

Entwurfstechnische Empfehlungen für Autobahntunnelstrecken

Berichte der
Bundesanstalt für Straßenwesen

Verkehrstechnik Heft V 265

bast

Entwurfstechnische Empfehlungen für Autobahntunnelstrecken

von

Andreas Bark
René Kutschera
Katerina Resnikow

Technische Hochschule Mittelhessen
Fachgebiet Straßenwesen und Vermessung
Gießen

Michael M. Baier
Wolfgang Schuckließ

BSV Büro für Stadt und Verkehrsplanung
Dr. Ing. Reinhold Baier GmbH
Aachen

**Berichte der
Bundesanstalt für Straßenwesen**

Verkehrstechnik Heft V 265

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 02.0333/2011/EGB
Entwurfstechnische Empfehlungen
für Autobahntunnelstrecken

Fachbetreuung
Thomas Jährig
Marco Irzik

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 0943-9331
ISBN 978-3-95606-210-0

Bergisch Gladbach, September 2015

Kurzfassung - Abstract

Entwurfstechnische Empfehlungen für Autobahntunnelstrecken

Der Entwurf und der Betrieb von Tunneln im Zuge von Bundesautobahnen sind in den Richtlinien für die Anlage von Autobahnen (RAA 2008) und in den Richtlinien für die Ausstattung und den Betrieb von Straßentunneln (RABT 2006) geregelt. Hier sind die Hinweise zu der Wahl des Tunnelquerschnittes und zu den anzusetzenden Trassierungsgrenzwerten sowie die Anforderungen hinsichtlich Sicherheit und Betriebsabläufen enthalten. Zielsetzung des Forschungsvorhabens war es daher, die Tunnelbauwerke bezüglich ihrer Verkehrssicherheit zu untersuchen.

Auf Grundlage der vorhandenen Informationen zur Trassierung wurden die Tunnelbauwerke gemäß ihrer Besonderheiten typisiert. Die Typisierung der 41 untersuchten Tunnel wurde anhand der Merkmale Fahrstreifenanzahl, dem Vorhandensein von Seitenstreifen und Ein- und Ausfahrten in Tunneln sowie der Höhe der zulässigen Höchstgeschwindigkeit vorgenommen.

Im nächsten Arbeitsschritt wurde eine makroskopische Unfallanalyse durchgeführt. Für die Analyse wurden die Verkehrsunfallanzeigen bzw. vergleichbare Unfalldaten aus Lieferungen der Polizeidienststellen herangezogen. Darauf aufbauend wurden Unfallkenngrößen der einzelnen Tunnelröhren ermittelt. Das Tunnelkollektiv umfasste Tunnelstrecken sowohl mit als auch ohne Anschlussstellen. In der makroskopischen Unfallanalyse wurden die ermittelten Unfallkenngrößen der Tunnelteilkollektive gegenübergestellt sowie mit denen der Außenstrecken verglichen. Die Bewertung des Unfallgeschehens in Tunneln führte zu der Erkenntnis, dass eine Anordnung von Seitenstreifen zur Senkung der Unfallrate und der mittleren Unfallkostenrate bei 2-streifigen Tunnelquerschnitten beitragen kann.

In der anschließenden mikroskopischen Unfallanalyse wurden die Anschlussstellen innerhalb der Tunnelbauwerke untersucht. Hierbei wurden vor allem die Unfallmerkmale wie Unfallursachen und Unfallumstände näher betrachtet. Die Betrachtung der Lage von Ein- und Ausfahrten in Tunneln hat ergeben, dass diese keine eindeutige Auswirkung auf das Unfallgeschehen hat. Infolge der Ein- und Ausfahrtvorgänge treten jedoch vermehrt Unfälle in diesen Bereichen auf. Somit sind die Ein- und Ausfahrten in Tunneln nach Möglichkeit zu vermeiden.

Darüber hinaus wurde eine Analyse zum Verkehrsablauf in Tunneln durchgeführt. Im Rahmen dieser Analyse erfolgten für ausgewählte Tunnel die Modellierung von q-V-Beziehungen und die Ermittlung von Kapazitätswerten.

Technical design recommendations for motorway tunnels

The design and the operation of tunnels for Federal motorways are regulated in the guidelines for both the Design of Motorways (RAA 2008) and for Equipment and Operation of Road Tunnels (RABT 2006). Included in this outline are the references for the choice of the tunnel cross-sections and for the values of the route survey, as well as the requirements for safety and operational procedures. The aim of this research project was to investigate the tunnel buildings with regard to their road safety.

Based on the existing information about the route survey, the tunnel structures were categorized according to their specific features. The categorization of the 41 tunnels investigated was carried out in terms of the following features: number of lanes, the existence of shoulders, entries and exits in tunnels as well as the maximum speed limit allowed.

In the next phase, a macroscopic accident analysis was carried out. For this analysis, a few road accident reports which were supplied by police stations were examined. Based on this, the accident parameters of the individual tunnel tubes were investigated. The tunnels investigated included ones with and without junctions. In the macroscopic accident analysis, the accident parameters of all the tunnels investigated were contrasted and compared with those of the outer lanes. Due to the evaluation of the accidents in the tunnels, it was determined that the layout of the shoulders would lead to a reduction of the rate and average cost of accidents.

Following this a microscopic accident analysis was completed and the junctions within the tunnel structures were investigated. The analysis of the accident occurrences was carried out separately for each tunnel. Primarily, the characteristics of accidents such as the causes and circumstances of an accident were looked at more closely. Observation of the positions of the entries and exits showed that they have no definite effect on the possibility of an accident occurring; however, as a result of entering or exiting a motorway, a lot of

accidents still occur. Therefore, the entrances and exits in tunnels should be avoided when possible.

Furthermore, an analysis on the flow of traffic in tunnels was carried out. Due to the analysis car-

ried out, the model from speed-flow-relationships (q-V-relations) was selected for the chosen tunnels and for determining their capacity.

Inhalt

1 Ausgangslage und Zielsetzung	7	6.2.4 Berechnung der Unfallkenngrößen	42
2 Vorgehensweise	7	6.2.5 Berechnung der Sichtweiten	50
3 Grundlagenanalyse	8	6.2.6 Zusammenfassung der makroskopischen Unfallanalyse	50
3.1 Stand der Forschung	8	6.3 Mikroskopische Unfallanalyse	52
3.1.1 Verkehrssicherheit von Tunnelstrecken	9	6.3.1 Auswahl der Tunnel	52
3.1.2 Verkehrssicherheit von Außenstrecken sowie Ein- und Ausfahrten	18	6.3.2 Beschreibung des Unfallgeschehens	53
3.2 Stand des technischen Regelwerks	21	6.3.3 Zusammenfassung der mikroskopischen Analyse	60
3.2.1 Entwurf von Straßentunneln in Deutschland	21	7 Verkehrsablaufanalyse	61
3.2.2 Entwurf von Straßentunneln in Österreich	22	7.1 Tunnelkollektiv	61
3.2.3 Entwurf von Straßentunneln in der Schweiz	24	7.2 Datengrundlage, -aufbereitung und -plausibilisierung	62
3.2.4 Verkehrstechnische Bemessung von Straßentunneln	26	7.3 Modellierung der q-V-Beziehungen	63
3.2.5 Zusammenfassung der Ergebnisse und Präzisierung der zu behandelnden Forschungsfragen	28	7.3.1 Methodik	63
4 Tunnel im Bundesautobahnnetz	30	7.3.2 Ergebnisse	64
4.1 Erfassung von Tunneldaten	30	7.4 Ermittlung der Kapazität auf Basis der q-V-Beziehungen	72
4.2 Auswertung der Ereignismeldebögen	30	7.4.1 Methodik	72
4.2.1 Grunddaten	30	7.4.2 Ergebnisse	72
4.2.2 Ereignisse zum Unfallgeschehen	32	7.5 Ermittlung der stochastischen Kapazität	73
4.3 Festlegungen zu Ereignismeldebögen	32	7.6 Ableitung von Kapazitäten und q-V-Beziehungen für das HBS	74
4.4 Auswertung Datenlieferung	32	8 Entwurfstechnische Empfehlungen	76
4.5 Auswertung vorhandene ZEB-Bilddaten	33	9 Zusammenfassung und Ausblick	78
5 Tunnelkollektiv	36	Literatur	81
5.1 Besonderheiten im Kollektiv	36	Anlagen	
5.2 Typisierung vorhandener Tunnel	36		
5.2.1 Tunnelteilkollektive	36		
5.2.2 Tunnel mit Ein- und Ausfahrtbereichen im Tunnel	37		
5.2.3 Tunnel mit Ein- und Ausfahrtbereichen im unmittelbaren Umfeld	39		
6 Unfallanalyse	40		
6.1 Projektdatenbank	40		
6.2 Makroskopische Unfallanalyse	40		
6.2.1 Erläuterung zum Unfallkollektiv	40		
6.2.2 Unfallstruktur	41		
6.2.3 Unfallcharakteristik	42		

Die Anlagen zum Bericht sind im elektronischen BASTArchiv ELBA unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de> abrufbar.

1 Ausgangslage und Zielsetzung

Der Anteil von Tunnelstrecken in Deutschland an der Gesamtlänge aller Bundesautobahnen ist mit rund 70 km vergleichsweise gering, dennoch werden immer häufiger Verkehrsführungen in Tunneln erforderlich. Als Gründe hierfür sind neben den topographischen Zwängen und der räumlichen Beengtheit von Siedlungsräumen auch die zunehmenden Anforderungen an den Schutz von Umwelt und Natur zu nennen.

Der Entwurf und der Betrieb von Tunneln im Zuge von Bundesautobahnen sind in den „Richtlinien für die Anlage von Autobahnen“ (RAA 2008) und in den „Richtlinien für die Ausstattung und den Betrieb von Straßentunneln“ (RABT 2006) geregelt. Weitere Hinweise bezüglich der wegweisenden Beschilderung finden sich in den RWBA (2000).

Für die Wahl des Tunnelquerschnitts wird in den RAA (2008) auf das „Verfahren für die Auswahl von Straßenquerschnitten in Tunneln“ des ARS Nr. 06/2000 verwiesen. Dieses beinhaltet auch einen Nachweis über die Zweckmäßigkeit von Seitenstreifen. Für die Trassierung von Tunnelstrecken sowie insbesondere für den Entwurf von Ein- und Ausfahrten in Tunneln bzw. im direkten Umfeld von Tunneln finden sich im aktuellen technischen Regelwerk nur vereinzelt gesonderte Grenz- und Richtwerte.

Zur Verkehrssicherheit von Tunnelstrecken existieren einige ältere Untersuchungen, in denen zwar Unfallraten ermittelt, jedoch keine Differenzierung in Tunnelstrecken mit und ohne Seitenstreifen vorgenommen wurde. Die Ergebnisse dieser Untersuchungen wurden von BRILON/LEMKE (2000) zusammenfassend dargestellt. Sie haben darüber hinaus im Rahmen ihrer Untersuchung zu Straßenquerschnitten in Tunneln neben einer Analyse des Verkehrsablaufs bei Normalbetrieb und bei Störfällen auch eigene Verkehrssicherheitsanalysen durchgeführt. BRILON/LEMKE (2000) ermittelten typische Unfallkennwerte (u. a. Unfallraten, Unfallkostenraten) für verschiedene Tunnelquerschnitte. Eine getrennte Ermittlung von Unfallkennwerten für Tunnelstrecken mit und ohne Ein- und Ausfahrten erfolgte nicht. Es konnte aber festgestellt werden, dass es oftmals zu Unfallhäufungen kommt, wenn Anschlussstellen im Tunnel selbst bzw. in deren Nähe vorhanden sind.

Zur verkehrstechnischen Bemessung von Autobahntunnelstrecken außerhalb der Einflussbereiche von Knotenpunkten werden im HBS (2001/2009) Kapazitäten und q-V-Beziehungen für 2- und 3-streifige Richtungsfahrbahnen angegeben. Diese basieren im Wesentlichen auf Simulationsrech-

nungen, die anhand empirischer Daten, u. a. von BRILON/LEMKE (2000), kalibriert wurden. Die einzige Einflussgröße, nach der die angegebenen q-V-Beziehungen bislang unterschieden werden, ist die Fahrstreifenanzahl. Eine weitere Differenzierung wie bei den Außenstrecken unter freiem Himmel nach Lage in Bezug zu Ballungsräumen, Längsneigung, SV-Anteil und Beschränkung der zulässigen Höchstgeschwindigkeit erfolgt nicht.

Bisher ist wenig darüber bekannt, wie in Tunnelstrecken die Trassierungsgrenzwerte im Vergleich zu Außenstrecken großzügiger anzusetzen, Mindestabstände von Knotenpunkten zu vergrößern oder etwa Aus- und Einfahrtbereiche übersichtlicher zu gestalten sind, um dasselbe Sicherheitsniveau wie auf den Außenstrecken zu erhalten. Ziel des Forschungsvorhabens ist es deshalb, zunächst Problembereiche hinsichtlich Verkehrssicherheit und Verkehrsablauf innerhalb von bestehenden Autobahntunneln zu identifizieren. Ausgehend von einer Analyse des Unfallgeschehens soll dabei die Grundlage für eine vergleichende Bewertung der Verkehrssicherheit verschiedener Tunnelquerschnitte mit und ohne Seitenstreifen sowie mit und ohne Anschlussstellen im Tunnel oder in der unmittelbaren Nähe des Tunnels erarbeitet werden. Darüber hinaus soll der Einfluss weiterer Trassierungsparameter innerhalb des Tunnels bzw. im Zuge der Ein- und Ausfahrten untersucht werden.

Die so gewonnenen Erkenntnisse sollen dazu dienen, die grundsätzlichen Unterschiede zwischen Außenstrecken und Tunnelstrecken hinsichtlich Verkehrssicherheit und Verkehrsablauf aufzuzeigen. Zusätzlich sollen trassierungsbezogene Einsatzempfehlungen für Tunnelstrecken und Empfehlungen für die Gestaltung von Ein- und Ausfahrten in Tunneln erarbeitet werden. Neben gestalterischen Maßnahmen sollen dabei auch telematische Lösungsansätze, wie z. B. die Zuflussregelung, mit in Betracht gezogen werden, um die für Maßnahmen zur Verfügung stehenden finanziellen Mittel möglichst effektiv einzusetzen.

2 Vorgehensweise

Die methodische Vorgehensweise und das sich hieraus ergebende Arbeitsprogramm sehen fünf (teilweise parallele) Arbeitsschritte vor:

- Grundlagenanalyse,
- Präzisierung der relevanten Fragestellungen,
- Analyse bereits realisierter Tunnellösungen,
- Herausarbeitung der Unterschiede zwischen Außen- und Tunnelstrecken,

- Erarbeitung von Empfehlungen.

Im Rahmen der Grundlagenanalyse erfolgt eine systematische Auswertung und Aufbereitung vorliegender Erkenntnisse zur Verkehrssicherheit und zum Verkehrsablauf in Autobahntunneln. Darüber hinaus werden Ein- und Ausfahrten in Tunneln und in unmittelbarer Nähe von Tunneln betrachtet. Zum Vergleich erfolgt eine analoge Bewertung der Verkehrssicherheit für Außenstrecken und Ein- und Ausfahrten an diesen Strecken. Hierbei sollen auch Erkenntnisse aus dem europäischen Ausland (in erster Linie aus Österreich und der Schweiz) berücksichtigt werden. Zum anderen wird das aktuelle technische Regelwerk zum Entwurf und Betrieb von Tunneln analysiert. Auch hier werden neben dem deutschen Regelwerk die Regelwerke aus Österreich und der Schweiz berücksichtigt. Aus der Literatur sollen Forschungsfragen abgeleitet werden. Sie sollen als Anhaltspunkte für die zu prüfenden Entwurfsparameter auf die Verkehrssicherheit und den Verkehrsablauf von/in Ein- und Ausfahrten dienen.

Zur Analyse bereits realisierter Tunnellösungen erfolgt bereits parallel zur Grundlagenanalyse eine Typisierung der im Bundesautobahnnetz befindlichen Tunnel. Dazu sollen alle Tunnel im Zuge von Autobahnen mit einer Länge von mehr als 400 m erfasst werden. Die relevanten Tunnel wurden von der Bundesanstalt für Straßenwesen auf der Grundlage vorhandener Datenbanken benannt.

Zur Untersuchung der Verkehrssicherheit soll zunächst eine makroskopische Unfallanalyse durchgeführt werden. Neben absoluten Unfallzahlen, differenziert nach Unfallkategorien, werden für alle Tunnelstrecken bzw. für die dort jeweils getrennt zu betrachtenden Bereiche (z. B. Ein- und Ausfahrten) die relevanten Unfallkenngrößen ermittelt. Diese Kenngrößen, insbesondere die Unfallkostenrate, sollen als Grundlage für den nachfolgend vorgesehenen Vergleich des Unfallgeschehens mit Außenstrecken dienen. In der anschließenden mikroskopischen Unfallanalyse sollen alle Anschlussstellen in den Tunneln betrachtet werden. Hierzu werden die Verkehrsunfallanzeigen der Polizei ausgewertet.

Für die Analysen zum Verkehrsablauf erfolgt auf Basis der vorgenommenen Typisierung und der Präzisierung der relevanten Forschungsfragen sowie gegebenenfalls unter Berücksichtigung der Erkenntnisse aus den makroskopischen Unfallanalysen eine Auswahl von Tunneln, anhand derer die q-V-Beziehungen und Kapazitätswerte ermittelt werden sollen. Darüber hinaus sollen weitere, vor allem fahrstreifenbezogene Kenngrößen analysiert werden.

Zur abschließenden Beurteilung, ob sich an Ein- und Ausfahrten innerhalb von Autobahntunneln vermehrt Unfälle ereignen, werden zunächst die ermittelten Unfallkenngrößen mit denen der Außenstrecken verglichen. Ebenso werden die Ergebnisse zu den q-V-Beziehungen und Kapazitätswerten der Tunnelstrecken mit bekannten Bemessungswerten für Tunnelstrecken und Außenstrecken vergleichend analysiert. Im Ergebnis werden die grundsätzlichen Unterschiede zwischen Außen- und Tunnelstrecken hinsichtlich Verkehrssicherheit und Verkehrsablauf aufgezeigt.

Auf der Grundlage der Ergebnisse der vorangegangenen Arbeitsschritte werden abschließend Empfehlungen zum Einsatz und zur Gestaltung von Anschlussstellen in Autobahntunneln erarbeitet.

3 Grundlagenanalyse

3.1 Stand der Forschung

Das vorliegende Forschungsvorhaben ordnet sich ein in den Kontext europaweiter Bemühungen, die Verkehrssicherheit der Straßenverkehrsinfrastruktur zu erhöhen. Zunächst werden vorliegende Erkenntnisse zur Verkehrssicherheit in Straßentunneln dargestellt, die auch Untersuchungen aus Österreich und der Schweiz berücksichtigen. Dabei ist jedoch kritisch zu prüfen, in welchem Umfang sich diese auf deutsche Verhältnisse übertragen lassen.

Neben Untersuchungen, die sich mit Autobahntunneln befassen, werden auch solche Untersuchungen einbezogen, die sich mit Außenstrecken auseinandergesetzt haben, sofern diese für einen Vergleich der Verkehrssicherheit zwischen Tunnelstrecken und Außenstrecken von Interesse sind.

Für den Bereich der Autobahnen existiert bislang nur eine begrenzte Anzahl aktueller Untersuchungen, die eine vergleichende Beurteilung der Verkehrssicherheit für Strecken und für einzelne Elemente planfreier Knotenpunkte zulassen. So wurden Unfallkennwerte für ausgewählte Typen von Einfahrten (FRIEDRICH et al., 2008), Typen von Ausfahrten (WEISER/SILLUS/LIPPOLD, 2006, und FRIEDRICH/IRZIK/HOFFMANN, 2006) sowie Typen von Verflechtungsbereichen (SCHNÜLL et al., 2000) ermittelt. Zu Strecken von Autobahnen allgemein liegen Unfallkennwerte von LEMKE (2007) und BRILON/GEISTEFELDT (2009) vor. Ebenfalls von Interesse sind die Erkenntnisse aus dem FE 16.0012/2009 „Bewertung der Sicherheitsbelange der Straßeninfrastruktur“.

3.1.1 Verkehrssicherheit von Tunnelstrecken

KAYSER/BALTZER/LEVEN (1985) untersuchten die Zulässigkeit und die Einsatzkriterien von Ein- und Ausfahrten in Tunneln. Dabei sollte vorrangig die Frage beantwortet werden, unter welchen Bedingungen Ein- und Ausfahrten in einem Tunnel zugelassen werden können und wie diese baulich und verkehrstechnisch gestaltet werden sollten, um eine erhöhte Unfallgefährdung zu vermeiden. Hierfür wurde eine Betrachtung des Zusammenhangs zwischen Unfallereignissen, baulichen Gegebenheiten und Verkehrsablauf durchgeführt.

Ein- und Ausfahrten bringen Verflechtungsstrecken mit sich, in denen der homogene Verkehrsfluss gestört wird und infolge der Ein- und Ausfahrtvorgänge vermehrt Unfälle auftreten können. Darüber hinaus sind in unterirdischen Ein- und Ausfahrtbereichen die Sichtverhältnisse durch die Tunnelwände und die Beleuchtungsverhältnisse eingeschränkt, sodass sich hieraus ein erhöhtes Unfallrisiko ergeben kann.

Auf Grund der geringen Anzahl von Tunneln in Deutschland mit Ein- und Ausfahrten wurde das Kollektiv auf Straßentunnel in der Schweiz ausgeweitet. Insgesamt wurden elf Tunnel in die Untersuchung einbezogen.

Alle untersuchten Tunnel befinden sich in städtischen Bereichen. Bei zwei der untersuchten Tunnel handelte es sich um Tunnel im Zuge von Autobahnen. Die zulässige Höchstgeschwindigkeit in den untersuchten Tunneln betrug maximal 80 km/h.

Die Unfalluntersuchung hat gezeigt, dass ein Großteil der Tunnel Unfallschwerpunkte aufweist, die auf objektspezifische bauliche Gegebenheiten zurückzuführen sind und nicht im direkten Zusammenhang mit der Ausgestaltung der Ein- und Ausfahrtbereiche stehen. Dazu zählen beispielsweise kleine Kurvenradien in Ein- und Ausfahrttrampen, die zu Fahrunfällen infolge überhöhter Geschwindigkeiten führen.

Als Ergebnis der Unfalluntersuchung konnte durch KAYSER/BALTZER/LEVEN (1985) festgestellt werden, dass keiner der untersuchten Ein- und Ausfahrttypen völlig ungeeignet ist. Zur Gewährleistung eines sicheren und flüssigen Verkehrsab-

laufs wurden die folgenden allgemeinen Anforderungen an Anschlussstellen in Tunneln formuliert:

- Für Einfahrten muss eine ausreichende Sicht vor der Einfahrttrampe auf die Hauptfahrbahn und umgekehrt vorhanden sein.
- Weiterhin sind eine ausreichende Länge des Einfädelungstreifens (möglichst 250 m nach RAL-K-2) sowie eine Anpassung der Geschwindigkeit auf Haupt- und Nebenfahrbahn wichtig für die Einfahrtbereiche.
- Die Ausfahrten müssen deutlich von der Hauptfahrbahn aus erkennbar sein.
- Die Ausfädelungsstrecke muss ausreichend lang und deren Ende deutlich erkennbar sein.
- Die Trassierung sollte fahrdynamischen Überlegungen entsprechen.

Die Gestaltungsvariante der keilförmigen Einfahrt, bei KAYSER/BALTZER/LEVEN (1985) als Typ E 0 beschrieben (vgl. Bild 1), ist keine Standardlösung nach den damals gültigen RAL-K-2 (1976).

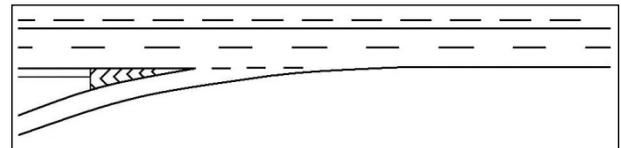


Bild 1: Keilförmige Einfahrt Typ E 0 nach KAYSER/BALTZER/LEVEN (1985)

Die im Untersuchungskollektiv vorhandene Ausfahrt vom Typ E 0 im Tunnel Söflingerring ist nur sehr schwach belastet. Obwohl sowohl die Sichtverhältnisse, als auch die Beleuchtungsverhältnisse an dieser Einfahrt unzureichend sind, konnte auf Grund des Unfallgeschehens keine negative Bewertung dieses Einfahrtstyps vorgenommen werden. Diese Lösung sollte nach Ansicht von KAYSER/BALTZER/LEVEN (1985) auf Ausnahmefälle beschränkt bleiben. Dabei muss jedoch beachtet werden, dass die Sicht auf den Verkehr der durchgehenden Hauptfahrbahn gewährleistet ist. In der Untersuchung von KAYSER/BALTZER/LEVEN (1985) hat die Unfallsituation im Tunnel Tegel mit einem auf 225 m verkürzten Einfädelungstreifen gezeigt, dass Einfahrten mit Einfädelungstreifen mindestens

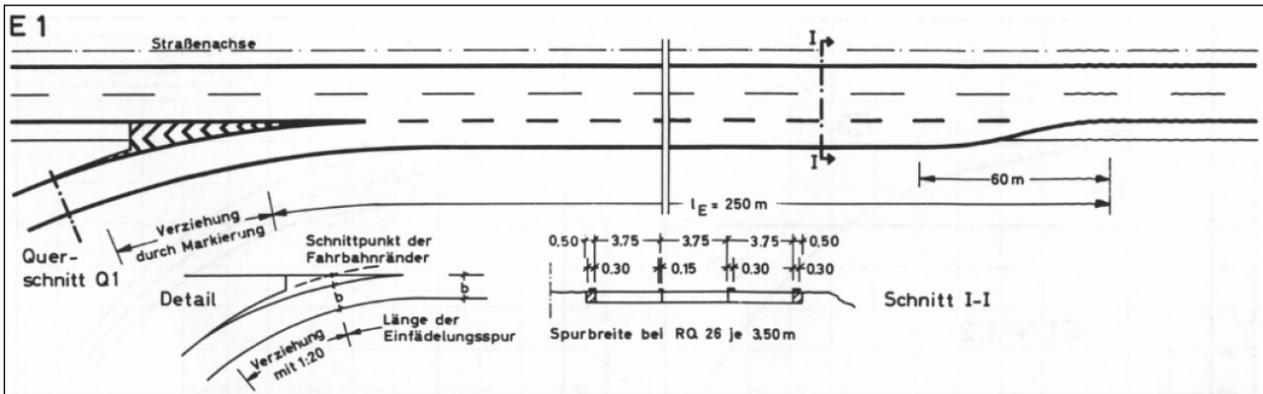


Bild 2: Einfahrttyp E 1 nach RAL-K-2 (FGSV, 1976)

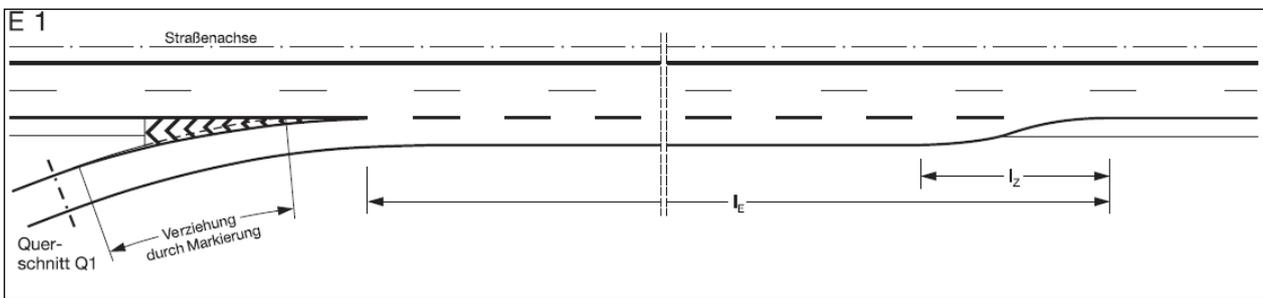


Bild 3: Einfahrttyp E 1 nach RAA (FGSV, 2008)

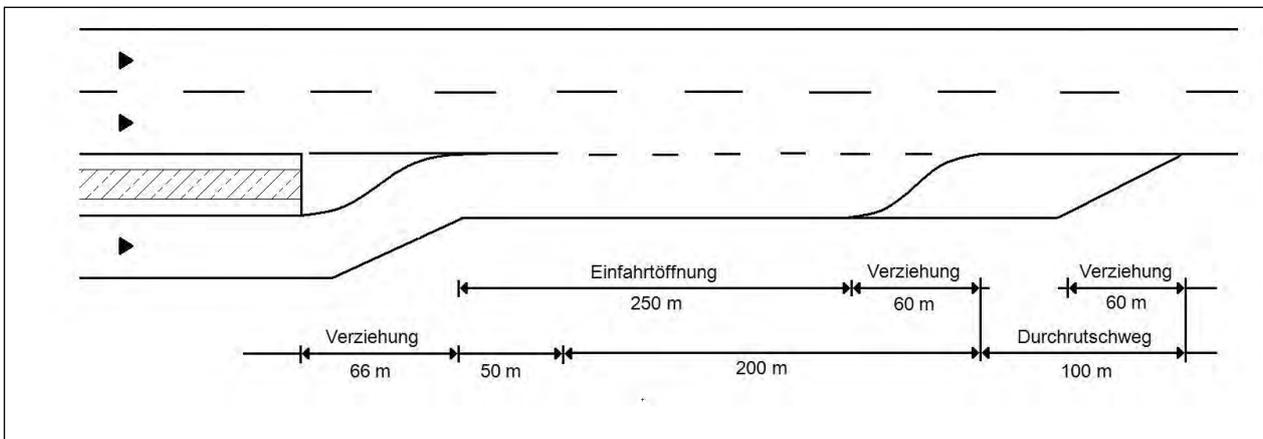


Bild 4: Ausbildung einer Einfahrt mit Einfädelspur im Tunnel nach KAYSER/BALTZER/LEVEN (1985)

eine Länge von 250 m nach den RAL-K-2 (FGSV, 1976) haben sollten (vgl. Bild 2). Dieser vorgeschlagene Wert von 250 m entspricht auch den Vorgaben der aktuell gültigen RAA (2008) für Einfahrten an der Hauptfahrbahn der EKA 1 und EKA 2. Für Einfahrten an Hauptfahrbahnen der EKA 3 ist nach den RAA (2008) eine Länge von 150 m ausreichend (vgl. Bild 3 und Tabelle 1).

KAYSER/BALTZER/LEVEN (1985) untersuchten keilförmige Einfahrten, Einfahrten mit Einfädelsstreifen, Einfahrten mit Fahrstreifenaddition, keilförmige Ausfahrten, Ausfahrten mit Ausfädelsstreifen sowie Ausfahrten mit Fahrstreifen-

subtraktion. Die genauen Angaben zu der Anzahl der jeweiligen Ein- bzw. Ausfahrttyps enthält die Untersuchung jedoch nicht. Für Einfahrten mit einem Einfädelsstreifen wurde von KAYSER/BALTZER/LEVEN (1985) der in Bild 4 dargestellte Gestaltungsvorschlag erarbeitet. Die Verziehung der nebeneinander liegenden Fahrbahnen zu Beginn des Einfädelsstreifens (Verziehungsbreite 3,30 m) wird mit 1:20 durchgeführt. Da die Sichtbeziehung von der Einfahrt auf die Hauptfahrbahn durch die Tunnelwand verhindert wird, sollte auf den ersten 50 m der Parallelführung der Hauptfahrbahn und der Einfahrt das Überwechsell durch eine Fahrstreifenbegren-

zungslinie unterbunden werden. An diesen Bereich schließt ein 200 m langer Bereich an, in dem der Einfahrende in den Hauptstrom einfädeln kann. Die gesamte Länge der Einfahrtöffnung beträgt damit 250 m. Dies entspricht neben den Vorgaben der RAL-K-2 (1976) auch den Vorgaben der aktuell gültigen RAA (2008).

Tab. 1: Zahlenwerte für die Maßgrößen l_E und l_Z nach den RAA (2008)

Größe	Einfahrttyp	EKA 1/EKA 2	EKA 3
l_E [m]	alle E- und E ^{*)} -Typen alle EE-Typen	250 ^{*)}	150
	ER 1, ER 4, ER 3	150	100
l_Z [m]	alle Typen	60	30

^{*)} in Steigungsstrecken gegebenenfalls verlängern (bei $s > 4,0\%$ oder verkehrstechnischer Nachweis nach dem Abschnitt 8.1)

Zur Erhöhung der Verkehrssicherheit empfehlen KAYSER/BALTZER/LEVEN (1985) einen 100m langen „Durchrutschweg“ am Ende des Einfädungsstreifens (vgl. Bild 4).

An Einfahrten mit Fahrstreifenaddition ergeben sich auf Grund der durchgeführten Unfallauswertung von KAYSER/BALTZER/LEVEN (1985) keine Auffälligkeiten. Auch an keilförmigen Ausfahrten und Ausfahrten mit Ausfädelungsstreifen konnten keine besonderen Unfallhäufungen festgestellt werden, solange die Ausfahrt optisch gut erkennbar ist und keine unerwarteten Trassierungselemente, wie z.B. sehr enge Radien auftreten.

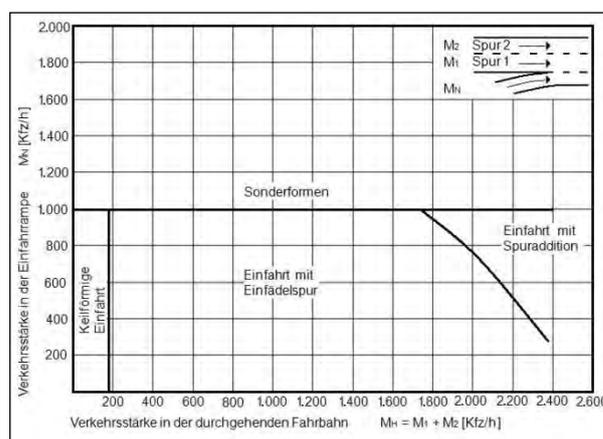
Fahrstreifenabtraktionen sollten nach Ansicht von KAYSER/BALTZER/LEVEN (1985) möglichst eindeutig angezeigt werden. Fahrstreifenwechsellvorgänge können durch zu spätes Erkennen der Situation zu Unfällen führen.

Die von KAYSER/BALTZER/LEVEN (1985) erarbeiteten Einsatzkriterien für Ein- und Ausfahrten in Tunneln (vgl. Bild 6 und Bild 7), wurden an die damals gültigen RAL-K-2 (1976) angelehnt. Die Auswahl des Einfahrtstyps erfolgt nach der Verkehrsstärke der zu verflechtenden Ströme (vgl. Bild 5).

Hauptauswahlkriterium für den Typ der Ausfahrt ist der Verlauf der anschließenden Ausfahrtrampe. Ausfahrten ohne eine große Richtungsänderung (Ausfahrwinkel < 12 gon) wurden günstig beurteilt, da in diesem Fall auf die Einrichtung zusätzlicher Ausfädel- und Verzögerungsstreifen verzichtet werden kann. Dies wird mit dem Umstand begründet, dass unter Ansatz einer maximalen Ge-

schwindigkeit von 100 km/h im Allgemeinen in eine solche Ausfahrt ohne Verzögerung eingefahren werden kann. Dies setzt jedoch auch eine Trassierung der anschließenden Rampe mit den entsprechenden Elementen voraus.

Bild 5: Grenzverkehrsstärken für Einfahrtstypen in Tunneln nach KAYSER/BALTZER/LEVEN (1985)



Ziel der Untersuchungen von BRILON/LEMKE (2000) war es, ein Verfahren zu entwickeln mit dessen Hilfe bereits im Planungsstadium die volkswirtschaftlich bewerteten Kosten und der Nutzen eines Tunnelprojekts geschätzt werden können. Das erstellte Bewertungsverfahren beschränkt sich dabei auf Tunnelquerschnitte im Zuge mehrbahniger Straßen. Das erarbeitete Bewertungsverfahren beschränkt sich auf 2- und 3-streifige Richtungsfahrbahnen (33t, 33T, 26t und 26T), wobei das Hauptunterscheidungsmerkmal der Seitenstreifen (T) war. Das Entscheidungskriterium für die Wahl des günstigsten Tunnelquerschnitts ist das Nutzen-Kosten-Verhältnis. Dabei können die Werte für die Kosten und die Werte für den Nutzen direkt aus den ausgearbeiteten Diagrammen abgelesen werden.

Im Zuge der Untersuchung wurde sowohl der Verkehrsablauf in Tunneln bei Normalbetrieb als auch bei Störfällen betrachtet. Zur Untersuchung des Verkehrsablaufs wurden Messungen an 16 Tunneln durchgeführt und verallgemeinerte q-V-Beziehungen für Tunnel in Abhängigkeit verschiedener Einflussparameter entwickelt. Für die Auswahl der Messstellen wurden die folgenden Kriterien zu Grunde gelegt:

Einfahrt ≤ 150 KFZ/h	Einfahrt < 1000 KFZ/h Hauptfahrbahn < 1700 KFZ/h	Einfahrt < 1000 KFZ/h Hauptfahrbahn > 1700 KFZ/h	Einfahrt > 1000 KFZ/h Hauptfahrbahn > 1700 KFZ/h
gute Sichtverhältnisse auf Verkehr der Hauptfahrbahn		Spurzuweisung möglich (temporäre Spuraddition)?	
ja / nein		ja / nein	
keilförmige Einfahrt		Sonderlösung	
Einfahrt mit Einfädelspur			
Einfahrt mit Spuraddition			

Bild 6: Einsatzkriterien für Einfahrten in Tunneln nach KAYSER/BALTZER/LEVEN (1985)

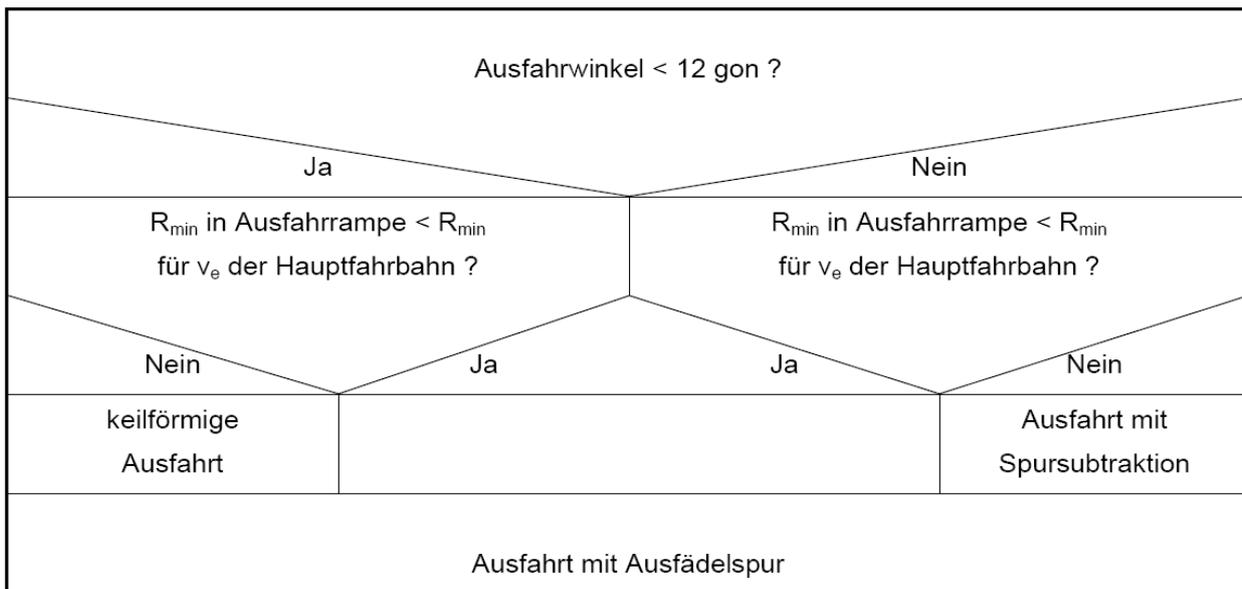


Bild 7: Einsatzkriterien für Ausfahrten in Tunneln nach KAYSER/BALTZER/LEVEN(1985)

- Tunnelmindestlänge von 400 m,
- keine Knotenpunkte im Tunnel und im Bereich der Tunnelportale,
- hohe Verkehrsbelastung,
- Lage an anbaufreien Straßen,
- Regelbreiten bei Fahr- und Seitenstreifen,
- durchschnittliche Tunnelbeleuchtung.

einem Fahrstreifen (acht Tunnel mit Gegenverkehr, einer mit Richtungsverkehr).

Zur Betrachtung des Verkehrsablaufs bei Störfällen wie Nothalten, Unfällen, und Arbeitsstellen wurden von BRILON/LEMKE (2000) Erkenntnisse aus Tunneln im Ausland herangezogen.

Für die Auswertungen zum Unfallgeschehen standen insgesamt 1.159 Unfälle zur Verfügung, die sich nachweislich in einem Tunnel ereignet hatten. In Abhängigkeit der verfügbaren Unfalldaten wurden die Unfallkenngrößen mit und ohne Sachschadensunfälle berechnet (vgl. Tabelle 2).

Das Kollektiv umfasste 91 Tunnel die zusammengesetzt waren aus Tunneln mit 3-streifiger und mit 2-streifiger Richtungsfahrbahn sowie Tunnel mit je

Tab. 2: Unfallkennwerte verschiedener Tunnelquerschnitte nach BRILON/LEMKE (2000)

Tunnelquerschnitt	Unfallraten		Unfallkostenraten UKR _{ST} [DM/1.000 Kfz·km]
	UR(P) _{ST} [U/10 ⁶ Kfz·km]	UR(S) _{ST} [U/10 ⁶ Kfz·km]	
26T 33T	0,074	0,326	12,78
26t 33t	0,130	0,354	21,16

Tunnel, die weniger als ein Jahr in Betrieb waren oder einen untypischen Querschnitt aufwiesen, wurden ausgeschlossen.

BRILON/LEMKE (2000) stellten fest, dass in Straßentunneln im Vergleich zur freien Strecke weniger Unfälle passieren, diese jedoch meist schwerwiegender sind. Insbesondere Brände erfordern einen schnellen und umsichtigen Einsatz der Rettungsdienste. Darüber hinaus treten viele für die freien Strecken typische Unfälle, wie z. B. Wildunfälle, Unfälle durch ungünstige Witterung (Schnee, Regen, Glatteis) sowie Unfälle wegen schlechter Sichtverhältnisse in Tunneln nicht auf.

Bei Straßentunneln, die im Richtungsverkehr betrieben werden, dominiert der Unfall im Längsverkehr mit einem Anteil von 69 % aller Unfälle. Bei

Tab. 3: Verteilung der Unfalltypen nach ZULAUF et al. (2009)

	Unfalltyp 1		Unfalltyp 2		Unfalltyp 6		Unfalltyp 7	
	Mit Ein-/Ausfahrt	Ohne Ein-/Ausfahrt						
Richtungsverkehrstunnel								
< 600 m	19.2 %	46.2 %	15.9 %	0.0 %	52.2 %	23.1 %	12.8 %	30.8 %
600 – 1.200 m	10.2 %	24.4 %	9.1 %	0.0 %	72.6 %	56.1 %	8.2 %	19.5 %
≥ 1.200 m	7.8 %	12.8 %	3.9 %	0.0 %	83.0 %	78.5 %	5.3 %	8.7 %

Die risikoorientierte Betrachtungsweise weist gegenüber den maßnahmenorientierten Ansätzen eine verstärkte Berücksichtigung spezifischer Tunnelcharakteristika auf.

Mit den Ergebnissen von ZULAUF et al. (2009) wurden Vorgaben für eine einheitliche und vergleichbare Durchführung von Sicherheitsbeurteilungen geschaffen. Um eine möglichst hohe Flexibilität der Methodik hinsichtlich der Anwendbarkeit für verschiedene Tunneltypen zu ermöglichen, wurden die Risiken jeweils für jede Tunnelröhre separat ermittelt und für die Gesamtbewertung zusammengefasst.

Als Grundlage für die Herleitung der erforderlichen statistischen Eingangsgrößen wurden im Rahmen

40 % dieser Unfälle handelte es sich um Unfälle auf der Hauptfahrbahn; diese ereigneten sich häufig auf hochbelasteten Streckenabschnitten. Häufungen von Unfällen konnten in Bereichen festgestellt werden, in denen Anschlussstellen im Tunnel oder in der Nähe des Tunnels vorhanden waren (z. B. A 44 Flughafentunnel Düsseldorf, Fahrtrichtung Messe).

Die RABT (2006) geben keine konkreten Vorgaben zur Durchführung einer Sicherheitsbewertung. ZULAUF et al. (2009) haben aus diesem Grund eine Bewertungsmethodik erarbeitet, die auf einen risikobasierten Ansatz aufsetzt. Ziel war es, eine Methodik zur Bewertung der Sicherheit in Straßentunneln zu entwickeln und die entsprechenden Grundlagen für die Anwendung im Rahmen der Umsetzung der EG-Richtlinie 2004/54/EG zu erarbeiten. Weiterhin sollten die systematischen Zusammenhänge hinsichtlich risikorelevanter Einflussgrößen aufgezeigt und ein standardisiertes Verfahren zur Bewertung der Sicherheit von Straßentunneln entwickelt werden.

einer Unfallanalyse für 80 Autobahn- und Landstraßentunnel die Unfallanzeigen von insgesamt 979 Unfällen aus den Jahren 2002 bis 2004 ausgewertet. Dabei wurden folgende Einflussgrößen als maßgeblich ermittelt:

- Tunneltyp/Verkehrsart,
- Tunnellänge,
- Verkehrsaufkommen (DTV),
- Tunnel mit bzw. Tunnel ohne Ein- und/oder Ausfahrten.

Mit Hilfe dieser Eingangsgrößen wurde die Anzahl der Unfälle pro Tunnelröhre und Jahr abgeschätzt.

Darüber hinaus wird folgenden Einflussgrößen ein Einfluss auf das Unfallgeschehen unterstellt:

- spezielle Charakteristik hinsichtlich Kurvigkeit und Gefälleverhältnissen,
- zulässige bzw. tatsächlich gefahrene Geschwindigkeit bzw. Verkehrsbeeinflussungsmöglichkeiten,
- Vorhandensein von Pannengebieten und/oder Seitenstreifen,
- Stauhäufigkeit.

Auf Grundlage der erhobenen Daten konnte der Einfluss dieser Einflussgrößen jedoch nicht statistisch nachgewiesen werden.

Für Straßentunnel, die im Richtungsverkehr betrieben werden, konnte die in Tabelle 3 dargestellte Verteilung der Unfalltypen ermittelt werden. In Richtungsverkehrstunneln ohne eine Ein- oder Ausfahrt nimmt mit zunehmender Tunnellänge der Anteil der Fahrunfälle (Unfalltyp 1) stark ab und der Anteil der Unfälle im Längsverkehr (Unfalltyp 6) stark zu. Eine Begründung dieser Feststellung wurde von ZULAUF et al. (2009) jedoch nicht formuliert. In allen untersuchten Tunneln ereigneten sich im Untersuchungszeitraum von 2002 bis 2004 nur sechs Unfälle mit Todesfolge.

Die von ZULAUF et al. (2009) vorgenommene Unfallanalyse hat gezeigt, dass die für den Zweck einer Risikoanalyse bei einem Unfall erfassten Informationen teilweise ungenügend sind. So haben oft Angaben zu den jeweiligen Begleitumständen bei einem Unfall gefehlt oder die Ortsangaben waren sehr ungenau. Dadurch war es teilweise nicht möglich, die verschiedenen Einflussgrößen bei einer quantitativen Risikoanalyse darzustellen. Im Rahmen der Erarbeitung neuer Richtlinien für Wirtschaftlichkeitsuntersuchungen an Straßen (RWS) wurden von BAIER et al. (2014) auf Basis der von ZULAUF et al. (2009) erfassten Unfalldaten, die zwischenzeitlich um die Unfälle des Jahres 2005 ergänzt wurden, mittlere UKR für Autobahn- und Landstraßentunnel ermittelt.¹ Es wurden 29 Autobahntunnel betrachtet und nach verschiedenen Tunnelquerschnitten differenziert:

- 2 Gegenverkehrstunnel mit einem Fahrstreifen je Richtung,

- 13 Richtungsverkehrstunnel mit zwei Fahrstreifen je Richtung ohne Seitenstreifen,
- 8 Richtungsverkehrstunnel mit zwei Fahrstreifen je Richtung mit Seitenstreifen,
- 1 Richtungsverkehrstunnel mit zwei Fahrstreifen und einem durchgehenden Verteilerfahrstreifen je Richtung,
- 5 Richtungsverkehrstunnel mit drei Fahrstreifen je Richtung mit Seitenstreifen.

