



**Erweiterung und Vertiefung des österr. Tunnelmodells – TuRisMo 2**

**Arbeitsbericht zum Arbeitsausschuss Tunnel-Sicherheit**

**31.03.2015**

**ILF BERATENDE INGENIEURE**

Harrachstraße 26, A-4020 Linz  
Tel: 0512-2412-4213 / Fax: 0512-2412-4263  
E-Mail: [info.linz@if.com](mailto:info.linz@if.com)



### REVISIONSVERZEICHNIS

1	31.03.2015	Endfassung	Forster, Lentz	FVT / TU Graz	Kohl
0	26.08.2014	Begutachtungsversion	Forster	-	Kohl
Rev.	Datum	Ausgabe, Art der Änderung	Erstellt	Begutachtet	Freigegeben

## INHALTSVERZEICHNIS

<b>1</b>	<b>EINLEITUNG</b>	<b>1</b>
1.1	Aufbau des Hintergrundberichts	1
1.2	Arbeitsgruppe	2
1.3	Erweiterbarkeit	2
<b>2</b>	<b>NEUERUNGEN BEI DER HÄUFIGKEITSANALYSE</b>	<b>3</b>
2.1	Genereller Aufbau des Ereignisbaums	3
2.2	Berücksichtigung von Folgeunfällen und Pannen im Stau	3
2.3	Spalte A – Verkehrszustand	3
2.4	Spalte B – Pannen und Unfälle	4
2.5	Spalte C – Unfalltyp	9
2.6	Spalte D – Fahrzeugbeteiligung	13
2.7	Spalte E – Folgebrand	14
2.8	Spalte F – Gefahrgutbeteiligung	14
2.9	Spalte G – Schadensszenario Personengefährdung bei Brand infolge Panne	15
2.10	Spalte H – Brandgröße	15
2.11	Spalte I – Schadensszenario	15
<b>3</b>	<b>NEUERUNGEN BEI DEN SCHADENSAUSMASSWERTEN BRAND FÜR DAS STANDARDMODELL</b>	<b>17</b>
3.1	Richtungsverkehrstunnel	17
3.2	Gegenverkehrstunnel	17
<b>4</b>	<b>METHODIK ZUR BERECHNUNG DER SCHADENSAUSMASSWERTE BRAND – DETAILLIERTE ANALYSE</b>	<b>18</b>
4.1	Allgemein	18
4.2	Grundstruktur der Berechnungsmethodik	18
4.3	Notwendige Variationen auf Basislevel	19
4.4	Notwendige Variationen auf Mappinglevel	23
<b>5</b>	<b>BESCHREIBUNG DER SUBMODELLE ZUM SCHADENSAUSMASS BRAND</b>	<b>25</b>
5.1	Verkehrsmodell	25

<b>5.2</b>	<b>Lüftungsmodell</b>	<b>34</b>
<b>5.3</b>	<b>Eindimensionales Strömungsmodell</b>	<b>38</b>
<b>5.4</b>	<b>Dreidimensionales Strömungsmodell</b>	<b>49</b>
<b>5.5</b>	<b>Evakuierungsmodell</b>	<b>59</b>
<b>5.6</b>	<b>Mappingansatz</b>	<b>67</b>
<b>5.7</b>	<b>Folgebrandmodell</b>	<b>71</b>
<b>5.8</b>	<b>Überlebensmodell</b>	<b>74</b>
<b>5.9</b>	<b>Expositionsmodell</b>	<b>79</b>
<b>5.10</b>	<b>Überlagerung</b>	<b>84</b>
<b>6</b>	<b>LITERATURVERZEICHNIS</b>	<b>85</b>

## ABBILDUNGSVERZEICHNIS

Abbildung 2-1: Histogramm der Unfälle in den Monaten der Jahre 2006 bzw. 2007	6
Abbildung 2-2: Außerhalb des Tunnels gelegene Verflechtungsstrecke	8
Abbildung 2-3: Im Tunnel gelegene Verflechtungsstrecke	8
Abbildung 2-4: Verteilung der Detektionszeiten	12
Abbildung 5-1: Histogramm des stündlichen Verkehrsvolumens	27
Abbildung 5-2: Asymmetrie des Verkehrsaufkommens der drei Verkehrsszenarios	28
Abbildung 5-3: Asymmetrie des Verkehrsaufkommens und Symmetriefälle	28
Abbildung 5-4: Verteilung der Unfallwahrscheinlichkeit	29
Abbildung 5-5: LKW-Anteil (schematische Darstellung)	30
Abbildung 5-6: Histogramm des stündlichen Verkehrsvolumens – Österreich	31
Abbildung 5-7: Verteilung der Unfallwahrscheinlichkeit – Österreich	31
Abbildung 5-8: PKW-Anteil nach Verkehrsaufkommen – Österreich	32
Abbildung 5-9: LKW-Anteil nach Verkehrsaufkommen – Österreich	32
Abbildung 5-10: Bus-Anteil nach Verkehrsaufkommen – Österreich	33
Abbildung 5-11: Einflussfaktoren und Anwendung des 1D-Modells	38
Abbildung 5-12: Eindimensionales Modell und Diskretisierung	42
Abbildung 5-13: Domainrepräsentation im Rauchausbreitungsmodell	53
Abbildung 5-14: Branddefinition in Rauchausbreitungssimulation	54
Abbildung 5-15: Modellierung von Kfz in Rauchausbreitungssimulation	56
Abbildung 5-16: Fahrzeugkonfiguration in Rauchausbreitungssimulation	56
Abbildung 5-17: Ortsfeste und gleichverteilte Lüftungskomponenten	59
Abbildung 5-18: Zusammenhang zwischen Verrauchung und Gehgeschwindigkeit	62
Abbildung 5-19: Zeit-Weg-Diagramm für Flucht von Person 3	66

Abbildung 5-20: Zeit-Weg-Diagramm für Flucht von Person 16	66
Abbildung 5-21: Impactfunktion für Verkehr	70
Abbildung 5-22: Impactfunktion für Symmetrie	70
Abbildung 5-23: Berechnung der statistischen Brandwahrscheinlichkeit	72
Abbildung 5-24: Verteilung der Brandorte nach Typ und Impactfunktion für Brandort	73
Abbildung 5-25: Notausgangskonfiguration Referenz tunnel	76
Abbildung 5-26: Berechnung der repräsentativen Notausgangskonfiguration	77
Abbildung 5-27: Notausgangskonfiguration realer Tunnel	78
Abbildung 5-28: Berechnung der statistisch erwartbaren Kfz und Personendichte	82

### TABELLENVERZEICHNIS

Tabelle 1-1: Aufbau des Hintergrundberichts	1
Tabelle 2-1: Basiswert der Unfallrate in Tunneln im Verlauf von Bundesstraßen A und S (Unfälle mit Personenschaden pro Million Fahrzeugkilometer)	7
Tabelle 2-2: Aufteilung der Unfälle mit Personenschaden auf die Unfalltypen (nur Tunnel im Verlauf von Bundesstraßen A und S)	13
Tabelle 2-3: Fahrzeugbeteiligung an den Unfalltypen, 2006-2009	14
Tabelle 2-4: Fahrzeugbeteiligung an den Unfalltypen, nur PKW/LKW/Bus, 2006-2009	14
Tabelle 5-1: Einbauwiderstände von Strahlventilatoren [7]	37
Tabelle 5-2: Parameterwerte für Fahrzeuge in Rauchausbreitungssimulation [2]	55
Tabelle 5-3: Personenzusammensetzung und Fluchtgeschwindigkeiten	63

### ABKÜRZUNGEN und FUNKTIONEN

ADR	Europäisches Übereinkommen über die internationale Beförderung gefährlicher Güter auf der Straße ( <i>Accord européen relatif au transport international des marchandises Dangereuses par Route</i> )
CFD	Computational fluid dynamics
GV	Gegenverkehr
JDTV	Jahresdurchschnittlicher täglicher Verkehr
KFZ	Kraftfahrzeug
RV	Richtungsverkehr
RVS	Richtlinien und Vorschriften für das Straßenwesen
STSG	Straßentunnel-Sicherheitsgesetz

TuRisMo	Tunnel-Risikoanalysemodell
$\delta(x)$	Dirac'sche Deltafunktion mit $\int f(x) \cdot \delta(x - \hat{x}) dx = f(\hat{x})$
$\theta(a, b)$	Rechteckfunktion als Produkt der Heavysidefunktionen $\theta(a, b) = \Theta(x - a) \cdot \Theta(b - x)$
$\Theta(x)$	Heavysidefunktionen als Integral über Dirac'sche Deltafunktion mit $\Theta(x) = \int \delta(x) dx$

## 1 EINLEITUNG

Die ursprüngliche Fassung der Richtlinie RVS 09.03.11, *Tunnel-Risikoanalysemodell (TuRisMo)*, wurde im Jahr 2008 veröffentlicht. Dieses ursprüngliche Modell wurde in den darauffolgenden Jahren erweitert und überarbeitet. Diese Anstrengungen mündeten vor kurzem in die aktuelle Neuauflage der Richtlinie [1].

Der vorliegende Bericht beleuchtet die Hintergründe der einzelnen Punkte der aktuellen Richtlinie, sowohl zum Zweck der Dokumentation als auch, um dem Anwender der Richtlinie eine zusätzliche, über den Richtlinien text hinausgehende Hilfestellung speziell bei detaillierten Risikoanalysen zu leisten.

Viele Sachverhalte in der aktuellen Richtlinie wurden unverändert aus der ursprünglichen Fassung übernommen. In diesen Fällen verweist der vorliegende Hintergrundbericht auf die entsprechenden Abschnitte im ursprünglichen Hintergrundbericht [2].

### 1.1 Aufbau des Hintergrundberichts

Der Aufbau des Hintergrundberichts folgt den Teilmodellen von TuRisMo:

Tabelle 1-1: Aufbau des Hintergrundberichts

Teilmodell	Beschreibung in der RVS 09.03.11	Beschreibung im vorliegenden Hintergrundbericht
Häufigkeitsanalyse (Ereignisbaumanalyse)	Anhang 2	Kapitel 2
Schadensaumaßanalyse für Verkehrsunfälle	Anhang 3	<i>Unverändert gegenüber der ursprünglichen RVS-Fassung</i>
Schadensausmaßanalyse für Brände: Standardmodell	Anhang 4, 5 und 6	Kapitel 3
Schadensausmaßanalyse für Brände: Detaillierte Analyse	Anhang 7	Kapitel 4 und 5

Bei der Beschreibung der Teilmodelle *Häufigkeitsanalyse* sowie *Schadensausmaßanalyse Brand gemäß Standardmodell* stehen die Neuerungen gegenüber der ursprünglichen Fassung von TuRisMo im Vordergrund.

Die aktuelle Fassung der RVS legt erstmals die Anforderungen an *detaillierte Schadensausmaßanalysen Brand* in ihren Eckpunkten fest. Der Hintergrundbericht erläutert

die konkrete Vorgehensweise im Einzelnen und bietet somit eine Anleitung für die Durchführung von detaillierten Schadensausmaßanalysen.

Das Schadensausmaßmodell für Verkehrsunfälle (mechanisches Schadensmodell) hat sich gegenüber der ursprünglichen Version der RVS 09.03.11 nicht verändert und wird deshalb nicht behandelt.

## 1.2 Arbeitsgruppe

Der Prozess der Bearbeitung erfolgte über mehrere Jahre bis Dezember 2013 in periodischen Schritten; anschließend wurden das Richtlinien-Dokumente (RVS 09.03.11) in mehreren Durchgängen schlussgelesen (finale Durchsicht Jänner 2015).

Die fachliche Begleitung des Entwicklungsprozesses und die fachliche Diskussion und Abstimmung wesentlicher Grundlagen und Annahmen der Risikoanalyse erfolgte in der zur Überarbeitung der RVS 09.03.11 eingerichteten Arbeitsgruppe im Rahmen der Österreichischen Forschungsgesellschaft Schiene-Straße-Verkehr (FSV). Die Arbeitsgruppe bestand aus folgenden Mitgliedern (in alphabetischer Reihenfolge):

- Dr. Rudolf **Bopp**, BTC - Bopp Tunnel Consulting GmbH
- Dipl.-Ing. Christoph **Forster**, ILF Consulting Engineers
- Dipl.-Ing. Rudolf **Hörhan** (Leiter)
- Ing. Roland **Laabmayr**, IL - Ingenieurbüro Laabmayr & Partner ZT GmbH
- Dipl.-Ing. Dr. Guntram **Lechner**, ZT Lechner & Partner ZT GmbH
- Dipl.-Ing. Harald **Kammerer**, ILF Consulting Engineers
- Dipl.-Ing. Bernhard **Kohl**, ILF Consulting Engineers
- Dipl.-Ing. Stefan **Krausbar**, ÖBFV
- Ing. Günter **Rattei**, ASFiNAG
- Ao. Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr. Peter **Sturm**, TU Graz
- Dipl.-HTL-Ing. Mag. (FH) Alexander **Wierer**, ASFiNAG
- Dipl.-Ing. Sonja **Wiesholzer**, Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie

## 1.3 Erweiterbarkeit

Alle Modelle wurden explizit mit der Idee der Erweiterbarkeit ausgewählt bzw. entwickelt. Sollten zu einem Aspekt aussagekräftige spezifische Informationen zur Verfügung stehen, so dürfen und sollen diese verwendet werden.

Ebenso kann das gesamte Modell um zusätzliche Variationsparameter erweitert bzw. existierende Variationen vertieft werden.

## 2 NEUERUNGEN BEI DER HÄUFIGKEITSANALYSE

Der vorliegende Hintergrundbericht befasst sich ausschließlich mit den Neuerungen der aktuellen Fassung von TuRisMo gegenüber der ursprünglichen Fassung. Die Hintergründe der ursprünglichen Fassung wurden in einem eigenen Bericht festgehalten [2].

### 2.1 Genereller Aufbau des Ereignisbaums

In der ursprünglichen Fassung bestand der Ereignisbaum aus 6 Hierarchieebenen (Spalten A-F). Die aktuelle Fassung enthält 3 zusätzliche Hierarchieebenen. Die neuen Hierarchieebenen ergeben sich aus folgenden logischen Verzweigungen:

- Verkehrszustand (Spalte A)
- Personengefährdung bei Brand infolge Panne (Spalte G)
- Brandgröße (Spalte H)

### 2.2 Berücksichtigung von Folgeunfällen und Pannen im Stau

In der ursprünglichen Fassung berücksichtigte die Häufigkeitsanalyse nur Primärereignisse, d.h. Unfälle und Pannen im fließenden Verkehr. Die neue Fassung beinhaltet darüber hinaus:

- Sekundärereignisse: Auffahrunfälle auf das Ende der Fahrzeugkolonne, die sich infolge eines Primärereignisses gebildet hat
- Tertiärereignisse: Pannen von Fahrzeugen, die sich in einem Tunnel mit stockendem Verkehr oder Stau infolge Verkehrsüberlastung befinden

In der neuen Fassung wurden somit alle Ereignistypen systematisch in den Ereignisbaum integriert.

### 2.3 Spalte A – Verkehrszustand

*(In der aktuellen Fassung neu hinzugekommen)*

Spalte A unterscheidet

- zwischen dem Verkehrszustand fließender Verkehr (Primär- und Sekundärereignisse möglich)
- und dem Verkehrszustand Stau infolge Verkehrsüberlastung (Tertiärereignisse möglich)

Das Verhältnis zwischen den beiden Verkehrszuständen hängt von den tatsächlichen Verkehrsverhältnissen im jeweiligen Tunnel ab.

## 2.4 Spalte B – Pannen und Unfälle

*(Entspricht Spalte A der ursprünglichen Fassung)*

### 2.4.1 Pannen im fließenden Verkehr (Primärereignis)

Der Basiswert der Pannenrate  $R_{p1} = 2,372 \approx 2,4$  Pannen/(Mio. Kfz-km) wurde aus der ursprünglichen Fassung übernommen.

Die absolute Pannenhäufigkeit  $B_1$  ergibt sich durch Multiplikation mit der Tunnellänge  $L_{TU}$  und dem JDTV.

### 2.4.2 Pannen im Stau durch Verkehrsüberlastung (Tertiärereignis)

Der Basiswert der Pannenrate im Stau durch Verkehrsüberlastung  $R_{p2}$  wurde aus dem Wert  $R_{p1}$  hergeleitet, wobei folgendermaßen vorgegangen wurde: Die meisten Fahrzeugkilometer werden in RV-Tunneln zurückgelegt, wo überwiegend eine höchste zulässige Geschwindigkeit von 100 km/h gilt. Somit lässt sich die zeitbezogene Pannenrate auf 237,2 Pannen pro Million Fahrzeugbetriebsstunden schätzen. Da im Staufall von einer mittleren Geschwindigkeit von ca. 20 km/h ausgegangen wird (Stop-and-go-Verkehr), ergibt sich eine Pannenrate von  $237,2 \times 20 / 100 \approx 47$  Pannen pro Million Fahrzeugbetriebsstunden im Stau.

Die absolute Pannenhäufigkeit  $B_3$  ergibt sich durch Multiplikation mit der Tunnellänge  $L_{TU}$  der Anzahl Fahrstreifen sowie der Anzahl Fahrzeuge pro Fahrstreifenkilometer. Im fiktiven Fall eines Stau, in dem die Fahrzeuge beinahe Stoßstange an Stoßstange stehen, ergibt die Anzahl Fahrzeuge als

$$\bar{N}_{Kfz \text{ pro Fahrstreifen}} = \frac{150}{1 + S_{SV}} \quad 2-1$$

wobei unterstellt wird, dass eine PKW-Einheit  $\frac{1000}{150} = 6,6$  m einnimmt, wobei die Länge eines PKW 1 PKW-E beträgt und diejenige eines Schwerfahrzeug 2 PKW-E. Nach dieser Logik finden auf einem Fahrstreifenkilometer 150 PKW bzw. 75 Schwerfahrzeuge Platz. In Wirklichkeit ist der Abstand zwischen den Fahrzeugen üblicherweise selbst bei vollkommenen Stillstand größer, weshalb der Nenner  $1 + S_{SV}$  auf  $2 + S_{SV}$  erhöht wird. Bedenkt man gleichzeitig, dass der Verkehr bei Verkehrsüberlastung selten vollständig zum Stehen kommt, sondern typisch mit einer mittleren Fahrgeschwindigkeit von 20 km/h gerechnet wird (siehe oben), erscheint eine Korrektur von 150 auf 50 PKW-E pro Fahrstreifen

fenkilometer realistischer. Damit ergibt sich die Anzahl Fahrzeuge pro Fahrstreifenkilometer als

$$\bar{N}_{Kfz \text{ pro Fahrstreifen}} = \frac{50}{2 + S_{SV}} \quad 2-2$$

#### 2.4.3 Unfälle im fließenden Verkehr (Primärereignis):

Die RVS unterscheidet bei der Unfallrate pro Fahrzeugkilometer zwischen drei Tunneltypen:

- GV-Tunnel im Verlauf von Landesstraßen
- GV-Tunnel im Verlauf von Bundesstraßen A und S
- RV-Tunnel im Verlauf von Bundesstraßen A und S

Im Fall der GV-Tunnel im Verlauf von Landesstraßen behält die neue RVS-Fassung die ursprüngliche Unfallrate bei.

Im Fall der Tunnel (RV/GV) im Verlauf von Bundesstraßen A und S wurden die Unfallraten auf Grundlage aktueller Daten aus dem Zeitraum 2006-2009 neu berechnet.

Insgesamt wurden im Zeitraum 2006-2009 1516 Unfälle in Bundesstraßentunneln aufgezeichnet. Da die aufgezeichnete Unfallzahl im Jahr 2006 nur etwa die Hälfte der in den darauffolgenden Jahren aufgezeichneten Ereignisse betrug, wurde für die Unfallrate nicht mit einem Beobachtungszeitraum von 4, sondern von 3½ Jahren gerechnet. Der Vergleich mit dem Jahr 2007 zeigt, dass im Jahr 2006 abgesehen von den Monaten Oktober und November relativ wenige Unfälle aufgezeichnet wurden (vgl. Abbildung 2-1).

Die Unterrepräsentation des Jahres 2006 dürfte auf Anfangsschwierigkeiten bei der Anwendung der neuen Systematik zur statistischen Unfallerrfassung zurückgehen, die in diesem Jahr erstmals zum Einsatz kam.

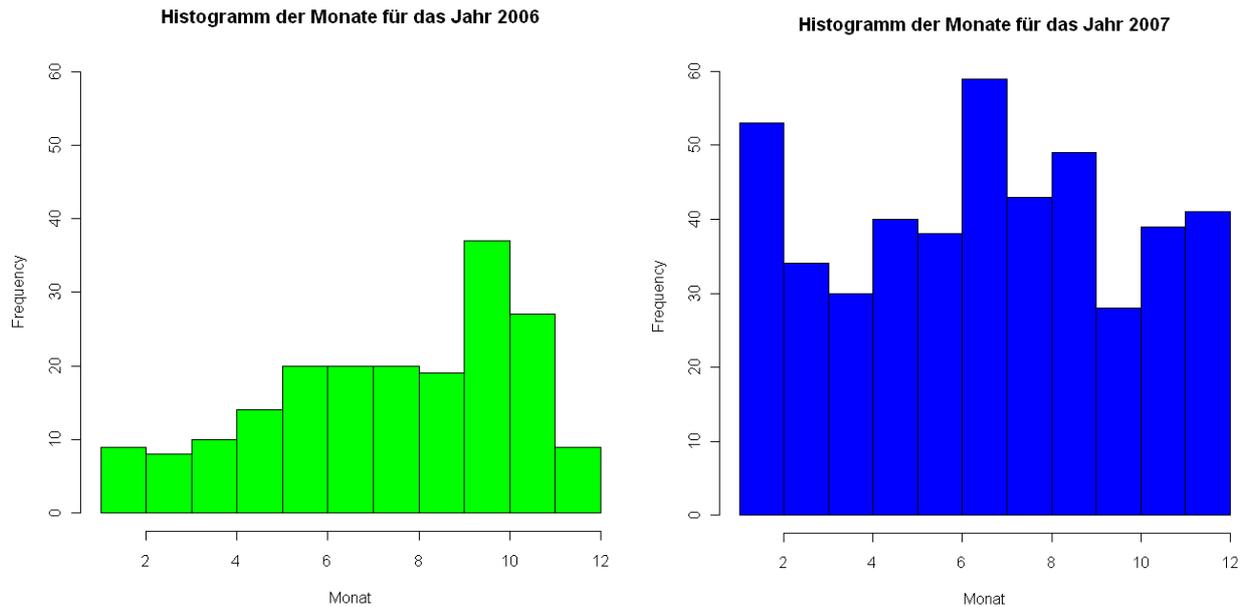


Abbildung 2-1: Histogramm der Unfälle in den Monaten der Jahre 2006 bzw. 2007

Die Auswertung basiert ausschließlich auf Unfällen mit Personenschaden, da diese Unfälle erfahrungsgemäß vollständig und konsequent erfasst werden.

Im Beobachtungszeitraum wurden 384 Unfälle mit Personenschaden registriert, auf deren Grundlage die Unfallrate pro Fahrzeugkilometer mittels Regression neu bestimmt wurde. Tabelle 2-1 zeigt die resultierenden Basiswerte der Unfallrate in GV- und RV-Tunneln. Die im Einzelfall zu erwartende Unfallrate bzw. die absolute Unfallhäufigkeit B2 ergibt sich aus der Kombination des Basiswerts mit den Korrekturfaktoren (Abschnitt 2.4.5 bis 2.4.7), die sich speziell im Falle der Einflussfaktoren Verkehrsleitung und Tunnellänge ebenfalls aus einer Regressionsanalyse herleiten.

Die aus den Unfalldaten 2006-2009 hergeleiteten neuen Basisraten betragen 74 % (GV-Tunnel) bzw. 69 % (RV-Tunnel) der ursprünglichen, aus den Unfalldaten 1999-2003 hergeleiteten Werte. Die Neufassung der RVS geht einheitlich von einer Reduktion auf 70 % aus, was dem gewichteten Mittel der beiden Unfallraten entspricht.

