutreffen. Zudem waren die aus dem Einsatz von Lang-Lkw auf dem deutschen Straßennetz resultierenden Sicherheitsrisiken für Straßentunnel, insbesondere im Brandfall, zu identifizieren, zu quantifizieren und zu beurteilen. Die Auswirkungen von Fahrzeugbränden mit Lang-Lkw auf die Sicherheit der Tunnelnutzer wurden analysiert, um ggf. erhöhte sicherheitstechnische und brandschutztechnische Anforderungen an Straßentunnel abzuleiten. Die Ergebnisse und ihre Beurteilung wurden abschließend als Empfehlungen an Entscheidungsträger formuliert.

Effects of longer trucks on safety-related and fire protection-related technical equipment of road tunnels

Maintaining mobility and protecting people and environment from negative impacts caused by traffic necessitates effective solutions to cope with increasing goods traffic. The introduction of longer transport vehicles or different vehicle combinations is considered to be one of the possibilities to handle the long-term growing road freight traffic. Due to their greater maximum length of 25.25 m Eurocombis offer a higher load volume compared to conventional HGVs, while retaining the presently permissible total weight.

Within the framework of the research project it was examined whether the use of Eurocombis necessitates higher requirements for the safety-related and fire protection-related technical equipment. Based on investigations about load volume and composition energy and smoke release rates for Eurocombis were determined. Using CFD simulations of various fire scenarios the effects of smoke and temperature on tunnel users were calculated. In the subsequent quantitative safety assessment the extents of damage and occurrence frequencies were compared to those of a RABT-conform tunnel without Eurocombi traffic for each scenario.

The objective of the research project was to check whether the fire loads set so far for fires in road tunnels equally cover Eurocombis. Additionally, the safety risks for road tunnels resulting from Eurocombis in the German road network, particularly in case of fire, had to be identified, quantified and assessed. The effects of vehicle fires involving Eurocombis on the safety of tunnel users were analyzed in order to be able to derive higher safety-related and fire protection-related requirements for road tunnels, if applicable. Finally, the results and their appraisal were formulated as recommendations for decision-makers.

Inhalt	
1 Einleitung / Ausgangslage.....	7
2 Zielsetzung / Aufgabe des Forschungsvorhabens.....	8
3 Methodische Vorgehensweise und Arbeitsprogramm	8
4 Grundlagenermittlung / -studie	9
4.1 Normative Grundlagen	9
4.1.1 Nationale und internationale Vorgaben zum Führen von Euro Combi	9
4.1.2 Anforderungen an den baulichen Brandschutz	11
4.1.3 Anforderungen an den betrieblichen Brandschutz	12
4.2 Ladungsvolumen und -zusammensetzung	12
4.3 Verkehrssicherheit	14
4.4 Lkw-Bestand	17
5 Bestimmung maßgeblicher Brandparameter	17
5.1 Energiefreisetzungsraten ausgewählter Transportgüter	17
5.2 Abbildung ausgewählter Energiefreisetzungsraten im Rechenmodell.....	19
5.3 Energiefreisetzung ZTV-ING-Kurve	22
5.4 Energiefreisetzung Referenzfall Lkw	23
5.5 Energiefreisetzung Untersuchungsfall Lang-Lkw	23
6 Festlegung von Untersuchungsvarianten	24
6.1 Referenzstunnel	24
6.2 Untersuchungstunnel	24
6.3 Untersuchungstunnel Substitution	25
7 Durchführung und Auswertung von CFD-Simulationen.....	25
7.1 Preprocessing	26
7.2 Processing.....	26
7.3 Postprocessing	26
7.3.1 Rauchausbreitung konventioneller Lkw (30 MW Brand).....	26
7.3.2 Rauchausbreitung Lang-Lkw (45 MW Brand)	27
8 Risikoanalytische Untersuchungen zum Sicherheitsniveau	27
8.1 Vorgehen.....	27
8.2 Risikoberechnung.....	27
8.2.1 Häufigkeitsermittlung	28
8.2.2 Ausmaßermittlung.....	28
8.2.3 Ermittlung der Häufigkeiten H_0 der Initialereignisse	31
8.2.4 Ermittlung der Verzweigungswahrscheinlichkeiten im Ereignisablauf	32
8.3 Untersuchungsergebnisse.....	36
8.3.1 Referenzfall mit Längsventilation – Tunnel 1A.....	36
8.3.2 Referenzfall mit Längsventilation und Rauchabsaugung – Tunnel 2A	36
8.3.3 Untersuchungsfall Tunnel 1B.....	36
8.3.4 Untersuchungsfall Tunnel 1C	36
8.3.5 Untersuchungsfall Tunnel 1D	37
8.3.6 Untersuchungsfall Tunnel 1E.....	37
8.3.7 Untersuchungsfall Tunnel 2B.....	37
8.3.8 Untersuchungsfall Tunnel 2C	37
8.3.9 Untersuchungsfall Tunnel 2D	38
8.3.10 Untersuchungsfall Tunnel 2E.....	38
9 Diskussion der Ergebnisse und Schlussfolgerungen.....	38
9.1 Vergleich der Berechnungsfälle.....	38
9.2 Diskussion der Berechnungsfälle.....	40
10 Einfluss auf ADR-Kategorisierung... 	41
11 Zusammenfassung und Empfehlungen	41
12 Literatur.....	42

1 Einleitung / Ausgangslage

Gemäß einer im Auftrag des Bundesministeriums für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung (BMVBS) für Deutschland erstellten Verkehrsprognose 2025¹ ist in den kommenden Jahren mit einer weiteren Zunahme des Güterverkehrs zu rechnen. Demnach wird eine Zunahme im Gesamtgüterverkehr von ca. 74 % bis 2025 gegenüber dem Jahr 2004 erwartet. Für den Güterfernverkehr auf der Straße wird im selben Bezugszeitraum ein Zuwachs von 84 % prognostiziert. Die Aufrechterhaltung von Mobilität sowie der Schutz von Mensch und Natur vor den negativen Einwirkungen von Verkehr erfordern effiziente Lösungen zur Bewältigung des zunehmenden Straßengüterfernverkehrs. Neben der Beseitigung von Engpässen im Netz der Bundesfernstraßen können moderne Verkehrsmanagementsysteme und neue Fahrzeugkonzepte zu einer Verbesserung der Effizienz im Straßengüterverkehr beitragen.

Eine Möglichkeit zur Erhöhung der Effizienz wird seitens Transportunternehmen und Fahrzeughersteller in der Einführung größerer Transportfahrzeuge bzw. geänderter Fahrzeugkombinationen gesehen. Im Rahmen eines auf 5 Jahren begrenzten Feldversuchs sollen nun die Wirkungen von sog. „Lang-Lkw“ auf Umwelt, Infrastrukturen und Transportsysteme untersucht werden. Hierzu ist seit dem 1. Januar 2012 eine Ausnahme-Verordnung für überlange LKW in Kraft, die den Betrieb von Lang-Lkw durch Transportunternehmen regelt. Erlaubt sind hierbei Zugkombinationen mit einer Länge von bis zu 25,25 Metern und einem Gesamtgewicht von max. 40 Tonnen, beziehungsweise 44 Tonnen im kombinierten Verkehr.

An dem Feldversuch mit Lang-Lkw beteiligen sich die 8 Bundesländer Bayern, Bremen, Hamburg, Hessen, Niedersachsen, Sachsen, Schleswig-Holstein und Thüringen. Die restlichen Bundesländer nehmen an dem Versuch nicht aktiv teil, da sie sowohl verfassungsrechtliche als auch die Verkehrssicherheit betreffende Bedenken haben.

Der Feldversuch wird durch die Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt) wissenschaftlich begleitet. Im Rahmen des Versuchs sollen Daten zu den eingesetzten Fahrzeugen, Fahrern, transportierten Gütern und gewählten Routen erhoben werden. Mit Hilfe von Interviews und Beobachtungen will die BASt unter anderem die Interaktionen der

Fahrzeuge mit anderen Verkehrsteilnehmern und die Auswirkungen der Fahrzeuge und Fahrzeugkombinationen auf die Infrastruktur analysieren. Außerdem sollen im Rahmen der wissenschaftlichen Studie die Fahrer in ihren Lang-LKW begleitet und beispielsweise Abbiegevorgänge und das Fahrverhalten in Baustellen beobachtet werden.

Die Abwicklung des Straßengüterfernverkehrs erfolgt überwiegend über das hochrangige Straßennetz der Bundesfernstraßen, in dem Straßentunnel äußerst wichtige und leistungsfähige infrastrukturelle Anlagen darstellen und wesentlich zu einer sicheren, ökonomischen und ökologischen Bewältigung des Verkehrs beitragen.

Die sicherheitstechnische Ausstattung von Straßentunneln ist in den Richtlinien für die Ausstattung und den Betrieb von Straßentunneln (RABT 2006)² geregelt. Anforderungen hinsichtlich der baulichen Durchbildung der Konstruktion sind in den Zusätzlichen Technischen Vertragsbedingungen und Richtlinien für Ingenieurbauten (ZTV-ING) festgelegt. Gegenüber der freien Strecke stellen insbesondere Ereignisse mit Bränden eine besondere Gefährdung für die Tunnelnutzer und die Tunnelkonstruktion dar. Die Auslegung und die Dimensionierung der sicherheitstechnischen Anlagen und der Tunnelkonstruktion erfolgt anhand von Bemessungsbränden und Temperatur-Zeit-Kurven.

Die RABT 2006 sehen zur Minimierung von Rauch- und Hitzeeinwirkungen infolge eines Fahrzeugbrandes unterschiedliche Lüftungsarten vor. In Abhängigkeit der Tunnellänge und der Betriebsart (Richtungsverkehr, Gegenverkehr) können hierzu neben einer natürlichen Längslüftung unterschiedliche mechanische Lüftungssysteme mit auf den jeweiligen Tunnel abgestimmten Lüftungskonzepten erforderlich werden.

Die Dimensionierung der Lüftungsanlagen erfolgt auf Basis von fahrleistungsabhängigen Bemessungsbrandleistungen. Je nach Lkw-Fahrleistung sind Brandleistungen zwischen 30 MW und 100 MW mit entsprechenden Rauchgasfreisetzungen zwischen 80 m³/s und 200 m³/s anzusetzen. Die Abbildung der Brandentwicklung erfolgt gem. der in den ZTV-ING definierten Temperatur-Zeit-Kurve. Diese Bemessungsgrundlagen repräsentieren das gegenwertig auf deutschen Straßen verkehrende bzw. zugelassene LKW-Fahrzeugkollektiv. Stellvertretend hierfür dient als Bezugsgröße das Ladevolumen eines Sattelzuges mit einer zulässigen Länge von 16,50 m.

¹ Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung (BMVBS); Beratergruppe Verkehr + Umwelt GmbH; Intraplan Consult GmbH (Hrsg.): Prognose der deutschlandweiten Verkehrsverflechtungen 2025 (FE-Nr. 96.0857/2005), (2007)

² Forschungsgesellschaft für das Straßen und Verkehrswesen (Hrsg.) (2006): Richtlinien für die Ausstattung und den Betrieb von Straßentunneln (RABT), FGSV Verlag, 2006

Lang-Lkw mit einer Länge von bis zu 25,25 m weisen demgegenüber jedoch deutlich höhere Ladevolumina auf. Es ist derzeit jedoch nicht bekannt, in welcher Korrelation diese höheren Ladevolumina im Vergleich zu den bisherigen Bemessungsgrundlagen stehen und ob sich daraus gegebenenfalls erhöhte Anforderungen an die sicherheitstechnische Ausstattung und den Brandschutz von Straßentunneln ergeben.

2 Zielsetzung / Aufgabe des Forschungsvorhabens

Ziel dieses Forschungsvorhabens ist es, zu überprüfen, ob die bisher festgelegten Brandlasten für Brände in Straßentunneln auch für Lang-Lkw zutreffen. Zudem sind die aus dem Einsatz von Lang-Lkw auf dem deutschen Straßennetz resultierenden Sicherheitsrisiken für Straßentunnel, insbesondere im Brandfall, zu identifizieren, zu quantifizieren und zu beurteilen. Durch das Projekt sollen die Auswirkungen von Fahrzeugbränden mit Lang-Lkw auf die Sicherheit der Tunnelnutzer und die Konstruktion analysiert und der Bedarf ggfs. erhöhter sicherheitstechnischer und brandschutztechnischer

Anforderungen an Straßentunnel abgeleitet werden.

3 Methodische Vorgehensweise und Arbeitsprogramm

Schwerpunkte dieses Forschungsvorhabens bilden zum einen die Überprüfung von Bemessungsparametern infolge sich ändernder Ladevolumina durch Lang-Lkw und zum anderen die Bewertung hinsichtlich ihrer Auswirkungen auf die Sicherheit der Tunnelnutzer und der Tunnelkonstruktion. In einem relativen Vergleich werden hierzu zunächst Veränderungen in den Brandleistungen bezogen auf die nach RABT 2006 gültigen Bemessungsbrandleistungen ermittelt und die daraus ableitbaren Temperatur-Zeit-Kurven den in den ZTV-ING definierten gegenübergestellt. Die Sicherheitsbewertung erfolgt mit Hilfe eines risikoanalytischen Ansatzes, wodurch neben den Wirkungen auch die Häufigkeit des Ereigniseintritts Berücksichtigung findet.

In Bild 1 ist ein Ablaufdiagramm über die wesentlichen Schritte dargestellt.

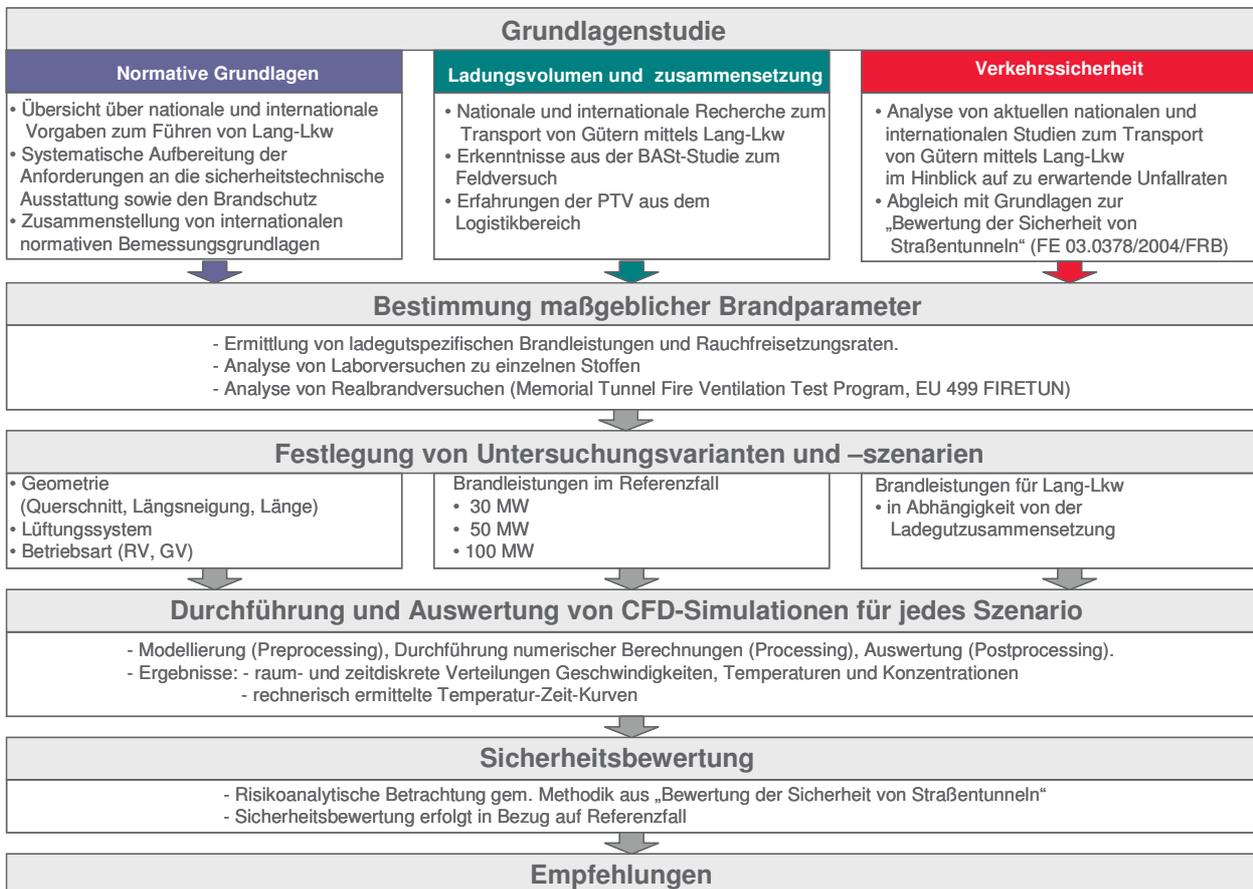


Bild 1: Methodisches Vorgehen

4 Grundlagenermittlung / -studie

In Teilen Europas sind längere und schwerere Lkw, sog. EuroCombi, zur Teilnahme im Straßenverkehr zugelassen. Diese Fahrzeuge werden durch Kombinationen von verschiedenen Nutzfahrzeugeinheiten gebildet und weisen eine Länge von bis zu 25,25 m auf. Ihr zulässiges Gesamtgewicht beträgt bis zu 60 t. Ein Lang-Lkw ist ein EuroCombi, dessen zulässiges Gesamtgewicht auf 40 t bzw. 44 t im kombinierten Verkehr begrenzt ist. Grundsätzlich lassen sich hierbei die in Bild 2 dargestellten Fahrzeugkombinationen unterscheiden.

Typ	Kombinationen	Darstellung Grundtypen
I	Sattelzugmaschine + Auflieger	
II	Sattelzugmaschine + Auflieger + Mittelachsanhänger	
III	Sattelzugmaschine + Auflieger + Auflieger	
IV	Motorwagen + Anhänger	
V	Motorwagen + Dolly + Auflieger	
VI	Motorwagen + zweifacher Mittelachsanhänger	

Bild 2: Grundtypen an Fahrzeugkombinationen

4.1 Normative Grundlagen

4.1.1 Nationale und internationale Vorgaben zum Führen von Euro Combi

4.1.1.1 Europäische Union

In der **RICHTLINIE 96/53/EG DES RATES vom 25. Juli 1996** sind für Fahrzeuge und Fahrzeugkombinationen des Straßengüterverkehrs die Rahmenbedingungen hinsichtlich der

- maximal zulässigen Abmessungen im innerstaatlichen und grenzüberschreitenden Verkehr, sowie der
- maximal zulässigen Gewichte im grenzüberschreitenden Verkehr

vorgegeben. Davon abweichende Regelungen dürfen die einzelnen Mitgliedsstaaten in ihrem nationalen Recht (in Deutschland: StVO, StVZO) für den innerstaatlichen Verkehr zulassen. Solche nationalen Abweichungen gelten allerdings nur innerhalb der Landesgrenzen. Außerdem müssen längere Lastzüge in das "European Modular System" (EMS) passen, das heißt die Fahrzeuge müs-

sen aus Anhängern, Aufliegern, Motorwagen etc. bestehen, die in der Richtlinie definiert sind.

Eine Festlegung spezieller Rahmenbedingungen für Lang-Lkw ist in der Richtlinie 96/53/EG jedoch noch nicht enthalten. Eine Zusammenstellung der nach dieser Richtlinie derzeit zulässigen Abmessungen, Gewichte und Achslasten enthalten nachfolgende Tab. 1 bis Tab. 3.

Maximal zulässige Abmessungen gem. RICHTLINIE 96/53/EG:

Max. zul. Längen	Anhänger	12,00 m	
	Kraftfahrzeug	12,00 m	
	Sattelkraftfahrzeug (Kraftfahrzeug mit einem Sattelanhänger bzw. Auflieger)	16,50 m	
	Lastzug (Lastkraftwagen mit Anhänger)	18,75 m	
Max. zul. Breiten	sämtliche Fahrzeuge	2,55 m	
	Aufbauten von klimatisierten Fahrzeugen	2,60 m	
Max. zul. Höhen	sämtliche Fahrzeuge	4,00 m	
Max. zul. Abstände	Lastzüge	zwischen dem vordersten äußeren Punkt der Ladefläche hinter dem Fahrerhaus und dem hintersten äußeren Punkt des Anhängers der Fahrzeugkombination, abzüglich des Abstands zwischen der hinteren Begrenzung des Kraftfahrzeugs und der vorderen Begrenzung des Anhängers (nutzbare Ladefläche)	15,65 m
		zwischen dem vordersten äußeren Punkt der Ladefläche hinter dem Fahrerhaus und dem hintersten äußeren Punkt des Anhängers der Fahrzeugkombination	16,40 m
	Sattelkraftfahrzeug	zwischen der Achse des Sattelzapfens und der hinteren Begrenzung des Sattelanhängers	12,00 m
		zwischen der Achse des Sattelzapfens und irgendeinem Punkt der vorderen Begrenzung des Sattelanhängers	2,04 m

Tab. 1: Maximale Abmessungen

Maximal zulässiges Gewicht eines Fahrzeugs gem. RICHTLINIE 96/53/EG:

Anhänger	2-achsig	18 t
	3-achsig	24 t
Kraftfahrzeuge	2-achsig	18 t
	3-achsig	25 t / 26 t
	4-achsig mit 2 Lenkachsen	32 t
Lastzüge	2-achsiges Kraftfahrzeug mit 2-achsigem Anhänger	36 t
	2-achsiges Kraftfahrzeug mit 3-achsigem Anhänger	40 t
	3-achsiges Kraftfahrzeug mit 2- oder 3-achsigem Anhänger	40 t
Sattelkraftfahrzeuge	2-achsiges Kraftfahrzeug mit 2-achsigem Sattelanhänger	36 t
	2-achsiges Kraftfahrzeug mit 3-achsigem Sattelanhänger	40 t
	3-achsiges Kraftfahrzeug mit 2- oder 3-achsigem Sattelanhänger	40 t
	3-achsiges Kraftfahrzeug mit 2- oder 3-achsigem Sattelanhänger im kombinierten Verkehr	44 t

Tab. 2: Maximal zulässiges Gewicht eines Fahrzeugs

Maximal zulässige Achslasten gem. RICHTLIE 96/53/EG:

Anhänger	Einzelachse		10 t
	Doppelachse	$d < 1,0 \text{ m}$	11 t
		$1,0 \text{ m} \leq d < 1,3 \text{ m}$	16 t
		$1,3 \text{ m} \leq d < 1,8 \text{ m}$	18 t
		$1,8 \text{ m} \leq d$	20 t
	Dreifachachsen	$d < 1,3 \text{ m}$	21 t
$1,3 \text{ m} \leq d < 1,4 \text{ m}$		24 t	
Kraftfahrzeuge	Antriebsachse		11,50 t
	Doppelachse	$d < 1,0 \text{ m}$	11,50 t
		$1,0 \text{ m} \leq d < 1,3 \text{ m}$	16 t
		$1,3 \text{ m} \leq d < 1,8 \text{ m}$	18 t / 19 t

Tab. 3: Maximal zulässige Achslasten in Abhängigkeit des Achsabstandes in Deutschland

4.1.1.2 Nationale Regelungen

In der nachfolgenden Tab. 4 und Tab. 5 sind die Vorgaben in den einzelnen Ländern im Hinblick auf die zulässigen Fahrzeuglängen, Gesamtgewichte sowie Fahrzeugtypen zusammengefasst und vergleichend gegenübergestellt. Darüber hinaus sind darin die rechtlichen Grundlagen sowie der Status der Zulassung in den einzelnen Ländern aufgelistet. Hierbei zeigt sich, dass in den Ländern, in denen sich längere und schwerere Lkw in der Erprobung befinden, die Zulassung über Ausnahme genehmigungen erfolgt. In Schweden, Finnland und seit dem 01.01.2013 auch in den Niederlanden gelten generelle Zulassungsverordnungen. Allen Regelungen ist gemein, dass eine Fahrt mit einem EuroCombi nur auf dafür freigegebenen Strecken erfolgen darf. Im Hinblick auf das zulässige Gesamtgewicht wird deutlich, dass im überwiegenden Teil der Länder eine Begrenzung von 60 t gilt. Lediglich Deutschland beschränkt das zulässige Gesamtgewicht bei seinen Lang-Lkw auf 40 t bzw. 44 t im kombinierten Verkehr. Großbritannien, Österreich und die Schweiz lehnen die Zulassung von längeren und schwereren Lkw auf Ihren Straßennetzen grundsätzlich ab. Begründet wird diese Ablehnung mit Aspekten des Umweltschutzes, der Verkehrssicherheit sowie der Eigenart der Straßen. Hinsichtlich der technischen Ausstattung von EuroCombis sind in den Regelwerken unterschiedlich tiefgehende Anforderungen festzustellen. Während in den niederländischen und deutschen Vorgaben sehr detaillierte Anforderungen definiert sind, weisen andere Vorgaben globalere Anforderungen auf. Beispielsweise können folgende zusätzliche Ausstattungselemente gefordert sein:

- Seitlicher und vorderer Unterfahrschutz

- Zusätzliche Beleuchtungseinrichtungen an Zugfahrzeug und Anhänger
- Luftfederung
- Differenzialsperre oder Antriebsschlupfregelung
- Elektronisch gesteuertes Bremssystem (EBS)
- Scheibenbremsen und Retarder im Zugfahrzeug
- Automatische Achslastüberwachung
- Spurhaltewarnsystem
- Elektronische Fahrdynamikregelsysteme
- Automatisches Abstandsregelsystem oder Notbremsassistentensystem
- Zusätzliche Einrichtungen für indirekte Sicht (Frontspiegel, Rückspiegel)
- Kamera-System am Heck
- Konturmarkierungen
- Aufschrift am Heck, dass es sich um ein langes Fahrzeug handelt
- Digitaler Fahrtenschreiber

Darüber hinaus werden verschiedentlich Anforderungen an die Motorleistung (z.B. $P [\text{kW}] \geq 5 \times \text{zul. Gesamtgewicht in Tonnen}$) und den einzuhaltenen Wendekreis definiert.