In Anlage 1 sind die betrachteten Tunnel, deren Länge und Verkehrsbelastung (DTV) sowie die Unfälle differenziert nach den Unfallkategorien und die für die 29 Tunnel berechneten Unfallkenngrößen angegeben. Die UKD und UKR wurden dabei mit pauschalen Kostensätzen (Preisstand 2000) berechnet.

In den 29 Tunneln sind im Zeitraum von 2002 bis 2005 insgesamt 517 Unfälle geschehen. Davon waren 103 Unfälle mit Personenschaden (U(P)), 18 Unfälle mit schwerem und 85 Unfälle mit leichtem Personenschaden. Die übrigen 414 Unfälle waren Unfälle mit Sachschaden U(S); 55 Unfälle mit schwerwiegendem und 359 Unfälle mit leichtem Sachschaden.

Aus den UKR der einzelnen Tunnel ergeben sich folgende mittlere UKR in Abhängigkeit des Tunnelquerschnitts für Richtungsverkehrstunnel:

- mit zwei Fahrstreifen je Richtung ohne Seitenstreifen: 4,9 €/ (1.000 Kfz·km),
- mit zwei Fahrstreifen je Richtung mit Seitenstreifen: 6,7 €/ (1.000 Kfz·km),
- mit drei Fahrstreifen je Richtung mit Seitenstreifen: 10,6 €/ (1.000 Kfz·km).

Für Gegenverkehrstunnel mit einem Fahrstreifen je Richtung und Richtungsverkehrstunnel mit zwei Fahrstreifen und einem durchgehenden Verteilerfahrstreifen je Richtung war die Anzahl mit zwei bzw. einem Tunnel zu gering um mittlere UKR abzuleiten.

¹ Die Tunnel- und Unfalldaten wurden vom Institut für Straßenwesen der RWTH Aachen University zur Verfügung gestellt. Die Angaben zum DTV wurden aus der Tunneldatenbank des Instituts für Straßenwesen der RWTH Aachen University entnommen; diese basieren auf entsprechenden DTV-Werten aus der Straßenverkehrszählung 2000.

In Österreich haben ROBATSCH/NUSSBAUMER (2005) einen Verkehrssicherheitsvergleich von Tunneln mit Gegen- und Richtungsverkehr mit der freien Außenstrecke durchgeführt. In einem ersten Teil erfolgte die Weiterführung einer vorangegangenen Studie aus dem Jahr 2004, in der die Unfälle in Tunneln mit Gegen- und Richtungsverkehr der Jahre 1999 bis 2001 betrachtet wurden. Diese wurde um die Unfälle der Jahre 2002 und 2003 ergänzt. Im zweiten Teil erfolgte ein Vergleich von allen im Gegen- und Richtungsverkehr geführten Schnellstraßentunneln mit der freien Strecke, unter Beachtung aller Unfälle mit Personenschaden. Dazu wurde zunächst eine makroskopische Analyse des Unfallgeschehens (Unfallzahlen, Verletzungsschwere, Unfalltypen, beteiligte Fahrzeugarten) durchgeführt.

Das Untersuchungskollektiv umfasste 82 Tunnel, die im Richtungsverkehr und 43 Tunnel, die im Gegenverkehr (davon 15 an Autobahnen) betrieben wurden.

Es konnte festgestellt werden, dass die Unfallrate in den untersuchten Tunneln niedriger ist als die an freien Außenstrecken an Autobahnen. Eine Unterscheidung zwischen Tunneln an Autobahnen und anderen Straßen wurde bei diesem Vergleich nicht vorgenommen.

Weiterhin konnte festgestellt werden, dass die Tunnellänge einen starken Einfluss auf die Unfallzahlen, wie Unfallrate, Unfallkostenrate etc. hat. Vor allem Tunnel mit einer Länge von $L < 1$ km wiesen hohe Unfallraten auf.

In Tunneln mit Gegenverkehr verunglückten im Durchschnitt 2,1 Verkehrsteilnehmer pro Unfall. Hingegen ist der Wert mit 1,6 Verunglückten pro Unfall in Tunneln, die im Richtungsverkehr betrieben werden, deutlich geringer. Dies bedeutet, dass die Verletzungsschwere in Tunneln mit Gegenverkehr höher ist als in Tunneln ohne Gegenverkehr. In dem Tunnelkollektiv sind sowohl Tunnel $V_{zul} = 80$ km/h als auch Tunnel $V_{zul} = 100$ km/h vorhanden. Eine Differenzierung nach V_{zul} wurde nicht vorgenommen.

In der Schweiz wurden von LANZ et al. (1990) die Voraussetzungen für Straßenknoten in Tunneln und Galerien ausgearbeitet. Hierfür wurden zunächst Daten zu 201 geplanten, projektierten und in Betrieb befindlichen Knotenpunkten im Bereich von Tunneln in der Schweiz erfasst, analysiert und typisiert. Bei 162 der 201 Anlagen handelte es sich um planfreie Knotenpunkte, von denen 76 in Betrieb waren. 54 waren bereits projektiert oder im Bau. Weitere 32 Anlagen befanden sich zum Zeitpunkt der Erfassung in der Planung. Auffallend ist

die große Anzahl von Einfahrten unmittelbar vor einem Tunnel (14 Einfahrten) oder nach einem Tunnel (10 Einfahrten). Bei der Analyse dieser Anlagen haben LANZ et al. (1990) festgestellt, dass sehr oft vor allem der Einfädelsstreifen nur einen Bruchteil der in den Normen verlangten Länge aufweist und alles getan wurde, die Einfahrt außerhalb des Tunnels anzuordnen. Dies führte dazu, dass mit dem Einfädelsstreifen auch der Seitenstreifen aufhört und somit ein Notbremsraum fehlt.

LANZ et al. (1995) stellen in diesem Zusammenhang die Frage, ob solche Anlagen tatsächlich verkehrssicherer sind als vollständig unterirdische, korrekt ausgebaute Einfahrten mit homogenen Beleuchtungsverhältnissen. Die einzige vollständig unterirdische Einfahrt konnte am Gotthardstraßentunnel erfasst werden.

Die von LANZ et al. (1995) gewonnenen Erkenntnisse basieren auf den Ergebnissen der Literaturanalyse, den erhobenen Gestaltungsvarianten, auf theoretischen Überlegungen sowie der an zwei Tunneln durchgeführten Unfalluntersuchung. Im Ergebnis wurden die nachfolgenden Hinweise und Empfehlungen für die Praxis erstellt, welche für die verschiedenen Konstellationen die Beurteilung der Machbarkeit von Anschlussstellen in Tunneln und Galerien erlauben.

- Die Anforderungen gemäß den Schweizer Normen² sind einzuhalten,
- die Signale sind in erforderlicher Größe zweckmäßig anzuordnen,
- die gleichmäßige Ausleuchtung des Tunnels ist sicherzustellen und
- die Strategien für die Rettung und Verkehrsabwicklung bei Unfällen sind im Vorfeld auszuarbeiten.

Weiterhin ergeben sich die folgenden Anforderungen an die Gestaltung von Einfahrten an Autobahnen:

- Der Einfahrtbereich soll in Lage und Höhe in Bereichen mit einer gestreckten Linienführung liegen,
- Rechtskurven im Einfahrtbereich sind zu vermeiden,
- die Trassierung und Prüfung der Sichtweiten soll für eine um 20 km/h höhere als die zulässige Geschwindigkeit erfolgen,

² Dies sind u. a. die SN 505 197 und die SN 505 197/2.

- die Trassierung ist so zu wählen, dass ab der geometrischen Nase (Inselspitze nach RAA 2008) der gesamte Einfahrtbereich überblickt werden kann,
- bei einem vergleichsweise hohen Verkehrsaufkommen in der Einfahrt (maximal mögliche Belastung) ist die Länge des Einfädungsstreifens auf 300 m zu verlängern.
- der Seitenstreifen soll um mindestens 300 m nach Ende des Einfädungsstreifens weitergezogen werden,
- eine frühzeitige Geschwindigkeitsbeschränkung auf der Hauptfahrbahn und in der Einfahrt auf 80 km/h ist sicherzustellen,
- die Anlagen sind so zu dimensionieren, dass sie bei den maßgebenden Belastungen eine Leistungsreserve von 20 % aufweisen,
- eine rasche Eingriffsmöglichkeit für Polizei und Rettungsdienst ist sicherzustellen,
- bei Einfahrten im Bereich der Durchgangsbeleuchtung ist eine auf 10 cd/m^2 erhöhte Beleuchtungsstärke vorzusehen,
- die Beleuchtungsstärke über der Länge des Einfädungsstreifens hat 5 cd/m^2 über dem Wert zu liegen, der sich bei einer normalen Adaptionsbeleuchtung beim Beginn der Vorlaufstrecke ergäbe,
- im Bereich der Einfahrt sind durchgehende Leuchtbänder anzuordnen,
- die Einfahrtbereiche sind dauernd zu überwachen.

Aufbauend auf den zuvor dargestellten Ergebnissen wurden von LANZ et al. (1995) im Rahmen ihrer Untersuchungen zu Einfahrten auf Hochleistungsstraßen in Tunneln vor allem die Problematik der visuellen Wahrnehmung von Einfädungsstreifen im Bereich von Tunneln näher untersucht. Im Zuge einer verkehrstechnischen Voranalyse wurden die maßgebenden Einflussfaktoren erfasst. Dazu zählen die:

- Lage der Einfahrt in Bezug auf den Tunnel,
 - Geometrie des Tunnels,
 - Zulässige Höchstgeschwindigkeit,
 - Verkehrszusammensetzung,
 - Tunnelbeleuchtung und weitere Tunnelausrüstung.
- Im Rahmen der Untersuchungen wurden ausschließlich richtungstrennte Straßen mit mindestens zwei Fahrstreifen je Richtung analysiert. Zur Berücksichtigung der unterschiedlichen Lichtverhältnisse im Tunnel und den Adaptionsproblemen beim Lichtwechsel wurde der Tunnel in verschiedene Bereiche unterteilt (vgl. Bild 9). In Bezug auf den Tunnel wurden unterschieden:
- A = außerhalb des Tunnels,
 - B = Annäherungsbereich,
 - D = Adaptionsbereich,
 - E = Innenbereich,
 - F = Bereich mit Sicht ins Freie,
 - H = Anschlussbereich,
 - I = außerhalb des Einflussbereichs.
- Auf der Grundlage von Feldversuchen konnte festgestellt werden, dass Einfädungsmanöver in den Bereichen E und F als genügend sicher angesehen werden können. Der Einfädungsvorgang im Bereich D1 konnte nicht abschließend beurteilt werden, da dieser im Grenzbereich zwischen einer genügenden und ungenügenden Wahrnehmung liegt. Weiterhin sollte bei starken Verkehrsbelastungen die Länge des Einfädungsstreifens mindestens 200 m betragen (vgl. Bild 8).

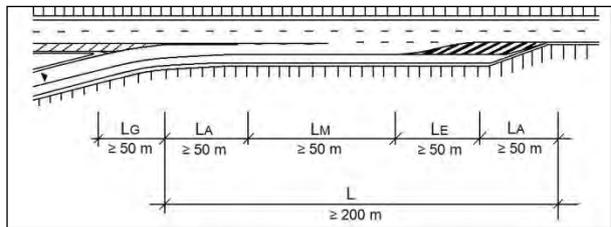


Bild 8: Geometrie des Einfädungsstreifens im Tunnel (LANZ et al., 1995)

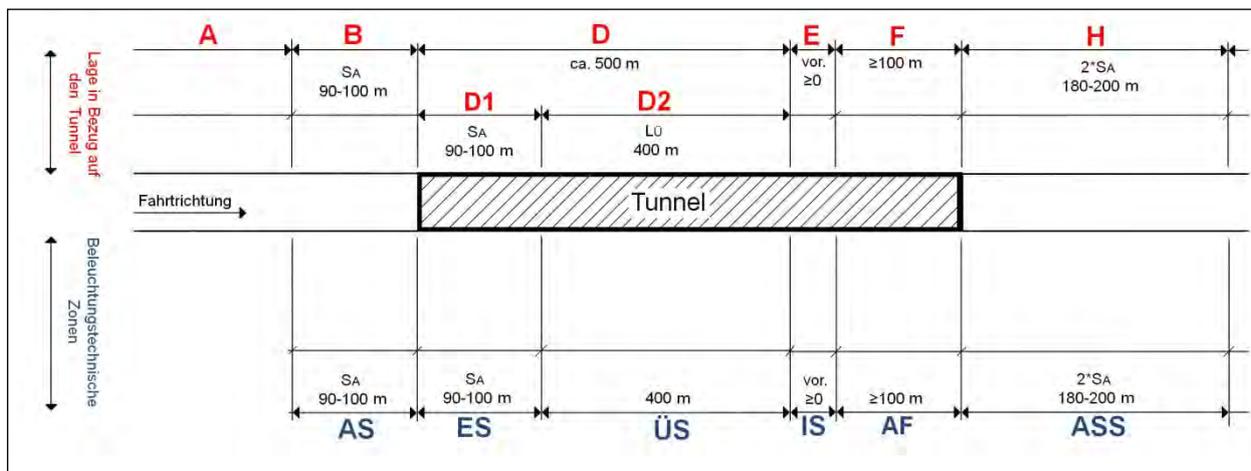


Bild 9: Lage im Tunnel (LANZ et al. 1995)

Unter Einhaltung der von LANZ et al. (1995) formulierten Anforderungen können in den Bereichen B, D2, E, F und H Einfahrten auf Hochleistungsstraßen realisiert werden. Hierfür wurden allgemeine Anforderungen und zusätzliche Anforderungen definiert.

In einer schweizerischen Untersuchung wurde von SALVISBERG et al. (2004) das Unfallgeschehen in Straßentunneln unter Berücksichtigung ausgewählter Anlagen und Betriebsmerkmale statistisch untersucht. Die Untersuchung setzt sich aus einer breit angelegten Befragung der Fachstellen (z. B. Tiefbauämter, Polizei) aller Kantone sowie einer Unfallanalyse zusammen.

Insgesamt wurden 126 Tunnelanlagen (Mindestlänge von 200 m) untersucht von denen 89 im Richtungsverkehr und 37 im Gegenverkehr betrieben wurden. Der Betrachtungszeitraum des Unfallgeschehens betrug fünf Jahre (1995 bis 1999). Es wurden sowohl Tunnel im Zuge von Autobahnen als auch Tunnel im nachgeordneten Netz untersucht. Im Zuge der statistischen Auswertung wurden die folgenden anlagenspezifischen und betriebstechnischen Merkmale untersucht:

- Tunnellänge,
- Röhrigkeit,
- Kurvigkeit,
- Längsneigung,
- Gestaltung der Notgehwege,
- Fahrstreifenbreite,
- Raumhöhe,
- DTV,
- Schwerverkehrsanteil,
- signalisierte zulässige Höchstgeschwindigkeit,

- Leuchtdichte.

Das Merkmal der Ein- bzw. Ausfahrten in Tunneln wurden bei der statischen Auswertung nicht berücksichtigt. Die Hälfte der analysierten Anlagen wurde mit 80 km/h betrieben; 46 % der Tunnel sind mit 100 km/h signalisiert. Zwei Anlagen werden auf Grund der Linienführung mit geringeren Geschwindigkeiten betrieben. Drei Anlagen können mit 120 km/h befahren werden. 61 % der Tunnel weisen eine Kurvigkeit von $KU \leq 66,6$ gon/km auf.

Die Auswirkungen der Leuchtdichte auf das Unfallgeschehen konnten mit dem zur Verfügung stehenden Datenmaterial nicht überprüft werden.

Ein Vergleich des Unfallgeschehens in Tunnelanlagen mit dem der freien Strecken außerhalb von Tunneln zeigte, dass die Unfallraten im Straßentunnel niedriger sind. Im Gegensatz dazu lag die Verunglücktenrate in der gleichen Größenordnung wie die der freien Außenstrecke. Das bedeutet, dass pro Unfallereignis mehr Personen einen Schaden erleiden als auf der freien Außenstrecke.

Die detaillierte Betrachtung des Unfallgeschehens zeigte, dass Auffahrunfälle mit rund 42 % am häufigsten vorkommen. Nach den Auffahrunfällen stehen die Fahrnfälle mit rund 34 % an zweiter Stelle. SALVISBERG et al. (2004) stellten fest, dass ein großer Teil dieser Unfälle mit dem Fehlen des Seitenstreifens zusammenhängt. So ist beispielsweise eine höhere Präzision beim Spurverhalten erforderlich, die Ausweichmöglichkeiten in kritischen Fahrsituationen sind reduziert und das Risiko von Hindernissen auf der Fahrbahn (z. B. liegengebliebene Fahrzeuge) erhöht sich.

Bei längeren Tunnelanlagen sind gegenüber kürzeren ein geringeres Unfallrisiko und ein geringeres Verunglücktenrisiko festzustellen. Die Annah-

me, dass die Portalbereiche im Vergleich zur Innenstrecke ein erhöhtes Unfallgeschehen aufweisen, konnte nicht beantwortet werden, da keine Angaben zum Unfallort vorlagen.

Eine Erhöhung der Verkehrsdichte führt sowohl zu einer höheren Unfall- als auch zu einer erhöhten Verunglücktenrate. Für die freie Außenstrecke konnte dieser Zusammenhang von LINDEMANN (2000) ebenfalls ermittelt werden.

Tunnelanlagen mit einer Röhre wiesen gegenüber denen, die mit zwei Röhren im Richtungsverkehr betrieben wurden sowohl ein erhöhtes Unfallrisiko als auch ein erhöhtes Risiko schwer verletzt zu werden auf. Ein hoher Anteil des Schwerverkehrs führt öfter zu Unfällen mit schweren Folgen.

3.1.2 Verkehrssicherheit von Außenstrecken sowie Ein- und Ausfahrten

Für freie Strecken und Knotenpunkte an Autobahnen (Autobahnkreuze/-dreiecke, Anschlussstellen) außerhalb von Tunneln liegen ebenfalls aktuelle Untersuchungen vor, die für die vorgesehene vergleichende Beurteilung der Verkehrssicherheit und des Verkehrsablaufs herangezogen werden können.

PÖPEL-DECKER/SCHEPERS/KOßMANN (2003) führten auf der Grundlage des Unfallgeschehens aus den Jahren 1997 bis 2000 streckenbezogene Unfallanalysen für Autobahnen durch. Hierbei wurden auch UKR für die untersuchten Abschnitte zum Preisstand 2000 ermittelt, mit getrennter Betrachtung einerseits der Unfälle mit Personenschaden und andererseits aller Unfälle (vgl. Tabelle 4).

Tab. 4: Mittlere UKR für Abschnitte 2- und 3-streifiger Richtungsfahrbahnen zum Preisstand 2000 nach PÖPEL-DECKER/SCHEPERS/KOßMANN (2003)

Querschnitt	UKR [€/ (1.000 Kfz•km)]	
	U(P)	alle U
2-streifige Richtungsfahrbahn	13,156	14,631
3-streifige Richtungsfahrbahn	12,243	13,753

LEMKE (2007) führte streckenbezogene Analysen der Verkehrsunfälle der Jahre 2002 und 2004 durch. Die Unfallkosten wurden unter Verwendung pauschaler Unfallkostensätze zum Preisstand 2000 ermittelt (vgl. Tabelle 5).

Streckenabschnitte wurden nur dann berücksichtigt, wenn für die vorhandenen Querschnitte Verkehrsstärken vorlagen, die dem Einsatzbereich der

Regelquerschnitte (4-streifig 10.000 bis 35.000 Kfz/d, 6-streifig 30.000 bis 55.000 Kfz/24h) entsprachen. Für die Zuordnung der Querschnitte zu den befestigten Breiten der Richtungsfahrbahnen wurden die folgenden Festlegungen getroffen: als RQ 29,5 und RQ 31 gelten 2-streifige Richtungsfahrbahnen mit befestigten Breiten von mindestens 10,50 m, als RQ 35,5 und RQ 36 gelten 3-streifige Richtungsfahrbahnen mit befestigten Breiten von mindestens 14,50 m.

Tab. 5: Unfallkostenraten für Unfälle mit Personenschaden und schwerwiegendem Sachschaden an Autobahnen (LEMKE, 2007)

Regelquerschnitt	Anzahl der Abschnitte	Länge der Abschnitte	UKR (U _{P,SS}) [€/ (1.000 Kfz•km)]
RQ 29,5 RQ 31	301	2.084	10,8
RQ 35,5 RQ 36	108	751	11,7
Alle RQ	409	2.835	11,2
BAB gesamt	5.158	23.541	11,6

Aus der Untersuchung wurde für den RQ 29,5 eine UKR von 10,8 €/ (1.000 Kfz•km) ermittelt. Die mittlere UKR für Abschnitte mit einem RQ 35,5 beträgt 11,7 €/ (1.000 Kfz•km).

Eine Untersuchung zu Gestaltung und Bemessung von Autobahnen mit 4-streifigen Richtungsfahrbahnen wurde von BRILON et. al (2007) durchgeführt. Neben einer Analyse des Verkehrsablaufs und einer Beurteilung der Anforderungen an die Entwässerung wurde eine Unfallanalyse für einen 28,5 km langen Abschnitt der A 5 durchgeführt. Es wurden insgesamt 2.075 Unfälle der Jahre 2001 bis 2003 ausgewertet. Die von BRILON et al. (2007) berechneten Unfallkenngrößen wurden unter Verwendung pauschaler Unfallkostensätze durchgeführt. Unfälle mit Sachschaden wurden bei der Berechnung der Unfallkenngrößen nicht berücksichtigt. Für die Unfallkostenraten aller Unfälle mit Personenschäden UKR(P) wurden Werte zwischen 6,7 und 7,8 €/ (1.000 Kfz•km) für den 4-streifigen Querschnitt der A 5 angegeben. Die von BRILON et al. (2007) für diesen Abschnitt ermittelte durchschnittliche UKR liegt mit 7,4 €/ (1.000 Kfz•km) unter den Mittelwerten der UKR des gesamten deutschen Autobahnnetzes.

Von FRIEDRICH et al. (2008) wurden der Verkehrsablauf und die Verkehrssicherheit an Einfahrten der Typen E 4 und E 5 an 3-streifigen Richtungsfahrbahnen untersucht. Dabei stand die Ermittlung von Bemessungsdiagrammen zur Be-

stimmung der Qualitätsstufen für die Bewertung des Verkehrsablaufs 2-streifiger Einfahrten an 3-streifigen Richtungsfahrbahnen im Vordergrund. Ein weiteres Ziel der Untersuchung war die empirische Analyse der Verkehrssicherheit in 2-streifigen Einfahrten. Für die Analyse der Verkehrssicherheit wurden für fünf Einfahrten vom Typ E 4 und sechs Einfahrten vom Typ E 5 makroskopische und mikroskopische Unfallanalysen auf der Basis polizeilicher Verkehrsunfallanzeigen aus drei aufeinanderfolgenden Jahren durchgeführt. Neben dem Unfallgeschehen im Bereich der eigentlichen Einfahrtöffnung wurde ein so genannter „Beeinflussungsbereich“ unter- und oberhalb der Einfahrtöffnung in die Unfallanalyse mit einbezogen. Die Abgrenzung dieses Beeinflussungsbereiches erfolgte 500 m vor sowie 500 m nach der eigentlichen Einfahrtöffnung. Das Unfallgeschehen in den Rampen wurde nicht berücksichtigt.

An den elf von FRIEDRICH et al. (2008) untersuchten Einfahrten ereigneten sich im Betrachtungszeitraum insgesamt 338 Unfälle. Unfälle mit Getöteten konnten nicht beobachtet werden. Unfälle mit schwerem Personenschaden traten nur sehr selten auf. Die Berechnung der Unfallkennwerte erfolgte für jede Einfahrt getrennt für die Beeinflussungsbereiche unter- und oberhalb der eigentlichen Einfahrtöffnung sowie für die Einfahrtöffnung selbst. Nach Ansicht von FRIEDRICH et al. (2008) können die Einfahrtbereiche nicht mehr als Punkte behandelt werden (Länge bis zu 2.000 m). Im Gegensatz zu der in den „Hinweisen zur Methodik der Untersuchung von Straßenverkehrsunfällen“ der FGSV (1991) beschriebenen Vorgehensweise zur Berechnung von Unfallkenngrößen an planfreien Knotenpunkten wurden deshalb die Längen der einzelnen Bereiche berücksichtigt. Die Berechnung der Unfallkenngrößen erfolgte anhand pauschaler Unfallkostensätze zum Preisstand 2000. Die Ergebnisse der Unfallanalyse zeigen nur bedingt Unterschiede zwischen den betrachteten Einfahrttypen und Knotenpunktsystemen. Zwar wurden für die einzelnen Bereiche unterschiedlich hohe Unfallkostenraten berechnet, eine gemeinsame Betrachtung aller drei Bereiche zeigte jedoch, dass sich die Unfallkostenraten der betrachteten Einfahrten E 4 und E 5 an den drei Knotenpunktsystemen nur geringfügig unterscheiden. Um die berechneten Unfallraten für die Einfahrttypen E 4 und E 5 mit den Unfallraten anderer Elemente an planfreien Knotenpunkten vergleichen zu können, wurden aus zurückliegenden Untersuchungen die Unfallraten für Ausfahrten und Verflechtungsstrecken ermittelt.

KATHMANN et al. (2014) haben die Verkehrssicherheit von Einfahrten des Typs E1 untersucht. Die Ergebnisse der Unfallanalyse zeigen, dass Einfahrten des Typs E1 im Hinblick auf die Verkehrssicherheit grundsätzlich als unkritisch einzustufen sind.

Das Unfallgeschehen an 2-streifigen Ausfahrten wurde durch WEISER/SILLUS/LIPPOLD (2006) mit Hilfe einer makroskopischen Unfallanalyse untersucht. Von den 20 berücksichtigten Ausfahrten entsprachen vier dem Ausfahrttyp A 3 (nur mit anschließender Fahrstreifenabstraktion auf der Hauptfahrbahn), elf dem Ausfahrttyp A 4 und fünf dem Ausfahrttyp A 5. Für die Untersuchung wurde ein einheitlicher Untersuchungsbereich von 2.400 m vor und 500 m hinter der Trenninselspitze festgelegt. Für die Berechnung der Unfallkennwerte wurden angepasste Unfallkostensätze zum Preisstand 2000 zu Grunde gelegt. Für die Ausfahrten des Typs A 5 wurden die günstigsten Unfallkostenraten ermittelt. Die mittleren Unfallkostenraten der Ausfahrten des Typs A 4 liegen etwas höher als beim Typ A 5, aber deutlich unter denen des Typs A 3 mit anschließender Fahrstreifenabstraktion auf der Hauptfahrbahn.

Um die Verkehrssicherheit an Ausfahrten vom Typ A 2 gemäß den RAL-K-2 (1976) zu beurteilen, haben FRIEDRICH/IRZIK/HOFFMANN (2006) eine makroskopische und eine mikroskopische Unfallanalyse an sechs Ausfahrten vom Typ A 2 durchgeführt. Insgesamt wurden 671 Unfälle für die Berechnung der Unfallkennwerte zu Grunde gelegt. Dabei wurden alle Unfälle einbezogen, die sich direkt im Ausfahrtbereich, in einem 2.400 m langen Beeinflussungsbereich vor dem Beginn der Verziehung sowie 300 m in der anschließenden Rampe (gemessen ab der Trenninselspitze) ereignet haben. Auf Grund der geringen Anzahl von Unfällen mit Personenschaden (109 Unfälle) erfolgte die Berechnung der Unfallkennwerte mit Hilfe pauschaler Unfallkostensätze zum Preisstand 2000. Für einen Vergleich mit den für die Ausfahrttypen A 3, A 4 und A 5 berechneten Unfallkennwerten von WEISER/SILLUS/LIPPOLD (2006) wurden durch FRIEDRICH/IRZIK/HOFFMANN (2006) mittlere Unfallkennwerte für die Ausfahrten vom Typ A 2 mit richtliniengerechter Markierung und Beschilderung berechnet. Der Vergleich mit den Ausfahrttypen A 4 und A 5 zeigt für den Gesamtbereich der Ausfahrt (ohne Rampe) schlechtere Unfallkennwerte als für den Ausfahrttyp A 2. Verglichen mit den Werten für den Ausfahrttyp A 3 (mit anschließender Fahrstreifenreduktion in der Hauptfahrbahn, Untersuchung WEISER/SILLUS/LIPPOLD, 2006) liegen die berechneten Unfallkennwerte aber deutlich darunter. Auf Grund der

geringen Anzahl von Unfällen sowie der nur bedingt vergleichbaren Kollektive kann nach Ansicht von FRIEDRICH/IRZIK/HOFFMANN (2006) dieser Vergleich nur Tendenzen aufzeigen.

SCHNÜLL et al. (2000) untersuchten die Leistungsfähigkeit von Verflechtungsstrecken an planfreien Knotenpunkten. Das Untersuchungskollektiv bestand aus acht planfreien Knotenpunkten im Raum Hannover und Köln. An diesen wurden sowohl eine makroskopische als auch eine mikroskopische Unfalluntersuchung durchgeführt und Unfallkenngrößen berechnet. Im Rahmen der Untersuchung wurde zudem eine Verkehrssituationsanalyse durchgeführt. Dabei wurden Methoden aus der Verkehrskonflikttechnik auf Grundlage der von ANGENENDT et al. (1987) definierten verkehrssituationsbezogenen Sicherheitskriterien angewendet. Als geeignete Indikatoren wurden kritische Weg-Zeit-Beziehungen, ein Verlassen der Soll-Linie, eine räumliche Annäherung, Überschreitung der situativen Grenzgeschwindigkeit, Missachtung der Verkehrsregelungen sowie Verkehrskonflikte berücksichtigt und als Ergebnis eine Systematik von Unfallmustern erstellt.

Bestimmt wurden Unfallkennwerte (Unfalldichte und -kostendichte sowie Unfallraten und -kostenraten) sowie Verteilungen (z. B. nach Lichtverhältnissen, Straßenzustand, Unfallursache, Unfallfolgen). Die Untersuchungen zeigten, dass Verflechtungsbereiche als sicher eingestuft werden können. Da das Untersuchungskollektiv mit acht Knotenpunkten klein war, fielen Unfälle mit Personenschäden in den Unfallkennziffern deutlich auf. 97 % aller Unfälle waren auf Fehler der Kraftfahrer zurückzuführen, wobei im Ein- und Ausfahrtbereich die Alleinunfälle dominierten (häufigste Unfallursache: nicht angepasste Geschwindigkeit).

Ein Vergleich der berechneten Unfallraten für die Einfahrttypen E 4 und E 5 von FRIEDRICH et al. (2008) mit den Ergebnissen zu Ausfahrten der Typen A 2 bis A 5 von WEISER/SILLUS/LIPPOLD (2006) sowie mit den Ergebnissen zu Verflechtungsstrecken vom Typ V 1 und VR 1 von SCHNÜLL et al. (2000) lässt darauf schließen, dass sich die genannten Elemente bezüglich ihrer Verkehrssicherheit nur geringfügig unterscheiden (vgl. Tabelle 6).

Tab. 6: Vergleichende Zusammenstellung von Unfallraten in Elementen planfreier Knotenpunkte aus abgeschlossenen Untersuchungen (angegeben sind Mittelwerte für die einzelnen Elemente nach FRIEDRICH et al., 2008)

KP-Element und Typ	Quelle	Unfallrate UR [U/(10 ⁶ *Kfz*km)]
Einfahrttyp E 4 (KP-System A)	(FRIEDRICH et al., 2008)	0,39
Einfahrttyp E 5 (KP-System C)	(FRIEDRICH et al., 2008)	0,49
Einfahrttyp E 5 (KP-System D)	(FRIEDRICH et al., 2008)	0,51
Ausfahrt Typ A 2	(FRIEDRICH et al., 2006)	0,67
Ausfahrt Typ A 3	(WEISER et al., 2006)	1,12
Ausfahrt Typ A 4	(WEISER et al., 2006)	0,64
Ausfahrt Typ A 5	(WEISER et al., 2006)	0,45
Verflechtungsstrecke, Typ VR 1	(SCHNÜLL et al., 2000)	0,45
Verflechtungsstrecke, Typ V 1	(SCHNÜLL et al., 2000)	0,25

Ebenfalls von Interesse sind die Erkenntnisse aus dem FE 16.0012/2009 „Bewertung der Sicherheitsbelange der Straßeninfrastruktur“. Im Zuge dieses Projektes wurden die bisher im Entwurf des HVS (Handbuch für die Verkehrssicherheit von Straßen) von BARK et al. (2008) gesetzten Werte für die Grundunfallkostenraten und deren Zu-

schläge unter Berücksichtigung identifizierbarer betrieblicher und infrastruktureller Einflussgrößen für Autobahnen ermittelt. Abgestimmte Ergebnisse zu Unfallkenngrößen an Streckenabschnitten und Knotenpunktelementen lagen jedoch zum Zeitpunkt der Berichtserstellung noch nicht vor.

3.2 Stand des technischen Regelwerks

3.2.1 Entwurf von Straßentunneln in Deutschland

Der Entwurf und Betrieb von Tunneln im Zuge von Bundesautobahnen ist in den RAA (2008) und in den RABT (2006) geregelt.

In den RAA (2008) werden für die Trassierung von Tunneln, als solche gelten Bauwerke mit einer Länge von $L > 80$ m, zu denen auch Lärmschutzeinhausungen und ähnliche Bauwerke zählen, nur wenige Grenzwerte vorgegeben.

Hinsichtlich der Sicherheit und des Betriebsablaufs sind in Deutschland in Tunneln besondere Anforderungen einzuhalten. Diese sind in den RABT (2006) beschrieben und dienen vorrangig der sicheren Verkehrsführung, dem Schutz der Tunnelnutzer sowie der Unterstützung der Einsatzdienste bei der Hilfeleistung bei Bränden, Unfällen und Pannen. Die RABT (2006) legen die Mindestanforderungen an die Ausstattung und den Betrieb von Straßentunneln in Deutschland fest.

In begründeten Fällen kann von diesen baulichen und technischen Vorgaben abgewichen werden. Ist dies für einen Straßentunnel mit einer Länge von $L \geq 400$ m der Fall oder liegt eine besondere Charakteristik vor, so ist eine Sicherheitsbewertung auf der Basis einer Risikoanalyse durchzuführen. Die hierfür zu berücksichtigenden Parameter werden in den RABT (2006) benannt, u. a.:

- Tunnellänge,
- Anzahl der Tunnelröhren,
- Anzahl der Fahrstreifen,
- Fahrstreifenbreite,
- Querschnittsgeometrie,
- Vorhandensein von unterirdischen Ein- und Ausfahrten.

Die Bemessung im Hinblick auf die Kapazität sowie die Bestimmung der Qualität des Verkehrsablaufs erfolgt entsprechend dem HBS (2001/2009).

Weitere Hinweise bezüglich der wegweisenden Beschilderung geben die RWBA (2000). Die RWBA (2000) regelt die Gestaltung der wegweisenden Beschilderung auf Bundesautobahnen und gilt somit auch für die Autobahntunnelstrecken.

Entwurfs- und Betriebsmerkmale

Nach den RAA (2008) wird empfohlen, die zulässige Höchstgeschwindigkeit in Autobahntunneln in

der Regel auf $V_{zul} = 80$ km/h zu beschränken. Auch die RABT (2006) empfehlen eine Beschränkung der zulässigen Höchstgeschwindigkeit im Tunnel auf $V_{zul} = 80$ km/h.

Die verkehrstechnische Bemessung nach dem HBS (2001/2009) erfolgt ausschließlich für Tunnelstrecken in der Ebene, im Gefälle und mit Steigungen bis $s \leq 2$ %, für einem SV-Anteil von 10 % und einer ständigen Geschwindigkeitsbeschränkung von $V_{zul} = 80$ km/h.

Querschnitte

Im Tunnel gilt nach den RAA (2008) ein Verbot von Fahrstreifenreduktionen. Für die Wahl des Tunnelquerschnitts wird in den RAA (2008) auf das „Verfahren für die Auswahl von Straßenquerschnitten in Tunneln“ nach dem ARS Nr. 06/2000 verwiesen. Dieses beinhaltet auch einen Nachweis über die Zweckmäßigkeit von Seitenstreifen. Es ist für mehrstreifige Richtungsfahrbahnen in Tunneln mit Längen zwischen 250 m und 2.000 m anwendbar.

Für die Regelbauweise bei Tunnelstrecken an mehrstreifigen Richtungsfahrbahnen wird zunächst ein im Vergleich zur freien Strecke in der Breite abgeminderter Regelquerschnitt ohne Seitenstreifen zu Grunde gelegt. Anschließend wird geprüft, ob der durch einen zusätzlichen Seitenstreifen erzielbare Nutzen größer ist als die Kosten für diesen Seitenstreifen. Gemäß dem ARS Nr. 06/2000 kommen Seitenstreifen überwiegend bei größeren Längsneigungen und einem hohen SV-Anteil in Betracht, da diesen beiden Faktoren ein starker Einfluss auf den Verkehrsablauf zugemessen wird.

Für eine Querneigung (q) von mehr als 3,5 % ist nach den RABT (2006) eine Verbreiterung der Fahrbahn erforderlich (vgl. Tabelle 7).

Tab. 7: Mehrbreite bei Querneigungen in Tunneln mit Rechteckquerschnitt nach RABT (2006)

q [%]	Mehrbreite [cm]
> 3,5 bis 4,5	5
> 4,5 bis 5,5	10
> 5,5 bis 6,5	10
> 6,5 bis 8,0	20

Linienführung im Lageplan

Für die Trassierung im Lageplan sollte nach den RAA (2008) mit großzügigen Entwurfselementen gearbeitet werden. Weder die RAA (2008) noch die RABT (2006) geben hierfür jedoch gesonderte Grenzwerte für Tunnelstrecken vor.

Linienführung im Höhenplan

Die maximale Längsneigung (s) auf der durchgehenden Hauptfahrbahn sollte nach den RAA (2008) für Tunnel mit einer Länge von $L > 500$ m $s \leq 2,5$ % betragen, sonst $s \leq 3$ %. Für die Längsneigungen von Rampenfahrbahnen von Tunneln der EKA 3 sowie kurzen Abschnitten mit einer Länge von $L \leq 200$ m sollte eine Längsneigung von $s \leq 6$ % eingehalten werden.

Eine Längsneigung von $s > 5$ % ist nach den RABT (2006) zu vermeiden, da sonst die Verkehrssicherheit stark abnimmt. Ausgenommen von diesen Bestimmungen sind begrenzte Tunnellängen von weniger als 200 m der Kategorie EKA 3, bei denen die maximale Längsneigung 6,0 % betragen darf.

Knotenpunkte

In der EKA 1 und EKA 2 sind Ein- und Ausfahrten im Tunnel zu vermeiden. Für die Trassierung von Ein- und Ausfahrten im Bereich der Tunnelstrecken sind derzeit keine gesonderten Grenz- und Richtwerte vorgegeben.

In Rampenfahrbahnen der Kategorie EKA 3 darf die maximale Längsneigung nach den RAA (2008) 6,0 % betragen.

Für die Gestaltung der keilförmigen Einfahrten als Typ E 0 ist in der gültigen RAA (2008) keine Standardlösung vorgesehen.

Bauliche Anlagen

Ab einer Länge von $L \geq 900$ m sind nach den RAA (2008) Nothaltehaltebuchten anzuordnen.

Gemäß dem ARS Nr. 06/2000 ist im Tunnel die Wahl zwischen einem durchgehenden Seitenstreifen und Pannenbuchten möglich. Die Anordnung eines solchen Seitenstreifens muss mit einer Nutzen-Kosten-Abwägung entschieden werden. Kann für einen Tunnel kein Querschnitt mit einem Seitenstreifen gewählt werden, so sind nach den RABT (2006) Nothalte- und Pannenbuchten vorzusehen (vgl. Bild 10). Diese sind ab einer Tunnellänge von $L \geq 9,00$ m erforderlich, bei hohem Lkw-Aufkommen auch schon ab einer Länge von $L \geq 600$ m. Eine Pannenbucht muss mit dem Zeichen (Zeichen 328 StVO) frühzeitig angekündigt werden.

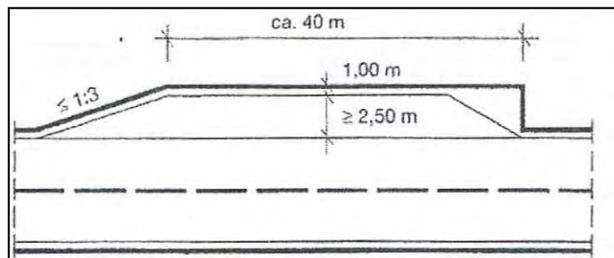


Bild 10: Grundrissform einer Nothalte- und Pannenbucht an einer Richtungsfahrbahn nach RABT (2006)

3.2.2 Entwurf von Straßentunneln in Österreich

In österreichischen Richtlinien ist ein Straßentunnel ein Bauwerk, welches den Zwecken des Straßenverkehrs dient und einen völlig geschlossenen Querschnitt aufweist. Für den Entwurf von Tunneln gibt es im Wesentlichen drei Richtlinien und Vorschriften: Die RVS 09.01.21 (2007), die sich mit der Linienführung im Tunnel befasst, die RVS 09.01.22 (2010), die den Einsatz der Tunnelquerschnitte regelt, und die RVS 09.01.23 (2009) für den Innenausbau. Darüber hinaus sollen die Regelungen der RVS 09.01.24 (2009) für bauliche Anlagen, der RVS 09.01.25 (2009) zum Vorportalbereich, der RVS 09.01.41 (2009) zur Beleuchtung und der RVS 09.02.22 (2010) zur Tunnelausrüstung berücksichtigt werden.

Entwurfs- und Betriebsmerkmale

Die zulässige Höchstgeschwindigkeit entspricht laut der RVS 09.01.21 (2007) der Projektierungsgeschwindigkeit. Für Autobahnen sind die Entwurfsmerkmale der Lage und der Höhe so zu wählen, dass sie einer Projektierungsgeschwindigkeit 100 km/h genügen.

Aus sicherheitstechnischen Überlegungen ist auf die Flüssigkeit des Verkehrs zu achten. Bei Tunnelketten sollte daher durchgehend die gleiche Projektierungsgeschwindigkeit zu Grunde gelegt werden.

Querschnitt

Die Querneigung muss, wie in Deutschland, mindestens 2,5 % betragen und darf 5 % nicht übersteigen. Von dieser Regelung sind Verwindungsstrecken ausgeschlossen. Die Neigung sollte in Kurven im Regelfall in Richtung der Kurveninnenseite ausgerichtet sein. Eine Ausnahme stellen Kurven mit einem größeren Radius von mehr als 2.000 m dar, in denen die Querneigung von 2,5 % auch zur Kurvenaußenseite geneigt werden darf,

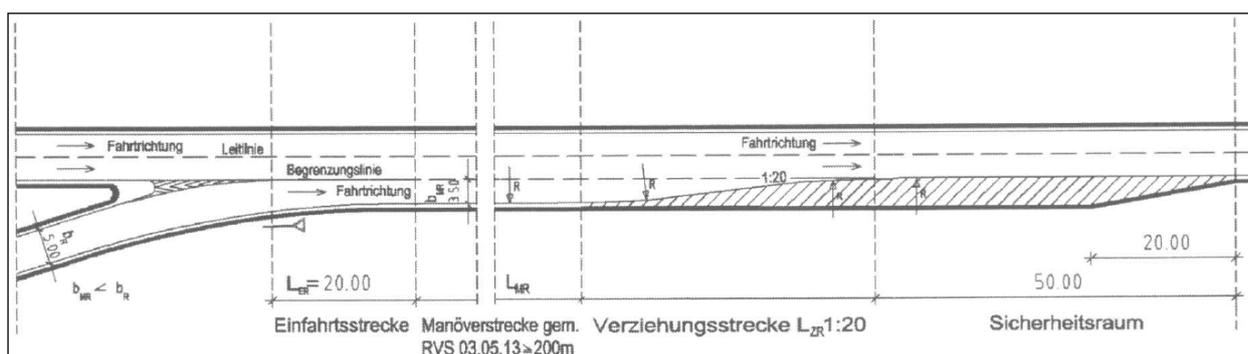


Bild 11: Geometrie und Ausbildung des Einbiegestreifens im Tunnel nach RVS 09.01.21 (2007)

wenn dies Vorteile für die Fahrbahntwässerung mit sich bringt (RVS 09.01.22, 2010).

Lageplan

Der Portalbereich ist möglichst mit einer Geraden auszuführen und Kreisbogenradien sollten, falls diese erforderlich sind, eine maximale Änderung zwischen Freiland und Tunnel um den Faktor 1,5 besitzen. Eine sprunghafte Änderung von der freien Strecke zu dem Portalbereich des Tunnels und umgekehrt müssen vermieden werden. Die Fahrbahnverhältnisse sollten im gesamten Tunnel möglichst gleichbleibend trassiert werden. Wirtschaftlich gesehen ist bei diesen Strecken zu überlegen, ob bei Tunnelketten eine Einhausung der kurzen freien Strecken zwischen den Tunnelabschnitten sinnvoll ist oder vorgesehene Tunnelketten komplett vermieden werden können. Bei der Linienführung ist zu beachten, dass Flucht- und Rettungswege an das öffentliche Straßennetz anzuschließen sind, um den Zugang für Einsatzfahrzeuge sicherzustellen.

Höhenplan

Längsneigungen von mehr als 5 % sind nur dann zulässig, wenn dies auf Grund geographischer Zwänge unvermeidlich ist. Die minimale Längsneigung von 0,5 % darf nur in Ausnahmefällen auf 0,3 % reduziert werden.

Bei einer Längsneigung von mehr als 3 % wird empfohlen, die Belüftungsplanung im Brandfall näher zu betrachten und, wenn notwendig, weitere Maßnahmen zur Verbesserung der Sicherheit zu treffen. Ab einer Längsneigung von 4 % müssen Maßnahmen in Form von Zusatzfahrstreifen, Hinweisschildern oder Informationstafeln getroffen werden, um Auffahrunfälle zu vermeiden.

Bei Tunnellängen von mehr als 500 m, welche in Österreich laut der RVS 09.02.21 (2007) der Gefährdungskategorie III und IV zuzuordnen sind, muss die maximale Längsneigung auf 4 % gemindert werden. Wenn dies durch örtliche Zwänge nicht

durchführbar ist, muss ein weiterer Fahrstreifen addiert werden.

Darüber hinaus werden in der RVS 09.01.21 (2007) Mindestwerte für Kuppenradien in Abhängigkeit von der Projektierungsgeschwindigkeit vorgegeben.

Knotenpunkte

Die Anordnung von Knotenpunkten im Tunnel ist, wenn möglich, zu vermeiden. Bei fehlenden Alternativen, müssen bei deren Planung besondere Einschränkungen und Verkehrssicherheitsvorkehrungen getroffen werden.

Bei planfreien Knoten sollte die Länge der Manöverstrecke nach der RVS 03.05.23 (1997) bestimmt werden und eine Länge von 200 m nicht unterschreiten. Weiterhin muss am Ende des Einfädungsstreifens ein mindestens 50 m langer Sicherheitsraum platziert werden (vgl. Bild 11).

Dieser ist als Sperrfläche auszubilden, bevor der Tunnelquerschnitt wieder verkleinert wird, um bei fehlenden Möglichkeiten des Einfahrens ein Abbremsen zu erlauben, bevor der Streifen endet.

Die Trassierungselemente der Hauptfahrbahn sind so zu wählen, dass diese gegenüber den Bereichen außerhalb des Knotenpunkts einer um 20 km/h höheren Projektierungsgeschwindigkeit genügen.