Tabelle 2-1: Basiswert der Unfallrate in Tunneln im Verlauf von Bundesstraßen A und S (Unfälle mit Personenschaden pro Million Fahrzeugkilometer)

Unfallrate	GV-Tunnel		RV-Tunnel	
	Rate	Relativ	Rate	Relativ
Ursprünglich (1999-2003)	0,077	100 %	0,112	100 %
Aktuell (2006-2009)	0,057	74 %	0,077	69 %
Aktuell, gemittelte Anpassung der GV- und RV-Raten	0,054	70 %	0,078	70 %

2.4.4 Ermittlung der Tunnellänge  $L_{TU}$

Unverändert gegenüber der ursprünglichen Fassung.

2.4.5 Korrekturfaktor Verkehrsleistung  $f_{VK}$

Unverändert gegenüber der ursprünglichen Fassung, d.h. der Korrekturfaktor beruht auf einer Regressionsanalyse der Unfälle in den Jahren 1999-2003 [2].

2.4.6 Korrekturfaktor Tunnellänge  $f_{TL}$

Unverändert gegenüber der ursprünglichen Fassung, d.h. der Korrekturfaktor beruht auf einer Regressionsanalyse der Unfälle in den Jahren 1999-2003 [2].

2.4.7 Korrekturfaktor Verflechtungsstrecken  $f_{VF}$

Die ursprüngliche Fassung der RVS begrenzte die bei der Berechnung zu berücksichtigende Länge einer Verflechtungsstrecke inkl. Einflussbereich auf 200 m. Der Einflussbereich ist dabei als die Wegstrecke definiert, die bei höchstzulässiger Geschwindigkeit in 10 s zurückgelegt werden kann. Diese Vorgehensweise führte zur paradoxen Situation, dass eine außerhalb des Tunnels gelegene Verflechtungsstrecke, deren Einflussbereich 200 m in den Tunnel (inkl. Portalbereich) hineinragt (Abbildung 2-2), mit demselben Risikoaufschlag zu bewerten ist wie eine gleich lange Verflechtungsstrecke, die sich zur Gänze im Tunnel befindet (Abbildung 2-3).

Um diese Situation zu bereinigen, wurde in der aktuellen Fassung festgelegt, dass die Verflechtungsstrecke exkl. Einflussbereich in der Berechnung auf max. 200 m zu begrenzen ist, während der Einflussbereich immer mit seiner vollen Länge hinzugezählt

wird.

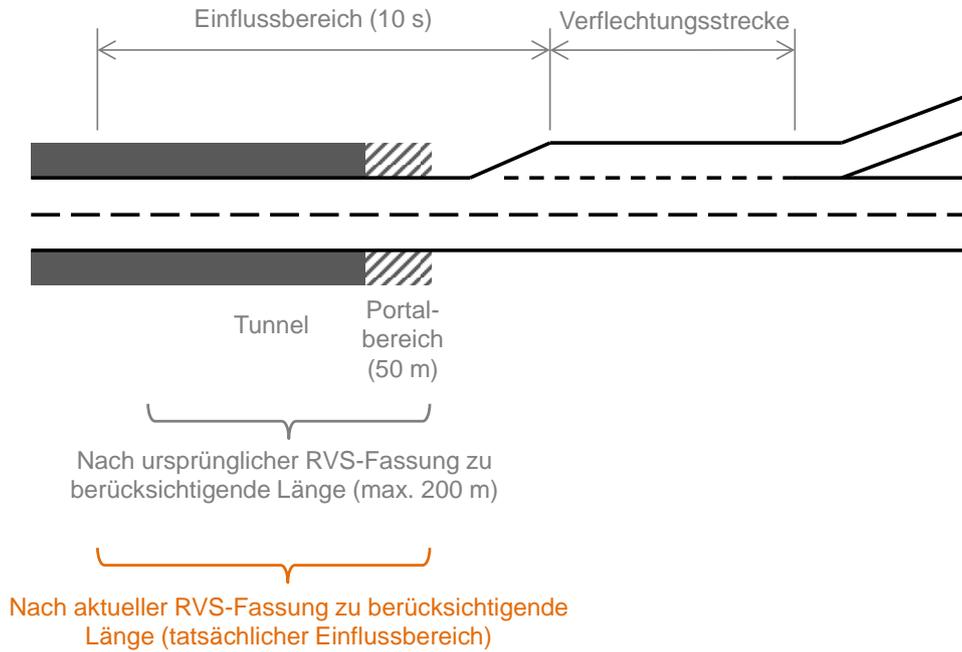


Abbildung 2-2: Außerhalb des Tunnels gelegene Verflechtungsstrecke

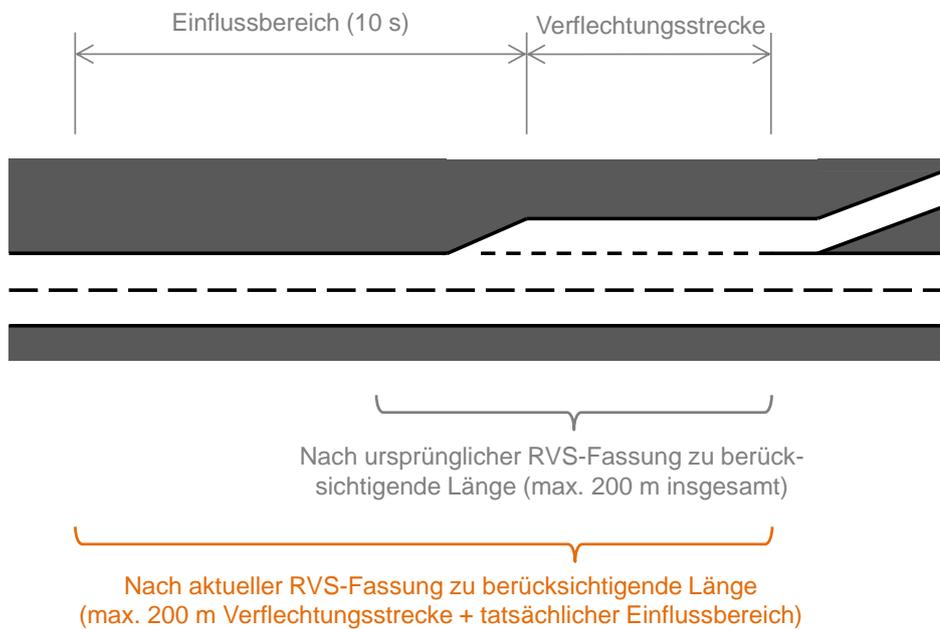


Abbildung 2-3: Im Tunnel gelegene Verflechtungsstrecke

## 2.5 Spalte C – Unfalltyp

*(Entspricht Spalte B der ursprünglichen Fassung)*

### 2.5.1 Wert C2 – Häufigkeit von Folgeunfällen

Wie eingangs in Abschnitt 2.2 erwähnt, berücksichtigt die aktuelle Fassung erstmals die Möglichkeit von Folgeunfällen.

Speziell in Richtungsverkehrstunneln, bei denen sich für das Primärereignis (Brand am Ort der ursprünglichen Verkehrsstörung) ein vernachlässigbares Risiko aus Brandereignissen ergibt, stellt das Szenario ‚Auffahren auf das Stauende‘ einen relevanten Beitrag zum Brandrisiko dar. Dieses Szenario ist zu unterscheiden vom ‚klassischen Stau‘ durch Verkehrsüberlastung, da in diesem Fall nur wenig Zeit zwischen ungestörtem Verkehr und Brandausbruch vergangen ist. Die Längsströmung ist in diesem Fall wesentlich höher als im Fall Primärstau woraus sich auch größere Bereiche mit Personengefährdung ergeben. In der Simulation wird davon ausgegangen, dass jedes auf den Stau auffahrende Fahrzeug die gleiche Wahrscheinlichkeit eines Auffahrunfalls aufweist.

Beim Wert C2 handelt es sich – im Gegensatz zu den übrigen Werten in Spalte C – nicht um eine bedingte Wahrscheinlichkeit, sondern um eine absolute Häufigkeit.

Die Formel, nach der C2 bestimmt wird, ist selbsterklärend. Allerdings bedürfen einige der Parameter, die in die Formel eingehen einer näheren Herleitung. Das betrifft:

- Die Wahrscheinlichkeit eines Auffahrunfalls als Folge einer Panne pro nachfolgendem Kfz  $p_{A,P}$
- Die Wahrscheinlichkeit eines Auffahrunfalls als Folge eines Primärunfalls pro nachfolgendem Kfz  $p_{A,U}$
- Die durchschnittliche Anzahl von hinter einer Verkehrsstörung zum Stehen kommender Fahrzeuge  $\bar{N}$ .

#### 2.5.1.1 Auffahrunfall als Folge einer Panne

Die Wahrscheinlichkeit eines Auffahrunfalls als Folge einer Panne  $p_{A,U}$  wurde statistisch hergeleitet aus dem Verhältnis zwischen

- der Summe der erfassten Auffahrunfälle infolge Primärpannen im Bezugszeitraum
- der Summe der hinter Primärpannen zum Stehen gekommenen Fahrzeuge im Bezugszeitraum

In Zeitraum 2006-2011 wurden 36 Auffahrunfälle infolge Primärpannen erfasst. Um die Pannenzahl in den einzelnen Tunneln abzuschätzen, wurde die Primärpannenrate  $R_{p1}$  mit der Anzahl der im selben Zeitraum zurückgelegten Fahrzeugkilometer multipliziert.

Diese Zahl wurde für jeden Tunnel mit der durchschnittlichen im Pannenfall zum Stehen kommenden Anzahl Fahrzeuge  $\bar{N}$  multipliziert (vgl. Abschnitt 2.5.1.3).

### 2.5.1.2 Auffahrunfall als Folge eines Primärunfalls

Die Wahrscheinlichkeit eines Auffahrunfalls als Folge eines Primärunfalls pro nachfolgendem Kfz  $p_{A,U}$  ergibt sich in gleicher Weise wie infolge Primärpannen (siehe oben). Der Unterschied bei der Herleitung besteht darin, dass die Anzahl der Auffahrunfälle infolge Primärpannen (10 Fälle in im Zeitraum 2006-2011) an die Stelle derjenigen infolge Primärpannen tritt; des weiteren tritt die Primärunfallrate  $R_{p2}$  an die Stelle der Primärpannenrate  $R_{p1}$ .

### 2.5.1.3 Hinter einer Verkehrsstörung zum Stehen kommende Fahrzeuge

Die Anzahl der im Durchschnittsfall hinter einer Verkehrsstörung zum Stehen kommenden Fahrzeuge setzt sich aus zwei Komponenten zusammen:

- Den Fahrzeugen, die sich bei Entstehen der Verkehrsstörung bereits im Tunnel befinden (zwischen Einfahrtportal und Ort der Verkehrsstörung)  $\bar{N}_{bereits\ im\ Tunnel}$
- Den Fahrzeugen, die zwischen Entstehen der Verkehrsstörung und Wirksamwerden der Tunnelsperre in den Tunnel einfahren  $\bar{N}_{fährt\ noch\ ein}$

Das bedeutet

$$\bar{N} = \bar{N}_{bereits\ im\ Tunnel} + \bar{N}_{fährt\ noch\ ein} \quad 2-3$$

Die bereits im Tunnel befindlichen Fahrzeuge sind *im Durchschnitt* über die halbe Tunnellänge  $L_T/2$  verteilt (ohne Zuschläge für Portalbereich), d.h. der Ort der Verkehrsstörung liegt im Durchschnitt in Tunnelmitte. Die Anzahl der Fahrzeuge in diesem Bereich hängt zum einen vom stündlichen Durchschnittsverkehr  $JDTV/24$  ab<sup>1</sup>, zum anderen von der Fahrzeuggeschwindigkeit  $v$ , wobei hier grundsätzlich die zulässige Höchstgeschwindigkeit  $v_{max}$  [km/h] angesetzt wird. Je höher die Geschwindigkeit, desto geringer die Zeit, die ein Fahrzeug zum Durchqueren des Tunnels benötigt bzw. desto geringer die Anzahl Fahrzeuge im betroffenen Tunnelabschnitt. Daraus ergibt sich der Term

$$\bar{N}_{bereits\ im\ Tunnel} = \frac{L_T}{2 \cdot v_{max}} \cdot \frac{JDTV}{24} \quad 2-4$$

Die Anzahl der Fahrzeuge, die zwischen Entstehen der Verkehrsstörung und Wirksamwerden der Tunnelsperre in den Tunnel einfahren, hängt vom stündlichen Durchschnittsverkehr sowie der Sperrzeit (Dauer des Wirksamwerdens der Sperre)  $t_{sp}$  [s] ab:

---

<sup>1</sup> Es ist jeweils der JDTV der betroffenen Röhre heranzuziehen, d.h. der gesamte JDTV in GV-Tunneln und der halbe JDTV in RV-Tunneln

$$\bar{N}_{\text{fährt noch ein}} = \frac{t_{SP}}{3600} \cdot \frac{JDTV}{24} \quad 2-5$$

Die Sperrzeit von  $t_{SP} = 90 \text{ s}$  leitet sich dabei folgendermaßen ab:

Die Reaktionszeit des Systems auf Verkehrsstörungen wurde im Rahmen der Überarbeitung der Risikoanalysemethodik systematisch ausgewertet [3] und hat einen Medianwert von  $37 \text{ s}$  ergeben. Dies ist jedoch die reine Detektionszeit. Zur endgültigen Anhaltung kommt erst nach weiteren  $53 \text{ s}$  für die keine Variation durchgeführt wird. Die  $53 \text{ s}$  setzen sich zusammen aus  $15 \text{ s}$  Reaktionszeit des Betriebspersonals,  $8 \text{ s}$  Systemreaktionszeit (Umschalten der Ampel) und  $30 \text{ s}$  bis das rote Lichtsignal auch respektiert wird.

Die Wahrscheinlichkeitsdichte der Detektionszeiten ist in Abbildung 2-4 angegeben. Polynomielle Regression ergibt folgenden funktionalen Zusammenhang:

$$\begin{aligned} \sigma(t) = & 1.17 \cdot 10^{-13} \cdot t^6 - 2.78 \cdot 10^{-10} \cdot t^5 + 2.68 \cdot 10^{-7} \cdot t^4 \\ & - 1.32 \cdot 10^{-13} \cdot t^3 + 3.53 \cdot 10^{-2} \cdot t^2 - 4.83 \cdot t \\ & + 2.74 \cdot 10^2 \end{aligned} \quad 2-6$$

Mit einem Residuum  $R^2 = 0.88$ . Dies ist in Anbetracht von beträchtlichen Rundungseffekten bei  $15 \text{ s}$ ,  $30 \text{ s}$  und dann weiter im Minutentakt stellt dies keine schlechte Repräsentation der Messdaten dar. Es ist anzumerken, dass die Messdaten Tunnel mit unterschiedlichen Ausstattungslevels inkludieren, woraus sich die wenigen langen Detektionszeiten ergeben. Eine genaue Trennung nach Detektionssystemen wäre wünschenswert, sollen die Effekte von unterschiedlichen Detektionssystemen explizit verglichen werden wäre dies notwendig.

In Abbildung 2-4 sind des weiteren 10 repräsentative Detektionszeiten mit den dazugehörigen Wahrscheinlichkeiten abgebildet. Die leichten Unterschiede in der Wahrscheinlichkeit der einzelnen Punkte ergeben sich dabei aus der numerischen Integration.

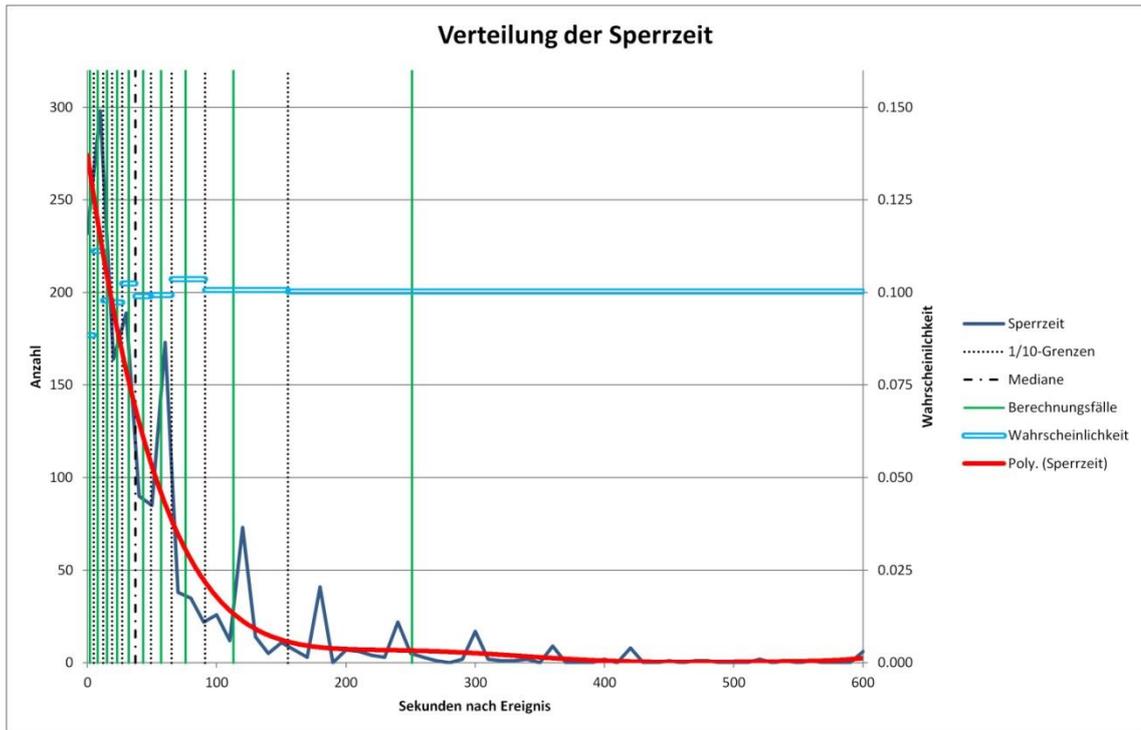


Abbildung 2-4: Verteilung der Detektionszeiten

### 2.5.2 Werte C3 bis C5 – Unfalltyp bei Primärurfällen

Auf Grundlage der 384 Unfälle mit Personenschaden, die in den Jahren 2006-2009 in Autobahn- und Schnellstraßentunneln registriert wurden (vgl. Abschnitt 2.4.3), wurde auch die Aufteilung der Primärurfälle in die einzelnen Unfalltypen überprüft.

Wie die Ergebnisse in Tabelle 2-2 zeigen, hat sich die beobachtete Aufteilung in die einzelnen Unfalltypen nur in geringem Maße gegenüber der ursprünglichen Fassung der RVS 09.03.11 verändert. Deshalb werden die ursprünglichen Werte auch in der aktuellen Fassung beibehalten. Zudem darf speziell im Fall der im Begegnungsverkehr in Richtungsverkehrstunneln keinesfalls mit einem Anteil von 0 % gerechnet werden; da es sich um ein seltenes Ereignis handelt – Geisterfahrt im RV-Tunnel mit Personenschaden zur Folge – ist es durchaus nicht untypisch, dass mehrere Jahre hintereinander kein derartiges Ereignis registriert wird.

Tabelle 2-2: Aufteilung der Unfälle mit Personenschaden auf die Unfalltypen (nur Tunnel im Verlauf von Bundesstraßen A und S)

Unfalltyp	GV-Tunnel		RV-Tunnel	
	Ursprüngl.	Aktuell	Ursprüngl.	Aktuell
0 (Alleinunfall)	17%	18,02%	40%	40,08%
1 (Unfall im Richtungsverkehr)	50%	51,35%	59%	59,92%
2 (Unfall im Begegnungsverkehr)	33%	30,63%	1%	0,00%

Die Aufteilung auf die einzelnen Unfalltypen in GV-Tunneln im Verlauf von Landesstraßen wurde nicht neuerlich überprüft. Hier behält die neue Fassung der RVS ebenfalls die bisherigen Werte bei.

## 2.6 Spalte D – Fahrzeugbeteiligung

*(Entspricht Spalte C der ursprünglichen Fassung)*

Die Basiswerte U wurden anhand aktueller Verkehrsdaten (vgl. Abschnitt 2.4.3) neu ermittelt.

Tabelle 2-3 enthält das Ergebnis für alle statistisch unterscheidbaren Fahrzeugtypen. Die Werte in Tabelle 2-4 beziehen sich dagegen ausschließlich auf die Beteiligung der drei Fahrzeugtypen PKW, LKW und Bus. Auch wenn im Beobachtungszeitraum keine Unfälle von Typ 2 mit Busbeteiligung eingetreten sind, ist die bedingte Wahrscheinlichkeit eines solchen Ereignisses keinesfalls 0 und wurde deshalb in Tabelle 2-4 als 0,1 % festgelegt. Die Wahrscheinlichkeit einer PKW- bzw. LKW-Beteiligung wurde korrigiert, um weiterhin eine Summe von 100 % zu erhalten.

Tabelle 2-3: Fahrzeugbeteiligung an den Unfalltypen, 2006-2009

<b>Fahrzeugtyp</b>	<b>Unfalltyp 0</b> Alleinunfall	<b>Unfalltyp 1</b> Unfall im Richtungs- verkehr	<b>Unfalltyp 2</b> Unfall im Begeg- nungsverkehr
PKW	77,6%	62,1%	54,4%
LKW	13,8%	34,7%	39,1%
Bus	2,6%	0,6%	0,0%
Motorrad	6,0%	1,9%	4,3%
Gefahrguttransport	0,0%	0,6%	2,2%
Insgesamt	100,0%	100,0%	100,0%

Tabelle 2-4: Fahrzeugbeteiligung an den Unfalltypen, nur PKW/LKW/Bus, 2006-2009

<b>Fahrzeugtyp</b>	<b>Unfalltyp 0</b> Alleinunfall	<b>Unfalltyp 1</b> Unfall im Richtungs- verkehr	<b>Unfalltyp 2</b> Unfall im Begeg- nungsverkehr
PKW	82,6%	63,7%	58,0%
LKW	14,7%	35,6%	41,9%
Bus	2,7%	0,7%	0,1%
Insgesamt	100,0%	100,0%	100,0%

## 2.7 Spalte E – Folgebrand

*(Entspricht Spalte D der ursprünglichen Fassung)*

Die Herleitung der Werte für Spalte E ist im separat erstellten Bericht zur Tunnelbrandstatistik 2006-2012 dokumentiert [4], wobei konkret auf die Abschnitte 4.3 (Brand nach Panne) 4.4 (Brand nach Unfall) und 8.1 (Zusammenfassung) im genannten Dokument verwiesen wird.

## 2.8 Spalte F – Gefahrgutbeteiligung

*(Entspricht Spalte E der ursprünglichen Fassung)*

Bei der Berechnung der Werte F1 bis F20 beruht neu auf einem Gefahrgutanteil von 3 % am Schwerverkehr, was den tatsächlichen Gegebenheiten besser entspricht als die ursprünglichen 5 %. Zudem stimmt dieser Wert mit der aktuellen Richtlinie für Gefahrgut-Tunnelrisikoanalysen RVS 09.03.12 überein [5].

## **2.9 Spalte G – Schadensszenario Personengefährdung bei Brand infolge Panne**

*(In der aktuellen Fassung neu hinzugekommen)*

Die Herleitung der Werte für Spalte G ist im separat erstellten Bericht zur Tunnelbrandstatistik 2006-2012 dokumentiert [4], wobei konkret auf die Abschnitte 5.2 (Herleitung) und 8.2 (Zusammenfassung) im genannten Dokument verwiesen wird.

## **2.10 Spalte H – Brandgröße**

*(In der aktuellen Fassung neu hinzugekommen)*

Die Herleitung der Werte für Spalte H ist im separat erstellten Bericht zur Tunnelbrandstatistik 2006-2012 dokumentiert [4], wobei konkret auf die Abschnitte 5.2.2 (Herleitung) und 8.3 (Zusammenfassung) im genannten Dokument verwiesen wird.