Ausgeschlossen vom Transport mit EuroCombis sind i. d. R. flüssige Massengüter in Großtanks mit einem Volumen $\geq 1.000 \text{ l}$, kennzeichnungspflichtige Gefahrgüter sowie lebende Tiere.

Aus Tab. 5 geht hervor, dass in einigen Ländern bestimmte Fahrzeugkombinationen nicht zulässig sind. In Norwegen sind beispielsweise Fahrzeugkombinationen, die aus einem Motorwagen mit Anhänger oder aus einem Motorwagen mit zwei Zentralachsanhängern bestehen, nicht erlaubt. Letztere Fahrzeugkombination ist auch in Deutschland und Dänemark nicht zulässig.

In Deutschland und den Niederlanden müssen Fahrer als Qualifikation zum Führen von längeren und schwereren Lkw / EuroCombis über mindestens 5 Jahre ohne Unterbrechung im Besitz der Fahrerlaubnis der Klasse CE sein sowie an einer Schulung zum sicheren Umgang mit den besonderen Fahreigenschaften und zum Kurven und Rückwärtsfahren teilgenommen haben. In Deutschland muss darüber hinaus eine Berufserfahrung von mindestens 5 Jahren im gewerblichen Straßengüter- oder Werkverkehr nachgewiesen werden.

	Deutschland	Belgien	Dänemark	Schweden	Finnland	Frankreich	Niederlande	Norwegen
Bezeichnung	Lang-Lkw	Euro Combi	Modulvogn tog (Modulare LKW)	LHV (Long and heavy vehicles)	LHV (Long and heavy vehicles)	Euro Combi	LZV langere en zwaardere vrachtauto (längere und schwerere Frachtwagenkombination)	Modulvogn tog (Modulare LKW)
Rechtliche Grundlage	LKWÜberStVAusnV (Verordnung über Ausnahmen von straßenverkehrsrechtlichen Vorschriften für Fahrzeuge und Fahrzeugkombinationen mit Überlänge)	Nationale Zulassung für Euro Combi in 3 Regionen	Ausnahmeregelung	Schwedische Straßenverkehrsordnung	Finnische Straßenverkehrsordnung		Beleidsregel keuring en ontheffing-verlening LZV (Verordnung über die allgemeine Zulassung von LZV)	- Vedlegg 1 til forskrift om bruk av kjøretøy - Forskrift om vektor og dimensjoner - kjøretøyforskriften
Status	Feldversuch vom 01.01.2012 – 31.12.2016	Pilotversuch ab Sommer 2014	Feldversuch von 2008 bis 2017	Generell zugelassen seit 1973 mit 24 m Länge, seit 1997 mit 25,25 m Länge	Generell zugelassen seit 70er Jahre mit 22 m Länge, seit 1997 mit 25,25 m Länge	Feldversuch seit April 2010	Seit 01.01.2013 sind LZV generell zugelassen	Erprobungsphase vom 01.06.2008 – 01.06.2017
Freigegebene Strecken	Positivnetz	Positivnetz	Positivnetz			Positivnetz	Positivnetz	Positivnetz
Max. zulässige Länge	25,25 m	25,25 m	25,25 m (30 m in Erprobung)	25,25 m	25,25 m	25,00 m	25,25 m	25,25 m
Zul. Gesamtgewicht	40 t / 44 t	60 t	60 t (90 t in Erprobung)	60 t	60 t	57 t	60 t	60 t

Tab. 4: Allgemeine Vorgaben

Fahrzeugkombinationen		Deutschland	Belgien	Dänemark	Schweden	Finnland	Frankreich	Niederlande	Norwegen
I	Sattelzugmaschine + Auflieger	≤ 17,80 m							
II	Sattelzugmaschine + Auflieger + Mittelachsanhänger	≤ 25,25 m		≤ 25,25 m	≤ 25,25 m	≤ 25,25 m		≤ 25,25 m	≤ 25,25 m
III	Sattelzugmaschine + Auflieger + Auflieger	≤ 25,25 m		≤ 25,25 m				≤ 25,25 m	≤ 25,25 m
IV	Motorwagen + Anhänger	≤ 24,00 m		≤ 24,00 m				≤ 24,00 m	Nicht zulässig
V	Motorwagen + Dolly + Auflieger	≤ 25,25 m		≤ 25,25 m	≤ 25,25 m	≤ 25,25 m		≤ 25,25 m	≤ 25,25 m
VI	Motorwagen + zweifacher Mittelachsanhänger	Nicht zulässig		Nicht zulässig				≤ 25,25 m	Nicht zulässig

Tab. 5: Zulässige Fahrzeugkombinationen

4.1.2 Anforderungen an den baulichen Brandschutz

Aufgabe des baulichen Brandschutzes ist es, ein Tunnelbauwerk im Brandfall durch seine bauliche Ausbildung vor Temperatureinwirkungen so zu schützen, dass seine Tragfähigkeit über die Branddauer erhalten bleibt und es nach einem Brandereignis möglichst zeitnah und ohne größte-

ren Aufwand wieder in Betrieb genommen werden kann. Zur Bemessung des baulichen Brandschutzes werden Vorgaben notwendig, die den Einfluss infolge einer Temperatureinwirkung über die Zeit berücksichtigen. Hierzu existieren eine Reihe von unterschiedlichen Temperatur-Zeit-Kurven bzw. Temperatur-Zeit-Verläufe. Die verschiedenen Bemessungsansätze werden in Kap. 1.2 des Anhangs zu diesem Bericht vorgestellt und diskutiert.

Berücksichtigung finden hierbei Bemessungsansätze nach folgenden Vorgaben:

- Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen und Richtlinien für Ingenieurbauten (ZTV-ING), Teil 5, Tunnelbau (ZTV-Ing – Kurve)
- Anforderungen des Brand- und Katastrophenschutzes an den Bau und den Betrieb von Eisenbahntunneln des Eisenbahnbundesamtes (EBA-Kurve)
- DIN 4102-2: Brandverhalten von Baustoffen und Bauteilen; Teil1: Bauteile, Begriffe, Anforderungen und Prüfungen Einheits-Temperatur-Zeit-Kurve (ETK-Kurve)
- ISO 834-1: Feuerwiderstandsprüfungen - Bauteile - Teil 1: Allgemeine Anforderungen (ISO-Kurve)
- DIN EN 1991-1-2 für flüssige Kohlenwasserstoff- (Hydrocarbon)-Brände) (HC-Kurve, HCinc-Kurve)
- Rijkswaterstaat (RWS-Kurve, RWSmod. - Kurve)

In Bild 3 sind die verschiedenen Bemessungskurven einander vergleichend gegenübergestellt. Daraus wird ersichtlich, dass die RWS-Kurven mit 1.350 °C die die höchsten Temperaturen aufweisen. Mit 1.300 °C weist die HCinc-Kurve nur eine geringfügig niedrigere Maximaltemperatur. Mit etwas Abstand folgen die ZTV-ING-Kurve sowie die EBA-Kurve, deren Maximaltemperaturen 1.200 °C betragen. Eine noch niedrigere Maximaltemperatur weist die HC-Kurve mit 1.100 °C auf. Bis auf die ETK / ISO Kurve ist für alle anderen Bemessungskurven ein sehr steiler Temperaturanstieg in den ersten fünf Brandminuten charakteristisch. Auffallend ist auch, dass lediglich die ZTV-ING-Kurve sowie die EBA-Kurve eine zeitliche Begrenzung aufweisen, d.h. geschlossene Brandkurven sind.

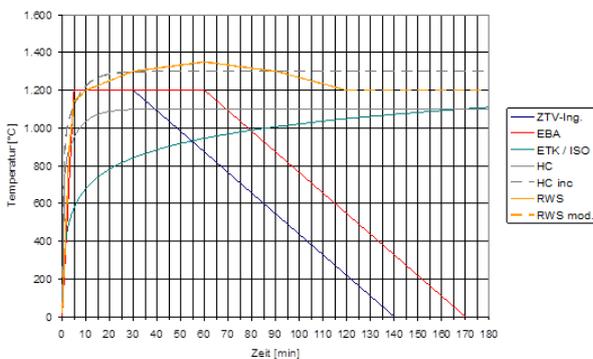


Bild 3: Vergleichende Gegenüberstellung von Brandkurven

4.1.3 Anforderungen an den betrieblichen Brandschutz

Aufgabe des betrieblichen Brandschutzes ist es, Personen so vor den Einwirkungen von Hitze und Rauch zu schützen, dass eine Selbstrettung der Tunnelnutzer auf den vorgesehenen Fluchtwegen möglich ist, die Fremdrettung durch die Ereignisdienste sichergestellt und die Brandbekämpfung entsprechend unterstützt werden kann. Zur Gewährleistung dieses Schutzziels werden Vorgaben hinsichtlich der Auslegung von betriebstechnischen Einrichtungen erforderlich. Die verschiedenen Bemessungsansätze werden im Anhang, Kap. 1.2, zu diesem Bericht vorgestellt und diskutiert.

Nachfolgende Tab. 6 enthält eine vergleichende Zusammenstellung der Bemessungsgrundlagen in den einzelnen Staaten. Die Bemessungsbrandleistungen variieren danach in einem Bereich von 20 MW bis 300 MW. Eine Brandleistung von 20 MW – 30 MW entspricht dem Brand eines Reisebusses. Brennende Lkw können eine Brandleistung von 30 – 200 MW bewirken. Brandleistungen von 200 MW bis 300 MW dienen zur Bemessung von Bränden infolge von Gefahrgutfreisetzung.

Land	Bemessungsbrandleistung	Anmerkung
Australien	50	Zur Dimensionierung von Längslüftungssystemen in Verbindung mit FFFS
Deutschland	30 – 100	Abhängig von der Tunnellänge und Lkw-Fahrleistung pro Tag und Röhre
Frankreich	30 – 200	200 MW zur Dimensionierung von Längslüftungssystemen, wenn Gefahrguttransporte zulässig sind
Griechenland	100	Zur Dimensionierung von Längslüftungssystemen
Italien	20 – 200	
Japan	30	
Niederlande	100 – 200	Zur Dimensionierung des Lüftungssystems: 100 MW, wenn keine Tanklastwagen mit Gefahrgütern zulässig sind, ansonsten 200 MW
Norwegen	20 – 100	abhängig von einer Risikoklassifizierung, ausschließlich Längslüftungssysteme,
Österreich	30 – 50	Im Fall erhöhter Risiken 50 MW
Portugal	10 – 100	Abhängig vom Verkehrstyp
Russland	50 – 100	
Singapur	30 – 200	Abhängig von den zulässigen Fahrzeugtypen
Spanien	≥ 30	
Schweden	100	Zur Dimensionierung von Längslüftungssystemen
Schweiz	30	
UK	30 – 100	
USA	30 – 300	300 MW, wenn Gefahrguttransporte zulässig

Tab. 6: Zusammenfassung bzw. vergleichende Gegenüberstellung der Bemessungsgrundlagen

4.2 Ladungsvolumen und -zusammensetzung

Die Brandleistung eines Lkw variiert in Abhängigkeit von der Art und Menge der transportierten Güter und deren Brandeigenschaften. Im Folgenden werden daher Erfahrungen zum Transport von Gütern mittels EuroCombi in verschiedenen Län-

dem hinsichtlich Ladungsvolumen und -zusammensetzung als Grundlage für die weiteren Untersuchungsschritte zusammengestellt.

Deutschland

Der Einsatz von Lang-Lkw verfolgt das Ziel, bei gleicher Transportleistung weniger Fahrzeuge einsetzen zu müssen, was Kostenvorteile für die Speditionen bringen kann. Dabei dürfen die bisherigen Gewichtsobergrenzen von 40 t bzw. 44 t im kombinierten Verkehr auch von Lang-Lkw nicht überschritten werden. Im Vergleich zu herkömmlichen Lkw besitzen Lang-Lkw eine geringere Zuladung, weil ihr Leergewicht größer ist, dafür besitzen sie aber ein um etwa 50 % größeres Ladevolumen, was für viele Transportgüter Vorteile bringt. Ein Lang-Lkw kann bis zu 53 Paletten laden, wohingegen ein Standard-Lkw nur 34 Paletten transportieren kann.

Mit Stand Januar 2013 sind insgesamt etwa 15 - 20 Speditionen mit weniger als 40 Fahrzeugen am Feldversuch beteiligt. Im Vergleich zum täglichen Güterverkehrsaufkommen von konventionellen Lkw stellt der Anteil von Lang-Lkw derzeit eine verschwindend geringen Anteil dar. Die Auswertung der vorhandenen Informationen liefert aber einen ersten Überblick über die transportierten Güter. Hier zeigt sich, dass schon für die geringe Anzahl an bisher zum Einsatz kommenden Fahrzeugen die Ladungen ein breites Spektrum aufweisen. Die transportierten Güter reichen dabei von Nahrungs- und Genussmitteln über Textilien bis hin zu chemischen Erzeugnissen. Weitere Güter sind Zulieferteile für die Automobilindustrie, Haushaltsgeräte, Holz, Papier und Pappe. Lang-Lkw weisen damit ein großes Einsatzspektrum auf. Ein typisches Ladungsgut für Lang-Lkw ist nicht feststellbar. Grundsätzlich sind alle Ladungsarten für den Einsatz von Lang-Lkw denkbar, wobei sich Lang-Lkw für Volumengüter mit geringem Gewicht besonders eignen.

Ausgenommen vom Transport mit Lang-Lkw sind jedoch gem. LKWÜberlStVAusV³ vom 19. Dezember 2011 kennzeichnungspflichtige Gefahrgüter, flüssige Massengüter in Großtanks, lebende Tiere sowie freischwingend befestigte Güter, die aufgrund ihrer Masse zur Beeinträchtigung der Fahrstabilität führen. Die bisher am Versuch beteiligten Lang-Lkw werden vorwiegend als Pendelfahrten im Punkt-zu-Punkt-Verkehr eingesetzt. Aufgrund der Vorteile beim Be- und Entladen werden häufig palettierte Güter transportiert, was aber

im Allgemeinen auch für konventionelle Lkw gilt. Zu den palettierten Gütern zählt u.a. auch die sogenannte weiße Ware, das heißt Haushaltselektrogeräte wie Waschmaschinen, Kühlschränke etc.

Dänemark

Im Auftrag der dänischen Straßenbehörde wurden im Rahmen des Feldversuchs in den Jahren 2009 und 2010 Fahrtenbuchprüfungen durchgeführt⁴. Gegenüber den herkömmlichen Fahrtenbüchern, in denen der Spediteur bzw. der Fahrer lediglich angibt, wohin ein bestimmter Lkw in der fraglichen Woche gefahren ist und welche Güter er transportiert hat, wurde im Falle der Überprüfung der EuroCombi eine etwas umfangreichere Befragung durchgeführt, die auch Angaben zu ihrer allgemeinen Nutzung enthielt.

Die Umfrage ergab u.a., dass EuroCombi zu ca. 92 % für den Gütertransport, insbesondere für den Transport von Stückgut und Lebensmitteln, eingesetzt werden, während andere Lkw nur zu ungefähr 73 % dafür verwendet werden. Beim Vergleich der Warengruppen, die von EuroCombi bzw. von herkömmlichen Lkw transportiert werden, haben zwei Warengruppen einen relativ großen Anteil bei beiden Fahrzeugtypen; dies sind zum einen Lebensmittel, Futtermittel, Getränke etc. und zum anderen Stückgut. EuroCombi werden also überwiegend für den Transport von nur wenigen Warengruppen verwendet. Darüber hinaus sind dies die Warengruppen, bei denen das Transportvolumen der EuroCombi am besten genutzt werden kann. Tendenziell werden EuroCombi also überwiegend zum Transport von Volumengütern verwendet. Ungefähr 2/3 der Frachtgüter gehörten zu dieser Warengruppe, ein deutlich höherer Anteil als bei normalen Lkw.

Das durchschnittliche Gesamtgewicht der verschiedenen EMS-Fahrzeugtypen bzw. EuroCombi beträgt ca. 40 t und die durchschnittliche Achslast ca. 6 t. Dies ist gleich viel wie oder sogar etwas weniger als bei herkömmlichen Sattel- und Lastzügen.

Niederlande

In den Niederlanden werden zunehmend LZVs im Güterverkehr eingesetzt. Im Januar 2010 gibt es 196 Firmen, die zusammen über 429 LZV-Ausnahmebewilligungen verfügen. Marktsektoren, in denen Firmen in den Niederlanden LZVs einsetzen, sind vor allem der Einzelhandel (24 %), der

³ BMVBS: Verordnung über Ausnahmen von straßenverkehrsrechtlichen Vorschriften für Fahrzeuge und Fahrzeugkombinationen mit Überlänge, 19. Dezember 2011

⁴ The Danish Road Directorate: Evaluation of trial with European Modular System, Dezember 2011

Seecontainertransport (22 %) und der Zierpflanzenanbau (14 %) ⁵.

Wesentliche Gründe für die Beantragung einer LZV-Ausnahmebewilligung sehen Transportunternehmen in der Senkung von Transportkosten und in der Reduzierung von CO₂-Emissionen. Die Kosten pro Kilometer eines LZV liegen durchschnittlich 6 % höher als die einer regulären Lastkraftwagenkombination. Für Bulk-Ware und Container (schwere Güter) liegt dieser Prozentsatz höher (10 % bzw. 9 %). Für Stückgüter beträgt dieser Prozentsatz 3 %. Die durchschnittliche Ladekapazität eines LZV ist allerdings um fast 40 % höher, was zu einer durchschnittlichen Einsparung von ungefähr 35 % pro LZV-Fahrt führt.

Nachfolgende Abbildung zeigt eine Verteilung nach Marktsektoren in denen 150 Firmen mit LZV-Ausnahmebewilligung im September 2009 aktiv waren.

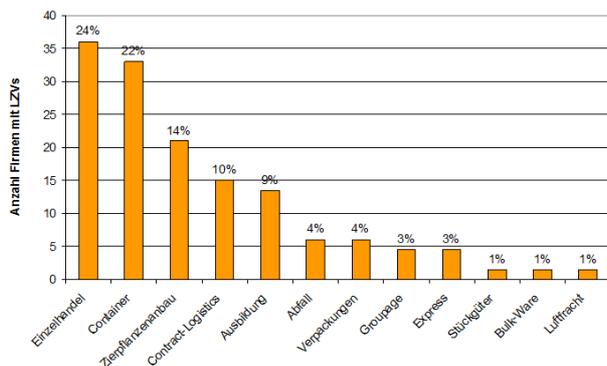


Bild 4: Verteilung nach Marktsektoren auf Basis von 150 Firmen mit LZV-Ausnahmebewilligung (Quelle: RDW 2010) ⁶

Zusammenfassung Ladungsvolumen und Ladungszusammensetzung

Grundsätzlich sind alle Ladungsarten für den Einsatz von Lang-Lkw denkbar, wobei sich Lang-Lkw für Volumengüter mit geringem Gewicht besonders eignen. Hier kann die große Transportkapazität der EuroCombi am besten genutzt werden, ohne dass die geringere zulässige Zuladung der Fahrzeuge aufgrund des höheren Eigengewichts ins Gewicht fällt. Das Spektrum der bisher transportierten Güter ist vielfältig und reicht von Nahrungs- und Genussmitteln über Textilien, Holz, Papier oder Pappe

bis hin zu chemischen Erzeugnissen. Aber auch Stückgut wird transportiert.

4.3 Verkehrssicherheit

Unfälle können einerseits Ursache für Sach- und Personenschäden sein, die direkt aus dem Kollisionsereignis folgen. Andererseits können sie auch eine Ursache für weitere Ereignisse, wie z.B. Fahrzeugbrände, darstellen. Im Hinblick auf die Sicherheit in Tunneln ist es daher von Bedeutung, welcher Einfluss durch EuroCombi auf das Unfallgeschehen zu erwarten ist. Als Grundlage für die weiteren Untersuchungsschritte erfolgt daher im Folgenden eine Recherche zu Erfahrungen bzgl. der Verkehrssicherheit von EuroCombi in verschiedenen europäischen Ländern.

Deutschland

Aus dem aktuellen Feldversuch liegen bisher keine validen Erkenntnisse im Hinblick auf Unfälle mit Lang-Lkw vor. Frühere Studien wie z.B. der von 2006 bis 2008 in Nordrhein-Westfalen durchgeführte Pilotversuch ⁷ zum Einsatz von Gigalibern haben keine Auffälligkeiten im Hinblick auf die Verkehrssicherheit gezeigt.

Eine zur Befahrbarkeit von Verkehrsanlagen mit Lang-Lkw durchgeführte Untersuchung ⁸ hat ergeben, dass die Regelabmessung einer Pannenbucht in Straßentunneln nach RABT 2006 mit einer Länge von 40 m nicht ausreicht, um das Fahrzeug parallel zur Tunnelwand abzustellen und die Fahrzeuge bis zu 1,9 m in den 1. Fahrstreifen hineinreichen können. Somit wäre ein Lang-Lkw in einer Pannenbucht stets wie ein Liegenbleiber auf einem Fahrstreifen zu betrachten. Da die RABT 2006 die Anordnung von Pannenbuchten erst ab einer Tunnelnänge von mehr als 900 m vorsehen und der Großteil der Straßentunnel in Deutschland eine geringere Länge aufweist, bleibt die Situation mit einem Hineinragen auf den 1. Fahrstreifen auf eine überschaubare Anzahl von Tunneln beschränkt. Des Weiteren ist zu beachten, dass längere, hochbelastete Straßentunnel häufig mit einem Pannestreifen anstelle einer Pannenbucht ausgestattet sind. Sind Pannenbuchten vorhanden, wird deren Nutzung permanent überwacht und es erfolgt im Falle einer Belegung automatisch das Einleiten

⁵ Rijkswaterstaat - Dienst Verkeer en Scheepvaart: Längere und schwerere Lastkraftwagen (LZVs) in den Niederlanden, Einblicke und Erfahrungen im Zeitraum 1995-2010, März 2010

⁶ Rijkswaterstaat - Dienst Verkeer en Scheepvaart: Längere und schwerere Lastkraftwagen (LZVs) in den Niederlanden, Einblicke und Erfahrungen im Zeitraum 1995-2010, März 2010

⁷ Wangrin, G., Stürmer, B., Wöhrmann M.: Technische Erprobung von Fahrzeugkombinationen mit einer Gesamtlänge bis 25,25 m, Ministerium für Bauen und Verkehr des Landes Nordrhein-Westfalen, 2009

⁸ Lippold, Ch., Schemmel A.: Befahrbarkeit spezieller Verkehrsanlagen auf Autobahnen mit Lang-Lkw, unveröffentlicher Schlussbericht zu FE09.0180 im Auftrag der BAST, Dresden

von verkehrssichernden Maßnahmen wie z.B. das Anzeigen von Gefahrenwarnungen, Geschwindigkeitsreduktionen, Fahrstreifensperrungen. Gleichzeitig erfolgt das automatische Aufschalten eines Videobildes von der betreffenden Pannenbucht bei einer überwachenden Stelle, von wo aus weitere Maßnahmen eingeleitet werden können, wie beispielsweise das Sperren der betroffenen Röhre. Auswirkungen auf die Verkehrssicherheit infolge der Nutzung von Pannenbuchten durch Lang-Lkw werden dadurch minimiert.

Bei den im Rahmen des FE 03.378/2004/FRB Bewertung der Sicherheit in Straßentunneln⁹ bestimmten Unfallraten handelt es sich um gemittelten Unfallraten aus ca. 80 Tunneln. Eine Differenzierung hinsichtlich Tunnel mit und ohne Pannenbuchten erfolgte hierbei nicht. Jedoch sind in den Unfallraten Unfälle infolge von Pannen enthalten. Unterstellt man, dass Lang-Lkw dieselbe Pannenhäufigkeit aufweisen wie herkömmliche Lkw, so sind diese Unfallraten auch für Lang-Lkw unverändert anwendbar.

Dänemark

Die dänische Straßenbehörde hat mit Ihrem Bericht zur Auswertung des Feldversuchs¹⁰ eine ausführliche Zusammenfassung im Hinblick auf Unfälle mit EMS-Fahrzeugen bzw. EuroCombi veröffentlicht. Die Verkehrssicherheit wird teilweise auf der Grundlage der Lkw-Unfälle im EMS-Straßennetz und teilweise auf der Grundlage der Gesamtzahl der Unfälle an den umgebauten bzw. an die Anforderungen der EuroCombi entsprechend angepassten Örtlichkeiten beurteilt. Da die jeweiligen Bezugszeiträume unterschiedlich sind, 5 Jahre vor Auswertung bzw. 2 Jahre während der Auswertung, erfolgte eine Umrechnung in die durchschnittliche Zahl der Unfälle pro Jahr. Darüber hinaus ist anzumerken, dass die Verkehrssicherheit des Jahres 2009 nur teilweise in die Auswertung eingeflossen ist, da das Straßennetz, auf dem EMS-Fahrzeuge zugelassen waren, 2009 mehrfach erweitert wurde. Das EMS-Straßennetz des Jahres 2009 ist also weder mit dem EMS-Straßennetz der Jahre zuvor noch mit dem von 2010 vergleichbar.

Die Entwicklung der Unfallzahlen im EMS-Straßennetz wurde anhand eines Vergleichs von 4 verschiedenen Unfallkategorien untersucht. Die

Ergebnisse der Untersuchung für die einzelnen Unfallkategorien, ein Vergleich der Unfallentwicklung zwischen 2003 und 2007 sowie 2010, lauten wie folgt:

- Unfälle mit Lkw-Beteiligung im EMS-Straßennetz: - 25,7 %
- Gesamtzahl der Unfälle mit Beteiligung aller Fahrzeugtypen im EMS-Straßennetz: - 24,4 %
- Gesamtzahl der Unfälle ohne Lkw-Beteiligung (andere Fahrzeugtypen) im EMS-Straßennetz: - 24,1 %
- Gesamtzahl der Unfälle außerorts mit Beteiligung aller Fahrzeugtypen: - 32,0 %

Insgesamt ist also ein Rückgang der Unfallzahlen zwischen den beiden Zeiträumen zu verzeichnen. Am signifikantesten fällt er für die Gesamtzahl der Unfälle außerorts mit Beteiligung aller Fahrzeugtypen aus, am geringsten für die Gesamtzahl der Unfälle anderer Fahrzeugtypen im EMS-Straßennetz.