Bauliche Anlagen

Ab einer Tunnellänge von 1.000 m sollen bei Richtungsverkehr auf der rechten Seite der Fahrbahn (vgl. Bild 12) und im Gegenverkehr auf beiden Seiten der Fahrbahn Pannenbuchten angeordnet werden. Pannenbuchten sind immer mit Notrufnischen abzustimmen. Der Notgehweg sollte im Regelfall in diesem Bereich auf die Fahrbahnebene abgesenkt und lediglich mit einer Markierung begrenzt werden. Es ist ebenso möglich aus betrieblichen Gründen einen erhöhten Gehstreifen mit einer Breite von 70 cm anzuordnen.

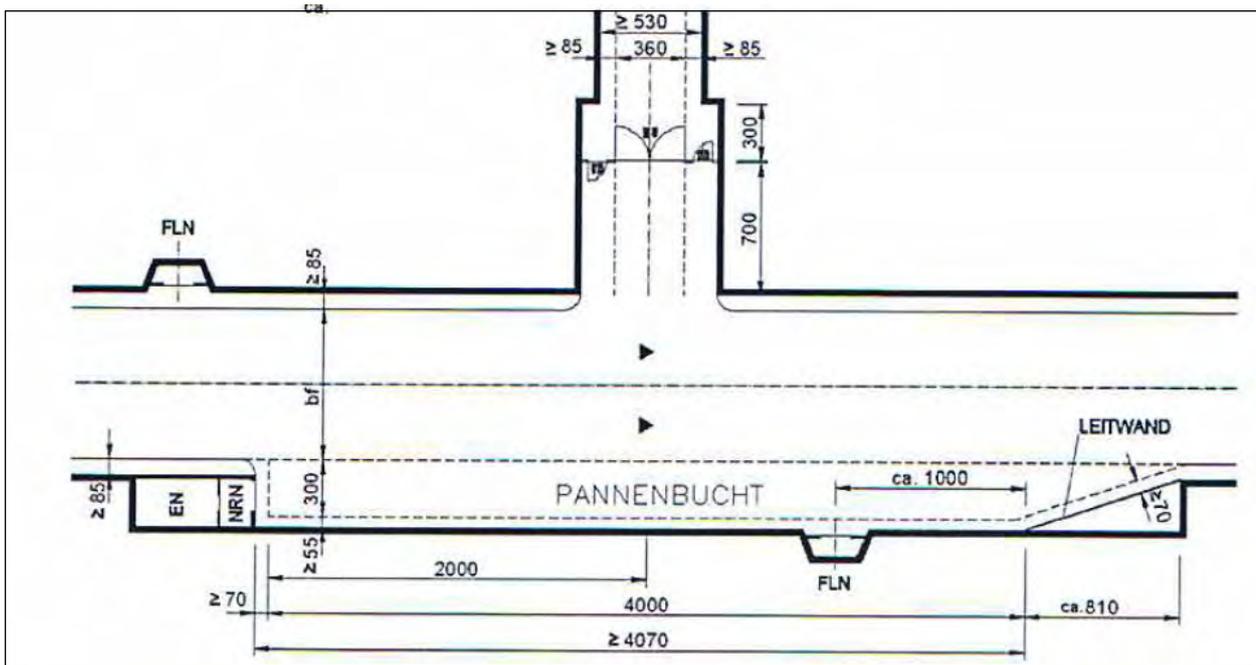


Bild 12: Grundriss einer einseitig angeordneten Pannenbucht mit Einbindung eines Rettungswegs in die andere Tunnelröhre nach RVS 09.01.24 (2009)

3.2.3 Entwurf von Straßentunneln in der Schweiz

Die neuen SN 505 197 (VSS, 2004), als Grundlagentorm für die Projektierung von Tunneln, sowie die SN 505 197/1 (VSS, 2004) für Bahntunnel und die SN 505 197/2 (VSS, 2004) für Straßentunnel lösen die bisherige SN 505 198 (1993) ab. In der SN 505 197 (VSS, 2004) sind die Grundlagen, ungeachtet der Zweckbestimmung, die bei der Projektierung von Verkehrstunneln zu beachten sind, enthalten. Dabei werden auch Aspekte der Sicherheit, der Umwelt und der Tragwerksplanung betrachtet. Die Berücksichtigung von Besonderheiten bei Straßentunneln werden in der SN 505 197/2 (VSS, 2004) beschrieben.

Die Sicherheit von Personen, Umweltgütern und Sachwerten ist während der Ausführung und der Bewirtschaftung zu gewährleisten. Erforderliche Maßnahmen können dabei baulich, betrieblich und organisatorisch sein. Das primäre Ziel der Projektierung ist es, kritische Ereignisse zu verhindern, bei denen Personen, Umweltgüter oder Sachwerte gefährdet werden. Kommt es trotz allem zu einem Ereignisfall, sollen ausmaßmindernde Maßnahmen vorgesehen werden.

Gemäß der SN 505 197/2 (VSS, 2004) hängt die Sicherheit in Straßentunneln von folgenden vier Gruppen von Einflussfaktoren ab:

- Verkehrsteilnehmer,
- Betrieb,
- Infrastruktur,
- Fahrzeuge.

Um Ereignisse, wie beispielsweise Brände, Unfälle oder Pannen zu verhindern, ist es wichtig, dass eine geeignete Infrastruktur und deren uneingeschränkte Gebrauchstauglichkeit vorhanden sind.

Weiterhin ist das richtige Verhalten der Beteiligten in einem Ereignisfall von großer Bedeutung.

Entwurfs- und Betriebsmerkmale

In der SN 505 197 (VSS, 2004) und der SN 505 197/2 (VSS, 2004) sind keine Vorgaben für eine Beschränkung der zulässigen Höchstgeschwindigkeit enthalten.

Querschnitt

Bestandteil der Gestaltung des Tunnelquerschnitts ist das Soll-Profil. Dieses wird auf Grundlage der Ausbaugeschwindigkeit, der Linienführung und der Verkehrsart nach den SN 640 200 (VSS, 2003) bestimmt.

Eine Anordnung von Seitenstreifen in Tunneln ist in der Regel nicht vorgesehen.

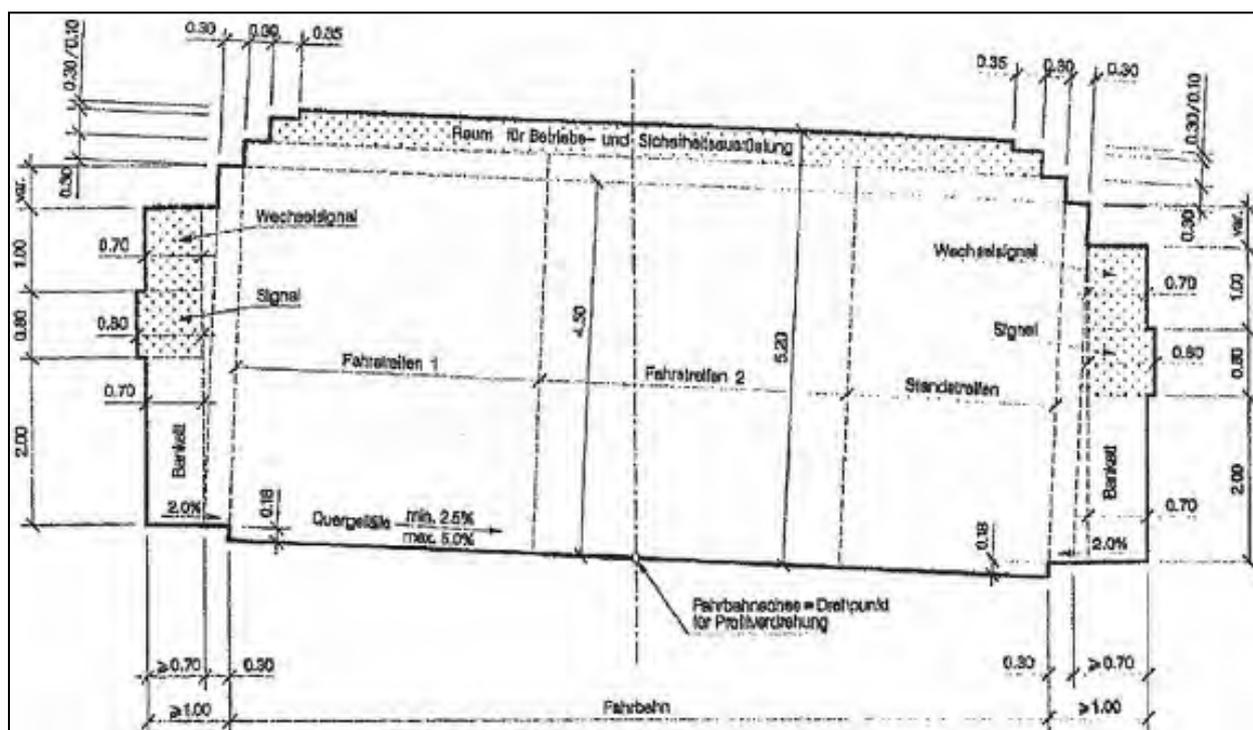


Bild 13: Verkehrstechnischer Nutzraum des Tunnelquerschnitts nach SN 505 197/2 (2004)

Der Querschnitt des Tunnels sollte im Normalprofil dargestellt werden (vgl. Bild 13). In der Anlage der SN 505 197/2 (VSS, 2004) werden Beispiele von Normalprofilen gegeben.

Der Notgehweg im Tunnel, der in der österreichischen Richtlinie als Bankett bezeichnet wird, muss mindestens 1,00 m breit sein; die lichte Höhe über dem Bankett muss 2,00 m betragen.

Eine Verminderung der Fahrbahnbreite ist außerhalb des Tunnels vorzusehen. Die Ausführung der Portale sollte so erfolgen, dass eine sichere Verkehrsführung von der freien Strecke in den Tunnel hinein und umgekehrt gewährleistet wird. Eine befahrbare Verbindung von der einen in die andere Tunnelröhre muss bei zweiröhren Tunneln gewährleistet sein. Auch das Schneeräumkonzept muss bei der Planung der Portalbereiche beachtet werden.

Bei der Gestaltung der Tunnelportale sind ästhetische, bautechnische und sicherheitstechnische Anforderungen zu erfüllen. Diese werden jedoch in den SN 505 197 (VSS, 2004) nicht weiter beschrieben.

Lageplan

Kurze Tunnel, mit einer Länge von unter 200 m, sollten aus Gründen der Sicht in einer Geraden liegen.

Bei langen Tunneln sollten gerade Strecken mit einer Länge über 3 km vermieden werden. Darüber hinaus sollte eine mögliche Blendwirkung im Bereich des Ausfahrtportals bei der Linienführung im Lageplan berücksichtigt werden. Die Blendung des Fahrzeugführers durch direkte Sonneneinstrahlung kann dabei beispielsweise durch eine gekrümmte Linienführung vermindert werden.

Bei Tunneln mit kleinen Kurvenradien ist auf die Kurvenverbreiterung und die Haltesichtweite zu achten. Kann eine ausreichende Sichtweite nicht mehr sichergestellt werden, so kann bei kleinen Radien im Tunnel der Notgehweg oder alternativ der Fahrstreifen verbreitert werden.

Höhenplan

Die Linienführung sollte nach den SN 505 197 (VSS, 2004), wenn immer möglich, den Gebirgsverhältnissen angepasst werden. Dabei sollte die Linienführung so gewählt werden, dass der Tunnel im freien Abfluss zu den Portalen entwässert wird. Ein Längsgefälle von mindestens 0,5 % ist anzustreben (SN 505 197, VSS, 2004).

Richtungsänderungen der Längsneigung haben Auswirkungen auf die Entwässerung und die Tunnellüftung. Die maximale Längsneigung wird aus Gründen der Verkehrssicherheit (Unfallhäufigkeit und Rauchausbreitung) auf 5 % beschränkt. Wannen sollten, wenn möglich, vermieden werden.

Die Querneigung sollte mindestens 2,5 % betragen und 5 % nicht überschreiten.

Knotenpunkte

Verzweigungen innerhalb eines Tunnels sollten möglichst vermieden werden. Wenn dies nicht möglich ist, sollte die Einmündung so gestaltet werden, dass eine Fahrstreifenaddition entsteht. Bei einer Ausfahrt sollte ein ausreichend langer Ausfädelungsstreifen angeordnet werden. In zweiröhriigen Tunneln sind Fahrbahnüberfahrten zu vermeiden.

Verkehrsknoten sind im Portalbereich möglichst zu vermeiden. Wenn dies nicht machbar ist, muss ein Nachweis erfolgen, der einen Rückstau in den Tunnel hinein ausschließt.

Bauliche Anlagen

Als ergänzende Bauteile für die Sicherheit werden noch Nischen, Ausstellbuchten und Fluchtwege aus dem Fahrerraum aufgeführt. Dabei wird eine Unterscheidung in einröhriige und zweiröhriige Tunnel gemacht.

Ab einer Tunnellänge von 300 m sind diese Bauteile für die Sicherheit vorzusehen. Nischen sind in zweiröhriigen Tunneln alle 150 m anzuordnen.

Wie in Deutschland sollen Nothalte- und Pannbuchten angeordnet werden, die in der Norm als Ausstellungsbuchten beschrieben werden. Diese müssen gegenüberliegend angeordnet und nur bei schwierigen Baugrundverhältnissen versetzt werden (SN 505 197/2, VSS, 2004).

Die Verkehrsbeeinflussung erfolgt in einem Tunnel durch Signalisationen und Markierungen. Die Signale müssen den gesetzlichen Vorschriften gemäß Signalisationsverordnung SSV (SCHWEIZER BUNDESRAT, 2012) entsprechen. Detaillierte Angaben sind ebenfalls in der ASTRA-Richtlinie „Signalisierung und Sicherheitseinrichtungen in Tunneln“ (ASTRA, 2011) enthalten.

3.2.4 Verkehrstechnische Bemessung von Straßentunneln

Die Grundlage der verkehrstechnischen Bemessung von Straßen in Deutschland ist das HBS (2001/2009). Für Autobahnen werden Bemessungsverfahren für Abschnitte außerhalb der Knotenpunkte sowie für planfreie Knotenpunkte angegeben. Die Bemessungsverfahren basieren auf

dem Konzept der Qualitätsstufen des Verkehrsablaufs, das an das „Level of Service“-Konzept des amerikanischen HCM (2000) angelehnt ist. Danach erfolgt die Einschätzung der Qualität des Verkehrsablaufs für eine definierte Spitzenstunde anhand von sechs Stufen des Verkehrsablaufs (A bis F).

Das maßgebende Kriterium für die Beurteilung von Autobahnabschnitten ist der Auslastungsgrad, d. h. der Quotient aus der Bemessungsverkehrsstärke und der Kapazität. Der Auslastungsgrad wurde gewählt, um zu berücksichtigen, dass beispielsweise verringerte Geschwindigkeiten auf Steigungsstrecken oder im Bereich von Geschwindigkeitsbeschränkungen (z. B. Tunnelstrecken) nicht zu einer Reduzierung des Qualitätsniveaus führen (vgl. BRILON/GEISTEFELD, 2007).

Zur verkehrstechnischen Bemessung von Autobahntunnelstrecken außerhalb der Einflussbereiche von Knotenpunkten werden im HBS (2001/2009) entsprechende Kapazitäten und q-V-Beziehungen für 2- und 3-streifige Richtungsfahrbahnen angegeben. Diese basieren im Wesentlichen auf Simulationsrechnungen, die anhand empirischer Daten, u. a. von BRILON/LEMKE (2000), kalibriert wurden.

Die einzige Einflussgröße, nach der die angegebenen q-V-Beziehungen für Tunnelstrecken bislang unterschieden werden, ist die Fahrstreifenanzahl. Die q-V-Beziehungen gelten ausschließlich für Tunnelstrecken in der Ebene, im Gefälle und mit Steigungen bis $s \leq 2\%$, einem SV-Anteil von 10 % und einer ständigen Geschwindigkeitsbeschränkung von $V_{zul} = 80$ km/h (vgl. Bild 14). Eine weitere Differenzierung wie bei den Außenstrecken nach Lage, Längsneigung und SV-Anteil ist bei den q-V-Beziehungen derzeit nicht gegeben. Die Kapazitäten dagegen werden nach SV-Anteilen von 0 %, 10 % und 20 % weiter differenziert angegeben (vgl. Tabelle 8). Im Rahmen der derzeit laufenden Fortschreibung des HBS erfolgte mit der Aktualisierung der Bemessungswerte für Autobahnabschnitte eine weitergehende Unterscheidung nach der Lage der Tunnelstrecke innerhalb oder außerhalb von Ballungsräumen. Sowohl die q-V-Beziehungen (vgl. Bild 15 bis Bild 18) als auch die Kapazitäten (vgl. Tabelle 9 und Tabelle 10) wurden hierzu auf Basis der Erkenntnisse von BRILON/GEISTEFELDT (2009) abgeleitet und entsprechend angepasst.

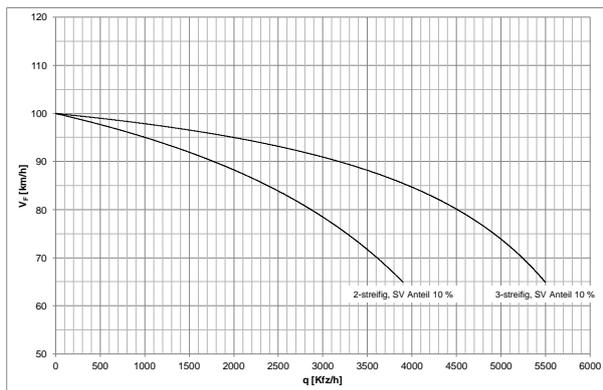


Bild 14: Mittlere Pkw-Fahrtgeschwindigkeit in Abhängigkeit von der Verkehrsstärke für Tunnelstrecken auf Autobahnen (für Ebene, Gefälle und Steigung bis 2 %) nach HBS (2001/2009)

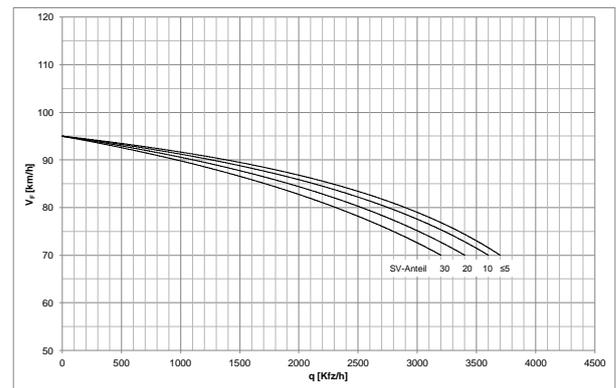


Bild 17: Mittlere Pkw-Fahrtgeschwindigkeit in Abhängigkeit von der Verkehrsstärke für 2-streifige Tunnelstrecken auf Autobahnen außerhalb von Ballungsräumen (für Ebene, Gefälle und Steigung bis 2 %) nach HBS (2014)

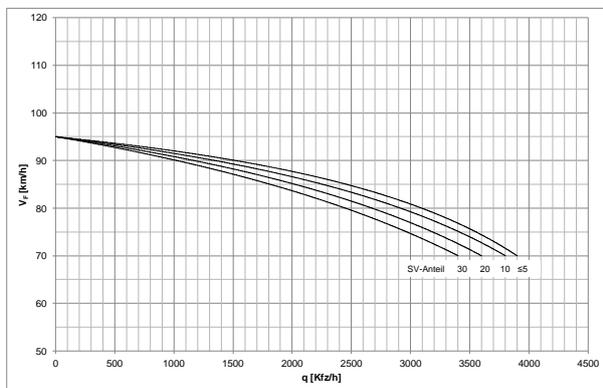


Bild 15: Mittlere Pkw-Fahrtgeschwindigkeit in Abhängigkeit von der Verkehrsstärke für 2-streifige Tunnelstrecken auf Autobahnen innerhalb von Ballungsräumen (für Ebene, Gefälle und Steigung bis 2 %) nach HBS (2014)

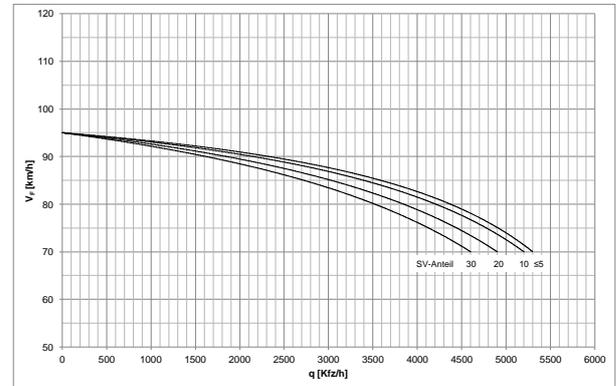


Bild 18: Mittlere Pkw-Fahrtgeschwindigkeit in Abhängigkeit von der Verkehrsstärke für 3-streifige Tunnelstrecken auf Autobahnen außerhalb von Ballungsräumen (für Ebene, Gefälle und Steigung bis 2 %) nach HBS (2014)

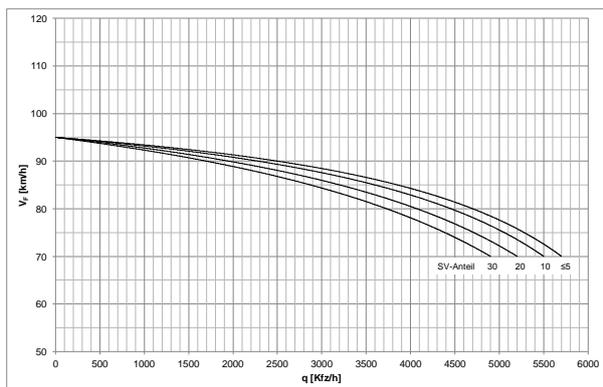


Bild 16: Mittlere Pkw-Fahrtgeschwindigkeit in Abhängigkeit von der Verkehrsstärke für 3-streifige Tunnelstrecken auf Autobahnen innerhalb von Ballungsräumen (für Ebene, Gefälle und Steigung bis 2 %) nach HBS (2014)

Tab. 8: Kapazitäten für Tunnelstrecken auf Autobahnen (für Ebene, Gefälle und Steigung bis 2 %) nach HBS (2001/2009)

SV-Anteil [%]	Kapazität [Kfz/h]	
	2-streifig	3-streifig
0	4.100	5.800
10	3.900	5.500
20	3.700	5.200

Tab. 9: Kapazitäten für Tunnelstrecken auf Autobahnen innerhalb von Ballungsräumen (für Ebene, Gefälle und Steigung bis 2 %) nach HBS (2014)

SV-Anteil [%]	Kapazität [Kfz/h]	
	2-streifig	3-streifig
≤ 5	3.900	5.700
10	3.800	5.500
20	3.600	5.200
30	3.400	4.900

Tab. 10: Kapazitäten für Tunnelstrecken auf Autobahnen außerhalb von Ballungsräumen (für Ebene, Gefälle und Steigung bis 2 %) nach HBS (2014)

SV-Anteil [%]	Kapazität [Kfz/h]	
	2-streifig	3-streifig
≤ 5	3.700	5.300
10	3.600	5.200
20	3.400	4.900
30	3.200	4.600

3.2.5 Zusammenfassung der Ergebnisse und Präzisierung der zu behandelnden Forschungsfragen

Als Fazit der ausgewerteten Literatur kann festgehalten werden, dass Ein- und Ausfahrten in Tunnelstrecken in vielerlei Hinsicht kritischer zu bewerten sind als auf Außenstrecken. Darüber, wie in Tunnelstrecken im Vergleich zu Außenstrecken etwa Trassierungsgrenzwerte großzügiger anzusetzen, Mindestabstände von Knotenpunkten zu vergrößern oder etwa Ein- und Ausfahrtbereiche übersichtlicher zu gestalten sind, um das gleiche Verkehrssicherheitsniveau wie auf Außenstrecken zu erreichen, ist dagegen wenig bekannt.

Auf Basis der Ergebnisse der Grundlagenanalyse sowie der weiteren Erkenntnisse aus der Erhebung der Tunneldaten werden die folgenden Forschungsfragen formuliert.

1. Wie sollen Ein- und Ausfahrten an Tunnelquerschnitten mit und ohne Seitenstreifen unter Berücksichtigung der Verkehrssicherheit künftig gestaltet werden?
2. Welche Lage der Ein- oder Ausfahrt im Bezug auf den Tunnel ist dabei vorteilhaft?

3. Wie soll die durchgehende Hauptfahrbahn im Bereich von Tunneln künftig gestaltet werden?
4. Wie sollen Ein- und Ausfahrten in Tunneln unter Berücksichtigung des Verkehrsablaufs künftig ausgestaltet werden?
5. Welche Rampenparameter, z. B. Länge der Ein- und Ausfädelungstreifen, Scheitelradius sollen künftig gewählt werden?
6. Welche Sonderlösungen sollen möglicherweise ins Regelwerk aufgenommen werden?
 - hintereinander liegende Einfahrten EE1 bis EE3 (Doppeleinfahrten) nach den RAA (2008),
 - Linkseinfahrten E1* und E3* (bisher nur mit entsprechender Fahrstreifenaddition zulässig),
 - hintereinander liegende Ausfahrten?

Welche Anforderungen sind bei Sonderlösungen an die Wegweisung zu stellen?

7. Welche Entwurfselemente können/sollen künftig in der EKA 3 für Tunnel Anwendung finden?
 - Ist die empfohlene Einfahrtlänge von 150 m an Autobahnen nach RAA (2008) für die EKA 3 in Tunneln sinnvoll? Diese kürzere Länge bei der EKA 3 ist aus der Sicht der Geschwindigkeit nicht nachvollziehbar. Denn bei Autobahnen der EKA 1 und EKA 2 wird die Geschwindigkeit im Tunnel im Regelfall ebenfalls auf $V_{zul} = 80$ km/h begrenzt.

Erste Hinweise auf mögliche Antworten zu diesen Fragestellungen liefern dabei die folgenden Ergebnisse der Grundlagenanalyse:

zu Frage 1:

- An Ein- und Ausfahrten muss eine ausreichende Sicht von der Einfahrtrampe auf die Hauptfahrbahn und umgekehrt vorhanden sein (KAYSER/BALTZER/LEVEN, 1985).
- Der Seitenstreifen sollte um mindestens 300 m nach Ende des Einfädelungstreifens weitergezogen werden (LANZ et al., 1995).
- Bei hohem Verkehrsaufkommen in der Einfahrt ist die Länge des Einfädelungstreifens auf 300 m zu verlängern (KAYSER/BALTZER/LEVEN, 1985).
- Fahrstreifensubtraktionen sollten möglichst eindeutig angezeigt werden (KAYSER/BALTZER/LEVEN, 1985).

zu Frage 2:

- Die Inselspitzen der Einfahrtbereiche sollten weder im Bereich des Einfahrtportals (150 m

vor bis 100 m danach) noch im Bereich des Ausfahrtportals (250 m vor bis 50 m danach) angeordnet werden (LANZ et al., 1990).

- Der Einfahrtbereich soll in Lage und Höhe in Bereichen mit einer gestreckten Linienführung liegen (LANZ et al., 1995).
- Rechtskurven im Einfahrtbereich sind zu vermeiden (LANZ et al., 1995).

zu Frage 3:

- Eine frühzeitige Geschwindigkeitsbeschränkung auf der Hauptfahrbahn und in der Einfahrt auf 80 km/h ist sicherzustellen (LANZ et al., 1995).
- Trassierungselemente der durchgehenden Hauptfahrbahn im Bereich von Knotenpunkten sollten so gewählt werden, dass sie einer um 20 % höheren Projektierungsgeschwindigkeit als auf der freien Strecke außerhalb von Knotenpunkten genügen (RVS 03.05.23).

zu Frage 4:

- Die Anlagen sind so zu dimensionieren, dass sie bei den maßgebenden Belastungen eine Leistungsreserve von 20 % aufweisen (LANZ et al., 1995).

Die Hinweise zur möglichen Beantwortung der Fragen 5 bis 7 gingen aus der Literatur nicht hervor.

4 Tunnel im Bundesautobahnnetz

4.1 Erfassung von Tunneldaten

Mit der Einführung der RABT (2006) wurde die EG-Richtlinie 2004/54/EG über Mindestanforderungen an die Sicherheit von Tunneln im transeuropäischen Straßennetz in nationales Recht umgesetzt. In Verbindung mit Artikel 15 (1) der EG-Richtlinie und gemäß dem ARS Nr. 10/2006 sind regelmäßige Berichte über Brände und Unfälle in Tunneln sowie deren Häufigkeit und Ursachen zu erstellen. Hierzu hat die Bundesanstalt für Straßenwesen in Zusammenarbeit mit den Verwaltungsbehörden der Länder einen so genannten Ereignismeldebogen erstellt, der gemäß dem ARS Nr. 10/2006 und dem ARS Nr. 03/2008 für Tunnel im Zuge von Bundesfernstraßen ab einer Länge von 400 m von den jeweiligen Verwaltungsbehörden auszufüllen und der Bundesanstalt für Straßenwesen zu übermitteln ist. Die Berichte sind jährlich, spätestens bis zum 31. März des Folgejahres der Bundesanstalt für Straßenwesen zu übergeben.

Die Erfassung der relevanten Tunnelbauwerke erfolgte anhand einer Auswertung der für die Ereignismeldebögen bei der Bundesanstalt für Straßenwesen vorliegenden Datenbank.

Die Auswertung der Ereignismeldeliste zeigte, dass Meldungen zu insgesamt 59 Tunneln mit einer Länge von $L \geq 400$ m an Autobahnen aus zehn Bundesländern vorliegen. Eine Liste der erfassten Tunnel kann der Anlage 2 entnommen werden.

4.2 Auswertung der Ereignismeldebögen

4.2.1 Grunddaten

Die Grunddaten der Ereignismeldebögen enthalten die wichtigsten anlagenspezifischen Daten eines Tunnels (vgl. Bild 19). Eine Auswertung der Ereignismeldeliste zu den 59 Tunneln hat gezeigt, dass nicht für alle diese Tunnel die Grunddaten in gewünschtem Umfang bzw. in der gewünschten Qualität vorliegen.

43 der 59 Tunnel haben einen 4-streifigen Regelquerschnitt (elf davon mit einem Seitenstreifen). Über einen 6-streifigen Regelquerschnitt verfügen 12 Tunnel (davon zehn mit Seitenstreifen). Für die verbleibenden vier Tunnel konnte auf Grundlage der Datenbank der Bundesanstalt für Straßenwesen kein Regelquerschnitt ermittelt werden.

Tunnelname	
ASB-Nummer	
Bundesland	
Zuständige Verwaltungsbehörde	
Zuständiger Tunnelmanager	
Nächstgelegener Ort (Tunnel)	
Straße	Klasse / Nr.
TERN-Straße (Eintrag der E-Nr.)	
Jahr der Erstinbetriebnahme des Tunnels	
Jahr der letztmaligen Inbetriebnahme des Tunnels	
Anzahl der Tunnelröhren	
Verkehrsart	
Regelquerschnitt im Tunnel	RQ
	lichte Breite in m
	lichte Höhe in m
Gesamtanzahl der Fahrstreifen (im Regelquerschnitt)	
Seitenstreifen	
Pannengebühren	
Zufahrten im Tunnel	
Abfahrten im Tunnel	
Tunnellängen je Röhre	m (/ m)
Maximale Längsneigung	%
	über welche Länge [m]
Lüftungssystem	
Löschwasserleitung	
DTV (aktuell bekannter)	Kfz / 24 h
	Bezugsjahr (Jahr der Verkehrszählung)
Lkw-Anteil (aktuell bekannter)	%
	Bezugsjahr (Jahr der Verkehrszählung)
Zulässige Geschwindigkeit	km/h
Transport gefährlicher Güter	Tunnelcode
	Sonstige Beschränkung

Bild 19: Grunddaten der Ereignismeldungen (BASt, 2012)

In 38 der 59 Tunnel gilt eine zulässige Höchstgeschwindigkeit von $V_{zul} = 80$ km/h. 12 Tunnel werden mit einer $V_{zul} = 100$ km/h betrieben. In zwei Tunneln gilt eine zulässige Höchstgeschwindigkeit von $V_{zul} = 60$ km/h. Für die verbleibenden sieben Tunnel liegt in den Grunddaten keine Angabe zur V_{zul} vor.

Von den insgesamt 59 Tunneln haben zehn Tunnel mindestens eine Einfahrt und zwölf Tunnel mindestens eine Ausfahrt (vgl. Anlage 3) im Tunnel. Mittels einer ersten Auswertung von Luftbildern konnten 12 Einfahrtbereiche und 13 Ausfahrtbereiche festgestellt werden, die entweder vollständig innerhalb des Tunnels liegen oder im Tunnel beginnen bzw. enden.

Für 44 von 59 Tunneln liegen Angaben zur maximalen Längsneigung vor. Diese variieren zwischen -0,03 % und 5,1 %. In 16 Tunnel beträgt die

maximale Längsneigung $\max. s \geq 2,5 \%$ (vgl. Tabelle 11). Gemäß den Vorgaben der RAA (2008) sollte die maximale Längsneigung auf der durchgehenden Hauptfahrbahn für Tunnel mit einer Länge von $L > 500 \text{ m}$ $\max. s \leq 2,5 \%$ betragen, sonst $s \leq 3 \%$. Diese Vorgaben werden in 13 Tunnel nicht eingehalten. Eine Längsneigung von $s > 5 \%$, die entsprechend den Vorgaben der RABT (2006) zu vermeiden ist, wird im Tunnel Pellinger-Berg an der A 8 um 0,1 % überschritten.

Tab. 11: Tunnel an BAB mit einer maximalen Längsneigung $\max. s \geq 2,5 \%$

Land	Straße	Name	Ort	V _{zul} [km/h]	Länge je Röhre [m]	max s [%]
BW	A 81	Hohentwiel	Singen	100	833	2,5
BY	A 99	Allach	München	80	1.020	2,5
TH	A 38	Höllbergtunnel	Bernterode	80	879	2,5
BY	A 99	Aubing	München	80	1.935	2,7
HE	A 44	Tunnel Hopfenberg	Walburg	80	543	2,8
NI	A 38	Heidkopftunnel	Friedland	80	1.724	3,2
NI	A 31	Emstunnel	Leer	k.A.	946	3,4
BE	A 100	Tunnel Ortsteil Britz	Berlin	80	1.713	3,7
BW	A 861	Nollinger Berg	Rheinfelden	100	1.268	3,9
NW	A 46	Olpe	Meschede	80	540	3,9
BE	A 111	Flughafen Tegel	Berlin	80	934	4,0
BW	A 81	Heilsberg	Gottmadingen	100	483	4,0
TH	A 71	Eichelberg	Ritschenhausen	80	1.123	4,0
NW	A 46	Hemberg	Meschede	80	400	4,5
BE	A 111	Tegel (Ortskern)	Berlin	80	753	5,0
SL	A 8	Pellinger-Berg Wellingen	Merzig/ Wellingen	80	596	5,1

Angaben zu Längsneigungen von Rampenfahrbahnen sind in den Ereignismeldebögen nicht enthalten. Neben der maximalen Längsneigung liegen keine weiteren Trassierungsparameter der durchgehenden Hauptfahrbahn im Tunnel, der Ein- und Ausfahrtbereiche sowie der anschließenden Rampen vor.

Die Auswertung der Grunddaten aus Ereignismeldungen hat auch gezeigt, dass einige der insgesamt 59 betrachteten Tunnel Besonderheiten aufweisen. Die Besonderheiten beziehen sich vor allem auf Betriebsmerkmale, Lage der Tunnel im Netz und auf den Zeitpunkt der Verkehrsfreigabe. Folgende Besonderheiten konnten dem Kollektiv aus 59 Tunneln entnommen werden:

- Tunnel mit einer $V_{zul} = 60 \text{ km/h}$ (vgl. Tabelle 12),
- Tunnel im Zuge von kurzen BAB-Teilstrecken (vgl. Tabelle 13),
- halbseitige Tunnel, Galerien (vgl. Tabelle 14),
- Tunnel am Ausbauende (vgl. Tabelle 15).

Tab. 12: Tunnel mit V_{zul} von 60 km/h

Land	Straße	Tunnelname
BE	A 111	Beyschlagsiedlung
TH	A 4	Lodeburg

Tab. 13: Tunnel im Zuge von kurzen BAB-Teilstrecken

Land	Straße	Tunnelname
BW	A 98	Bürgerwald
HE	A 44	Tunnel Hopfenberg
TH	A 71	Schmücketunnel

Tab. 14: Halbseitige Tunnel und Tunnel mit nur einer Röhre

Land	Straße	Tunnel
BW	A 8	Lämmerbuckeltunnel ¹
BW	A 861	Nollinger Berg ¹
NI	A 39	Lärmschutzunnel
NW	A 46	Galerie Hansasträße
NW	A 46	Galerie Sternenberg

¹Tunnel mit einer Röhre

Tab. 15: Tunnel am Ausbauende

Land	Straße	Tunnel	Abstand Ausbauende
BW	A 81	Heilsberg	ca. 2,0 km
BY	A 7	Grenztunnel	0
BY	A 7	Reinertshof ¹	ca. 3,5 km
NW	A 44	Birth	ca. 1,5 km
RP	A 62	Hörnchenberg	ca. 3,5 km

¹erst seit 2009 in Betrieb

4.2.2 Ereignisse zum Unfallgeschehen

Für 43 der 58 Tunnel (ohne Elbtunnel) sind Meldungen zu Unfällen aus den Ereignismeldungen verfügbar (vgl. Tabelle 21). Die Ereignisse im Elbtunnel lagen nicht vollständig vor und konnten daher nicht berücksichtigt werden.

Für 32 Tunnel liegen die Ereignismeldungen aus drei oder mehr Jahren vor (davon 23 an 4-streifigen Regelquerschnitten, neun an 6-streifigen Regelquerschnitten); für weitere elf Tunnel liegen Daten aus zwei Jahren (davon neun an 4-streifigen Regelquerschnitten, zwei an 6-streifigen Regelquerschnitten) vor. Für sechs Tunnel liegen nur Unfallzahlen aus einem Jahr vor (vier an 4-streifigen Regelquerschnitten, zwei an 6-streifigen Regelquerschnitten). Auf der Grundlage dieser Daten konnten insgesamt 3.140 Ereignisse an 4-streifigen und 2.195 Ereignisse an 6-streifigen Regelquerschnitten erfasst werden.

Für neun Tunnel liegen lediglich Informationen zu den Grunddaten vor.

Die Auswertung der Unfalldaten zeigt, dass im Untersuchungszeitraum wenige Unfälle mit Personenschaden geschehen sind. Von 411 ausgewerteten Unfällen an 4-streifigen Regelquerschnitten sind 14,6 % Unfälle mit Personenschaden. An 6-streifigen Regelquerschnitten sind insgesamt 568 Unfälle geschehen. Hier beträgt der Anteil der Unfälle mit Personenschaden 10,7 %.

4.3 Festlegungen zu Ereignismeldbögen

In Anbetracht der vorhandenen Besonderheiten im Tunnelkollektiv wurden folgende Festlegungen getroffen:

- Alle Tunnel, für die keine ausreichenden Grunddaten vorliegen, werden nicht berücksichtigt. Dies betrifft die Tunnel Agnesburg und Virngrund an der A 7, den Tunnel Herfatz an der A 96, den Tunnel Hörnchenberg an der A 62 sowie die Lärmschutzgalerie Lindenberg

an der A 39.

- Der Grenztunnel an der A 7 wird auf Grund seiner Lage im Netz nicht weiter untersucht.
- Der Tunnel Beyschlagsiedlung an der A 111 wird auf Grund seiner zulässigen Höchstgeschwindigkeit ($V_{zul} = 60 \text{ km/h}$) nicht weiter untersucht. Dies gilt ebenfalls für den Lodeburgtunnel an der A 4, weil dieser im Betrachtungszeitraum umgebaut wurde.

Auf Grundlage dieser Festlegungen wurde das Kollektiv um acht Tunnel (vgl. Tabelle 16) reduziert.

Tab. 16: Für die Auswertung nicht geeignete Tunnel

Land	Straße	Tunnelname
BE	A 111	Beyschlagsiedlung
BW	A 7	Agnesburg
BW	A 7	Virngrund
BW	A 96	Herfatz
BY	A 7	Grenztunnel
NI	A 39	Lärmschutzunnel
RP	A 62	Hörnchenberg
TH	A 4	Lodeburgtunnel

Im Verlauf der Untersuchung wurde festgestellt, dass die weiteren Auswertungen anhand der Ereignismeldungen allein, nur bedingt möglich sind. Auch beinhalten die Meldungen keine Informationen zur Anzahl oder Lage von Ein- und Ausfahrtbereichen in Tunneln.

Zudem enthalten die Ereignismeldungen weder eine Beschreibung des Unfallhergangs, noch eine Unterscheidung der Sachschadensunfälle nach Unfallkategorien. Aus diesem Grund war auf der Basis der Ereignismeldbögen eine Prüfung des Unfallhergangs nicht möglich.

4.4 Auswertung Datenlieferung

Um für die weitere Analyse eine tragfähige Datengrundlage zu schaffen, mussten die fehlenden Informationen über weitere Recherchen bei den Straßenbauverwaltungen der betreffenden Länder eingeholt werden.

Planunterlagen wurden für insgesamt 31 der 51 Tunnel von den zuständigen Dienststellen geliefert. Für 12 Tunnel liegen nur die Lagepläne bzw. nur Höhenpläne vor. Davon sind die Tunnel Pelling-Berg an der A 7, sowie die Tunnel Allach und Aubing an der A 99 zusätzlich mit einem Bauwerksbuch ausgestattet. Für weitere sieben Tunnel liegen sowohl Lage- als auch

Querschnittspläne vor. Für die übrigen 12 Tunnel wurden mindestens Lage-, Höhen-, und Querschnittspläne zur Verfügung gestellt.

Die fehlenden Informationen zum Unfallgeschehen wurden ebenfalls für 51 Tunnel sowie für die angrenzenden Streckenabschnitte (500 m vor und nach dem Tunnelportal) für den Zeitraum von 2008-2011 bei den entsprechenden Polizeidienststellen angefordert.

Für die Auswertung lagen Informationen zum Unfallgeschehen für 44 Tunnel vor. Im Rahmen der Datenanforderung wurden Verkehrsunfallanzeigen der Polizei (Daten zu 21 Tunneln) sowie Tabellen der Unfalldaten mit und ohne textliche Beschreibung des Unfallhergangs zur Verfügung gestellt. Für sieben der 51 Tunnel wurden keine Unfalldaten bzw. nicht für die Auswertung geeignete Angaben zum Unfallgeschehen geliefert. Sie schießen daher aus dem Untersuchungskollektiv aus.

4.5 Auswertung vorhandene ZEB-Bilddaten

Als Ergänzung der teilweise unvollständigen Planunterlagen wurde durch die Bundesanstalt für Straßenwesen eine Auswertung der Streckenbilddaten der Zustandserfassung und Bewertung (ZEB) durchgeführt.

Bei der Sammlung der Streckenbilddaten handelt es sich um Aufnahmen, die innerhalb eines Netzknotenabschnittes in einem Abstand von 10 m aufgenommen wurden. Hieraus können dementsprechend alle Grundinformationen zu den einzelnen Tunneln, wie die Anzahl der Fahrstreifen, Vorhandensein eines Seitenstreifens oder der Panenbuchten entnommen werden. Folgende Vereinbarungen liegen dem Datensatz zu Grunde:

- Als die rechte Richtungsfahrbahn gilt die in

Stationierungsrichtung rechte Fahrstreifen. Als linke ist die Richtungsfahrbahn mit Fahrtrichtung entgegen der Stationierungsrichtung definiert.

- Die Nummerierung der Fahrstreifen erfolgt jeweils in Fahrtrichtung von rechts nach links. D. h., der am weitesten links gelegene Überholfahrstreifen hat die höchste Nummer.

Insgesamt wurden ZEB-Bilddaten für 44 Tunnel ausgewertet. Die Auswertung von ZEB-Bilddaten hat gezeigt, dass der Tunnel Hohentwiel, der Tunnel Kohlberg und der Tunnel Pellinger-Berg im Jahr 2009 umgebaut wurden. Direkt vor der Einfahrt in die Galerie Hansasträße wurde ebenfalls eine Baustelle anhand der Bilder identifiziert. Für den Tunnel Reinertshof lagen keine ZEB-Daten vor. Anhand der Ereignismeldebögen konnte jedoch festgestellt werden, dass dieser Tunnel im Jahr 2009 wieder unter Verkehr genommen wurde. Der Höllbergtunnel wurde ebenfalls 2009 und Tunnel Allach im Jahr 2010 in Betrieb genommen.

Für die genannten Tunnel wurden folgende Festlegungen getroffen:

- Die Unfälle, die im Jahr 2009 geschehen sind, werden bei der Auswertung von Tunnel Hohentwiel, Reinertshof und Kohlberg nicht berücksichtigt. Das Gleiche gilt für den Tunnel Allach für das Jahr 2010.
- Auf Grund des auffälligen Unfallgeschehens im Bereich der Baustelle vor der Galerie Hansasträße sowie in der Galerie selbst, jedoch nicht im Bereich danach wird die Galerie Hansasträße nicht weiter betrachtet.
- Der Tunnel Pellinger-Berg und der Höllbergtunnel werden ebenfalls nicht weiter untersucht.

Tab. 17: Vorhandene Daten zum Unfallgeschehen an 4-streifigen Regelquerschnitten

Land	Straße	Name	Vorhandene Daten	Alle Ereignisse	Unfälle
BE	A 111	Beyschlagsiedl.	2010	11	1
BE	A 111	Flughafen Tegel	2009/2010	141	24
BE	A 111	Tegel (Ortskern)	2009/2010	69	18
BW	A 7	Virngrund	2009	4	2
BW	A 8	Lämmerbuckel	2008/2010	3	3
BW	A 81	Hölzern	2009	1	0
BW	A 81	Schönbuch	2009	4	4
BW	A 81	Heilsberg	0	k.A.	k.A.
BW	A 81	Hohentwiel	0	k.A.	k.A.
BW	A 861	Nollinger Berg	2009/2010	2	2
BW	A 96	Herfatz	0	k.A.	k.A.
BW	A 98	Bürgerwald 1	0	k.A.	k.A.
BY	A 7	Grenztunnel	2009/2010/2011	73	9
BY	A 7	Tunnel Reinertshof	2009/2010/2011	29	11
BY	A 70	Schwarzer Berg	2009/2010/2011	41	15
BY	A 93	Pfaffenstein	2009/2010/2011	92	64
BY	A 96	Eching	2009/2010	10	7
BY	A 96	Etterschlag	2009/2010/2011	26	22
BY	A 96	Kohlberg	2009/2010/2011	20	12
BY	A 99	Aubing	2009/2010/2011	444	35
HE	A 44	Tunnel Hopfenberg	2009/2010/2011	387	13
NI	A 31	Emstunnel	2009/2010/2011	273	17
NI	A 33	Dissen	0	0	0
NI	A 38	Heidkopftunnel	2010/2011	125	4
NI	A 39	Lärmschutz-Tunnel "Lindenberg"	0	k.A.	k.A.
NW	A 40	Ruhrschnellweg	2009/2010/2011	110	55
NW	A 44	Birch	2009/2010/2011	6	1
NW	A 44	Reichswaldallee	2009/2010/2011	5	4
NW	A 46	Hemberg	2009/2010	7	1
NW	A 46	Olpe	2009/2010	15	4
RP	A 62	Hörnchenberg	0	k.A.	k.A.
SL	A 8	Pellinger-Berg Wellingen	2008/2009/2010/2011	90	9
SN	A 17	Coschütz	2009/2010/2011	70	12
SN	A 17	Dölzchen	2009/2010/2011	28	2
SN	A 4	Königshainer Berge	2009/2010/2020	80	4
TH	A 38	Höllbergtunnel	2010/2011	34	1
TH	A 71	Alte Burg	2009/2010/2011	116	5
TH	A 71	Behringen	2009/2010/2011	40	6
TH	A 71	Berg Bock	2009/2010/2011	175	7
TH	A 71	Eichelberg	2009/2010/2011	43	4
TH	A 71	Hochwald	2009/2010/2011	38	10
TH	A 71	Rennsteig	2009/2010/2011	512	21
TH	A 71	Schmücketunnel	2009/2010/2011	16	2

Tab. 18: Vorhandene Daten zum Unfallgeschehen an 6-streifigen Regelquerschnitten

Land	Straße	Name	Vorhandene Daten	Alle Ereignisse	Unfälle
BE	A 100	Tunnel Ortsteil Britz	2009/2010	159	23
BE	A 113	Rudower Höhe	2009/2010	96	0
BW	A 81	Engelberg Basis	2009	62	11
BY	A 93	Einhausung Prüfening	2009/2010/2011	70	36
BY	A 99	Allach	2009/2010/2011	1021	128
NW	A 44	Flughafen	2009/2010/2011	42	37
NW	A 44	Rheinschlinge	2009/2010/2011	70	14
NW	A 44	Strümp	2009/2010/2011	73,0	24
NW	A 46	Universität	2009/2010/2011	86,0	66
NW	A 46	Wersten	2009/2010/2011	143	116
TH	A 4	Lodeburgtunnel	2009/2010/2011	77,0	23
BW	A 7	Agnesburg	2009	2	1
BY	A 3	Einhausung Hösbach	2009/2010/2011	294	89
NW	A 46	Galerie Hansastraße	0	0	0
NW	A 46	Galerie Sternenberg	0	0	0

5 Tunnelkollektiv

5.1 Besonderheiten im Kollektiv

Auf Grundlage der im Kapitel 4 getroffenen Festlegungen, wurde das ursprüngliche Kollektiv aus 59 Tunneln um 18 Tunnel reduziert. Die Auflistung der verbleibenden 41 Tunnel kann der Anlage 4 entnommen werden.