## **2.11 Spalte I – Schadensszenario**

*(Entspricht Spalte F der ursprünglichen Fassung)*

Neben den in der ursprünglichen Fassung enthaltenen Modellbränden mit einer Brandlast von 5 und 30 MW enthält die aktuelle Fassung neu auch ein Großbrandereignis mit einer Brandlast von 100 MW. Die Zeit bis zum Erreichen der maximalen Brandleistung wird dabei mit 7 min angegeben. Die Quellraten entsprechen proportional denen der kleineren Brände (vgl. Tabelle 37 der RVS 09.03.11).

Wie die kleineren Brände stellt der 100 MW-Modellbrand ein hypothetisches Brandszenario mit einer raschen Entwicklung dar und wurde auf Basis verschiedener Testergebnisse in einer Expertendiskussion festgelegt. Die Wahrscheinlichkeit der Entwicklung eines 100 MW-Brandes wird mit 10 % der Wahrscheinlichkeit eines LKW-Vollbrandes eingeschätzt.

Zudem unterscheidet die aktuelle Fassung bei LKW neu zwischen

- Brand der Fahrzeugkabine
- Vollbrand der Fahrzeugkabine

Brände der Fahrzeugkabine wurden im Rahmen der Expertendiskussion den Modellbränden 5 und 30 MW zugeordnet (im Verhältnis 75:25), Vollbrände den Modellbränden 30 und 100 MW (im Verhältnis 90:10). Die dabei zugrunde gelegten Betrachtungen sind im separat erstellten Bericht zur Tunnelbrandstatistik 2006-2012 [4] näher dokumentiert, wobei konkret auf die Abschnitte 5.2.2 (Herleitung) und 8.2 (Zusammenfassung) im genannten Dokument verwiesen wird.

### **3 NEUERUNGEN BEI DEN SCHADENSAUSMASSWERTEN BRAND FÜR DAS STANDARDMODELL**

#### **3.1 Richtungsverkehrstunnel**

Die Schadensausmaßwerte Brand in Richtungsverkehrstunneln wurden in der aktuellen Fassung der RVS 09.03.11 vollständig neu berechnet. Dabei diente die neue, in Kapitel 4 und 5 beschriebene Methodik zur Untersuchung einer Reihe von Modelltunneln, woraus sich die aktuellen Standardwerte ergeben.

#### **3.2 Gegenverkehrstunnel**

Gegenverkehrstunnel wurden im Zuge der Neuberechnung der Schadensausmaßwerte Brand mit dem neuen, vertieften Risikomodell nicht neu berechnet. Dies deshalb, weil bei Gegenverkehrstunneln eine größere Anzahl relevanter Einflussparameter zu berücksichtigen wären als bei Richtungsverkehrstunneln, was eine Standardisierung erschwert bzw. die Anwendbarkeit des Standardmodells stark einschränken würde. Es wird daher bei Gegenverkehrstunneln häufig eine detaillierte Untersuchung erforderlich sein.

Um dennoch Risikoabschätzungen mit dem Standardmodell vornehmen zu können, wurden für die Schadensausmaßwerte Brand für Gegenverkehrstunnel die Werte der ursprünglichen Fassung der RVS 09.03.11 übernommen.

## 4 METHODIK ZUR BERECHNUNG DER SCHADENSAUSMASSWERTE BRAND – DETAILLIERTE ANALYSE

### 4.1 Allgemein

Bei der Berechnung von *repräsentativen* Schadensausmaßen für Szenarien mit Brandentwicklung muss eine Vielzahl von Einflussfaktoren abgebildet und im Falle großer Auswirkungen auf das Gesamtsystem einer Variation unterworfen werden. Dies führt unvermeidlich zu einer großen Anzahl von Simulationsfällen.

In diesem Kapitel wird der Ansatz beschrieben, der für die Berechnung der Schadensausmaßwerte der Standardmethode gewählt wurde. Er besteht in der Grundstruktur auf einem Monte-Carlo-Ansatz mit der Variation bestimmter Einflussparameter.

Die Parameter für diese Simulationsszenarien werden auf Basis statistischer Auswertungen ermittelt. Die Simulationsszenarien stellen dann das Grundgitter des Gesamtmodells dar und auf Ihnen werden die Fluchtdistanzen schlussendlich ermittelt. Diese Simulationsszenarien stellen auch den numerisch aufwändigen Teil der Risikoanalyse dar, da hier eine Vielzahl von Szenarien in einer dreidimensionalen Strömungssimulation berechnet werden müssen.

Für die Levels der Personengefährdung und der Personenexposition ist dann in weiter Folge eine wesentlich höhere Auflösung der Variationsparameter möglich, da diese relativ geringen algorithmischen Aufwand bedeuten. Hierfür wurde ein Mappingansatz entworfen, der diese feineren Szenarien auf die Simulationsszenarien projizieren kann. Dadurch bleibt die Identität der Simulationsszenarien bestehen (inklusive ihrer Grundwahrscheinlichkeit und Gefährdungscharakteristik) und es werden die Wahrscheinlichkeiten in diesen Szenarien ‚gesammelt‘.

### 4.2 Grundstruktur der Berechnungsmethodik

Im Wesentlichen besteht das Risikoanalysemodell aus folgenden separierbaren Submodellen:

1. Verkehrsmodell zur Berechnung der repräsentativen Verkehrsfälle sowie der Fahrzeugkonfiguration in Abhängigkeit der Zeit
2. Lüftungsmodell zur Abbildung der erwartbaren Beeinflussung durch Lüftungskomponenten
3. Eindimensionales Strömungsmodell zur Berechnung der Längsströmungsentwicklung nach initialer Verkehrsstörung bzw. Brandentwicklung (1d Euler Solver, kompressibel, implizit, instationär)

4. Dreidimensionales Strömungsmodell zur Berechnung der Rauchausbreitung im Umfeld des Brandes (z.B. FDS – „Fire Dynamic Simulator“)
5. Evakuierungsmodell basierend auf der Akkumulation von toxischen Gasen während des Fluchtvorgangs zur Berechnung der maximalen Fluchtdistanz (Purser-Modell)
6. Mappingansatz zur Projektion eines feineren Netzes für Überlebens- und Expositionsmodell auf das gröbere Netz des Strömungsmodells
7. Folgebrandmodell zur Berechnung der erwartbaren Brandwahrscheinlichkeit für Sekundär und Tertiärereignis
8. Überlebensmodell zur Berechnung der statistisch erwartbaren Mortalitätsrate
9. Expositionsmodell zur Berechnung der statistisch erwartbaren Personendichte
10. Überlagerung der statistischen Mortalitätsrate mit der statistisch erwartbaren Personendichte

In den folgenden Punkten werden die oben genannten Modelle im Detail diskutiert und der für das vorliegende Risikoanalysemodell gewählte Ansatz präsentiert.

### **4.3 Notwendige Variationen auf Basislevel**

#### **4.3.1 Allgemeine Überlegungen**

Auf Basislevel muss mit Variationen vorsichtig umgegangen werden, da jeder zusätzliche Fall zu einem nicht zu vernachlässigenden numerischen Aufwand führt. Die Anzahl der Variationsparameter und die Anzahl der Fälle für jeden Parameter muss daher so klein wie möglich gehalten werden um den algorithmischen Aufwand (dreidimensionale Rauchausbreitungssimulation) in Grenzen zu halten, jedoch so groß wie nötig sein, um eine hinreichend gute Abbildung des Gesamtsystems zu ermöglichen.

#### **4.3.2 Auf Basislevel variierte Parameter**

In den folgenden Punkten werden die auf Basislevel variierten Parameter und die verwendete Fallzahl, sowie Parameter, auf deren Variation auf diesem Level verzichtet wurde, besprochen.

##### **1. Röhre bei Richtungsverkehrstunneln**

Bei Richtungsverkehrstunneln sind beide Röhren mit der jeweiligen Längsneigung, Querschnitt, Lüftungstechnischen Besonderheiten und Verkehr getrennt zu berechnen. Lediglich im Falle von horizontalen Tunneln mit annähernd gleichem Verkehr kann auf eine getrennte Berechnung verzichtet werden

## 2. Brandgröße

Die Brandgrößen 5MW, 30MW und 100MW stellen die Grundlage der Szenarienvariation dar.

## 3. Verkehrsstärke

Die Verkehrsstärke ist der das Tunnelsystem in der Anfangsphase am stärksten beeinflussende Parameter und muss daher in jedem Fall auf Basislevel einer Variation unterzogen werden.

Im Rahmen der Berechnung der ‚Schadensausmaße Brand‘ wurden 3 Fälle für ‚geringen Verkehr‘, ‚durchschnittlichen Verkehr‘ und ‚hohen Verkehr‘ berechnet. Diese Variationsgenauigkeit kann in den meisten Fällen als ausreichend angesehen werden.

## 4. Verkehrsaufteilung

Neben der Gesamtverkehrsstärke ist die Aufteilung der Fahrzeuge auf die zwei Richtungsfahrbahnen bei Gegenverkehrstunneln ein wesentlicher die Längsströmung beeinflussender Parameter.

Wie bei der Verkehrsstärke wurden hier drei Szenarien pro Verkehrsszenario gewählt um ‚Überhang in negative Fahrtrichtung‘, ‚annähernd symmetrischen Verkehr‘ und ‚Überhang in positive Fahrtrichtung‘ abzubilden. Auch diese Genauigkeit wird für die meisten Fälle als ausreichend betrachtet.

## 5. Unfallort

Der Unfallort hat neben den örtlichen Gegebenheiten wie Querschnitt und Längsneigung auch noch über das spezifische Freifahrverhalten nach einer Verkehrsstörung einen Einfluss auf die Entwicklung der Längsströmung und muss daher auch in Tunneln mit gleichbleibenden Parametern einer Variation unterworfen werden.

Die Anzahl der zu simulierenden Unfallorte hängt stark vom betrachteten Objekt ab und kann nicht allgemein angegeben werden. Für Tunnel ohne große Änderungen in den relevanten Parametern wie Querschnitt und Längsneigung kann eine Anzahl von 3 Unfallorten als ausreichend gesehen werden. Im Falle von punktuellen Effekten wie Querschnittswechsel, Punktabsaugungen, etc. kann diese Zahl jedoch auf bis zu 10 steigen. Hierbei wird auf die Diskussion von ‚Punktuellen volumsaustauschenden Komponenten‘ in Kapitel 5.4.4.4 Punkt 2 verwiesen. Selbe Überlegungen gelten auch für Querschnittswechsel und ähnliche punktuelle Einflüsse.

## 6. Entzündungszeitpunkt

Während bei einer Entzündung als Folge des die initiale Verkehrsstörung verursachenden Unfalls die Längsströmung in Richtungsverkehrstunneln relativ hoch

ist, kann sie bei einer Entzündung als Folge eines Auffahrunfalls am Ende des sich bildenden Staus schon weit abgeklungen sein, so dass sich für diesen Fall andere Selbstrettungsbedingungen ergeben. Bei Gegenverkehrstunneln kann es in dieser Zeit sowohl zu einem Abklingen der Strömung wie beim Richtungsverkehrstunnel, als auch zu einem vollkommen anderen Verhalten (Beschleunigung oder Strömungsumkehr) kommen.

Aus diesem Grund und der Tatsache, dass beim Richtungsverkehrstunnel ein großer Anteil des gesamten Risikos aus Brandwirkung aus Folgeszenarien kommt, müssen bei Richtungsverkehrstunneln zumindest drei Zeitpunkte betrachtet werden.

Bei Gegenverkehrstunneln macht der Anteil des Risikos aus Brandwirkung aus Folgeszenarien nur einen Bruchteil des Ganzen aus und kann hier eventuell sogar entfallen. Empfohlen wird jedoch eine Variation mit zwei Zeitpunkten.

Je nach Art der Untersuchung können und sollen auch Parameter variiert werden, die auf der obigen Liste nicht angeführt sind bzw. explizit auf der Liste im nächsten Punkt aufgelistet werden. Dies kann zum Beispiel Wind oder eine Variation der Entwicklung der Brandlast für unterschiedliche Szenarienannahmen sein.

#### 4.3.3 Auf Basislevel nicht variierte Parameter

Um die Gesamtanzahl der Simulationsszenarien so gering wie möglich zu halten, wurden die folgenden Parameter explizit nicht variiert:

##### 1. Brandentwicklung

Für alle Brände wurde unabhängig von der Art der Entzündung (Panne oder Unfall), unabhängig von der Strömungsgeschwindigkeit im Tunnel und unabhängig von Besonderheiten (z.B. Ladung) des brennenden Kfz eine konstante Brandentwicklung gewählt. Diese soll den Durchschnitt der möglichen Brandverläufe gemäß Tabelle 37 der RVS 09.03.11 darstellen.

Eine Variation auf Basis der Entstehungsart und der vorherrschenden Bedingungen (Strömung, Querschnitt, etc.) ist jedoch möglich und wünschenswert, bedarf jedoch weiteren Arbeiten zum besseren Verständnis der Brandentwicklung und deren Abhängigkeiten.

##### 2. Detektionszeit

Die Detektionszeit (Sperrzeit) sowohl für Brandereignisse als auch für Verkehrsstörungen wurde auf Basislevel nicht variiert. Dabei wurde für die Sperrung des Tunnels nach einer Verkehrsstörung (Unfall oder Panne) eine Zeitspanne von 90s als Medianwert aus Abschnitt 2.5.1.3 (37s + 53s) herangezogen. Eine Variation findet erst auf Mappinglevel statt.

Andere Aspekte der Detektionszeit sind der Zeitpunkt der Aktivierung der Lüftungsanlage und der Aufforderung zur Evakuierung des Tunnels. Diese beiden Aspekte hängen von der Zeitspanne der Branddetektion ab. Ersterer Aspekt kann dabei lediglich auf Basislevel variiert werden, worauf hier aufgrund der oben angeführten Überlegungen verzichtet wurde. Letzterer kann auf dem Mappinglevel variiert werden, wobei die entsprechenden Fälle in der Evakuierungssimulation berücksichtigt werden müssen. Im Rahmen der Untersuchung wurde auf Variation verzichtet, da erstens ein ‚richtlinienkonformer Tunnel‘ bewertet wurde, der exakt diese Detektionszeit aufweist, und zweitens keine verlässlichen Verteilungsfunktionen hinsichtlich der Branddetektion verschiedener Systeme vorliegen. Sollte eine Untersuchung explizit die Wirkung unterschiedlicher Detektionssysteme zum Inhalt haben, so ist jedoch eine Variation des Zeitpunkts der Aktivierung der Lüftungsanlage unerlässlich.

### 3. Meteorologische Einflüsse

Meteorologische Einflüsse wurden im Rahmen der Berechnung der repräsentativen Schadensausmaße explizit nicht variiert, da der statistisch erwartbare Mittelwert über teilweise nicht existierende theoretische Tunnel zu berechnen war.

Auch für spezifische Tunnel stellen die äußeren Einflüsse in der Regel eine mehr oder weniger neutrale Komponente dar, da im Falle einer annähernd symmetrischen Verteilung die Wirkung einmal beschleunigend und einmal bremsend wirkt. Ein Punkt im Histogramm des Verkehrsaufkommens wird dann beim Richtungsverkehrstunnel in zwei Punkte aufgeteilt (nach links und rechts verschoben). Das Ausmaß der Verschiebung hängt von der Stärke des Windes in Relation zum Kolbeneffekt der Kfz ab. Sollten in diesem Intervall keine zu starken Änderungen (Gradienten) auftreten, so kann auf Variation verzichtet werden. Hierbei ist insbesondere das linke Ende der Verteilung zu betrachten, da hier die Minimalgeschwindigkeit ( $1 \text{ m/s}$ ) unterschritten werden kann (Aktivierung der Betriebslüftung oder Strömungsumkehr möglich). Beim Gegenverkehrstunnel stellt sich die Situation komplexer dar und kann nicht im Allgemeinen behandelt werden.

Sollten besondere meteorologische Aspekte auftreten (starke Protaldruckdifferenzen, hohe Windgeschwindigkeiten, etc.) so muss dies in der Analyse abgebildet werden. Hierbei ist insbesondere auf eine saisonale Koppelung zwischen Verkehrsstärke und Windgeschwindigkeit (bei Talwindssystemen wird in Zeiten der ‚Rückreise‘ – also am Nachmittag – es zu einem tendenziell taleinwärts gerichteten Talwind kommen). Mit Saisonal ist dabei nicht nur unbedingt die Jahreszeit sondern auch die Tageszeit gemeint.

Die Verfügbarkeit entsprechender repräsentativer Messdaten ist unabdingbare Voraussetzung für die Berücksichtigung meteorologischer Effekte im Risikomodell.

## 4.4 Notwendige Variationen auf Mappinglevel

### 4.4.1 Allgemeine Überlegungen

Auf Mappinglevel kann ein Vielfaches der Simulationsszenarien auf Basislevel betrachtet werden, da hier die einzelnen Fälle einen vernachlässigbaren algorithmischen Aufwand erzeugen, sofern die Struktur effizient implementiert ist. Aus diesem Grund können einerseits Parameter, die bereits auf Basislevel variiert wurden, mit einer größeren Anzahl an Fällen betrachtet werden, andererseits zusätzliche Variationsparameter eingeführt werden.

### 4.4.2 Auf Mappinglevel variierte Parameter

In den folgenden Punkten werden die auf Mapping variierten Parameter und die verwendete Fallzahl, sowie Parameter, auf deren Variation auf diesem Level verzichtet wurde, besprochen.

#### 1. Röhre bei Richtungsverkehrstunneln

Da die Szenarien auf Mappinglevel auf die Szenarien des Basislevels projiziert werden ist für jedes Szenario der getrennten Röhren auch die entsprechende Betrachtung auf Mappinglevel vorzunehmen.

#### 2. Brandgröße

Auch diese Variation kopiert sich eins zu eins auf das Mappinglevel. Theoretisch könnte hier bei einer Abhängigkeit der tatsächlichen Brandgröße von den Strömungsbedingungen (Anwachsrate als Funktion der Längsströmung) auch auf die drei Brandgrößen projiziert werden. Dies ist jedoch von der Entwicklung eines besseren Verständnisses für Brandentwicklung abhängig.

#### 3. Verkehrsstärke

Auf Mappinglevel kann eine Vielzahl von Verkehrsfällen betrachtet werden. Dies stellt vor allem für die Ermittlung der statistisch erwartbaren Verteilung des Brandorts (und damit auch der relativen Position des Brandes zu den Notausgängen und zu eventuellen Sprüngen in der Fahrspuranzahl) und für die Exposition eine entscheidende Verbesserung dar. Auf Mappinglevel werden dabei 20 anstelle der 3 auf Basislevel betrachteten Verkehrsfälle betrachtet. Die Anzahl kann jedoch ohne Probleme auf 50 oder 100 erhöht werden.

#### 4. Verkehrsaufteilung

Wie bei der Verkehrsstärke kann auch die Symmetrie auf Mappinglevel genauer betrachtet werden wobei auch die Konsequenzen dieselben sind. Wie bei der

Verkehrsstärke werden auch hier in der Regel 20 Symmetriefälle je Verkehrsfall betrachtet. Auch hier kann die Anzahl beliebig erhöht werden.

#### 5. Unfallort

Für die Variation des Unfallorts gilt sinngemäß dasselbe wie für Verkehrsstärke und Symmetrie. In der Regel wird der Unfallort in 10m oder 20m im Tunnel verschoben und die Verkehrskonfiguration bestimmt. Für die genaue Berechnung der repräsentativen Notausgangsabstände für sekundär und Tertiärszenario ist dies ein entscheidender Parameter.

#### 6. Detektionszeit

Da auch die Detektionszeit einen entscheidenden Einfluss auf die Konfiguration von Kfz im Tunnel hat, sollte auch dieser Parameter auf Mappinglevel variiert werden. Die dazugehörige Dichtefunktion ist in Gleichung 2-6 angegeben. Die Anzahl der verwendeten Fälle beträgt die 10 in Abbildung 2-4 dargestellten Szenarien.

#### 4.4.3 Auf Mappinglevel nicht variierte Parameter

In diesem Rahmen wird nicht auf alle Parameter eingegangen, die auf Mappinglevel nicht variiert werden, da dies eine unendliche Liste werden könnte. Es soll jedoch explizit ein Parameter diskutiert werden, der auf Basislevel variiert wird und hier augenscheinlich fehlt:

##### 1. Zeitpunkt der Brandentwicklung

Im Gegensatz zum Basislevel, auf dem die Variation den Zeitpunkt der Brandentwicklung betroffen hat, wird diese hier nicht durchgeführt. Der Grund hierfür ist, dass zwar auf verschiedene Zeitpunkte auf das Basislevel projiziert werden, sich die Zeitpunkte nicht aus einer Variation, sondern aus der Lage im Stauabschnitt ergeben. Dies wird im Detail in Kapitel 5.6.3 besprochen.

Im Allgemeinen kann auf diesem Level eine Vielzahl von zusätzlichen Parametern einer Variation unterworfen werden, ohne den algorithmischen Aufwand ins Unbeherrschbare zu treiben. Sollte der Aufwand zu groß werden, so kann auch die Präzision bei anderen Parametern etwas gesenkt werden, um so eine global bessere Repräsentation des Gesamtsystems zu ermöglichen.

## 5 BESCHREIBUNG DER SUBMODELLE ZUM SCHADENSAUSMASS BRAND

### 5.1 Verkehrsmodell

#### 5.1.1 Motivation und Übersicht

Da die Verkehrssituation neben der Meteorologie den größten Einfluss auf die initiale Strömungsgeschwindigkeit hat, ist auf diesen Parameter große Aufmerksamkeit hinsichtlich Wahl der betrachteten Szenarien und der zeitlich genauen Abbildung im eindimensionalen Strömungsmodell gelegt worden.

Es werden einerseits Verkehrsszenarien und Symmetrieszenarien für die beiden Levels der Szenarienvariation definiert, andererseits für jeden Zeitpunkt  $t$  die entsprechende Verkehrskonfiguration berechnet. Hierfür ist eine direkte Interaktion mit dem Strömungsmodell jedoch nicht nötig. Die zeitliche Verkehrskonfiguration kann von extern definiert und übergeben werden, da sie nur von den Verkehrsparametern, der Konfiguration von Anhaltemöglichkeiten, dem Unfallort und dem Zeitpunkt der Sperre abhängt.

Ein direkter Zugriff auf die endgültige Verkehrskonfiguration ist jedoch für die Berechnung der statistischen Verkehrskonfiguration von Vorteil, da hier ansonsten eine große Anzahl an Szenarien übergeben werden müsste.

#### 5.1.2 Anforderungen an Verkehrsmodell

Für die oben genannten Anwendungen ergeben sich für das Verkehrsmodell folgende Anforderungen:

1. Möglichkeit der Verarbeitung von Messdaten einer Dauerzählstelle oder äquivalenter Eingangsdaten, die
  - a. Für jede Fahrtrichtung die Gesamtverkehrsstärke, den Schwerverkehrsanteil und den Busanteil ausweisen oder sich aus Ganglinien rekonstruieren lassen. Eine direkte Angabe der Geschwindigkeiten wäre von Vorteil.

Und für Gegenverkehrstunnel zusätzlich

- b. Die Messdaten für die beiden Fahrtrichtungen getrennt für den gleichen Zeitpunkt ausweisen, oder nach Fahrtrichtungen getrennt aufbereitete Ganglinien.

Im Allgemeinen sind dabei Messdaten von Dauerzählstellen der Rekonstruktion aus Ganglinien für Tag, Woche und Jahr vorzuziehen. Wichtig ist jedoch schlussendlich die Möglichkeit des Aufbaus einer Dichtefunktion für Verkehrsstärke und bei Gegenverkehrstunneln für Symmetrie.

Eine gesonderte Auswertung für den repräsentativen Schwerverkehrsanteil bzw. Busanteil für die einzelnen Szenarien wird empfohlen.