Für die 150 von der dänischen Straßenbehörde umgebauten bzw. an die Anforderungen der EMS-Fahrzeuge entsprechend angepassten Örtlichkeiten wurde die Zahl der Unfälle vor und nach dem Umbau sowie mit allen Unfällen an Kreuzungen von Hauptverkehrsstraßen außerorts verglichen. Dabei hat sich die Gesamtunfallzahl an den umgebauten Kreuzungen zwar um ca. 37 % verringert, die Unfallzahlen an allen Kreuzungen auf Hauptverkehrsstraßen außerorts aber haben um 44 % abgenommen. Bei den umgebauten Örtlichkeiten fanden sich 38 Orte, an denen die Zahl der Unfälle im Vergleich zu vor der Zulassung der EMS-Fahrzeuge zugenommen hat und 66 Orte, an denen die Zahl der Unfälle abgenommen hat.

Im Zeitraum 2009 und 2010 wurden insgesamt vier Unfälle, an denen EuroCombi beteiligt waren, registriert, von denen jedoch zwei möglicherweise falsch zugeordnet wurden. Geht man davon aus, dass im Jahr 2007 EMS-Fahrzeuge dieselbe Unfallhäufigkeit aufweisen wie andere Lkws, würde man im gleichen Straßennetz für 2009 und 2010 16 Unfälle erwarten – im Vergleich zu vier registrierten Unfällen. Allerdings sind das Gesamtstraßennetz von 2007 und das EMS-Straßennetz von 2010 auch nicht direkt vergleichbar. Die Unfallhäufigkeit der EuroCombi scheint niedriger zu sein als die Unfallhäufigkeit anderer Lkws im Jahr 2007 und auch als die Unfallhäufigkeit aller Lkws inkl. EuroCombi im Jahr 2010.

Grundsätzlich sind die Unfallzahlen in Dänemark rückläufig. Auch für die Verkehrssicherheit ist in Bezug auf Lkw-Unfälle im EMS-Straßennetz eine

⁹ Baltzer, W., Kündig, P., Locher, P., Mayer, G., Riepe, W., Steinauer, B., Zimmermann, U., Zulauf, Ch.: Bewertung der Sicherheit von Straßentunneln, Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen, Heft B 66, 2009 (ISBN 978-3-86509-909-9)

¹⁰ The Danish Road Directorate: Evaluation of trial with European Modular System, Dezember 2011

positive Entwicklung zu verzeichnen. Sie ist sogar positiver als bei den Unfällen aller Fahrzeugtypen im EMS-Strabennetz, aber etwas weniger positiv als die aller Unfälle auf Hauptverkehrsstraßen auBerorts.

Die Unfallhäufigkeit von EuroCombi im EMS-Strabennetz ist niedriger als die der Lkws generell in Dänemark. Für die Unfallhäufigkeit anderer Lkws im EMS-Strabennetz stehen allerdings keine Daten zur Verfügung, so dass hier kein Vergleich möglich ist.

Die Zahl der Unfälle an entsprechend umgebauten Örtlichkeiten ist ebenfalls zurückgegangen, allerdings nicht in dem Maße wie zu erwarten gewesen wäre, verglichen mit der allgemeinen Unfallentwicklung an Kreuzungen.

Zusammenfassend ist festzustellen: Ende 2010 waren 408 EMS-Fahrzeugkombinationen in Dänemark zugelassen; die Unfallhäufigkeit von EuroCombi ist geringer als die anderer Lkws. Eine leichte Abnahme der Verkehrssicherheit ist bei den entsprechend umgebauten Örtlichkeiten erkennbar. Im EMS-Strabennetz haben die Unfallzahlen weniger stark abgenommen als auf Außerortsstraßen im Allgemeinen. Jedoch erscheint ein Versuchszeitraum von zwei Jahren zu kurz, um definitive Schlussfolgerungen zu den Auswirkungen auf die Verkehrssicherheit zu ziehen.

Niederlande

Der Bericht der Rijkswaterstaat „Längere und schwerere Lastkraftwagen (LZVs) in den Niederlanden“ vom März 2010¹¹ beinhaltet eine Zusammenfassung erster Erkenntnisse hinsichtlich des Einflusses von LZV auf die Verkehrssicherheit. Danach wurden in der Zeit von 2007 bis Mitte 2009 elf Unfälle mit Beteiligung von LZVs registriert. Bei allen elf Unfällen waren ausschließlich Sachschäden zu verzeichnen; es waren auch keine schwächeren Verkehrsteilnehmer beteiligt. Hierbei ist jedoch zu beachten, dass nicht alle Unfälle, die sich ereignen, von der Polizei registriert werden. Wenn man allerdings den hohen Registrierungsgrad von Unfällen mit der Einlieferung in Krankenhäuser und mit tödlichen Opfern berücksichtigt, ist die Wahrscheinlichkeit äußerst gering, dass es einen Unfall mit Verletzten oder mit Todesfolge gegeben hat, in den ein LZV involviert war und der nicht registriert wurde.

Bei sieben der elf Unfälle spielte eines der besonderen LZV-Merkmale, wie z.B. die Überlänge oder das Ausschwenkverhalten, möglicherweise eine Rolle. Bei diesen sieben Unfällen handelt es sich laut der Studie allerdings um typische Unfälle mit Lastkraftwagen. Außerdem ereigneten sich drei der Unfälle an Stellen mit einer hohen Unfallhäufigkeit. Bei zwei der sieben LZV-Unfälle konnte die Unfallursache mit Sicherheit der anderen Partei zugeschrieben werden. Basierend auf diesen Unfallanalysen wird in genanntem Bericht ausgeschlossen, dass LZVs im Vergleich zu herkömmlichen Lastkraftwagenkombinationen ein höheres Risiko mit sich bringen.

Schweden

In Ihrem Bericht zum Einsatz von 60 t Lkw kommen Berndtsson und Lundqvist¹² im Hinblick auf das Unfallgeschehen zu dem Schluss, dass Schweden trotz oder gerade wegen der Existenz von langen Fahrzeugkombinationen auf schwedischen Straßen, ein hohes Maß an Sicherheit im Straßenverkehr genießt. Begründet wird dies u.a. damit, dass zum Transport einer bestimmten Menge an Waren durch den Einsatz von längeren und schwereren Fahrzeugkombinationen auch weniger Lkw auf den Straßen und somit ein kleineres Unfallrisiko bedeuten. Sie berichten auch, dass sowohl LKW und kleinere Fahrzeuge bei Verkehrsunfällen mit langen und schweren Lkw beteiligt sind. Allerdings gibt es laut den Verfassern keinen 'alarmierenden' Hinweis darauf, dass die Länge von HGV Kombinationen einen entscheidenden Einfluss auf das Eintreten von Unfällen hat.

Finnland

Gestützt auf ihren langjährigen Erfahrungen mit langen und schweren Fahrzeugen im Straßenverkehr kommt Finnland nach Berndtsson und Lundqvist¹³ zu dem Schluss, dass das Risiko von schweren Fahrzeugen in Unfälle verwickelt zu sein, proportional zu den gefahrenen Kilometern und unabhängig von der Größe der Fahrzeuge ist.

Zusammenfassung Verkehrssicherheit

Die durchgeführten Studien zur Verkehrssicherheit haben ergeben, dass EuroCombis bisher keine negativen Auswirkungen auf das Unfallgeschehen zeigen. Vielmehr scheinen diese eher weniger als andere Lkw in Unfälle verwickelt zu sein.

¹¹ Rijkswaterstaat - Dienst Verkeer en Scheepvaart: Längere und schwerere Lastkraftwagen (LZVs) in den Niederlanden, Einblicke und Erfahrungen im Zeitraum 1995-2010, März 2010

¹² A. Berndtsson, A.Lundqvist: Report on 60-t vehicles, CEDR, Oktober 2007

¹³ A. Berndtsson, A.Lundqvist: Report on 60-t vehicles, CEDR, Oktober 2007

Zur Risikoabschätzung wird daher im Folgenden davon ausgegangen, dass sich die Unfallrate infolge des Einsatzes von EuroCombis nicht verändert.

4.4 Lkw-Bestand

Deutschland

Mit Stand von Januar 2013 sind nach dem Kraftfahrt-Bundesamt in Deutschland ca. 540.000 Lkw > 3,5 t sowie 180.000 Sattelzüge zugelassen. Im Feldversuch sind derzeit ca. 30 Lang-Lkw im Einsatz. Dies entspricht einem Anteil am Schwerverkehr von 0,004% der in Deutschland zugelassenen Fahrzeuge.

Niederlande

In den Niederlanden sind aktuell 70.000 Lkw > 3,5 t sowie 1.000.000 Sattelfahrzeuge registriert. Bei einer Anzahl von 430 LZV entspricht dies einem Anteil von 0,04% am Lkw- Gesamtbestand.

Dänemark

In Dänemark umfasst der Lkw-Bestand ca. 30.000 Fahrzeuge mit einem zul. Gewicht von mehr als 3,5 t. Bei einer Anzahl von 400 EMS-Fahrzeugen entspricht deren Anteil ca. 1,3% der Lkw-Zulassungen.

5 Bestimmung maßgeblicher Brandparameter

Basierend auf den Erkenntnissen aus der Literaturrecherche und den derzeit im Feldversuch transportierten Lkw-Ladungen wurden entsprechende Brandleistungen bzw. Energiefreisetzungsraten auf Grundlage von dokumentierten Labor- und Realbrandversuchen für folgende Gütergruppen ermittelt:

- **Haushaltsgeräte**
(Kaffeemaschinen, Kühlschränke, Geschirrspüler, Waschmaschinen)
- **Elektronische Geräte**
(Fernseher, EDV-Geräte)
- **Möbel**
(Betten, Stühle, Tische, Kommoden, Polstermöbel, Kleiderschränke)
- **Lebensmittelverpackungen**
(Obst, Knabbergebäck)
- **Kleidung**
(Herrenjacken, Herrenanzüge)
- **Holzpaletten**
- **Pflanzen**
(Weihnachtsbäume, Sträucher)

- **Fahrzeuge und Fahrzeugkomponenten**
(Pkw, Lkw, Armaturenbretter, Sitz, Tanks)
- **Abfall / Müll**

Eine Zusammenstellung der zugehörigen Energiefreisetzungsraten ist in Kap. 2 des Anhangs zu diesem Bericht enthalten. Zur Begrenzung der Anzahl wurden für die weiteren Untersuchungsschritte Transportgüter ausgewählt, die zum einen gut entflammbar sind sowie eine möglichst hohe Brandleistung besitzen und zum anderen in Ihren Eigenschaften eine möglichst große Bandbreite an Gütern abdecken bzw. häufiger mit Lang-Lkw transportiert werden. Die Wahl fiel hierbei auf

- Holzpaletten,
- Knabbergebäck und
- Kleidung.

Holzpaletten kommen einerseits als singuläres Ladegut vor und können andererseits als repräsentativ für Holz, Papier, Pappe und daraus hergestellte Waren, Möbel und Umzugsgut, palettieren und gestapelten Waren (vgl. Brandversuche Runehamar) sowie für Pflanzen angesehen werden.

Knabbergebäck kann repräsentativ für brennbare Lebensmittel angenommen werden wie beispielsweise Mehl und Margarine, wie im Fall der Mont Blanc Tunnelkatastrophe.

Kleidung kann ebenfalls als singuläres Ladegut vorkommen und steht repräsentativ für sämtliche Ladungen aus Textilien.

Im Folgenden wird detailliert auf diese Transportgüter eingegangen.

5.1 Energiefreisetzungsraten ausgewählter Transportgüter

Holzpaletten

Im Güterverkehr werden Holzpaletten zum Transport von stapelbaren Waren verwendet. Sie bestehen aus einem Bretterboden, der über Klötze von einem unteren Rahmen bzw. Kufbrettern abgesetzt ist. Hinsichtlich Ausführung und Abmessungen ist zwischen nicht genormten Einfachpaletten und genormten Mehrwegpaletten zu unterscheiden. Weit verbreitet ist die genormte Europalette in den Abmessungen 800 x 1.200 x 144 mm. Diese Europaletten weisen abhängig vom Feuchtegehalt des Holzes einem Gewicht von 20 bis 24 kg auf. Nachfolgende Bild 5 zeigt beispielhaft den Aufbau einer Europalette.



Bild 5: Beispiel einer Europalette

Um Platz zu sparen, werden leere Paletten in der Regel zu einem dichten Stapel aufgeschichtet. Den Aufbau und die Abmessungen eines solchen Stapels von Holzpaletten zeigt Bild 6.

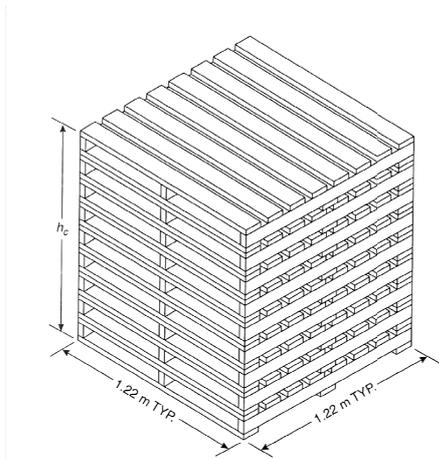


Bild 6: Maße und Aufbau eines Stapels Holzpaletten

Krasner¹⁴ hat für einen derartigen Stapel Holzpaletten Brandversuche durchgeführt. In Bild 7 ist die hierbei ermittelte Energiefreisetzungsrate dargestellt. Daraus wird ersichtlich, dass mit diesem Holzpalettenstapel eine über mehrere Minuten anhaltende Energiefreisetzungsrate von ca. 3.500 kW erreicht wird.

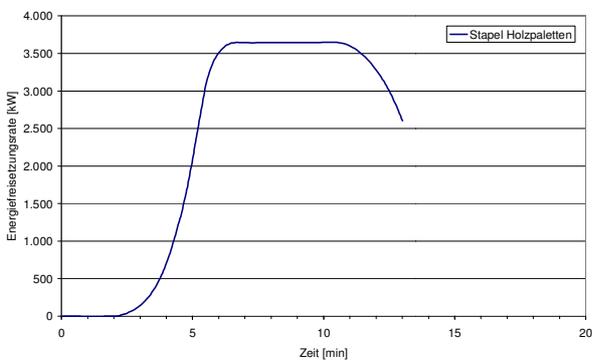


Bild 7: HRR eines Stapels herkömmlicher Holzpaletten (Maße: 1,22 m x 1,22 m x 1,22 m)

¹⁴ L. M. Krasner: "Burning Characteristics of Wooden Pallets as Test Fuel", Serial 16437, Factory Mutual Research Corp., Norwood, MA (1968)

Knabbergebäck

Kartoffelchips und Käsecracker sind Knabbergebäck und zählen zu den Lebensmitteln. Sie sind typischerweise durch einen hohen Fettanteil gekennzeichnet.

Bei Brandversuchen, die von SP (Technical Research Institute of Sweden) durchgeführt wurden, wurde ein Regal mit Knabbergebäck auf einer Länge von 5,4 m nachgebildet, das in 3 Regalebenen mit 54 Schachteln Chips und Käsecracker gefüllt wurde. Die brennbaren Stoffe hatten ein Gesamtgewicht von 275 kg. Nachfolgendes Bild 8 zeigt den Versuchsaufbau und den Abbrand.



Bild 8: Beginn Brandversuch und Vollbrandphase nach 5 Minuten¹⁵

Die zugehörige Auswertung zu dem Brandversuch zeigt unten stehendes Bild 9. Mit der vorgegebenen Versuchsanordnung wird danach eine Energiefreisetzungsrate von über 6.000 kW erzielt.

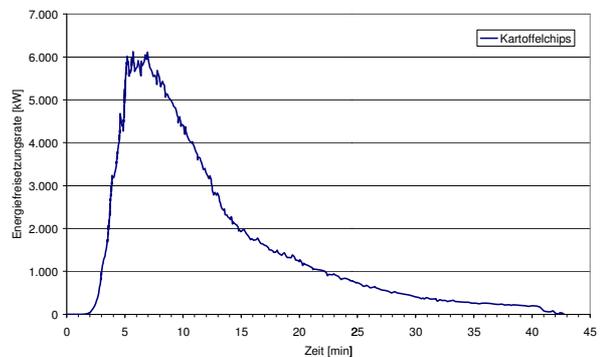


Bild 9: HRR von Kartoffelchips und Käsecracker in einer Geschäftsauslage, ermittelt durch SP¹⁶

Kleidung

In der Textilindustrie werden verschiedenste Materialien bei der Herstellung von Kleidungen verwendet. Zum Einsatz kommen hierbei Stoffe, die auf pflanzlichen (Baumwolle), tierischen (Wolle, Seide) oder synthetischen (Polyacrylnitril, Polypropylen, Polyester, Polyamid Polyurethan) Textilfasern basieren. Häufig werden auch verschiedene Fasern

¹⁵ M. Arvidson: "Potato Crisps and Cheese Nibbles Burn Fiercely," Brandposten [SP] Nr. 32, S. 10-11 (2005)

¹⁶ M. Arvidson: "Potato Crisps and Cheese Nibbles Burn Fiercely," Brandposten [SP] Nr. 32, S. 10-11 (2005)

oder Stoffe miteinander kombiniert. Der Transport von Kleidung erfolgt entweder in Kartons, Kisten oder an Kleiderständern. Nachfolgendes Bild 10 zeigt ein Beispiel eines Kleidungstransportes mittels Kleiderstangen in einem Lkw.



Bild 10: Beispiel eines Kleidungstransportes mittels Lkw

Zur Bestimmung der Brandlast führte SP Brandversuche mit einzelnen Herrenjacken durch. Bild 11 zeigt die Energiefreisetzungsraten für zwei Anoraks, die überwiegend aus Polyester bzw. Acryl hergestellt wurden. Eine Polyesterjacke weist demnach eine max. Brandleistung von ca. 85 kW auf. Die max. Brandleistung der getesteten Acryljacke beträgt ca. 72 kW.

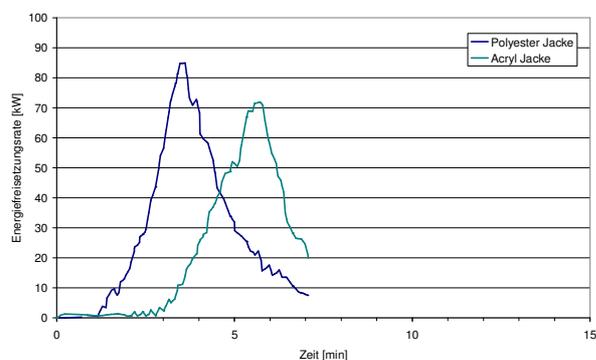


Bild 11: HRR von 2 Anoraks, ermittelt durch SP¹⁷

Stroup et al. führten Brandversuche an zwei 1,8 m langen, übereinander angeordneten Ständern mit je 48 Herrenanzügen durch. Die Stoffe der Anzüge bestanden aus Polyester und Wolle. Bild 12 zeigt die Ergebnisse bei dreimaliger Wiederholung des gleichen Versuchs. Die hierbei auftretenden Ener-

giefreisetzungsraten variierten zwischen 1.100 und 1.950 kW.

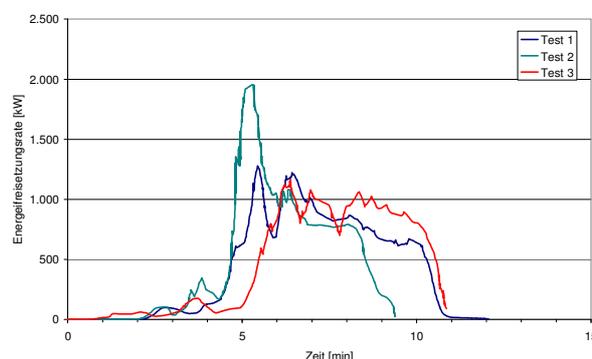


Bild 12: HRR von zwei 1,8 m langen, übereinander angeordneten Ständern mit je 48 Herrenanzügen¹⁸

Die brennbaren Bestandteile des Versuchsaufbaus hatten ein Gesamtgewicht von im Mittel ca. 57 kg. Nachfolgendes Bild 13 zeigt den Versuchsaufbau und den Abbrand.



Bild 13: Beginn Brandversuch und Vollbrandphase

5.2 Abbildung ausgewählter Energiefreisetzungsraten im Rechenmodell

Für die Untersuchung der Brandentwicklung sowie der Rauchgasausbreitung infolge von Brandereignissen in Straßentunneln können aufgrund der großen frei werdenden Energien im Allgemeinen keine Realbrände herangezogen werden. Stattdessen werden im Rahmen des Forschungsvorhabens CFD-Simulationen eingesetzt. Es sollen dabei Energiefreisetzungen von konventionellen Lkw-Bränden als Referenzfälle typischen Energiefreisetzungen von ausgewählten Ladungen von Lang-Lkw gegenübergestellt werden. In einem ersten Schritt werden die Brandparameter bestimmt und mittels Vergleichen zwischen Realbrandversuchen und Brandsimulationen verifiziert. In einem 2. Schritt werden die Unterschiede der Brandentwick-

¹⁷ B. Sundstrom, (Hrsg.): "Fire Safety of Upholstered Furniture - The Final Report on the CBUF Research Programme," Report EUR 16477 EN, Directorate-General Science, Research and Development (Measurements and Testing), European Commission, Interscience Communications Ltd, London (1995)

¹⁸ D.W. Stroup, L. DeLauter, J. Lee, and G. Roadarmel: "Fire Tests of Men's Suits on Racks," FR 4013, National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, MD (2001)

lung von Ladungen in konventionellen und Lang-Lkw auf Basis der Grundsimulationen untersucht.

Rechenmodell

Grundlage der Berechnungen zur Ermittlung stoffspezifischer Energiefreisetzungsraten und zur Bestimmung von Druck-, Geschwindigkeits-, Temperatur- und Konzentrationsverteilungen im Raum bilden die nachfolgend aufgeführten zeitabhängigen Erhaltungsgleichungen für Massen-, Impuls-, Energie- und Stoffhaltung.

Massenerhaltung

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot \rho \cdot \mathbf{u} = 0$$

Stoffhaltung

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho Y_i) + \nabla \cdot \rho Y_i \mathbf{u} = \nabla \cdot \rho D_i \nabla Y_i + \dot{m}_i'''$$

Impulserhaltung

$$\rho \cdot \left(\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + (\mathbf{u} \cdot \nabla) \cdot \mathbf{u} \right) + \nabla p = \rho \cdot \mathbf{g} + \mathbf{f} + \nabla \cdot \boldsymbol{\tau}$$

Energieerhaltung

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho h) + \nabla \cdot \rho h \mathbf{u} = \frac{Dp}{Dt} - \nabla \cdot \mathbf{q}_r + \nabla \cdot \mathbf{k} \nabla T + \sum_i \nabla \cdot h_i \rho D_i \nabla Y_i$$

Aufgrund ihrer Komplexität sind diese kontinuierlich formulierten Gleichungen nicht mehr analytisch lösbar und können nur näherungsweise mit Hilfe von numerischen Methoden gelöst werden. Hierzu müssen diese partiellen Differentialgleichungen zunächst diskretisiert werden, d.h., die in Raum und Zeit kontinuierlichen Differentialgleichungen werden nur noch an einer endlichen Anzahl von Punkten im Raum zu bestimmten Zeitpunkten betrachtet.

Als Modell zur Lösung dieser Gleichungen kommt das Brandsimulationsprogramm Fire Dynamics Simulator (FDS) in der derzeit aktuellsten Version¹⁹ zum Einsatz. Es ist ein frei verfügbares CFD-Programm, weltweit Anwendung bei der simulativen Abbildung von Brandereignissen findet.

Holzpaletten

Holzpaletten werden weltweit in vielen Brandversuchen als repräsentatives Transportgut für die Abbildung von Lkw-Bränden verwendet. Neben der guten Durchführbarkeit von Realversuchen in Versuchsanlagen sind auch die entsprechenden Si-

mulationsparameter gut dokumentiert. Auf dieser Grundlage werden die Abbrandvorgänge eines Holzpalettenbrandes eruiert und verifiziert. Grundlage dazu bilden u. a. die Versuche und HRR-Darstellungen, die in Kapitel 5.1 dargestellt sind. Zu den Versuchen selbst sind nicht alle Parameter in der Literatur verfügbar, so dass einige iterativ ermittelt werden mussten. Besonders der Initialbrand hat Auswirkungen auf den Brandverlauf. Nachfolgende Abbildung zeigt einen Simulationslauf mit guter Übereinstimmung der Brandentwicklung.

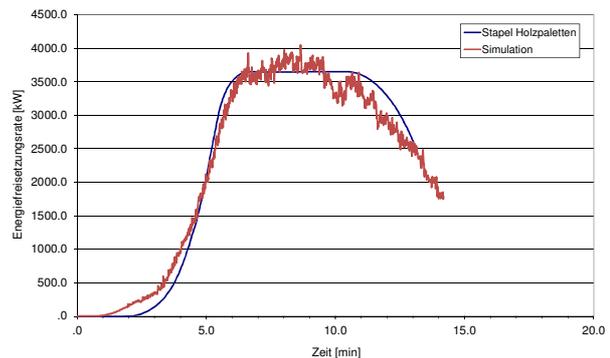


Bild 14: Vergleich Simulation / Realbrand Holzpalettenstapel

Darauf aufbauend wurde der Abbrand der Holzpaletten als Ladung in einem konventionellen Lkw und einem Lang-Lkw simuliert. Als Initialbrand wurde ein Brand mit 250 kW im hinteren Bereich der Ladung angesetzt. Er steht stellvertretend für einen Reifenbrand zu Beginn des Abbrandes (siehe auch detaillierte Angaben zu Reifen in Kap.2.7.4 des Anhangs).