Das Tunnelkollektiv der vorliegenden Untersuchung ist sehr vielfältig was Merkmale wie Querschnitte, Anzahl der Fahrstreifen und Ausstattung der einzelnen Tunnel betrifft. Nachfolgend sind die wesentlichen Besonderheiten der einzelnen Tunnel dargestellt.

In Bezug auf den Querschnitt können die Tunnel in Richtungsquerschnitte mit zwei und drei Fahrstreifen unterteilt werden. 30 der 41 Tunnel haben einen 2-streifigen Richtungsquerschnitt. Über einen 3-streifigen Richtungsquerschnitt verfügen 10 Tunnel. Der Tunnel Dölzchen, als einziger im Tunnelkollektiv, verfügt über einen 2-streifigen Richtungsquerschnitt in einer und einen 3-streifigen Richtungsquerschnitt in der anderen Richtung. Der 3-streifige Querschnitt dieses Tunnels entsteht infolge einer Fahrstreifenaddition, die sich über ca. 90 % der Rohrlänge erstreckt. Eine Übersicht der Tunnel unterteilt nach Regelquerschnitt und dem Vorhandensein eines Seitenstreifens kann der Anlage 4 entnommen werden.

Das Tunnelkollektiv enthält einen halbseitigen Tunnel: die Galerie Sternenberg an der A 46. Die besondere Bauweise als Galerie soll bei der Auswertung berücksichtigt werden. Eine weitere Besonderheit im Tunnelkollektiv wurde bei der Einhausung Hösbach festgestellt. Die Einhausung besteht aus zwei getrennten, nah beieinander liegenden Abschnitten (Abschnitte West und Ost). Die freie Strecke zwischen der Einhausung West und der Einhausung Ost beträgt ca. 440 m.

Weiterhin wurde festgestellt, dass einige Tunnel des Kollektivs in einem relativ kurzen Abstand zueinander liegen. Das Verzeichnis der aufeinanderfolgenden Tunnel, samt Längen der Zwischenabschnitte kann dem Anlage 5 entnommen werden.

Der Lämmerbuckeltunnel an der A 8 wurde bereits Ende der 50er Jahre in Betrieb genommen und 2011 saniert. Somit soll bei der Auswertung das Alter des Tunnels sowie der Hufeisenquerschnitt berücksichtigt werden.

Als weitere Besonderheit kann man Ein- und Ausfahrtbereiche in den Tunneln und deren Nähe benennen. Insgesamt weisen 12 der 41 Tunnel dieses Merkmal auf. Die Einhausung Prüfening weist je Richtung einen Verflechtungsstreifen über die gesamte Tunnellänge auf. Im Rahmen der Auswertung erfolgte die notwendige Typisierung vorhandener Tunnel in Abhängigkeit der zuvor beschriebenen Charakteristiken.

5.2 Typisierung vorhandener Tunnel

5.2.1 Tunnelteilkollektive

Die Typisierung der Tunnel erfolgte auf Grundlage der in der Literaturanalyse als maßgeblich identifizierten Parameter, wie Seitenstreifen, Anzahl der Fahrstreifen und Vorhandensein von Ein- und Ausfahrten. Die Tunnellänge, die maximale Längsneigung sowie die zugelassene Höchstgeschwindigkeit der Tunnel werden als erklärende Größen des Unfallgeschehens herangezogen.

Die Typisierung erfolgt für alle Tunnel des Tunnelkollektivs getrennt nach den Tunnelröhren. Als Basis wurden hierbei die Grunddaten der Ereignismeldungen und die vorhandenen Planunterlagen verwendet. Die Tunnel, für die keine Planunterlagen vorliegen, wurden unter Verwendung der ZEB-Bilder typisiert.

38 der 41 Tunnel verfügen jeweils über zwei Röhren. Galerie Sternenberg ist halbseitig und hat somit nur ein Tunnelrohr. Der Tunnel Lämmerbuckeltunnel verfügt ebenfalls nur über eine Röhre Richtung Ulm. Die Einhausung Hösbach besteht aus zwei aufeinander folgenden Abschnitten. Beide Abschnitte wurden getrennt betrachtet (Einhausung Hösbach West und Einhausung Hösbach Ost). Beide Abschnitte der Einhausung verfügen jeweils über zwei Röhren. Betrachtet wurden somit insgesamt 82 Tunnelröhren in 41 Tunneln.

Anhand baulicher und betrieblicher Merkmale wurde die Gesamtheit der Tunnelröhren in Teilkollektive unterteilt. Die Zusammensetzung der Teilkollektive ist vor allem für den Vergleich der Röhren miteinander in der nachfolgenden Untersuchung wichtig. Ein Vergleich der Tunnel nur unter Einbezug eines einzigen der genannten Merkmale wäre nicht zielführend, da bei einer Einfachkorrelation die gegenseitige Abhängigkeit der Merkmale nicht berücksichtigt werden würde.

Um eine gegenseitige Abhängigkeit der Merkmale bei der Bewertung der Verkehrssicherheit in den Tunnel zu berücksichtigen, wurden 82 Tunnelröhren nacheinander auf vier verschiedene Ebenen

aufgeteilt und somit die Teilkollektive gebildet (vgl. Bild 20).

Insgesamt konnten zehn Teilkollektive gebildet werden. In der ersten Ebene erfolgte die Unterteilung in Teilkollektive mit und ohne Ein- und Ausfahrtbereiche. Demzufolge haben 25 der 82 Röhren mindestens eine Ein- oder Ausfahrt. In einem weiteren Schritt wurden die Tunnelröhren nach der Anzahl der Fahrstreifen differenziert. In der dritten Ebene wird die Übersicht über das Vorhandensein eines Seitenstreifens gegeben. Dies zeigt, dass im Tunnelkollektiv keine 3-streifige Röhre ohne Seitenstreifen enthalten ist. In der letzten Ebene wird das Tunnelkollektiv in Kollektive mit $V_{zul} = 80$ km/h und $V_{zul} = 100$ km/h unterteilt. Dies zeigt, dass in allen 2-streifigen Tunnelröhren mit Ein- und Ausfahrten eine $V_{zul} = 80$ km/h zugelassen ist.

5.2.2 Tunnel mit Ein- und Ausfahrtbereichen im Tunnel

KAYSER/BALTZER/LEVEN (1985) haben gezeigt, dass ein Großteil der Tunnel Unfallschwerpunkte aufweisen, die auf objektspezifische bauliche Gegebenheiten zurückzuführen sind (z. B. kleine Kurvenradien in Ein- und Ausfahrtrampen). Wei-

terhin konnte am Beispiel eines Tunnels mit einem verkürzten Einfädungsstreifen gezeigt werden, dass Einfahrten mit Einfädungsstreifen mindestens eine Länge von 250 m haben sollten. An Einfahrten mit Fahrstreifenaddition ergaben sich keine Auffälligkeiten im Unfallgeschehen.

Die schematischen Darstellungen der Ein- und Ausfahrtbereiche für jeden Tunnel des Kollektivs können Tabelle 19 entnommen werden. Diese wurden für die Zuordnung zu den zuvor festgelegten Typen genutzt (vgl. Tabelle 20). Die gewählte Typisierung berücksichtigt drei Fälle für die Lage des Einfädungs- bzw. Ausfädungsstreifens in Bezug auf den Tunnel getrennt für Einfahrten ET und für Ausfahrten AT.

- Typ ET/AT 01: Der Einfädungs- bzw. Ausfädungsstreifen beginnt bereits vor dem Einfahrtportal und endet im Tunnel.
- Typ ET/AT 02: Der gesamte Einfädungs- bzw. Ausfädungsstreifen befindet sich im Tunnel.
- Typ ET/AT 03: Der Einfädungs- bzw. Ausfädungsstreifen beginnt noch im Tunnel und endet hinter der Tunnelausfahrt.

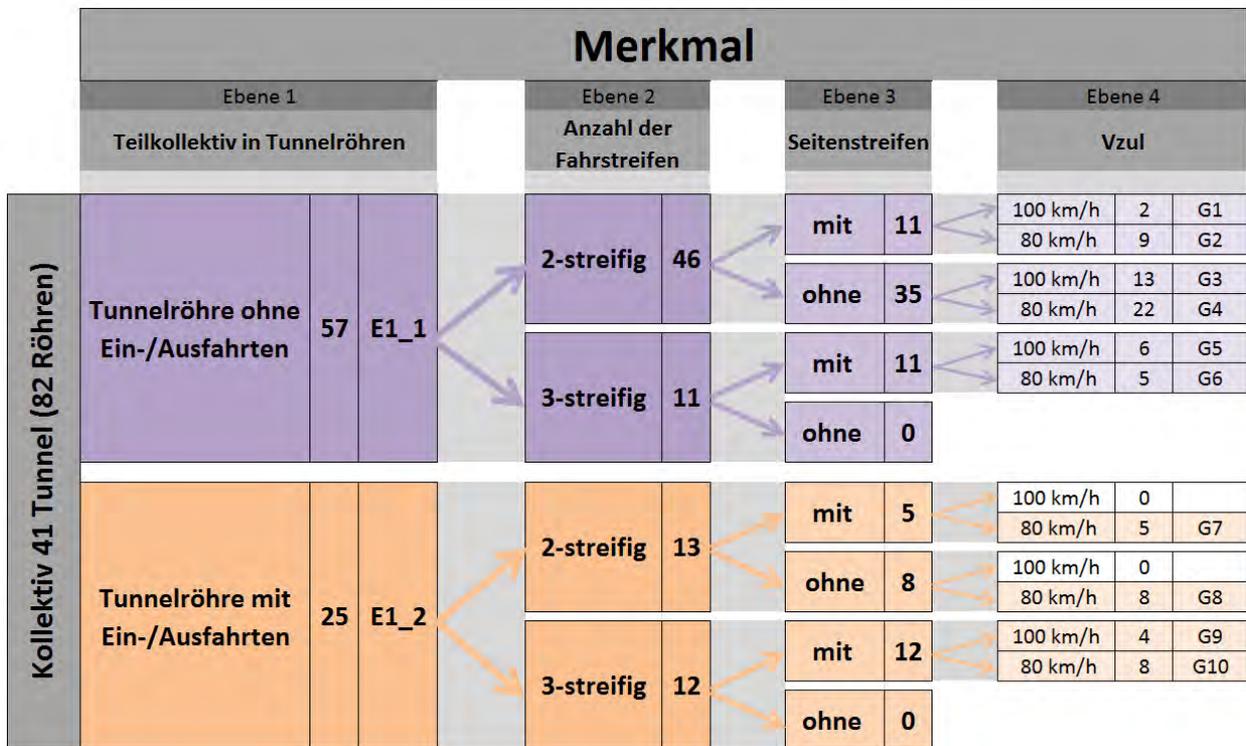


Bild 20: Tunnelteilkollektive

Tab. 19: Typisierung der Ein- und Ausfahrtbereiche

Tunnel	Skizze	Fahrstreifen Hauptfahrbahn	Einfahrt- bereich	Ausfahrt- bereich
Tegel (Ortskern) A 111		2 FS	ET01	AT03
Flughafen Tegel A 111		2 FS	ET02	AT02
Aubing A 99		2 FS	--	AT03
Birth A 44		2 FS	--	AT03
Prüfening A 93		2 FS	Verflechtungsstreifen	Verflechtungsstreifen -
Pfaffenstein		2 FS	ET01	AT03
Ruhrschnellweg A 40		2 FS	ET01	AT03
Ortsteil Britz A 100		3 FS	ET01 ET02	AT02 AT03
Flughafen Düsseldorf A 44		3 FS	ET02	AT02
Strümp A 44		3 FS	--	AT01
Universität A 46		3 FS	ET02	AT03
Wersten A 46		3 FS	ET01 ET02	AT02 AT03
Einhausung Hösbach A 3 West		3 FS	ET02	AT02
Einhausung Hösbach A 3 Ost		3 FS	--	AT03

mit: FS = Fahrstreifen einer Richtungsfahrbahn
 ET 01 – ET 03 = Typ der Einfahrt im Tunnel
 AT 01 – AT 03 = Typ der Ausfahrt im Tunnel

Tab. 20: Typen von Ein- und Ausfahrtbereichen im Tunnel

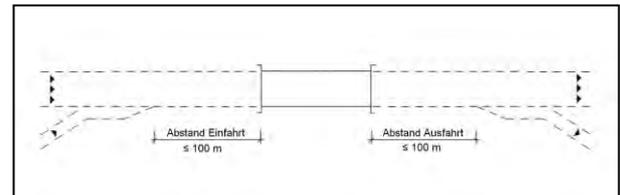
Typ	Skizze
ET 01	
ET 02	
ET 03	
AT 01	
AT 02	
AT 03	

Insgesamt liegen im Untersuchungskollektiv 29 Ein- und Ausfahrtbereiche vor. Von den 12 Einfahrten beginnen fünf vor dem Tunnelportal und enden im Tunnel (ET 01), sieben befinden sich innerhalb des Tunnels (ET 02). Eine der 17 vorgefundenen Ausfahrten beginnt vor dem Tunnelportal und endet im Tunnel, sechs befinden sich innerhalb des Tunnels (AT 02) und zehn beginnen im Tunnel und enden hinter der Tunnelausfahrt (AT 03).

5.2.3 Tunnel mit Ein- und Ausfahrtbereichen im unmittelbaren Umfeld

Anhand vorliegender Planunterlagen und ZEB-Bilddaten wurde geprüft, ob sich direkt vor oder nach dem Tunnel ein Einfahrtbereich befindet. In

der Schweiz konnten von LANZ et al. (1995) eine große Anzahl von Einfahrten unmittelbar vor oder nach einem Tunnel vorgefunden werden, an denen sehr oft der Einfädungsstreifen nur einen Bruchteil der in den Normen verlangten Längen aufweist. Vor diesem Hintergrund erscheint daher eine Untersuchung entsprechender Einfahrtbereiche sinnvoll.

**Bild 21:** Abstand der Ein- und Ausfahrtbereiche zu den Tunnelportalen

Hierfür wurden die Abstände zu den Ein- und Ausfahrtbereichen vor und nach den Portalen gemäß Bild 21 ermittelt.

Eine Liste der Tunnel, bei denen sich vor den Portalen ein Ein- oder Ausfahrtbereich in einem Abstand ≤ 100 m befindet kann Tabelle 21 entnommen werden. Abstände die mit „0“ gekennzeichnet sind stehen dabei für Ein- und Ausfahrtbereiche die direkt vor dem Portal beginnen bzw. enden.

An den folgenden Anschlussstellen befinden sich Ein- und Ausfahrtbereiche im Bereich eines Tunnelportals:

- A 81 AS Engelberg Basis,
- A 93 AS Regensburg-Pfaffenstein,
- A 71 AS Oberhof.

Tab. 21: Ein- und Ausfahrtbereiche vor oder hinter einem Tunnelportal mit einem Abstand ≤ 100 m

Nr.	Land	Straße	Name	Einfahrt im Tunnel	Ausfahrt im Tunnel	Name der AS	Abstand [m]	Art
1	BE	A 100	Tunnel Ortsteil Britz	ja	ja	Buschkrugallee	0	E+A
6	BW	A 81	Engelberg Basis	nein	nein	Dreieck Leonberg	0	E+A
15	BY	A 93	Einhausung Prüfening	VS	VS	Regensburg-Prüfening	0	E+A
15	BY	A 93	Einhausung Prüfening	VS	VS	Regensburg-West	0	E+A
16	BY	A 99	Allach	nein	nein	Dreieck-München-Allach	0	E+A
17	BY	A 99	Aubing	nein	ja	Münschen-Lochhausen	0	A
21	BY	A 93	Pfaffenstein	ja	ja	Regensburg-Pfaffenstein	0	E+A
55	BY	A 3	Einhausung Hösbach	ja	ja	Hösbach	0	A
31	NW	A 44	Birch	nein	ja	Velbert-Nord	0	A
32	NW	A 44	Flughafen	ja	ja	Düsseldorf-Stockum	100	E+A
35	NW	A 40	Ruhrschnellweg	ja	ja	Essen Zentrum-Ost	0	E
37	NW	A 46	Universität	ja	ja	Düsseldorf-Bilk	0	A
38	NW	A 46	Wersten	ja	ja	Düsseldorf-Wersten Westteil	0	E+A
40	TH	A 71	Berg Bock	nein	nein	Suhl/Zella-Mehlis	100	E
42	TH	A 71	Hochwald	nein	nein	Oberhof	0	E+A
44	TH	A 71	Rennsteig	nein	nein	Oberhof	10	E+A

mit: E = Einfahrt, A = Ausfahrt VS = Verflechtungsstreifen

6 Unfallanalyse

6.1 Projektdatenbank

Für die betrachteten Straßentunnel im Zuge von Autobahnen wurden die verfügbaren Infrastruktur- und Verkehrsdaten (Länge, Regelquerschnitt, Trassierungsparameter, Vorhandensein und Gestaltung von Ein- und Ausfahrten, Verkehrsstärke und Zusammensetzung, V_{zul}) in einer spezifischen Projektdatenbank zusammengeführt. Diese wurde durch Unfalldaten und deren Merkmale ergänzt. Anhand dieser Datenbank konnten dann im Rahmen der Unfallanalysen verschiedene Filterkriterien zur gezielten Analyse spezieller einzelner Merkmale festgelegt werden.

6.2 Makroskopische Unfallanalyse

Zur Untersuchung der Verkehrssicherheit wurde zunächst eine makroskopische Unfallanalyse durchgeführt. Insgesamt wurden 82 Tunnelröhren betrachtet. Dieses Kollektiv umfasst Tunnelstrecken sowohl mit als auch ohne Anschlussstellen im Tunnel.

Für die Unfallanalyse wurden die Verkehrsunfallanzeigen der Polizei bzw. vergleichbare Unfalldaten aller Kategorien herangezogen. Betrachtet wurden nach Möglichkeit die Unfälle für drei zusammenhängende Jahre, um vor allem auch Unfälle mit schwerem Personenschaden und damit besonders unfallträchtige Strecken mit ihren jeweiligen Randbedingungen vollständig abzubilden.

Die Datenerhebung zum Unfallgeschehen erfolgte in den Jahren 2012 und 2013. Das zur Verfügung gestellte Unfallkollektiv umfasst die Kalenderjahre 2008 bis 2012, wobei die Anzahl der Jahre innerhalb der einzelnen Tunnel zwischen 3 und 5 Jahren schwankt. Das Unfallkollektiv des Jahres 2008 ist zum Teil unvollständig. Auch für das Jahr 2012 liegen Unfälle nicht für die gesamten 12 Monate vor. Im Sinne der Vergleichbarkeit wurde deshalb der Auswertungszeitraum auf drei gleiche Kalenderjahre für alle Tunnel beschränkt und die unvollständigen Jahre 2008 und 2012 nicht einbezogen. Somit wurde die Unfallauswertung für die Jahre 2009 bis einschließlich 2011 durchgeführt. Ausnahmen stellen hierbei die Tunnel dar, die im Untersuchungszeitraum umgebaut wurden.

Dies betrifft den Tunnel Hohentwiel an der A 81, den Tunnel Reinertshof an der A 7, den Tunnel Kohlberg an der A 96 und den Tunnel Allach an der A 99. Das Jahr, in dem der Umbau des jeweiligen Tunnels stattfand, blieb unberücksichtigt. Somit wurde bei der Unfallanalyse der genannten Tunnel mit Umbaumaßnahmen das Unfallgeschehen für nur zwei Jahre ausgewertet.

Neben einem Vergleich der absoluten Unfallzahlen, differenziert nach Unfallkategorien, wurden für alle Tunnelröhren bzw. für die getrennt zu betrachtenden Bereiche (z. B. Ein- und Ausfahrten) die relevanten Unfallkenngrößen, wie Unfalldichte und Unfallkostendichte sowie Unfallrate und Unfallkostenrate ermittelt. Zur Berechnung der Raten standen die Ergebnisse der Straßenverkehrszählung aus dem Jahr 2010 zur Verfügung. Hieraus konnten DTV-Werte für insgesamt 39 der 41 Tunnel abgeleitet werden. Für den Tunnel Lämmerbuckel und die Galerie Sternenberg lagen DTV-Werte aus den Auswertungen der Dauerzählstellen zum Jahr 2009 vor. Die Unfallkenngrößen, insbesondere die Unfallkostenrate, sollen als Grundlage für den vorgesehenen Vergleich des Unfallgeschehens mit den Außenstrecken dienen.

Dafür wurde das Unfallgeschehen auch der Strecken, die unmittelbar an die betrachteten Tunnel angrenzen, betrachtet und die entsprechenden Unfallkenngrößen ermittelt. Die Länge der an den Tunneln angrenzenden Strecken betrug jeweils 500 m. Ausnahmen stellen hierbei Tunnel dar, die in einem relativ kurzen Abstand zueinander liegen (vgl. Anlage 4). Bei diesen variieren die Längen der einzelnen Zwischenabschnitte zwischen 254 m (zwischen den Tunneln Coschütz und Dölzchen) und 1.400 m (zwischen dem Tunnel Pfaffenstein und der Einhausung Prüfening).

6.2.1 Erläuterung zum Unfallkollektiv

Insgesamt wurden 2.294 Unfälle in die Datenbank aufgenommen. Davon wurden 140 Unfälle bei der Auswertung nicht berücksichtigt. 137 davon stammen aus dem Unfallgeschehen der bayerischen Tunnel Hösbach und Schwarzer Berg, für die weder Angaben zur Beteiligung noch zum Unfalltyp vorlagen. Die restlichen drei ereigneten sich auf einem Parkplatz in der Nähe der Tunnel Hölzern und Schönbuch.

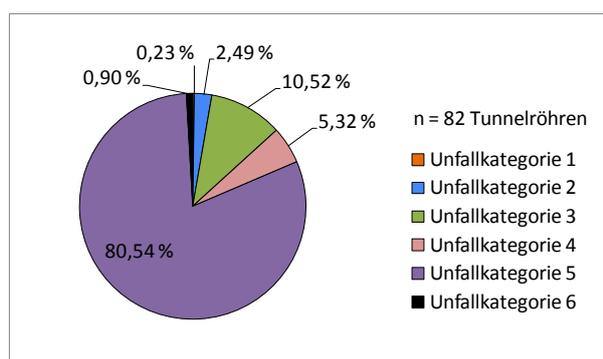


Bild 22: Verteilung der Unfallkategorien in den Tunneln

Die Örtlichkeiten der Unfälle wurden anhand der Straßenbezeichnung, Fahrtrichtung und Kilometer angegeben. So wurden beispielsweise Bundesautobahnen anhand der Betriebskilometrierung (BAB-Kilometrierung) bezeichnet. Nicht alle Unfälle waren anhand der BAB-Kilometrierung verortet. Die Zuordnung der Unfälle zu Tunnel oder freie Strecke erfolgte in solchen Fällen anhand der textlichen Beschreibung des Unfallhergangs, soweit diese vorlag. Zur Überprüfung der durchgeführten Unfallzuordnung wurden die Tunnelportale und die Tunnellänge mittels maßstäblicher Luftbildfotos verglichen.

Somit konnten insgesamt 2.154 Unfälle in der Unfallanalyse berücksichtigt werden. Davon ereigneten sich 884 nachweislich im Tunnel. Weitere 232 Unfälle konnten den Anschlussstellen zugeordnet werden. Bei den restlichen 1.038 Unfällen handelt es sich um Unfälle in Abschnitten vor und nach den Tunneln.

Die Unfallanalyse hat gezeigt, dass die Tunnelröhren sehr unterschiedlich mit Unfällen belastet sind. So ist in sechs der 82 Tunnelröhren während des gesamten Untersuchungszeitraums kein Unfall geschehen. In 21 Röhren wurden nur Unfälle der

Unfallkategorie fünf verzeichnet. Unfälle mit schwerem Personenschaden wurden bei 46 Röhren registriert.

6.2.2 Unfallstruktur

Die Analyse der Unfallstruktur erfolgt über die Unfallkategorie. Gemäß dem Merkblatt zur Örtlichen Unfalluntersuchung in Unfallkommissionen (M Uko 2012) ergibt sich die Unfallkategorie aus der schwersten Unfallfolge, die ein am Unfall Beteiligter erlitten hat oder nach dem Straftatbestand bei einem Unfall mit Sachschaden.

Die Verteilung der Unfallkategorien der 884 ausgewerteten Unfälle in Tunneln ist im Bild 22 dargestellt. Es zeigt sich, dass der Anteil der Unfälle mit Personenschaden (Unfallkategorien 1, 2 und 3) zwischen 7 % und 50 % liegt (vgl. Tabelle 22). Unfälle mit Getöteten wurden in zwei Fällen beobachtet. Der Anteil der Unfälle mit Schwerverletzten beträgt 2,49 % am gesamten Unfallgeschehen, der Anteil mit Leichtverletzten 10,52 %. Ca. 6 % der Unfälle sind schwerwiegende Unfälle mit Sachschaden (Unfallkategorien 4 und 6). Der überwiegende Anteil mit ca. 80 % sind sonstige Unfälle mit Sachschaden (Unfallkategorie 5). Eine polizeiliche Erfassung dieser Unfälle ist allerdings anders als bei Unfällen der Kategorien 1-4 und der Kategorie 6 nicht zwingend erforderlich.

Hingegen zu der freien Strecke kann für die Tunnelabschnitte aufgrund der zusätzlichen technischen Ausstattung angenommen werden, dass der Erfassungsgrad der Unfallkategorie 5 zuverlässig und nahezu vollständig ist. Aus diesem Grund wurde das Gesamtunfallgeschehen (Kategorien 1-6) zur Berechnung der Unfallkenngrößen verwendet.

Tab. 22: Grunddaten der einzelnen Teilkollektive

	Gruppen									
	G1	G2	G3	G4	G5	G6	G7	G8	G9	G10
	ohne Ein-/Ausfahrten						mit Ein-/Ausfahrten			
Anzahl Röhren	2	9	13	22	6	5	5	8	4	8
Fahrstreifenanzahl	2	2	2	2	3	3	2	2	3	3
Seitenstreifen	ja	ja	nein	nein	ja	ja	ja	nein	ja	ja
V _{zul}	100 km/h	80 km/h	100 km/h	80 km/h	100 km/h	80 km/h	80 km/h	80 km/h	100 km/h	80 km/h
UR [U/Mio.Kfz·km]	0,35	0,07	0,23	0,20	0,09	0,10	0,71	0,74	0,14	0,74
Anzahl der Unfälle	15	52	34	79	32	18	121	182	25	326
davon U (P)	4	6	16	9	7	2	9	28	7	29
U (P) [%]	27%	12%	50%	11%	22%	11%	7%	15%	28%	9%

6.2.3 Unfallcharakteristik

Die Analyse der Unfallcharakteristik erfolgt in Anlehnung an das M Uko (2012) über unterschiedliche Unfalltypen. Der Unfalltyp beschreibt die Konfliktsituation, die zum Unfall geführt hat.

Bei 37 der 884 Unfälle im Tunnel fehlten die Angaben zum Unfalltyp in den Unfalldaten. Allerdings lag für die betroffenen Tunnel die Beschreibung des Unfallhergangs vor, sodass die Angaben zum Unfalltyp im Nachhinein ergänzt werden konnten. Allgemein werden sieben Unfalltypen unterschieden, die ihrerseits in weitere zwei- / dreistellige Unfalltypen unterteilt werden. Die Angabe des zwei- / dreistelligen Unfalltyps lag allerdings nur bei ca. 40 % aller Unfälle vor. Die restlichen 60 % der Unfälle wurden innerhalb von sieben (Haupt-) Unfalltypen klassifiziert.

Die Zusammenstellung der Unfalltypen zeigt Tabelle 24. Die Verteilung der Unfalltypen wird im Bild 23 dargestellt. Erwartungsgemäß kommen auf den Untersuchungsstrecken keine bzw. kaum Unfälle der Typen 2, 4 und 5 vor. Folgende vier Unfalltypen sind maßgeblich vorhanden:

- Typ 1: Fahrnfall
- Typ 3: Einbiegen/Kreuzen-Unfall
- Typ 6: Unfall im Längsverkehr
- Typ 7: Sonstige Unfall

Der Unfall im Längsverkehr mit einem Anteil von 57 % aller Unfälle ist im Kollektiv der makroskopischen Analyse der häufigste Unfalltyp. Den kleinsten Anteil an der gesamten Unfallzahl weisen die Abbiege-Unfälle (Typ 2) mit 0,23 % auf.

Die Verteilung der Unfalltypen auf den angrenzenden Streckenabschnitten zeigte nur marginale Unterschiede im Vergleich zu den eigentlichen Tunnelstrecken.

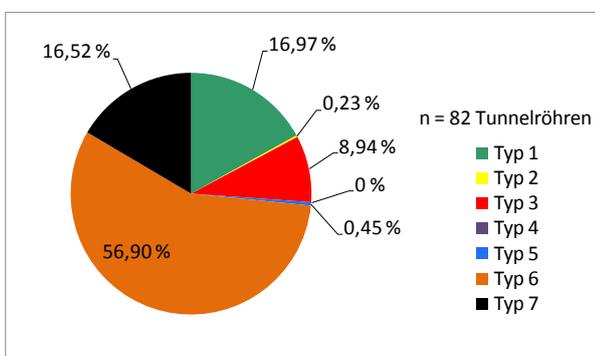


Bild 23: Verteilung der Unfalltypen

6.2.4 Berechnung der Unfallkenngrößen

Zunächst wurden die relevanten Unfallkenngrößen für das Kollektiv der 82 Tunnelröhren berechnet und anschließend die Ergebnisse mit den Kenngrößen für die Strecken vor und nach den Tunneln verglichen.

Um Aussagen über die Verkehrssicherheit von Straßenzügen zu erhalten, werden die Unfallkenngrößen (Unfallrate, Unfallkostenrate, Unfalldichte und Unfallkostendichte) berechnet.

Die Schwere der Unfälle wird durch die Unfallkosten ausgedrückt. Die Unfallkosten werden berechnet, in dem die Anzahl der einzelnen Unfälle einer Strecke für ausgewählte Jahre mit einem Kostensatz in Euro pro Unfall multipliziert wird.

Eine weitere Möglichkeit der Berechnung der Unfallkostensätze wird durch das Merkblatt für die Auswertung von Straßenverkehrsunfällen, Teil 2 (FGSV 2002) gegeben. Hier werden die Unfallkosten auf der Grundlage von angepassten Kostensätzen berechnet. Im genannten Merkblatt wird die Anpassung nur für ein Unfallkollektiv von mehr als 100 Unfällen mit Personenschaden empfohlen. Im vorliegenden Tunnelkollektiv liegt die Anzahl der Unfälle mit Personenschaden (Kat. 1 bis 3) bei 118 Unfällen.

Da die Anzahl der Unfälle mit Personenschaden über dem empfohlenen Wert liegt, wurde geprüft, ob eine Anpassung der Unfallkostensätze in dem bestehenden Unfallkollektiv sinnvoll ist. Als Vergleichswert wurde die Verunglücktenstruktur, FGSV 2003 (ausgedrückt durch die Anzahl der Verunglückten je 100 Unfälle mit schwerem Personenschaden) herangezogen. Hierbei wurde festgestellt, dass die Verunglücktenstruktur in dem vorliegenden Tunnelkollektiv deutlich von den Werten für Autobahnen abweicht (vgl. Tabelle 23).

Tab. 23: Verunglückte je 100 Unfälle mit schwerem Personenschaden

	Unfallkollektiv Tunnel	Vergleichswerte FGSV 2003
Getötete	8,33	12
Schwerverletzte	100	123
Leichtverletzte	37,5	64

Tab. 24: Unfalltypen in Tunneln (n = 41) und angrenzenden Strecken

U Typ	Erläuterung	Strecken vor dem Tunnel		Tunnelstrecke		Strecke nach dem Tunnel	
		Anzahl	Anteile	Anzahl	Anteile	Anzahl	Anteile
1	Fahrerunfall (F)	97	14,83 %	150	16,97 %	91	17,27 %
10	Kurve	7	1,07	6	0,68	4	0,76
12	Abbiegen/Einbiegen	0	0,00	2	0,23	0	0 (%)
13	Verschwenkte Fahrbahn	1	0,15	0	0 (%)	0	0 (%)
14	Gerade	10	1,53	22	2,48	13	2,47
15	Gefälle/Steigung	4	0,61	2	0,23	3	0,57
19	Sonstiges	0	0,00	2	0,23	1	0,19
	unbekannt	75	11,47	116	13,12	70	13,28
2	Abbiege-Unfall (AB)	4	0,61 %	2	0,23 %	3	0,57 %
23-24	Rechtsabbieger	0	0 (%)	1	0,11	0	0 (%)
	unbekannt	4	0,61	1	0,11	3	0,57
3	Einbiegen/Kreuzen	35	5,35 %	79	8,94 %	31	5,88 %
30-33	aus Beschleunigungsspur	7	1,07	69	7,81	25	4,74
39	Sonstiges	0	0 (%)	2	0,23	1	0,19
	unbekannt	28	4,28	8	0,90	5	0,95
5	Unfall durch RV	3	0,46 %	4	0,45 %	0	0,00 %
	unbekannt	3	0,46	4	0,45	0	0 (%)
6	Unfall im LV	388	59,33 %	503	56,90 %	286	54,27 %
60-62	Auf der Fahrbahn	54	8,26	103	11,65	60	11,39
63-64	Spurwechsel	40	6,12	76	8,60	50	9,49
65	Nebeneinanderfahren	6	0,92	14	1,58	6	1,14
69	Sonstiges	1	0,15	2	0,23	1	0,19
	unbekannt	287	43,88	308	34,84	169	32,07
7	Sonstiger Unfall (SO)	127	19,42 %	146	16,51 %	116	22,01 %
71-73	Hindernis	31	4,74	38	4,30	25	4,74
74	liegendegebliebenes Fahr-	2	0,31	1	0,11	1	0,19
75	Tier	4	0,61	4	0,45	4	0,76
76-77	plötzliches körperliches	6	0,92	3	0,35	3	0,57
79	Sonstiges	1	0,15	1	0,11	0	0 (%)
	unbekannt	83	12,69	99	11,20	83	15,75

Für die Berechnung der angepassten Unfallkostensätze wurden die Kostensätze zum Preisstand 2010 verwendet.³ Die Unfallraten (UR) und Unfallkostenraten (UKR) wurden getrennt für jede Tunnelröhre wie folgt berechnet.

$$UR = \frac{10^6 \cdot U}{365 \cdot DTV \cdot L \cdot t} \quad [U/(\text{Mio. Kfz} \cdot \text{km})]$$

$$UKR = \frac{1.000 \cdot UK}{365 \cdot DTV \cdot L \cdot t} \quad [\text{Euro}/(1.000 \text{ Kfz} \cdot \text{km})]$$

mit:

U	=	Anzahl der Unfälle	
UK	=	Unfallkosten	[Euro]
DTV	=	durchschnittliche tägliche Verkehrsstärke	[Kfz/24h]
L	=	Länge des Tunnels	[km]
t	=	Anzahl der Betrachtungsjahre	

Die Unfallrate beschreibt die durchschnittliche Anzahl der Unfälle, die bei einer Fahrleistung von 1 Mio. Kraftfahrzeugen pro Kilometer Strecke stattgefunden haben. Die Unfallkostenrate bezieht die Unfallkosten auf eine Fahrleistung von 1.000 Kraftfahrzeugen pro Kilometer. Sie ist ein Maß für das fahrleistungsabhängige Unfallrisiko.

Im Rahmen der makroskopischen Analyse erfolgte eine Auswertung der Tunnel in Abhängigkeit der im Kapitel 6.2 vorgenommenen Typisierung. Hierbei wurden einzelne Tunnelröhren unter Berücksichtigung der baulichen sowie betrieblichen Merkmale in insgesamt zehn Teilkollektive (vgl. Bild 20) unterteilt. Die aufgestellten Teilkollektive wurden anhand ihrer Unfallkenngrößen miteinander verglichen. Die Unfallraten und Unfallkostenraten der betrachteten Kollektive sind in den Bildern 24 bis 33 dargestellt. Die Unfallkenngrößen der einzelnen Tunnelröhren zeigt die Anlage 5.

Die Einbindung der betrieblichen Aspekte erfolgt unter der Betrachtung der in den Tunnelröhren zulässigen Höchstgeschwindigkeit. Von der Gesamtheit der in der makroskopischen Analyse betrachteten Tunnelröhren werden 57 mit einer Geschwindigkeit von 80 km/h betrieben. In den restlichen 25 Röhren beträgt die zulässige Höchstgeschwindigkeit 100 km/h.

In dem Teilkollektiv der 2-streifigen Querschnitte mit Seitenstreifen ($V_{zul} = 100$ km/h) sind im Untersuchungszeitraum 15 Unfälle geschehen. Ursa-

chen für die Unfälle waren nicht angepasste Geschwindigkeit (in sechs Fällen), Alkoholeinfluss (in zwei Fällen), ungenügender Sicherheitsabstand (in zwei Fällen) und unzureichend gesicherte Ladung (in zwei Fällen). Weitere drei Unfälle sind jeweils auf falschen Fahrstreifenwechsel, mangelnde Sicherung des Fahrzeuges sowie andere technische Mängeln zurückzuführen. Für dieses Kollektiv wurde eine mittlere Unfallrate von 0,35 [U/Mio.Kfz•km] ermittelt (Bild 24). Im Vergleich dazu ist die Unfallrate der 2-streifigen Querschnitte mit Seitenstreifen bei $V_{zul} = 80$ km/h deutlich niedriger (vgl. Bild 25). Der Anteil an Unfällen mit Personenschaden (Kat. 1 bis 3) beträgt an den 2-streifigen Querschnitten mit Seitenstreifen ($V_{zul} = 100$ km/h) ca. 27 %, bei $V_{zul} = 80$ km/h nur noch ca. 12 %.

Für die 2-streifigen Querschnitte mit Seitenstreifen ($V_{zul} = 80$ km/h) liegt die mittlere Unfallrate bei 0,07 [U/Mio.Kfz•km]. In diesem Kollektiv fällt vor allem die östliche Röhre des Tunnels Birth negativ auf (Birth L). Die Ursachen für die auffällige Unfallrate dieser Röhre liegen in der vergleichsweise kurzen Länge des Tunnelabschnitts von 840 m und einem geringen DTV von 8.700 Kfz/24h. Eine hohe Unfallkostenrate des Birth L entstand infolge eines Unfalls der Kat. 1 mit einer getöteten Person. Insgesamt wurden für das Teilkollektiv der 2-streifigen Tunnelquerschnitte mit Seitenstreifen ($V_{zul} = 80$ km/h) 52 Unfälle in die Datenbank aufgenommen. Angaben zu den Unfallursachen lagen für neun der 52 Unfälle vor. Daher können die Gründe für das Unfallgeschehen nicht näher untersucht werden. Eine Analyse der weiteren Unfallmerkmale wie Unfalltyp, Lichtverhältnisse oder Straßenzustand zeigte keine Auffälligkeiten.

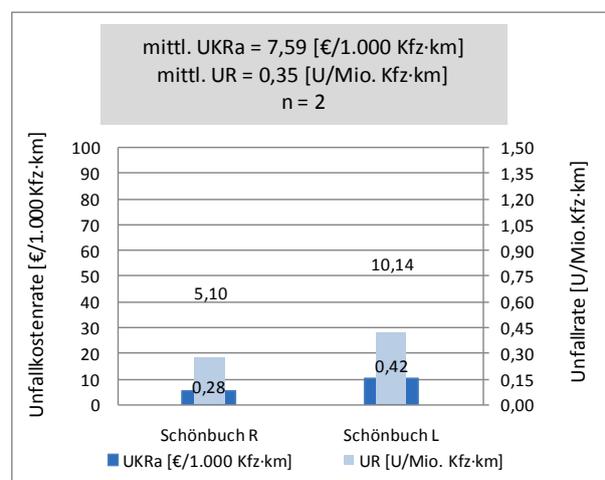


Bild 24: 2-streifige Querschnitte mit Seitenstreifen ($V_{zul} = 100$ km/h)

³ Lerner, M. Kranz, T. Schepers, A.: Bewertung der Straßenverkehrsunfälle Entwicklung der Unfallkosten in Deutschland 2005-2010 – Unfallkostensätze 2010.

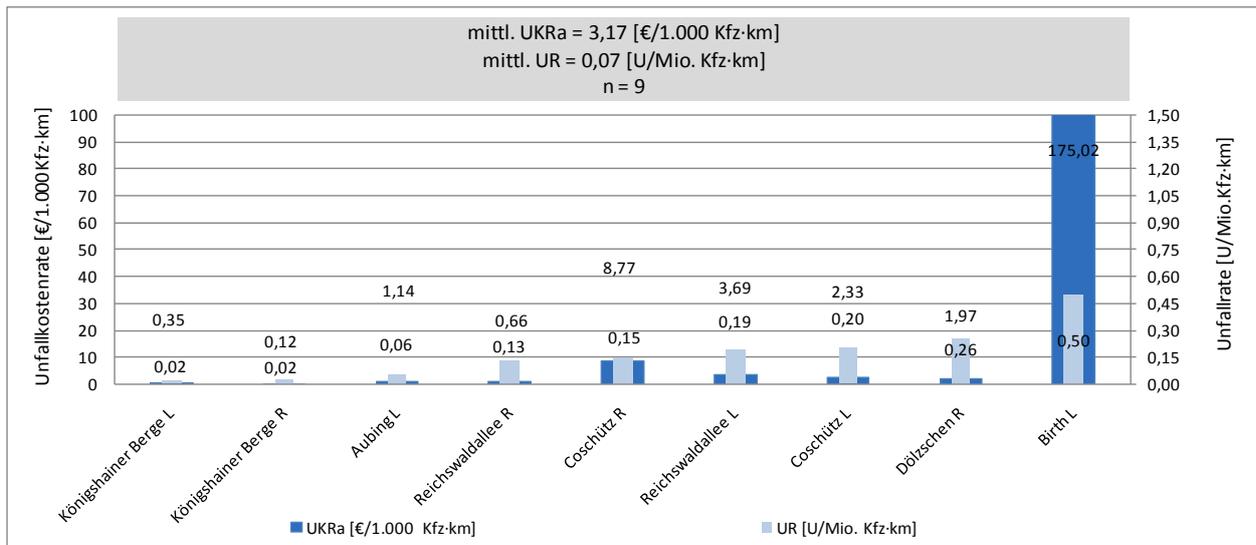


Bild 25: 2-streifige Querschnitte mit Seitenstreifen ($V_{zul} = 80$ km/h)

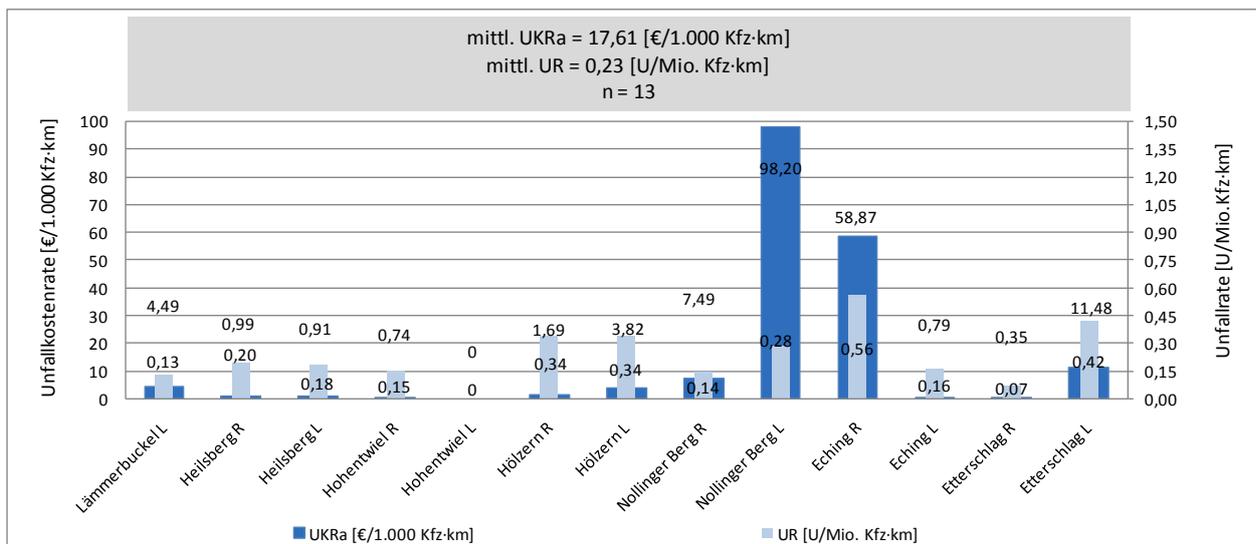


Bild 26: 2-streifige Querschnitte ohne Seitenstreifen ($V_{zul} = 100$ km/h)

Das Kollektiv der 2-streifigen Querschnitte ohne Seitenstreifen ($V_{zul} = 100$ km/h) besteht aus 13 Tunnelröhren. Die Röhren der Tunnel Nollinger Berg und Eching fallen in diesem Kollektiv durch hohe Unfallkostenraten auf. Grund dafür ist eine erhöhte Anzahl der Unfälle mit Personenschaden (Unfallkategorien 1-3). Insgesamt ereigneten sich in diesem Teilkollektiv 34 Unfälle. Für 16 der 34 Unfälle fehlen die Angaben der Unfallursache. Dieser Umstand lässt somit keine tragfähige Auswertung der Unfallursachen zu. In dem Kollektiv der 2-streifigen Querschnitte ohne Seitenstreifen ($V_{zul} = 100$ km/h) konnte jedoch eine erhöhte Anzahl an Unfällen festgestellt werden, die infolge ei-

ner nicht angepassten Geschwindigkeit stattfanden (sechs Fälle). Die Betrachtung der Unfallraten an den 2-streifigen Querschnitten ohne Seitenstreifen (vgl. Bild 26 und Bild 27) zeigt, dass die Röhren mit einer $V_{zul} = 100$ km/h im Mittel eine höhere Unfallrate haben, als die Röhren mit $V_{zul} = 80$ km/h. Der Anteil an Unfällen mit Personenschaden beträgt an 2-streifigen Tunnelquerschnitten ohne Seitenstreifen bei $V_{zul} = 100$ km/h ca. 50 %, bei einer $V_{zul} = 80$ km/h dagegen nur ca. 11 %. Vermutlich ist die höhere Geschwindigkeit eine maßgebende Ursache. Weitere Auffälligkeiten konnten im Teilkollektiv nicht festgestellt werden.