2. Möglichkeit der Berechnung der Verkehrskonfiguration für den Zeitpunkt  $t$  und Übergabe an die eindimensionale Strömungssimulation
3. Möglichkeit der Berechnung der endgültigen Verkehrskonfiguration und Übergabe an die dreidimensionale Rauchausbreitungssimulation und an das Expositionsmodell und Folgeunfallmodell.

Die oben genannten Anforderungen könne aber auch im Rahmen von getrennten Modulen in die einzelnen Modelle eingebaut werden.

### 5.1.3 Implementierung der Verkehrsanalyse

#### 5.1.3.1 Verkehrsvolumen (Richtungsverkehr und Gegenverkehr)

Auf Grundlage einer Verkehrscharakteristik (stündliche Messwerte eines Jahres) wird ein Histogramm mit den stündlichen Verkehrsvolumen erstellt. Der Gesamtverkehr wird dabei auf das jeweilige Prognosejahr normiert. Um repräsentative Verkehrsszenarios für die qualitative Risikoanalyse zu erhalten wird die Fläche unter dem Histogramm in eine Anzahl von Segmenten unterteilt. Zentral in jedem Segment liegt dann das dafür repräsentative Verkehrsszenario. Im Fall von einer Unterteilung in drei Segmente bilden diese Verkehrsszenarios „geringen Verkehr“, „durchschnittlichen Verkehr“ und „hohen Verkehr“ ab. Diese Verkehrsszenarios bilden die Grundlage für die numerische Rauchausbreitungssimulation, sowie die Evakuierungssimulation um die durchschnittliche Anzahl von Toten bei Ereignissen mit Bränden zu ermitteln.

Ein Histogramm mit drei gewählten Berechnungsfällen für einen Modelltunnel ist in Abbildung 5-1 dargestellt.

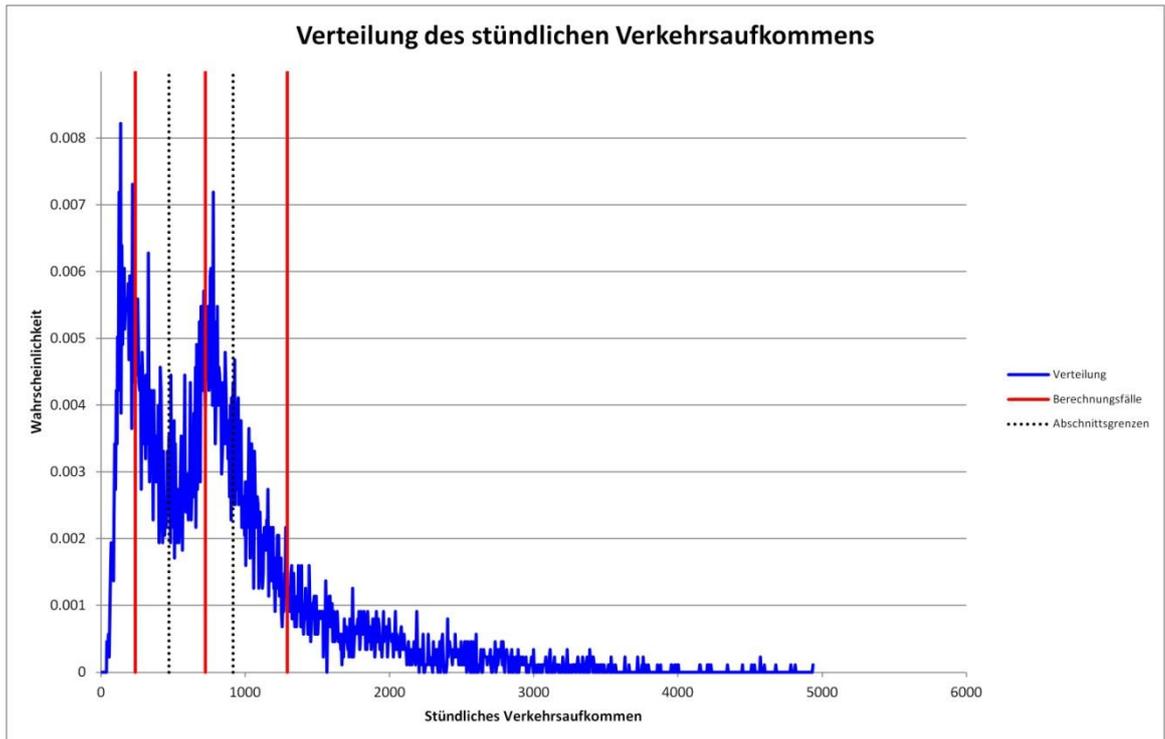


Abbildung 5-1: Histogramm des stündlichen Verkehrsvolumens

### 5.1.3.2 Verkehrsaufteilung (Gegenverkehr)

Da im Fall von Gegenverkehrstunnel die Verteilung des Verkehrs auf positive und negative Fahrtrichtung einen wesentlichen Einfluss auf die im Tunnelinneren herrschende Strömung hat, muss diese in der Risikoanalyse mit berücksichtigt werden. Hierfür wird in Analogie zum Vorgehen beim Gesamtverkehr ein Histogramm der Abweichung vom symmetrischen Fall in Abhängigkeit der stündlichen Verkehrsleistung erstellt. In weiterer Folge wird über das jeweilige Segment gemittelt, um für die im vorigen Punkt gewählten Verkehrsszenarien die durchschnittliche Abweichung vom symmetrischen Fall zu erhalten.

Für jedes dieser Verkehrsszenarien werden somit drei Berechnungsfälle für die Simulation generiert. Das erste Szenario ist der symmetrische Fall, der Verkehr in positiver und negativer Richtung entspricht genau der Hälfte des gesamten Verkehrs. Die beiden anderen Szenarien stellen  $50\% \cdot (1 - Av_{Asymm})$  (entspricht einem geringen Verkehrsaufkommen) in eine Richtung und  $50\% \cdot (1 + Av_{Asymm})$  (entspricht einem hohen Verkehrsaufkommen) in die andere Richtung und umgekehrt für die Berücksichtigung der durchschnittlichen Asymmetrie.

Das bedeutet, dass im Fall einer Risikobewertung für den Gegenverkehrsbetrieb 9 verschiedenen Verkehrsszenarien simuliert werden. Die Asymmetrie des Verkehrsaufkommens für die 3 untersuchten Verkehrsszenarios ist in Abbildung 5-2 dargestellt.

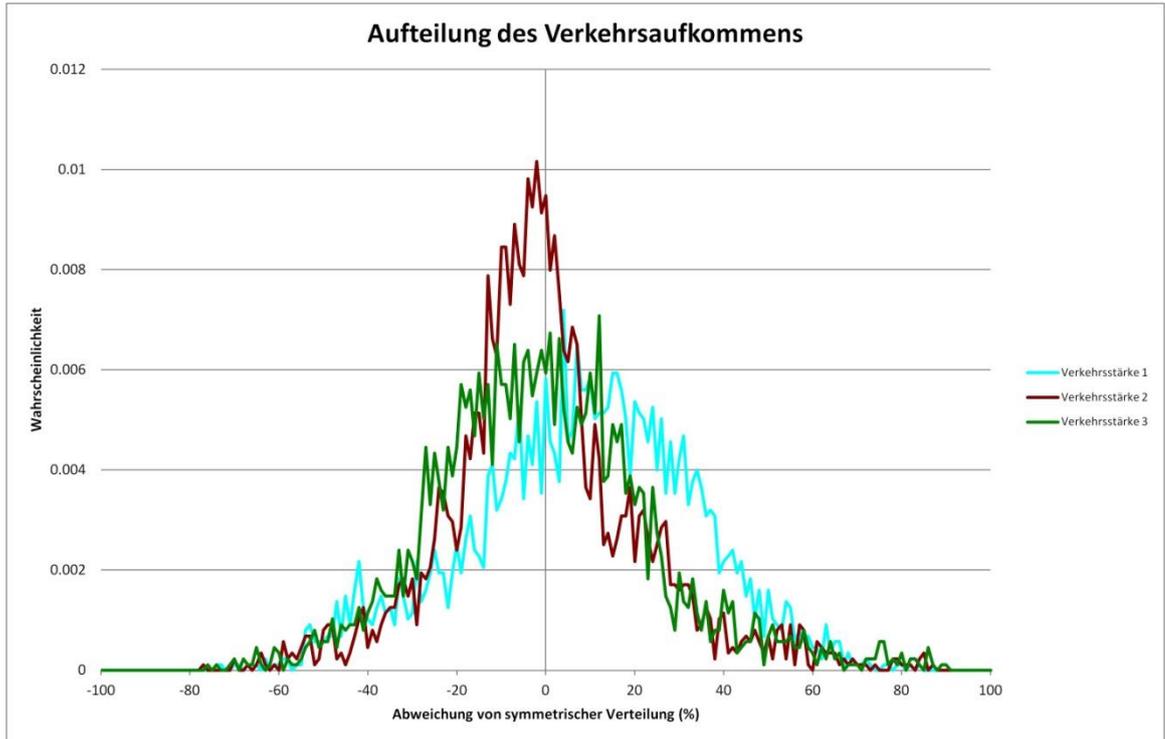


Abbildung 5-2: Asymmetrie des Verkehrsaufkommens der drei Verkehrsszenarios

Die Lage der repräsentativen Symmetriefälle für den mittleren Verkehrsfal ist in Abbildung 5-3 dargestellt.

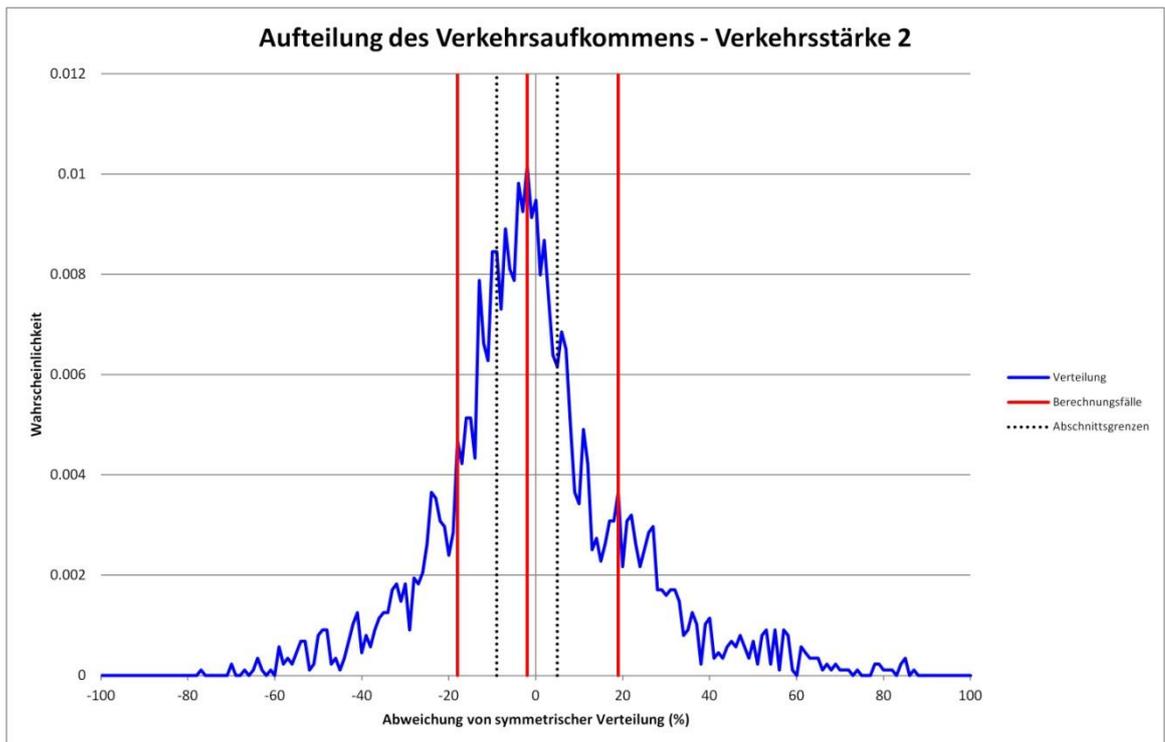


Abbildung 5-3: Asymmetrie des Verkehrsaufkommens und Symmetriefälle

### 5.1.3.3 Eintrittswahrscheinlichkeit

Da keine detaillierten Statistiken über den Einfluss des Verkehrsaufkommens (stündliches Verkehrsvolumen) auf die Brandwahrscheinlichkeit vorliegen wurde die Eintrittswahrscheinlichkeit von Bränden als proportional zum Verkehrsvolumen angesetzt.

Da die Selektion der Verkehrsszenarien auf der Verteilung der Verkehrsstärke beruht, nicht jedoch auf der Verteilung der Wahrscheinlichkeit, resultiert daraus ein Bereich mit relativ hoher Wahrscheinlichkeit, der von nur einem Szenario abgedeckt wird. Das sich aber bei hoher Verkehrsstärke (auch ohne Geschwindigkeitsrückgang am Sättigungspunkt) die Bedingungen weniger stark ändern als bei niedrigen Verkehrsstärken (Initiale Längsströmung wächst mit Wurzel des Verkehrsvolumens) ist diese Wahl berechtigt.

Die resultierende Wahrscheinlichkeitsdichte von Tunnelbränden ist in Abbildung 5-4 dargestellt.

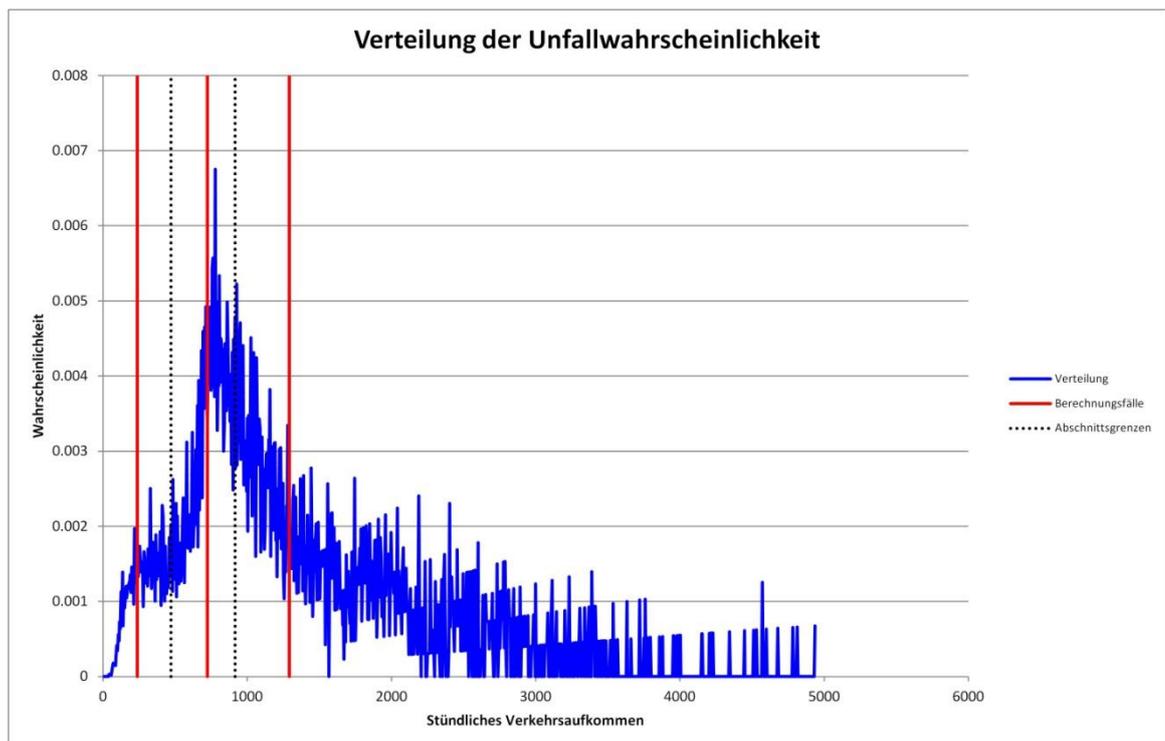


Abbildung 5-4: Verteilung der Unfallwahrscheinlichkeit

### 5.1.3.4 Schwerververkehrsanteil

Zusätzlich wird für die drei Berechnungsfälle der repräsentative LKW- und Bus-Anteil berücksichtigt (sowohl Richtungsverkehr als auch Gegenverkehr) um bei der Berechnung der Initialgeschwindigkeit und deren Entwicklung berücksichtigt zu werden (Unterschiedliche  $C_w A_w$  Koeffizienten). Das Histogramm für den LKW-Anteil ist in Abbildung 5-5 dargestellt. Dies stellt jedoch keine neue Parametervariation im Sinne der Erweiterung um

neue Simulationsszenarien dar, sondern bedeutet eine erhöhte Genauigkeit der Modelanwendung in den bereits definierten Szenarien.

Durch die Berücksichtigung des mittleren LKW-Anteils für die einzelnen Verkehrsszenarien wird der Tatsache Rechnung getragen, dass der Anteil von Schwerverkehr am gesamten Verkehrsaufkommen in Abhängigkeit der Verkehrsstärke variiert. Die Auswirkungen sind eine größere Anzahl von LKW in der Rauchausbreitungssimulation einerseits (höhere Kolbenwirkung in 1D, mehr Turbulenzen in 3D) und eine geringere Personendichte (doppelte Länge, geringerer Besetzungsgrad) in der Evakuierungssimulation andererseits.

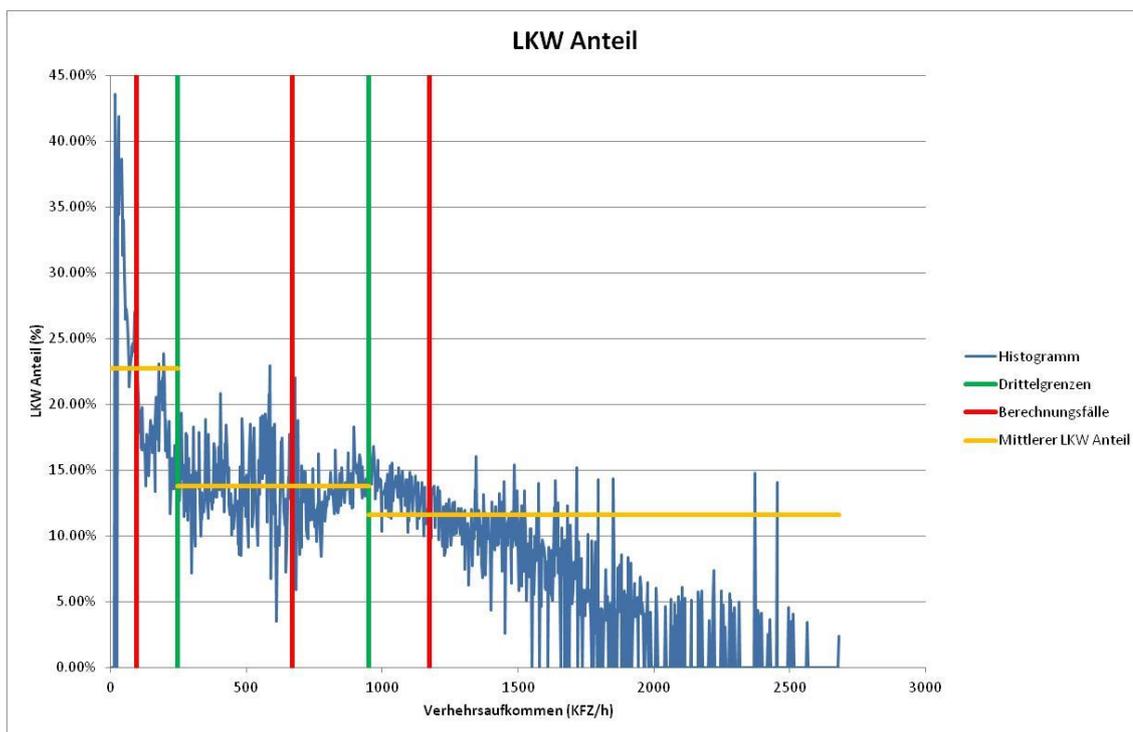


Abbildung 5-5: LKW-Anteil (schematische Darstellung)

### 5.1.3.5 Berechnung der repräsentativen Verkehrsszenarien (Standardwerte)

Für die Berechnung der repräsentativen Schadensausmaßwerte für die standardisierte Methodik wurde die in den vorigen Punkten beschriebene Auswertung für die Gesamtheit des österreichischen Autobahn- und Schnellstraßennetz durchgeführt. Dabei wurden die stündlichen Messdaten aller Dauerzählstellen für das Jahr 2011 [6] gewichtet nach Abschnittslänge in das Histogramm eingebracht.

Durch Überlagerung verschiedener Verkehrsstärken auf unterschiedlichen Abschnitten geht die Charakteristische Form der Dichtefunktion des Verkehrsaufkommens verloren.

Die entsprechenden Verteilungen und durchschnittlichen Verkehrszusammensetzungen sind in Abbildung 5-6 bis Abbildung 5-10 dargestellt.