Für den Lkw wurde eine Grundfläche von 2 Paletten in der Breite und 17 in der Länge festgelegt, was einer Sattelzugmaschine mit Sattelanhänger entspricht. In die Höhe wurden 15 Paletten verwendet. Für den Lang-Lkw ergibt sich eine größere Grundfläche mit insgesamt 26 Paletten in der Länge, die weiteren Werte wurden beibehalten. Dies repräsentiert den Fahrzeugtyp Lang-Lkw mit einer 50% Ladekapazitätserhöhung im Volumen gegenüber konventionellen Lkw. Ausgehend von einem Gewicht einer einzelnen Palette von 20 - 24 kg liegt das Ladungsgewicht damit innerhalb der möglichen Nutzlast für Lang-Lkw.

Nachfolgendes Bild 15 zeigt das Simulationsergebnis als Zeit-Energiefreisetzungsdigramm. Der Vergleich der maximalen Energiefreisetzungsraten zeigt einen Faktor von 1,3 zwischen Lang-Lkw und konventionellem Fahrzeug.

¹⁹ National Institute of Standards and Technology (NIST): Version 5.5.3a

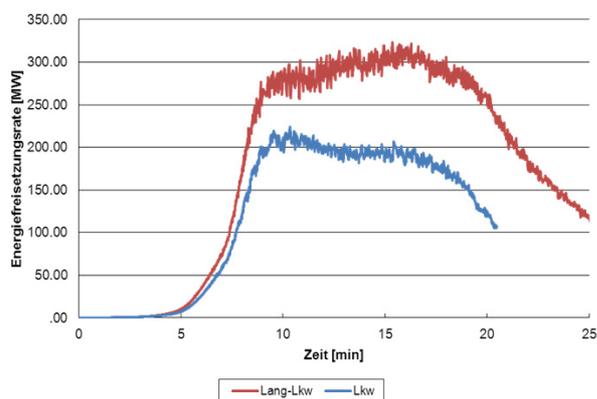


Bild 15: Energiefreisetzungen Holzpaletten Lang-Lkw (150 m³) / Lkw (100 m³)

Die maximalen Energiefreisetzungsraten stellen allerdings nur einen kurzfristigen Zustand dar. Das Niveau der Energiefreisetzungsrate während der Vollbrandphase bestimmt die Rauchgasproduktion und damit die Sichtverhältnisse im Tunnel, die wesentlichen Einfluss auf die Fluchtmöglichkeiten der Tunnelnutzer haben. Sie sind maßgeblich für die Beurteilung der Unterschiede zwischen konventionellem Lkw und Lang-Lkw. Im Bereich zwischen 10 und 15 Minuten nach Beginn des Brandes liegen für die untersuchten Holzpaletten die Unterschiede zwischen 20 % und 45 %.

Knabbergebäck

Die im Kapitel 5.1 dargestellte Brandverlaufskurve für Kartoffelchips und Käsecracker steht stellvertretend für die Sparte transportierter Lebensmittel. Kartoffelchips beispielsweise zeichnen sich durch einen hohen Anteil von Fett aus, der bei etwa 30 % - 35 Gewichts-% liegt. In Kombination mit den weiteren brennbaren Inhaltsstoffen Kohlenhydrate (ca. 50 %) und Protein (ca. 5 %) liegt der durchschnittliche Energiewert bei 22 MJ/kg. Zum Vergleich weist reines Sonnenblumenöl einen Brennwert von 37,1 MJ/kg auf. Durch die typische Umverpackung mit einem hohen Luftanteil ist Knabbergebäck eine Volumenware, die für den Transport in Lang-Lkw geeignet und zugleich gut brennbar ist.

Die weiteren Abmessungen des Versuchsaufbaus sind nicht veröffentlicht und wurden daher abgeschätzt.

Bild 16 zeigt den Vergleich zwischen Brandversuch und der entsprechenden Simulation. Der Anstieg und das Plateau der Energiefreisetzung werden gut getroffen. Die im weiteren Verlauf zu erkennenden Unterschiede im Endstadium des Brandes spielen für die weiteren Aussagen keine wesentliche Rolle.

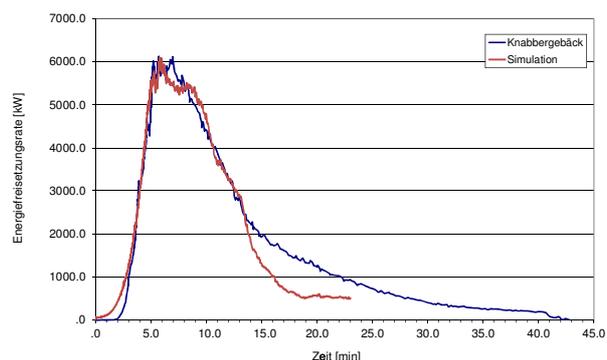


Bild 16: Vergleich Simulation / Realbrand Knabbergebäck

In Bild 17 sind die für herkömmliche Lkw und Lang-Lkw ermittelten Energiefreisetzungsraten infolge von brennendem Knabbergebäck dargestellt. Der Vergleich der maximalen Energiefreisetzungsraten zeigt einen Faktor von 1,35 zwischen Lang-Lkw und konventionellem Fahrzeug. Im maßgeblichen Bereich des Vollbrandes zwischen 10 und 15 Minuten nach Beginn der Zündung liegen die Niveauunterschiede zwischen 28 % und 43 %.

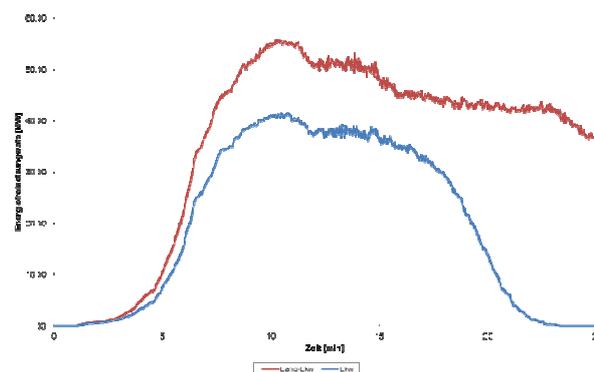


Bild 17: Energiefreisetzungen Knabbergebäck Lang-Lkw (150 m³) / Lkw (100 m³)

Kleidung

Die im Kapitel 5.1 dargestellte Brandverlaufskurve für Herrenanzüge wurde als Grundlage für die Überprüfung von Bekleidung verwendet. Sie stehen stellvertretend für die Sparte der Textilien. Sie zeichnen sich durch ein im Verhältnis zum Volumen geringes Gewicht aus und kommen daher auch als Volumengut für Transporte in Lang-Lkw in Betracht.

Bild 18 zeigt den Vergleich zwischen den Brandversuchen und der entsprechenden Simulation. Der Anstieg der Energiefreisetzungsrate wird dabei für die Versuche 1 und 2 gut getroffen. Das Niveau der Kurve bei Vollbrand entspricht eher den Versuchen 2 und 3.

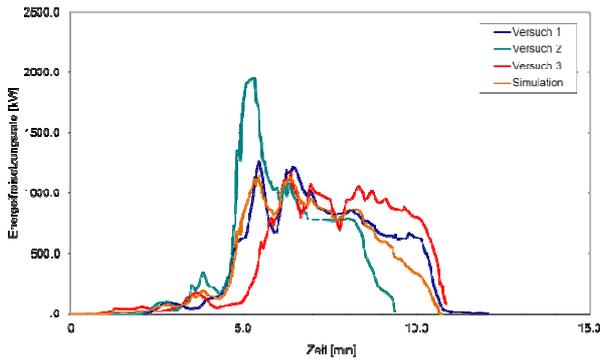


Bild 18: Vergleich Simulation / Realbrand Herrenanzüge

Der Vergleich der maximalen Energiefreisetzungsraten ergibt einen Faktor von 1,24 zwischen Lang-Lkw und konventionellem Fahrzeug (siehe Bild 19). Im Bereich zwischen 10 und 15 Minuten nach Beginn des Brandes liegen die Unterschiede zwischen 2 % und 47 %, wobei der untere Wert sich nur aufgrund des Zusammentreffens zweier Ausschläge der Kurven jeweils nach unten und oben zustande kommt. Typischerweise liegt der Unterschied zwischen 20 % und 40 %.

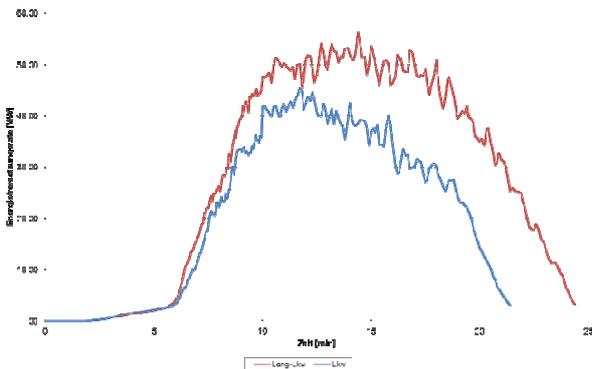


Bild 19: Energiefreisetzungen Bekleidung Lang-Lkw (150 m³) / Lkw (100 m³)

5.3 Energiefreisetzung ZTV-ING-Kurve

Die Bemessungsbrandleistungen leiten sich von der Lkw-Fahrleistung im Tunnel ab. Abhängig davon wird die Rauchgasmenge ermittelt, für die die Lüftungsanlage auszulegen ist. Die Stufen liegen bei Brandleistungen von 30, 50 bzw. 100 MW. Diese Brandleistungen kommen auch im Rahmen von Risikoanalysen für die Darstellung der Fahrzeugbrände zum Einsatz. Neben der Höhe der Brandleistung im Vollbrand ist aber auch Brandentwicklung ein Faktor bei der Beurteilung. Ein großer Brand mit langsamem Brandverlauf kann geringere Auswirkungen haben als ein kleiner Brand mit schnellem Anstieg der Brandkurve. Zu Vereinheitlichung wird deshalb der Brandverlauf

der ZTV-ING-Kurve angesetzt. Dabei wird die Maximaltemperatur innerhalb von 5 Minuten erreicht.

Wie in Kap. 1.1.1 des Anhangs dargestellt, gelten in Deutschland zur Bemessung des baulichen Brandschutzes die ZTV-ING. Der dort angegebene Verlauf der Brandentwicklung wird als Temperaturkurve dargestellt, so dass es keinen direkten Bezug zu den in den RABT 2006 verwendeten Bemessungsbrandleistungen gibt. Um die ZTV-ING-Kurve aber auch stellvertretend für Risikoanalysen zu nutzen, ist sie daher in eine Energiefreisetzungskurve zu überführen.

In Grundlagensimulationen wurden unterschiedliche Bemessungsbrände im Tunnel modelliert und die Oberflächentemperaturen an der Tunneldecke gemessen.

Dabei zeigte sich, dass ein 100 MW-Brand nicht die Oberflächentemperatur der ZTV-ING-Kurve an der Tunneldecke erreicht. Die maximalen Temperaturwerte liegen hier im Bereich zwischen 1.000° C und 1.100° C. Daraufhin wurden weitere Energiefreisetzungsraten in verschiedenen Stufen zwischen 100 und 450 MW variiert. Die besten Übereinstimmungen zeigten sich bei einer Brandleistung von 300 MW. Die damit ermittelten Temperaturwerte differieren um maximal 5 % gegenüber den Maximalwerten der ZTV-ING-Kurve.

Aufgrund der langen Berechnungsdauer wurden die Simulationen nur bis zum Ende des Vollbrandes nach 30 Minuten durchgeführt und die nachfolgende Abkühlungsphase nicht weiter simuliert, da sie nicht maßgebend für die Ermittlung der Maximaltemperaturen ist. In Bild 20 ist die Temperatur-Zeit-Kurve eines 300 MW-Brandes im Modelltunnel den Werten der ZTV-ING gegenüber gestellt. Die Erwärmungsphase in den ersten 5 Minuten korreliert relativ gut und auch das Erreichen der 1.200°-C-Grenze in der Phase des Vollbrandes wird gut abgebildet. Es ist aber ein leichter Anstieg im Verlauf des Vollbrandes zu verzeichnen, was sich auch in der RWS-Kurve wiederfindet (siehe Kapitel 4.1.2), die einen Flüssigkeitsbrand mit einer Brandleistung von ebenfalls bis zu 300 MW darstellt. Dabei wurden in den ersten 30 Minuten Maximaltemperaturen von 1.300 C gemessen.

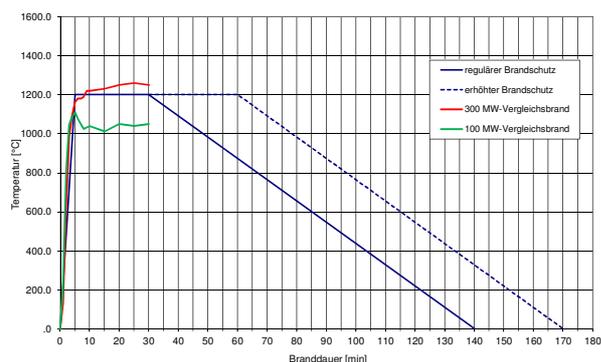


Bild 20: Vergleich Temperaturentwicklung ZTV-ING / Simulation

5.4 Energiefreisetzungen Referenzfall Lkw

Im Referenzfall werden Lkw-Brände mit definierten Brandleistungen von 30, 50 und 100 MW simuliert und deren Auswirkungen auf die Tunnelnutzer im Rahmen einer quantitativen Risikoanalyse (QRA) untersucht. Auf Grundlage der aus der Temperaturentwicklung der ZTV-ING-Kurve gewonnenen Erkenntnisse geschehen die Energiefreisetzungen sehr rasch. Für einen 100 MW-Brand gilt, dass die maximale Brandleistung innerhalb von weniger als 2 min erreicht und dann konstant aufrechterhalten wird. Gleiches gilt für 30 und 50 MW. Ausgehend von einer Energiefreisetzung von 300 MW, die dem Temperaturverlauf der ZTV-ING-Kurve entspricht, sind im nachfolgenden Bild 21 die daraus abgeleiteten Energiefreisetzungsverläufe für 30, 50 und 100 MW Brände dargestellt. Diese werden im Weiteren für die Simulationen im Rahmen der Risikoanalyse der konventionellen Lkw-Brände verwendet.

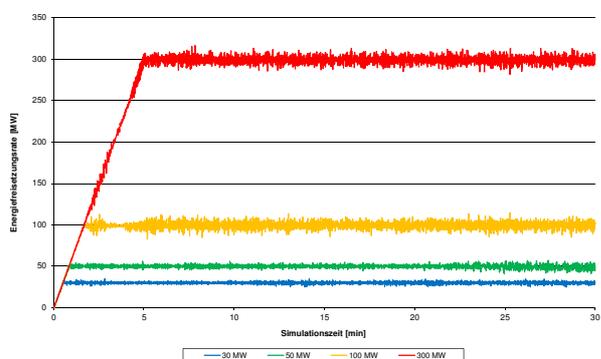


Bild 21: Energiefreisetzungen Referenzfall

Ein wesentlicher Faktor für die Auswirkungen der Kurven auf das Schadensausmaß ist neben der maximalen Energiefreisetzung auch die Steigung der Kurve. Zwischen Brandausbruch und den Fluchtmöglichkeiten der Tunnelnutzer liegen im

Rahmen der Selbstrettung nur wenige Minuten. Die in den RABT geforderten Branderkennungssysteme müssen daher Brände ab 5 MW zuverlässig innerhalb von 60 sec detektieren.

5.5 Energiefreisetzungen Untersuchungsfall Lang-Lkw

Die Literaturrecherche und die eigenen Untersuchungen zeigen, dass auch konventionelle Lkw, welche die derzeit gültigen Maximallängen einhalten, größere Brandleistungen als die in den RABT 2006 vorgesehenen 100 MW erreichen können. Die im Runehamar-Tunnel durchgeführten Tests eines Lkw-Brands lieferten Spitzenwerte von über 200 MW (siehe Kapitel Anhang). Die Vergleiche zwischen konventionellem Lkw und Lang-Lkw mit einem um 50 % vergrößerten Ladevolumen zeigen, dass dies bei vergleichbaren Randbedingungen zu einer Erhöhung der Energiefreisetzung typischerweise um 20 % - 45 % während des Vollbrandes führen kann. Die Steigerung ist dabei von vielen Faktoren abhängig, wie z.B.

- Brennstoffart (Ladung)
- Brennstoffmenge (Ladungsmenge)
- Ventilationsbedingungen (Sauerstoffzustrom)
- Lage des Initialbrandes
- Größe des Initialbrandes

Im Rahmen des Forschungsvorhabens wurden die genannten Parameter an ausgewählten Ladungen betrachtet. Aufgrund der großen Variationsmöglichkeit der weiteren Parameter über die Ladungsart bzw. -menge hinaus mussten Annahmen getroffen werden, um die Anzahl an Simulationen zu begrenzen. Für den Vergleich zwischen Lang-Lkw und konventionellem Lkw wurden daher einheitliche Parameter gewählt und nur die Ladungsmenge variiert. Die weiteren Faktoren können aber ebenfalls Auswirkungen auf die Brandentwicklung haben. Um für die weiteren Untersuchungen im Rahmen der Risikoanalyse allgemein gültige Aussagen treffen zu können, werden im Sinne einer konservativen Betrachtung Erhöhungen der maximalen Energiefreisetzungsrate um 50 % angesetzt. Sie ergeben sich aus den ermittelten Erhöhungen bei den ausgewählten Ladungsgütern unter Berücksichtigung eines „Sicherheitszuschlages“. Als maßgebend gewählt sind dabei nicht die maximalen Energiefreisetzungen, die für die ausgewählten Transportgüter Abweichungen von 24% bis 35% liefern, sondern das Plateau, das sich im Zeitbereich zwischen 10 und 20 Minuten ergibt. Die erhöhten Energiefreisetzungen können sich bei einer schnellen Brandausbreitung, bedingt

durch einen schnellen Initialbrand und geeignete Ladungen, ergeben.

Für die weiteren Betrachtungen werden folglich die bisherigen Energiefreisetzungsraten von 30 / 50 / 100 MW für konventionelle Lkw bei den Lang-Lkw auf 45 / 75 und 150 MW erhöht. Die Erhöhungen decken damit auch ungünstige Verhältnisse im Sinn eines konservativen Ansatzes ab. Neben der absoluten Höhe der maximalen Energiefreisetzungsrates spielt aber auch ihr zeitlicher Verlauf bis zum Erreichen des Maximums eine entscheidende Rolle für die Ermittlung des Sicherheitsniveaus eines Tunnels. Große Initialbrände führen zu schnellen Anstiegen, bei kleinen Startereignissen kann das Erreichen des Maximums auch bei gleichen Brennstoffen und Randbedingungen deutlich verzögert eintreten. Zur Vergleichbarkeit mit den konventionellen Lkw-Bränden wird der Anstieg der Energiefreisetzungsrates aus der ZTV-ING-Kurve abgeleitet. Die angesetzte Brandentwicklungsgeschwindigkeit für Lang-Lkw entspricht damit der von konventionellen Lkw.

In der folgenden Abbildung sind die erweiterten Energiefreisetzungsrates für die Brände des Schwerverkehrs anhand tatsächlicher Simulationen dargestellt. Deutlich zu erkennen ist die übereinstimmende Steigung der jeweiligen Kurven, die sich aber auf unterschiedliche Niveaus einpendeln.

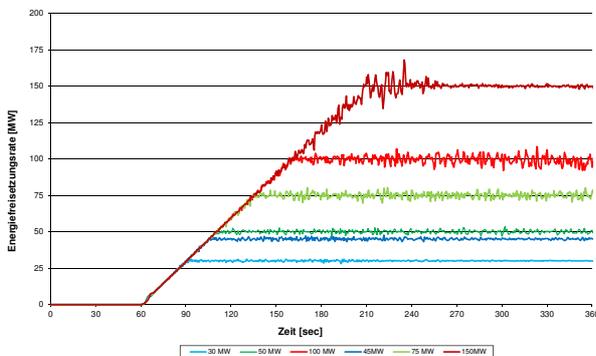


Bild 22: Energiefreisetzungsrates Risikoanalyse – Erweiterung

Für eine vollständige Analyse der nachfolgend zu untersuchenden Tunnel sind auch die Brandereignisse der Pkw einzubeziehen, auch wenn ihr Anteil am Gesamtrisiko nur von untergeordneter Rolle ist. Sie werden mit 5 MW in der Risikoanalyse berücksichtigt.

6 Festlegung von Untersuchungsvarianten

In der risikobasierten Untersuchung wird für die ausgewählten Szenarien mit Lang-Lkws das

Sicherheitsniveau bestimmt und anhand von Risikowerten und in Summenkurven von Häufigkeits-Ausmaß-Diagrammen mit den entsprechenden Szenarien ohne Lang-Lkw-Beteiligungen verglichen.

Ausgehend von einem Richtungsverkehrstunnel mit 2 Röhren wird die kritischere Röhre für die weiteren Betrachtungen verwendet. Bei gleicher Geometrie (z.B. Querschnitt) und Ausstattung ist das üblicherweise die Röhre mit fallender Längsneigung, weil hier ein Backlayering²⁰ verstärkt auftreten kann.

6.1 Referenztunnel

Für die Risikobetrachtung eines Referenztunnels werden typische Tunnel(röhren) ohne Lang-Lkw-Anteil untersucht. Wesentlicher Unterschied zwischen ihnen ist das vorhandene Lüftungssystem.

Nachfolgende Tab. 7 zeigt die wichtigsten Parameter des jeweiligen Tunnelbauwerkes. Für nicht gesondert dargestellte Parameter werden Werte gewählt, die entweder regulativen Vorgaben entsprechen oder typische Werte darstellen. Sie beeinflussen die Aussagen hinsichtlich der Auswirkungen von Lang-Lkw nicht oder nur unwesentlich, weil sie für alle betrachteten Fälle in gleichem Maße gelten. Beispiele dafür sind zulässige Höchstgeschwindigkeiten oder auch die Entwässerung innerhalb der Tunnel.

Parameter	Tunnel ohne Lang-Lkw	
	RV-Tunnel 1A	RV-Tunnel 2A
Infrastruktur		
Tunnellänge	1.200 m	
Verkehrsart	Richtungsverkehr	
Anzahl Fahrstreifen pro Richtung (Regelquerschnitt)	2 (RQ10,5t)	
Querschnittshöhe	5.0 m	
Längsneigung	-3.0 %	
Lüftungssystem (ausgelegt auf 50 MW)	Mechanische Längslüftung	Rauchabsaugung über Zwischendecke mit steuerbaren Absaugöffnungen
Notausgangsabstand	300 m	
Verkehr		
DTV pro Tunnelröhre	30.000 Kfz/d	30.000 Kfz/d
Schwerverkehrsanteil	15%	15%
Stauanteil	0.34%	0.34%
Lang-Lkw-Anteil	--	--
Ereignis		
Brandort	Tunnelmitte	
Brandleistung	5 / 30 / 50 / 100 MW	
Branddetektion	60 s	
Bemerkungen	--	--

Tab. 7: Berechnungsfälle Referenztunnel

6.2 Untersuchungstunnel

Der Anteil der derzeit am Feldversuch beteiligten

²⁰ Ausbreitung von Rauch entgegen der Strömungsrichtung

Lang-Lkw ist im Vergleich zum restlichen Schwerverkehrsanteil auf dem deutschen Straßennetz so gering, dass sich daraus keine Erkenntnisse hinsichtlich des absoluten Risikos ziehen lassen. Die Veränderungen liegen im Unschärfbereich des Verfahrens. Es ist deshalb notwendig Ansätze zu wählen, anhand deren die Auswirkungen von Lang-Lkw auf die Sicherheit messbar sind und sich in einem realistischen Wertebereich befinden.

Bei der Risikobetrachtung der Untersuchungsfälle werden in zwei Szenarien unterschiedliche Anteile von Lang-Lkw am Schwerverkehr betrachtet (1 % und 10 %). Gemäß Kapitel 4.4 sind derzeit in Deutschland 0,004%, in den Niederlanden 0,04% sowie in Dänemark 1,3% an längeren Lkw bezogen auf den LKW-Gesamtbestand zugelassen.

Es wird im Rahmen dieser Untersuchung davon ausgegangen, dass 10% auf Basis heutiger Erkenntnisse eine Obergrenze der möglichen Lang-Lkw-Anteile am Schwerverkehr in Deutschland darstellen, da insbesondere nicht alle Güter für den Transport in Lang-Lkw geeignet sind. Aufgrund der geringeren Nutzlast im Vergleich zu konventionellen Lkw kommen vorwiegend Volumengüter in Betracht. Unter Berücksichtigung eines gewissen „Sicherheitszuschlags“ orientieren sich die gewählten Lang-Lkw-Anteile dabei an Schätzungen zum Marktpotential von Lang-Lkw, die im Rahmen eines weiteren Teilprojekts zur wissenschaftlichen Begleitung des Feldversuchs²¹ erfolgt sind. In Tab. 8 sind die jeweiligen Parameter der Berechnungsfälle dargestellt.