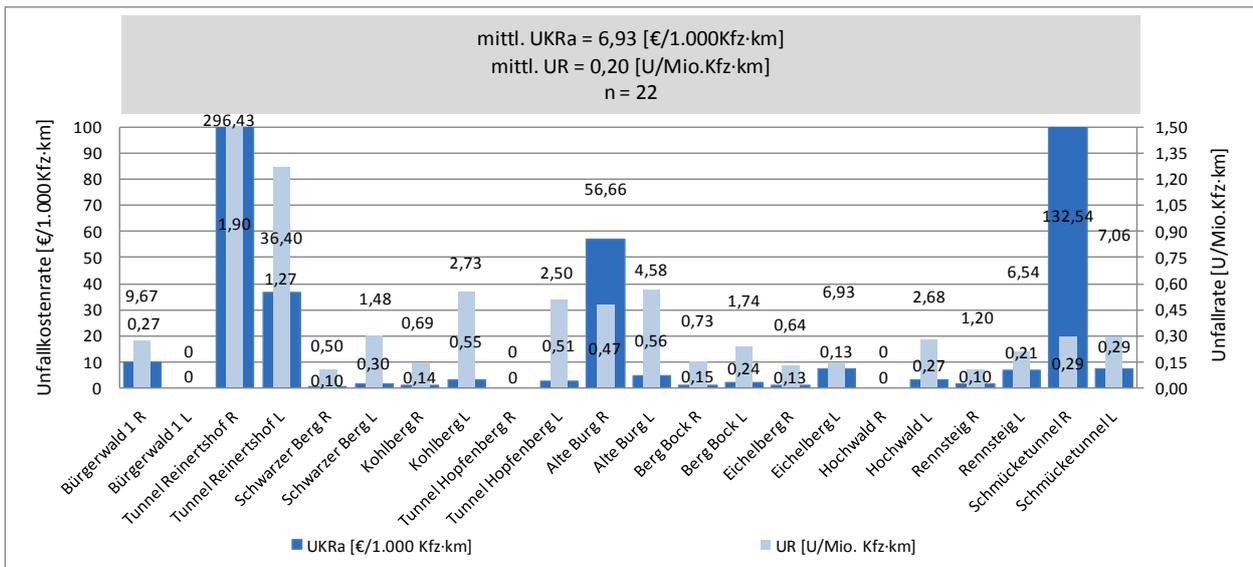


Bild 27: 2-streifige Querschnitte ohne Seitenstreifen ($V_{zul} = 80$ km/h)

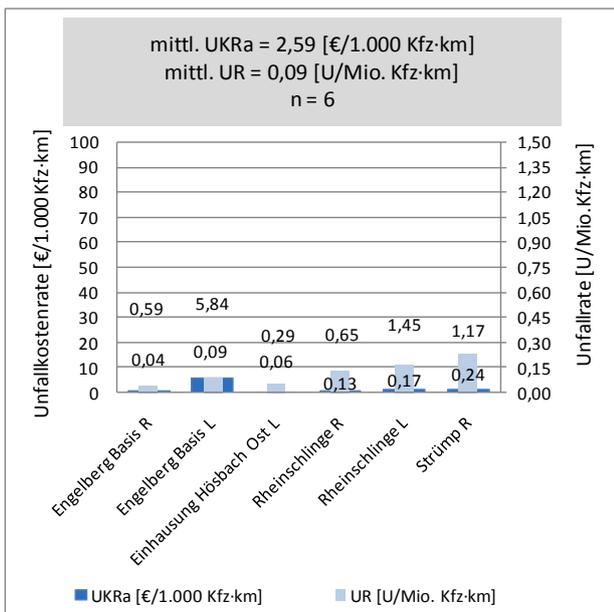


Bild 28: 3-streifige Querschnitte mit Seitenstreifen ($V_{zul} = 100$ km/h)

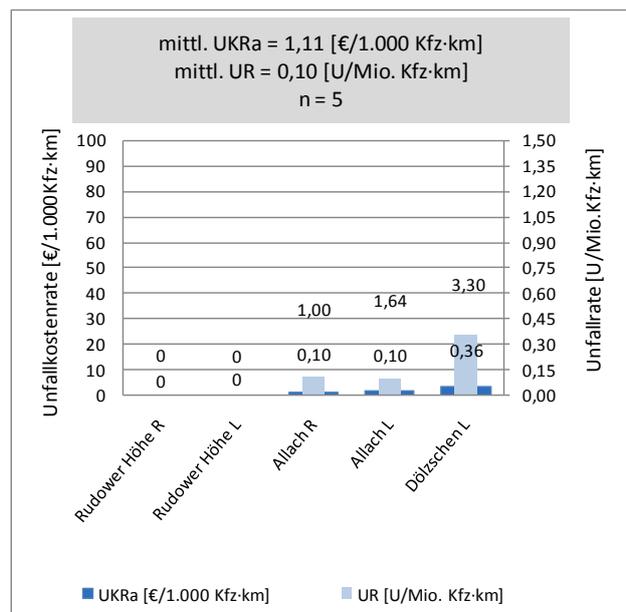


Bild 29: 3-streifige Querschnitte mit Seitenstreifen ($V_{zul} = 80$ km/h)

Das Kollektiv der 2-streifigen Querschnitte ohne Seitenstreifen ($V_{zul} = 80$ km/h) beinhaltet ebenfalls Tunnelröhren, die durch hohe Unfallkenngrößen auffallen. Dabei handelt es sich um die Röhren der Tunnel Reinertshof, Alte Burg und Schmücke. Hier sind die erhöhten Werte der Unfallkostenrate auf Unfälle der Kat. 2 zurückzuführen. Im Untersuchungszeitraum konnten insgesamt 79 Unfälle für dieses Teilkollektiv polizeilich erfasst werden. Angaben zu den Unfallursachen liegen nur für 17 der 79 Unfälle vor. Weitere Auffälligkeiten wurden nicht festgestellt.

In den Bildern 28 und 29 sind die Unfallkenngrößen der 3-streifigen Querschnitte mit Seitenstreifen in Abhängigkeit der V_{zul} dargestellt. Die Unfallraten der Röhren mit einer $V_{zul} = 80$ km/h und einer $V_{zul} = 100$ km/h sind vergleichbar. Insgesamt wurden für das Teilkollektiv der 3-streifigen Querschnitte mit Seitenstreifen ($V_{zul} = 100$ km/h) 32 Unfälle aufgenommen. Als Auslöser der Unfälle wurde eine nicht angepasste Geschwindigkeit (in vier Fällen), ungenügender Sicherheitsabstand (in vier Fällen), Fehler beim Wiedereinordnen nach rechts (in vier Fällen),

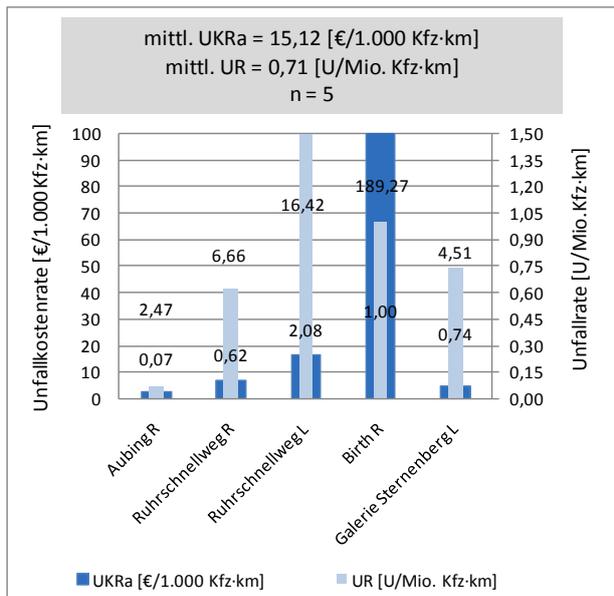


Bild 30: 2-streifige Querschnitte mit Seitenstreifen mit Ein- und Ausfahrten ($V_{zul} = 80$ km/h)

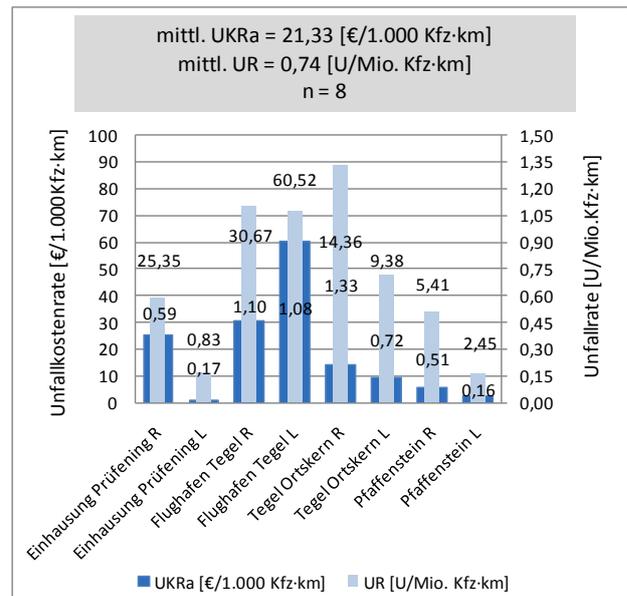


Bild 31: 2-streifige Querschnitte ohne Seitenstreifen mit Ein- und Ausfahrten ($V_{zul} = 80$ km/h)

falscher Fahrstreifenwechsel (in zehn Fällen) sowie unzureichend gesicherte Ladung (in vier Fällen) angegeben. Bei den restlichen sechs Unfällen wurden andere Fehler des Fahrzeugführers sowie sonstige Ursachen festgestellt. Eine erhöhte Anzahl an Unfällen, die infolge eines falschen Fahrstreifenwechsels oder Nichtbeachten von Reißverschluss (Ursache 26) geschehen sind kann u. U. auf Defizite in der baulichen bzw. betrieblichen Eigenschaften der 3-streifigen Tunnelröhren mit Seitenstreifen ($V_{zul} = 100$ km/h) deuten. Beispielweise dann, wenn die Verkehrsführung für den Verkehrsteilnehmer nicht richtig erkennbar bzw. eindeutig verständlich ist.

In den drei Untersuchungsjahren ereigneten sich auf den 3-streifigen Tunnelröhren mit Seitenstreifen ($V_{zul} = 80$ km/h) 18 Unfälle. Für dieses Teilkollektiv liegt keine Beschreibung der Unfallursachen vor. Auffällig ist jedoch, dass die Anzahl der Unfälle mit Personenschaden auf den 3-streifigen Querschnitten bei $V_{zul} = 80$ km/h mit ca. 11 % deutlich kleiner als bei $V_{zul} = 100$ km/h mit ca. 22 % ist. Die 3-streifigen Tunnelröhren ohne Seitenstreifen sind im Kollektiv nicht vorhanden.

2-streifige Tunnelröhren mit Seitenstreifen und Ein- und Ausfahrten und $V_{zul} = 100$ km/h sind in dem Kollektiv nicht vorhanden.

Die Unfallkostenrate der 2-streifigen Tunnelröhren mit Seitenstreifen und Ein- und Ausfahrten ($V_{zul} = 80$ km/h) liegt bei $UR = 0,71$ [U/Mio.Kfz•km] (vgl. Bild 30). Dieses Kollektiv besteht aus fünf

Tunnelröhren. Die Röhren der Tunnel Ruhrschnellweg und Birch fallen besonders durch ihre Unfallraten und Unfallkostenraten auf. In beiden Röhren wurde eine erhöhte Anzahl an Unfällen mit Personenschaden beobachtet. Die nördliche Röhre des Tunnels Ruhrschnellweg fällt zusätzlich durch eine allgemein hohe Anzahl an Unfällen auf. In diesem Teilkollektiv wurden 121 Unfälle verzeichnet. Der Anteil an Unfällen mit Personenschaden beträgt ca. 7 %. Angaben zu den Unfallursachen liegen für 116 der 121 Unfälle vor. Am häufigsten aufgetretene Ursachen waren nicht angepasste Geschwindigkeit (in 22 Fällen), starkes Bremsen des Vorausfahrenden ohne zwingenden Grund (in 31 Fällen), falscher Fahrstreifenwechsel oder Nichtbeachten von Reißverschluss (in neun Fällen) sowie Missachten der Vorfahrt des durchgehenden Verkehrs (in 27 Fällen). Auffällig ist vor allem ein hoher Anteil an Unfällen, die durch das Missachten der Vorfahrt entstanden sind. Als Grund für das Entstehen solcher Unfälle werden Defizite in der Gestaltung bzw. Trassierung von Ein- und Ausfahrtbereichen vermutet.

Für die 2-streifige Tunnelröhre ohne Seitenstreifen mit Ein- und Ausfahrten ($V_{zul} = 80$ km/h) wurde eine Unfallrate von $UR = 0,74$ [U/Mio.Kfz•km] ermittelt (vgl. Bild 31). Dieses Kollektiv besteht aus 182 Unfällen. Der Anteil an Unfällen mit Personenschaden liegt bei ca. 15 % und ist somit doppelt so hoch wie bei 2-streifigen Tunnelröhren mit Seitenstreifen ($V_{zul} = 80$ km/h).

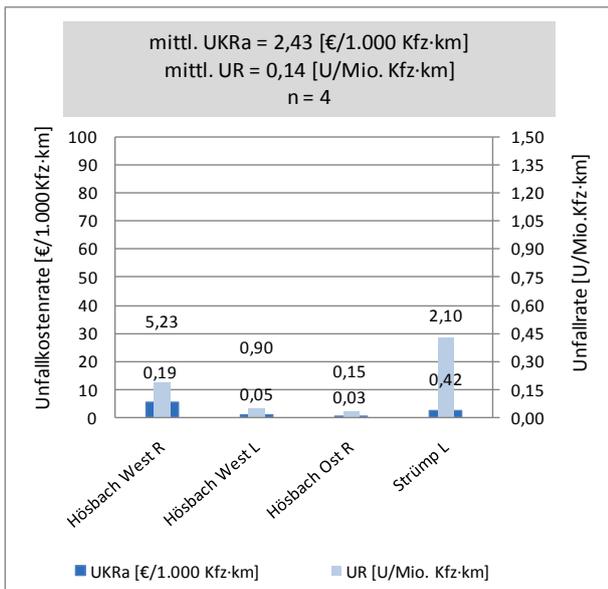


Bild 32: 3-streifige Querschnitte mit Seitenstreifen mit Ein- und Ausfahrten ($V_{zul} = 100$ km/h)

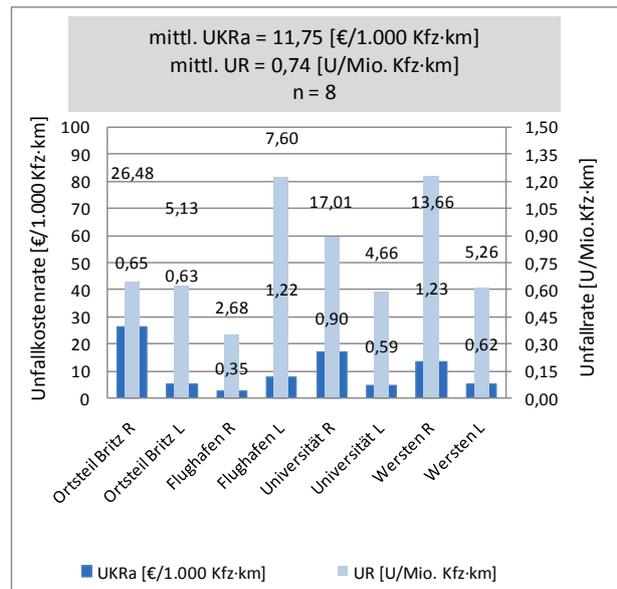


Bild 33: 3-streifige Querschnitte mit Seitenstreifen mit Ein- und Ausfahrten ($V_{zul} = 80$ km/h)

Die häufigsten Unfallursachen waren nicht angepasste Geschwindigkeit (in 23 Fällen), starkes Bremsen des Vorfahrenden ohne zwingenden Grund (in 39 Fällen) sowie falscher Fahrstreifenwechsel oder Nichtbeachten von Reißverschluss (in 61 Fällen). Missachten der Vorfahrt war nicht zu beobachten. Bei ca. 89 % der Unfälle, die infolge des falschen Fahrstreifenwechsels oder Nichtbeachten von Reißverschluss entstanden sind, kam es zum Zusammenstoß mit dem Fahrzeug, das seitlich in gleicher Richtung fährt (Unfallart 3). Ob sich diese Unfälle im Bereich von Ein- und Ausfahrten ereignet haben, geht aus den Unterlagen nicht hervor. Auf Grund der hohen Unfallrate in diesem Teilkollektiv wird jedoch deutlich, dass die Ein- und Ausfahrtbereiche sich negativ auf das Unfallgeschehen auswirken. Für die 2-streifigen Tunnelröhren ohne Seitenstreifen ($V_{zul} = 80$ km/h) liegen die Unfallraten bei $UR = 0,20$ [U/Mio.Kfz•km] (ohne Ein- und Ausfahrten) und bei $UR = 0,74$ [U/Mio.Kfz•km] (mit Ein- und Ausfahrten).

Die Betrachtung der Unfallkenngrößen in Anhängigkeit der V_{zul} ließ somit feststellen, dass im Allgemeinen die Unfallraten an 2-streifigen Querschnitten bei $V_{zul} = 80$ km/h niedriger sind als bei einer $V_{zul} = 100$ km/h.

Die hohe Unfallrate der 2-streifigen Querschnitte mit $V_{zul} = 100$ km/h beruht auf dem höheren Anteil an Unfällen mit Personenschaden. Es kann somit festgehalten werden, dass mit steigendem Geschwindigkeitsniveau in den 2-streifigen Tunnelquerschnitten die Verletzungsschwere ansteigt.

Das Kollektiv der 3-streifigen Querschnitte mit Seitenstreifen und Ein- und Ausfahrten ($V_{zul} = 100$ km/h) besteht aus vier Tunnelröhren. In diesen Tunnelröhren ereigneten sich 25 Unfälle. Der Anteil an Unfällen mit Personenschaden beträgt ca. 28 %. Angaben zu den Unfallursachen lagen für neun der 25 Unfälle vor. Hierbei handelt es sich um folgende Ursachen: nicht angepasste Geschwindigkeit (in zwei Fällen), ungenügender Sicherheitsabstand (in drei Fällen), sonstige Fehler beim Überholen (in einem Fall), unzureichend gesicherte Ladung (in einem Fall), andere Fehler des Fahrzeugführers (in einem Fall) und technische Mängel an der Bereifung (in einem Fall).

Das Kollektiv der 3-streifigen Querschnitte mit Seitenstreifen und Ein- und Ausfahrten ($V_{zul} = 80$ km/h) besteht aus acht Tunnelröhren. In dem Untersuchungszeitraum ereigneten sich 326 Unfälle. Der Anteil an Unfällen mit Personenschaden beträgt ca. 9 %. Am häufigsten aufgetretene Ursachen waren nicht angepasste Geschwindigkeit (in 30 Fällen), ungenügender Sicherheitsabstand (in 81 Fällen), falscher Fahrstreifenwechsel, Nichtbeachten von Reißverschluss (in 74 Fällen) sowie Missachten der Vorfahrt des durchgehenden Verkehrs (in 50 Fällen).

Die Unfallkenngrößen der 3-streifigen Querschnitte mit Seitenstreifen und Ein- und Ausfahrtbereichen sind in den Bildern 32 und 33 dargestellt. Diese Querschnitte weisen zum Teil höhere Unfallraten bei $V_{zul} = 80$ km/h als bei $V_{zul} = 100$ km/h auf. Der Anteil an Unfällen mit Personenschaden bei $V_{zul} = 100$ km/h ist jedoch viel höher als bei

$V_{zul} = 80$ km/h. Es lässt sich somit festhalten, dass eine erhöhte Unfallrate an den 3-streifigen Querschnitten mit Ein- und Ausfahrten ($V_{zul} = 80$ km/h) durch eine hohe Anzahl der Unfälle in diesem Teilkollektiv hervorgerufen wurde.

39 der 82 Tunnelröhren sind mit einem Seitenstreifen ausgestattet. Es zeigte sich, dass innerhalb der 2-streifigen Querschnitte mit und ohne Ein- und Ausfahrten die Röhren ohne Seitenstreifen ($V_{zul} = 80$ km/h) vergleichbare Unfallraten aufweisen als Röhren mit Seitenstreifen (vgl. Bild 25 und Bild 27). Bei einer zulässigen Höchstgeschwindigkeit von 100 km/h ist die Unfallrate beim Vorhandensein eines Seitenstreifens bei den beiden untersuchten Tunnelröhren etwas höher als bei den meisten 2-streifigen Querschnitte ohne Seitenstreifen mit $V_{zul} = 100$ km/h (vgl. Bild 24 und Bild 26). Aus dem Unfallgeschehen gehen keine Anhaltspunkte hervor, die zur Klärung dieses Ergebnisses beitragen. Das Teilkollektiv der 2-streifigen Querschnitte mit Seitenstreifen ($V_{zul} = 100$ km/h) umfasst nur zwei Tunnelröhren des Tunnels Schönbuch. Dem gegenüber standen 13 Röhren der 2-streifigen Querschnitte ohne Seitenstreifen ($V_{zul} = 100$ km/h).

Die Gegenüberstellung der Kollektive der 2-streifigen Querschnitte in Bezug auf den Einfluss des Seitenstreifens lieferte unterschiedliche Ergebnisse für die Röhren mit $V_{zul} = 100$ km/h und $V_{zul} = 80$ km/h. Das Kollektiv der 2-streifigen Querschnitte mit einem Seitenstreifen und einer $V_{zul} = 100$ km/h ist sehr klein (beinhaltet zwei Tunnelröhren). Auf Grund dessen wurde zusätzlich ein Vergleich von Unfallraten ohne Einbindung der zulässigen Höchstgeschwindigkeit aufgestellt (vgl. Anlage 7). Dies zeigt, dass innerhalb der 2-streifigen Querschnitte ohne Ein- und Ausfahrten die Unfallrate der Röhren mit einem Seitenstreifen $UR = 0,08$ [U/Mio.Kfz•km] beträgt, während die Unfallrate für die Röhren ohne Seitenstreifen mit $UR = 0,21$ [U/Mio.Kfz•km] deutlich höher ist.

Für die 2-streifigen Tunnelröhren mit Ein- und Ausfahrten ($V_{zul} = 80$ km/h) wurden ebenfalls – wenn auch hier nur noch geringfügig – höhere Unfallraten bei Querschnitten ohne Seitenstreifen ermittelt als bei Querschnitten mit Seitenstreifen: $UR_{ohneSStr.} = 0,74$ [U/Mio.Kfz•km] und $UR_{mitSStr.} = 0,71$ [U/Mio.Kfz•km] (vgl. Bild 30 und Bild 31). Der Anteil der Unfälle mit Personenschaden bei den 2-streifigen Tunnelröhren mit Ein- und Ausfahrten ist beim Vorhandensein eines Seitenstreifens deutlich niedriger als bei den Querschnitten ohne Seitenstreifen.

Im Rahmen der makroskopischen Analyse wurden auch die Unfallraten der 2- und 3-streifigen Quer-

schnitte miteinander verglichen. Die Betrachtung der Unfallraten dieser beiden Kollektive zeigte, dass die 2-streifigen Querschnitte bei einer $V_{zul} = 100$ km/h höhere Unfallraten aufweisen als die 3-streifigen Querschnitte:

$UR_{2-streifig} = 0,35$ [U/Mio.Kfz•km] und
 $UR_{3-streifig} = 0,09$ [U/Mio.Kfz•km]
 (vgl. Bild 24 und Bild 28).

Die Unfallrate der 2- und 3-streifigen Querschnitte bei $V_{zul} = 80$ km/h ist vergleichbar:

$UR_{2-streifig} = 0,07$ [U/Mio.Kfz•km] und
 $UR_{3-streifig} = 0,10$ [U/Mio.Kfz•km]
 (vgl. Bild 25 und Bild 29).

Die Unfallraten in 2- und 3-streifigen Tunnelröhren mit Ein- und Ausfahrten ($V_{zul} = 80$ km/h) weisen nur einen geringfügigen Unterschied auf:

$UR_{2-streifig} = 0,71$ [U/Mio.Kfz•km] und
 $UR_{3-streifig} = 0,74$ [U/Mio.Kfz•km]
 (vgl. Bild 30 und Bild 33).

Weiterhin wurde der Einfluss von Ein- und Ausfahrten in den Tunnelröhren auf das Unfallgeschehen untersucht. Deutlich erkennbar ist, dass die Röhren mit Ein- bzw. Ausfahrten (vgl. Bild 30 bis Bild 33) wesentlich höhere Unfallraten haben.

Dies wurde ausnahmslos bei dem Vergleich sowohl der 2-streifigen Querschnitte, als auch der 3-streifigen Querschnitte miteinander (auch unabhängig der V_{zul}) festgestellt:

- 2-streifige mit Seitenstreifen, $V_{zul} = 80$ km/h
 $UR_{ohne E/A} = 0,07$ [U/Mio.Kfz•km]
 $UR_{mit E/A} = 0,71$ [U/Mio.Kfz•km]
- 2-streifige ohne Seitenstreifen, $V_{zul} = 80$ km/h
 $UR_{ohne E/A} = 0,20$ [U/Mio.Kfz•km]
 $UR_{mit E/A} = 0,74$ [U/Mio.Kfz•km]
- 3-streifige mit Seitenstreifen, $V_{zul} = 100$ km/h
 $UR_{ohne E/A} = 0,09$ [U/Mio.Kfz•km]
 $UR_{mit E/A} = 0,14$ [U/Mio.Kfz•km]
- 3-streifige mit Seitenstreifen, $V_{zul} = 80$ km/h
 $UR_{ohne E/A} = 0,10$ [U/Mio.Kfz•km]
 $UR_{mit E/A} = 0,74$ [U/Mio.Kfz•km]

Anschließend wurden die angrenzenden Streckenabschnitte vor und nach den Tunneln untersucht. Um möglichst detaillierte Kenntnisse über die Unterschiede zwischen Tunnel und angrenzenden Streckenabschnitten zu erlangen, wurde in der Tabelle 25 neben der Darstellung der Unfallraten auch die Verteilung der Unfallkategorien angegeben.

Tab. 25: Unfallkategorien und Unfallraten aller Tunnel sowie der angrenzenden Streckenabschnitte

Unfallkategorie	Anzahl/Anteile vor Tunnel		Anzahl/Anteile Tunnel		Anzahl/Anteile nach Tunnel	
	Anzahl	Anteil	Anzahl	Anteil	Anzahl	Anteil
Unfälle mit Personenschaden	76	11,62 %	117	13,24 %	64	12,14 %
Kat. 1	0	0 %	2	0,23 %	0	0 %
Kat. 2	4	0,61 %	22	2,49 %	6	1,14 %
Kat. 3	72	11,01 %	93	10,52 %	58	11,00 %
Unfälle mit Sachschaden	578	88,38%	767	86,76 %	463	87,86 %
Kat. 4	37	5,66 %	47	5,32 %	38	7,21 %
Kat. 5	538	82,26 %	712	80,54 %	424	80,46%
Kat. 6	3	0,46 %	8	0,90 %	1	0,19 %
UR [U/Mio.Kfz•km]	0,22		0,30		0,18	

Die Untersuchung der angrenzenden Streckenbereiche erstreckt sich auf ca. 90 km (in beide Fahrrichtungen). Dem gegenüber standen 82 Tunnelröhren mit einer Länge von ca. 104 km.

Erhebliche Unterschiede in der Verteilung der Unfälle auf die Unfallkategorien konnten zwischen den Tunnelabschnitten und den angrenzenden Streckenabschnitten nicht festgestellt werden. Die angrenzenden Streckenabschnitte vor und nach dem Tunnel weisen jedoch etwas niedrigere Unfallraten als die Tunnelabschnitte auf. Aufgrund der fehlenden Daten erfolgte ein Vergleich mit Ein- und Ausfahrten auf der freien Strecke nicht,

6.2.5 Berechnung der Sichtweiten

Im Rahmen der Untersuchung wurden die Sichtweiten für die Tunnel, für die Planunterlagen vorlagen berechnet. Demnach wurden die erforderlichen Sichtweiten im Tunnel Schönbuch und Hölzern unterschritten. Bei der Bewertung von Sichtweiten konnten allerdings keine Rückschlüsse auf die Verkehrssicherheit gewonnen werden.

Voraussetzung für die Untersuchung der Sichtweiten in den Ein- und Ausfahrtbereichen sind Angaben zur Trassierung sowie der vorhandenen räumlichen Linienführung in den Ein- und Ausfahrtbereichen. Da hierfür aber keine ausreichenden Planunterlagen zur Verfügung gestellt wurden, konnte der Einfluss der Sichtweite nicht untersucht werden.

6.2.6 Zusammenfassung der makroskopischen Unfallanalyse

Als wesentliche Ergebnisse der makroskopischen Analyse können festgehalten werden:

- Autobahntunnelstrecken fallen nicht durch ein besonders hohes Unfallrisiko auf. Als Ver-

gleichswert wurde hierbei die Unfallrate der Unfälle mit Personenschaden für Bundesautobahnen $UR (P) = 0,83 [U/Mio.Kfz \cdot km]^4$ herangezogen. Die Unfälle mit Personenschaden liegen im vorliegenden Kollektiv bei 13 %, die Unfallrate bei $UR (P) = 0,04 [U/Mio.Kfz \cdot km]$. Die niedrigere $UR (P)$ im vorliegenden Kollektiv kann vermutlich auf die Beschränkung der zulässigen Höchstgeschwindigkeit in den Tunneln zurückgeführt werden.

- Die Betrachtung der Unfalltypen zeigt, dass in Tunnelstrecken im Wesentlichen die vier Unfalltypen Fahr Unfall, Einbiegen/Kreuzen-Unfall, Unfall im Längsverkehr und sonstiger Unfall von Bedeutung sind. Der Unfall im Längsverkehr ist der dominierende Unfalltyp.
- Der Vergleich der Tunnelabschnitte mit den angrenzenden Streckenabschnitten (jeweils 500 m vor und nach dem Tunnel) zeigt keine großen Unterschiede. Dies betrifft sowohl die Unfallkenngrößen als auch die Verteilungen der Unfallkategorien und der Unfalltypen.

Tunnel ohne Ein- und Ausfahrten

- 2-streifige Querschnitte ohne Seitenstreifen weisen eine geringfügig niedrigere mittlere Unfallrate bei $V_{zul} = 80 \text{ km/h}$ als bei $V_{zul} = 100 \text{ km/h}$ auf.
- 2-streifige Querschnitte mit Seitenstreifen weisen eine niedrigere mittlere Unfallrate als ohne Seitenstreifen bei $V_{zul} = 80 \text{ km/h}$ auf.
- 3-streifige Querschnitte mit Seitenstreifen ha-

⁴ Elsner 2014: Handbuch für Straßen- und Verkehrswesen (Planung, Bau, Erhaltung, Verkehr, Betrieb), Herausgeber Lipold, C., 68. Auflage, S. 493.

ben vergleichbare Unfallraten bei $V_{zul} = 80 \text{ km/h}$ und $V_{zul} = 100 \text{ km/h}$.

- 2- und 3-streifige Querschnitte mit und ohne Seitenstreifen weisen eine doppelt so hohe Anzahl an Unfällen der Kategorien 1 bis 3 bei $V_{zul} = 100 \text{ km/h}$ gegenüber $V_{zul} = 80 \text{ km/h}$ auf.

Tunnel mit Ein- und Ausfahrten

- 2-streifige Querschnitte mit Seitenstreifen weisen eine geringfügig niedrigere mittlere Unfallrate als ohne Seitenstreifen auf. Der Anteil an Unfällen der Kategorien 1 bis 3 ist an den Querschnitten ohne Seitenstreifen doppelt so hoch als an den Querschnitten mit Seitenstreifen.
- 3-streifige Querschnitte mit Seitenstreifen weisen eine doppelt so hohe Anzahl an Unfällen der Kategorien 1 bis 3 bei $V_{zul} = 100 \text{ km/h}$ als bei $V_{zul} = 80 \text{ km/h}$ auf. Die mittleren Unfallraten sind jedoch bei $V_{zul} = 100 \text{ km/h}$ und $V_{zul} = 80 \text{ km/h}$ vergleichbar.
- 2-streifige Querschnitte mit Seitenstreifen weisen eine geringfügig niedrigere mittlere Unfallrate als 3-streifige Querschnitte auf.

Vergleich Tunnel ohne Ein- und Ausfahrten/Tunnel mit Ein- und Ausfahrten

- Der Vergleich hat gezeigt, dass die Tunnel mit Ein- und Ausfahrten eine höhere Unfallrate haben als die Tunnel ohne Ein- und Ausfahrten. Ein Großteil der Tunnel mit Ein- und Ausfahrten weist Unfallschwerpunkte auf.

6.3 Mikroskopische Unfallanalyse

In der mikroskopischen Unfallanalyse soll vor allem die Frage beantwortet werden, wie die Ein- und Ausfahrten an Querschnitten mit und ohne Seitenstreifen künftig zu gestalten sind. Die mikroskopische Betrachtung des Unfallgeschehens soll außerdem dazu beitragen, die in der makroskopischen Untersuchung gewonnenen Erkenntnisse zu vertiefen. Zu diesem Zweck werden einzelne Tunnel unter Einbeziehung ihrer betrieblichen und baulichen Merkmale untersucht.

6.3.1 Auswahl der Tunnel

In der Unfallanalyse sollen alle Tunnel mit Ein- und Ausfahrten, die höhere Unfallraten aufweisen näher untersucht werden. Insgesamt umfasst das vorliegende Kollektiv 12 Tunnel mit Ein- und Ausfahrtbereichen. Nicht enthalten ist hier der Tunnel Flughafen Tegel an der A 111, der jeweils mit einer Ein- und Ausfahrt ausgestattet ist. Hier war es nicht möglich, die Unfälle dem Tunnelbauwerk zuzuordnen. Die Einhausung Prüfening besitzt keine Ein- und Ausfahrtbereiche. Auf Grund deren Besonderheit wurde jedoch entschieden, die

Tab. 26: Tunnel der mikroskopischen Untersuchung (n = 13)

Nr	Land	Straße	Tunnelname	Richtung		Planunterlagen	Vzul [km/h]	Einfahrt im Tunnel	Ausfahrt im Tunnel
1	BE	A100	Ortsteil Britz	Dreieck Neukölln	1	Lageplan Höhenplan Querschnittsplan	80	nein	ja (2)
				Dreieck Charlottenburg	-1			ja (2)	nein
5	BE	A111	Tegel Ortskern	Dreieck Charlottenburg	1	Lageplan Höhenplan Querschnittsplan	80	ja	nein
				Oranienburg	-1			nein	ja
15	BY	A 93	Einhausung Prüfening	Regensburg	1	Lageplan Höhenplan Querschnittsplan	80	VS	nein
				Weiden	-1			nein	VS
17	BY	A 99	Aubing	AK Süd	1	Lageplan	80	nein	ja
				AD Münschen	-1			nein	nein
21	BY	A 93	Pfaffenstein	Regensburg	1	Lageplan Höhenplan Querschnittsplan	80	nein	ja
				Weiden	-1			ja	nein
31	NW	A 44	Birth	Dortmund	1	Höhenplan	80	nein	ja
				Düsseldorf	-1			nein	nein
32	NW	A 44	Flughafen	Velbert	1	-	80	nein	ja
				Aachen	-1			ja	nein
35	NW	A 40	Ruhrschnellweg	Bochum	1	-	80	nein	ja
				Duisburg	-1			ja	nein
36	NW	A 44	Strümp	Velbert	1	-	100	nein	ja
				Aachen	-1			nein	nein
37	NW	A 46	Universität	Brilon	1	-	80	ja	nein
				Heinsberg	-1			nein	ja
38	NW	A 46	Wersten	Brilon	1	-	80	ja (2)	nein
				Heinsberg	-1			nein	ja (2)
55	BY	A 3	Einhausung Hösbach West	Würzburg	1	Lageplan Höhenplan Querschnittsplan	100	ja	ja
				Frankfurt a. Main	-1			ja	ja
55	BY	A 3	Einhausung Hösbach Ost	Würzburg	1	Lageplan Höhenplan Querschnittsplan	100	nein	ja
				Frankfurt a. Main	-1			nein	nein
59	NW	A 46	Galerie Sternenberg	Heinsberg	-1	-	80	nein	ja

mit: VS = Verflechtungsstreifen

Einhausung in das Kollektiv der mikroskopischen Analyse aufzunehmen. Die Tunnel der mikroskopischen Unfallanalyse sind in der Tabelle 26 zusammengestellt und in der Anlage 6 durch Grauschattierung kenntlich gemacht.

Für die Tunnel der mikroskopischen Unfallanalyse wurden Datenblätter mit Grundinformationen zu den Tunneln sowie Skizzen mit der Verteilung der Unfälle entlang der Tunnel angefertigt. Diese können den Anlagen 8 und 9 entnommen werden. In dem Tunnelkollektiv sind sowohl 2- als auch 3-streifige Richtungsquerschnitte vorhanden. Mit Ausnahme der Tunnel Tegel Ortskern und Pfaffenstein sowie der Einhausung Prüfening besitzen alle Tunnel einen Seitenstreifen. 11 Tunnel werden mit einer $V_{zul} = 80$ km/h betrieben. In den anderen beiden Tunneln ist die zulässige Höchstgeschwindigkeit auf $V_{zul} = 100$ km/h begrenzt.

Das Kollektiv weist eine Gesamtlänge von ca. 25 km auf. Dabei variiert die Länge einzelner Tunnel von 618 m (Einhausung Prüfening) bis 1.935 m (Tunnel Aubing). Die durchschnittliche tägliche Verkehrsbelastung liegt zwischen 8.700 Kfz/24h (Tunnel Birth) und 52.750 Kfz/24h (Tunnel Ortsteil Britz).

Für die mikroskopische Unfallanalyse wurden die Unfalldaten mit den streckengeometrischen Parametern und den Verkehrsdaten zusammengeführt.

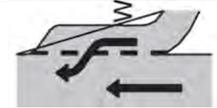
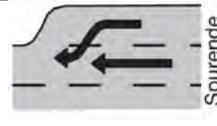
6.3.2 Beschreibung des Unfallgeschehens

In den 13 Tunneln der mikroskopischen Analyse ereigneten sich insgesamt 579 Unfälle im Tunnel. Etwa 10 % der Unfälle sind mit Personenschaden.

Für die Untersuchung der Verkehrssicherheit an den Ein- und Ausfahrten der Tunnel sind vor allem Unfälle, die in den Rampen der Anschlussstellen stattfanden, von Interesse. Solche Unfälle beziehen sich hauptsächlich auf drei Unfalltypen: Fahr-unfall, bei dem ein Fahrer beim Einbiegen die Kontrolle über sein Fahrzeug verliert, Einbiegen/Kreuzen-Unfälle in den Ein- und Ausfahrtbereichen und Unfälle, die infolge eines Fahrstreifenwechsels am Ende der Einfädelungstreifen stattfanden.

Für die nähere Untersuchung der Unfälle wurden die maßgeblichen Konfliktsituationen in der Tabelle 27 zusammengefasst. Im Datenkollektiv liegen 73 Unfälle dieser Konfliktsituation vor.

Tab. 27: Maßgebliche Konfliktsituationen an den Ein- und Ausfahrten der Tunnel

Unfalltyp	Fall	Konfliktsituation
1 (F)	123	
3 (EK)	305	
	315	
6 (LV)	622	
	633	
	643	

Im Rahmen der Untersuchung wurden die Unfallursachen für die Unfälle in Tunneln näher betrachtet. Zu 37 der 579 Unfälle fehlten diese Angaben. Die Unfallursache wird aus dem Unfallursachenverzeichnis durch die Polizei zugeordnet. In dem Verzeichnis sind 89 verschiedene Unfallursachen beschrieben. Es zeigte sich, dass folgende vier Unfallursachen in dem Kollektiv der mikroskopischen Untersuchung maßgeblich sind:

- Nicht angepasste Geschwindigkeit (Unfallursache 13)
- Ungenügender Sicherheitsabstand (Unfallursache 14)
- Falscher Fahrstreifenwechsel (Unfallursache 26)
- Missachten der Vorfahrt (Unfallursache 29)

Tunnel Ortsteil Britz

Der Tunnel Ortsteil Britz ist ein zweiröhriger Autobahntunnel. Dieser liegt an der A 100 auf dem Gebiet der Stadt Berlin. Das nachgeordnete Straßennetz wird durch die Anschlussstelle Buschkrugallee angeschlossen. Für die Rampen der Anschlussstellen liegen keine Angaben zum Unfallgeschehen für die Jahre 2009 bis 2011 vor.

Für den Tunnel liegen Lage-, Höhen- sowie Querschnittspläne vor. Der Tunnel Ortsteil Britz besitzt in der nördlichen Röhre zwei Einfahrten. Beide Einfahrtbereiche beginnen und enden im Tunnel. Beide Einfädelsstreifen sind gleich lang und haben eine Länge von jeweils 200 m. Die südliche Röhre des Tunnels ist mit zwei Ausfahrten ausgestattet. Einer der beiden Ausfädelsstreifen beginnt und endet im Tunnel. Dessen Länge beträgt 130 m. Der zweite Ausfädelsstreifen beginnt im Tunnel und endet 100 m nach dem Tunnelportal.

Insgesamt wurden für den Tunnel Ortsteil Britz 126 Unfälle in die Datenbank aufgenommen, davon 17 Unfällen mit Personenschaden. Sechs Einbiegen/Kreuzen-Unfälle wurden nur in der nördlichen Röhre vermerkt. Davon sind alle auf das Missachten der Vorfahrt des durchgehenden Verkehrs zurückzuführen. In der Einfahrt selbst wurden lediglich vier Unfälle dieses Typs verzeichnet. Da keine textliche Beschreibung des Unfallhergangs zur Verfügung gestellt wurde, konnten die Ursachen für die Verteilung der Einbiegen/Kreuzen-Unfälle nicht geklärt werden.

Tunnel Tegel Ortskern

Dieser Tunnel befindet sich ebenfalls, wie der Tunnel Ortsteil Britz, in Berlin. Für die Auswertung standen Unfalldaten der Jahre 2009 bis 2011 sowie Lage-, Höhen- und Querschnittspläne zur Verfügung.

Der Tunnel Tegel Ortskern besitzt eine Ausfahrt in der östlichen und eine Einfahrt in der westlichen Röhre. Die Länge des Ausfädelsstreifens beträgt nur 120 m, davon befinden sich 40 m im Tunnel. Auch der Einfädelsstreifen befindet sich nur zum Teil im Tunnel Tegel Ortskern. Dabei weist dieser eine Länge von 200 m (davon 130 m im Tunnel) auf.

Die Verteilung der Unfälle auf die beiden Röhren wurde in der Anlage 9-2 dargestellt. Insgesamt ereigneten sich im Tunnel 54 Unfälle, davon 35 in der westlichen Röhre. Im Tunnel Ortsteil Britz wurden sieben Unfälle mit Personenschaden verzeichnet (ausschließlich Unfälle der Kat. 3). Der Ausfahrtbereich des Tunnels fällt nicht durch die

hohe Anzahl von Unfällen auf. In dem Untersuchungszeitraum ereignete sich hier kein einziger Unfall. Hingegen fällt der Einfahrtbereich mit acht Unfällen negativ auf. In der Einfahrt fanden keine Einbiegen/Kreuzen-Unfälle statt. In sieben der acht Fälle war es ein Unfall im Längsverkehr. Als Auslöser der Unfälle in der Einfahrt wurde von der Polizei der ungenügende Sicherheitsabstand (in zwei Fällen), falscher Fahrstreifenwechsel (in vier Fällen), Fehler beim Überholen (in einem Fall) angegeben. Zum dem sonstigen Unfall wurde keine Ursache vermerkt.

Einhausung Prüfening

Die Einhausung Prüfening ist ein zweiröhriger Tunnel an der A 93. Der Tunnel befindet sich im Osten von Bayern, hat eine Länge von 618 m und wird mit 80 km/h befahren. Die Einhausung Prüfening liegt zwischen den Anschlussstellen Regensburg-Prüfening und Regensburg-West. Für die Rampen der Anschlussstellen liegt kein Unfallgeschehen vor. Die angrenzenden Streckenabschnitte zeigen jedoch eine etwas erhöhte Unfallrate im Vergleich zu dem Tunnelabschnitt.

Für die Einhausung liegen Lage-, Höhen- sowie Querschnittspläne vor. Bei den Unterlagen handelt es sich jedoch nur um Übersichtspläne. Für die Auswertung wurden daher zusätzlich die ZEB-Bilddaten herangezogen. Der Tunnel besitzt einen 31 m breiten Querschnitt mit zwei Fahrstreifen sowie einen Verflechtungsstreifen je Richtung. Der Verflechtungsstreifen wird über die gesamte Tunnellänge geführt. Die Fahrstreifen haben eine Breite von 3,75 m. Der Verflechtungsstreifen ist 3,50 m breit. Der Querschnitt hat eine lichte Breite von 15 m. Seitenstreifen sind keine vorhanden. Die Notgehwege haben eine Breite von 1,50 m. Die Notrufstationen befinden sich in einem regelmäßigen Abstand von jeweils 150 m.



Straße A0093, Abschnitt 6938019--6938020, Station 306, Lage R, Kampagne BY / BAB 2009

Bild 34: Nordportal Einhausung Prüfening (ZEB-Bilddaten)



Straße A0093, Abschnitt 6938036->6938014, Station 2017, Lage L, Kampagne BY / BAB 2009

Bild 35: Einfahrt Tunnel Pfaffenstein (ZEB-Bilddaten)

Die Einhausung wurde großzügig trassiert, so dass die gewählten Radien von 3.500 m deutlich größer sind als die Mindestangaben nach RAA (2008). Die Querneigung der Fahrbahn mit $q = 2,5 \%$ ist regelkonform.

Für den Bereich der Einhausung Prüfening liegen Verkehrsunfallanzeigen der Polizei für die Jahre 2009 bis 2011 vor. In diesem Zeitraum konnten insgesamt 18 Unfälle im Tunnel polizeilich erfasst werden, davon fanden 14 in aufsteigender Richtung (Fahrtrichtung Regensburg) statt. Im Tunnel wurden drei Unfälle mit Personenschaden verzeichnet, die auf Grund einer nicht angepassten Geschwindigkeit stattfanden. Die Unfallrate für die Einhausung Prüfening liegt bei $UR = 0,59$ [U/Mio.Kfz•km] in Richtung Regensburg und bei $UR = 0,17$ [U/Mio.Kfz•km] in Richtung Weiden. An dem nördlichen Tunneleingang endet die Führung des Verflechtungsstreifens ca. 40 m nach dem Tunnelportal (vgl. Bild 34). In diesem Bereich wurden neun Unfälle verzeichnet. Worauf diese Unfälle zurückzuführen sind, konnte nicht festgestellt werden, da die Angaben zu den Unfallursachen im Bereich des nördlichen Tunnelportals fehlen. Es wird jedoch vermutet, dass die Anhäufung der Unfälle mit der Verkehrsführung im Bereich des nördlichen Tunneleingangs zusammenhängt. Die Verteilung der Unfälle (Unfallkategorien und Unfalltypen) entlang des Tunnelabschnittes kann der Anlage 9-3 entnommen werden.

Tunnel Aubing

Der Tunnel Aubing ist ein zweiröhriger Autobahntunnel an der A 99. Er liegt im Westen der bayerischen Landeshauptstadt München und wird mit $V_{zul} = 80$ km/h betrieben. Hinter dem nordöstlichen Tunnelportal befindet sich die Anschlussstelle München-Lochhausen. Angaben zum Unfallgeschehen der Anschlussstelle standen nicht zur Verfügung. Die angrenzenden Streckenabschnitte zeigen jedoch keine Auffälligkeiten.



Straße A0099, Abschnitt 7834043->7834039, Station 3419, Lage R, Kampagne BY / BAB 2009

Bild 36: Ausfädelungsstreifen Tunnel Aubing (ZEB-Bilddaten)

Für den Tunnel Aubing wurden ein Lageplan sowie ein Bauwerksbuch zur Verfügung gestellt. Aus der Querschnittsskizze im Bauwerksbuch konnte eine lichte Breite von 13,60 m je Röhre entnommen werden. Angaben zu Fahrstreifenbreiten beinhaltet das Bauwerksbuch jedoch nicht. Aus der Querschnittsskizze wurde eine Querneigung q von $2,5 \%$ entnommen.