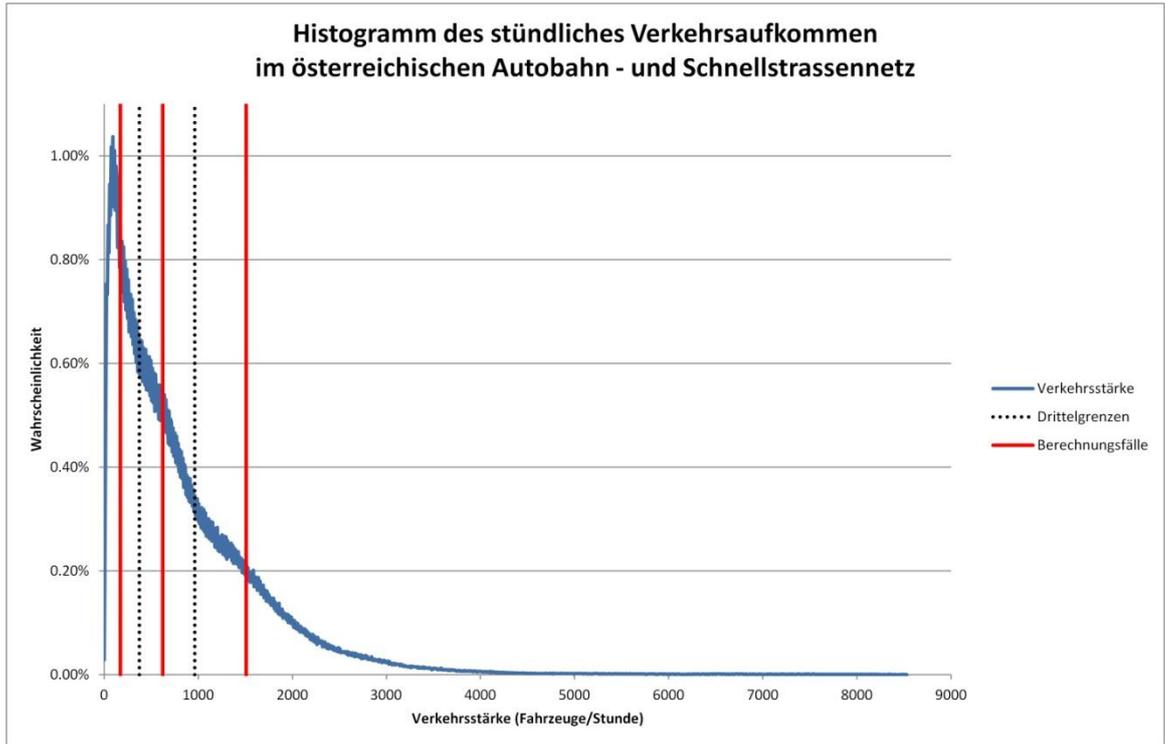


Abbildung 5-6: Histogramm des stündlichen Verkehrsvolumens – Österreich

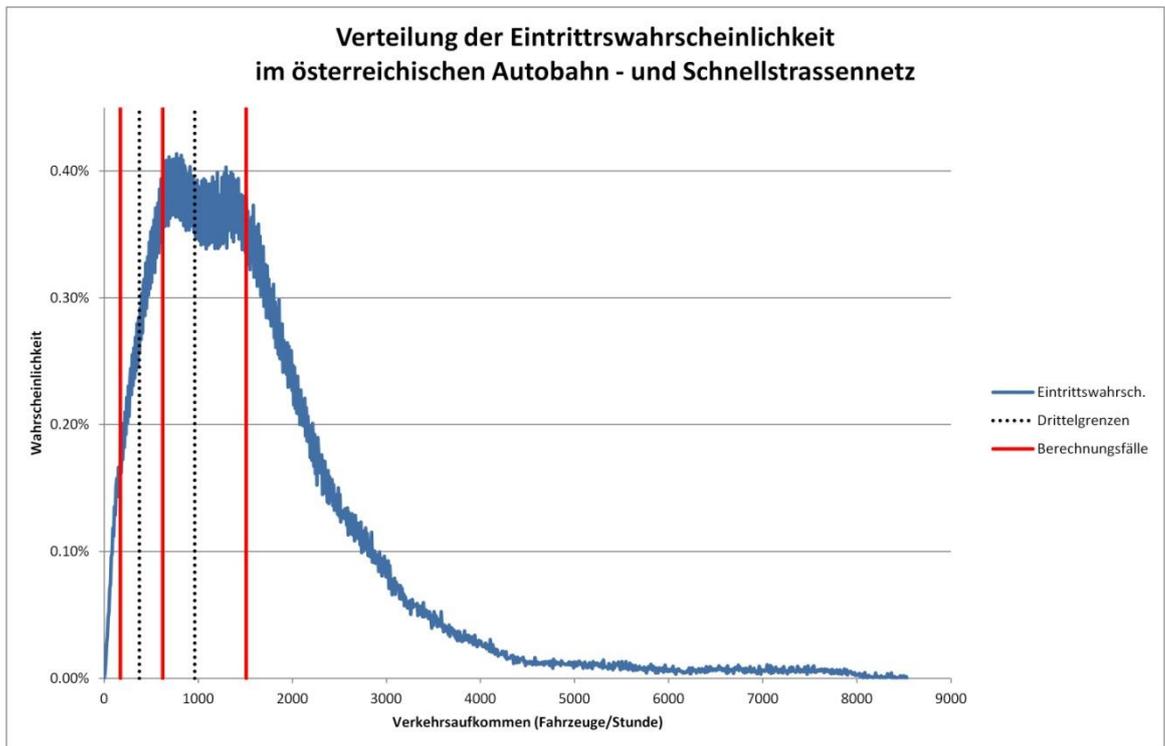


Abbildung 5-7: Verteilung der Unfallwahrscheinlichkeit – Österreich

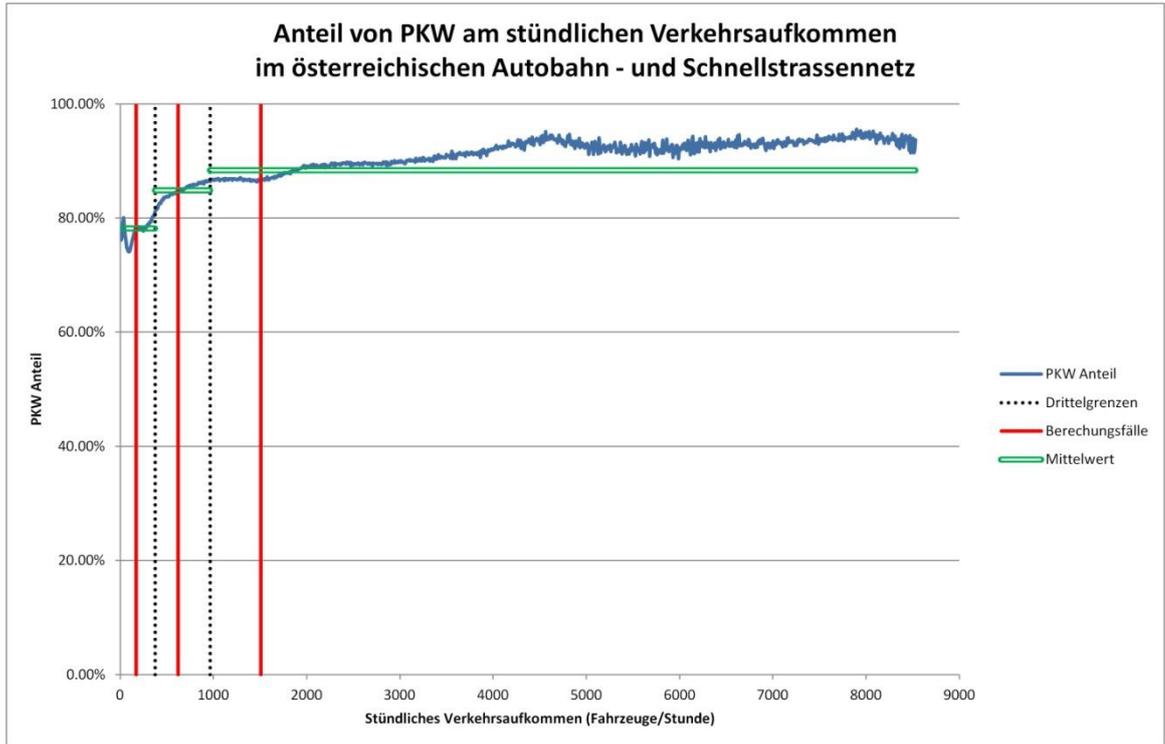


Abbildung 5-8: PKW-Anteil nach Verkehrsaufkommen – Österreich

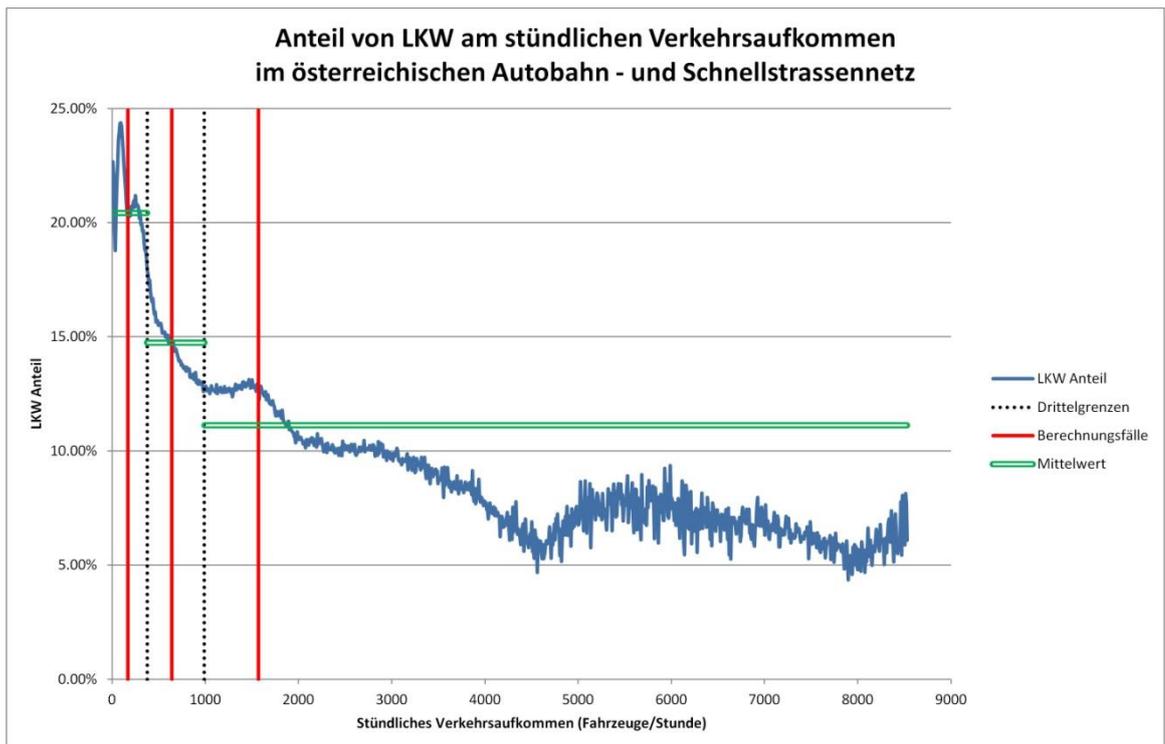


Abbildung 5-9: LKW-Anteil nach Verkehrsaufkommen – Österreich

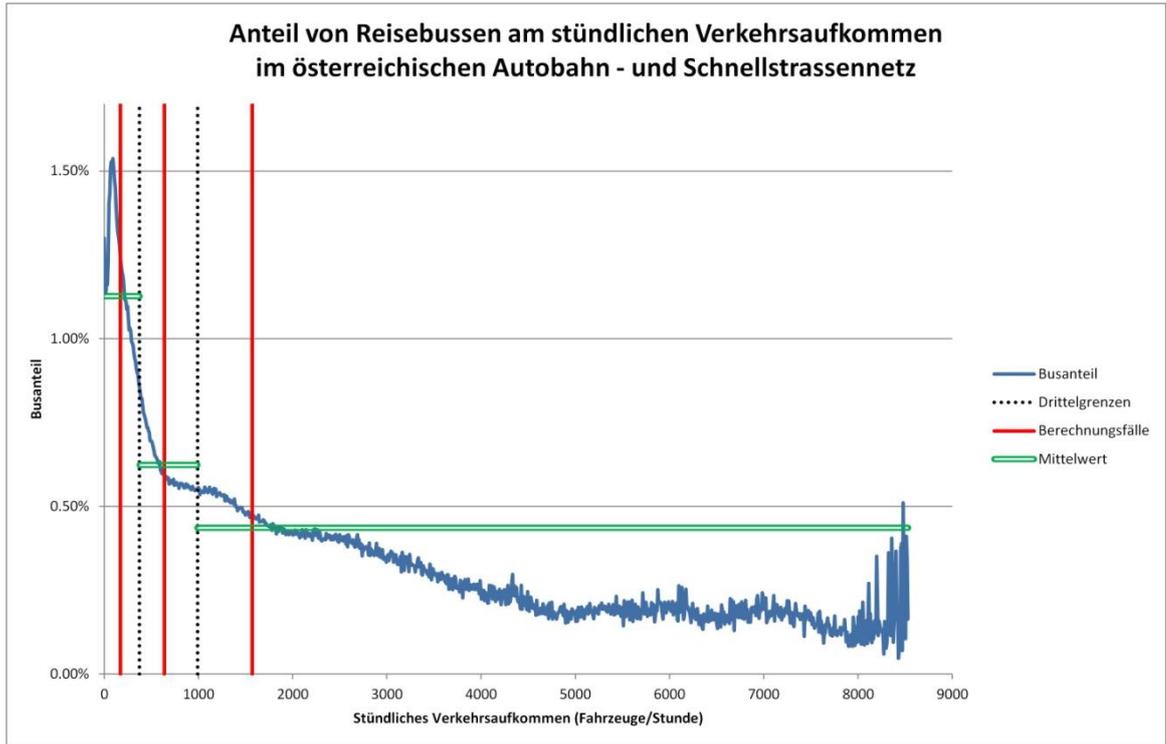


Abbildung 5-10: Bus-Anteil nach Verkehrsaufkommen – Österreich

### 5.1.3.6 Berechnung der Fahrzeugkonfiguration in Abhängigkeit der Zeit

Für die Berechnung der Längsströmung nach der initialen Verkehrsstörung ist es nötig, zu jedem Zeitpunkt  $t$  die genaue Konfiguration von Kfz im Tunnel  $\rho_{Kfz}(x, t)$  zu kennen. Dies beinhaltet sowohl Bereiche, in denen der Verkehr noch nicht zum Stillstand gekommen ist, als auch Bereiche, in denen sich bereits Stau aufgebaut hat.

Die Angenommene Fahrzeugdichte im Stau beträgt dabei  $150 \text{ Kfz} - E/km$  [2].

## 5.2 Lüftungsmodell

### 5.2.1 Motivation und Übersicht

Das Lüftungsmodell liefert Eingangsparameter für das eindimensionale Strömungsmodell wie auch für das dreidimensionale Rauchausbreitungsmodell. In ihm werden die Lüftungskomponenten gesteuert und die Quellterme für die eindimensionale Simulation zellenweise extrahiert (Massenstrom, Impuls und Energie) sowie die Rampenfunktionen für die Rauchausbreitungssimulation (Komponentenweise) gespeichert.

Es ist wichtig anzumerken, dass jegliche Steuerung der Längsströmung *besser* als in Realität funktionieren muss, um Oszillationen der Längsströmung so gut wie möglich zu vermeiden (Oszillationen führen zu einer Verschiebung der Rauchfront nach vorne/hinten, wodurch veränderte Evakuierungsbedingungen entstehen. Es kann nicht zwangsläufig von einer ‚Rausmittelung‘ ausgegangen werden, obwohl die Intoxikation integral berechnet wird.).

### 5.2.2 Anforderungen an Lüftungsmodell

Zur korrekten Abbildung der lüftungstechnischen Komponenten muss das Lüftungsmodell in der Lage sein, folgende Aspekte korrekt abbilden zu können:

1. Es müssen während der eindimensionalen Strömungssimulation Daten mit dem Lüftungsmodell ausgetauscht werden können. Diese können Daten des Strömungsmodells sein (Geschwindigkeit, Dichte, etc.) oder Daten des Lüftungsmodells (Schub, Massenstrom, etc.)
2. Die einzelnen Komponenten müssen realitätsnah abgebildet werden können. Dies betrifft insbesondere Querlüftungskomponenten, die ein langsames Ansprechverhalten aufweisen.
3. Die Lüftungssteuerung inklusive dem Lüftungskonzept müssen realitätsnah abgebildet werden können. Dies inkludiert systemtechnische Aspekte wie z.B. ein zeitversetztes Aktivieren von Strahlventilatoren aus Gründen der Stromversorgung.

In den folgenden Punkten wird die Implementierung der oben angeführten Punkte im Detail besprochen. Es muss aber darauf hingewiesen werden, dass es bezüglich Lüftungssteuerung schwierig ist, ein allgemein gültiges Konzept zu entwickeln und die Annahmen von Projekt zu Projekt überprüft werden müssen. Erschwert wird dies durch die Tatsache, dass zum Zeitpunkt der Durchführung einer Risikoanalyse meist noch kein fertiges Lüftungskonzept vorliegt, aus dem die Steuerung entnommen werden kann (Planung meist in Detailprojekt). Aus diesem Grund sind *fundierte Kenntnisse* lüftungs- bzw. strö-

mungstechnischer Prinzipien und deren Auswirkungen auf instationäre Systeme für die Durchführung einer Risikoanalyse unerlässlich.

### 5.2.3 Implementierung der Einflussfaktoren

#### 5.2.3.1 Messung der Längsströmung

Die Längsströmung in realen Tunneln wird in der Regel als gleitender Mittelwert über ein Zeitintervall von 15s gemessen. Dies hat zwar primär messtechnische Gründe (Turbulente Strömung im Fahrraum), die in der eindimensionalen Simulation keine Rolle spielen, doch führt es auch zu einer verzögerten Reaktion im Falle von sich schnell entwickelnden Systemen. Daher muss dieser Effekt in der Simulation und im Lüftungsmodell abgebildet werden können.

Die Messung der Längsströmung erfolgt auf der zuströmenden Seite in einem Abstand von 50m oder im Falle von Absaugklappen auf der zuströmenden Seite in Abstimmung mit dem realen Lüftungskonzept. Im Falle von Querschnittänderungen erfolgt die Messung näher am Brandort (im betroffenen Querschnitt).

#### 5.2.3.2 Schaltreihenfolge von Strahlventilatoren

##### 5.2.3.2.1 Strahlventilatoren ohne Frequenzumformer

Es müssen die Strahlventilatoren in einer der Realität entsprechenden Reihenfolge geschaltet werden können. Dies bedeutet zum Beispiel für Betrieb im Unterdruckmodus (Saugbetrieb) Schulpriorität auf Strahlventilatoren am Ausfahrtsportal, erst dann am Eingangsportal und niemals im Bereich der Rauchscht, die als Ausschlussbereich angegeben werden können muss.

Weiters ist zu beachten, dass Strahlventilatoren im Allgemeinen nicht gleichzeitig in Betrieb genommen werden, um das Mittelspannungsnetz nicht zu überlasten. Aus diesem Grund wurden im Rahmen dieser Analyse die Strahlventilatoren mit 10s Zeitversatz aktiviert. Ausgeschaltet können Strahlventilatoren jederzeit werden.

##### 5.2.3.2.2 Strahlventilatoren mit Frequenzumformer

Strahlventilatoren mit Frequenzumformer können gleichzeitig aktiviert werden, wodurch die Notwendigkeit eines zeitversetzten Einschaltens entfällt. Die Einschränkungen hinsichtlich Unterdruckbetrieb und Ausschlussbereichen bleiben jedoch auch hier bestehen.

Bei einer Veränderung des Schubs werden alle Strahlventilatoren, die in Betrieb genommen werden können gleichmäßig angesteuert. Jeder Strahlventilator bewegt sich auf seiner eigenen Anfahrtskurve auf und ab, jedoch parallel.

### 5.2.3.3 Anfahrverhalten der Lüftungskomponenten

Sowohl Strahlventilatoren als auch Querlüftungskomponenten müssen in ihrem Verhalten richtig abgebildet werden können. Dies kann mit dem Aktivierungszeitpunkt  $t_A$  in funktionaler Weise mit  $\dot{m} = f(t - t_A)$  oder numerisch in Form einer vorgegebenen Kennlinie  $\dot{m} = \dot{m}(t - t_A)$  erfolgen. Selbes gilt für den Schub  $F$  der Strahlventilatoren.

### 5.2.3.4 Schaltimpulse

Wie bereits erwähnt muss in Rahmen der Risikoanalyse eine Oszillation um die Zielgeschwindigkeit so weit wie möglich unterbunden werden, um nicht zu weit vom statistischen ‚Mittelwert‘ (entsprechend dem perfekten Regeln auf die Zielgeschwindigkeit) abzuweichen.

Aus diesem Grund wurden neben den normalerweise für die Steuerung von nicht frequenzgesteuerten Strahlventilatoren herangezogenen Geschwindigkeiten auch die Ableitungen und die Krümmungen der Geschwindigkeitsentwicklung für die Bestimmung von Schaltimpulsen herangezogen (stabileres System).

## 5.2.4 Funktionen und Parameterwerte für Einflussfaktoren

### 5.2.4.1 Dichtekorrektur für Strahlventilatoren

Für die Strahlventilatoren ist der Schub normalerweise auf eine Referenzhöhe (= Referenzdichte  $\rho_0$ ) angegeben. Aufgrund von einer Abweichung in der Höhenlage des Tunnels oder einer durch den Brand erhöhten Umgebungstemperatur kann jedoch je lokale Dichte von dieser abweichen, was sich auf den erzeugten Schub in Form von

$$\hat{F} = \frac{\rho}{\rho_0} \cdot F \quad 5-1$$

Auswirkt.

### 5.2.4.2 Geschwindigkeitskorrektur für Strahlventilatoren

Der angegebene Schub bezieht sich auf eine ruhende Umgebungsluft. Im bewegten Strömungsfeld reduziert sich der Schub mit der Ausblasgeschwindigkeit  $u_{FAN}$  und der Strömungsgeschwindigkeit im Tunnel  $u$  auf

$$\hat{F} = \left(1 - \frac{u}{u_{FAN}}\right) \quad 5-2$$

### 5.2.4.3 Einbauwiderstand von Strahlventilatoren

Der angegeben Schub von Strahlventilatoren bezieht sich auf das Freifeld und muss in der Simulation mit dem für die Einbausituation gültigen Einbauwiderstand reduziert werden.

Die Einbauwiderstände  $\eta$  für gängige Einbauvarianten sind in Tabelle 5-1 zusammengefasst.

Tabelle 5-1: Einbauwiderstände von Strahlventilatoren [7]

Deckeneinbau	Deckeneinbau mit Abstand	Eckeinbau	Eckeinbau mit Abstand	Nischeneinbau	Nischeneinbau mit Abstand
$\eta = 0.85$	$\eta = 0.95$	$\eta = 0.75$	$\eta = 0.85$	$\eta = 0.65$	$\eta = 0.80$
					



### 5.3.2 Anforderungen an 1d Modell

Um die nach der initialen Verkehrsstörung auftretenden Effekte korrekt abbilden zu können, muss das verwendete eindimensionale Strömungsmodell **instationäre** Berechnungen durchführen können. Volle Kompressibilität ist nicht zwangsläufig gefordert, sofern nicht Resonanzen eines schlecht abgestimmten Systems explizit bewertet werden sollen. In der Regel reicht eine inkompressible Formulierung aus, um die auftretenden Fragestellungen mit hinreichender Genauigkeit zu beantworten (Anm.: die für dreidimensionale Simulationen benutzte Software FDS berechnet inkompressibel).

In der folgenden Auflistung sind die Anforderungen an das eindimensionale Strömungsmodell zur Verwendung im Rahmen der Risikoanalyse angeführt:

#### 1. *Instationäres Verfahren*

Zur genauen Berechnung der Entwicklung der Längsgeschwindigkeit nach der initialen Verkehrsstörung muss ein instationäres Verfahren verwendet werden

#### 2. *Verkehrseffekte müssen zeitlich und örtlich korrekt abgebildet werden können*

Um die Entwicklung der Längsströmung am Brandort zu bestimmen ist neben der Anzahl der fahrenden und stehenden Fahrzeuge auch die genaue Lage mit einzubeziehen.

#### 3. *Lüftungseffekte müssen zeitlich und örtlich korrekt abgebildet werden können*

Der Schub und Volumenaustausch muss nicht nur zeitlich sondern auch örtlich korrekt abgebildet werden.

#### 4. *Wärmequellen bzw. Senken müssen abgebildet werden können*

Zur Darstellung der eingetragenen Verbrennungsenthalpie sowie des konvektiven Wärmeverlusts an der Tunnelwand müssen Energieflüsse zeitlich und örtlich definiert werden können.

Um alle diese Anforderungen zu erfüllen wurde auf ein eindimensionales ‚Finite-Volumen-Verfahren‘ zurückgegriffen, bei denen die Summe über sämtliche Flüsse über die Grenzen des Kontrollvolumens die Veränderung des Zustands im Kontrollvolumen darstellt.

Die zu lösenden Gleichungen stellen in diesem Fall die 3 Eulergleichungen für Massenerhaltung, Impulserhaltung und Energieerhaltung für ein reines Advektionsproblem dar:

$$\int_{\tau} \frac{\partial \rho}{\partial t} d\tau + \oint_A (\rho \vec{u}) \cdot \vec{n} dA = \dot{m} \quad 5-3$$
$$\int_{\tau} \frac{\partial \rho \vec{u}}{\partial t} d\tau + \oint_A (\rho \vec{u} \vec{u} + \vec{\sigma}) \cdot \vec{n} dA = \int_{\tau} \vec{F}_{vol} d\tau$$

$$\int_{\tau} \frac{\partial \rho E}{\partial t} d\tau + \oint_A (\rho E \vec{u} + \vec{\sigma} \vec{u} + \vec{q}) \cdot \vec{n} dA = \int_{\tau} (\vec{F}_{vol} \cdot \vec{u}) d\tau$$

In den folgenden Punkten wird die Implementierung mittels Finitem Volumenverfahren kurz besprochen und die notwendigen Gleichungen und Standardwerte für Berechnungsparameter angegeben.