Parameter	Tunnel mit Lang-Lkw			
	Tunnel 1B	Tunnel 1C	Tunnel 2B	Tunnel 2C
Abkürzung				
Infrastruktur				
Tunnellänge	1.200 m			
Verkehrsart	Richtungsverkehr			
Anzahl Fahrstreifen pro Richtung (Regelquerschnitt)	2 (RQ10,5t)			
Querschnittshöhe	5,0 m			
Längsneigung	-3,0 %			
Lüftungssystem (ausgelegt auf 50 MW)	mechanische Längslüftung		Rauchabsaugung über Zwischendecke mit steuerbaren Absaugöffnungen	
Notausgangabstand	300 m			
Verkehr				
DTV pro Tunnelröhre	30.000 Kfz/d	30.000 Kfz/d	30.000 Kfz/d	30.000 Kfz/d
Schwerverkehrsanteil	15%	15%	15%	15%
Stauanteil	0,34%	0,34%	0,34%	0,34%
Lang-Lkw-Anteil	1%	10%	1%	10%
Ereignis				
Brandort	Tunnelmitte			
Brandleistung	5 / 30 / 45 / 50 / 75 / 100 / 150 MW			
Branddetektion	60 s			
Bemerkungen	--	--	--	--

Tab. 8: Berechnungsfälle Untersuchungstunnel

6.3 Untersuchungstunnel Substitution

In einem weiteren Szenario wird im Rahmen der Substitutionsbetrachtung von der Annahme ausgegangen, dass sich durch Lang-Lkw Transporte einsparen lassen. Der Ansatz hierbei ist, dass im absoluten Optimalfall 2 Lang-Lkw 3 konventionelle Lkw aufgrund des gesteigerten Ladevolumens ersetzen können. Im Rahmen dieser angenommenen Substitution sind dann weniger Fahrzeuge notwendig, was sich sowohl auf den DTV als auch den Schwerverkehrsanteil auswirkt.

Zudem ergeben sich daraus auch Auswirkungen auf das Sicherheitsniveau. Nachfolgende Tab. 9 zeigt die zum Ansatz gebrachten jeweiligen Parameter.

Parameter	Tunnel mit Lang-Lkw			
	Tunnel 1D	Tunnel 1E	Tunnel 2D	Tunnel 2E
Abkürzung				
Infrastruktur				
Tunnellänge	1.200 m			
Verkehrsart	Richtungsverkehr			
Anzahl Fahrstreifen pro Richtung (Regelquerschnitt)	2 (RQ10,5t)			
Querschnittshöhe	5,0 m			
Längsneigung	-3,0 %			
Lüftungssystem (ausgelegt auf 50 MW)	mechanische Längslüftung		Rauchabsaugung über Zwischendecke mit steuerbaren Absaugöffnungen	
Notausgangabstand	300 m			
Verkehr				
DTV pro Tunnelröhre	29.977 Kfz/d	29.775 Kfz/d	29.977 Kfz/d	29.775 Kfz/d
Schwerverkehrsanteil	14,93%	14,36%	14,93%	14,36%
Stauanteil	0,34%	0,34%	0,34%	0,34%
Lang-Lkw-Anteil	1%	10%	1%	10%
Ereignis				
Brandort	Tunnelmitte			
Brandleistung	5 / 30 / 45 / 50 / 75 / 100 / 150 MW			
Branddetektion	60 s			
Bemerkungen	--	--	--	--

Tab. 9: Berechnungsfälle Untersuchungstunnel mit Substitution

7 Durchführung und Auswertung von CFD-Simulationen

Zur Durchführung der numerischen Berechnungen sind im Wesentlichen folgende drei Schritte erforderlich:

1. Preprocessing (Dateneingabe)
2. Processing (Berechnung)
3. Postprocessing (Datenausgabe und Visualisierung)

Die drei Simulationsschritte des Preprocessing, Processing und Postprocessing müssen für jedes zu untersuchende Szenario durchlaufen werden.

²¹ Röhling, W., Burg, R., Klaas-Wissing, T.: Verkehrsnachfragewirkungen von Lang-Lkw – Grundlagenermittlung. Unveröffentlichter Zwischenbericht zum FE 89.0273/2012 im Auftrag der Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt). Waldkirch 2013

7.1 Preprocessing

Im **Preprocessing** wird zur möglichst realitätsnahen Abbildung des Tunnels wird dieser über seine gesamte Länge mitsamt seinen sicherheitstechnischen Einrichtungen wie Ventilatoren, Detektionsystemen und Notausgängen sowie den sich in den Röhren befindlichen Fahrzeugen abgebildet. Hierzu müssen zum einen die geometrischen Angaben in ein Rechengitter übertragen werden und zum anderen Anfangs- und Randbedingungen vorgegeben werden. Des Weiteren sind Angaben zur Simulationsdauer und zum Aktivieren und Deaktivieren von Ventilatoren erforderlich. Um bei Brandbeginn einen eingeströmten Zustand zu erreichen, werden sämtliche Simulationen 1 min vor der Zündung des Brandmittels begonnen und solange durchgeführt, bis sich hinsichtlich der Schadensausmaße ein stabiler Endzustand eingestellt hat. Bild 23 zeigt die beispielhafte Modellierung des Tunnels im Bereich einer Notrufrutsche ohne Fahrzeuge.

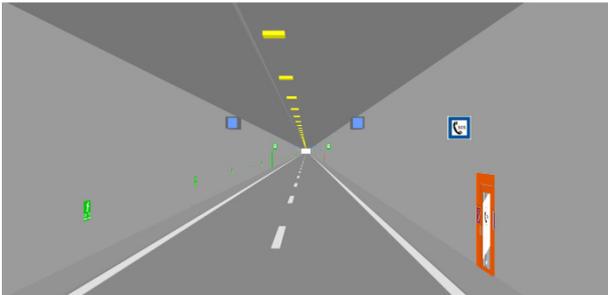


Bild 23: Ausschnitt der Modellierung im visualisierten Rechenmodell

Dazu wird in allen Fällen ein 1200 m langer, einröhriger Tunnel modelliert, der die Mindestkriterien der RABT 2006 vollständig erfüllt. Die Untersuchung beschränkt sich auf den Richtungsverkehrsbetrieb. Die Tunnelgeometrie ist als Rechteckquerschnitt mit einer Deckenhöhe von 5,0 m und einer Längsneigung von -3 % Gefälle festgelegt. Dies stellt den nach den RABT zulässigen Grenzwert hinsichtlich der Längsneigung dar. Die negative Längsneigung sorgt für ein verstärktes Backlayering stromaufwärts gegen die Fahrtrichtung aufgrund der thermischen Auftriebskräfte zum höhergelegenen Portal (Kaminwirkung). Der Notausgangsabstand beträgt 300 m. Als Lüftungssystem kommt eine Längslüftung bzw. eine Längslüftung mit Rauchabsaugung zum Einsatz. Aufgrund der angenommenen Verkehrsbelastung von 30.000 Kfz / 24 h in der Röhre und einem Schwerverkehrsanteil von 15 % ergibt sich ein Ventilationsystem, das auf eine Bemessungsbrandleistung von 50 MW auszulegen ist. Die geforderte Detektionszeit orientiert sich an den Mindestvor-

gaben der RABT 2006. Sie liegt bei allen bei allen untersuchten Brände bei 60 sec nach Brandausbruch gesetzt.

7.2 Processing

Die eigentliche Berechnung findet anschließend im Schritt **Processing** statt. Die Berechnung erfolgt hierbei unter Ausnutzung paralleler Rechnerstrukturen. Die erforderliche Rechenzeit ist hierbei direkt abhängig von der Anzahl der zur Verfügung stehenden Rechenkerne, der Größe des Rechengebietes und der gewählten Auflösung. Eine Verdoppelung der Auflösung führt beispielsweise zu einer Verachtfachung der Rechenzeit und des erforderlichen Speichers.

7.3 Postprocessing

Als **Postprocessing** wird die Behandlung der Daten nach Durchführung der Berechnungen bezeichnet. Ein wesentlicher Punkt ist hierbei die Visualisierung der Rechenergebnisse. Dadurch lassen sich Aussagen über die Auswirkungen von Lang-Lkw auf die Brandentwicklung ableiten.

Die Ausbreitungsberechnungen erfolgten einheitlich mit einem Brandherd in der Mitte der zu untersuchenden Tunnel. Im Folgenden werden exemplarisch Ergebnisse aus den numerischen Berechnungen zu einem 30 MW Brand für konventionelle Lkw sowie einem 45 MW Brand für Lang-Lkw im Fall von freiem Verkehr bei Längsventilation erläutert. Eine umfassende Zusammenstellung aller Simulationsergebnisse ist in Kap. 3 des Anhangs zu diesem Bericht dargestellt. Der Start des Brandes erfolgt in sämtlichen Szenarien 60 Sekunden nach Simulationsbeginn. Die Darstellung der Rechenergebnisse erfolgt überhöht, die grauen Rechtecke repräsentieren Lkw und Pkw im Fahrraum.

7.3.1 Rauchausbreitung konventioneller Lkw (30 MW Brand)

Das nachfolgende Bild 24 zeigt die Rauchausbreitungen für einen 30 MW-Brand.

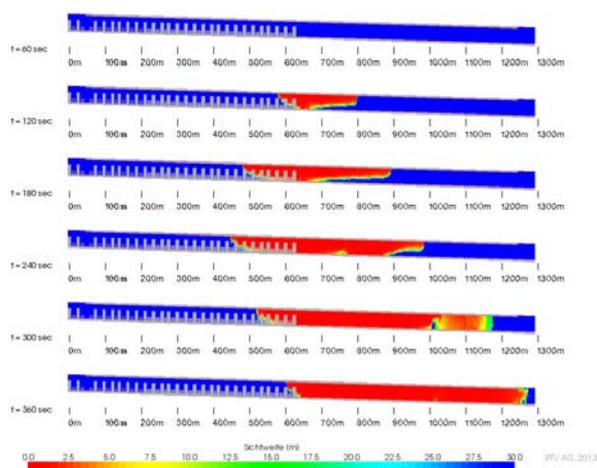


Bild 24: Referenz-tunnel mit Längslüftung - 30 MW - freier Verkehr (3% Längsneigung)

Zur Simulationssekunde 60 findet der Beginn des Brandereignisses statt, das gemäß RABT 2006 innerhalb von 60 s detektiert wird. Nach weiteren 60 s steht die Brandfalllüftung in vollem Umfang zur Verfügung. Mit Hilfe einer Längslüftung wird bei freiem Verkehr nach der Aktivierung der Brandfalllüftung ein Backlayering wirkungsvoll verhindert. Aufgrund des freigesetzten Rauchvolumens und der durch die Ventilatoren verursachten Turbulenzen, findet jedoch unmittelbar nach Brandausbruch eine Verteilung des Rauches über den gesamten Querschnitt statt.

7.3.2 Rauchausbreitung Lang-Lkw (45 MW Brand)

Die nachfolgende Abbildung zeigt die Rauchausbreitungen für einen 45 MW-Brand. Sämtliche Ereignisse wie Brandbeginn und Aktivierung der Sicherheitssysteme erfolgen analog zum Referenz-tunnel. Auch hier ist die auf 50 MW ausgelegte Brandventilation in der Lage, die Rauchausbreitung stromaufwärts zu begrenzen. Bedingt durch die höhere Rauchgasmenge im Vergleich zu einem 30 MW-Brand breitet sich der Rauch aber stärker aus, bevor die Ventilation zu 100 % aktiv ist. Zu $t = 240s$, also 3 Minuten nach Brandausbruch hat sich der Rauch ca. 50m weiter nach links entgegen der Fahrtrichtung ausgebreitet. Hier befinden sich durch den Brand aufgestaute Fahrzeuge. Im Vergleich zum 30 MW-Brand (Bild 24) befinden sich damit mehr Personen im verrauchten Gefahrenbereich.

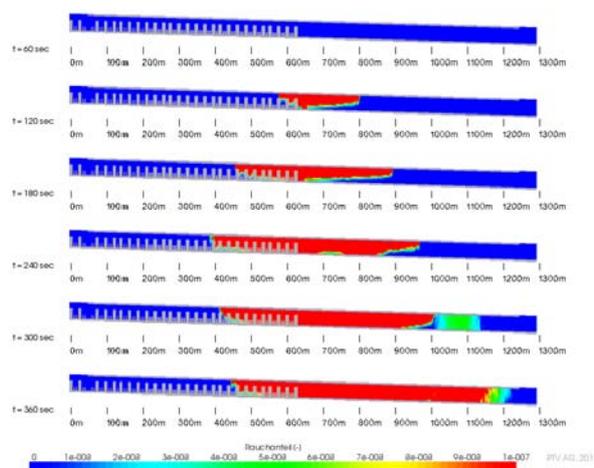


Bild 25: Referenz-tunnel mit Längslüftung - 45 MW - freier Verkehr

Die weiteren Darstellungen sind im Anhang dargestellt. Dort finden sich neben den Rauchausbreitungen auch Darstellungen zur Temperaturentwicklung sowie CO-Verteilung und zur Sichtweite für die jeweiligen Brandereignisse.

8 Risikoanalytische Untersuchungen zum Sicherheitsniveau

8.1 Vorgehen

Im Rahmen der quantitativen Analyse werden vergleichende Betrachtungen zum Sicherheitsniveau durchgeführt. Maßgebliche Betrachtungen sind daher nicht für die absoluten Risiken, die sich aus den Lang-Lkw ergeben, sondern vielmehr die relativen Vergleiche zwischen den Tunnelrisiken mit und ohne Lang-Lkw-Beteiligung. Grundlage dazu bilden die Ansätze der „Sicherheitsbewertung von Straßentunneln“.²²

8.2 Risikoberechnung

Die Quantifizierung von Risiken erfordert die Kenntnis über die Häufigkeit, mit der bestimmte Schadensereignisse eintreten. Als Maß für das Risiko dient dann die Verknüpfung von Schadensausmaß mit der zugehörigen Eintrittshäufigkeit, sowie einem auswirkungsabhängigen Aversionsfaktor. Das Risiko ist wie folgt definiert:

Risiko = Häufigkeit des Eintritts * Größe der Auswirkungen * Aversionsfaktor

²² Veröffentlicht als Heft B66, 2009 (BAST)

Als Aversionsfaktor φ wird der im Forschungsbericht „Bewertung der Sicherheit von Straßentunneln“ verwendete Aversionsfaktor übernommen. Hierbei wird für Personenschäden (Todesopfer) folgende Formel verwendet:

$$\varphi = \sqrt{\text{Schadensausmaß}}$$

Der Aversionsfaktor trägt dem Wunsch Rechnung, seltenerere Ereignisse mit größeren Ausmaßen stärker zu gewichten als häufigere Ereignisse mit geringeren Auswirkungen, da sie von der Öffentlichkeit als schwerwiegender empfunden werden.

Der so bestimmte Schadenerwartungswert wird auch als bewertetetes kollektives Risiko bezeichnet.

Nachfolgend werden die Prinzipien der im Rahmen dieser Untersuchung eingesetzten Methoden zur Häufigkeits- und Ausmaßermittlung erläutert.

8.2.1 Häufigkeitsermittlung

Zur Häufigkeitsermittlung werden von einem auslösenden Ereignis (Initialereignis, Top Event) ausgehend deduktiv alle möglichen Zwischenzustände bis hin zu den Endzuständen des Systems ermittelt und diese hinsichtlich ihrer zu erwartenden Häufigkeit quantifiziert. Vom auslösenden Ereignis (Initialereignis, Top Event) aus werden die angeforderten Systemantworten (zum Beispiel die eines Sicherheitssystems) abgefragt, und es wird unterschieden, ob ein Erfolg oder ein Versagen vorliegt. An diesem Punkt verzweigt sich der Ereignisablauf in weitere Zwischenzustände. Die Zwischenzustände werden analog zu denen des auslösenden Ereignisses auf Systemantworten untersucht. So entstehen bis zum Erreichen eines Endzustandes unterschiedliche Zweige des Ereignisablaufes, die mit unterschiedlichen Verzweigungswahrscheinlichkeiten versehen sind.

Zur besseren Veranschaulichung dieses Ereignisablaufes werden so genannte Ereignisbäume verwendet, die über Linien eine graphische Darstellung des Ablaufes wiedergeben (vgl. Bild 26).

Bei der Modellierung der Ereignisbäume sind folgende Regeln zu beachten:

- Für jedes auslösende Ereignis wird für sich ein detailliertes Ablaufdiagramm erstellt.
- Der Zweig des Ereignisablaufes wird bis zu dem Zeitpunkt verfolgt, wo das System einen endgültigen Zustand (Endzustand) erreicht hat und eine weitere Verzweigung nicht mehr möglich ist.

Eine weitere Betrachtung für beherrschbare Ereignisabläufe (d. h. Erfolg eines Sicherheitssystems)

kann notwendig sein, wenn sich die Randbedingungen durch Einflussfaktoren wie Zeit oder andere Systemausfälle ändern können.

- Die Systemantworten werden im Ablaufdiagramm in der zeitlichen Reihenfolge ihres Auftretens aufgeführt.
- Es werden nur Systemantworten dargestellt, die eine unmittelbare Wirkung auf die Ablaufentwicklung der Ereignisse haben. Alle mittelbar benutzten Subsysteme, wie zum Beispiel das der Energieversorgung, sind nicht Bestandteil der Ablaufentwicklung, sondern werden in den zugehörigen Verzweigungswahrscheinlichkeiten berücksichtigt.

Die zu erwartenden Häufigkeiten der Endzustände werden über folgende Formel berechnet:

$$H_{ei} = H_0 \prod P_{u,i}$$

(Verzweigungswahrscheinlichkeiten P im Zweig i)

Für diese Berechnung werden die Häufigkeiten des auslösenden Ereignisses und der Verzweigungswahrscheinlichkeiten der einzelnen Systemantworten benötigt.

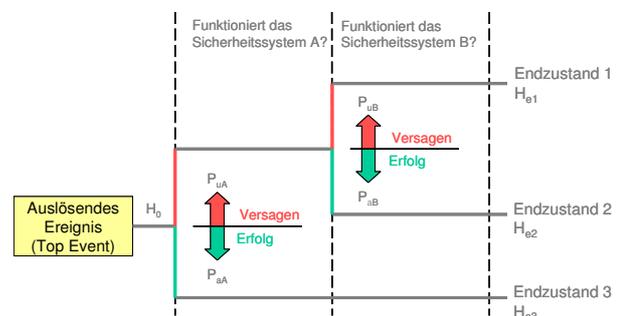


Bild 26: Schema eines Ereignisbaums

8.2.2 Ausmaßermittlung

Das personenbezogene Schadenausmaß wird durch mehrere, sich überlagernde Effekte bestimmt. Das Schadensausmaß ist zum einen abhängig von den Einwirkungen auf den menschlichen Organismus infolge äußerer Einflüsse wie Druck, Temperatur, Rauch und zum anderen von der Anzahl der potentiell betroffenen Personen im betreffenden Abschnitt. Die Ausbreitung von Temperatur und Rauch unterliegt fluiddynamischen Gesetzmäßigkeiten. Die Anzahl der betroffenen Personen ist abhängig von der verkehrlichen Situation, dem Zeitpunkt der Detektion eines Ereignisses und der Sperrung eines Tunnels sowie den momentanen Fluchtbedingungen im Tunnel. Nachfolgend werden die Verfahren und Methoden zur Bestimmung des Schadensausmaßes erläutert.

8.2.2.1 Zusammenhang zwischen Sichtweite und Fluchtgeschwindigkeit

In Untersuchungen konnte gezeigt werden, dass die Fluchtgeschwindigkeit direkt abhängig ist von der vorhandenen Sichtweite. Wie aus Bild 27 ersichtlich, ist ab einer Sichtweite von 10 m mit einem drastischen Rückgang der Fluchtgeschwindigkeiten zu rechnen. Abhängig von der Rauchzusammensetzung ist bei einer starken Irritation der Augen und Atemwege, wie sie bei real ablaufenden Fahrzeugbränden i. d. R. anzutreffen ist, bei ca. 5 m Sichtweite keine Fortbewegung mehr möglich. Zu berücksichtigen ist hierbei jedoch, dass eine Orientierungslosigkeit schon deutlich früher einsetzt. Ein gezieltes Aufsuchen von Notausgängen ist nur möglich, wenn diese auch erkannt werden, bzw. entsprechende Einrichtungen den Flüchtenden dorthin führen. Für den Flüchtenden im Tunnel bedeutet dies, dass er mindestens die Fluchtwegkennzeichen wahrnehmen können muss. Bei einem Abstand von 25 m müssen diese daher im Extremfall auf mindestens diese Entfernung vom Flüchtenden erkannt werden.

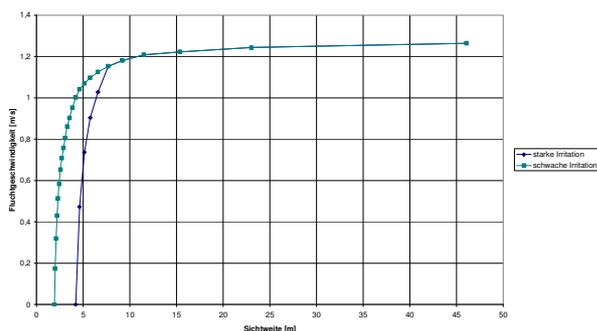


Bild 27: Zusammenhang zwischen Sichtweite und Fluchtgeschwindigkeit für reflektierende Objekte²³

8.2.2.2 Toxizität von Brandgasen

Bei realen Bränden werden i.d.R. eine Reihe von toxisch wirkenden Schadstoffen über den Plume an die Umgebung abgegeben. Von der Vielzahl der im Brandrauch enthaltenen toxischen Rauchgaskomponenten wirken im Wesentlichen Kohlenmonoxid (CO) und Blausäure (HCN) akut toxisch auf den Menschen. Beide Gase haben bereits in geringen Konzentrationen narkotische Wirkung und führen bei längerer Expositionsdauer oder bei höheren Konzentrationen sehr rasch zum Tod.

Kohlenmonoxid entsteht bei praktisch jedem unvollständigen Verbrennungsprozess. Es gehört zu

der Gruppe der farb- und geruchslosen Gase. Es ist darüber hinaus schwer wasserlöslich und dringt daher bis in tiefe Lungenregionen vor. Seine schädigende Wirkung liegt in der gegenüber dem Sauerstoff ca. 250-fach höheren Affinität zum Blutfarbstoff Hämoglobin. Das dabei entstehende Carboxyhämoglobin (CO-Hb) reduziert den Sauerstofftransport im Blut. Bereits ab einem Anteil von ca. 20 % CO-Hb im Blut treten erste toxische Wirkungen auf und führen ab einem Anteil von ca. 40 % zur Bewusstlosigkeit. CO-Hb-Konzentrationen zwischen 50 % und 70 % führen schließlich zum Tod.

Blausäure weist gegenüber Kohlenmonoxid eine ca. zehnmal höhere Toxizität auf (vgl. Bild 28). Es entsteht bei der Verbrennung stickstoffhaltiger Materialien. Hierzu zählen beispielsweise Acryl, Nylon, Polyurethan und Wolle. Das Blausäuregas ist im Gegensatz zum Kohlenmonoxid leicht wasserlöslich und kann daher vom menschlichen Organismus sowohl oral als auch durch Inhalation aufgenommen werden. Untersuchungen zeigen, dass bereits Konzentrationen von 180 bis 270 ppm in der Atemluft bei kurzzeitiger Exposition und Konzentrationen von 90 ppm bei längerer Exposition zum Tode führen.

Beide Brandgase können unabhängig voneinander ihre toxische Wirkung entfalten, d.h. ihre Wirkungen addieren sich.

In Bild 28 sind die Konzentrationen für Kohlenmonoxid (CO) und Blausäure (HCN) in Abhängigkeit von der Expositionszeit aufgetragen, ab der mit Bewusstlosigkeit zu rechnen ist.

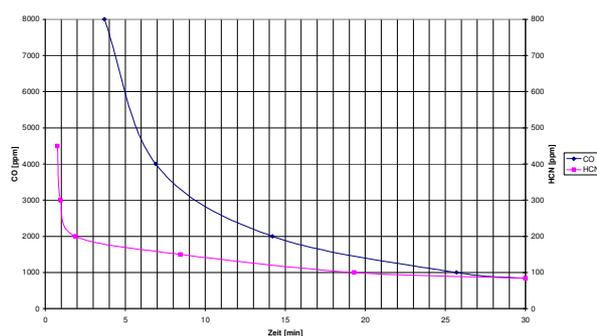


Bild 28: Letalitäten infolge CO bzw. HCN Exposition

8.2.2.3 Einfluss von Temperatur auf den menschlichen Organismus

Die infolge eines Brandes freigesetzte Energie kann auf den Menschen durch Wärmestrahlung oder infolge konvektiver Wärmeübertragung schädigend wirken. Effekte durch Wärmestrahlung beschränken sich in der Regel auf den unmittelbaren Brandbereich, während durch konvektive Wärme-

²³ Mayer, G.: "Brände in Straßentunneln: Abschätzung der Selbstrettungsmöglichkeiten der Tunnelnutzer mittels numerischer Rauchausbreitungssimulation", Aachener Mitteilungen Straßenwesen, Erd- und Tunnelbau, Heft 47, 2006

übertragung Wärme mit der Strömung über weite Bereiche transportiert werden kann. Die damit verbundene Erhöhung der Umgebungstemperatur kann in Abhängigkeit von der Expositionsdauer zu Verbrennungen oder Wärmestaubildung im menschlichen Organismus führen. Im Allgemeinen führen kurze Expositionzeiten aufgrund der körpereigenen Wärmekapazität zu keiner signifikanten Erhöhung der Körpertemperatur. Jedoch können bereits kurze Expositionzeiten zu Verbrennungen auf der Haut und im Atemtrakt führen.

Neben der Umgebungstemperatur hat der Feuchtegehalt der Luft einen wesentlichen Einfluss auf die Art der Schädigung (siehe Bild 29). Nach Purser (1995) ist in trockener Luft bis zu einer Temperatur von 120°C mit überwiegender Wärmestaubildung zu rechnen. Temperaturen über 120°C führen schließlich zu Verbrennungen der Haut.