Eine Tunnelröhre des Tunnels Aubing hat einen Ausfahrtbereich am östlichen Tunnelportal. Dieser beginnt im Tunnel und endet im Streckenabschnitt nach dem Tunnel (vgl. Bild 36). Die Länge des Ausfädelungsstreifens beträgt 250 m. Aus dem Lageplan konnte entnommen werden, dass der kleinste trassierte Radius im Tunnel Aubing bei $R = 5.500$ m liegt. Der Tunnel Aubing wurde unter Verwendung unterschiedlicher Klothoidenparameter trassiert. Die kleinste verwendete Klothoide betrug $A = 1.000$ m. Die Längsneigung auf der durchgehenden Hauptfahrbahn beträgt $s = 2,7 \%$ und liegt daher geringfügig über dem Regelwert nach der RAA (2008) von $s \leq 2,5 \%$ für Tunnel mit einer Länge von $L > 500$ m.

Für den Bereich des Tunnels Aubing wurden Verkehrsunfallanzeigen ausgewertet. In den drei Jahren fanden im Tunnel neun Unfälle statt, vier davon waren Unfälle der Kategorie 3. Im Ausfahrtbereich fanden keine Unfälle statt. Die Unfallursachen waren in den Verkehrsunfallanzeigen nicht beschrieben. Die Verteilung der Unfälle entlang des Tunnels ist in der Anlage 9-4 dargestellt.

Tunnel Pfaffenstein

Der Tunnel Pfaffenstein ist ein zweiröhriger Autobahntunnel auf der A 93 mit einer lichten Breite von 11,80 m je Röhre. Er verläuft in der Nähe zum Tunnel Prüfening (ca. 1400 m Tunnelabstand).

Für den Tunnel Pfaffenstein liegen Lage-, Höhen- sowie Querschnittspläne vor. Bei den Unterlagen handelt es sich nur um Übersichtspläne. Wie bei der Einhausung Prüfening wurden auch hier für die Auswertung ZEB-Bilddaten herangezogen. Am nördlichen Ende schließt der Tunnel an die B 8 (Anschlussstelle Regensburg-Pfaffenstein) an. Der Tunnel Pfaffenstein besitzt in der westlichen Röhre eine Einfahrt (vgl. Bild 35). Der Einfädelsstreifen hat eine Länge von nur 135 m, davon befinden sich 80 m im Tunnel. Die östliche Röhre des Tunnels ist mit einer Ausfahrt ausgestattet. Die Länge des Ausfädelsstreifens beträgt nur 90 m.

In den drei Untersuchungsjahren fanden im Tunnel Pfaffenstein 21 Unfälle statt, 16 Unfälle davon in der westlichen Röhre. Bei drei Unfällen handelt es sich um Unfälle mit Personenschaden (ausschließlich Unfälle der Kat. 3). Im Rahmen der Unfalluntersuchung konnten im Tunnel mehrere Unfälle im Bereich der zu kurzen Einfahrt erkannt werden. Die Verteilung der Unfälle kann der Anlage 9-5 entnommen werden.

Tunnel Birth

Der Tunnel Birth bei Velbert in Nordrhein-Westfalen ist ein zweiröhriger Tunnel mit einem 2-streifigen Richtungsquerschnitt. Der Tunnel befindet sich am Ausbauende der A 44, die im Süden 1.100 m nach dem Tunnelportal endet. Im Norden wird das regionale Straßennetz über die Anschlussstelle Velbert-Nord an die A 44 angeschlossen. Für die Rampen der Anschlussstellen liegen Angaben zum Unfallgeschehen vor.

Im Bereich der AS Velbert-Nord fanden in den Jahren 2009 bis 2011 insgesamt 26 Unfälle statt, einer davon war ein Unfall mit Personenschaden. 50 % aller Unfälle in den Rampen der AS Velbert-Nord waren Fahrunfälle. Die Betrachtung der angrenzenden Streckenabschnitte vor und nach dem Tunnel zeigte keine Auffälligkeiten. Die Verteilung der Unfälle auf den Rampen der Anschlussstelle Velbert-Nord kann der Anlage 10-1 entnommen werden.

Für den Tunnel Birth wurden keine Planunterlagen zur Verfügung gestellt. Im Rahmen der Datenanforderung wurde für die Tunnel des Bundeslandes Nordrhein-Westfalen eine Übersichtsdatenbank in Form einer Excel-Tabelle mit Grundinformationen zu den Tunneln bereitgestellt. Demzufolge weist der Tunnel einen Querschnitt mit einer lichten Breite von 18,00 m auf. Anhand der Grunddaten konnte der Tunnel dem Regelquerschnitt 33T (Sonderlösung mit zusätzlichem Seitenstreifen) zugeordnet werden. Jede Tunnelröhre hat zwei Fahrstreifen mit Breiten von 3,75 m und 3,70 m.

Im Innenbereich der Tunnelröhre befinden sich jeweils ein Seitenstreifen mit einer Breite von 3,00 m und ein Seitenstreifen mit 3,75 m. Seitlich neben der Fahrbahn verlaufen Notgehwege mit 1,00 m Breite. Anhand der ZEB-Bilddaten konnte eine Ausfahrt im Tunnel Birth erkannt werden. Eine Skizze von der Lage der Ausfahrt im Tunnel kann Anlage 9-6 entnommen werden. Ähnlich wie bei dem Tunnel Aubing beginnt der Ausfädelsstreifen im Tunnel vor dem nördlichen Tunnelportal und endet kurz nach dem Tunnel. Anhand der ZEB-Bilddaten konnte näherungsweise die Länge des Ausfädelsstreifens auf 250 m bestimmt werden. Davon befinden sich 180 m im Tunnel.

Für den Tunnel Birth wurde eine Datenbank der Unfälle für die Jahre 2009 bis 2011 zur Verfügung gestellt. Diese enthält jedoch keine Beschreibung des Unfallhergangs. Insgesamt ereigneten sich im Tunnel Birth 12 Unfälle. Vier davon waren Unfälle mit Personenschaden, die auf Grund nicht angepasster Geschwindigkeit entstanden sind. Die Verteilung der Unfälle auf die Röhren kann der Anlage 8-6 entnommen werden. Zwei Unfälle konnten im Bereich des Ausfädelsstreifens festgestellt werden. Ursachen hierfür waren eine nicht angepasste Geschwindigkeit und ungenügender Sicherheitsabstand. Im Tunnel Birth (absteigende Fahrtrichtung) wurde einer der insgesamt zwei Unfälle der Kat. 1 vermerkt. Ursache für diesen Unfall war ebenfalls eine nicht angepasste Geschwindigkeit.

Tunnel Flughafen

Der Tunnel Flughafen Düsseldorf ist ein zweiröhriger Autobahntunnel an der A 44. Der Tunnel befindet sich im Norden der nordrhein-westfälischen Landeshauptstadt Düsseldorf und hat zwei Röhren mit Längen von 1.070 m. Das regionale Straßennetz wird im Westen durch die AS Düsseldorf-Stockum und im Osten durch die AS Düsseldorf-Flughafen jeweils vor dem Tunnel Flughafen an die A 44 angeschlossen.

Für den Flughafentunnel liegen keine Planunterlagen vor. Die Grundinformationen zum Querschnitt konnten jedoch aus der Übersichtsdatenbank entnommen werden. Danach besitzt der Flughafentunnel einen 35,50 m breiten Querschnitt mit drei Fahrstreifen (3,75 m) und einem Seitenstreifen (2,70 m) je Röhre. Der Tunnel hat sowohl eine Ein- als auch eine Ausfahrt, die Ein- und Ausfädelsstreifen befinden sich im Tunnel. Die Längen der Ein- und Ausfädelsstreifen wurden anhand der ZEB-Bilder näherungsweise bestimmt. Demnach ist der Ausfädelsstreifen 250 m und der Einfädelsstreifen 200 m lang.

Im Rahmen der Unfallanalyse wurde das Unfallgeschehen der Jahre 2009 bis 2011 ausgewertet. Bei der Unfallanalyse wurde festgestellt, dass der Flughafentunnel einer der unfallauffälligsten Tunnel im Rahmen der gegenwärtigen mikroskopischen Analyse ist. Die Verteilung der Unfälle in den beiden Tunnelröhren kann der Anlage 9-7 entnommen werden.

Im Tunnel ereigneten sich insgesamt 63 Unfälle, 49 davon allein in der nördlichen Röhre. Im Bereich der westlichen Ausfahrt wurden 16 Unfälle registriert. Im Einfahrtbereich der nördlichen Röhre wurden sieben Unfälle auf einer Länge von 100 m von der Polizei aufgenommen.

Im mittleren Bereich der Einfahrt ereigneten sich drei Unfälle. Direkt hinter der Einfahrt konnten 13 Unfälle vermerkt werden. Einer der Unfälle ist eindeutig infolge einer Kollision im Einfahrtbereich entstanden (Typ 305). In der nördlichen Röhre ereigneten sich vier Einbiegen/Kreuzen-Unfälle. Zwei davon ereigneten sich direkt im Einfahrtbereich, einer vor der Einfahrt und einer nach der Einfahrt. Die Ursache für drei der insgesamt vier Einbiegen/Kreuzen-Unfälle der nördlichen Röhre war das Missachten der Vorfahrt.

Für die Rampen der Anschlussstellen liegen Angaben zum Unfallgeschehen für die Jahre 2009 bis 2011 vor. Im Bereich der AS Düsseldorf-Flughafen fanden in den Untersuchungs Jahren 55 Unfälle statt. Ca. 50 % davon waren Fahrnunfälle. Bei fast allen Fahrnunfällen wurde „nicht angepasste Geschwindigkeit“ als Unfallursache angegeben. Bei ca. 42 % der Unfälle der AS Düsseldorf-Flughafen handelt es sich um Unfälle im Längsverkehr. Insgesamt haben sich nur wenige Unfälle mit Personenschaden (ca. 10 %) im Bereich dieser Anschlussstelle ereignet. Die Verteilung der Unfälle auf den Rampen der AS Düsseldorf-Flughafen kann der Anlage 10-2 entnommen werden.

Im Gegensatz dazu wurden im Bereich der Rampen der AS Düsseldorf-Stockum keine Unfälle verzeichnet. Die Betrachtung der angrenzenden Streckenabschnitte vor und nach dem Tunnel Flughafen hat gezeigt, dass diese etwas niedrigere Unfallraten im Vergleich zum Tunnelabschnitt aufweisen.

Tunnel Ruhr Schnellweg

Der Tunnel Ruhr Schnellweg ist ebenfalls ein zwei-röhriger Autobahntunnel. Dieser liegt an der A 40 auf dem Gebiet der Stadt Essen. Das nachgeordnete Straßennetz wird durch die Anschlussstellen Essen-Zentrum-West und -Ost an die A 40 angeschlossen. Für die Rampen der Anschlussstellen liegen Angaben zum Unfallgeschehen für die Jah-

re 2009 bis 2011 vor. An der AS Essen-Zentrum-Ost fanden 23 Unfälle statt. Hierbei handelt es sich bei 70 % um Unfälle im Längsverkehr. Auf den Rampen der AS Essen-Zentrum-West konnten neun Unfälle verzeichnet werden. Die Verteilung der Unfälle auf den Rampen der beiden Anschlussstellen kann der Anlagen 10-3 und 10-4 entnommen werden.

Für den Ruhr Schnellweg liegen keine Planunterlagen vor. Die Grundinformationen zum Querschnitt wurden aus der Übersichtsdatenbank entnommen. Der Tunnel hat einen 4-streifigen Querschnitt mit einer Breite von 10,70 m je Röhre. Im Tunnel beginnen die Ausfädelungstreifen und enden die Einfädelungstreifen der AS Essen-Zentrum-Ost. Die Längen der Ein- und Ausfädelungstreifen wurden anhand der ZEB-Bilder näherungsweise bestimmt. Demnach ist der Ausfädelungstreifen nur 170 m lang, davon befinden sich 70 m im Tunnel. Der Einfädelungstreifen ist nur 125 m lang, davon befinden sich 105 m im Tunnel (vgl. Bild 37).

Insgesamt wurden für den Tunnel Ruhr Schnellweg 91 Unfälle in die Datenbank aufgenommen. Dabei wurde festgestellt, dass vor allem in der nördlichen Röhre (Fahrtrichtung Duisburg) die meisten Unfälle stattfanden. Von den insgesamt 70 Unfällen in dieser Röhre waren 17 Unfälle vom Typ 305 „Unfall durch Kollision mit fließendem Verkehr in der Auffahrt“. Diese Unfälle fanden auf einer Länge von 700 m statt und wurden durch Missachten der Vorfahrt des durchgehenden Verkehrs auf der Bundesautobahn vermerkt. In der Einfahrt selbst wurden lediglich zwei Unfälle im Längsverkehr verzeichnet. Da keine textliche Beschreibungen des Unfallhergangs zur Verfügung gestellt wurden, konnten die Ursachen für die Verteilung der Einbiegen/Kreuzen-Unfälle nicht geklärt werden.



Straße A0040, Abschnitt 4508100A-4508165A, Station 918, Lage L, Kampagne NW / BAB 2010

Bild 37: Einfahrt Tunnel Ruhr Schnellweg

In der südlichen Röhre (Fahrtrichtung Bochum) fanden deutlich weniger Unfälle als in der Gegenrichtung statt. Auch hier entstanden 5 der 21 Unfälle auf Grund des Missachtens der Vorfahrt (vgl. Anlage 9-8).

Tunnel Strümp

Der Tunnel Strümp liegt an der A 44 im Nordwesten der nordrhein-westfälischen Landeshauptstadt Düsseldorf. Direkt vor dem Tunnel befindet sich die Anschlussstelle Lank-Latum. Für den Tunnel Strümp liegen keine Planunterlagen vor. Die Grundinformationen zum Querschnitt wurden aus der Übersichtsdatenbank entnommen.

Der Tunnelquerschnitt besteht aus zwei Röhren mit einer lichten Breite von 15,50 m. In jeder Röhre befinden sich drei Fahrstreifen mit Breiten von 3,50 m und Seitenstreifen. Nach RABT (2006) handelt es sich um den Querschnitt 33 T. Seitlich neben der Fahrbahn befinden sich Notgehwege mit einer Breite von 1,00 m. In Richtung Aachen ist der Tunnel mit einer Ausfahrt ausgestattet, deren Ausfädelungstreifen vor dem Tunnel beginnt und direkt im Tunnel endet. Die Länge des Ausfädelungstreifens beträgt 250 m (vgl. Bild 38).

Die Verteilung der Unfälle auf die beiden Röhren wurde in der Anlage 9-9 dargestellt. In den drei Untersuchungsjahren fanden im Tunnel Strümp 14 Unfälle statt, neun davon in der nördlichen Röhre. Der Ausfahrtbereich fällt nicht durch hohe Unfallanzahlen auf. In den Jahren 2009 bis 2011 ereigneten sich keine Unfälle mit Personenschaden.

Für die Rampen der AS Lank-Latum liegt das Unfallgeschehen der Jahre 2009 bis 2011 vor. In den Untersuchungsjahren fanden hier 31 Unfälle statt. Die Anschlussstelle ist bei der Auswertung durch einen hohen Anteil der Unfälle im Längsverkehr aufgefallen. Die Verteilung der Unfälle auf den Rampen wurde in der Anlage 10-5 dargestellt.

Tunnel Universität

Der Universitätstunnel liegt in Düsseldorf an der A 46. Für den Universitätstunnel liegen keine Planunterlagen vor. Die Grundinformationen zum Querschnitt wurden aus der Übersichtsdatenbank entnommen. Der Universitätstunnel schließt an seinem westlichen Ende an die AS Düsseldorf-Bilk an. Hier wird die Landesstraße L 293 durch zwei Rampen an das Autobahnnetz angeschlossen (Ein- und Ausfahrten). Die Einfahrt befindet sich direkt im Tunnel, dabei beträgt die Länge des Einfädelungstreifens 160 m. Die Ausfahrt der nördlichen Röhre ist 270 m lang, davon befinden sich 250 m im Tunnel.



Straße A0044, Abschnitt 4705068A--4706164A, Station 206, Lage L, Kampagne NW / BAB 2010

Bild 38: Ausfahrt Tunnel Strümp (ZEB-Bilddaten)

In der Anlage 9-10 wurde das Unfallgeschehen des Tunnels für die Jahre 2009 bis 2011 dargestellt. In den drei Jahren wurden 53 Unfälle durch die Polizei aufgenommen. Auch hier konnte eine Vielzahl von Einbiege-Unfällen registriert werden. Insgesamt wurden 14 Unfälle des Typs 305 in den beiden Röhren verzeichnet. Ähnlich wie bei dem Tunnel Ruhrschnellweg befinden sich nicht alle Einbiegen/Kreuzen-Unfälle im Bereich der Ein- und Ausfahrten, sondern sind über die ganze Tunnellänge verteilt. Die Ursache dafür konnte auf Grund der fehlenden Unfallhergangsbeschreibung nicht festgestellt werden. Vor allem der Bereich der Einfahrtrampe in Richtung Brilon ist mit sieben Einbiegen/Kreuzen-Unfällen auffällig.

Für die Rampen der Anschlussstelle liegt das Unfallgeschehen der Jahre 2009 bis 2011 vor. Hier fanden 56 Unfälle statt, drei Unfälle sind der Kategorie 2 zuzuordnen. Die an den Tunnel angrenzenden Streckenabschnitte weisen keine Auffälligkeiten im Bereich der AS Düsseldorf-Bilk auf. Die Verteilung der Unfälle auf den Rampen kann der Anlage 10-6 entnommen werden.

Tunnel Wersten

Der Tunnel Wersten ist ein zweiröhriger Autobahntunnel auf der A 46 mit einer lichten Breite von 16,85 m je Röhre in unmittelbarer Nähe zum Universitätstunnel (ca. 900 m Tunnelabstand). Der Tunnel verläuft südlich der Landeshauptstadt Düsseldorf. Am westlichen Ende schließt der Tunnel an die B 8 (Werstener Straße) an.

Von der Werstener Straße wird der Tunnel durch zum Teil oberirdisch verlaufende Rampen angeschlossen. Der Tunnel Wersten besitzt in der nördlichen Röhre zwei Ausfahrten. Der westliche Ausfädelungstreifen der Ausfahrt hat eine Länge von

300 m, davon befinden sich 140 m im Tunnel. Der zweite Ausfädelungstreifen befindet sich vollständig im Tunnel und ist 250 m lang. Die westliche Röhre des Tunnels Wersten ist mit zwei Einfahrtbereichen ausgestattet. Davon befindet sich die östliche Einfahrt direkt im Tunnel. Der Einfädelungstreifen hat eine Länge von 200 m. Der Einfädelungstreifen am westlichen Tunnelportal besitzt eine Länge von 250 m, davon befinden sich nur 140 m im Tunnel.

Die Ein- und Ausfahrtrampen im Tunnel bilden einen Teil der AS Düsseldorf-Wersten. Diese befindet sich am westlichen Tunnelportal. Für die Rampen liegen Angaben zum Unfallgeschehen vor. Insgesamt fanden in den drei Jahren im Rampenbereich der Anschlussstellen 32 Unfälle statt. Davon sind zwei Unfälle mit Personenschaden (vgl. Anlage 10-7).

In den drei Untersuchungsjahren fanden im Tunnel Wersten 84 Unfälle statt, 47 Unfälle davon in der südlichen Röhre. Bei acht Unfällen handelt es sich um Unfälle mit Personenschaden (ausschließlich Unfälle der Kat. 3). Im Rahmen der Unfalluntersuchung konnten im Tunnel Wersten mehrere Unfälle im Bereich der Ein- bzw. Ausfahrten sowie auf Höhe der Tunnelportale erkannt werden. Die nähere Betrachtung des Unfallgeschehens hat ergeben, dass sich 24 der 47 Unfälle (Richtung Brilon) nachweislich infolge Abbiegens und somit im Bereich der Einfahrten ereignet haben. Als Ursache für Einbiegen-Kreuzen-Unfälle wurde in 23 der 24 Fälle das Missachten der Vorfahrt angegeben. In der Gegenrichtung wurde diese Besonderheit nicht beobachtet. Die Verteilung der Unfälle kann der Anlage 9-11 entnommen werden.

Einhausung Hösbach West/Ost

Die Einhausung Hösbach ist ein zweiröhriger Tunnel an der A 3 und befindet sich nördlich von Aschaffenburg. Sie besteht aus zwei getrennten, nah beieinander liegenden Abschnitten (Abschnitte West und Ost). Die freie Strecke zwischen der Einhausung West und der Einhausung Ost beträgt 440 m. In der Mitte der Einhausung West befindet sich die AS Hösbach (vgl. Bild 39). Somit hat die Einhausung Hösbach West jeweils eine Ein- und Ausfahrt je Röhre. Die Einhausung Hösbach Ost hat in der südlichen Röhre nur eine Ausfahrt.

Für die beiden Abschnitte der Einhausung liegen Lage-, Höhen sowie Querschnittspläne vor. Die lichte Breite der Röhren beträgt im Minimum 16,10 m und weitet sich im Bereich der Ein- und Ausfahrten auf 25,60 m auf. Der Querschnitt jeder Röhre umfasst drei Fahrstreifen mit jeweils 3,50 m



Straße A0003, Abschnitt 6021028C->5921022, Station 1677, Lage R, Kampagne BY / BAB 2009

Bild 39: Ausfahrt Einhausung Hösbach Ost (ZEB-Bilddaten)

und einen Seitenstreifen mit 2,50 m. Seitlich der Fahrbahn befinden sich Notgehwege mit einer Breite von 1,00 m. Die Querneigung der Fahrbahn beträgt $q = 2,5\%$.

Laut dem Sicherheitskonzept handelt es sich bei der Einhausung Hösbach West/Ost um einen Straßentunnel. Die A 3 ist im Bereich der Einhausung großzügig trassiert. Der kleinste Radius liegt bei $R = 1.933$ m. Die maximale Längsneigung der durchgehenden Hauptfahrbahn im Tunnel beträgt $s = 4\%$.

Für den Bereich der Einhausung Hösbach West/Ost liegt das Unfallgeschehen für die Jahre 2009 bis 2011 ohne textliche Beschreibung des Unfallhergangs vor. In diesem Zeitraum konnten insgesamt 15 Unfälle im Tunnel West und 2 Unfälle im Tunnel Ost vermerkt werden. In den beiden Abschnitten der Einhausung wurden sieben Unfälle mit Personenschaden verzeichnet. In den Ein- und Ausfahrtportalen konnten jedoch keine Auffälligkeiten festgestellt werden. Die Verteilung der Unfälle auf die Röhren kann der Anlage 9-12 entnommen werden.

Die angrenzenden Streckenabschnitte weisen etwas erhöhte Unfallraten im Vergleich zum Tunnel auf. Angaben zum Unfallgeschehen der Anschlussstelle Hösbach stehen nicht zur Verfügung.

Galerie Sternenberg

Die Galerie Sternenberg an der A 46 liegt nordöstlich der Stadt Wuppertal. Bei der Galerie handelt es sich um einen einseitigen Tunnel. In der Galerie Sternenberg liegt die zulässige Höchstgeschwindigkeit bei $V_{zul} = 80$ km/h. Im südlichen Bereich befindet sich ca. 750 m nach dem Tunnel die Anschlussstelle W.-Wichlinghausen. Ca. 1.9 km vor dem Tunnel befindet sich die Anschlussstelle

W.-Oberbarmen. Für die anliegenden Rampen der Anschlussstelle liegt kein Unfallgeschehen vor. Die Prüfung der angrenzenden Bereiche (500 m vor und nach dem Tunnel) zeigt keine Auffälligkeiten im Vergleich zur Galerie Sternenberg.

Für die Galerie Sternenberg wurden keine Planunterlagen zur Verfügung gestellt. Die Grundinformationen zum Querschnitt wurden aus der Übersichtsdatenbank entnommen. Für die Auswertung wurden zusätzlich die ZEB-Bilddaten herangezogen. Am Westportal der Galerie befindet sich eine Ausfahrt. Die Länge des Ausfädelungstreifens beträgt 200 m, davon befinden sich 170 m im Tunnel.

Im Rahmen der Unfallanalyse wurde das Unfallgeschehen der Jahre 2009 bis 2011 ausgewertet. In den drei Jahren ereigneten sich im Bereich der Galerie Sternenberg 17 Unfälle. Unfälle mit Personenschaden wurden dabei nicht vermerkt. Die Verteilung der Unfälle entlang der Tunnelröhre ist der Anlage 9-13 zu entnehmen. Es haben sich sieben Unfälle im Ausfahrtbereich ereignet. Bei den Unfällen handelt es sich jedoch um Unfälle mit Sachschaden (Kategorie 5). Als Ursache für die fünf der sieben Unfälle in der Ausfahrt, wurde ein ungenügender Sicherheitsabstand angegeben.

6.3.3 Zusammenfassung der mikroskopischen Analyse

In der mikroskopischen Unfallanalyse wurden die Tunnel mit Ein- und Ausfahrten näher untersucht. Als wesentliche Ergebnisse der Analyse lassen sich festhalten:

- Die Betrachtung der Unfallursachen zeigt, dass in Tunneln mit Ein- und Ausfahrten im Wesentlichen die vier Unfallursachen nicht angepasste Geschwindigkeit, ungenügender Sicherheitsabstand, falscher Fahrstreifenwechsel, Missachten der Vorfahrt von Bedeutung sind.
- Auf Höhe der Tunnelportale wurden in einigen Tunneln vermehrt Unfälle beobachtet (Tunnel Flughafen, Tunnel Ruhrschnellweg, Tunnel Ortsteil Britz). Eine Systematik im Unfallgeschehen konnte hierbei jedoch nicht erkannt werden.
- Die Unfalluntersuchung hat gezeigt, dass ein Großteil der Tunnel mit Ein- und Ausfahrten Unfallschwerpunkte aufweist. Hier wurden vor allem Einbiege/Kreuzen-Unfälle vermehrt beobachtet, sodass ein direkter Zusammenhang zwischen dem Unfallgeschehen und dem Vorhandensein von Ein- und Ausfahrten abgelei-

tet werden kann. Die häufigste Ursache für diese Unfälle war das Missachten der Vorfahrt des durchgehenden Verkehrs (Ursache 29).

- In den Tunneln mit mehreren Ein- und Ausfahrtbereichen nacheinander wurde eine hohe Unfallanzahl beobachtet (Tunnel Wersten, Tunnel Ortsteil Britz).
- Von der Gesamtheit der untersuchten Ein- und Ausfahrtbereiche waren es die Einfahrten, die besonders negativ aufgefallen sind. Die Ursache hierfür wird in der Unterschreitung der in den RAA 2008 empfohlenen Länge für Einfädelungstreifen vermutet.
- Missachten der Vorfahrt war überwiegend in den Ein- und Ausfahrtbereichen mit kurzen Ein- und Ausfädelungstreifen die häufigste Unfallursache.
- Die Betrachtung der Längen von Ein- und Ausfädelungstreifen in Tunneln zeigt, dass die durch die RAA 2008 für EKA 1 und EKA 2 empfohlene Länge von 250 m vermehrt unterschritten wird.

7 Verkehrsablaufanalyse

Im Rahmen der Analyse zum Verkehrsablauf erfolgen für die ausgewählten Tunnel die Modellierung von q-V-Beziehungen und die Ermittlung von Kapazitätswerten. Darüber hinaus sollen weitere, vor allem fahrstreifenbezogene Kenngrößen analysiert werden.

Die Vorgehensweise soll, um eine Vergleichbarkeit mit den Bemessungswerten für die „Außenstrecken“ zu gewährleisten, entsprechend der Methodik zur Aktualisierung der q-V-Beziehungen durch BRILON/GEISTEFELDT (2010) erfolgen. Grundlage zur Modellierung der q-V-Beziehungen bildet dabei das Warteschlangenmodell nach BRILON/PONZLET (1995). Die Ermittlung der Kapazität erfolgt auf Basis des Verkehrsflussmodells nach VAN AERDE (1995) unter Berücksichtigung der Anpassungen nach BRILON/GEISTEFELDT (2010).

Um den Einfluss von Streckenparametern auf die Kapazität bewerten zu können, soll neben dem konventionellen Ansatz zur Ermittlung der Kapazität auch der Ansatz einer stochastischen Kapazitätsanalyse nach BRILON/ZURLINDEN (2004) und BRILON/GEISTEFELDT (2007) bzw. GEISTEFELDT (2007) erfolgen. Hiernach ist es möglich, bei genügend Überlastungen am betrachteten Messquerschnitt, auch Aussagen zur zufälligen Streuung der Kapazitäten zu treffen.

7.1 Tunnelkollektiv

Die Analyse des Verkehrsablaufs erfolgt getrennt für jede Tunnelröhre. Dabei sollen nur hochbelastete Tunnel innerhalb und außerhalb von Ballungsräumen untersucht werden, diese sollen Teil längerer Autobahnabschnitte sein. Neben der Lage in Bezug zu Ballungsräumen wird nach der Anzahl der Fahrstreifen in der betrachteten Richtung und der zulässigen Höchstgeschwindigkeit differenziert. Nach der Längsneigung wird nicht differenziert, da hierzu keine ausreichenden Angaben vorliegen. Da die maximale Längsneigung auf der durchgehenden Hauptfahrbahn für Tunnel mit einer Länge von $L > 500$ m nach den RAA (2008) $s \leq 2,5$ % betragen sollte, erscheint eine Differenzierung nach der Längsneigung auch nicht erforderlich. Auch erfolgt keine Differenzierung für Tunnel mit und ohne Seitenstreifen, da das Vorhandensein eines Seitenstreifens keine Auswirkungen auf den normalen Verkehrsablauf hat. Situationen mit Störungen durch z. B. liegengebliebene Fahrzeuge, in denen das Vorhandensein eines Seitenstreifens durchaus relevant ist, und anderen Ereignissen werden bei den Verkehrsab-

laufanalysen von vorneherein ausgeschlossen (vgl. Kapitel 7.2).

Es sollen Teilstrecken in Tunneln außerhalb von Knotenpunktbereichen (keine Beeinflussung durch ein- und ausfahrende Verkehre) betrachtet werden. Demnach sollen die Tunnel eine Länge von mehr als 500 m aufweisen, bei Tunneln mit einer Anschlussstelle im Tunnel sollte die Länge mindestens 1.000 m betragen.

Grundsätzlich sind aus dem Gesamtkollektiv nach Abgleich mit den zur Verfügung stehenden Basisdaten und Ereignismeldungen insgesamt 40 Tunnel für die Verkehrsablaufanalyse geeignet. Aus diesen 40 Tunneln wurden auf Grundlage der Angaben zur durchschnittlichen täglichen Verkehrsstärke (DTV) aus den Dauerzählstellen für das Jahr 2009 bzw. aus der manuellen Straßenverkehrszählung aus dem Jahr 2010 (SVZ 2010) unter Berücksichtigung der erforderlichen Differenzierung nach Lage in Bezug zu Ballungsräumen, Anzahl der Fahrstreifen und zulässiger Höchstgeschwindigkeit zunächst 21 Tunnel ausgewählt. Auf Grund der Datenverfügbarkeit konnten von diesen nur 17 Tunnel in die Verkehrsablaufanalyse einbezogen werden (vgl. Tabelle 28). Davon sind sechs Tunnel mit jeweils zwei Fahrstreifen je Richtung und zwei einseitige Tunnel mit zwei Fahrstreifen (Galerien Hansastrasse und Sternenbergr) innerhalb von Ballungsräumen, ein Tunnel mit drei Fahrstreifen je Richtung außerhalb von Ballungsräumen (Einhausung Hösbach) und sieben Tunnel mit drei Fahrstreifen je Richtung innerhalb von Ballungsräumen. Ein Tunnel innerhalb von Ballungsräumen (Dölzchen) verfügt in der einen Fahrtrichtung über zwei Fahrstreifen, in der anderen Fahrtrichtung über drei Fahrstreifen.

2-streifige Tunnel außerhalb von Ballungsräumen sind in dem betrachteten Kollektiv nicht enthalten. Es ist auch nur ein 3-streifiger Tunnel außerhalb von Ballungsräumen (Einhausung Hösbach) enthalten.

In 11 der 17 Tunnel ist eine Verkehrsbeeinflussungsanlage (VBA) vorhanden. Teilweise liegen diese Tunnel im Zuge einer Streckenbeeinflussungsanlage (SBA), z. B. die Tunnel Flughafen Tegel, Ruhr Schnellweg, Coschütz und Dölzchen. Teilweise sind die Tunnel lediglich mit Wechselverkehrszeichen (WVZ) ausgestattet.

Die Messquerschnitte liegen teilweise in den Tunneln, teilweise aber auch vor bzw. hinter dem Tunnel. In einigen Tunneln, vor allem denjenigen, die mit einer Verkehrsbeeinflussungsanlage (VBA) betrieben werden, sind mehrere Messquerschnitte vorhanden. Hier wurden jeweils nur ausgewählte Messquerschnitte betrachtet.

Tab. 28: Tunnelkollektiv der Verkehrsablaufanalyse

Fahrstreifen je Richtung	Lage	Tunnel	BAB Nr.	Länge [m]	V ₂₀₀ [km/h]	max s [%]	DTV [Kfz/24h]	Messquerschnitte		Verkehrsdaten	
								Anzahl	Lage	Zeitraum	Intervalle
2	iBR	Pfaffenstein	A 93	880	80	2,60	65.000	1/1	ca. 100 m vor bzw. hinter Tunnel	7/2010-10/2011	1'
		Reichswaldallee	A 44	695	80	k. A.	39.700	1/1	ca. 500 m vor bzw. hinter Tunnel	2010 und 2011	5'
		Galerie Hansastraße ¹⁾	A 46	574	80	0,50	38.400	1	im Tunnel (VBA)	2010 und 2011	5'
		Galerie Stemenberg ¹⁾	A 46	617	80	0,03	33.200	1	im Tunnel (VBA)	2010 und 2011	5'
		Flughafen Tegel	A 111	934	80	k. A.	79.900	22/13	vor/hinter und im Tunnel (VBA)	2011	1'
		Aubing	A 99	1.935	80	2,70	67.900	1/1	ca. 300 m vor bzw. hinter Tunnel (VBA)	2011	1'
		Ruhrschnellweg	A 40	1.005	80	k. A.	61.100	1/1	ca. 100 m vor Tunnel (VBA)	2010 und 2011	5'
		Coschütz	A 17	2.332	80	0,30	47.000	9/9	vor/hinter und im Tunnel (VBA)	2009, 2010 und 2011	1' und 5'
3	aBR	Dölzchen	A 17	1.070	80	3,50	47.000	6/6	vor/hinter und im Tunnel (VBA)	2009, 2010 und 2011	1' und 5'
		Einhausung Hösbach	A 3	1.380	100	4,00	84.700	6	vor/hinter und im Tunnel (VBA)	2011	5'
	iBR	Rheinschlinge	A 44	870	100	k. A.	63.500	2/2	im Tunnel	2010 und 2011	5'
		Strümp	A 44	660	100	k. A.	57.400	2/2	im Tunnel	2010 und 2011	5'
		Flughafen	A 44	1.070	80	2,14	70.400	1/1	ca. 100 m vor bzw. hinter Tunnel	2010 und 2011	5'
		Universität	A 46	1.026	80	k. A.	63.500	1/1	ca. 100 m vor bzw. hinter Tunnel	2010 und 2011	5'
		Britz	A 100	1.713	80	2,55	100.400 ²⁾	6/10	vor/hinter und im Tunnel (VBA)	2011	1'
		Rudower Höhe	A 113	900	80	1,00	71.500	5/3	vor/hinter und im Tunnel (VBA)	2011	1'
		Allach	A 99	1.020	80	2,50	106.300	1/1	ca. 200 m vor bzw. hinter Tunnel (VBA)	2011	1'
		Dölzchen ²⁾	A 17	1.070	80	3,50	47.000	6/6	vor/hinter und im Tunnel (VBA)	2009, 2010 und 2011	1' und 5'

¹⁾ Tunnel/Einhausung in einer Fahrtrichtung

²⁾ auf Abschnitt 110.600 Kfz/24h

³⁾ Fahrstreifenaddition (2 auf 3 Fahrstreifen) im Tunnel

7.2 Datengrundlage, -aufbereitung und -plausibilisierung

Grundlage für die Analyse zum Verkehrsablauf sind vorliegende Verkehrsdaten einzelner Messquerschnitte (Rohdaten aus Messschleifen) in 1-Minuten-Intervallen bzw. 5-Minuten-Intervallen.

Zunächst erfolgt die Aggregation der 1-Minuten-Intervalle zu 5-Minuten-Intervallen. Dabei werden 5-Minuten-Intervalle, in denen zu mindestens einem 1-Minuten-Intervall keine Werte vorliegen (z. B. wegen Ausfall einzelner Messschleifen), ausgeschlossen.

Für die Verkehrsdaten einzelner Messschleifen in 5-Minuten-Intervallen erfolgt eine automatische Datenbereinigung. Dabei werden

- Tage mit ungeeigneten Witterungsbedingungen (Tage mit einer Niederschlagshöhe von mindestens 1 mm oder Dauerfrost, d. h. einer Tageshöchsttemperatur unter 0 °C) und
- Tage mit gemeldeten Ereignissen oder mit Unfällen

ausgeschlossen.

Die Witterungsbedingungen werden anhand von Wetterdaten des Deutschen Wetterdienstes ermittelt (für die jeweils nächstgelegene Wetterstation). Die Ereignisse und Unfälle werden aus den Ereignismeldungen und den vorliegenden Unfalldaten bestimmt.

An den verbleibenden Tagen werden nur Intervalle betrachtet, für die vollständig eine Tageshelligkeit

vorlag. Die Helligkeitsverhältnisse werden anhand von Sonnenauf- und -untergangszeiten bestimmt.

Anschließend erfolgt eine manuelle Plausibilitätsprüfung. Dazu werden zunächst folgende Schritte durchgeführt:

- Umrechnung der lokalen Geschwindigkeiten in momentane Geschwindigkeiten (auf Basis der Daten in 5-Minuten-Intervallen),
- Ermittlung der Verkehrsstärken und Geschwindigkeiten des jeweiligen Gesamtquerschnitts der Richtungsfahrbahn durch Zusammenfassung der Daten der einzelnen zugehörigen Messschleifen (in 5-Minuten-Intervallen) und
- Erstellung von Diagrammen mit q-V-Wertepaaren in 5-Minuten-Intervallen sowie
- Erstellung von Diagrammen mit den absoluten Verkehrsstärken und den Verkehrsstärkeanteilen der einzelnen Fahrstreifen in 5-Minuten-Intervallen.

Für die Umrechnung der lokalen Geschwindigkeiten in momentane Geschwindigkeiten gilt folgender Zusammenhang:

$$\bar{V}_l = \bar{V}_m + \frac{\sigma_m(V)^2}{\bar{V}_m}$$

mit \bar{V}_l mittlere lokale Geschwindigkeit [km/h]

\bar{V}_m mittlere momentane Geschwindigkeit [km/h]

$\sigma_m(V)^2$ Varianz der momentanen Geschwindigkeiten [km/h]

Der zweite Summand ist positiv, deshalb muss die mittlere momentane Geschwindigkeit immer kleiner als die mittlere lokale Geschwindigkeit sein. Nach BRILON/GROßMANN/BLANKE (1994) kann zur Umrechnung lokal gemessener Geschwindigkeiten in momentane Geschwindigkeiten näherungsweise der Faktor 0,974 verwendet werden.

Um temporäre äußere Einflüsse auf den Verkehrsablauf möglichst weitgehend auszuschließen, z. B. auf Grund von Arbeitsstellen (zu denen keine entsprechenden Angaben vorliegen), werden anhand der jeweiligen Diagramme mit den q-V-Wertepaaren und der Fahrstreifenaufteilung sowie anhand von Ganglinien der Verkehrsstärke und der Geschwindigkeit diejenigen 5-Minuten-Intervalle ausgeschlossen, die diesbezüglich Auffälligkeiten aufweisen. Dazu gehören u. a. längerer Zeiträume mit einem deutlich verringerten Geschwindigkeitsniveau, aber auch 5-Minuten-Intervalle, in denen ungewöhnlich hohe Sprünge insbesondere der Verkehrsstärke aufgetreten sind, sowie aufeinanderfolgende 5-Minuten-Intervalle, in denen ein Fahrstreifen (insbesondere der Hauptfahrstreifen) nicht belegt war.

Die sich hieraus ergebenden Diagramme mit den q-V-Wertepaaren und die Diagramme der Fahrstreifenaufteilung für jeden betrachteten Messquerschnitt sind in Anlage 11 dargestellt.

7.3 Modellierung der q-V-Beziehungen

7.3.1 Methodik

Die Modellierung der q-V-Beziehungen erfolgt auf Grundlage von Stunden-Intervallen. Dazu erfolgt eine Aggregation der 5-Minuten-Intervalle zu Stunden-Intervallen („volle Stunden“).

Da bei einer Betrachtung von Stunden-Intervallen durch die Aggregation verschiedener Einzelzustände einzelne Wertepaare von Verkehrsstärke und Geschwindigkeit einen Verkehrszustand repräsentieren, der in der Realität nie vorgekommen ist, sind instationäre Verkehrszustände auszuschließen. Als Stationaritätsbedingung wird wie bei BRILON/GEISTEFELDT (2010) in Anlehnung an BRILON/GEISTEFELDT (2007) ein Grenzwert von 10 km/h für die Wurzel der mittleren quadratischen Abweichung der Geschwindigkeiten in den 12 einzelnen 5-Minuten-Intervallen vom zugehörigen Stundenwert der Geschwindigkeit verwendet. Stunden-Intervalle, die diese Bedingung nicht erfüllen, werden vollständig ausgeschlossen.

Durch den Ausschluss instationärer Verkehrszustände wird insbesondere die Anzahl der Werte im Bereich des zählfließenden und gestauten Ver-

kehrs deutlich reduziert. Nach BRILON/GEISTEFELDT (2010) sind bei kurzen Stauereignissen die Zeitpunkte der Stauentstehung und -auflösung maßgebend für Werte stationärer Verkehrszustände im unteren Ast einer q-V-Beziehung. Im Hinblick auf die Kapazitätsermittlung auf Basis der q-V-Beziehungen in Kapitel 7.4 auf Grundlage der angepassten Modellfunktion nach VAN AERDE (1995) werden deshalb wie bei BRILON/GEISTEFELDT (2010) für die Modellierung der q-V-Beziehungen generell gleitende Stunden-Intervalle auf Basis von 15-Minuten-Intervallen verwendet. Dazu werden die verbliebenen fortlaufenden 5-Minuten-Intervalle zu 15-Minuten-Intervallen aggregiert.

Auf Grundlage dieser q-V-Wertepaare wird für die Unterscheidung zwischen fließendem und gestautem Verkehr für jeden Querschnitt eine Grenzgeschwindigkeit im Bereich der Lücke zwischen dem oberen und dem unteren Ast einer q-V-Beziehung festgelegt.

Eine wesentliche Einflussgröße auf den Verkehrsablauf ist der Schwerverkehrsanteil.⁵ Der Einfluss des Schwerverkehrs kann nach BRILON/GEISTEFELDT (2010) prinzipiell durch die Unterscheidung von Schwerverkehrsanteilsklassen berücksichtigt werden. Wegen der relativ geringen Streuung des Schwerverkehrsanteils bei hohen Verkehrsstärken ergibt sich in der Regel jedoch nur eine einzige Klasse mit einer großen Spannweite der Verkehrsstärken. Daher wird wie bei BRILON/GEISTEFELDT (2010) nur die Klasse mit den höchsten Verkehrsstärken berücksichtigt. Dazu wird der mittlere Schwerverkehrsanteil bei den höchsten Verkehrsstärken bestimmt und auf ein Vielfaches von 2,5 % gerundet. Als höchste Verkehrsstärken werden diejenigen oberhalb des 99. Perzentils der Verkehrsstärken in den zuvor ermittelten gleitenden Stunden-Intervalle angesetzt.

Letztendlich werden dann bei der Modellierung der q-V-Beziehungen alle Stunden-Intervalle einbezogen, in denen der Schwerverkehrsanteil um bis zu $\pm 5\%$ abweicht. Damit ergibt sich eine Klassenbreite von jeweils 10 %.

Zur Beschreibung des funktionalen Zusammenhangs der zwischen der Verkehrsstärke und der mittleren Pkw-Geschwindigkeit im fließenden Verkehr wird das Warteschlangenmodell von BRI-

⁵ Üblicherweise zeigt der Schwerverkehrsanteil bei Betrachtung lokal gemessener Verkehrsdaten eine ausgeprägte Abhängigkeit von der Verkehrsstärke (vgl. BRILON/GEISTEFELDT, 2010).

LON/PONZLET (1995) in abgewandelter Form verwendet:

$$V(q) = \frac{V_0}{1 + \frac{V_0}{L_0 \cdot (C_0 - q)}}$$

mit	$V(q)$	mittlere Pkw-Geschwindigkeit in Abhängigkeit der Kfz-Verkehrsstärke	[km/h]
	V_0, L_0, C_0	Modellparameter	
	q	Kfz-Verkehrsstärke	[Kfz/h]

Die Modellfunktion wird dabei an Mittelwerte der Geschwindigkeit in Verkehrsstärkeklassen von 60 Kfz/h angepasst.

Neben den mit dem abgewandelten Warteschlangenmodell von BRILON/PONZLET (1995) modellierten q-V-Beziehungen werden auch q-V-Beziehungen mit der Modellfunktion von VAN AERDE (1995) erstellt, sofern die dafür erforderlichen Voraussetzungen an die Daten (vgl. Kapitel 7.4.1) gegeben sind.

7.3.2 Ergebnisse

Nachfolgend sind die Ergebnisse der Modellierung der q-V-Beziehungen für ausgewählte Messquerschnitte zusammengefasst. In den Bildern 40 bis 42 sind die q-V-Beziehungen für 2-streifige Richtungsfahrbahnen in Tunneln innerhalb von Ballungsräumen mit $V_{zul} = 80$ km/h, in Bild 43 die q-V-Beziehungen für 3-streifige Richtungsfahrbahnen in Tunneln außerhalb von Ballungsräumen mit $V_{zul} = 100$ km/h, in den Bildern 44 und 45 die q-V-Beziehungen für 3-streifige Richtungsfahrbahnen in Tunneln innerhalb von Ballungsräumen mit $V_{zul} = 100$ km/h und in den Bildern 46 und 47 die q-V-Beziehungen für 3-streifige Richtungsfahrbahnen in Tunneln innerhalb von Ballungsräumen mit $V_{zul} = 80$ km/h dargestellt.

Die q-V-Beziehungen der übrigen Messquerschnitte werden, trotz zuvor erfolgter Plausibilitätsprüfung, als nicht verwendbar angesehen. Die ermittelten q-V-Beziehungen aller betrachteten Messquerschnitte sind in Anlage 11 dargestellt; dort sind auch die zugehörigen Parameter angegeben.

In Tunneln mit 2-streifigen Richtungsfahrbahnen (in denen bei allen eine Beschränkung der V_{zul} auf 80 km/h besteht) werden maximale Verkehrsstärken bis zu etwa 4.000 Kfz/h erreicht. In Tunneln mit 3-streifigen Richtungsfahrbahnen werden Verkehrsstärken von 6.000 Kfz/h und mehr erreicht, sowohl bei Beschränkung der V_{zul} auf 100 km/h (Tunnel Rheinschlinge, vgl. Bild 44 als auch bei Beschränkung der V_{zul} auf 80 km/h (Tunnel Britz und Tunnel Allach, vgl. Bild 46 und Bild 47).

Nur in zwei Tunneln sind vermehrt Zusammenbrüche des Verkehrsablaufs aufgetreten, so dass auch q-V-Beziehungen mit der Modellfunktion von VAN AERDE (1995) erstellt werden konnten (vgl. Kapitel 7.4). Dies sind die Galerie HansasträÙe (2-streifige Richtungsfahrbahn, $V_{zul} = 80$ km/h, vgl. Bild 40) und der Tunnel Allach (3-streifige Richtungsfahrbahn, $V_{zul} = 80$ km/h, vgl. Bild 47).

Die Geschwindigkeiten im freien Verkehr ($q=0$) liegen bei den Tunneln mit 2-streifigen Richtungsfahrbahnen und $V_{zul} = 80$ km/h zwischen 76 km/h und 94 km/h, bei den Tunneln mit 3-streifigen Richtungsfahrbahnen und $V_{zul} = 100$ km/h etwa bei 100 km/h (ausgenommen der Einhausung Hösbach, dort liegt die Geschwindigkeiten im freien Verkehr deutlich unter 100 km/h) und bei den Tunneln mit 3-streifigen Richtungsfahrbahnen und $V_{zul} = 80$ km/h zwischen 73 km/h und 90 km/h. Die unterhalb der zulässigen Höchstgeschwindigkeit liegenden Geschwindigkeiten im freien Verkehr könnten auf die dortigen Verkehrsbeeinflussungsanlagen zurückzuführen sein. Zu diesen liegen aber keine weiteren Informationen, z. B. zu Schaltzuständen, vor.