### 5.3.3 Finites Volumenverfahren zur instationären Strömungsberechnung

#### 5.3.3.1 Idee und Grundprinzip des Finite-Volumen-Verfahrens

Beim Finite-Volumen-Verfahren ist die Grundidee die Zerteilung des Kontinuums in diskrete Teilvolumina und Berechnung der Flüsse über deren Rand. Die Änderung der jeweiligen Zustandsgröße im diskreten Teilvolumen plus die Summe der Flüsse über den Rand entspricht den wirkenden Volumskräften und Quelltermen. Aus dieser gerade beschriebenen Integralform für den Zeitschritt  $\Delta t = \tau$

$$\int_{\tau} \frac{\partial U}{\partial t} d\tau + \oint_A \vec{H} \cdot \vec{n} dA = \int_{\tau} (\vec{F}_{vol} + Q) d\tau \quad 5-4$$

Lässt sich mittels des Satzes von Gauß'schen Integralsatzes die Differentialform

$$\frac{\partial \vec{U}}{\partial t} + \nabla \cdot \vec{H} = \frac{\vec{F} + Q}{V} \quad 5-5$$

Ableiten.

Für die Eulergleichungen werden die Zustandsgrößen  $U$  zu

$$\vec{U} = \begin{bmatrix} U_1 \\ U_2 \\ U_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \rho \\ \rho u \\ \rho E \end{bmatrix} \quad 5-6$$

Die Flüsse  $H$  mit  $p(\vec{U}) = (\kappa - 1) \cdot \left( U_3 - \frac{1}{2} \frac{U_2^2}{U_1} \right)$  (für kompressibel) zu

$$\begin{aligned} \vec{H} = \begin{bmatrix} H_1 \\ H_2 \\ H_3 \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} \rho u \\ \rho u^2 + p \\ u \cdot (\rho E + p) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} U_2 \\ \frac{U_2^2}{U_1} + p(\vec{U}) \\ \frac{U_2}{U_1} \cdot (U_3 + p(\vec{U})) \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} U_2 \\ \frac{U_2^2}{U_1} + (\kappa - 1) \cdot \left( U_3 - \frac{1}{2} \frac{U_2^2}{U_1} \right) \\ \frac{U_2}{U_1} \cdot \left( U_3 + (\kappa - 1) \cdot \left( U_3 - \frac{1}{2} \frac{U_2^2}{U_1} \right) \right) \end{bmatrix} \end{aligned} \quad 5-7$$

Und der Kraft – und Quellterm  $(\vec{F} + Q)$  zu

$$\begin{aligned}
 (\vec{F} + \dot{Q}) = \begin{bmatrix} F_1 + \dot{Q}_1 \\ F_2 + \dot{Q}_2 \\ F_3 + \dot{Q}_3 \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} \dot{m} \\ \vec{F}_{Vol} + \vec{F}_{Vent} + \vec{F}_{Grav} \\ (\vec{F}_{Drag} + \vec{F}_{Vent} + \vec{F}_{Grav}) \cdot u + \dot{Q}_{Brand} \end{bmatrix} \\
 &= \begin{bmatrix} 0 \\ \vec{F}_{Vol} + \vec{F}_{Vent} + \vec{F}_{Grav} \\ (\vec{F}_{Vol} + \vec{F}_{Vent} + \vec{F}_{Grav}) \cdot \frac{U_2}{U_1} + \dot{Q}_{Brand} \end{bmatrix}
 \end{aligned}
 \tag{5-8}$$

$\vec{F}_{Vol}$  bezeichnet dabei die aus dem System resultierenden Volumskräfte wie z.B. Reibungseinflüsse und Gravitation pro Volumselement,  $\dot{Q}$  bezeichnet die externen Kraft, Impuls, und Energiequellterme. Für inkompressible Simulationen entfällt die Kopplung über den Druck (entsprechend dem Spannungstensor  $\bar{\sigma}$  der Eulergleichungen). Anwendung auf eindimensionales Tunnelmodell

Zur Modellbildung wird zuerst der Tunnel als eindimensionales Modell gesehen (der Tunnel Querschnittswchsel aufweisen, so ist dies in den Flussfunktionen zu berücksichtigen). Dieses eindimensionale Objekt der Länge  $L$  wird dann in  $n$  Elemente zerlegt. Im Allgemeinen müssen diese Elemente *nicht* die gleiche Länge aufweisen (z.B. könnten in Bereichen mit konstanten Eigenschaften größere Elementlängen gewählt werden), doch erweist sich programmiertechnisch als eher impraktikabel und setzt gewisse Vorkenntnisse des Ergebnisses voraus (in diesen Bereichen darf kein hoher Temperaturgradient vorkommen). Aus diesem Grund (und aufgrund des geringen algorithmischen Aufwands der eindimensionalen Berechnung) wurden äquidistante  $1\text{ m}$  Schritte gewählt.

In Abbildung 5-12 ist der Schritt der Diskretisierung dargestellt. Römische Zahlen bezeichnen Elemente, europäische Zahlen die Knoten. Es ist zu beachten, dass die numerischen Flüsse an den Knoten definiert sind, die Zustände jedoch in den Elementen definiert und gespeichert sind. Somit müssen die Flussfunktionen aus den angrenzenden Elementen berechnet werden. Hierfür wurde ein zentrales Differenzenschema erster Ordnung angewendet.

Tunnel



Eindimensionales Modell mit Diskretisierung

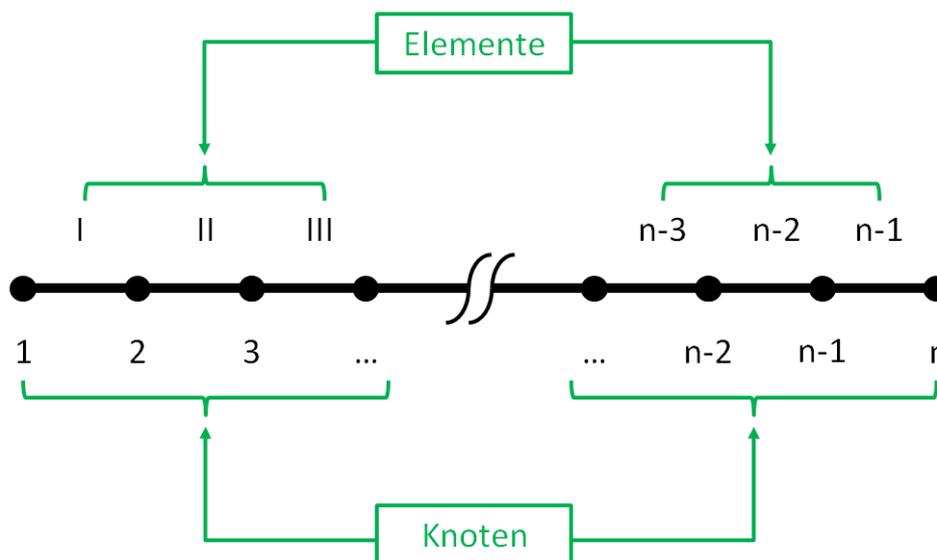


Abbildung 5-12: Eindimensionales Modell und Diskretisierung

### 5.3.3.3 Aufbau und Lösung des Differentialgleichungssystems

Für diskrete Zeitschritte erhält man aus Gleichung 5-5 für die Zustandsgröße  $U$  des Elements  $i$  bei diskreten Zeitschritten  $\Delta t$  und einer Elementlänge  $\Delta x$

$$\frac{\Delta U_i}{\Delta t} + \frac{F_{vol} + Q}{\Delta t} + \frac{\tilde{H}_{i+1/2} - \tilde{H}_{i-1/2}}{\Delta x} = 0 \quad 5-9$$

Wobei  $\tilde{H}_{i+1/2}$  und  $\tilde{H}_{i-1/2}$  die Numerischen Flüsse an den Zellgrenzen bezeichnen. Diese sind für ein zentrales Schema erster Ordnung

$$\tilde{H}_{i+1/2} = \frac{1}{2} \cdot [H(U_i) + H(U_{i+1})] \quad 5-10$$

$$\tilde{H}_{i-1/2} = \frac{1}{2} \cdot [H(U_{i-1}) + H(U_i)]$$

Das daraus entstehende Differentialgleichungssystem kann auf implizite oder explizite Weise gelöst werden. Der Vorteil einer expliziten Berechnung ist die Möglichkeit von festgelegten Zeitschritten die auch wesentlich länger sein können, was den algorithmischen Aufwand reduziert. Der Nachteil ist ein wesentlich komplexerer Lösungsansatz der einen Teil des Vorteils wieder aufwiegt.



Lässt sich dieses implizite Schema folgendermaßen darstellen

$$\frac{U_i^{t+\Delta t} - U_i^t}{\Delta t} + Res(U^{t+\Delta t}) = 0 \quad 5-16$$

Taylorentwicklung des Residuums und der Definition  $\Delta U^t = U_i^{t+\Delta t} - U_i^t$  ergibt nach wenigen Schritten

$$\frac{\Delta U_i^t}{\Delta t} + \frac{\partial Res(U^t)}{\partial U} \cdot \Delta U^t = -Res(U) \quad 5-17$$

Einsetzen der numerischen Flüsse aus Gleichung 5-10 ergibt für die Funktionalmatrizen  $\frac{\partial Res(U^t)}{\partial U} \cdot \Delta U^t$  die Abhängigkeit einer Zustandsvariable von jener ihrer Nachbarelemente

$$\begin{aligned} \frac{\partial Res(U^t)}{\partial U} \cdot \Delta U^t &= \frac{1}{\Delta x} \cdot \left[ \frac{\partial \tilde{H}_{i+1/2}}{\partial U} \Delta U_{i+1/2}^t - \frac{\partial \tilde{H}_{i-1/2}}{\partial U} \Delta U_{i-1/2}^t \right] + \frac{1}{\Delta t} \cdot \frac{\partial (F_{vol}^{t+\Delta t} + Q)}{\partial U} \\ &= \frac{1}{2 \cdot \Delta x} \cdot \left[ \left( \frac{\partial H(U_i)}{\partial U_i} \Delta U_i^t + \frac{\partial H(U_{i+1})}{\partial U_{i+1}} \Delta U_{i+1}^t \right) - \left( \frac{\partial H(U_{i-1})}{\partial U_{i-1}} \Delta U_{i-1}^t + \frac{\partial H(U_i)}{\partial U_i} \Delta U_i^t \right) \right] \\ &\quad + \frac{1}{\Delta t} \cdot \frac{\partial (F_{vol}^{t+\Delta t} + Q)}{\partial U_i} \Delta U_i^t \\ &= \frac{1}{2 \cdot \Delta x} \cdot \left[ \frac{\partial H(U_{i+1})}{\partial U_{i+1}} \Delta U_{i+1}^t - \frac{\partial H(U_{i-1})}{\partial U_{i-1}} \Delta U_{i-1}^t \right] + \frac{1}{\Delta t} \cdot \frac{\partial (F_{vol}^{t+\Delta t} + Q)}{\partial U_i} \Delta U_i^t \end{aligned} \quad 5-18$$

Es ist klar ersichtlich, dass die  $\frac{\partial H(U_{i+1})}{\partial U_{i+1}}$  mit  $\Delta U_{i+1}^t$  die Änderung des Zustands durch den Einfluss des  $(i+1)$ ten Elements auf den Zustand beschreiben, dasselbe gilt für  $\frac{\partial H(U_{i-1})}{\partial U_{i-1}} \Delta U_{i-1}^t$  hinsichtlich des  $(i-1)$ ten Elements.  $\frac{\partial (F_{vol}^{t+\Delta t} + Q)}{\partial U_i} \Delta U_i^t$  hängt nur von den eigenen Zuständen des Elements ab.

Es ergibt sich das in Gleichung 5-12 für den expliziten Lösungsansatz beschriebene Gleichungssystem in Block – Tribandstruktur für jedes Element

$$\bar{A}_i \cdot \Delta U_{i-1}^t + \bar{B}_i \cdot \Delta U_i^t + \bar{C}_i \cdot \Delta U_{i+1}^t = -Res(U) \quad 5-19$$

Dämpfungsterme erster und zweiter Ordnung führen in weiterer Folge zu einer Matrix in Block-Pentabandstruktur. Diese lässt sich mithilfe des Gauß'schen Eliminationsverfahren in einem Algorithmus erster Ordnung lösen.

An den Systemrändern werden die Flüsse aus den Randbedingungen (atmosphärische Bedingungen, Wind, etc.) anstatt aus Werten des Nachbarelements berechnet.

#### 5.3.3.4 Implementierung der Einflussfaktoren

Die Funktionalmatrizen  $\frac{\partial H(U_i)}{\partial U_i}$  werden auf Basis der im Schritt  $t$  erhaltenen Zustandsgrößen ermittelt.

$\bar{A}_i$  und  $\bar{C}_i$  hängen ausschließlich von den Zustandsgrößen des Systems und der örtlichen Schrittweite ab.

$\bar{B}_i$  beinhalten den Zeitschritt sowie die im Element wirkenden Kräfte:

1. Impuls und Energieeintrag durch bewegte Kfz (Kolbeneffekt)

Impuls wird durch aerodynamischen Strömungswiderstand des Kfz ins System eingebracht, Impuls wird von Motor des Kfz gegenüber Masse generiert

Energie wird durch aerodynamischen Strömungswiderstand des Kfz ins System eingebracht, Energie wird von Motor des Kfz aus Treibstoff umgewandelt

2. Impulsverlust durch stehende Kfz (Strömungswiderstand)

Impuls wird durch aerodynamischen Strömungswiderstand des Kfz in Wärme (Energie umgewandelt)

Gesamtenergie des Systems bleibt erhalten

3. Impulsverlust durch Rohrreibung (Reibungsverluste an Tunnelwänden)

Impuls wird durch Rohrreibung im Tunnel in Wärme (Energie umgewandelt)

Gesamtenergie des Systems bleibt erhalten

4. Impuls und Energieverlust an Portalen (Portalstoß)

Impuls geht dem Gesamtsystem durch Ausströmen am Portal verloren, Nachströmen ist widerstandsbehaftet

Energie geht dem Gesamtsystem durch Ausströmen am Portal verloren, Nachströmen ist widerstandsbehaftet

5. Kraft in Längsrichtung durch Brandrauchauftrieb

Impulseintrag oder Impulsverlust ins Gesamtsystem durch Gravitation und Dichtegradient in Abhängigkeit der Längsneigung

„Energieeintrag“ oder „Energieverlust“ im Gesamtsystem durch Gravitation und Dichtegradient in Abhängigkeit der Längsneigung

6. Energieverlust an Tunnelwänden (konvektiver Wärmeübergang)

„Energieverlust“ des Gesamtsystems an „Systemrändern“ (in ‚, da in 1d ja eigentlich keine Systemränder) entsprechend thermischen Randbedingungen in 2d

7. Impuls und Energieeintrag bzw. Volumsaustausch durch Lüftung

Impulseintrag oder Impulsverlust durch Strahlventilatoren bzw. Impulslüftung, rein volumsaustauschende Systeme zur Längsströmungsbeeinflussung (Querlüftungssysteme mit mehreren Abschnitten bringen keinen Impulsaustausch – die Beeinflussung der Strömung erfolgt auf *indirekte Weise!*)

Energieeintrag ins Gesamtsystem durch Motorleistung der Lüftungskomponenten  
Volumsaustausch bei allen Querlüftungssystemen bzw. Impulslüftung

#### 8. Impuls und Energieeintrag durch Wind und Portaldruckdifferenzen

Impulseintrag oder Impulsverlust ins Gesamtsystem durch am Portal wirkende Kräfte

„Energieeintrag“ oder „Energieverlust“ ins Gesamtsystem durch am Portal wirkende Kräfte

#### 9. Energieeintrag durch Brand

Energie wird durch Brand ins Gesamtsystem eingebracht (Freisetzung der Verbrennungsenthalpie von Treibstoff durch Brand). Dabei ist die in der RVS Tunnellüftung [8] festgelegte Effizienz (Wirkungsgrad konvektiv) zu beachten.

Alle angeführten Quellterme sind in die Funktionalmatrizen der jeweiligen Zelle als Ableitungen und im Residuenvektor direkt zu Berücksichtigen. Die Ableitungen können dabei numerisch (algorithmisch aufwändiger) oder analytisch (mathematisch komplexer) erfolgen.

### 5.3.4 Funktionen und Parameterwerte für Einflussfaktoren

#### 5.3.4.1 Kolbeneffekt fahrender Fahrzeuge

Der Kolbeneffekt bildet den von bewegten Fahrzeugen in den Fahrraum eingebrachten Impuls ab. Er ist abhängig von der lokalen Luftdichte  $\rho$ , der Anzahl der Kfz  $N$ , der Versperrung  $\frac{C_W A_W}{A}$  und der Relativgeschwindigkeit  $(u - v)$  zur Längsströmung im Tunnel.

Der Kolbeneffekt wird definiert durch:

$$\Delta p = \frac{\rho}{2} \cdot N \cdot \frac{C_W A_W}{A} (u - v) \cdot |u - v| \quad 5-20$$

Mit den Parameterwerten  $C_W A_W$  [9]:

$$C_W A_W (Pkw) = 0.9$$

$$C_W A_W (Lkw) = 5.2$$

#### 5.3.4.2 Strömungswiderstand stehender Fahrzeuge

Der Strömungswiderstand stehender Fahrzeuge berechnet sich in Analogie zum Kolbeneffekt durch nullsetzen der Eigengeschwindigkeit zu:

$$\Delta p = \frac{\rho}{2} \cdot N \cdot \frac{C_W A_W}{A} \cdot u^2 \quad 5-21$$

#### 5.3.4.3 Reibungsverluste an Tunnelwänden und Einbauten

Der aus der Rohrreibung resultierende Druckverlust im Tunnel ist neben bereits definierten Parametern abhängig von der Länge des Tunnels (Tunnelabschnitts/Zelle)  $L$ ; des hydraulischen Durchmessers  $D_H$  und des Reibungsbeiwerts  $\lambda$ .

Sie wird definiert durch:

$$\Delta p = \frac{\rho}{2} \cdot \lambda \cdot \frac{L}{D_H} \cdot u^2 \quad 5-22$$

Mit den Parameterwerten  $\lambda$  [9]:

$$\begin{aligned} \lambda(\text{Tunnel}) &= 0.015 \\ \lambda(\text{Einbauten}) &= 0.002 \end{aligned}$$

#### 5.3.4.4 Portalstoß (Druckverlust an Portalen)

Der Portalstoß beschreibt den an den Portalen entstehenden Druckverlust. Am ausströmenden Portal geht der gesamte Impuls durch ausströmen verloren, am einströmenden Portal durch Reibungsverluste beim nachströmen.

Gesamt ist der Portalstoß definiert durch:

$$\Delta p = \frac{\rho}{2} \cdot (\zeta_A + \zeta_E) \cdot u^2 \quad 5-23$$

Mit den Parameterwerten  $\zeta$  [10]:

$$\begin{aligned} \zeta_A &= 1 \text{ am ausströmenden Portal} \\ \zeta_E &= 0.6 \text{ am einströmenden Portal} \end{aligned}$$

#### 5.3.4.5 Brandrauchauftrieb

Abhängig von der Lokalen Längsneigung  $i$  ergibt sich aus einer Temperaturdifferenz zur Referenzdichte  $\rho_0$  bzw. Referenztemperatur  $T_0$  (bezogen auf die jeweilige Höhenlage) eine Auftriebskraft bzw. ein Druckverlust.

Dieser berechnet sich nach:

$$\Delta p = g \cdot i \cdot \frac{\rho}{\rho_0} = g \cdot i \cdot \frac{T_0}{T} \quad 5-24$$

#### 5.3.4.6 Konvektiver Wärmeübergang an Tunnelwänden

Die Temperatur  $T(x, t)$  an einem Punkt  $x$  im Tunnel zum Zeitpunkt  $t$  hängt von der ‚Vorgeschichte‘ des Volumselements ab und kann nur mittels instationärer Verfahren ermittelt werden. Der Wärmeaustausch erfolgt dabei (abgesehen vom Brand) über konvektiven Wärmeübergang an den Tunnelwänden. Dies ist eigentlich nur aus den Ergebnissen der dreidimensionalen Simulationen zu entnehmen (starke Abhängigkeit von der Ausbildung einer Schichtung), doch wurden im Rahmen eines Forschungsprojekts an der TU Graz [11] [8] äquivalente Wärmeübergangskoeffizienten für und Rechteckquerschnitt zu

$$a_F = 2.8 \cdot (u - 2.0) + 6.6, \quad u \in [2; 3] \quad 5-25$$

und für Gewölbequerschnitt zu

$$a_F = 1.15 \cdot (u - 2.0) + 8.4, \quad u \in [2; 3] \quad 5-26$$

ermittelt. Diese werden auch in der RVS Tunnellüftung [8] verwendet.

#### 5.3.4.7 Lüftungseffekte

Effekte der Tunnellüftung sind im eindimensionalen Strömungsmodell abzubilden. Dies können Impulseinträge über Strahlventilatoren und Impulslüftung sowie Volumsquellen bzw. Senken über Querlüftungskomponenten.

Die Details des Lüftungsmodells werden in Kapitel 5.2 behandelt.

#### 5.3.4.8 Wind

Sollte der Wind in der Risikoanalyse explizit berücksichtigt werden (z.B. aufgrund von besonderen Charakteristiken wie Föhn), so definiert sich der Einfluss von Wind in Form eines Portaldrucks mit:

$$\Delta p = \frac{\rho}{2} \cdot v_{Wind}^2 \quad 5-27$$

Beziehungsweise über eine Portaldruckdifferenz  $\Delta p$ .

Für die Berechnung der Standardwerte wurden Windeffekte aufgrund der allgemeinen Fragestellung nicht berücksichtigt.

#### 5.3.4.9 Energieeintrag durch Brand

Die durch den Brand eingebrachte Verbrennungsenthalpie muss als zeitlich veränderliche Energiequelle am Ereignisort  $\dot{Q}(x, t)$  berücksichtigt werden.

### 5.4 Dreidimensionales Strömungsmodell

#### 5.4.1 Motivation und Übersicht

Bei der Flucht von Personen spielt die vertikale Verteilung der Schadstoffe und der Sichttrübung eine entscheidende Rolle. Gute Schichtung bedeutet geringere Sichteinschränkung in Bodennähe und somit eine höhere Fortbewegungsgeschwindigkeit was wiederum eine kürzere Verweildauer bei gleichzeitig geringerer Toxizität nach sich zieht.

Aus diesem Grund müssen die für die Simulation der Personenevakuierung benötigten Ergebnisse mittels einer dreidimensionalen Rauchausbreitungssimulation berechnet werden.

In dieser werden sämtliche Parameter abgebildet, die bei einem realen Brand die Rauchausbreitung bzw. Rauchsichtung beeinflussen. Diese sind beispielsweise die Tunnelgeometrie (Querschnitt, Längsneigung, etc.), die Verkehrskonfiguration (Bereiche mit Kfz Belegung) oder Lüftungparameter (Strahlventilatoren, Absaugpunkte, etc.).

Hierbei ist besonders auf eine statistisch korrekte Anordnung zu achten, sofern der jeweilige Parameter nicht einer statistischen Variation unterworfen wird. Da jedoch die dreidimensionale Simulation den numerisch aufwändigsten Teil der Risikoberechnung darstellt, sind solche Variationen auf diesem Level kaum möglich. So sollte umso mehr ein gleichverteilter Parameter (wie z.B. Klappen einer Querlüftung) konsequent in der statistisch erwartbaren Konfiguration (i.e. erste Klappe in  $\frac{1}{2} \times \text{Klappendistanz}$ ) positioniert werden.

#### 5.4.2 Anforderungen an dreidimensionales Strömungsmodell

Für die Berechnung von Toxizitäts- und Sichttrübungswerten als Eingangsparameter der Evakuierungssimulation ist es nötig, den zeitlichen Verlauf von äußeren Einflussfaktoren definieren zu können, um dem instationären Verhalten des Gesamtsystems Rechnung zu tragen. Neben der Möglichkeit zeitlich veränderlicher Parameterwerte müssen auch Geometrie und sonstige räumliche Versperrungen (Fahrzeuge, Verkehrszeichen, etc.) und Lüftungseffekte sowie der Brand zeitlich und örtlich abgebildet werden können. Weiters müssen die Ergebnisse in einer für das Evakuierungsmodell zugänglichen Form ausgelesen werden können (z.B. Übergabe mittels ASCII File).