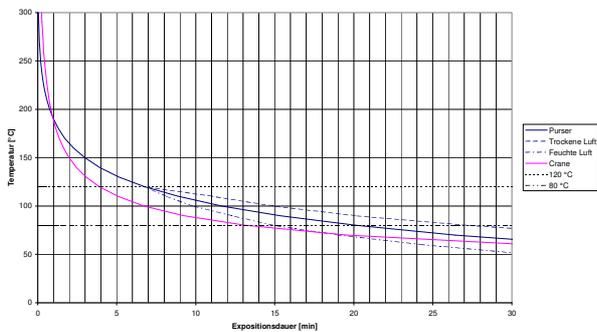


Bild 29: Letalitäten infolge Temperatureinwirkung

8.2.2.4 Bestimmung von Selbstrettungsbereichen

Das erfolgreiche Flüchten von Tunnelnutzern im Ereignisfall in sichere Bereiche wird maßgeblich von den lokal vorherrschenden Umgebungsbedingungen bestimmt. Als Maß zur Abschätzung der Fluchtbedingungen dienen Letalitätskurven für Einwirkungen infolge von Druck, Temperatur sowie Gas- und Partikelkonzentrationen. Basierend auf den Ergebnissen aus den numerischen Berechnungen lassen sich somit in Abhängigkeit von der Fluchtgeschwindigkeit und den gegebenen Fluchtweglängen Bereiche ableiten, aus denen unter den gegebenen Randbedingungen eine erfolgreiche Selbstrettung oder nur eine bedingte bzw. keine Selbstrettung möglich ist.

Sind für einen Tunnelnutzer noch ausreichende Umgebungsbedingungen vorhanden, so wird eine Fluchtgeschwindigkeit von 1,3 m/s angenommen. Werden dagegen Grenzwerte hinsichtlich äußerer Einwirkungen unterschritten, so wird davon ausgegangen, dass keine weitere Fortbewegung möglich ist und die Selbstrettung fehlschlägt.

Bereiche mit erfolgreicher Selbstrettung ergeben sich aus dem Weg, der bei der angenommenen Fluchtgeschwindigkeit durch den Tunnelnutzer zum nächstgelegenen Notausgang bzw. Portal bei unverzüglichem Einleiten der Flucht nach Alarmauslösung zurückgelegt werden kann. Die Bereiche, aus denen sich Tunnelnutzer retten können, wenn sie bereits vor Alarmierung durch die betriebstechnischen Einrichtungen selbstständig mit der Flucht beginnen, werden als Bereiche mit bedingter Selbstrettung bezeichnet. Keine Selbstrettung ist schließlich aus den Bereichen möglich, aus denen bei der zugrunde liegenden Fluchtgeschwindigkeit ein Notausgang bzw. ein Portal nicht mehr erreicht werden kann. Das folgende Bild 30 zeigt exemplarisch die Ermittlung der verschiedenen Selbstrettungsbereiche bei einem Notausgangsabstand von 150 m.

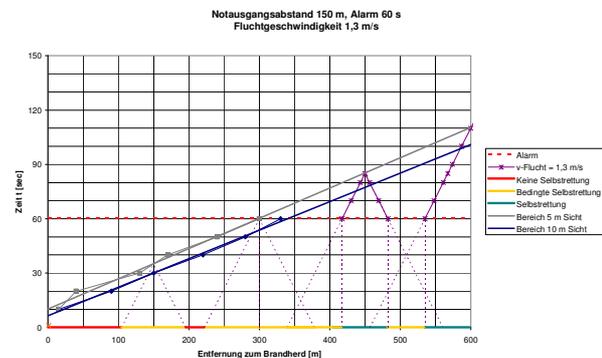


Bild 30: Selbstrettungsbereiche²⁴

Für sämtliche Brandszenarien von konventionellen Lkw sowie Lang-Lkw finden sich die zugehörigen Selbstrettungsbereichsbilder im Anhang.

8.2.2.5 Bestimmung von Personendichten

Die Bestimmung der Fahrzeugmengen wird wesentlich durch nachfolgende Faktoren beeinflusst:

- Straßentyp (Anzahl Fahrspuren / Anzahl gestauter Fahrspuren)
- Fahrzeugdichte bei mittlerem Verkehrsaufkommen (Unterscheidung Tag / Nacht)
- Mittlere Fahrzeugdichte im Stau (stehende Fahrzeugkolonne)
- Durchschnittliche Anzahl Personen pro Fahrzeug
- Detektionszeit bis Tunnelsperrung

Maßgeblichen Einfluss auf die Anzahl der potentiell betroffenen Tunnelnutzer hat hierbei die Zeit bis

²⁴ Mayer, G.: "Brände in Straßentunneln: Abschätzung der Selbstrettungsmöglichkeiten der Tunnelnutzer mittels numerischer Rauchausbreitungssimulation", Aachener Mitteilungen Straßenwesen, Erd- und Tunnelbau, Heft 47, 2006

zur Detektion eines Unfallereignisses²⁵, da nach der Detektion in der Regel eine sofortige Tunnel-schließung erfolgt. Dadurch werden nachfolgende Verkehrsteilnehmer daran gehindert, in den Gefahrenbereich einzufahren. Die entsprechende Zeitspanne ist jedoch abhängig vom jeweiligen Unfallszenario.

Die Berechnung der Fahrzeugmengen erfolgt mit Hilfe der Theorie von kinematischen Wellen, fahrstreifenbezogen und getrennt für Bereiche mit freiem Verkehrsfluss und Stau bzw. stockendem Verkehr. Hierbei werden folgende Annahmen und Vereinfachungen getroffen:

- Alle Fahrzeuge fahren im flüssigen Verkehr mit der zulässigen Maximalgeschwindigkeit.
- Reaktionszeit und Bremsweg werden vernachlässigt.
- Mit Ausnahme der Detektionszeit werden keine weiteren zeitlichen Effekte berücksichtigt.

Zur Ermittlung des Ausmaßes muss zunächst die Gesamtanzahl P der sich im Tunnel befindlichen Personen bestimmt werden. Dabei sind folgende Fälle zu unterscheiden:

Stau:

$$P = D_{Stau} \cdot l \cdot b_{Fzg} \cdot f_s$$

freier Verkehr (Tunnelsperrung erfolgreich):

$$P = Q \left(\frac{l}{v} + t_s \right) \cdot b_{Fzg} \cdot f_s$$

freier Verkehr (Tunnelsperrung nicht erfolgreich):

$$P = D_{Stau} \cdot l \cdot b_{Fzg} \cdot f_s$$

mit:	D_{Stau}	Dichte gestauter Fahrzeuge
	l	Länge des Tunnels
	b_{Fzg}	Fahrzeugbesetzungsgrad
	f_s	Anzahl Fahrspuren
	Q	Verkehrsstärke
	v	Geschwindigkeit der Fahrzeuge im Tunnel
	t_s	Zeit bis zur Sperrung des Tunnels

l' Strecke vom Einfahrportal bis zum Brandherd

8.2.2.6 Schadensausmaßbestimmung

Die Bestimmung der Schadensausmaße erfolgt durch Überlagerung der ermittelten Personendichten mit den bestimmten Bereichen für „Selbstrettung“, „bedingte Selbstrettung“ und „keine Selbstrettung“. Für die Bereiche mit bedingter Selbstrettung wird zur Bestimmung der Schadensausmaße die Annahme getroffen, dass sich die Hälfte der betroffenen Personen aus diesem Bereich retten kann.

8.2.3 Ermittlung der Häufigkeiten H_0 der Initialereignisse

Die Methode der Ereignisablaufanalyse erfordert nach der Identifizierung der auslösenden Ereignisse die Bestimmung der zugehörigen Eintrittshäufigkeiten. Um eine differenzierte Betrachtung des resultierenden Sicherheitsniveaus in Abhängigkeit von maßgeblichen Ereignisursachen zu ermöglichen, wird im Folgenden unterschieden zwischen den Initialereignissen

- Kollision,
- Brand infolge Kollision sowie
- Brand infolge Selbstzündung.

Die entsprechenden Eintrittshäufigkeiten basieren auf statistischen Angaben. In nachfolgender Tab. 10 sind die Eintrittshäufigkeiten für das jeweilige Initialereignis zusammengefasst.

Die Initialereignisse werden für Lang-Lkw und konventionell Lkw gleich angesetzt. Bisher ergeben sich keine Hinweise auf Änderungen in der Unfallhäufigkeit bei Lang-Lkw. Es ist derzeit eher von einer geringeren Unfallrate von Lang-Lkw auszugehen, z.B. aufgrund der verbesserten Sicherheitstechnik der neuen Fahrzeuge (siehe auch Kapitel 4.3). Als konservativer Ansatz wurde die allgemeine Unfallrate verwendet. Basis bildet der Forschungsbericht Bewertung der Sicherheit von Straßentunneln der BAST.

²⁵ Folgende Alarmierungsarten können u.a. zu einer Tunnel-schließung führen: Erkennen des Unfalls per Videoüberwachungssystem, Alarmierung durch Tunnelbenutzer, etc.

Initialereignis (Top Event)		Beschreibung
[0.1]	Initialereignis Kollision (ohne Brand)	Beim Initialereignis Kollision handelt es sich um die Häufigkeit eines zu erwartenden Unfalls. Die Unfallrate für Richtungsverkehrstunnel ohne Zu- und Abfahrten beträgt $2,28 \cdot 10^{-7}$ [1 / Fahrzeug*km].
Initialereignis (Top Event)		Beschreibung
[0.2]	Initialereignis Brand infolge Kollision	Der eingesetzte Wert basiert auf den im Forschungsbericht angegebenen Werten zur Brandwahrscheinlichkeit infolge eines Unfalls. Es wird angenommen, dass in 0,30 % der Unfälle mit einem Kfz-Brand zu rechnen ist, dies entspricht einer Unfallrate von $6,84 \cdot 10^{-10}$ [1/Fahrzeug* km]
Initialereignis (Top Event)		Beschreibung
[0.3]	Initialereignis Brand infolge Selbstzündung	Beim Initialereignis Selbstzündung handelt es sich um einen Kfz-Brand infolge eines technischen Defekts. Die entsprechende Häufigkeit eines Fahrzeugbrandes liegt bei einer Brandrate von $3,0 \cdot 10^{-9}$ [1 / Fahrzeug*km].

Tab. 10: Häufigkeiten H_0

8.2.4 Ermittlung der Verzweigungswahrscheinlichkeiten im Ereignisablauf

Die Quantifizierung der Häufigkeiten der Endzustände erfordert Kenntnis über die Verzweigungswahrscheinlichkeiten im Ereignisablauf. Zu unterscheiden ist hierbei prinzipiell zwischen den Ereignisabläufen infolge Brand und Kollision als Initialereignis.

8.2.4.1 Verzweigungswahrscheinlichkeiten P_i infolge Brand

Zur Berechnung der Ausmaßverteilung eines Fahrzeugbrandes werden folgende Einflussgrößen im Ereignisablauf für das Initialereignis Brands berücksichtigt:

- Brandort (Tunnelmitte)
- Fahrzeugtyp (Pkw: 5 MW, Lkw: 30 / 50 / 100 MW, Lang-Lkw: 45 / 75 / 150 MW)
- Zeitpunkt des Ereignisses (Tag / Nacht)
- Verkehrszustand (freier Verkehrsfluss / Stau)
- Detektion erfolgreich (ja / nein)
- Tunnelsperrung/Alarmierung erfolgreich (ja / nein)
- Lüftungssystem aktiviert (ja / nein)
- Erhöhtes Ausmaß (Reisebus ja / nein)

Die zur Bestimmung der Eintrittshäufigkeiten der Endzustände erforderlichen Wahrscheinlichkeiten in den Verzweigungspunkten des Ereignisablaufes werden in nachfolgender Tabelle 11 näher erläutert.

Verzweigung im Ereignisbaum		Beschreibung
[1]	Brandort	Als Brandort wird der Mittelpunkt der jeweiligen Tunnelröhre festgelegt. Darüber hinaus wird hier das Brandereignis direkt an einem Notausgang angenommen. Es wird davon ausgegangen, dass in diesem Brandfallszenario der Notausgang vollständig blockiert wird und nicht als Fluchtmöglichkeit zur Verfügung steht.
[2a]	Energiefreisetzungen Lkw	Hierbei wird von folgender Wahrscheinlichkeitsverteilung ausgegangen, die bei einem Unfall mit Brandfolge ein 5, 30, 50 oder 100 MW Brand entsteht. Aufgrund des SV-Anteils von 15 % liegen die Pkw-Brände bei 85 %. Ereignisse mit 100 MW-Energiefreisetzung treten in 6 % der Schwerverkehrsbrände auf, d.h. hier 6 % von 15 %. Die restlichen Prozente werden im Faktor 9:1 Bränden von 30 und 50 MW zugeordnet.
		Lkw
		5 MW 85 %
		30 MW 12,69 %
		50 MW 1,41 %
		100 MW 0,9 %
[2b]	Energiefreisetzungen Lang-Lkw	Für die Berücksichtigung von Lang Lkw werden 1% bzw. 10% am Schwerverkehr betrachtet. Die relativen Verteilungen zwischen 45 / 75 / 150 MW wird analog zu [2a] getroffen Damit ergeben sich folgende Verteilungen.

			Lang-Lkw 1%	Lang-Lkw 10%
		5 MW	85 %	85 %
		30 MW	12,56 %	11,42 %
		45 MW	0,13 %	1,27 %
		50 MW	1,40 %	1,27 %
		75 MW	0,01 %	0,14 %
		100 MW	0,89 %	0,81 %
		150 MW	0,01 %	0,09 %
[2b]	Energiefreisetzungen Lang-Lkw (Substitution)	<p>Im Fall der Substitution wird davon ausgegangen, dass durch die erhöhte Transportleistung von Lang-Lkw herkömmliche Lkw eingespart werden können. Es wird dabei der Ansatz verfolgt, dass aufgrund der Ladungsvolumen von 150 m³ zu 100 m³ von Lang-Lkw bzw. konventionellem Lkw, 2 Lang-Lkw 3 Lkw ersetzen können.</p> <p>Abhängig vom Anteil der Lang-Lkw sinkt damit der Anteil des Schwerverkehrs und die Relationen zueinander.</p> <p>Für die Berücksichtigung von Lang Lkw werden 1 % bzw. 10 % am Schwerverkehr betrachtet. Die relativen Verteilungen zwischen 45 / 75 / 150 MW wird analog zu [2a] getroffen Damit ergeben sich folgende Verteilungen.</p>		
			Lang-Lkw 1 % (subst.)	Lang-Lkw 10 % (subst.)
		5 MW	85,07 %	85,64 %
		30 MW	12,51 %	10,93 %
		45 MW	0,13 %	1,21 %
		50 MW	1,39 %	1,21 %
		75 MW	0,01 %	0,14 %
		100 MW	0,89 %	0,78 %
		150 MW	0,01 %	0,09 %
[3]	Tageszeit Tag/Nacht	<p>Das Verkehrsaufkommen ist tageszeitabhängig. Der Zeitpunkt eines Brandes hat deshalb einen Einfluss auf das jeweilige Ausmaß. Als Tageszeit werden die Stunden mit hoher Verkehrsdichte von 06.00 bis 22.00 Uhr betrachtet, als Nachtzeit die Stunden von 22.00 bis 06.00 Uhr. Bezogen auf 24 h entspricht hierbei der Anteil der Stunden bei Tag 67 % und der Anteil der Stunden bei Nacht 33 %.</p>		
[4]	Verkehrszustand Freier Verkehr / Stau	<p>Die Anzahl der potentiell betroffenen Tunnelnutzer ist auch vom vorherrschenden Verkehrszustand abhängig. Im Fall von Stau bzw. stockendem Verkehr können bedeutend mehr Personen als bei freiem Verkehrsfluss lebensbedrohlichen Einwirkungen ausgesetzt sein. Da es sich bei dem Untersuchungstunnel um einen innerstädtischen Tunnel mit täglich stockendem Verkehr infolge Überlastungen im nachgeordneten Netz handelt, wird die Annahme getroffen, dass Stau im Tunnel mit einer Wahrscheinlichkeit von 0,34 % auftritt. Dies entspricht 30 Staustunden pro Jahr</p>		
[5]	Detektion Ja / Nein	<p>Im Sinne einer konservativen Annahme wird davon ausgegangen, dass bei einem Fahrzeugbrand eine Detektion zu 99 % innerhalb von 60 s erfolgt.</p>		
[6]	Tunnelsperrung Ja / Nein	<p>Von einem Brand im Tunnel können auch technische Einrichtungen im Tunnel betroffen sein. Dies (oder andere technische Probleme) führt unter Umständen dazu, dass die Sperreinrichtungen nicht ordnungsgemäß funktionieren und somit eine Tunnelschließung nicht erfolgen kann. Es wird (im Sinne einer konservativen Annahme) davon ausgegangen, dass dies in einem von hundert Fällen eintritt.</p>		
[7]	Lüftungssystem Ja / Nein	<p>Die Belüftung der Tunnel erfolgt im Fall des Längslüftungsbetriebs ausschließlich über Strahlventilatoren und im Rauchabsaugbetrieb mittels einzeln ansteuerbaren Rauchabsaugvorrichtungen. Nach erfolgter Detektion wird mit Hilfe entsprechender Steuerungsprogramme die Ausbreitung der</p>		

		Rauchgase bzw. des Brandes beeinflusst. Es wird die Annahme getroffen, dass in einem von hundert Fällen (1 %) das Aktivieren des entsprechenden Lüftungsprogramms nicht erfolgt.
[8]	Erhöhtes Ausmaß Ja / Nein	Befindet sich beispielsweise ein Reisebus zum Zeitpunkt des Ereignisses im Gefahrenbereich, so ist mit einem erhöhten Schadensausmaß zu rechnen. Es wird die Annahme getroffen, dass in 1 % der Fälle mit einem erhöhten Ausmaß zu rechnen ist. Für die Erhöhung des Ausmaßes wird, wenn Bereiche mit keiner möglichen Selbstrettung auftreten, pauschal eine Menge von 20 Personen zu Grunde gelegt. Treten nur Bereiche mit bedingter Selbstrettung auf, so werden pauschal 10 Personen des Busses zum errechneten Ausmaß addiert.

Tab. 11: Verzweigungen im Ereignisablauf infolge eines Brandes

8.2.4.2 Verzweigungswahrscheinlichkeiten P_i infolge Kollision

Charakteristisch für Unfälle in Straßenverkehrstunneln ist das Auftreten folgender Unfalltypen:

- Unfalltyp 1: Fahrnfall (Selbstunfall z. B. Kollision mit der Tunnelinfrastruktur)
- Unfalltyp 3: Einbiegen/Kreuzen-Unfall (Kollision bei einer Zu-/Abfahrt im Tunnel)
- Unfalltyp 6: Unfall im Längsverkehr (Auffahrkollision oder Kollision bei einem Spurwechsel in einem Richtungsverkehrstunnel)

- Unfalltyp 7: Sonstiger Unfall (z. B. Kollision mit einem Gegenstand, plötzliches körperliches Unvermögen, Versagen am Fahrzeug)

Nachfolgende Tab. 12 gibt die Verzweigungswahrscheinlichkeiten in Abhängigkeit von dem jeweiligen Unfalltyp und dem zu erwartenden Schadensausmaß wieder. Da in den gewählten Tunneln keine Zu- und Abfahrten vorhanden sind, ergeben sich keine Unfälle des Typs 3. Die zugehörigen Ausmaßverteilungen sind deshalb auch nur zur Vervollständigung genannt.

Verzweigung im Ereignisbaum	Beschreibung		
[1] Unfalltyp	Basierend auf statistischen Werten der Sicherheitsbewertung von Straßentunneln wird für die Untersuchungsvarianten von folgender Verteilung nach Unfalltypen ausgegangen:		
		Lkw	Lang-Lkw
	Unfalltyp 1	12,8 %	12,8 %
	Unfalltyp 3	0,0 %	0,0 %
	Unfalltyp 6	78,5 %	78,5 %
Unfalltyp 7	8,7 %	8,7 %	
[2] Ausmaßverteilung	Es wird von folgender Schadensausmaßverteilung nach Unfalltypen ausgegangen:		
	Unfalltyp 1	99,25 %	Keine Todesopfer
		0,59 %	1 Todesopfer
		0,15 %	2-3 Todesopfer
		0,01 %	4-9 Todesopfer
		0,0001 %	10-30 Todesopfer
		0,00001 %	>30 Todesopfer
	Unfalltyp 3	99,50 %	Keine Todesopfer
		0,42 %	1 Todesopfer
		0,07 %	2-3 Todesopfer
		0,01 %	4-9 Todesopfer
		0,0001 %	10-30 Todesopfer
		0,00001 %	>30 Todesopfer
	Unfalltyp 6	99,00 %	Keine Todesopfer
		0,72 %	1 Todesopfer
		0,27 %	2-3 Todesopfer
		0,01 %	4-9 Todesopfer
		0,0001 %	10-30 Todesopfer
		0,00001 %	>30 Todesopfer
	Unfalltyp 7	99,50 %	Keine Todesopfer
		0,42 %	1 Todesopfer
		0,07 %	2-3 Todesopfer
		0,01 %	4-9 Todesopfer
		0,0001 %	10-30 Todesopfer
0,00001 %		>30 Todesopfer	

Tab. 12: Verzweigungen im Ereignisablauf infolge einer Kollision

8.3 Untersuchungsergebnisse

Nachfolgend sind die Ergebnisse der Berechnungsfälle aufgeführt. Eine detaillierte Dokumentation sämtlicher Simulationen und Auswertungen findet sich im Anhang.

8.3.1 Referenzfall mit Längsventilation – Tunnel 1A

Für den Referenzfall ergeben sich nach dem vorgestellten Vorgehen die folgenden Risikokenngrößen. Die Summenkurve des Häufigkeits-Ausmaß-Diagramms ist in Bild 31 dargestellt.

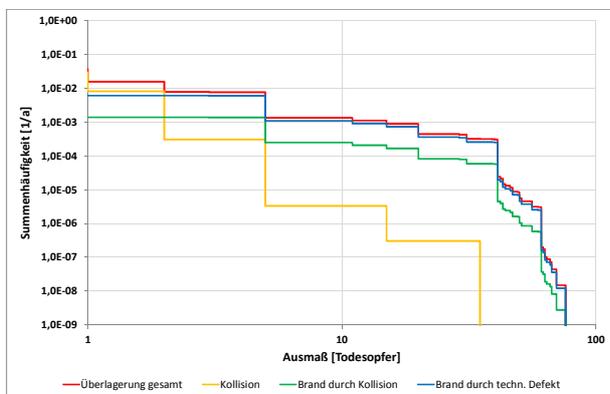


Bild 31: Summenkurve Berechnungsfall Tunnel 1A

Das zugehörige bewertete kollektive Gesamtrisiko für die betrachteten Initialereignisse liegt in der maßgeblichen Tunnelröhre bei 0,2795 Todesopfern pro Jahr.

8.3.2 Referenzfall mit Längsventilation und Rauchabsaugung – Tunnel 2A

Für den Referenzfall mit zusätzlicher Rauchabsaugung ergeben sich nach dem vorgestellten Vorgehen die folgenden Risikokenngrößen.

Die Summenkurve des Häufigkeits-Ausmaß-Diagramms ist nachfolgend dargestellt.

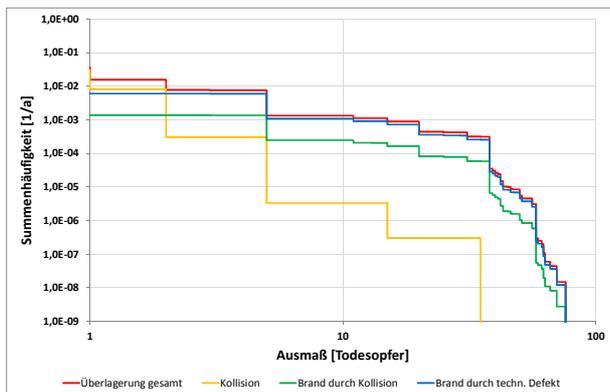


Bild 32: Summenkurve Berechnungsfall Tunnel 2A

Das zugehörige bewertete kollektive Gesamtrisiko für die betrachteten Initialereignisse liegt in der maßgeblichen Tunnelröhre bei 0,2707 Todesopfern pro Jahr.

8.3.3 Untersuchungsfall Tunnel 1B

Im Gegensatz zum Referenztunnel werden für den Tunnel 1B zusätzlich Lang-Lkw in die Betrachtung einbezogen. In diesem Fall wurde ihr Anteil auf 1 % des Schwerververkehrs festgelegt. Das bedeutet, dass bei einer angenommenen Verkehrsbelastung von 30.000 Kfz / 24 h und einem SV-Anteil von 15 % täglich 45 Lang-Lkw die Tunnelröhre passieren. Die Summenkurve des Häufigkeits-Ausmaß-Diagramms ist in Bild 33 dargestellt.

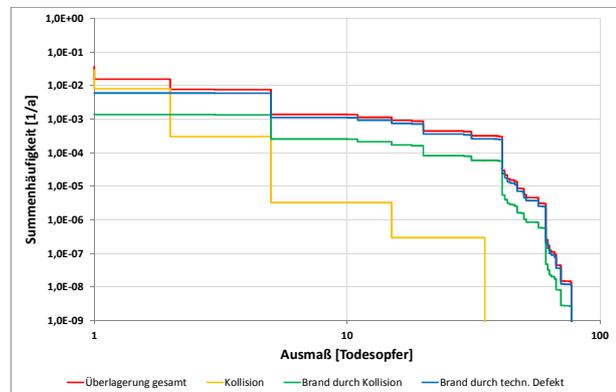


Bild 33: Summenkurve Berechnungsfall Tunnel 1B

Das zugehörige bewertete kollektive Gesamtrisiko für die betrachteten Initialereignisse liegt in der maßgeblichen Tunnelröhre bei 0,2837 Todesopfern pro Jahr.

8.3.4 Untersuchungsfall Tunnel 1C

Für den Tunnel 1C wurde der Anteil der Lang-Lkw am Schwerverkehr auf 10 % erhöht. In diesem Fall fahren täglich 450 Lang-Lkw durch den Tunnel. Bild 34 zeigt die zugehörige Summenkurve.