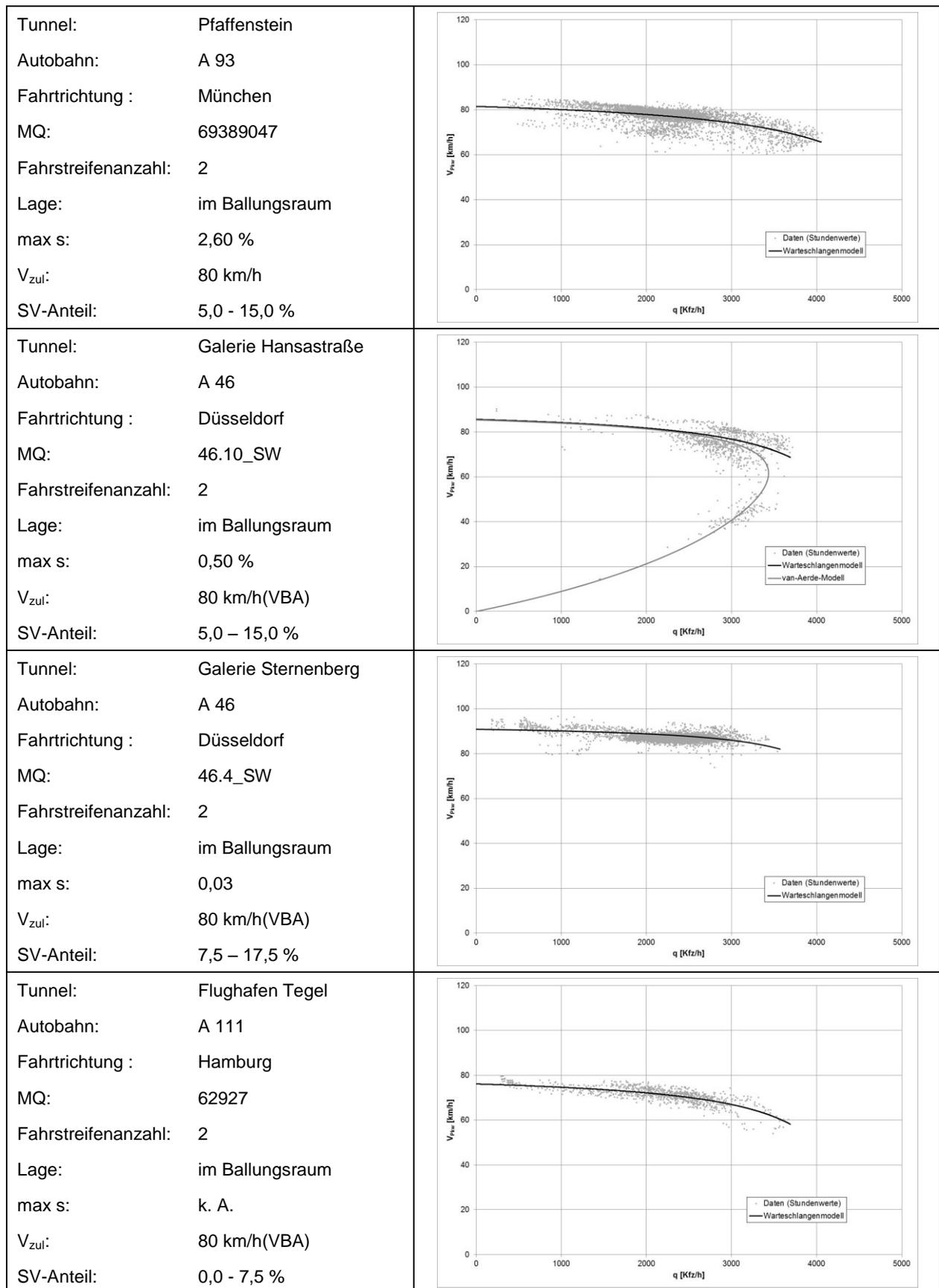


Bild 40: q-V-Beziehungen 2-streifiger Richtungsfahrbahnen im Tunnel innerhalb von Ballungsräumen mit $V_{zul} = 80$ km/h

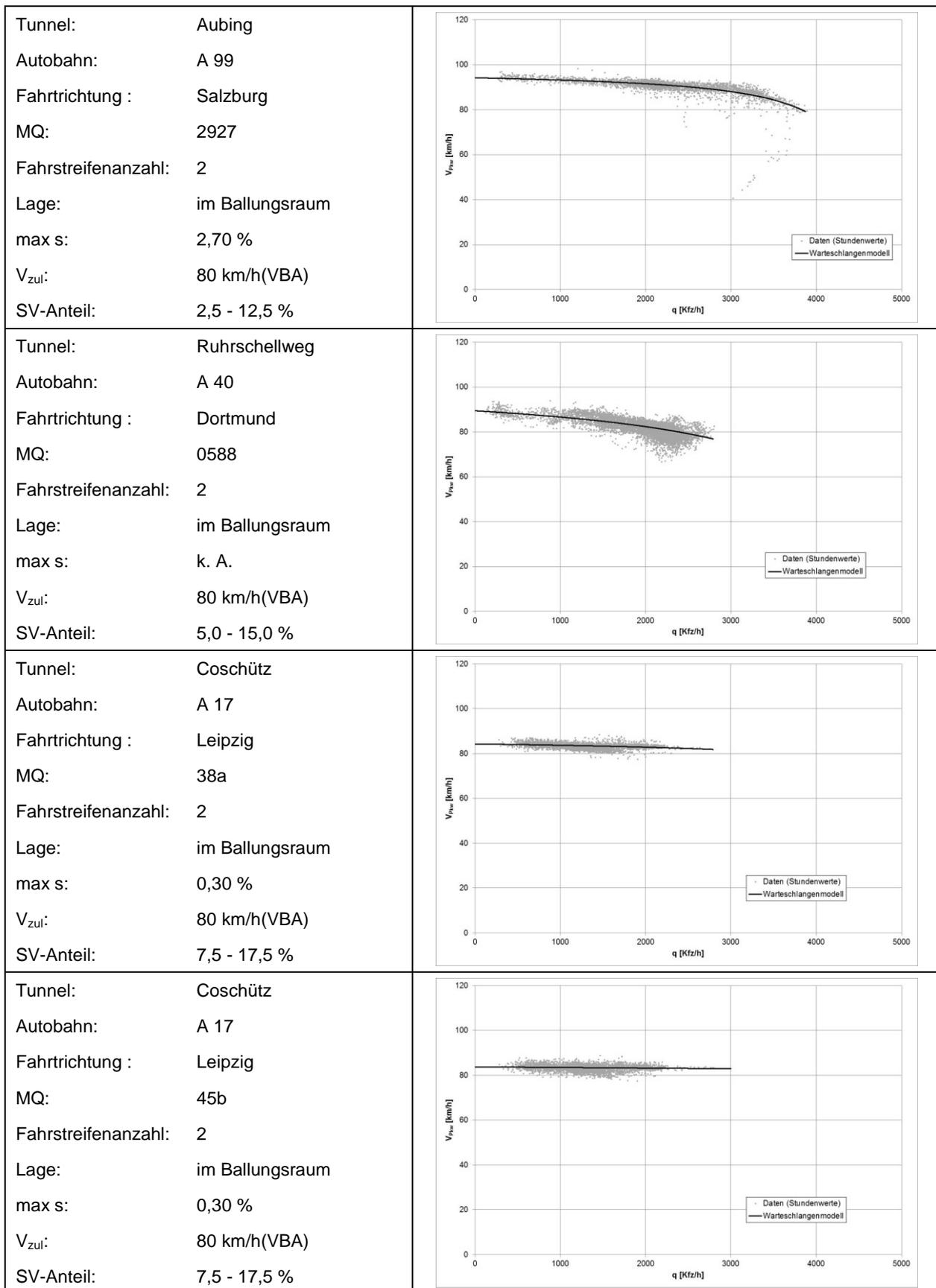


Bild 41: q-V-Beziehungen 2-streifiger Richtungsfahrbahnen im Tunnel innerhalb von Ballungsräumen mit V_{zul}= 80 km/h

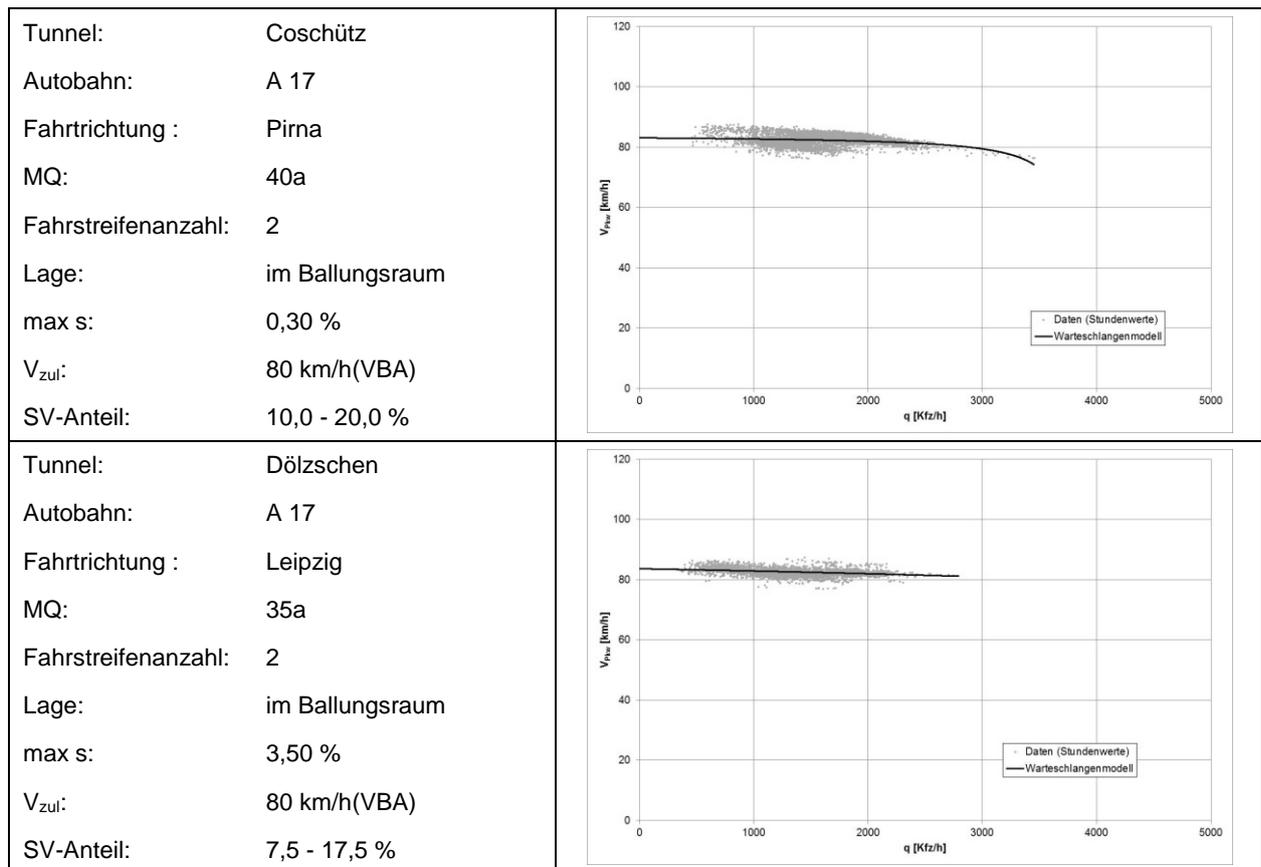


Bild 42: q-V-Beziehungen 2-streifiger Richtungsfahrbahnen im Tunnel innerhalb von Ballungsräumen mit $V_{zul} = 80$ km/h

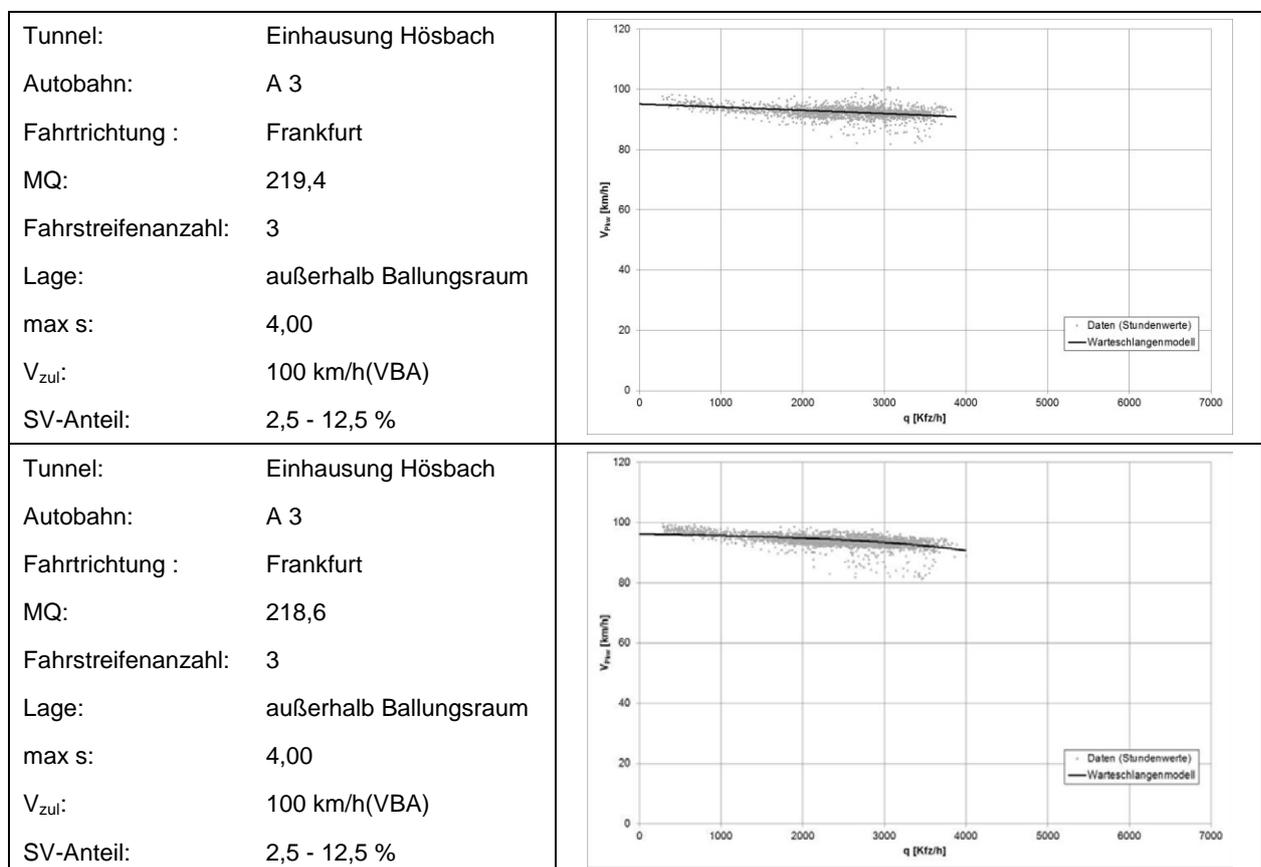


Bild 43: q-V-Beziehungen 3-streifiger Richtungsfahrbahnen im Tunnel außerhalb von Ballungsräumen mit $V_{zul} = 100$ km/h

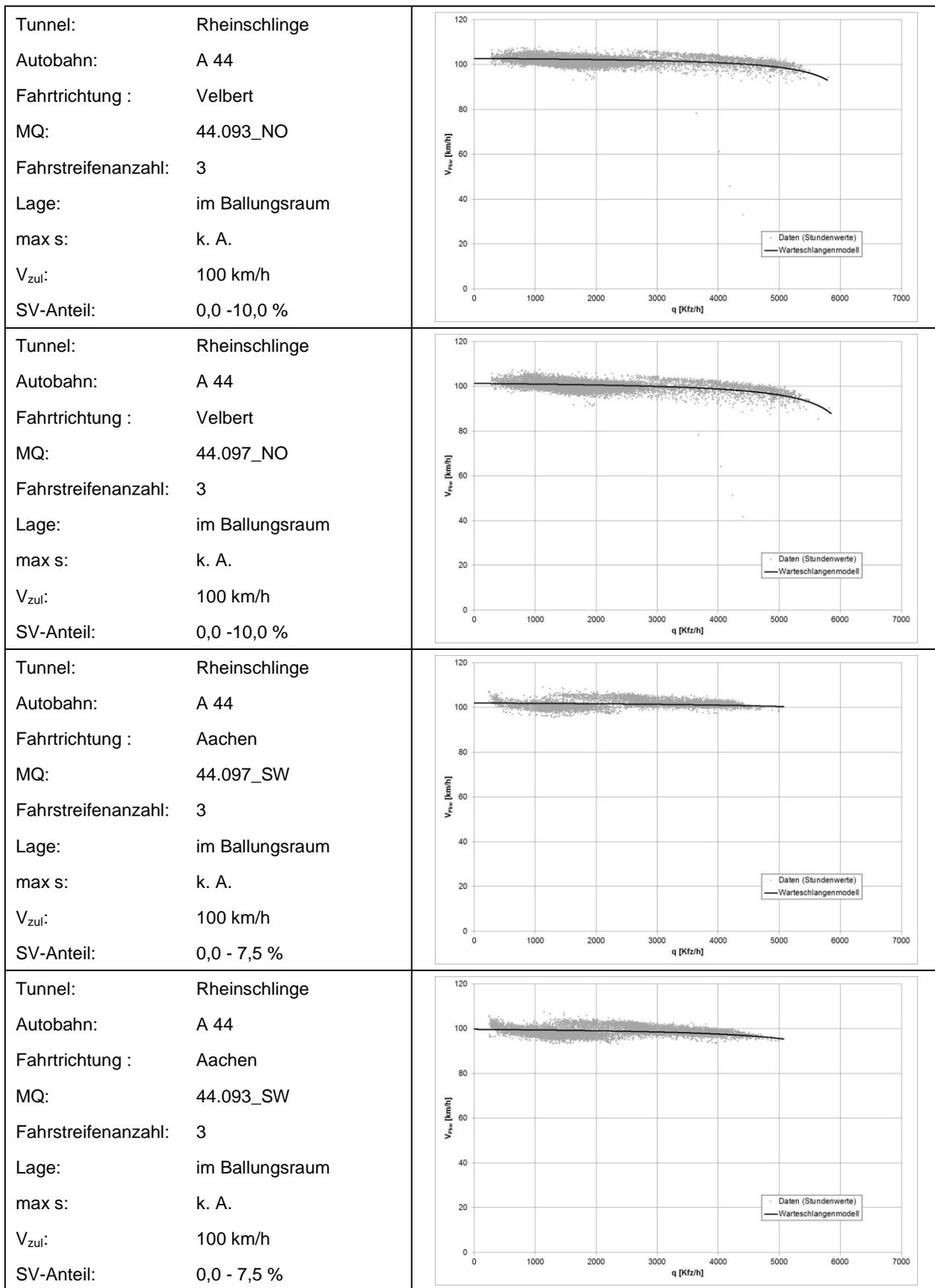


Bild 44: q-V-Beziehungen 3-streifiger Richtungsfahrbahnen im Tunnel innerhalb von Ballungsräumen mit V_{zul}= 100 km/h

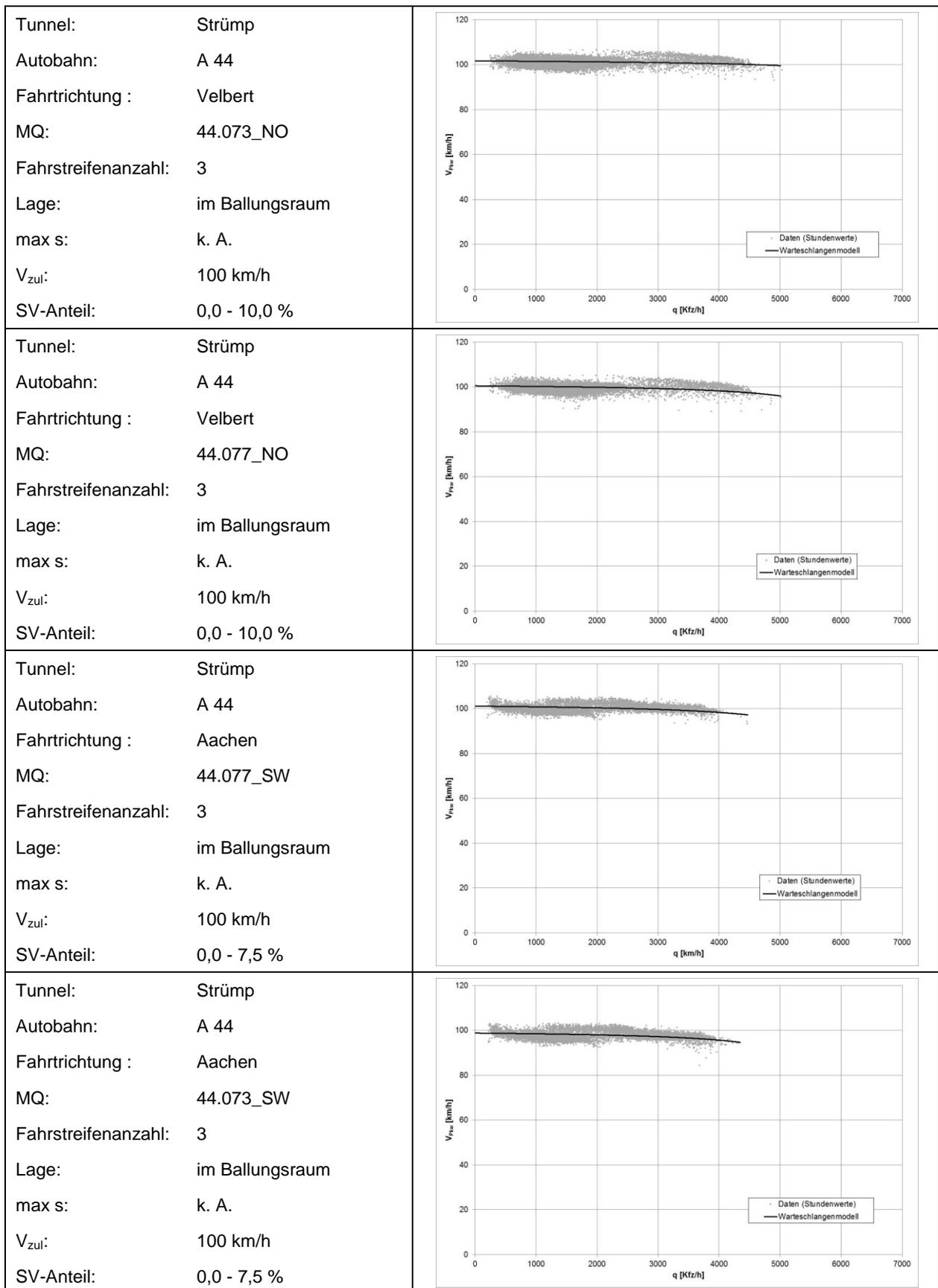


Bild 45: q-V-Beziehungen 3-streifiger Richtungsfahrbahnen im Tunnel innerhalb von Ballungsräumen mit $V_{zul} = 100$ km/h

<p>Tunnel: Universität Autobahn: A 46 Fahrtrichtung : Hagen MQ: 46.040_NO Fahrstreifenanzahl: 3 Lage: im Ballungsraum max s: k. A. V_{zul}: 80 km/h SV-Anteil: 5,0 - 15,0 %</p>	
<p>Tunnel: Britz Autobahn: A 100 Fahrtrichtung : Dresden MQ: 507 Fahrstreifenanzahl: 3 Lage: im Ballungsraum max s: 2,55 % V_{zul}: 80 km/h (VBA) SV-Anteil: 5,0 - 15,0 %</p>	
<p>Tunnel: Britz Autobahn: A 100 Fahrtrichtung : Hamburg MQ: 517 Fahrstreifenanzahl: 3 Lage: im Ballungsraum max s: 2,55 % V_{zul}: 80 km/h (VBA) SV-Anteil: 7,5 - 17,5 %</p>	
<p>Tunnel: Britz Autobahn: A 100 Fahrtrichtung : Hamburg MQ: 521 Fahrstreifenanzahl: 3 Lage: im Ballungsraum max s: 2,55 % V_{zul}: 80 km/h (VBA) SV-Anteil: 7,5 - 17,5 %</p>	

Bild 46: q-V-Beziehungen 3-streifiger Richtungsfahrbahnen im Tunnel innerhalb von Ballungsräumen mit V_{zul}= 80 km/h

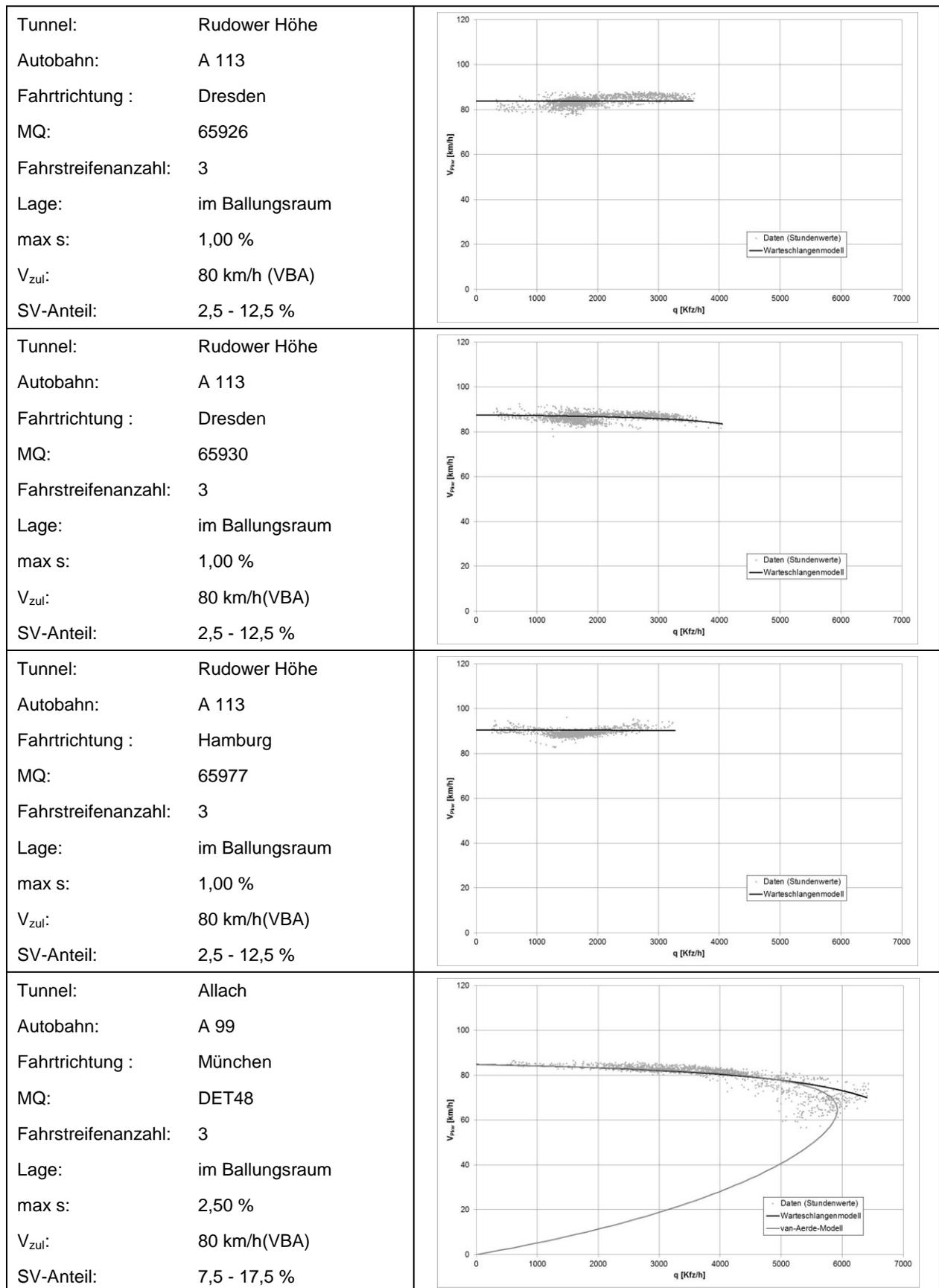


Bild 47: q-V-Beziehungen 3-streifiger Richtungsfahrbahnen im Tunnel innerhalb von Ballungsräumen mit $V_{zul} = 80$ km/h

7.4 Ermittlung der Kapazität auf Basis der q-V-Beziehungen

7.4.1 Methodik

Für die Ermittlung der Kapazität auf Basis der q-V-Beziehungen wird die Modellfunktion von VAN AERDE (1995) verwendet, mit der eine realistische Beschreibung sämtlicher auftretender Verkehrszustände durch einen „durchgehenden Kurvenzug“ möglich ist:

$$k(V) = \frac{1}{\Delta x}$$

mit $k(V)$	mittlere Dichte in Abhängigkeit der Geschwindigkeit [Kfz/km]
Δx	Mindestweglänge zwischen aufeinanderfolgenden Fahrzeugen [km/Kfz]

Diese Modellfunktion basiert auf einem einfachen Fahrzeugfolgemedell. Danach setzt sich die Mindestweglänge zwischen zwei Fahrzeugen aus einem konstanten, einem von der Differenz zwischen der aktuellen Geschwindigkeit und der Geschwindigkeit bei freiem Verkehr abhängigen und einem von der aktuellen Geschwindigkeit linear abhängigen Bestandteil zusammen:

$$\Delta x = c_1 + \frac{c_2}{V_0 - V} + c_3 \cdot V$$

mit Δx	Mindestweglänge zwischen aufeinanderfolgenden Fahrzeugen [km/Kfz]
V_0	mittlere momentane Geschwindigkeit bei freiem Verkehr ($k = 0$) [km/h]
V	mittlere momentane Geschwindigkeit [km/h]
c_1, c_2, c_3	Modellparameter

Die Modellfunktion wird durch eine nicht-lineare Regression in der k-V-Ebene angepasst. Für eine gleichmäßige Anpassung über den gesamten Bereich möglicher Verkehrszustände werden wie bei BRILON/GEISTEFELDT (2010) die Mittelwerte der Geschwindigkeit in Verkehrsdichteklassen mit der Breite von 1 Kfz/km zu Grunde gelegt.

Durch die Verwendung von gleitenden Stundenintervallen auf Basis von 15-Minuten-Intervallen (vgl. Kapitel 7.3) wird auch bei mäßig überlasteten Querschnitten eine akzeptable Anpassung der Modellfunktion nach VAN AERDE (1995) erreicht. Für eine realistische Beschreibung der q-V-Beziehung muss aber im zähfließenden und gestauten Verkehr eine ausreichende Anzahl an Wertepaaren von Verkehrsstärke und Geschwindigkeit vorliegen. Die Anpassung der Modellfunktion erfolgt daher wie bei BRILON/GEISTEFELDT

(2010) nur für Querschnitte, für die mindestens 25 Wertepaare im gestauten Verkehr vorliegen und diese gleichzeitig mindestens 0,5 % aller Wertepaare ausmachen.

Die Kapazität entspricht der Verkehrsstärke am Scheitelpunkt der sich ergebenden q-V-Beziehung.

Da sich in einzelnen Fällen, vor allem bei einer ausgeprägten Zweiteilung der q-V-Wertepaare, mit der Modellfunktion nach VAN AERDE (1995) sehr hohe Kapazitäten ergeben können, die nur knapp unter den höchsten gemessenen Verkehrsstärken liegen, werden wie bei BRILON/GEISTEFELDT (2010) weitere Schätzwerte für die Kapazität bestimmt. Dazu werden das Maximum der Verkehrsstärken (q_{max}), das 99. Perzentil der Verkehrsstärken (q_{99}) und das 95. Perzentil der Verkehrsstärken (q_{95}) ermittelt.

Für die Ableitung von Nennwerten der Kapazität gelten wie bei BRILON/GEISTEFELDT (2010) folgende Bedingungen:

$$C_N = C_M, \text{ wenn } C_M \leq q_{99}$$

$$C_N = q_{99}, \text{ wenn } C_M > q_{99}$$

$$C_N = q_{95}, \text{ wenn } q_{95} > C_{HBS} \text{ und } C_M \text{ nicht ermittelbar}$$

$$C_N = C_{HBS}, \text{ wenn Bedingungen zuvor nicht erfüllt sind}$$

mit C_N	Nennwert der Kapazität
C_M	Kapazität aus Modellfunktion nach VAN AERDE (1995)
q_{99}	99. Perzentil der Verkehrsstärken
q_{95}	95. Perzentil der Verkehrsstärken
C_{HBS}	Kapazitätswert nach HBS (2014)

Die so ermittelten Nennwerte der Kapazität gelten für Stunden-Intervalle.

7.4.2 Ergebnisse

Nachfolgend sind die Ergebnisse der Kapazitätsermittlung auf Basis der q-V-Beziehungen zusammengefasst. Betrachtet wurden dabei die in Kapitel 7.3.2 dargestellten ausgewählten Messquerschnitte.

Nur für zwei Tunnel (Galerie Hansastrasse und Tunnel Allach) liegt eine ausreichende Anzahl an q-V-Wertepaaren im Bereich des zähfließenden und gestauten Verkehrs vor (vgl. Bild 40 und Bild 47). In den übrigen Tunnel traten Überlastun-

gen nur sehr selten bzw. überhaupt nicht auf. Teilweise sind aber hohe maximale Verkehrsstärken aufgetreten, so dass die Ableitung von Nennwerten der Kapazität nach den in Kapitel 7.4.1 genannten Bedingungen erfolgen kann. Die abgeleiteten Nennwerte der Kapazität sind in Tabelle 29 angegeben.

In der Galerie Hansastraße und im Tunnel Allach sind die mit der Modellfunktion nach VAN AERDE (1995) ermittelten Kapazitäten maßgebend. Die so ermittelte Kapazität der Galerie Hansastraße ist mit 3.434 Kfz/h deutlich geringer als die im HBS (2014) angegebene Kapazität für Tunnel mit 2-streifiger Richtungsfahrbahn innerhalb von Ballungsräumen von 3.800 Kfz/h. Die ermittelte Kapazität für den Tunnel Allach liegt mit 5.920 Kfz/h deutlich über der im HBS (2014) angegebene Ka-

pazität für Tunnel mit 3-streifiger Richtungsfahrbahn innerhalb von Ballungsräumen von 5.500 Kfz/h.

In den übrigen Tunneln sind trotz der teilweise hohen maximalen Verkehrsstärken – mit Ausnahme eines Messquerschnitts im Tunnel Britz – immer die Kapazitätswerte des HBS (2014) maßgebend. An dem Messquerschnitt im Tunnel Britz ist das 95. Perzentil der Verkehrsstärken mit 5.965 Kfz/h höher als die im HBS (2014) angegebene Kapazität für Tunnel mit 3-streifiger Richtungsfahrbahn innerhalb von Ballungsräumen von 5.500 Kfz/h. An den beiden anderen Messquerschnitten im Tunnel Britz dagegen ist sogar das 99. Perzentil der Verkehrsstärken deutlich geringer als die im HBS (2014) angegebene Kapazität von 5.500 Kfz/h.

Tab. 29: Ergebnisse der Kapazitätsermittlung auf Basis der q-V-Beziehungen

Fahrstreifen	Lage	V_{zoll} [km/h]	Tunnel	BAB Nr.	MQ	SV-Anteil	Intervalle	Stauintervalle	V_{grenz} [km/h]	q_{max} [Kfz/h]	q_{99} [Kfz/h]	q_{95} [Kfz/h]	C_{95} [Kfz/h]	C_{HBS} [Kfz/h]	C_{91} [Kfz/h]
2	iBR	80	Pfaffenstein	A 93	69389047	10,0%	5.376	0	---	4.063	3.829	3.438	---	3.800	3.800
			Galerie Hansastraße	A 46	46.10_SW	10,0%	944	124	60	3.718	3.636	3.541	3.434	3.800	3.434
			Galerie Sternenberg	A 46	46.4_SW	12,5%	5.230	0	---	3.543	3.072	2.836	---	3.800	3.800
			Flughafen Tegel	A111	62927	2,5%	1.060	1	55	3.672	3.460	3.015	---	3.900	3.900
			Aubing	A 99	2927	7,5%	3.164	20	70	3.896	3.646	3.367	---	3.800	3.800
			Ruhrschnellweg	A 40	0588	10,0%	6.557	22	70	2.807	2.637	2.485	---	3.800	3.800
			Coschütz	A 17	38a	12,5%	4.228	0	---	2.764	2.187	1.995	---	3.800	3.800
			Coschütz	A 17	45b	12,5%	4.181	0	---	2.809	2.194	1.999	---	3.800	3.800
			Coschütz	A 17	40a	10,0%	5.224	0	---	3.459	2.468	2.213	---	3.800	3.800
			Dölzschen	A 17	35a	12,5%	2.773	0	---	3.071	2.565	2.353	---	3.800	3.800
			Einhausung Hösbach	A 3	219.4	7,5%	1.926	0	---	3.877	3.679	3.491	---	5.200	5.200
			Einhausung Hösbach	A 3	218.6	7,5%	3.307	0	---	4.007	3.637	3.437	---	5.200	5.200
3	aBR	100	Rheinschlinge	A 44	44.093_NO	5,0%	16.232	4	85	5.808	5.050	4.277	---	5.700	5.700
			Rheinschlinge	A 44	44.097_NO	5,0%	15.785	4	85	5.824	5.059	4.326	---	5.700	5.700
	iBR	100	Rheinschlinge	A 44	44.097_SW	2,5%	5.992	0	---	5.046	4.446	4.141	---	5.700	5.700
			Rheinschlinge	A 44	44.093_SW	2,5%	10.710	0	---	5.043	4.408	4.066	---	5.700	5.700
			Strümp	A 44	44.073_NO	5,0%	14.233	0	---	5.036	4.283	3.718	---	5.700	5.700
			Strümp	A 44	44.077_NO	5,0%	12.067	0	---	5.024	4.287	3.672	---	5.700	5.700
			Strümp	A 44	44.077_SW	2,5%	9.538	0	---	4.463	3.818	3.528	---	5.700	5.700
			Strümp	A 44	44.073_SW	2,5%	10.019	0	---	4.323	3.813	3.522	---	5.700	5.700
		80	Universität	A 46	46.040_NO	10,0%	5.248	0	---	2.919	2.775	2.626	---	5.500	5.500
			Britz	A 100	507	10,0%	1.078	0	---	5.971	5.864	5.695	---	5.500	5.695
			Britz	A 100	517	12,5%	1.218	7	55	5.390	4.931	4.035	---	5.500	5.500
			Britz	A 100	521	12,5%	857	0	---	5.615	5.240	4.553	---	5.500	5.500
			Rudower Höhe	A 113	65926	7,5%	1.615	0	---	3.595	3.446	3.215	---	5.500	5.500
			Rudower Höhe	A 113	65930	7,5%	1.868	0	---	4.033	3.497	3.211	---	5.500	5.500
			Rudower Höhe	A 113	65977	7,5%	2.150	0	---	3.241	2.793	2.376	---	5.500	5.500
			Allach	A 99	DET48	12,5%	1.624	161	70	6.432	6.244	5.574	5.920	5.500	5.920

7.5 Ermittlung der stochastischen Kapazität

Die Kapazität von Strecken von Autobahnen kann unabhängig von äußeren, systematischen Einflüssen erheblich variieren (BRILON/ZURLINDEN, 2003, BRILON/GEISTEFELDT/REGLER, 2005) und ist daher als Zufallsgröße aufzufassen. D. h., dass die Kapazität nicht durch einen festen Wert, sondern durch eine Verteilungsfunktion repräsentiert wird, mit der die Wahrscheinlichkeit, dass es zum Zusammenbruch des Verkehrsablaufs kommt, beschrieben wird.

Die stochastische Kapazitätsanalyse basiert auf der Auswertung von Zusammenbrüchen des Ver-

kehrsablaufs. Da solche Zusammenbrüche im Allgemeinen plötzlich eintreten, sind für die Analyse nur kleine Intervallauern (z. B. 5-Minuten-Intervalle) geeignet. Nach BRILON/GEISTEFELDT (2007) ist jedoch eine Transformation der in 5-Minuten-Intervallen ermittelten Verteilungsfunktion der Kapazität in Stunden-Intervalle möglich.

Voraussetzung für die stochastische Kapazitätsanalyse ist, dass eine ausreichend große Anzahl an Zusammenbrüchen des Verkehrsablaufs beobachtet wurde. Da nur für zwei Tunnel eine ausreichende Anzahl an q-V-Wertepaaren im Bereich des zähfließenden und gestauten Verkehrs vorliegt (vgl. Kapitel 7.4.2), wird auf die stochastische Kapazitätsanalyse verzichtet.

7.6 Ableitung von Kapazitäten und q-V-Beziehungen für das HBS

Die Ableitung Bemessungswerten für das HBS erfolgt auf Grundlage der empirisch ermittelten q-V-Beziehungen und Kapazitäten sowie den entsprechenden Angaben des HBS (2014). Die in den Bemessungsgrößen bislang berücksichtigten Einflussgrößen (Anzahl der Fahrstreifen der Richtungsfahrbahn, Lage in Bezug zu Ballungsräumen und SV-Anteil) wurden für die Ableitung übernommen. Für folgende Kategorien wurden Kapazitäten und q-V-Beziehungen aus der entsprechenden Datengrundlage abgeleitet:

- Tunnel mit 2-streifiger Richtungsfahrbahn innerhalb von Ballungsräumen und einer zulässigen Höchstgeschwindigkeit von 80 km/h (auf Basis der empirischen Ergebnisse der Tunnel Pfaffenstein und Ruhrschnellweg sowie der Galerie Hansasträße),
- Tunnel mit 3-streifiger Richtungsfahrbahn innerhalb von Ballungsräumen und einer zulässigen Höchstgeschwindigkeit von 100 km/h (auf Basis der empirischen Ergebnisse der Tunnel Rheinschlinge und Strümp),
- Tunnel mit 3-streifiger Richtungsfahrbahn innerhalb von Ballungsräumen und einer zulässigen Höchstgeschwindigkeit von 80 km/h (auf Basis der empirischen Ergebnisse der Tunnel Universität, Rudower Höhe und Allach).

Wesentliche Änderung der ermittelten Kapazitäten und q-V-Beziehungen für Tunnel ist eine zusätzliche Differenzierung nach der zulässigen Höchstgeschwindigkeit. Dies ergab sich aus dem Vergleich der empirisch ermittelten q-V-Beziehungen mit denen des HBS (2014). Dieser zeigt, dass für zulässige Höchstgeschwindigkeiten von 100 km/h die Geschwindigkeiten der q-V-Beziehungen des HBS (2014) im Allgemeinen zu niedrig und für zulässige Höchstgeschwindigkeiten von 80 km/h zu hoch sind. Als Beispiel hierzu sind die empirischen Ergebnisse der untersuchten Tunnel und der entsprechenden q-V-Beziehungen des HBS (2014) in Bild 49 und Bild 50 dargestellt. Aus dem Vergleich der empirisch ermittelten q-V-Beziehungen und den q-V-Beziehungen nach HBS (2014) konnte zudem festgestellt werden, dass die Neigung und Krümmung des Kurvenverlaufs zumindest bei den q-V-Beziehungen für Tunnel mit 3-streifigen Richtungsfahrbahnen unterschiedlich ist.

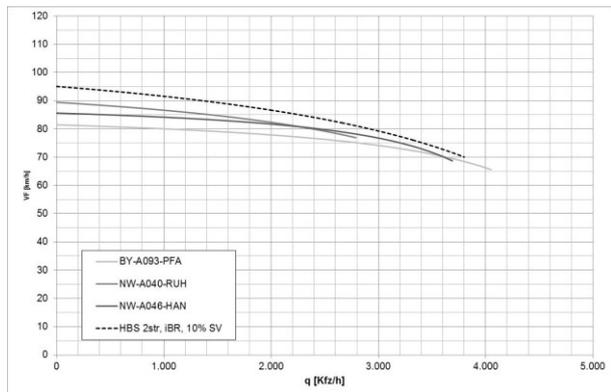


Bild 48: q-V-Beziehungen für Tunnel mit 2-streifiger Richtungsfahrbahn innerhalb von Ballungsräumen bei $V_{zul} = 80$ km/h aus den empirischen Untersuchungen und der entsprechenden q-V-Beziehung gemäß HBS (2014)

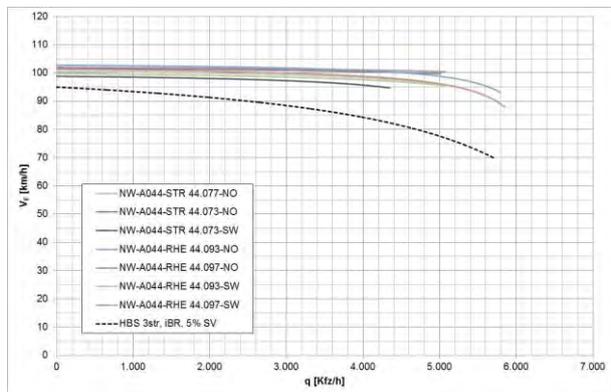


Bild 49: q-V-Beziehungen für Tunnel mit 3-streifiger Richtungsfahrbahn innerhalb von Ballungsräumen bei $V_{zul} = 100$ km/h aus den empirischen Untersuchungen und der entsprechenden q-V-Beziehung gemäß HBS (2014)

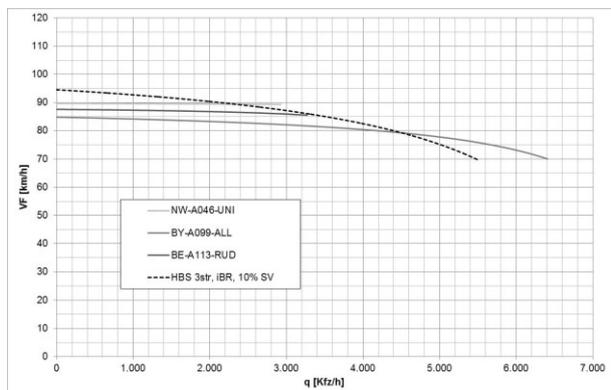


Bild 50: q-V-Beziehungen für Tunnel mit 3-streifiger Richtungsfahrbahn innerhalb von Ballungsräumen bei $V_{zul} = 80$ km/h aus den empirischen Untersuchungen und der entsprechenden q-V-Beziehung gemäß HBS (2014)

Aus der Kapazitätsanalyse lassen sich lediglich für Tunnel mit 3-streifiger Richtungsfahrbahn innerhalb von Ballungsräumen und einer zulässigen Höchstgeschwindigkeit von 80 km/h neue Kapazitätswerte ableiten. Für die beiden übrigen Kategorien werden die entsprechenden Kapazitäten für Tunnel mit 2- und 3-streifigen Richtungsfahrbahnen aus dem HBS (2014) übernommen (Tabelle 30).

Tab. 30: Kapazitätswerte [Kfz/h] für Tunnel innerhalb von Ballungsräumen

FS	V_{zul} [km/h]	SV-Anteil [%]			
		≤ 5	10	20	30
2	100	k. A.	k. A.	k. A.	k. A.
	80	3.900*	3.800*	3.600*	3.400*
3	100	5.700*	5.500*	5.200*	4.900*
	80	6.100	5.900	5.600	5.300

* aus HBS (2014) übernommen

Kapazitäten und q-V-Beziehungen für Tunnel mit 2-streifigen Richtungsfahrbahnen innerhalb von Ballungsräumen mit einer zulässigen Höchstgeschwindigkeit von 100 km/h konnten auf Grund fehlender Datenbasis nicht ermittelt werden.

Die q-V-Beziehungen im HBS (2014) basieren auf der Modellfunktion nach Kapitel 7.3.1. Die Ableitung neuer q-V-Beziehungen erfolgt in Anlehnung an BRILON/GEISTEFELD (2010) anhand der folgenden Funktionsparameter:

- Geschwindigkeit im freien Verkehr: $V(q=0)$,
- kritische Geschwindigkeit bei Erreichen der Kapazität: $V(q=C)$,
- Neigung und Krümmung der q-V-Beziehung im freien Verkehr.