Die Anforderungen an das dreidimensionale Modell zur Rauchausbreitungssimulation sind in der folgenden Auflistung angeführt:

#### 1. Möglichkeit der zeitlich veränderlichen Definition von Randbedingungen

Der aus der eindimensionalen Strömungssimulation erhaltene Verlauf der Längsgeschwindigkeit muss als Randbedingung definiert werden können. Hieraus ergibt sich selbsterklärend die Notwendigkeit eines instationären Modells.

#### 2. Möglichkeit der zeitlich veränderlichen Definition von Parameterwerten

Zur Abbildung der Ereignisabfolge nach Brandbeginn muss es möglich sein, Eingangsparameter in Abhängigkeit der Zeit zu definieren. Dies können zum Beispiel die Brandleistung (Quellraten für Wärmefluss und Schadstoffe, etc.) oder Lüftungsparameter (Absaugleistung, Strahlventilatoren, etc.) sein.

#### 3. Möglichkeit der mehrfachen Definition und einzelnen Steuerbarkeit aller Simulationsparameter

Für den Fall mehrerer Lüftungsabschnitte im betrachteten Tunnelabschnitt beziehungsweise für die Definition eines zellenweise entstehenden Feuers (Details siehe Kapitel 5.2) ist es nötig, Eingangsparameter mehrfach zu definieren und einzeln anzusteuern (z.B. die einzelnen Zellen des Feuers zeitversetzt). Simulationsumgebungen mit beispielsweise der Definitionsmöglichkeit eines einzelnen ‚Feuers‘ ohne Interaktionsmöglichkeit sind nicht zielführend.

#### 4. Möglichkeit einer genauen Definition der Tunnelgeometrie

Versperrungen wie Tunnelgeometrie und Fahrzeuge im Fahrraum müssen korrekt abgebildet werden können. Dies beinhaltet Querschnitts – und Neigungswechsel. Die Definition eines durchgehenden Querschnitts ist in vielen Fällen nicht ausreichend.

#### 5. Möglichkeit der Abbildung der im Tunnel verbauten Lüftungskomponenten

Alle im untersuchten Tunnel verbauten Lüftungskomponenten müssen im Modell korrekt abgebildet werden können. Da sich die einzelnen Modelle jedoch in der Parameterdefinition zu stark unterscheiden, ist keine genaue Angabe möglich.

Mit der ‚Möglichkeit einer zeitlich veränderlichen Definition‘ ist in allen Fällen die Eingabe mittels Koordinatenpunkten  $Q(t_i) = a_i$  gemeint. Eine funktionale Eingabe im Sinne von  $Q(t) = f(t)$  ist nicht sinnvoll.

#### 5.4.3 ‚Fire Dynamic Simulator‘ (FDS)

Der ‚Fire Dynamics Simulator‘ ist ein numerisches Strömungssimulations-Modell (CFD-Modell) für die Simulation von Bränden und die Ausbreitung von Rauchgasen. FDS wird durch das National Institute of Standards and Technology (NIST) mit internationaler Beteiligung über ein Open-Source-Netzwerk entwickelt. Dies ermöglicht auch dem Anwen-

der die Nutzung auf großen Clustersystemen zur Bereitstellung der nötigen Rechenkapazitäten.

Die Software löst numerisch eine Form der Navier-Stokes-Gleichung und ist in der Lage auch bei geringen Geschwindigkeiten die thermische Rauchausbreitung und Schichtung abzubilden. Neben der Angabe einer dreidimensionalen Prognose der Rauchausbreitung basierend auf vorgegebenen Randbedingungen (z.B. Geschwindigkeit auf zuströmender Seite, Wärmeleitung an Tunnelwänden) und des Strömungsprozesses, bietet es auch eine leistungsfähige Funktion, das Verhalten von verschiedenen Gasarten und deren vertikale Verteilung zu bestimmen. Dies ermöglicht die Berechnung der Konzentration von giftigen Gasen bei einer bestimmten Höhe (angenommen Kopfhöhe von 1,6 m über dem Boden) und damit eine Aussage über die Auswirkungen auf flüchtende Personen beim Evakuierungsmodell.

In Deutschland ist FDS eine Standardsoftware für die Berechnungen von Tunnelbränden und die Prognosen der Rauchausbreitung für den Einsatzbereich von Risikoanalysen. FDS ist auch Grundlage des völlig überarbeiteten und 2011 veröffentlichten offiziellen holländischen Risikomodell RWSQRA 2.0.

#### 5.4.4 Implementierung der Einflussfaktoren

##### 5.4.4.1 Domainrepräsentation und Randbedingungen im dreidimensionalen Modell

Während im eindimensionalen Strömungsmodell der Tunnel als Ganzes betrachtet wird (die Strömungsentwicklung auf Basis der vorgegebenen Parameter bzw. deren Entwicklung berechnet wird), wird für die dreidimensionalen Simulationen ein Submodell erstellt, das die Umgebung des Brandorts abbildet. Dabei muss die Länge des gewählten Abschnitts zwei Bedingungen erfüllen, die sich aus unterschiedlichen Ebenen der Risikoanalyse ableiten:

1. Die Randbedingung der Längsströmung muss hinreichend weit vom Brandort entfernt sein, um eventuelle Backlayering-Effekte nicht zu beeinflussen. Dies ist insofern relevant, da an der Randbedingung  $v(h) = const.$  gilt, Backlayering jedoch ein vertikales Geschwindigkeitsprofil aufweist.
2. Die Ergebnisse der Rauchausbreitungssimulation werden für alle Bereiche benötigt, die von Personen auf der Flucht benutzt werden und in denen es zu einer Beeinträchtigung durch Brandgase während dieser Zeit kommt. Weiters ist die Verschiebung des Brandorts (innerhalb der anwendbaren Bereiche) zu berücksichtigen.

Das bedeutet, dass z.B. für einen Tunnel ohne Notausgang und Gegenverkehr, bei dem nur ein Brandort simuliert wird, die doppelte Domainlänge (je eine Tun-

nellänge vor und hinter Brandort) aufweisen muss wie der tatsächliche Tunnel, da:

1. Personen immer die gesamte Distanz zum Portal zurücklegen müssen
2. Die Strömung sowohl in die positive, als auch in die negative Richtung zeigen kann
3. Der Brandort an jeden Punkt im Tunnel verschoben können werden muss

Andererseits muss ein Richtungsverkehrstunnel mit 500m Notausgangsabstand unabhängig von der Länge in der Regel eine maximal 2000m lange Domain aufweisen (500m vor und 1500m hinter dem Brandort) da:

1. Damit wird in der Regel (außer bei Strömungsumkehr) die Randbedingung weit genug vom Brandort entfernt definiert
2. Es können Evakuierungen über die gesamte Distanz vom Brandort in die negative Richtung und von sich 1000m hinter dem Brandort befindlichen Personen in die positive Richtung (Auffahrunfall bei Ampel im Fahrraum mit Folgebrandentwicklung).
3. Für einen Gegenverkehrstunnel mit demselben Notausgangsabstand ergibt sich die Länge aus der Entwicklung der Geschwindigkeit (Vordringen des Rauchs) und aus dem Zeitablauf (wann sind die betroffenen Tunnelbereiche evakuiert). Im Allgemeinen ist jedoch dieselbe Domainlänge symmetrisch gegenüber dem Brand ausreichend. Die Überlegungen hinsichtlich der Wahl der Domainlänge sind in Abbildung 5-13 dargestellt.
4. Für die dreidimensionale Domain wurde eine über die gesamte Länge konstante Netzauflösung von 0.5m in  $x, y$  Richtung und 2.0m in  $z$  Richtung gewählt.
5. Die Tunnelgeometrie wird in Form von Stäben mit 0.5m Kantenlänge repräsentiert. Im Falle von Gewölbequerschnitten wird die in FDS verfügbare Option *SAWTOOTH = FALSE*. gewählt, um die durch das kartesische Gitter entstandene Stufenmuster aerodynamisch auszugleichen. Eine veränderliche Tunnelneigung wird mittels örtlich gedrehten Gravitationsvektors (Rampenfunktion) dargestellt. Diese Parameter sind jedoch stark vom verwendeten Modell abhängig, und müssen je nach verwendetem Modell richtig gewählt werden.
6. Querschnittswechsel im Tunnel stellen ortsfeste Objekte dar und werden an ihrer genauen Stelle abgebildet. Die gewählten Simulationsstandorte müssen demnach eine statistisch korrekte Repräsentation ermöglichen.

## Tunnel

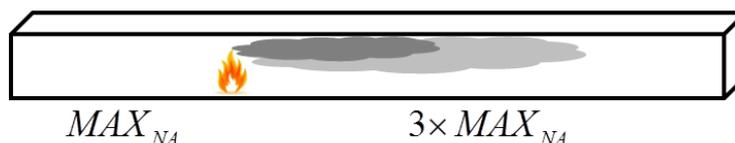


## Domainrepräsentation eindimensional



## Domainrepräsentation im Rauchausbreitungsmodell

### Richtungsverkehrstunnel



### Gegenverkehrstunnel

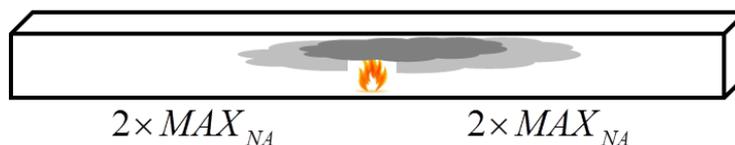


Abbildung 5-13: Domainrepräsentation im Rauchausbreitungsmodell

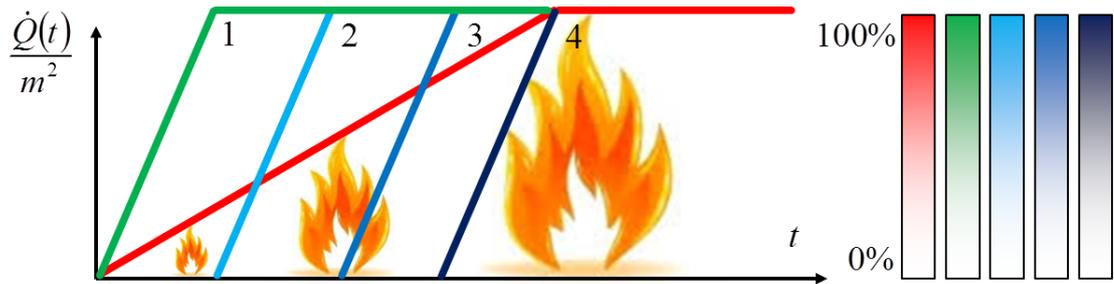
#### 5.4.4.2 Brand und der Quellraten im dreidimensionalen Modell

Der Brand entspricht einer Quelle von Masse und Energie. Je nach verwendetem Programm ist ein Quellterm für die Zellen des Brandes mit der passenden Funktion anzugeben. In FDS sind dies die Objekte *TOTAL\_HEAT\_FLUX* bzw. *CONVECTIVE\_HEAT\_FLUX* und *MASS\_FLUX(n)* in der Surface Definition (&SURF Line der entsprechenden &VENT Line). Es ist wichtig, Quellraten für die einzelnen toxischen Gase angeben zu können. Diese Gastypen müssen in FDS über &SPEC definiert werden.

Der eigentliche Brand sollte für jede Zelle gesondert, zeitversetzt definiert werden. Alternativ kann dies mit einem Algorithmus passieren, der die brennende Fläche in Abhängigkeit der Zeit vergrößert. Dies soll die physikalischen Eigenschaften (Plume-Entwicklung) während der Brandanwuchsphase genauer abbilden. Es ist in diesem Punkt offensichtlich, dass ein 100MW Brand bei 1% der maximalen Brandleistung mit

0,8m<sup>2</sup> brennender Fläche ein anderes Strömungsbild aufweisen wird als auf 80m<sup>2</sup> verteilt. Dies ist vor allem bei der Untersuchung von Gegenverkehrstunneln von Bedeutung, bei denen die geringen Strömungsgeschwindigkeiten von Beginn an eine relativ gute Rauchschiebung erlauben. Die Vorgehensweise ist in Abbildung 5-14 dargestellt.

Brandentwicklung



Implementierung der Brandentwicklung

Eine Branddefinition für  
 gesamte Fläche

Eigene Branddefinition  
 für jede Zelle

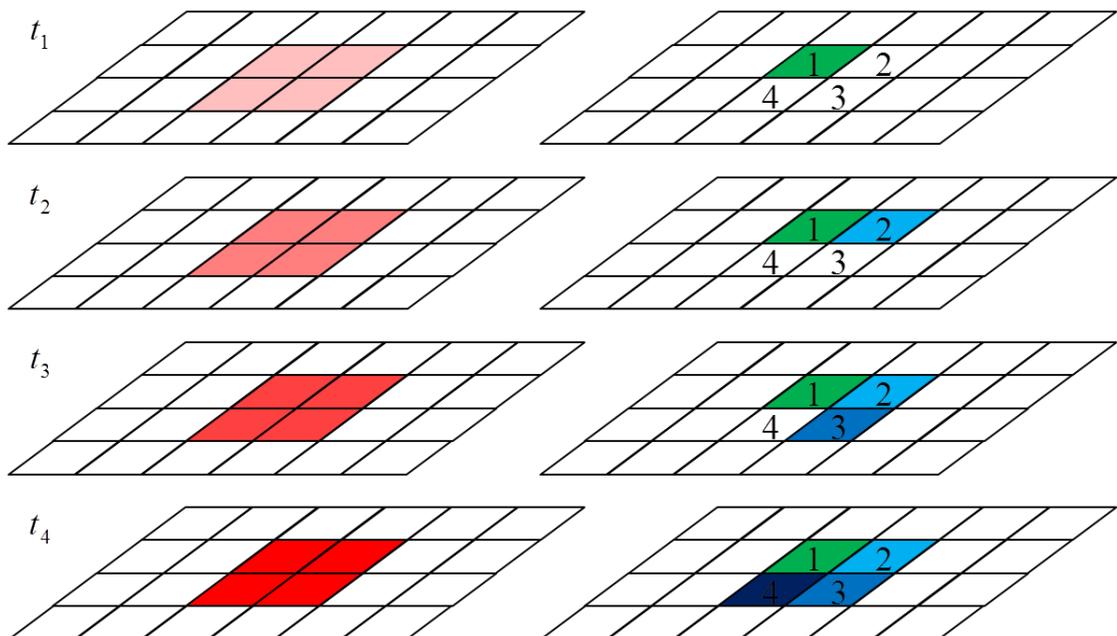


Abbildung 5-14: Branddefinition in Rauchausbreitungssimulation

#### 5.4.4.3 Definition von Fahrzeugen im dreidimensionalen Modell

Fahrzeuge im Tunnel stellen speziell in Brandnähe ein Problem durch Turbulenzbildung und damit ein teilweises Zerstören der Rauchsichtung dar. Dies gilt insbesondere für Schwerverkehr durch die hohe Versperrung im Tunnel.

Im Dreidimensionalen Modell werden die Fahrzeuge durch Versperrungen in Form von Quadern dargestellt. Aufgrund des bestehenden Überholverbots stehen dabei alle Schwerverfahrzeuge auf der rechten Fahrspur. Die verwendeten Parameterwerte sind in der folgenden Tabelle zusammengefasst:

Tabelle 5-2: Parameterwerte für Fahrzeuge in Rauchausbreitungssimulation [2]

Parameter	PKW	LKW
Länge	4.5m	15.0m
Breite	1.5m	2.5m
Höhe	1.5m	3.0m
Abstand von Boden	0.0m	0.5m
Ausschnitt für Motorhaube	1m Länge und 0.5m Höhe	-
Aerodynamische Rundung	<i>SAWTOOTH = FALSE.</i>	-
Abstand zwischen Kfz	2.5m	2.5m

Abbildung 5-15 zeigt die Modellierung der Kfz Kolonne in der dreidimensionalen Rauchausbreitungssimulation. Die Option ‚Smooth Obstacles‘ wurde zur Darstellung deaktiviert.

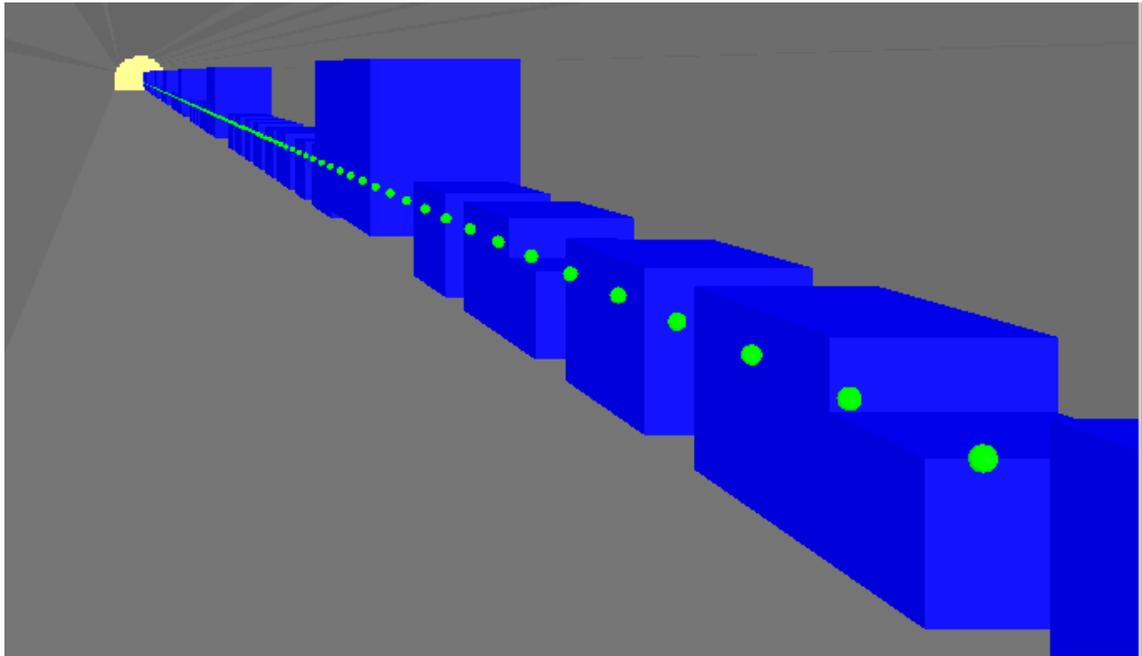


Abbildung 5-15: Modellierung von Kfz in Rauchausbreitungssimulation

Es ist auf eine statistisch korrekte Anordnung des Schwerverkehrs zu achten. Dies bedeutet, dass wenn am rechten Fahrstreifen statistisch jedes fünfte Kfz ein LKW oder Bus ist (entsprechend 9.1% Schwerverkehrsanteil), dass dann nach zwei PKW ein LKW steht, danach jeweils nach vier PKW. Dies ist in Abbildung 5-16 dargestellt.

Kfz Konfiguration bei Lkw Überholverbot



Statistisch erwartbare Konfiguration

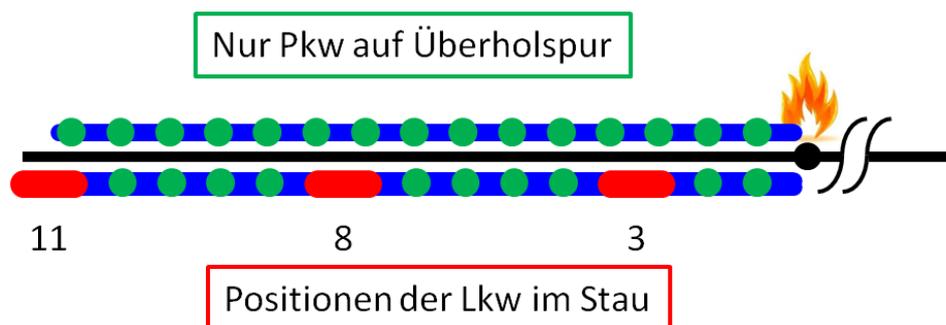


Abbildung 5-16: Fahrzeugkonfiguration in Rauchausbreitungssimulation

Die Fahrzeuge werden in der für den Verkehrszustand zutreffenden Endkonfiguration abgebildet. Fahrende Fahrzeuge werden vernachlässigt, da:

1. Der Effekt der Kolbenwirkung bereits in der eindimensionalen Strömungssimulation berücksichtigt wurde
2. Man davon ausgehen kann, dass Kfz vor der Rauchfront aus dem Tunnel ausfahren und es somit (zumindest im Richtungsverkehrstunnel) zu keiner Interaktion zwischen bewegten Kfz und Rauchsicht kommt. Im Gegenverkehrstunnel kann es in der frühen Phase allerdings zu Interaktionen kommen, die jedoch nicht mit vernünftigem Aufwand abgebildet werden können.

Es muss angemerkt werden, dass es zur korrekten Abbildung von bewegten Objekten wesentlich komplexerer Simulationstechniken bedarf, welche in keiner Relation zum daraus gezogenen Nutzen stehen.

#### 5.4.4.4 Lüftungsdefinition im dreidimensionalen Modell

Hinsichtlich der Tunnellüftung sind im dreidimensionalen Modell folgende Komponenten zu unterscheiden:

1. Strahlventilatoren

Die Wirkung von Strahlventilatoren ist an sich bereits in der eindimensionalen Strömungssimulation berücksichtigt. Es kann jedoch über die Längsströmungsbeeinflussung hinaus noch zu lokalen Effekten kommen, wenn Strahlventilatoren im Bereich der Rauchsicht in Betrieb genommen werden. Strahlventilatoren werden als ortsfeste Objekte betrachtet.

2. Punktuelle volumsaustauschende Komponenten

Darunter fallen Injektionspunkte, Punktabsaugungen und reversible punktuelle Anlagen. Diese werden genauso wie Strahlventilatoren als ortsfeste Objekte betrachtet.

3. Gleichverteilte volumsaustauschende Komponenten

Darunter fallen verteilte Frischluftinjektion, Rauchabsaugung über Zwischendecke und reversible Injektions- und Absauganlagen. Diese werden als gleichverteilte Objekte betrachtet.

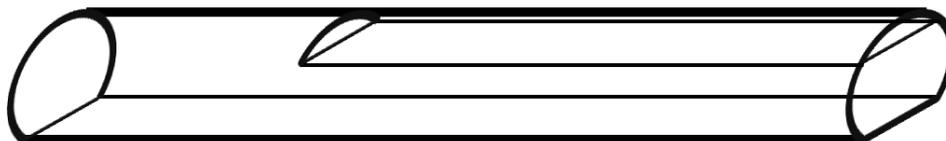
Strahlventilatoren werden (sofern in Betrieb) durch impulseinbringende Objekte definiert. In FDS verwendet man hierfür einen `&VENT` mit der Option `POROUS = .TRUE`. Dieser wiederum erhält eine Durchströmungsgeschwindigkeit woraus sich (inkl. Hülle) ein Strahlventilator ergibt.

Volumsaustauschende Komponenten werden als externe Volumsquellen (externe & VENT) modelliert. Die Definition von Massenströmen erweist sich gegenüber der Definition von Normalgeschwindigkeiten als Vorteil, da diese Temperaturabhängig sind.

Interessant ist die Unterscheidung von *ortsfesten* und *gleichverteilten* Objekten. Als ortsfeste Objekte werden Objekte bezeichnet, die an wenigen Punkten im Tunnel vorkommen, und auf deren Existenz und Lage man bei der Wahl der Simulationsstandorte berücksichtigen muss. Gleichverteilte Objekte wiederum sind im gesamten Tunnel in mehr oder weniger langen Abständen verfügbar. Ein Beispiel hierfür sind die Klappen eines Querlüftungssystems. Der Brand kann in jeder beliebigen Lage zwischen den Klappen passieren, also wäre eine Variation des Parameters nötig. Da man allerdings nicht jeden Parameter einer Variation unterwerfen kann (ähnliches müsste man z.B. bei der Kfz Anordnung hinsichtlich des ersten LKW tun) wird hier auf die statistisch erwartbare Lage zurückgegriffen: der Brandort liegt immer genau zwischen zwei Klappen.