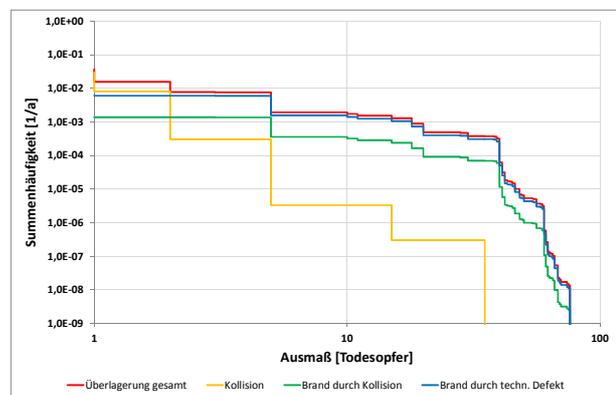


Bild 34: Summenkurve Berechnungsfall Tunnel 1C

Das zugehörige bewertete kollektive Gesamtrisiko für die betrachteten Initialereignisse steigt in der maßgeblichen Tunnelröhre auf 0,3155 Todesopfern pro Jahr an.

8.3.5 Untersuchungsfall Tunnel 1D

Im Vergleich zum Tunnel 1B wurde die absolute Anzahl an Lang-Lkw beibehalten, d.h. täglich passieren 45 Lang-Lkw den Tunnel. Im Gegensatz zum vorangegangenen Fall wird aber die Substitutionsmöglichkeit der Lang-Lkw berücksichtigt. Aufgrund des deutlich vergrößerten Ladevolumens wird davon ausgegangen, dass damit die Anzahl an notwendigen Fahrten reduziert werden kann. Demnach können 2 Lang-Lkw 3 herkömmliche Lkw ersetzen. Unter Berücksichtigung dieses Ansatzes repräsentieren 45 Lang-Lkw theoretisch 67,5 Lkw. Es werden damit 22,5 weniger Lkw notwendig für die gleiche Transportleistung und der DTV sinkt auf 29.977 Kfz / 24 h und der SV-Anteil entsprechend auf 14,93 %.

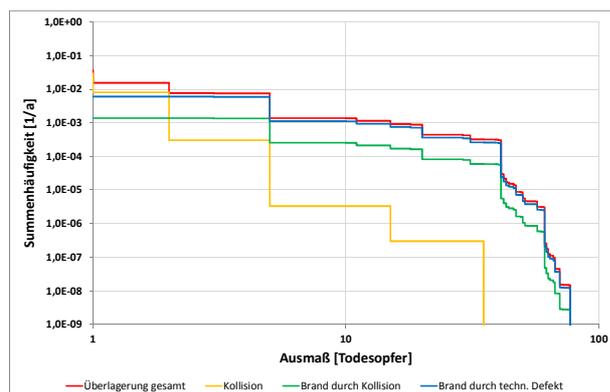


Bild 35: Summenkurve Berechnungsfall Tunnel 1D

Das zugehörige bewertete kollektive Gesamtrisiko für die betrachteten Initialereignisse liegt in der maßgeblichen Tunnelröhre bei 0,2824 Todesopfern pro Jahr.

8.3.6 Untersuchungsfall Tunnel 1E

Im Vergleich zum Tunnel 1C wurde die absolute Anzahl an Lang-Lkw beibehalten, auch hier sind täglich 450 Lang-Lkw im Tunnel zu verzeichnen. Im Gegensatz zum vorangegangenen Fall wird aber die Substitutionsmöglichkeit der Lang-Lkw berücksichtigt. Aufgrund des deutlich vergrößerten Ladevolumens wird davon ausgegangen, dass damit die Anzahl an notwendigen Fahrten reduziert werden kann. Demnach können 2 Lang-Lkw 3 herkömmliche Lkw ersetzen. Unter Berücksichtigung dieses Ansatzes repräsentieren 450 Lang-Lkw theoretisch 675 Lkw. Es werden damit 225 weniger Lkw notwendig für die gleiche Transport-

leistung und der DTV sinkt auf 29.775 Kfz / 24 h und der SV-Anteil entsprechend auf 14,36 %.

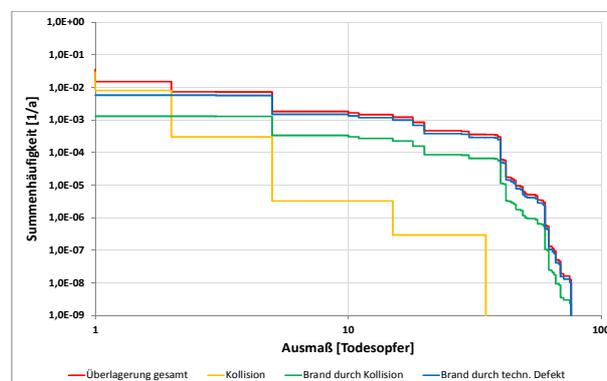


Bild 36: Summenkurve Berechnungsfall Tunnel 1E

Das zugehörige bewertete kollektive Gesamtrisiko für die betrachteten Initialereignisse liegt in der maßgeblichen Tunnelröhre bei 0,3021 Todesopfern pro Jahr.

8.3.7 Untersuchungsfall Tunnel 2B

Analog zum Tunnel 1B wird im vorliegenden Untersuchungsfall zusätzlich Lang-Lkw in die Betrachtung einbezogen. Auch hier wurde ihr Anteil auf 1 % des Schwerverkehrs festgelegt. Das bedeutet, dass bei einem angenommenen DTV von 30.000 Kfz / 24 h und einem SV-Anteil von 15 % täglich 45 Lang-Lkw den Tunnel passieren. Die Summenkurve des Häufigkeits-Ausmaß-Diagramms ist in Bild 37 dargestellt.

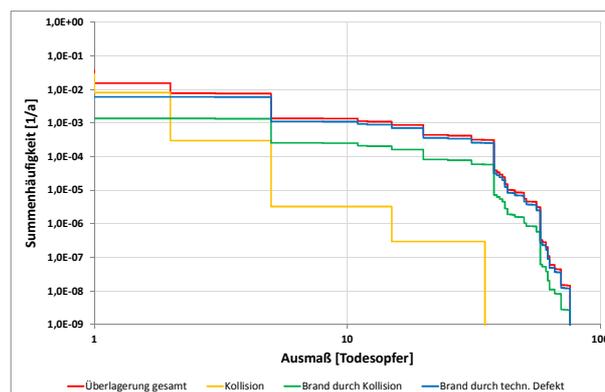


Bild 37: Summenkurve Berechnungsfall Tunnel 2B

Das zugehörige bewertete kollektive Gesamtrisiko für die betrachteten Initialereignisse liegt in der maßgeblichen Tunnelröhre bei 0,2729 Todesopfern pro Jahr.

8.3.8 Untersuchungsfall Tunnel 2C

Für den Tunnel 2C wurde der Anteil der Lang-Lkw am Schwerverkehr auf 10 % erhöht. In diesem Fall

fahren täglich 450 Lang-Lkw durch den Tunnel. Bild 38 zeigt die zugehörige Summenkurve.

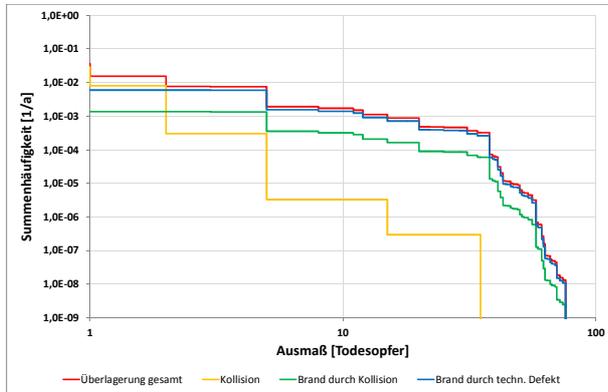


Bild 38 Summenkurve Berechnungsfall Tunnel 2C

Das zugehörige bewertete kollektive Gesamtrisiko für die betrachteten Initialereignisse liegt in der maßgeblichen Tunnelröhre bei 0,2925 Todesopfern pro Jahr.

8.3.9 Untersuchungsfall Tunnel 2D

Im Vergleich zum Tunnel 2B wurde die absolute Anzahl an Lang-Lkw beibehalten, lediglich die Substitution wird analog den Ausführungen beim Tunnel 1D durchgeführt.

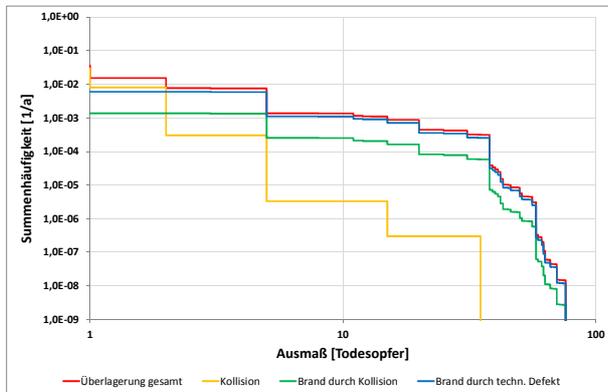


Bild 39: Summenkurve Berechnungsfall Tunnel 2D

Das zugehörige bewertete kollektive Gesamtrisiko für die betrachteten Initialereignisse liegt in der maßgeblichen Tunnelröhre bei 0,2717 Todesopfern pro Jahr.

8.3.10 Untersuchungsfall Tunnel 2E

Im Vergleich zum Tunnel 2C wurde die absolute Anzahl an Lang-Lkw beibehalten, lediglich die Substitution wird analog den Ausführungen beim Tunnel 1E durchgeführt.

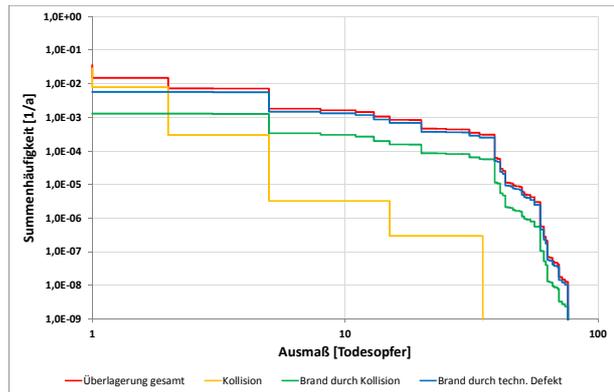


Bild 40: Summenkurve Berechnungsfall Tunnel 2E

Das zugehörige bewertete kollektive Gesamtrisiko für die betrachteten Initialereignisse liegt in der maßgeblichen Tunnelröhre bei 0,2843 Todesopfern pro Jahr.

9 Diskussion der Ergebnisse und Schlussfolgerungen

9.1 Vergleich der Berechnungsfälle

Wie die in den vorangegangenen Kapiteln durchgeführten Analysen zum Sicherheitsniveau zeigen, ergeben sich aufgrund der unterschiedlichen Anteile von Lang-Lkw am Gesamtschwerverkehrsaufkommen und die Berücksichtigung der Fahrzeugsubstitution geringe Unterschiede im Vergleich zu den konventionellen Lkw.

Die folgenden Abbildungen, Bild 41 und Bild 42, stellen zusammenfassend die Summenkurven für die Berechnungen der Lüftungsarten Längslüftung und Längslüftung mit Rauchabsaugung dar.

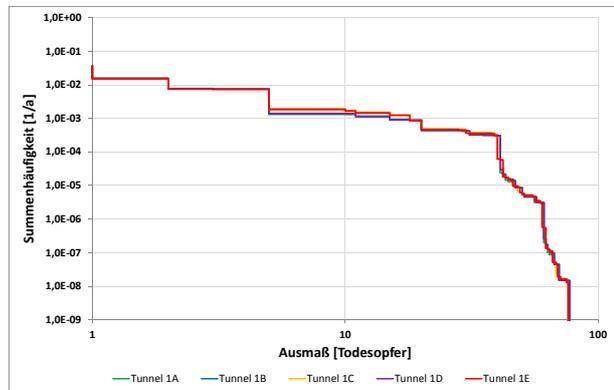


Bild 41: Summenkurve Berechnungsfall Tunnel 1 (mechanische Längslüftung)

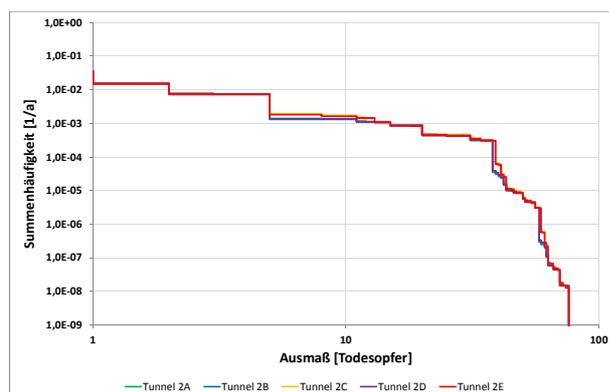


Bild 42: Summenkurve Berechnungsfall Tunnel 2 (Rauchabsaugung über Zwischendecke)

In nachfolgender Tab. 13 und Tab. 14 sind entsprechend die Risikokenngrößen in ihren jeweiligen Anteilen zusammenfassend dargestellt. Zudem werden die Unterschiede zwischen den Untersuchungstunneln den jeweiligen Referenztunneln gegenüber gestellt. Die Darstellung der Summenkurven mittels der zugehörigen Risikowerte ermöglicht Abweichungen von einander übersichtlich prozentual darzustellen. Die in diesen Tabellen aufgeführten Differenzwerte über 0 (rot dargestellt) bedeuten eine Risikoerhöhung. Negative Werte (in grün) stellen ein höheres Sicherheitsniveau im Vergleich zum Referenztunnel dar.

Berechnungsfälle	bewertetes kollektives Risiko - Längsventilation			
	Brand (Kollision)	Brand (techn. Defekt)	Kollision (ohne Brand)	Gesamt
Tunnel 1A (ohne Lang-Lkw-Anteil)	0,0432	0,1896	0,0467	0,2795
Tunnel 1B (1 % Lang-Lkw am SV)	0,0440	0,1930	0,0467	0,2837
Differenzen	1,79%	1,79%	0,00%	1,49%
Tunnel 1A (ohne Lang-Lkw-Anteil)	0,0432	0,1896	0,0467	0,2795
Tunnel 1C (10 % Lang-Lkw am SV)	0,0499	0,2189	0,0467	0,3155
Differenzen	15,45%	15,45%	0,00%	12,87%
Tunnel 1A (ohne Lang-Lkw-Anteil)	0,0432	0,1896	0,0467	0,2795
Tunnel 1D (1 % Lang-Lkw am SV mit Subst.)	0,0438	0,1920	0,0467	0,2824
Differenzen	1,27%	1,27%	-0,08%	1,04%
Tunnel 1A (ohne Lang-Lkw-Anteil)	0,0432	0,1896	0,0467	0,2795
Tunnel 1E (10 % Lang-Lkw am SV mit Subst.)	0,0475	0,2083	0,0463	0,3021
Differenzen	9,85%	9,85%	-0,75%	8,08%
Tunnel 1B (1 % Lang-Lkw am SV)	0,0440	0,1930	0,0467	0,2837
Tunnel 1D (1 % Lang-Lkw am SV mit Subst.)	0,0438	0,1920	0,0467	0,2824
Differenzen	-0,51%	-0,51%	-0,08%	-0,44%
Tunnel 1C (10 % Lang-Lkw am SV)	0,0499	0,2189	0,0467	0,3155
Tunnel 1E (10 % Lang-Lkw am SV mit Subst.)	0,0475	0,2083	0,0463	0,3021
Differenzen	-4,86%	-4,86%	-0,75%	-4,25%

Tab. 13: Berechnungsfälle Tunnel 1

Berechnungsfälle	bewertetes kollektives Risiko - Längs-ventilation mit Rauchabsaugung			
	Brand (Kollision)	Brand (techn. Defekt)	Kollision (ohne Brand)	Gesamt
Tunnel 2A (ohne Lang-Lkw-Anteil)	0,0416	0,1824	0,0467	0,2707
Tunnel 2B (1 % Lang-Lkw am SV)	0,0420	0,1842	0,0467	0,2729
Differenzen	0,97%	0,97%	0,00%	0,81%
Tunnel 2A (ohne Lang-Lkw-Anteil)	0,0416	0,1824	0,0467	0,2707
Tunnel 2C (10 % Lang-Lkw am SV)	0,0456	0,2002	0,0467	0,2925
Differenzen	9,74%	9,74%	0,00%	8,06%
Tunnel 2A (ohne Lang-Lkw-Anteil)	0,0416	0,1824	0,0467	0,2707
Tunnel 2D (1 % Lang-Lkw am SV mit Subst.)	0,0418	0,1833	0,0467	0,2717
Differenzen	0,46%	0,46%	-0,08%	0,37%
Tunnel 2A (ohne Lang-Lkw-Anteil)	0,0416	0,1824	0,0467	0,2707
Tunnel 2E (10 % Lang-Lkw am SV mit Subst.)	0,0442	0,1938	0,0463	0,2843
Differenzen	6,21%	6,21%	-0,75%	5,01%
Tunnel 2B (1 % Lang-Lkw am SV)	0,0420	0,1842	0,0467	0,2729
Tunnel 2D (1 % Lang-Lkw am SV mit Subst.)	0,0418	0,1833	0,0467	0,2717
Differenzen	-0,51%	-0,51%	-0,08%	-0,44%
Tunnel 2C (10 % Lang-Lkw am SV)	0,0456	0,2002	0,0467	0,2925
Tunnel 2E (10 % Lang-Lkw am SV mit Subst.)	0,0442	0,1938	0,0463	0,2843
Differenzen	-3,22%	-3,22%	-0,75%	-2,82%

Tab. 14: Berechnungsfälle Tunnel 2

9.2 Diskussion der Berechnungsfälle

Bei der Interpretation der Ergebnisse ist zu berücksichtigen, dass die Ergebnisse generell auf

konservativen Annahmen basieren (Längsgefälle 3 %, konservative Ausmaßabschätzungen, keine schnelle Detektion usw.), so dass sich entsprechend hohe absolute Risikowerte ergeben. Im Vergleich zu statistischen Daten von Brandereignissen sind die Ergebnisse als zu hoch einzuschätzen. Da in der Untersuchung jedoch die vergleichende Betrachtung des Sicherheitsniveaus im Vordergrund stand, spielt die absolute Höhe der Risiken keine maßgebende Rolle.

Es zeigen sich jedoch gerade bei den hohen Energiefreisetzung von 100 bzw. 150 MW nur geringe Unterschiede hinsichtlich der absoluten Betroffenenzahlen. Bedingt durch die schnelle Rauchausbreitung, ist bereits eine maximale Anzahl an Betroffenen erreicht, so dass die zusätzliche Rauchgasproduktion nur geringe Unterschiede bewirkt. Die Betroffenenzahlen liegen in beiden Fällen hoch, aufgrund der geringen Häufigkeit der Ereignisse ist ihr Anteil am Gesamtrisiko aber nur von untergeordneter Bedeutung.

Maßgeblicher sind die Brandereignisse von Lkw bzw. Lang-Lkw von 30 und 45 MW, da sie den größten Anteil am Schwerverkehr repräsentieren. Die Zunahme der Brandleistung um 50 % bewirkt hier abhängig vom Verkehrs- und Ventilationsszenario deutliche Unterschiede hinsichtlich der Betroffenenzahlen. Diese Differenzen sind maßgeblich für die Veränderung im Sicherheitsniveau.

Der Ansatz der teilweisen Substitution bewirkt aufgrund der Verringerung der Verkehrsbelastungen allgemein eine niedrigere Eintrittshäufigkeit von Unfällen mit und ohne Brand. Im Besonderen die Reduktion des Schwerverkehrsanteils bewirkt die dargestellte Verringerung des Risikos. Das bewertete Risiko mit Lang-Lkw lag aber in allen maßgeblichen Untersuchungsfällen über den Kennzahlen der Untersuchungsfälle ohne Lang-Lkw.

Der Vergleich zwischen den Ventilationssystemen reine Längslüftung (Tunnel 1) und Längslüftung in Kombination mit einer Rauchabsaugung ergibt durchgängig ein höheres Sicherheitsniveau für die zusätzlich installierte Rauchabsaugung über Zwischendecke mit steuerbaren Absaugöffnungen. Betrachtet man nur die Brandrisiken, da die Kollisionen ohne Brand nicht durch die Ventilationssysteme beeinflussbar sind, so ergeben sich zwischen den Tunnelvarianten A bis C Sicherheitsgewinne zwischen 4 % und knapp 10 %.

Berücksichtigt man als sicherheitserhöhende Maßnahme den Einsatz einer Rauchabsaugung bei der Zulassung von Lang-Lkw in Tunneln und nutzt den Tunnel 1A (mechanische Längslüftung

ohne Lang-Lkw-Beteiligung) als Referenz, dann gilt für den Tunnel 2E (Rauchabsaugung über Zwischendecke mit steuerbaren Absaugöffnungen) bei einem Anteil von 10 % am SV und Substitution), dass die Differenz nur noch 1,7 % beträgt. Eine Rauchabsaugung, die für 100 MW ausgelegt wäre, würde die Risikodifferenz vermutlich weiter verringern. Die im Vorfeld festgelegten Parameter für die Tunnel erfordern eine Bemessungsbrandleistung von 50 MW, auf die auch die Lüftung in den Berechnungen ausgelegt wurde (Tab. 7 und Tab. 8).

10 Einfluss auf ADR-Kategorisierung

Derzeit sind keine Lang-Lkw für den Transport von kennzeichnungspflichtigen Gefahrgütern zugelassen. Auch im europäischen Vergleich sind für EuroCombi bislang keine Freigaben für Gefahrguttransporte erteilt worden. Eine Freigabe von Gefahrguttransporten mit Lang-Lkw sollte erst nach eingehenden zusätzlichen detaillierten Betrachtungen erfolgen. Der Fokus des vorliegenden Forschungsberichtes lag in der Bewertung von nicht kennzeichnungspflichtigen Transportgütern, es soll jedoch auch eine kurze Einschätzung zum Transport von Gefahrgütern mit Lang-Lkw getroffen werden.

Die Auswirkungen von Ereignisfällen im Rahmen von Gefahrguttransporten hängen maßgeblich von den Eigenschaften der freigesetzten Stoffe ab. Es werden bei quantitativen Gefahrgutanalysen stellvertretend für die Gesamtheit aller hinsichtlich Personenschäden relevanten Gefahrgüter die vier Leitstoffe Benzin, Propan, Chlor und Trinitrotoluol (TNT) untersucht. Für die Abschätzung der Risiken infolge Gefahrguttransporte wurde ein mehrstufiges Verfahren im Rahmen eines Forschungsprojektes entwickelt.²⁶

Die vier Leitstoffe decken die Stoffe der Gefahrgutklasse 1, 2 und 3 ab. Zum einen entfallen rund 90 % aller transportierten Gefahrgüter in Deutschland auf diese drei Gefahrgutklassen. Zum anderen ist das Gefahrenpotential dieser Stoffe für Personen im Vergleich zu den anderen Gefahrgutklassen überdurchschnittlich hoch. Deshalb ist im Rahmen der ADR-Kategorisierung die Risikoanalyse im Bereich der Personenschäden auf diese Gefahrgutklassen beschränkt.

In Tab. 15 sind die Leitstoffe mit ihren Freisetzung und der damit einhergehenden Tunnelkategorie aufgeführt. Daraus wird ersichtlich, dass für die Leitstoffe jeweils unterschiedliche Freisetzungsmengen und -raten festgelegt wurden. Da das maximale zulässige Gesamtgewicht für Lang-Lkw dem von konventionellen Lkw entspricht, ergeben sich daraus zunächst keine Anpassungsnotwendigkeiten.

Neben den Ladungen sind für Gefahrgutfreisetzungen aber auch weitere Faktoren für die Ermittlung des Risikos wesentlich, wie z.B. die Unfallraten. Dazu existieren bislang für Deutschland für Lang-Lkw keine Erkenntnisse. Eine Fortschreibung des Verfahrens zur Kategorisierung von Straßentunnel sollte daher den Einfluss von Gefahrguttransporten mit Lang-Lkw berücksichtigen, sofern der Transport von kennzeichnungspflichtigen Gefahrgütern generell auch für Lang-Lkw zugelassen wird.

Leitstoff	Szenario-Nr.	Freisetzung-			Tunnelkategorie gemäß ADR
		art	menge	rate	
[-]	[-]	[-]	[t]	[kg/s]	[-]
Benzin	1	spontan / kontinuierlich	15	300 / 20,6	D
	2	spontan / kontinuierlich	8	300 / 20,6	E
Propan	3	spontan / kontinuierlich	12	400 / 30	B
	4	spontan / kontinuierlich	1	400 / 30	D
Chlor	5	spontan / kontinuierlich	4	400 / 45	C
	6	spontan / kontinuierlich	0,05	400 / 45	E
TNT	7	spontan / kontinuierlich	1	--	B
	8	spontan / kontinuierlich	0,1	--	C

Tab. 15: Übersicht der Leitstoffszenarien bei Gefahrguttransporten

11 Zusammenfassung und Empfehlungen

Für den derzeitigen Umfang an Lang-Lkw im Feldversuch ist von keiner signifikanten Erhöhung der Risiken für Tunnelnutzer auszugehen. Dafür sind die tatsächlich derzeit in Deutschland genutzten Lang-Lkw zu selten vertreten. Ihr Anteil am Gesamtschwerverkehr ist verschwindend gering. Für detaillierte Aussagen müssten betroffene Tunnel gesondert unter Berücksichtigung ihrer sicherheitstechnischen Ausstattung und weiteren Tunnelparametern untersucht werden. Eine Notwendigkeit dazu wird beim derzeitigen Umfang des Feldversuches aber nicht gesehen.