Anhand dieser Randbedingungen können die Parameter L_0 , V_0 und C_0 der Modellfunktion bestimmt werden. Die Kapazitäten der q-V-Beziehungen entsprechen den Werten nach Tabelle 32.

In Bild 51 sind die q-V-Beziehungen für Tunnel mit 2-streifigen Richtungsfahrbahnen innerhalb von Ballungsräumen und einer zulässigen Höchstgeschwindigkeit von 80 km/h dargestellt. In Bild 52 sind die q-V-Beziehungen für Tunnel mit 3-streifigen Richtungsfahrbahnen innerhalb von Ballungsräumen und einer zulässigen Höchstgeschwindigkeit von 100 km/h dargestellt, in Bild 53 die q-V-Beziehungen für Tunnel mit 3-streifigen

Richtungsfahrbahnen innerhalb von Ballungsräumen und einer zulässigen Höchstgeschwindigkeit von 80 km/h. Die Parameter der q-V-Beziehungen sind in Anlage 11 zusammengestellt.

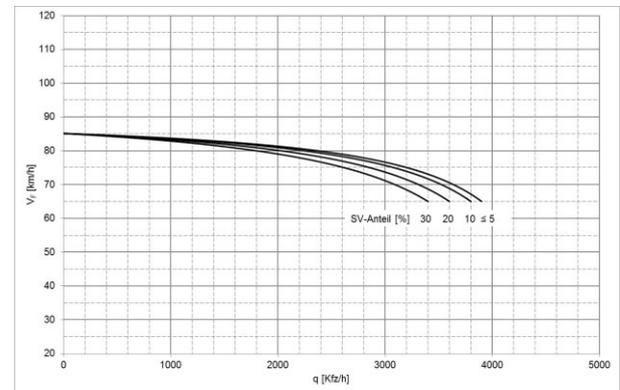


Bild 51: q-V-Beziehungen für Tunnel mit 2-streifiger Richtungsfahrbahn innerhalb von Ballungsräumen und $V_{zul} = 80$ km/h

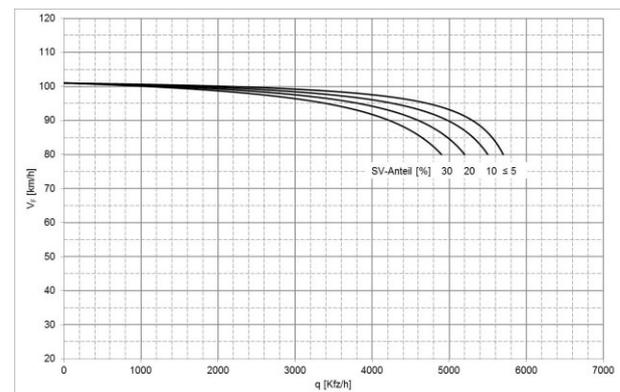


Bild 52: q-V-Beziehungen für Tunnel mit 3-streifiger Richtungsfahrbahn innerhalb von Ballungsräumen und $V_{zul} = 100$ km/h

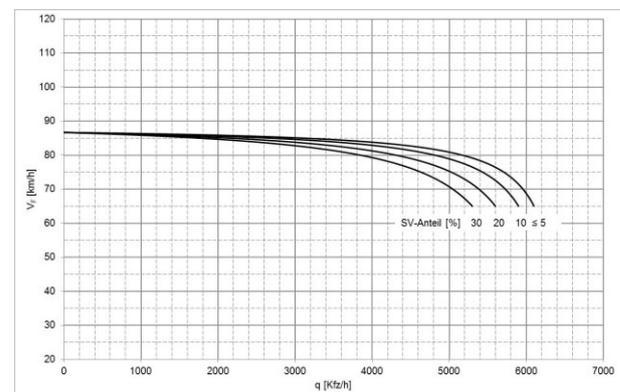


Bild 53: q-V-Beziehungen für Tunnel mit 3-streifiger Richtungsfahrbahn innerhalb von Ballungsräumen und $V_{zul} = 80$ km/h

8 Entwurfstechnische Empfehlungen

Die Erarbeitung der entwurfstechnischen Empfehlungen für Autobahntunnelstrecken erfolgte in der Anlehnung an die durchgeführte Unfallanalyse.

Querschnitt

Bei 2-streifigen Tunnelquerschnitten tragen Seitenstreifen zu einer Senkung der Unfallrate und der mittleren Unfallkostenrate bei. Gemäß dem „Verfahren für die Auswahl von Straßenquerschnitten in Tunneln“ nach dem ARS Nr. 06/2000 ist ein Seitenstreifen allerdings nur bei hohem SV-Anteil und Längsneigung anzuordnen. Hinsichtlich einer Verbesserung der Verkehrssicherheit sollte daher geprüft werden, ob dieser generelle Entfall des Seitenstreifens bei 2-streifigen Querschnitten nicht mehr erfolgen sollte.

Auf Höhe der Tunnelportale wurden in einigen Tunneln vermehrt Unfälle beobachtet. Eine Systematik geht weder aus dem Unfallgeschehen hervor, noch konnten die Ursachen für diese Auffälligkeit anhand von Bildmaterial geklärt werden.

Knotenpunkte

Ein- und Ausfahrten in Tunnelstrecken können sich negativ auf die Verkehrssicherheit auswirken. In der Untersuchung waren insbesondere die Einfahrtbereiche unfallauffällig. Auf Grund fehlender Daten zur Trassierung und zu den vorhandenen Sichtweiten können jedoch keine Hinweise zu geeigneten Trassierungsgrenzwerten oder zur Gestaltung von Ein- und Ausfahrtbereichen in Tunneln gegeben werden. Eine Begutachtung der wegweisenden Beschilderung in den Tunneln lieferte keine Anhaltspunkte für das auffällige Unfallgeschehen bei den Tunnelquerschnitten mit Ein- und Ausfahrtbereichen.

Die Untersuchung hat gezeigt, dass die Lage von Ein- und Ausfahrten in Tunneln keine Auswirkung auf das Unfallgeschehen hat. Infolge der Ein- und Ausfahrtvorgänge treten jedoch vermehrt Unfälle auf. Somit sind Ein- und Ausfahrtbereiche in Tunneln nach Möglichkeit zu vermeiden.

In der Untersuchung wurden die Sonderlösungen für die Ein- und Ausfahrtbereiche betrachtet, die möglicherweise in das Regelwerk aufgenommen werden können. Vor allem die hintereinander liegenden Ein- und Ausfahrtbereiche (Doppeleinfahrten und -ausfahrten) sowie die Linkseinfahrten kämen als Sonderlösung in Frage. Linkseinfahrten kommen äußerst selten vor und sind bisher nur mit entsprechender Fahrstreifenaddition zulässig. Im Untersuchungskollektiv waren jedoch keine Linkseinfahrten vorhanden. Der Tunnel Wersten an der

A 46, der Tunnel Ortsteil Britz an der A 100 und die Einhausung Hösbach an der A 3 verfügen über mehrere, hintereinander liegende Ein- und Ausfahrtbereiche je Richtung. Mit Ausnahme der Einhausung Hösbach fallen diese Tunnel durch eine hohe Unfallanzahl auf. Folglich wird empfohlen die Doppeleinfahrten und -ausfahrten in Tunneln nach Möglichkeit zu vermeiden. Falls Doppeleinfahrten bzw. -ausfahrten in Tunneln auf Grund bestehender Gegebenheiten nicht zu vermeiden sind, sollte eine für den Verkehrsteilnehmer möglichst übersichtliche Verkehrsführung geplant werden. Außerdem wird empfohlen, die in den RAA (2008) und RABT (2006) aufgeführten Betriebs- und Trassierungsparameter einzuhalten.

Im Bereich der Ein- und Ausfahrten mit verkürzten Ein- und Ausfädelungsstreifen ($L \leq 250$ m) wurden vermehrt Unfälle beobachtet. Um die Sicherheit in Ein- und Ausfahrtbereichen zu erhöhen, sollten die Längen der Ein- und Ausfädelungsstreifen die Mindestwerte nach RAA (2008) von 250 m für die EKA 1 und EKA 2 nicht unterschreiten.

Für Einfahrten an Hauptfahrbahnen der EKA 3 ist nach den RAA (2008) eine Länge von 150 m ausreichend. Dies ist jedoch nur in Verbindung mit einer Geschwindigkeitsbeschränkung auf freier Strecke zulässig. Für den Tunnel wird durch die RABT (2006) bereits eine Geschwindigkeit von 80 km/h empfohlen. Eine Verkürzung der Einfahrten an Autobahnen in der EKA 3 in Tunneln auf 150 m bleibt somit unbegründet und sollte geprüft werden. Auf der Grundlage der Untersuchungsergebnisse sollten zumindest die Einfahrten in allen Entwurfsklassen eine Länge von 250 m haben.

Betriebsmerkmale

Die RAA (2008) und die RABT (2006) empfehlen eine zulässige Höchstgeschwindigkeit in Autobahntunneln von 80 km/h. Bei dem Vergleich der Tunnelquerschnitte mit $V_{zul} = 80$ km/h und $V_{zul} = 100$ km/h wurden insbesondere bei 2-streifigen Tunnelquerschnitten ohne Seitenstreifen zum Teil höhere Unfallraten und Unfallkostenraten bei $V_{zul} = 100$ km/h festgestellt. Dies zeigte sich auch bei 2-streifigen Tunnelstrecken mit Ein- und Ausfahrtbereichen. Der Vergleich hat auch gezeigt, dass die Verletzungsschwere mit der zunehmenden Geschwindigkeit im Tunnel steigt. An 2- und 3-streifigen Querschnitten mit $V_{zul} = 100$ km/h wurde ein doppelt so hoher Anteil an Unfällen der Kategorien 1 bis 3 festgestellt als an Querschnitten mit $V_{zul} = 80$ km/h. Daher sollte die zulässige Höchstgeschwindigkeit insbesondere bei 2-streifigen Tunnelquerschnitten $V_{zul} = 80$ km/h nicht überschreiten. In 3-streifigen Tunnelquerschnitten sollte die zulässige Höchstgeschwindigkeit

keit von 80 km/h möglichst bevorzugt angeordnet werden.

Eine nicht angepasste Geschwindigkeit war eine der häufigsten Unfallursachen in den untersuchten Tunneln. Im Sinne einer Erhöhung der Verkehrssicherheit sollte die Anordnung von Anlagen zur Durchsetzung der zulässigen Höchstgeschwindigkeit bei allen Tunneln geprüft werden.

9 Zusammenfassung und Ausblick

Der Entwurf und der Betrieb von Tunneln im Zuge von Bundesautobahnen sind in den Richtlinien für die Anlage von Autobahnen (RAA 2008) und in den Richtlinien für die Ausstattung und den Betrieb von Straßentunneln (RABT 2006) geregelt. Hier sind die Hinweise zu der Wahl des Tunnelquerschnittes und zu den anzusetzenden Trassierungsgrenzwerten sowie die Anforderungen hinsichtlich Sicherheit und Betriebsabläufen enthalten. Hingegen ist wenig darüber bekannt, wie Ein- und Ausfahrten im Bereich der Tunnelstrecken zu gestalten sind und ob im Vergleich zu Außenstrecken gegebenenfalls andere Trassierungsparameter für einen sicheren Verkehrsablauf im Tunnel notwendig werden.

Zielsetzung des Forschungsvorhabens war es daher, die in Deutschland im Betrieb befindlichen Tunnel sowie in deren Querschnitt vorhandene Ein- und Ausfahrten bezüglich ihrer Verkehrssicherheit und Leistungsfähigkeit zu untersuchen. Grundsätzliche Unterschiede zwischen Außen- und Tunnelstrecken sollten hierbei ergründet werden. Darüber hinaus sollten Verkehrsablaufanalysen durchgeführt und q-V-Beziehungen und Kapazitätswerte für Tunnel abgeleitet werden. Bei der Erarbeitung der methodischen Vorgehensweise wurden fünf Arbeitsschritte definiert:

- Grundlagenanalyse,
- Präzisierung der relevanten Fragestellungen,
- Analyse bereits realisierter Tunnellösungen,
- Herausarbeitung der Unterschiede zwischen Außen- und Tunnelstrecken,
- Erarbeitung von Empfehlungen.

Im Rahmen der Grundlagenanalyse wurde eine systematische Auswertung und Aufbereitung vorliegender Erkenntnisse zur Verkehrssicherheit und zum Verkehrsablauf in Autobahntunneln durchgeführt. Neben dem deutschen Regelwerk zum Entwurf und Betrieb von Tunneln wurden auch die Erkenntnisse aus dem europäischen Ausland berücksichtigt. Anhand der Ergebnisse der Grundlagenanalyse erfolgte die Präzisierung der relevanten Fragestellungen. Die erarbeiteten Fragestellungen bildeten die Grundlage der Untersuchungsmethodik, die bei der Analyse von bereits realisierten Tunnellösungen angewandt wurde.

Zur Wahl der Untersuchungsstrecken für die Analyse der realisierten Tunnellösungen dienten Ereignismeldebögen. Die Ereignismeldebögen stellen eine Zusammenfassung der Berichte über u. a. Brände und Unfälle in Tunneln dar und werden für

die Tunnel ab einer Länge von 400 m geführt. Die Ereignismeldebögen wurden von der Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt) zur Verfügung gestellt. Insgesamt konnten Meldungen für 59 Tunnel mit einer Länge von $L \geq 400$ m ausgewertet werden. Die Auswertung zeigte, dass nicht für alle Tunnel die Grunddaten in gewünschtem Umfang bzw. in der gewünschten Qualität vorliegen. Infolgedessen wurden Daten zu bauseitigen Kennwerten der Tunnel und der zugehörigen Rampen bei den Ländern angefordert. Angaben zum Unfallgeschehen (inkl. 500 m vor und nach dem Tunnelportal) wurden für den Zeitraum von 2008 bis 2012 bei den entsprechenden Polizeidienststellen angefragt. Die Planunterlagen wurden für insgesamt 31 Tunnel geliefert. Angaben zum Unfallgeschehen lagen für 44 Tunnel vor. Als Ergänzung zu den Planunterlagen wurde die Sammlung der Streckenbilddaten aus der Datenbank der turnusmäßig durchgeführten Zustandserfassung und Bewertung (ZEB-Datenbank) herangezogen. Nach Prüfung der Eignung aller vorliegenden Daten wurde das Tunnelkollektiv auf 41 Tunnel reduziert. Die bauseitigen Kennwerte und die Informationen zum Unfallgeschehen dieser Tunnel wurden in einer Projektdatenbank zusammengefasst.

Die Tunnel weisen unterschiedliche betriebliche und bauliche Merkmale auf. Aus Gründen der Vergleichbarkeit, wurde eine Typisierung vorgenommen. Die Festlegung der maßgeblichen Parameter erfolgte in Anlehnung an die Ergebnisse der Literaturanalyse. So wurden die 41 Tunnel entsprechend ihrer Merkmale, (z. B. Fahrstreifenanzahl, Seitenstreifen, Ein- und Ausfahrten zulässige Höchstgeschwindigkeit) in zehn Gruppen unterteilt. Damit wurde der gegenseitigen Abhängigkeit der Einzelmerkmale Rechnung getragen. Die Typisierung und Auswertung erfolgte für alle Tunnel getrennt nach Tunnelröhren. Für die im Tunnelkollektiv vorhandenen Ein- und Ausfahrtbereiche wurde ebenfalls eine Typisierung entsprechend der Lage des Einfädelungs- bzw. Ausfädelungstreifens vorgenommen.

Zur Untersuchung der Verkehrssicherheit wurde eine makroskopische Unfallanalyse durchgeführt. Neben absoluten Unfallzahlen wurden für alle Tunnelstrecken die relevanten Unfallkenngrößen ermittelt. Insgesamt wurden 2.154 Unfälle (davon 884 im Tunnel) betrachtet. Demnach fallen Autobahntunnelstrecken nicht durch ein besonders hohes Unfallrisiko auf. Als Vergleichswert wurde hierbei die Unfallrate der Unfälle mit Personenschaden für Bundesautobahnen herangezogen. Im vorliegenden Tunnelkollektiv liegt der Anteil der Unfälle mit Personenschaden bei 13 %. Die Verteilung der Unfalltypen zeigte, dass der Unfalltyp 1,

der Unfalltyp 3, der Unfalltyp 6 und der Unfalltyp 7 maßgeblich im Tunnelkollektiv vorhanden sind. Für die Unfälle in den Tunneln wurde die Verunglücktenstruktur, ausgedrückt durch die Anzahl der Verunglückten je 100 Unfälle mit Personenschaden, ermittelt und mit der Verunglücktenstruktur für Bundesautobahnen, verglichen. Das Unfallkollektiv der Tunnel weist eine deutlich niedrigere Anzahl an Verunglückten auf. Auf Grund dieser Abweichung wurden Unfallkenngrößen unter Verwendung der angepassten Unfallkostensätze auf dem Preisstand 2010 berechnet. Die Unfallkenngrößen wurden entsprechend der vorgenommenen Typisierung grafisch dargestellt. Ein Vergleich der Unfallkenngrößen einzelner Teilkollektive führte zu folgenden Ergebnissen:

Tunnel ohne Ein- und Ausfahrten

- 2-streifige Querschnitte ohne Seitenstreifen weisen eine geringfügig niedrigere mittlere Unfallrate bei $V_{zul} = 80$ km/h als bei $V_{zul} = 100$ km/h auf.
- 2-streifige Querschnitte mit Seitenstreifen weisen eine niedrigere mittlere Unfallrate als ohne Seitenstreifen bei $V_{zul} = 80$ km/h auf.
- 3-streifige Querschnitte mit Seitenstreifen haben vergleichbare Unfallraten bei $V_{zul} = 80$ km/h und $V_{zul} = 100$ km/h.
- 2- und 3-streifige Querschnitte mit und ohne Seitenstreifen weisen eine doppelt so hohe Anzahl an Unfällen der Kategorien 1 bis 3 bei $V_{zul} = 100$ km/h als bei $V_{zul} = 80$ km/h auf.

Tunnel mit Ein- und Ausfahrten

- 2-streifige Querschnitte mit Seitenstreifen weisen eine geringfügig niedrigere mittlere Unfallrate als ohne Seitenstreifen auf. Der Anteil an Unfällen der Kategorien 1 bis 3 ist an den Querschnitten ohne Seitenstreifen doppelt so hoch als an den Querschnitten mit Seitenstreifen.
- 3-streifige Querschnitte mit Seitenstreifen weisen eine doppelt so hohe Anzahl an Unfällen der Kategorien 1 bis 3 bei $V_{zul} = 100$ km/h als bei $V_{zul} = 80$ km/h auf. Die mittleren Unfallraten sind jedoch bei $V_{zul} = 100$ km/h und $V_{zul} = 80$ km/h vergleichbar.
- 2-streifige Querschnitte mit Seitenstreifen weisen eine geringfügig niedrigere mittlere Unfallrate als 3-streifige Querschnitte auf.

Weiterhin wurde der Einfluss von Ein- und Ausfahrten in den Tunnelröhren auf das Unfallgeschehen untersucht. Es zeigte sich, dass Röhren mit Ein- bzw. Ausfahrten wesentlich höhere Unfall-

raten aufweisen. Dies wurde sowohl bei dem Vergleich der 2-streifigen Querschnitte als auch der 3-streifigen Querschnitte (auch unabhängig der V_{zul}) festgestellt.

Für den Vergleich der Tunnel mit den Außenstrecken wurde das Unfallgeschehen der angrenzenden Streckenbereiche vor und nach dem Tunnel betrachtet. Das Kollektiv der angrenzenden Streckenabschnitte erstreckte sich auf ca. 90 km. Erhebliche Unterschiede in der Verteilung der Unfälle auf die Unfallkategorien konnten zwischen den Tunnelabschnitten und den angrenzenden Streckenabschnitten nicht festgestellt werden. Für angrenzende Abschnitte wurden die entsprechenden Kenngrößen ermittelt und mit den Unfallkenngrößen der Tunnel verglichen. Dies hat gezeigt, dass die angrenzenden Streckenabschnitte vor und nach dem Tunnel geringfügig niedrigere Unfallraten als die Tunnelabschnitte aufweisen. Im Vergleich zu freien Strecken weisen die Tunnelstreckenabschnitte aber geringere Unfallraten auf.

Im Rahmen der Untersuchung sollten die vorhandenen Sichtweiten im Tunnel und in den Ein- und Ausfahrtbereichen ermittelt werden. Voraussetzung dafür sind Angaben zur Trassierung im Lage- und Höhenplan sowie zur Querschnittsgestaltung. Da hierfür aber keine ausreichenden Planungsunterlagen zur Verfügung gestellt worden sind, konnten diesbezügliche Analysen nicht durchgeführt und entsprechende Empfehlungen abgeleitet werden.

In einer mikroskopischen Unfallanalyse wurden Anschlussstellen innerhalb der Tunnelbauwerke untersucht. Insgesamt wurden 13 Tunnel näher betrachtet. Davon haben 12 mindestens eine Ein- bzw. Ausfahrt. Die Einhausung Prüfening weist je Richtung einen Verflechtungsstreifen über die gesamte Tunnelänge auf. Im Kollektiv sind 11 Einfahrten und 16 Ausfahrten vorhanden. Es wurden vor allem die Unfallmerkmale, wie Unfallursachen und Unfallumstände näher betrachtet. Bei der Betrachtung der Unfallursachen zeigte sich, dass nicht angepasste Geschwindigkeit, ungenügender Sicherheitsabstand, falscher Fahrstreifenwechsel und Missachten der Vorfahrt die häufigsten Unfallursachen in den Tunneln mit Ein- und Ausfahrten waren.

Auf Höhe der Tunnelportale sowie in den Ein- und Ausfahrtbereichen wurden in einigen Tunneln vermehrt Unfälle beobachtet (Tunnel Flughafen, Tunnel Ruhrschnellweg, Tunnel Ortsteil Britz). Vor allem in den Tunneln mit mehreren Ein- und Ausfahrtbereichen nacheinander war die Unfallanzahl besonders hoch (Tunnel Wersten, Tunnel Ortsteil Britz). Von der Gesamtheit der untersuchten Ein-

und Ausfahrtbereiche waren es die Einfahrten, die negativ aufgefallen sind. Die Betrachtung der Längen von Ein- und Ausfädelungstreifen in Tunneln zeigte, dass die durch die RAA 2008 empfohlene Länge von 250 m vermehrt unterschritten wird.

Zusammenfassend lassen sich folgende Empfehlungen für Autobahntunnel ableiten:

- Ein Verzicht auf Seitenstreifen bei 2-streifigen Querschnitten sollte hinsichtlich einer Verbesserung der Verkehrssicherheit geprüft werden. Hierzu müsste das „Verfahren für die Auswahl von Straßenquerschnitten in Tunneln“ nach dem ARS Nr. 06/2000 geändert werden.
- Ein- und Ausfahrtbereiche in Tunnel sind zu vermeiden.
- Die Längen der Ein- und Ausfädelungstreifen für Autobahnen der EKA 1 und EKA 2 sollten den Mindestwert nach RAA (2008) von 250 m nicht unterschreiten.
- Eine Verkürzung der Ein- und Ausfädelungstreifen in der EKA 3 auf 150 m ist zu vermeiden. Die Länge sollte mindestens 250 m betragen.
- Die zulässige Höchstgeschwindigkeit in Tunneln sollte auf $V_{zul} = 80$ km/h begrenzt werden.
- Die Anordnung von Anlagen zur Durchsetzung der zulässigen Höchstgeschwindigkeit ist zu prüfen.

Kapazitäten und q-V-Beziehungen

Auf Basis der empirischen Untersuchungen konnten Kapazitäten und q-V-Beziehungen für

- Tunnel mit 2-streifiger Richtungsfahrbahn innerhalb von Ballungsräumen und einer zulässigen Höchstgeschwindigkeit von 80 km/h,
- Tunnel mit 3-streifiger Richtungsfahrbahn innerhalb von Ballungsräumen und einer zulässigen Höchstgeschwindigkeit von 100 km/h,
- Tunnel mit 3-streifiger Richtungsfahrbahn innerhalb von Ballungsräumen und einer zulässigen Höchstgeschwindigkeit von 80 km/h abgeleitet werden.

Wesentliche Änderung gegenüber den Kapazitäten und q-V-Beziehungen des HBS (2014) ist eine Differenzierung nach der zulässigen Höchstgeschwindigkeit ($V_{zul} = 100$ km/h und $V_{zul} = 80$ km/h).

Kapazitäten und q-V-Beziehungen für Tunnel mit 2-streifigen Richtungsfahrbahnen innerhalb von Ballungsräumen mit einer zulässigen Höchstgeschwindigkeit von 100 km/h konnten auf Grund fehlender Datenbasis nicht ermittelt werden. Ebenso konnten keine Kapazitäten und q-V-Beziehungen für Tunnel mit 2- und 3-streifigen Richtungsfahrbahnen außerhalb von Ballungsräumen abgeleitet werden.

Die abgeleiteten Kapazitäten und q-V-Beziehungen sollten bei einer Fortschreibung des HBS berücksichtigt werden. Für Tunnel mit 2-streifigen Richtungsfahrbahnen innerhalb von Ballungsräumen mit einer zulässigen Höchstgeschwindigkeit von 100 km/h und für Tunnel mit 2- und 3-streifigen Richtungsfahrbahnen außerhalb von Ballungsräumen sollten dazu weitere Untersuchungen zum Verkehrsablauf erfolgen.

Literatur

- Angenendt, W., Erke, H., Hoffmann, G., Marburger, E.-A., Molt, W., Zimmermann, G.: Situationsbezogene Sicherheitskriterien im Straßenverkehr. Projektgruppenberichte der Bundesanstalt für Straßenwesen, Bereich Unfallforschung, Heft 18, Bergisch Gladbach 1987
- ARS Nr. 06/2000: Straßenquerschnitte in Tunneln, Verfahren für die Auswahl von Straßenquerschnitten in Tunneln. Bundesministerium für Verkehr, Bau- und Stadtentwicklung, Bonn, den 22. Februar 2000
- ARS Nr. 10/2006: Betriebstechnische Ausstattung von Straßentunneln – Umsetzung der Richtlinie 2004/54/EG des europäischen Parlamentes und des Rates vom 29. April 2004 über Mindestanforderungen in Tunneln in transeuropäischen Straßennetzen in nationales Recht, Richtlinien für die Ausstattung und den Betrieb von Straßentunneln (RABT), Ausgabe 2006. Bundesministerium für Verkehr, Bau- und Stadtentwicklung, Bonn, den 27. April 2006
- ARS Nr. 03/2008: Betriebstechnische Ausstattung von Straßentunneln – Ereignismeldewesen. Bundesministerium für Verkehr, Bau- und Stadtentwicklung, Bonn, den 1. April 2008
- Baier, M. M., Klemp-Kohnen, A., Bark, A., Bergmann, A.: Ermittlung und Zuordnung von Unfallkostenraten für Wirtschaftlichkeitsberechnungen. AP 6 „Unfallgeschehen“ zum FE 23.0009/2006 „Erarbeitung neuer Richtlinien für die Anlage von Straßen, Teil: Wirtschaftlichkeitsberechnungen (RAS-W) mit Aktualisierung der Nutzen- und Kostenkomponenten“ im Auftrag des Bundesministeriums für Verkehr und digitaler Infrastruktur, Aachen/Darmstadt 2014 (unveröffentlicht).
- Bark, A., Kutschera, R., Baier, R., Klemp-Kohnen, A.: Handbuch der Verkehrssicherheit von Straßen – Entwurf eines Handbuchs für die Bewertung der Verkehrssicherheit von Straßen (HVS). FE 03.389/2005/FGB im Auftrag des Bundesministeriums für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung, Gießen/Aachen 2008 (unveröffentlicht)
- Bark, A., Schmidt, H.: Entwicklung eines dreidimensionalen Simulationstools zur Überprüfung von Straßenentwürfen auf sicherheitsrelevante Entwurfsdefizite für Sicherheitsauditoren und Planer von Landstraßen. Forschungsprojekt 1740X05 im Auftrag des Bundesministeriums für Bildung und Forschung, Gießen 2010 (unveröffentlicht)
- Brilon, W., Geistefeldt, J.: Überprüfung der Bemessungswerte des HBS für Autobahnabschnitte außerhalb der Knotenpunkte. Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik, Heft 1033, Bonn 2010
- Brilon, W., Geistefeldt, J., Lippold, C., Kuczora, V.: Autobahnen und Autobahnknotenpunkte mit vierstreifigen Richtungsfahrbahnen – Gestaltung und Bemessung. Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik, Heft 967, Bonn 2007
- Brilon, W., Geistefeldt, J., Regler, M.: Reliability of Freeway Traffic Flow: A Stochastic Concept of Capacity. Proceedings of the 16th International Symposium on Transportation and Traffic Theory, Maryland 2005
- Brilon, W., Großmann, M., Blanke, H.: Verfahren für die Berechnung der Leistungsfähigkeit und Qualität des Verkehrsablaufs auf Straßen. Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik, Heft 669, Bonn 1994
- Brilon, W., Lemke, K.: Straßenquerschnitte in Tunneln. Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik, Heft 785, Bonn 2000
- Brilon, W., Ponzlet, M.: Application of traffic flow models. Proceedings of the Workshop in Traffic and Granular Flow, World Scientific, Singapore 1995
- Brilon, W., Zurlinden, H.: Kapazität von Straßen als Zufallsgröße. In: Straßenverkehrstechnik 48 (2004), Heft 4, S. 164-172
- Bundesamt für Strassen, ASTRA: Signalisation der Sicherheitseinrichtungen in Strassentunneln, ASTRA 13 010, Zürich 2011
- FORSCHUNGSGESELLSCHAFT FÜR STRASSEN- UND VERKEHRSWESSEN (FGSV): Richtlinien für die Anlage von Landstraßen, Teil III: Knotenpunkte, Abschnitt 2: Planfreie Knotenpunkte (RAL-K-2). Ausgabe 1976, Köln 1976
- FORSCHUNGSGESELLSCHAFT FÜR STRASSEN- UND VERKEHRSWESSEN (FGSV): Hinweise zur Methodik der Untersuchung von Straßenverkehrsunfällen. Ausgabe 1991, Köln 1991
- FORSCHUNGSGESELLSCHAFT FÜR STRASSEN- UND VERKEHRSWESSEN (FGSV): Richtlinien für die wegweisende Beschilderung auf Autobahnen (RWBA). Ausgabe 2000, Köln 2000
- FORSCHUNGSGESELLSCHAFT FÜR STRASSEN- UND VERKEHRSWESSEN (FGSV): Richtlinien für die Ausstattung und den Betrieb von Straßentunneln (RABT). Ausgabe 2006, Köln 2006

- FORSCHUNGSGESELLSCHAFT FÜR STRASSEN- UND VERKEHRSWESSEN (FGSV): Richtlinien für die Anlage von Autobahnen (RAA). Ausgabe 2008, Köln 2008
- FORSCHUNGSGESELLSCHAFT FÜR STRASSEN- UND VERKEHRSWESSEN (FGSV): Handbuch für die Bemessung von Straßenverkehrsanlagen (HBS). Ausgabe 2001, Fassung 2009, Köln 2001/2009
- Friedrich, B., Hoffmann, S., Irzik, M., Matschke, I.: Zweistreifige Einfahrten an dreistreifigen Richtungsfahrbahnen – Verkehrssicherheit und Verkehrsablauf. Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik, Heft 992, Bonn 2008
- Friedrich, B., Irzik, M., Hoffmann, S.: Verkehrsablauf an Autobahnausfahrten des Typs A 2 der RAL-K-2. Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik, Heft 946, Bonn 2006
- Geistefeldt, J.: Verkehrsablauf und Verkehrssicherheit auf Autobahnen mit vierstreifigen Richtungsfahrbahnen. Schriftenreihe des Lehrstuhls für Verkehrswesen der Ruhr-Universität Bochum, Heft 30, Bochum 2007
- Handbuch für die Bemessung von Straßenverkehrsanlagen (HBS), Entwurf 2014. Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, Köln 2014
- Kathmann, T., Roggendorf, S., Scotti, C., Baier, M. M.: Verkehrssicherheit in Einfahrten auf Autobahnen. FE 82.509/2010 im Auftrag der Bundesanstalt für Straßenwesen, Aachen 2014 (unveröffentlicht)
- Kayser, H. J., Baltzer, W., Leven, W.: Zulässigkeit und Einsatzkriterien von Ein- und Ausfahrten in Tunneln. Mitteilungen des Lehrstuhls und Institut für Straßenwesen, Erd- und Tunnelbau der RWTH Aachen, Nr. 13, Aachen 1985
- Lanz, R., Broenimann, F., Haftka, U. : Voraussetzungen für Strassenknoten in Tunneln und Galerien. VSS-Forschungsauftrag Nr. 18/87 auf Antrag der Vereinigung Schweizerischer Strassenfachleute, Zürich 1990
- Lanz, R., Schaufelberger, W., Marino, F., Groner, M., Groner, R., Zahnd, D.: Einfahrten in Hochleistungsstrassen mit Beschleunigungsstreifen in Tunneln und Galerien. VSS-Forschungsauftrag Nr. 23/90 auf Antrag der Vereinigung Schweizerischer Strassenfachleute, Zürich 1995
- Lemke, K.: Sicherheitswirkung 2- und 3-streifiger Regelquerschnitte auf BAB. In: Straßenverkehrstechnik 51 (2007), Heft 8, S. 427-430 (Mitteilungen der Bundesanstalt für Straßenwesen 2/2007)
- Lerner, M., Kranz, T. Schepers, A.: Bewertung der Straßenverkehrsunfälle Entwicklung der Unfallkosten in Deutschland 2005-2010 Unfallkostensätze 2010
- Lindenmann, H.-P., Weber, R., Ranft, B., Chabot-Zhang, Y.: Unfallgeschehen auf stark belasteten Autobahnen. Forschungsauftrag unterstützt durch den Fonds für Verkehrssicherheit, Zürich 2000
- Österreichische Forschungsgesellschaft Straßenschiene-Verkehr (FSV): RVS 03.03.23: Linienführung. (Jänner 1997), Wien 1997
- Österreichische Forschungsgesellschaft Straßenschiene-Verkehr (FSV): RVS 09.01.21: Linienführung im Tunnel. (September 2007), Wien 2007
- Österreichische Forschungsgesellschaft Straßenschiene-Verkehr (FSV): RVS 09.01.23: Innenausbau. (April 2009), Wien 2009
- Österreichische Forschungsgesellschaft Straßenschiene-Verkehr (FSV): RVS 09.01.24: Bauliche Anlagen. (September 2009), Wien 2009
- Österreichische Forschungsgesellschaft Straßenschiene-Verkehr (FSV): RVS 09.01.25: Vorportalbereich. (Dezember 2009), Wien 2009
- Österreichische Forschungsgesellschaft Straßenschiene-Verkehr (FSV): RVS 09.02.41: Beleuchtung. (Februar 2009), Wien 2009
- Österreichische Forschungsgesellschaft Straßenschiene-Verkehr (FSV): RVS 09.01.22: Tunnelquerschnitte. (März 2010), Wien 2010
- Österreichische Forschungsgesellschaft Straßenschiene-Verkehr (FSV): RVS 09.02.22: Tunnelausrüstung. (November 2010), Wien 2010
- Pöppel-Decker, M., Schepers, A., Koßmann, I.: Grundlagen streckenbezogener Unfallanalysen auf Bundesautobahnen. Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen, Unterreihe Mensch und Sicherheit, Heft M 153, Bergisch Gladbach 2003
- Robatsch, K., Nussbaumer, C.: Sicherheitsvergleich in Tunneln – Verkehrssicherheitsvergleich von Tunneln mit Gegen- und Richtungsverkehr mit anderen Straßenarten. Kuratorium für Verkehrssicherheit, Wien 2005
- Salvisberg, U., Allenbach, R., Cavegn, M., Hubacher, M., Siegrist, S.: Verkehrssicherheit in Autobahn- und Autostrassentunneln des Nationalstrassennetzes. bfu-Report 51, Bern 2004
- Schnüll, R., Hoffmann, S., Kölle, M., Mennicken, C.: Leistungsfähigkeit von Verflechtungsstrecken an planfreien Knotenpunkten. Forschung Straßen-

bau und Straßenverkehrstechnik, Heft 796, Bonn 2000

Schweizerischer Bundesrat: Signalisationsverordnung vom 5 September 1997 (Stand am 1. Juli 2012, Zürich, 2012

Schweizer Verband der Straßen und Verkehrsfachleute (VSS): Projektierung Tunnel, Grundlagen. Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein SN 505 197, Zürich 2004

Schweizer Verband der Straßen und Verkehrsfachleute (VSS): Projektierung Tunnel, Bahntunnel. Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein SN 505 197/1, Zürich 2004

Schweizer Verband der Straßen und Verkehrsfachleute (VSS): Projektierung Tunnel, Strassentunnel. Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein SN 505 197/2, Zürich 2004

Schweizer Verband der Straßen und Verkehrsfachleute (VSS): Geometrisches Normalprofil, Allgemeine Grundsätze, Begriffe und Elemente SN 640 200, Zürich 2003

Trapp, R.: Entwicklung und vergleichende Bewertung eines proaktiven Verfahrens zur Zuflussregelung. In: Straßenverkehrstechnik 52 (2008), Heft 12, S. 774-783

Trupat, S., Tepper, M.: Neuere Entwicklungen der Zuflussregelung in Deutschland. Straßenverkehrstechnik 48 (2004), Heft 8, S. 381-386

Van Aerde, M.: A Single Regime Speed-Flow-Density Relationship for Freeways and Arterials. Proceedings of the 74th TRB Annual Meeting. Transportation Research Board, Washington D. C. 1995

Weiser, F., Sillius, A., Lippold, C.: Verkehrssicherheit und Verkehrsablauf an planfreien Knotenpunkten mit Fahrstreifensubtraktion. Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik, Heft 936, Bonn 2006

Zulauf, C., Locher, P., Steinauer, B., Mayer, G., Zimmermann, U., Baltzer, W., Riepe, W., Kündig, P., Bewertung der Sicherheit von Straßentunneln. Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen, Unterreihe Brücken- und Ingenieurbau, Heft B 66, Bergisch Gladbach 2009

Schriftenreihe

Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen

Unterreihe „Verkehrstechnik“

2012

V 210: Schmale zweibahnig vierstreifige Landstraßen (RQ 21)
Maier, Berger € 18,50

V 211: Innliegende Linkseinfädelungstreifen an plangleichen Knotenpunkten innerorts und im Vorfeld bebauter Gebiete
Richter, Neumann, Zierke, Seebo € 17,00

V 212: Anlagenkonzeption für Meistereigehöfte – Optimierung von Arbeitsabläufen
Schmauder, Jung, Paritschkow € 19,00

V 213: Quantifizierung von Verkehrsverlagerungen durch Baustellen an BAB
Laffont, Mahmoudi, Dohmen, Funke-Akbiyik, Vieten € 18,00

V 214: Vernetzungseignung von Brücken im Bereich von Lebensraumkorridoren
Schmellekamp, Tegethof
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

V 215: Stauprävention auf BAB im Winter
Kirschfink, Poschmann, Zobel, Schedler € 17,00

V 216: Verbesserung der Verkehrssicherheit auf einbahnig zweistreifigen Außerortsstraßen (AOSI)
Lippold, Weise, Jährig € 17,50

V 217: Verbesserung der Bedingungen für Fußgänger an Lichtsignalanlagen
Alrutz, Bachmann, Rudert, Angenendt, Blase, Fohlmeister, Häckelmann € 18,50

V 218: Empfehlungen zum richtigen Aufbringen von Tausalzlösungen
Hausmann € 16,00

V 219: Bewältigung großer Verkehrsmengen auf Autobahnen im Winter
Roos, Zimmermann, Schulz, Riffel € 16,50

2013

V 220: Maßnahmen zur Bewältigung der besonderen psychischen Belastung des Straßenbetriebsdienstpersonals – Pilotstudie
Pöpping, Pollack, Müller € 16,00

V 221: Bemessungsverkehrsstärken auf einbahnigen Landstraßen
Arnold, Kluth, Ziegler, Thomas € 18,50

V 222: Aktualisierung des MLuS 02 – Erstellung der RLuS
Düring, Flassak, Nitzsche, Sörgel, Dünnebeil, Rehberger € 19,50

V 223: Verkehrsentwicklung auf Bundesfernstraßen 2010
Fitschen, Nordmann € 16,50
Dieser Bericht ist sowohl als gedrucktes Heft der Schriftenreihe als auch als CD erhältlich oder kann außerdem als kostenpflichtiger Download unter www.nw-verlag.de heruntergeladen werden.

V 224: Prüfung und Bewertung von Schutzeinrichtungen der Aufenthaltstufe H4b für den Einsatz auf Brücken – Teil 1 und 2
Bergerhausen, Klostermeier, Klöckner, Kübler € 19,00

V 225: Neue Technik für den Straßenbetriebsdienst – Teil 1: Neue Informations- und Kommunikationstechniken Teil 2: Autonomes Fahren für den Straßenbetriebsdienst
Holldorb, Häusler, Träger € 21,50

V 226: Bewertungsmodell für die Verkehrssicherheit von Landstraßen
Maier, Berger, Schüller, Heine € 18,00

V 227: Radpotenziale im Stadtverkehr
Baier, Schuckließ, Jachtmann, Diegmann, Mahlau, Gässler € 17,00

V 228: Sicherheitskenngrößen für den Radverkehr
Baier, Göbbels, Klemps-Kohnen € 15,50

V 229: Straßenverkehrszählungen (SVZ) mit mobilen Messsystemen
Schmidt, Frenken, Hellebrandt, Regniet, Mahmoudi € 20,50

V 230: Verkehrsadaptive Netzsteuerungen
Hohmann, Giuliani, Wietholt € 16,50

V 231: Verkehrsentwicklung auf Bundesfernstraßen 2011
Fitschen, Nordmann € 28,50
Dieser Bericht ist sowohl als gedrucktes Heft der Schriftenreihe als auch als CD erhältlich oder kann außerdem als kostenpflichtiger Download unter www.nw-verlag.de heruntergeladen werden.

V 232: Reflexkörper und Griffigkeitsmittel in Nachstreumittelgemischen für Markierungssysteme
Recknagel, Eichler, Koch, Proske, Huth € 23,50

V 233: Straßenverkehrszählung 2010 – Ergebnisse
Lensing € 16,00

V 234: Straßenverkehrszählung 2010 – Methodik
Lensing € 17,50

2014

V 235: Dynamische Messung der Nachtsichtbarkeit von Fahrbahnmarkierungen bei Nässe
Drewes, Laumer, Sick, Auer, Zehntner € 16,00

V 236: Verkehrsentwicklung auf Bundesfernstraßen 2012
Fitschen, Nordmann € 28,50
Die Ergebnisdateien sind auch als CD erhältlich oder können außerdem als kostenpflichtiger Download unter www.nw-verlag.de heruntergeladen werden.

V 237: Monitoring von Grünbrücken – Arbeitshilfe für den Nachweis der Wirksamkeit von Grünbrücken für die Wiedervernetzung im Rahmen der KP II – Maßnahmen
Bund-Länder Arbeitskreis
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden. Der Anhang ist interaktiv. Das heißt er kann ausgefüllt und gespeichert werden.

V 238: Optimierung der Arbeitsprozesse im Straßenbetriebsdienst – Sommerdienst
Schmauder, Jung, Paritschkow € 19,00

V 239: Dynamische Messung der Griffigkeit von Fahrbahnmarkierungen
Steinauer, Oeser, Kemper, Schacht, Klein € 16,00

V 240: Minikreisverkehre – Ableitung ihrer Einsatzbereiche und Einsatzgrenzen
Baier, Leu, Klemps-Kohnen, Reinartz, Maier, Schmotz € 23,50

V 241: Rastanlagen an BAB – Verbesserung der Auslastung und Erhöhung der Kapazität durch Telematiksysteme
Kleine, Lehmann, Lohoff, Rittershaus € 16,50

- V 242: Bordsteinkanten mit einheitlicher Bordhöhe und Bodenindikatoren an Überquerungsstellen
Boenke, Grossmann, Piazzolla, Rebstock, Herrnsdorf, Pfeil € 20,00
- V 243: Nutzen und Kosten von Verkehrsbeeinflussungsanlagen über den gesamten Lebenszyklus
Balmberger, Maibach, Schüller, Dahl, Schäfer € 17,50
- V 244: Verkehrsentwicklung auf Bundesfernstraßen 2013
Fitschen, Nordmann € 28,50
- V 245: Überprüfung der Befahrbarkeit innerörtlicher Knotenpunkte mit Fahrzeugen des Schwerlastverkehrs
Friedrich, Hoffmann, Axer, Niemeier, Tengen, Adams, Santel
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.
- V 246: Auswirkungen von Lang-Lkw auf die Verkehrssicherheit in Einfahrten auf Autobahnen
Kathmann, Roggendorf, Kemper, Baier
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.
- V 247: Befahrbarkeit plangleicher Knotenpunkte mit Lang-Lkw
Lippold, Schemmel
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.
- V 248: Verkehrsnachfragewirkungen von Lang-Lkw – Grundlagentermittlung
Burg, Röhling
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.
- ## 2015
- V 249: Auswirkungen von Querschnittsgestaltung und längsgerichteten Markierungen auf das Fahrverhalten auf Landstraßen
Schlag, Voigt, Lippold, Enzfelder
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.
- V 250: Befahrbarkeit spezieller Verkehrsanlagen auf Autobahnen mit Lang-Lkw
Lippold, Schemmel
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.
- V 251: Einsatzbereiche und Einsatzgrenzen von Straßenumgestaltungen nach dem „Shared Space“-Gedanken
Baier, Engelen, Klemps-Kohnen, Reinartz € 18,50
- V 252: Standortkataster für Lärmschutzanlagen mit Ertragsprognose für potenzielle Photovoltaik-Anwendungen
Gündra, Barron, Henrichs, Jäger, Höfle, Marx, Peters, Reimer, Zipf € 15,00
- V 253: Auswirkungen von Lang-Lkw auf die Sicherheit und den Ablauf des Verkehrs in Arbeitsstellen
Baier, Kemper
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.
- V 254: Beanspruchung der Straßeninfrastruktur durch Lang-Lkw
Wellner, Uhlig
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.
- V 255: Überholen und Räumen – Auswirkungen auf Verkehrssicherheit und Verkehrsablauf durch Lang-Lkw
Zimmermann, Riffel, Roos
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.
- V 256: Grundlagen für die Einbeziehung der sonstigen Anlagenteile von Straßen in die systematische Straßenerhaltung als Voraussetzung eines umfassenden Asset Managements
Zander, Birbaum, Schmidt
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.
- V 257: Führung des Radverkehrs im Mischverkehr auf innerörtlichen Hauptverkehrsstraßen
Ohm, Fiedler, Zimmermann, Kraxenberger, Maier Hantschel, Otto € 18,00
- V 258: Regionalisierte Erfassung von Straßenwetter-Daten
Holldorb, Streich, Uhlig, Schäufele € 18,00
- V 259: Berücksichtigung des Schwerverkehrs bei der Modellierung des Verkehrsablaufs an planfreien Knotenpunkten
Geistefeldt, Sievers
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.
- V 260: Berechnung der optimalen Streudichte im Straßenwinterdienst
Hausmann € 15,50
- V 261: Nutzung von Radwegen in Gegenrichtung - Sicherheitsverbesserungen
Alrutz, Bohle, Busek € 16,50
- V 262: Verkehrstechnische Optimierung des Linksabbiegens vom nachgeordneten Straßennetz auf die Autobahn zur Vermeidung von Falschfahrten
Maier, Pohle, Schmotz, Nirschl, Erbsmehl € XX,XX
- V 263: Verkehrstechnische Bemessung von Landstraßen – Weiterentwicklung der Verfahren
Weiser, Jäger, Riedl, Weiser, Lohoff € XX,XX
- V 264: Qualitätskonzepte zur anlagenübergreifenden Bewertung des Verkehrsablaufs auf Außerortsstraßen
Weiser, Jäger, Riedl, Weiser, Lohoff € XX,XX
- V 265: Entwurfstechnische Empfehlungen für Autobahntunnelstrecken
Bark, Kutschera, Resnikow, Baier, Schuckließ
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.