Für eine Abschätzung der Auswirkungen von Lang-Lkw auf Tunnel im Allgemeinen wurden daher höhere Lang-Lkw-Anteile betrachtet. Es ist davon auszugehen, dass aufgrund der angesetz-

²⁶ Baltzer, W. ; Riepe, W. ; Zimmermann, U. ; Zulauf, C. ; Imhof, D. ; Mayer, G.: Verfahren zur Kategorisierung von Straßentunneln gemäß ADR 2007 (FE 03.437/2007/FGB)

ten konservativen Berechnungsparameter bei einem relevanten Anteil von Lang-Lkw am Schwerverkehr das Tunnelrisiko erhöht wird. Für die betrachteten Anteile von 1 % und 10 % liegen sie allerdings in Bereichen, die in der Regel mit kompensatorischen Maßnahmen ausgeglichen werden könnten.

Maßgeblich für die Sicherheitsbewertung von Lang-Lkw sind deren Anteile am Gesamtschwerverkehrsaufkommen, und die Frage, inwieweit eine Substitution von konventionellen Lkw durch Lang-Lkw möglich ist. Die Abschätzungen wurden hierbei sehr konservativ vorgenommen und positiv wirkende Aspekte wie der höhere Sicherheitsstandard von Lang-Lkw nicht berücksichtigt. Auch weitere sicherheitserhöhende Maßnahmen im Rahmen der Tunnelausstattung wurden nicht näher betrachtet. So könnten beispielsweise verkürzte Notausgangsabstände oder frühzeitigere Detektion von Brandereignissen das Sicherheitsniveau günstig beeinflussen. Dies gilt in gleichem Maß für das Szenario ohne Lkw.

Die vorgeschlagene Methodik zur Berücksichtigung von Lang-Lkw stellt eine Erweiterung des bekannten Vorgehens zur quantitativen Sicherheitsbewertung von Straßentunneln dar. Das grundsätzliche Vorgehen entspricht weitestgehend den Festlegungen der „Sicherheitsbewertung von Straßentunneln“, die von der BASt 2009 als Heft B 66 veröffentlicht wurden. Der Ansatz des Relativvergleichs zwischen Referenz- und Untersuchungsfällen wird dabei weiterhin verfolgt und um Brandleistungen für Lang-Lkw ergänzt.

Das Höchstmaß hinsichtlich der Bemessungsbrandleistung ist bislang auf 100 MW begrenzt. Eigene Untersuchungen und Auswertungen von vorhandenen Brandversuchen zeigen allerdings, dass Brandereignisse in Tunnel durchaus größere Brandleistungen produzieren können. Die zur Bemessung des baulichen Brandschutzes verwendete ZTV-ING-Kurve repräsentiert einen 300 MW-Brand.

Darauf aufbauend werden die Bemessungsbrandleistungen hinsichtlich der Brandentwicklung für Risikoanalysen abgeleitet.

Vergleiche zwischen Ladungen von konventionellen Lkw und Lang-Lkw zeigen, dass sich bei einer Ladungszunahme (Ladevolumen) abhängig von den Randbedingungen auch eine Erhöhung der Brandleistung ergibt.

Die in der Methodik festgelegten Brandleistungen wurden auf Basis von wenigen ausgewählten Ladungsgütern untersucht.

Auf Grundlage der Ladungen der am Feldversuch teilnehmenden Fahrzeuge wurden repräsentative Ladungen aus den Bereichen Lebensmittel, Kleidung und Holzwaren ausgewählt. Des Weiteren wurden umfassende Grundlagen geschaffen, um zukünftig auch weitere Ladungsarten sowie gemischte Ladungen berücksichtigen zu können.

Für allgemein gültige Aussagen über die Brandereignisse im Hinblick auf das damit verbundene Sicherheitsniveau wurde ein konservativer Ansatz gewählt, der eher auf der ungünstigen Seite liegende Verhältnisse hinsichtlich Brandentwicklung und Brandstärke ansetzt.

Für die risikoanalytische Betrachtung von Lang-Lkw in Straßentunneln wird deshalb empfohlen, die maximale Bemessungsbrandleistung auf 150 MW zu erhöhen. Entsprechend wird auch für die weiteren Bemessungsbrandleistungen von Lang-Lkw vorgeschlagen, sie mit einem Faktor zu belegen. Im vorliegenden Forschungsprojekt konnte er aufgrund umfangreicher Berechnungsergebnisse auf 1,5 festgesetzt werden. Damit ergeben sich für Lang-Lkw in Analogie zu den Vorgaben in den RABT weitere Bemessungsbrandleistungen zu 45 und 75 MW. Unter dieser Voraussetzung führen Lang-Lkw zu erhöhten Risiken im Vergleich zu konventionellen Lkw.

Über einen Abgleich der Erkenntnisse zwischen den weiteren laufenden Forschungsvorhaben im Rahmen des Feldversuchs sollten die bisherigen Ansätze verifiziert und ggf. angepasst werden. Die durchgeführte Grundlagenstudie legt z.B. hinsichtlich der Unfallauswertungen in anderen europäischen Ländern nahe, dass der Einsatz von EuroCombi bzw. Lang-Lkw zu keinen erhöhten Unfallzahlen führt. Dieser Ansatz wurde auch in der Untersuchung verfolgt; er sollte aber auch für das deutsche Straßennetz anhand von Unfallstatistiken verifiziert werden.

12 Literatur

- Anforderungen des Brand- und Katastrophenschutzes an den Bau und den Betrieb von Eisenbahntunneln des Eisenbahnbundesamtes (EBA-Kurve)
- ARVIDSON, M. (2005): Potato Crisps and Cheese Nibbles Burn Fiercely, Brandposten [SP] Nr. 32, S. 10-11
- BALTZER, W., KÜNDIG, P., LOCHER, P., MAYER, G., RIEPE, W., STEINAUER, B., ZIMMERMANN, U., ZULAUF, CH. (2009): Bewertung der Sicherheit von Straßentunneln, Be-

- richte der Bundesanstalt für Straßenwesen, Heft B66, (ISBN 978-3-86509-909-9)
- BALTZER, W.; RIEPE, W.; ZIMMERMANN, U.; ZULAUF, C.; IMHOF, D.; MAYER, G.: Verfahren zur Kategorisierung von Straßentunneln gemäß ADR 2007 (FE 03.437/2007/FGB)
- BUNDESMINISTERIUM FÜR VERKEHR, BAU UND STADTENTWICKLUNG (BMVBS): Verordnung über Ausnahmen von straßenverkehrsrechtlichen Vorschriften für Fahrzeuge und Fahrzeugkombinationen mit Überlänge, 19. Dezember 2011
- BUNDESMINISTERIUM FÜR VERKEHR, BAU UND STADTENTWICKLUNG (BMVBS); Beratergruppe Verkehr + Umwelt GmbH; Intraplan Consult GmbH (Hrsg.) (2007): Prognose der deutschlandweiten Verkehrsverflechtungen 2025, (FE-Nr. 96.0857/2005)
- Beleidsregel keuring en ontheffingverlening LZV (langere en zwaardere vrachtauto) (Verordnung über die allgemeine Zulassung von Lang-Lkw auf Straßen), STAATSCOURANT Nr. 26634, (21.12.2012)
- BERNDTSSON, A., LUNDQVIST, A. (2007): Report on 60-t vehicles, CEDR, Oktober 2007
- BUNDESANSTALT FÜR STRASSENWESEN (2009): Sicherheitsbewertung von Straßentunneln, Heft B66, DIN 4102-2: Brandverhalten von Baustoffen und Bauteilen; Teil1: Bauteile, Begriffe, Anforderungen und Prüfungen (Einheits-Temperatur-Zeit-Kurve, ETK-Kurve)
- DIN 4102-2: Brandverhalten von Baustoffen und Bauteilen; Teil1: Bauteile, Begriffe, Anforderungen und Prüfungen (Einheits-Temperatur-Zeit-Kurve, ETK-Kurve)
- DIN EN 1991-1-2 für Hydrocarbon-Brände (HC-Kurve, HCinc-Kurve)
- Forschungsgesellschaft für das Straßen- und Verkehrswesen (Hrsg.) (2006): Richtlinien für die Ausstattung und den Betrieb von Straßentunneln (RABT), FGSV Verlag, 2006
- ISO 834-1: Feuerwiderstandsprüfungen - Bauteile - Teil 1: Allgemeine Anforderungen (ISO-Kurve)
- KRASNER, L. M. (1968): Burning Characteristics of Wooden Pallets as Test Fuel, Serial 16437, Factory Mutual Research Corp., Norwood, MA
- LIPPOLD, CH., SCHEMMEL A. (2013): Befahrbarkeit spezieller Verkehrsanlagen auf Autobahnen mit Lang-Lkw, BMVBS
- MAYER, G. (2006): Brände in Straßentunneln: Abschätzung der Selbstrettungsmöglichkeiten der Tunnelnutzer mittels numerischer Rauchausbreitungssimulation, Aachener Mitteilungen Straßenwesen, Erd- und Tunnelbau, Heft 47
- National Institute of Standards and Technology (NIST): Fire Dynamics Simulator (FDS), Version 5.5.3a
- Rijkswaterstaat (RWS-Kurve, RWSmod.-Kurve)
- Rijkswaterstaat - Dienst verkeer en scheepvaart (2010): Längere und schwerere Lastkraftwagen (LZVs) in den Niederlanden, Einblicke und Erfahrungen im Zeitraum 1995-2010, März 2010
- STROUP, D.W., DELAUTER, L., LEE, J. AND ROADARMEL, G. (2001): Fire Tests of Men's Suits on Racks, FR 4013, National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, MD
- SUNDSTROM, B. (Hrsg.) (1995): Fire Safety of Upholstered Furniture - The Final Report on the CBUF Research Programme, Report EUR 16477 EN, Directorate-General Science, Research and Development (Measurements and Testing), European Commission, Interscience Communications Ltd, London
- The Danish Road Directorate (2011): Evaluation of trial with European Modular System, Dezember 2011
- WANGRIN, G., STÜRMER, B., WÖHRMANN M. (2009): Technische Erprobung von Fahrzeugkombinationen mit einer Gesamtlänge bis 25,25 m, Ministerium für Bauen und Verkehr des Landes Nordrhein-Westfalen
- Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen und Richtlinien für Ingenieurbauten (ZTV-ING), Teil 5, Tunnelbau (ZTV-Ing – Kurve)
- http://www.bast.de/cln_031/nn_42244/DE/Aufgabe_n/abteilung-v/referat-v1/lang-lkw/lang-lkw-kombinationen.html

Schriftenreihe

Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen

Unterreihe „Brücken- und Ingenieurbau“

2008

B 59: Bandverzinkte Schutzplankenholme
Schröder € 12,50

B 60: Instandhaltung des Korrosionsschutzes durch Teilerneuerung – Bewährung
Schröder € 13,50

B 61: Untersuchung von Korrosion an Fußplatten von Schutzplankenpfosten
Schröder, Staeck € 13,00

B 62: Bewährungsnachweis von Fugenfüllungen ohne Unterfüllstoff
Eilers € 12,00

B 63: Selbstverdichtender Beton (SVB) im Straßentunnelbau
Heunisch, Hoepfner, Pierson (†), Dehn, Orgass, Sint
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann kostenpflichtig unter www.nw-verlag.de heruntergeladen werden. € 17,50

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

2009

B 65: Zerstörungsfreie Untersuchungen am Brückenbauwerk A1 Hagen/Schwerte
Friese, Taffe, Wöstmann, Zoega
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann kostenpflichtig unter www.nw-verlag.de heruntergeladen werden. € 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 Straßentunneln
Blosfeld € 17,50

B 68: Auswirkungen des Schwerlastverkehrs auf die Brücken der Bundesfernstraßen – Teile 1-4
Kaschner, Buschmeyer, Schnellenbach-Held, Lubasch, Grünberg, Hansen, Liebig, Geißler
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann kostenpflichtig unter www.nw-verlag.de heruntergeladen werden. € 29,50

B 69: Berücksichtigung der Belange behinderter Personen bei Ausstattung und Betrieb von Straßentunneln
Wagener, Grossmann, Hintzke, Sieger € 18,50

B 70: Frost-Tausalz-Widerstand von Beton in Brücken und Ingenieurbauwerken an Bundesfernstraßen
Tauscher € 14,50

2010

B 71: Empfehlungen für geschweißte KK-Knoten im Straßenbrückenbau
Kuhlmann, Euler € 22,50

B 72: Untersuchungen zur Dauerhaftigkeit von permanenten Anti-Graffiti-Systemen
Weschpennig, Kropf, von Witzhausen € 13,50

B 73: Brand- und Abplatzverhalten von Faserbeton in Straßentunneln

Dehn, Nause, Juknat, Orgass, König
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann kostenpflichtig unter www.nw-verlag.de heruntergeladen werden. € 21,00

B 74: Verwendung von Anti-Graffiti-Systemen auf Mauerwerk
Müller € 14,00

B 75: Sachstand Verstärkungsverfahren – Verstärken von Betonbrücken im Bestand
Schnellenbach-Held, Peeters, Scherbaum € 13,50

2011

B 76: Instandsetzung und Verstärkung von Stahlbrücken unter Berücksichtigung des Belagssystems
Sedlacek, Paschen, Feldmann, Geßler, Möller, Steinauer, Scharnigg € 17,00

B 77: Anpassung von DIN-Fachberichten „Brücken“ an Eurocodes
Teil 1: DIN-FB 101 „Einwirkung auf Brücken“
Teil 2: DIN-FB 102 „Betonbrücken“
Teil 3: DIN-FB 103 „Stahlbrücken“
Teil 4: DIN-FB 104 „Verbundbrücken“
Freundt, Böning, Maurer, Arnold, Gedwien, Müller, Schrick, Tappe, Kuhlmann, Rasche, Froschmeier, Euler, Hanswille, Brauer, Bergmann
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann kostenpflichtig unter www.nw-verlag.de heruntergeladen werden. € 29,50

B 78: Bemessung von Wellstahlbauwerken – Vergleich nach den bisherigen und den neuen Richtlinien
Kuhlmann, Günther, Krauss
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann kostenpflichtig unter www.nw-verlag.de heruntergeladen werden. € 18,50

B 79: Untersuchungen zur Querkraftbemessung von Spannbetonbalken mit girlandenförmiger Spanngliedführung
Maurer, Kiziltan, Zilch, Dunkelberg, Fitik
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann kostenpflichtig unter www.nw-verlag.de heruntergeladen werden. € 15,50

B 80: Lautsprecheranlagen und akustische Signalisierung in Straßentunneln
Mayer, Reimann, Löwer, Brettschneider, Los € 16,00

B 81: Quantifizierung der Lebensdauer von Betonbrücken mit den Methoden der Systemanalyse
Müller, Vogel, Neumann € 14,50

B 82: Verkehrslastmodelle für die Nachrechnung von Straßenbrücken im Bestand
Freundt, Böning € 16,00

B 83: Konzeption zur Nachrechnung bestehender Straßenbrücken
Maurer, Kolodziejczyk, Zilch, Dunkelberg € 16,00

B 84: Prüfung des Frost-Tausalz-Widerstandes von Beton mit dem modifizierten CDF-Verfahren (XF2)
Gehlen, Lowke, Milachowski € 15,00

B 85: Entwicklung von Verfahren einer zuverlässigkeitsbasierten Bauwerksprüfung
Zilch, Straub, Dier, Fischer € 19,50

B 86: Untersuchungen an Bauwerken aus hochfesten Beton
Nguyen, Freitag € 13,50

2012

B 87: Vermeidung von Glättebildung auf Brücken durch die Nutzung von Geothermie
Feldmann, Döring, Hellberg, Kuhnhenne, Pak, Mangerig, Beucher, Hess, Steinauer, Kemper, Scharnigg € 17,00

Schriftenreihe

Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen

Unterreihe „Brücken- und Ingenieurbau“

2008

- B 59: Bandverzinkte Schutzplankenholme
Schröder € 12,50
- B 60: Instandhaltung des Korrosionsschutzes durch Teilerneuerung – Bewährung
Schröder € 13,50
- B 61: Untersuchung von Korrosion an Fußplatten von Schutzplankenpfosten
Schröder, Staeck € 13,00
- B 62: Bewährungsnachweis von Fugenfüllungen ohne Unterfüllstoff
Eilers € 12,00
- B 63: Selbstverdichtender Beton (SVB) im Straßentunnelbau
Heunisch, Hoepfner, Pierson (†), Dehn, Orgass, Sint
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann kostenpflichtig unter www.nw-verlag.de heruntergeladen werden. € 17,50
- B 64: Tiefenabhängige Feuchte- und Temperaturmessung an einer Brückenkappe der Expositionsklasse XF4
Bramshuber, Spörel, Warkus € 12,50

2009

- B 65: Zerstörungsfreie Untersuchungen am Brückenbauwerk A1 Hagen/Schwerte
Friese, Taffe, Wöstmann, Zoega
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann kostenpflichtig unter www.nw-verlag.de heruntergeladen werden. € 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 Straßentunneln
Blosfeld € 17,50
- B 68: Auswirkungen des Schwerlastverkehrs auf die Brücken der Bundesfernstraßen – Teile 1-4
Kaschner, Buschmeyer, Schnellenbach-Held, Lubasch, Grünberg, Hansen, Liebig, Geißler
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann kostenpflichtig unter www.nw-verlag.de heruntergeladen werden. € 29,50
- B 69: Berücksichtigung der Belange behinderter Personen bei Ausstattung und Betrieb von Straßentunneln
Wagener, Grossmann, Hintzke, Sieger € 18,50
- B 70: Frost-Tausalz-Widerstand von Beton in Brücken und Ingenieurbauwerken an Bundesfernstraßen
Tauscher € 14,50

2010

- B 71: Empfehlungen für geschweißte KK-Knoten im Straßenbrückenbau
Kuhlmann, Euler € 22,50
- B 72: Untersuchungen zur Dauerhaftigkeit von permanenten Anti-Graffiti-Systemen
Weschpennig, Kropf, von Witzenhausen € 13,50

B 73: Brand- und Abplatzverhalten von Faserbeton in Straßentunneln
Dehn, Nause, Juknat, Orgass, König
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann kostenpflichtig unter www.nw-verlag.de heruntergeladen werden. € 21,00

B 74: Verwendung von Anti-Graffiti-Systemen auf Mauerwerk
Müller € 14,00

B 75: Sachstand Verstärkungsverfahren – Verstärken von Betonbrücken im Bestand
Schnellenbach-Held, Peeters, Scherbaum € 13,50

2011

B 76: Instandsetzung und Verstärkung von Stahlbrücken unter Berücksichtigung des Belagssystems
Sedlacek, Paschen, Feldmann, Geßler, Möller, Steinauer, Scharnigg € 17,00

B 77: Anpassung von DIN-Fachberichten „Brücken“ an Eurocodes
Teil 1: DIN-FB 101 „Einwirkung auf Brücken“
Teil 2: DIN-FB 102 „Betonbrücken“
Teil 3: DIN-FB 103 „Stahlbrücken“
Teil 4: DIN-FB 104 „Verbundbrücken“
Freundt, Böning, Maurer, Arnold, Gedwien, Müller, Schrick, Tappe, Kuhlmann, Rasche, Froschmeier, Euler, Hanswille, Brauer, Bergmann
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann kostenpflichtig unter www.nw-verlag.de heruntergeladen werden. € 29,50

B 78: Bemessung von Wellstahlbauwerken – Vergleich nach den bisherigen und den neuen Richtlinien
Kuhlmann, Günther, Krauss
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann kostenpflichtig unter www.nw-verlag.de heruntergeladen werden. € 18,50

B 79: Untersuchungen zur Querkraftbemessung von Spannbetonbalken mit girlandenförmiger Spannliedführung
Maurer, Kiziltan, Zilch, Dunkelberg, Fitik
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann kostenpflichtig unter www.nw-verlag.de heruntergeladen werden. € 15,50

B 80: Lautsprecheranlagen und akustische Signalisierung in Straßentunneln
Mayer, Reimann, Löwer, Brettschneider, Los € 16,00

B 81: Quantifizierung der Lebensdauer von Betonbrücken mit den Methoden der Systemanalyse
Müller, Vogel, Neumann € 14,50

B 82: Verkehrslastmodelle für die Nachrechnung von Straßenbrücken im Bestand
Freundt, Böning € 16,00

B 83: Konzeption zur Nachrechnung bestehender Straßenbrücken
Maurer, Kolodziejczyk, Zilch, Dunkelberg € 16,00

B 84: Prüfung des Frost-Tausalz-Widerstandes von Beton mit dem modifizierten CDF-Verfahren (XF2)
Gehlen, Lowke, Milachowski € 15,00

B 85: Entwicklung von Verfahren einer zuverlässigkeitsbasierten Bauwerksprüfung
Zilch, Straub, Dier, Fischer € 19,50

B 86: Untersuchungen an Bauwerken aus hochfesten Beton
Nguyen, Freitag € 13,50

2012

B 87: Vermeidung von Glättebildung auf Brücken durch die Nutzung von Geothermie
Feldmann, Döring, Hellberg, Kuhnhenne, Pak, Mangerig, Beucher, Hess, Steinauer, Kemper, Scharnigg € 17,00

B 88: Anpralllasten an Schutzeinrichtungen auf Brücken – Anpassung der DIN-Fachberichte „Stahlbrücken“ und „Verbundbrücken“ an endgültige Eurocodes und nationale Anhänge einschließlich Vergleichsrechnungen
Kuhlmann, Zizza, Günther € 15,50

B 89: Nachrechnung von Betonbrücken zur Bewertung der Tragfähigkeit bestehender Bauwerke
Maurer, Heeke, Kiziltan, Kolodziejczyk, Zilch, Dunkelberg, Fitik € 19,50

B 90: Fugenbewegung an der Ruhrtalbrücke Mintard
Eilers, Quaas, Staeck € 14,00

2013

B 91: Priorisierung und Nachrechnung von Brücken im Bereich der Bundesfernstraßen – Einfluss der Einwirkungen aus Verkehr unter besonderer Berücksichtigung von Restnutzungsdauer und Verkehrsentwicklung
Freundt, Böning € 15,00

B 92: Kriterien für die Anwendung von unbewehrten Innenschalen für Straßentunnel
Kaundinya € 14,00

B 93: Querkrafttragfähigkeit von Fahrbahnplatten – Anpassung des DIN-Fachberichtes „Betonbrücken“ an die endgültige Eurocodes und nationale Anhänge einschließlich Vergleichsrechnungen
Hegger, Reiß € 17,50

B 94: Baulicher Brandschutz für Tunnel in offener Bauweise – Rechnerischer Nachweis
Peter, Knief, Schreyer, Piazzola
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

B 95: Erfahrungen mit selbstverdichtendem und hochfestem Beton im Brücken- und Ingenieurbau an Bundesfernstraßen
Tauscher € 17,00

B 96: Geothermischen Anlagen bei Grund- und Tunnelbauwerken
Adam € 17,00

B 97: Einfluss der veränderten Verkehrsführung bei Ertüchtigungsmaßnahmen auf die Bauwerksbeanspruchungen
Freundt, Böning € 15,00

2014

B 98: Brückenseile – Gegenüberstellung von vollverschlossenen Seilen und Litzenbündelseilen
Friedrich
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

B 99: Intelligente Brücke – Zuverlässigkeitsbasierte Bewertung von Brückenbauwerken unter Berücksichtigung von Inspektions- und Überwachungsergebnissen
Fischer, Schneider, Thöns, Rücker, Straub
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

B 100: Roadtraffic Management System (RTMS)
Freundt, Vogt, Böning, Pierson, Ehrle € 15,00

B 101: Adaptive Spannbetonstruktur mit lernfähigem Fuzzy-Regelungssystem
Schnellenbach-Held, Fakhouri, Steiner, Kühn € 18,50

B 102: Adaptive „Tube-in-Tube“-Brücken
Empelmann, Busse, Hamm, Zedler, Girmscheid € 18,00

B 103: Umsetzung des Eurocode 7 bei der Bemessung von Grund- und Tunnelbauwerken
Briebrecher, Städing € 14,00

B 104: Intelligente Brücke – Konzeption eines modular aufgebauten Brückenmodells und Systemanalyse
Borrmann, Fischer, Dori, Wild
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

B 105: Intelligente Brücke – Machbarkeitsstudie für ein System zur Informationsbereitstellung und ganzheitlichen Bewertung in Echtzeit für Brückenbauwerke
Schnellenbach-Held, Karczewski, Kühn
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

B 106: Einsatz von Monitoringsystemen zur Bewertung des Schädigungszustands von Brückenbauwerken
Freundt, Vogt, Böning, Michael, Könke, Beinersdorf € 17,00

B 107: Materialeigenschaften von Kunststoffdichtungsbahnen bestehender Straßentunnel
Robertson, Bronstein, Brummermann € 16,00

B 108: Fahrzeug-Rückhaltesysteme auf Brücken
Neumann, Rauert € 18,50

B 109: Querkrafttragfähigkeit bestehender Spannbetonbrücken
Hegger, Herbrand € 17,00

B 110: Intelligente Brücke – Schädigungsrelevante Einwirkungen und Schädigungspotenziale von Brückenbauwerken aus Beton
Schnellenbach-Held, Peeters, Miedzinski
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

B 111: Erarbeitung von Modellen zur Bestimmung der Schadensumfangsentwicklung an Brücken
Müller € 15,00

2015

B 112: Nachhaltigkeitsberechnung von feuerverzinkten Stahlbrücken
Kuhlmann, Maier, Ummenhofer, Zinke, Fischer, Schneider € 14,00

B 113: Versagen eines Einzelelementes bei Stützkonstruktionen aus Gabionen
Placzek, Pohl
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

B 114: Auswirkungen von Lang-Lkw auf die sicherheitstechnische Ausstattung und den Brandschutz von Straßentunneln
Mayer, Brennberger, Großmann
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

B 115: Auswirkungen von Lang-Lkw auf die sicherheitstechnische Ausstattung und den Brandschutz von Straßentunneln
Mayer, Brennberger, Großmann
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

Alle Berichte sind zu beziehen im:

Carl Schünemann Verlag GmbH
Zweite Schlachtpforte 7
28195 Bremen
Tel. (0421) 3 69 03-53
Fax (0421) 3 69 03-48
www.schuenemann-verlag.de

Dort ist auch ein Kompletverzeichnis erhältlich.