Die Implementierung in der Rauchausbreitungssimulation ist in Abbildung 5-17 dargestellt. Es muss darauf hingewiesen werden, dass hinsichtlich der genauen Abbildung ortsfester Lüftungskomponenten oder Einflussfaktoren die Anzahl der tatsächlich auf dem Niveau der Rauchausbreitung zu variierenden Szenarien weit über jenen von Standardtunneln liegen kann. Eine allgemein gültige Zahl kann nicht genannt werden.

Tunnel



Domainrepräsentation eindimensional

Abschnittswechsel - ortsfest



Implementierung

Ortsfeste Eigenschaften



Gleichverteilte Eigenschaften

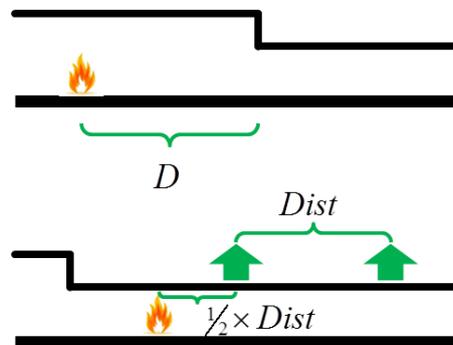


Abbildung 5-17: Ortsfeste und gleichverteilte Lüftungskomponenten

**5.5 Evakuierungsmodell**

5.5.1 Motivation und Übersicht

Für die Berechnung der Todesopfer wird ein lineares auf der Akkumulation von Gasen basierendes Modell verwendet. Der Vorteil dieses Modells ist die direkte Importmöglichkeit der Verdunkelung sowie der Rauchgaskonzentration von den .csv-Ausgabedateien des 3D-Simulation von Rauchgasen, d.h. ohne eine Bearbeitung oder Parametrierung, die einen gewissen Verlust an Genauigkeit bedeuten würde.

Darüber hinaus wird durch den direkten Import der Dateien eine Verarbeitung von vielen Fällen ermöglicht, welche notwendig sind, um alle beschriebenen Szenarien zu untersuchen.

Die Strategie im Submodell ist die Fragestellung nach der maximalen Distanz, die ein Mensch, der zum Zeitpunkt  $t$  vom Ort  $x$  die Flucht einleitet, zurücklegen kann. Dies ist

aus statistischen und algorithmischen Gründen einfacher als die Fragestellung, ob von jedem Ort aus ein Notausgang erreicht werden kann. Kann z.B. eine Person immer 700m zurücklegen und beträgt der maximale Notausgangsabstand 500m, so wird diese Person immer überleben, beträgt aber der durchschnittliche Notausgangsabstand 1000m, so hat die Person eine Wahrscheinlichkeit von 30% zu sterben. Diese Vorgehensweise wird im Kapitel 5.8 im Detail beschrieben.

## 5.5.2 Anforderungen an Evakuierungsmodell

Um im Rahmen der Risikoanalyse relevante Aussagen über die Auswirkungen von Brandgasen auf flüchtende Personen treffen zu können, werden an das verwendete Evakuierungsmodell folgende Anforderungen gestellt:

1. Bei dem verwendeten Verfahren muss es sich um ein auf der Akkumulierung von Schadstoffen basierendes Modell handeln. Eine Vorgehensweise basierend auf absoluten Grenzwerten ist nicht zielführend.
2. Möglichkeit der Eingabe von Gaskonzentrationen aus der Rauchausbreitungssimulation in numerischem Format (z.B. .csv File). Eine Eingabe als (stückweise) funktionaler Zusammenhang ist nicht zielführend.
3. Möglichkeit der Simulation unterschiedlicher Personen mit unterschiedlichen Parametern. Alternativ kann die Simulation auch mehrmals durchgeführt werden.
4. Möglichkeit der Implementierung der Strategie ‚Fortbewegung bis zum Ende‘ (= Domainende bzw. Brand oder Tod). Dies lässt sich in der Regel leicht implementieren, indem man in der gesamten Domain einfach keine Notausgänge definiert.

In den nächsten Punkten wird die Implementierung insbesondere das akkumulationsbasierte Intoxikationsmodell im Detail beschrieben.

## 5.5.3 Implementierung der Einflussfaktoren

### 5.5.3.1 Berechnung der akkumulierten Intoxikationswerte [12]

Die Bewertung der Auswirkung der Rauchgaskonzentration auf den menschlichen Körper basieren auf der Theorie der Akkumulation von toxischen Gasen von D.A. Purser [12]. Nachfolgende Formeln geben die Intoxikation von verschiedenen Gasen an:

Intoxikation durch Kohlenmonoxid mit der Kohlenmonoxidkonzentration  $CO(t)$  in ppm:

$$FICO = \frac{3.317 \cdot 10^{-5} \cdot CO(t)^{1.036} \cdot RMV}{PID} \quad 5-28$$

Intoxikation durch Wasserstoffcyanid mit der Wasserstoffcyanidkonzentration  $HCN(t)$  in ppm:

$$FICN = \frac{e^{\frac{HCN(t)}{43}}}{220} \quad 5-29$$

Intoxikation durch Kohlendioxid mit der Kohlendioxidkonzentration  $CO_2(t)$  in %:

$$FICO_2 = \frac{1}{e^{6.1623 - 0.5189 \cdot CO_2(t)}} \quad 5-30$$

Effekte von Hypoxie (Sauerstoffmangel) mit der Sauerstoffkonzentration  $O_2(t)$  in %:

$$FIO_2 = \frac{1}{e^{8.13 - 0.54 \cdot (20.9 - O_2(t))}} \quad 5-31$$

Zusätzlich kommt es durch die Präsenz von Kohlendioxid zur Ausprägung von Hyperventilation. Das dadurch erhöhte Atemvolumen durch erhöhte Kohlendioxidkonzentration  $CO_2(t)$  ist definiert durch:

$$VCO_2 = e^{\frac{CO_2(t)}{2}} \quad 5-32$$

Die gesamte Intoxikation zu einem bestimmten Zeitpunkt wurde durch die Integration über die gesamte Zeit der Aussetzung erhalten:

$$FIN = \int_{t_{EXP}} [(FICO + FICN + FICO_2) \cdot VCO_2 + FIO_2] dt \quad 5-33$$

Zusätzlich zu den Effekten toxischer Gase werden die Effekte von Strahlungs- und Konvektionswärme berücksichtigt:

Konvektionswärme mit der Temperatur  $T(t)$ :

$$FIH_C = 2.0 \cdot 10^{-8} \cdot T(t)^{3.4} \quad 5-34$$

Strahlungswärme mit der Strahlungsintensität  $q(t)$  in  $\frac{kW}{m^2}$  und dem Grenzwert für Letalität durch Strahlungswärme  $D_r$

$$FIH_R = \frac{60 \cdot q(t)^{1.33}}{D_r} \quad 5-35$$

Die gesamte Wirkung der Wärme zu einem bestimmten Zeitpunkt wird durch die Integration über die gesamte Zeit der Aussetzung erhalten:

$$FIH = \int_{t_{EXP}} (FIH_C + FIH_R) dt \quad 5-36$$

Wenn einer der Einflussparameter – total Intoxikation oder Hitze – Grenzwert ist 1, erreicht wird, ist der Flüchtende nicht mehr im Stande die Flucht fortzusetzen und die Flucht kann somit ohne fremde Hilfe nicht mehr erfolgen.

### 5.5.3.2 Auswirkungen des Rauchs auf die Fortbewegungsgeschwindigkeit [13]

Während des Fluchtvorgangs werden die Personen von der Sichttrübe behindert und gleichzeitig noch durch die gesamt aufgenommene Intoxikation geschwächt:

Auswirkung der Intoxikation auf die Fluchtgeschwindigkeit:

$$M_I = \begin{cases} 1.0, & FIN \in [0.00; 0.90[ \\ 0.9, & FIN \in [0.90; 0.95[ \\ 0.8, & FIN \in [0.95; 1.00] \end{cases} \quad 5-37$$

Auswirkung der geringen Sichtweite auf die Fluchtgeschwindigkeit mit dem linearen Ex-tinktionskoeffizienten  $K$ :

$$M_S = 1.105 - 0.488 \cdot K - 0.161 \cdot K^2 \quad 5-38$$

Der Gesamteinfluss von Intoxikation und der Sichtweite auf die Fluchtgeschwindigkeit berechnet sich mit der Initialgeschwindigkeit  $V_I$  nach:

$$V = V_I \cdot M_I \cdot M_S \quad 5-39$$

Ein entscheidender Faktor ist dabei die Reduktion der Fluchtgeschwindigkeit mit zuneh-mender Sichttrübung durch Brandrauch, da dies die Expositionszeit und damit auch die gesamte akkumulierte Dosis der toxischen Gase erhöht. Der Zusammenhang zwischen Sichttrübung und Fluchtgeschwindigkeit ist in Abbildung 5-18 dargestellt. Die Beeinträch-tigung der Fortbewegung wurde zur Beibehaltung der Festlegungen der RVS [2] an das Modell von Building Exodus [13] gehalten.

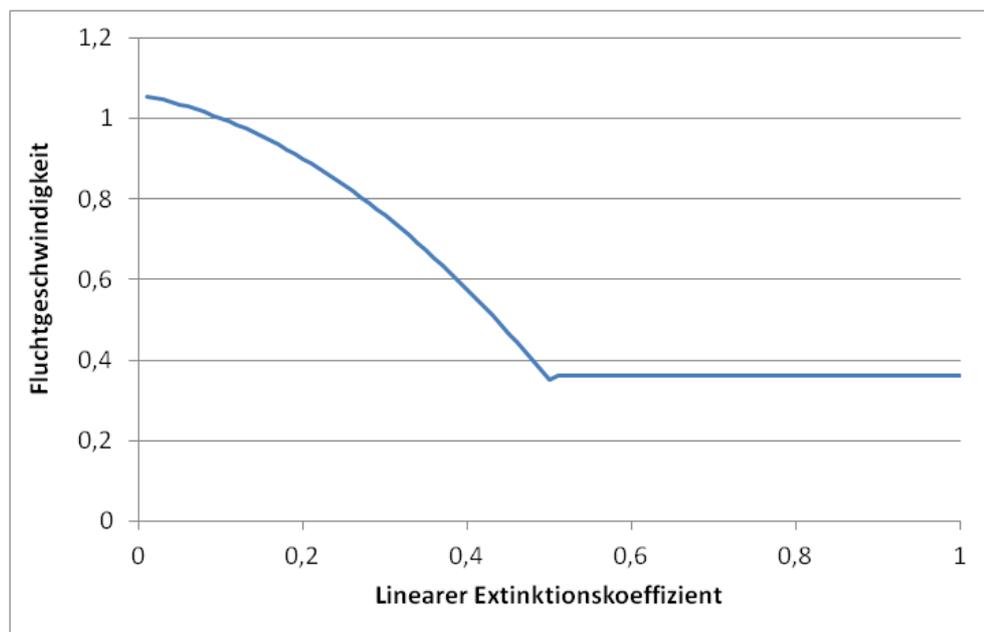


Abbildung 5-18: Zusammenhang zwischen Verrauchung und Gehgeschwindigkeit

## 5.5.4 Parameterwerte für Evakuierungsmodell

### 5.5.4.1 Personenzusammensetzung

Die Evakuierung nach oben beschriebenem Vorgehen wird für insgesamt 6 verschiedene Gruppen von Personen (2 Geschlechter, 3 Altersbereiche) und mit jeweils 3 verschiedenen anfänglichen Gehgeschwindigkeiten wiederholt, woraus sich jeweils Bereiche ergeben, aus denen der Personentyp nicht erfolgreich flüchten kann. Die prozentuellen Anteile der einzelnen Personengruppen und Gehgeschwindigkeiten ohne Beeinträchtigung sind in Tabelle 5-3 zusammengefasst.

Tabelle 5-3: Personenzusammensetzung und Fluchtgeschwindigkeiten

Altersgruppe	Beteiligung [14] [15]	Fluchtgeschwindigkeit [16]
Männlich < 30 Jahre	18%	1.10 – 1.60 m/s
Weiblich < 30 Jahre	17%	0.80 – 1.39 m/s
Männlich 30 – 50	16%	1.30 – 1.48 m/s
Weiblich 30 – 50	16%	0.95 – 1.24 m/s
Männlich > 50	14%	1.00 – 1.29 m/s
Weiblich > 50	19%	0.75 – 0.95 m/s

Es ist anzumerken, dass in der Evakuierungssimulation lediglich die Fluchtgeschwindigkeiten eine Rolle spielen, die Beteiligungen kommen erst im Schritt ‚Überlebensmodell‘ ins Spiel, sind jedoch hier im Sinne der Vollständigkeit angegeben.

### 5.5.4.2 Annahmen hinsichtlich Fluchtverhalten

Gemäß [1] wird davon ausgegangen, dass Personen die Flucht einleiten, wenn eine der folgenden Voraussetzung gegeben ist:

1. Personen werden von der Tunnelwarte oder Einsatzkräften zum Verlassen des Fahrzeugs aufgefordert. In diesem Fall wird von einer Zeitspanne von 150s zwischen Brandausbruch und Einleiten der Flucht ausgegangen. Diese Annahme geht von einer aktiven Aufforderung der Personen im Tunnel zur Selbstrettung aus (insbesondere Tunnel mit Möglichkeit zur visuellen oder akustischen Informationsvermittlung an Betroffene im Tunnel). Der Wert von 150s entspricht dem kumulierten Zeitbedarf für Ereignisdetektion, Reaktionszeit des Personals, Systemreaktionszeit (60s gemäß Abschnitt 2.5.1.3) sowie der Latenzzeit bis zur Reaktion

der betroffenen Tunnelbenutzer (weitere 90s). Latenzzeit ist hier ein Sammelbegriff für die beiden von Kuligowski [17] als *pre-evacuation phase* und *pre-movement phase* eingeführten Zeiträume.

2. Personen fühlen sich durch den Rauch unmittelbar bedroht. Hierfür wurde ein Wert von  $EC = 0.1/m$  (Standardwert BuildingExodus [12]) für den linearen Extinktionskoeffizienten in Kopfhöhe festgelegt.
3. Reisebusse führen zu einer Verzögerung der Fluchteinleitung eines Teils der Personen. Für die Evakuierungszeit des Busses wurden 30s angenommen (2 Türen für 40 Personen). Hierfür wurden 3 Zeitpunkte der Fluchteinleitung (mit je 10s Verzögerung hinzugefügt)

Vom Zeitpunkt der Fluchteinleitung bewegen sich die Personen mit der ihrem physiologischen Zustand und den lokalen Sichtbedingungen entsprechenden Geschwindigkeit in die vorgegebene Evakuierungsrichtung. Das Ziel ist dabei entweder der Brandort oder die Domaingrenze.

Neben den zwei Annahmen hinsichtlich korrektem Verhalten und Fluchteinleitung wurde auch Fehlverhalten von einer gewissen Anzahl Personen berücksichtigt:

1. 3% der Tunnelnutzer verhalten sich ‚falsch‘ und leiten die Flucht nicht ein. Dies kann auch aufgrund von Unfallfolgen der Fall sein (eingeklemmte Personen). Es wird davon ausgegangen, dass diese Personen am Ursprungsort verweilen und erst nach 15min die Flucht antreten.
2. Das Fehlverhalten ist auf alle Bevölkerungsgruppen gleichverteilt
3. Das Fehlverhalten betrifft auch Personen in Reisebussen

Daraus ergeben sich für jede Personengruppe von jedem Standort im Tunnel 5 Zeitpunkte der Fluchteinleitung.

Die Annahmen zur Fluchtrichtung der betroffenen Personen sind in Abschnitt 5.8.3 beschrieben.

### 5.5.5 Beispiel

Abbildung 5-19 und Abbildung 5-20 auf der nächsten Seite sind zwei Beispiele für die aus vorigen Überlegungen resultierenden Zeit- Weg- Diagramme. Die Fluchtrichtung ist jeweils nach links, die Toxizitäts- und Sichttrübungswerte stammen von einem 30MW Brand mit Grundströmung nach links.

Die erste Abbildung (Person 3) bezieht sich auf eine jungen männlichen Probanden mit der höchsten Fluchtgeschwindigkeit. Person 16 ist alt, weiblich und hat die geringste Fortbewegungsgeschwindigkeit.

Klar zu erkennen ist die erhöhte Gesamtzeit bis zur vollständigen Evakuierung und die nach rechts unten verschobenen Linien für Tod / Erfolg. Warum dies als gleichwertig angesehen wird (natürlich nur im Rahmen der Simulation) wurde bereits in den Erläuterungen der Grundidee diskutiert.

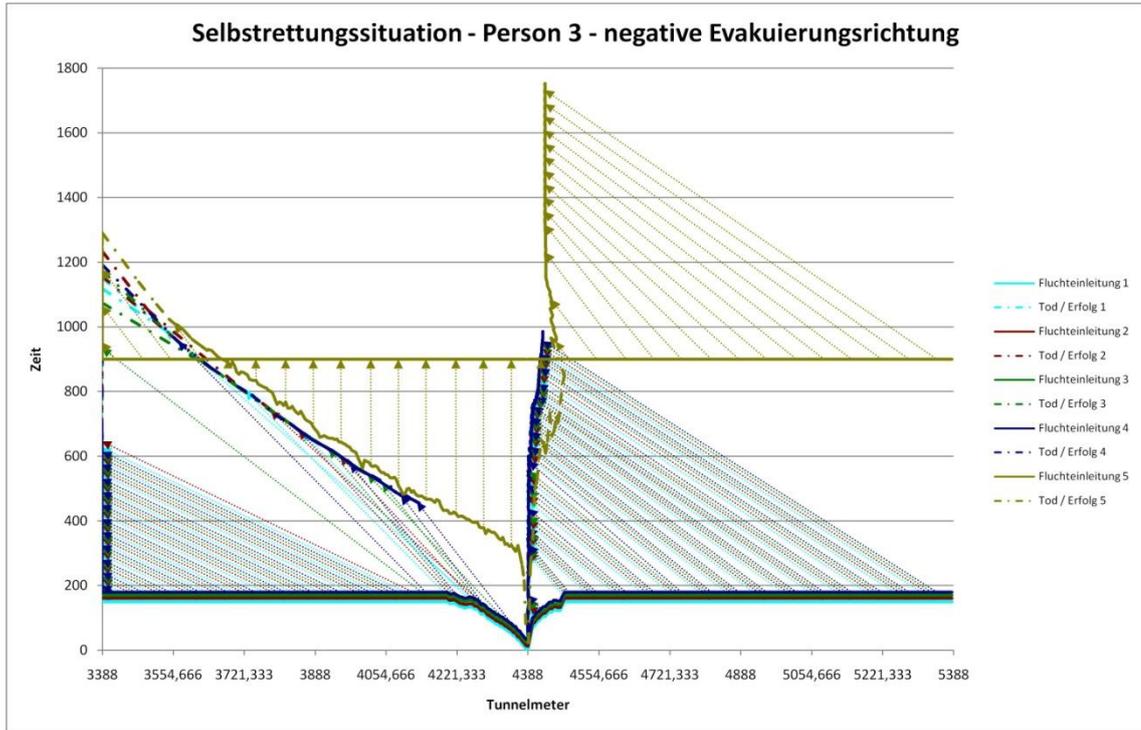


Abbildung 5-19: Zeit-Weg-Diagramm für Flucht von Person 3

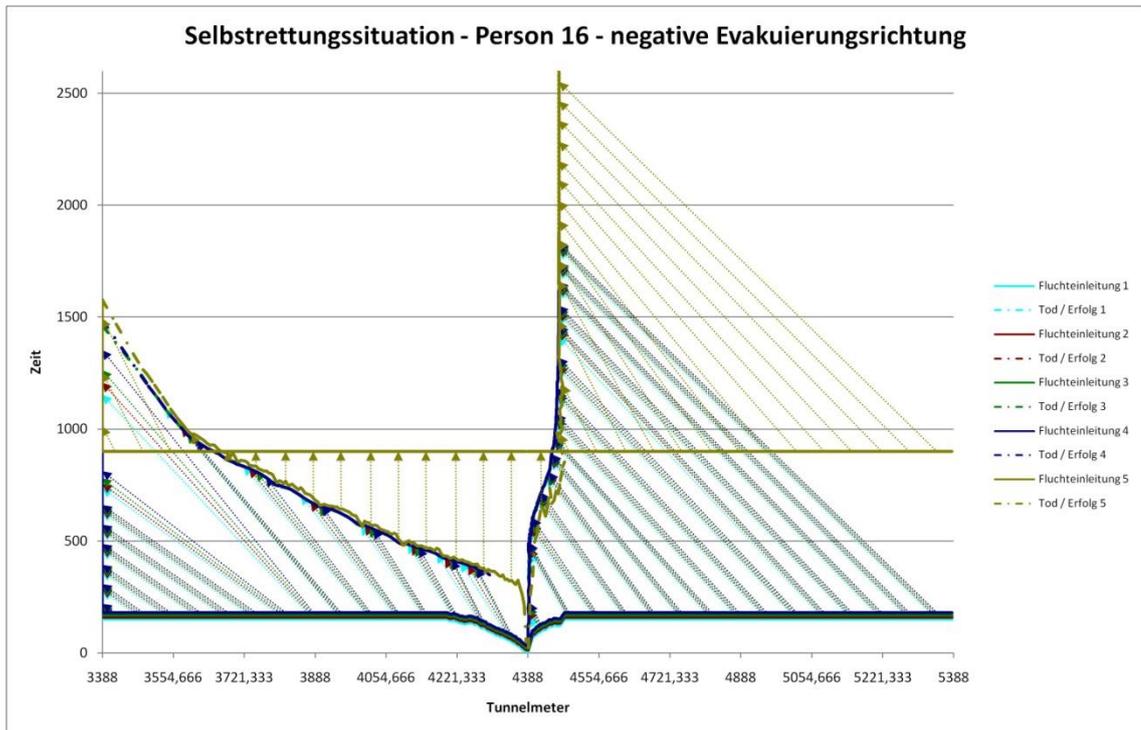


Abbildung 5-20: Zeit-Weg-Diagramm für Flucht von Person 16

## 5.6 Mappingansatz

### 5.6.1 Motivation und Übersicht

Da bei der Berechnung repräsentativer Schadensausmaßwerte auf unterschiedlichen Levels der Analyse ein unterschiedlicher algorithmischer Aufwand betrieben werden muss, ist es sinnvoll, aufwändige Schritte in einem gröberen Raster zu berechnen, als relativ einfache. Im Grunde genommen sind es die dreidimensionalen Rauchausbreitungssimulationen, die den aufwändigen Teil darstellen.

Aus diesem Grund wurde folgende Struktur zur Berechnung auf unterschiedlich feinem Raster definiert:

1. Die in Kapitel 4 definierte Grundstruktur bleibt aufrecht. In ihre werden alle Strömungsberechnungen und auch Evakuierungssimulationen durchgeführt. Das eindimensionale Strömungsmodell und das Rauchausbreitungsmodell sind gekoppelt (jede 1d Simulation hat eine 3d Simulation). Ebenso lässt sich die Fluchtsimulation nur für ein konkretes Verrauchungsmuster durchführen.
2. Für das Überlebensmodell und das Expositionsmodell ist es möglich, eine wesentlich größere Anzahl von Fällen zu betrachten, da diese relativ wenig algorithmischen Aufwand bedeuten. Es könne zum Beispiel auch zusätzliche Variationsparameter in das Modell eingeführt werden.
3. Zwischen feinem und grobem Netz wird eine Projektion definiert, die die Verbindung der Szenarien der beiden Levels darstellt. Diese Projektion findet vom feinen Netz auf das grobe Netz der Simulationsszenarien statt. Die Anzahl der Fälle bleibt damit kontrollierbar und es besteht noch die Möglichkeit der Dokumentation der Zwischenschritte.

Mit diesem Mappingansatz ist somit eine wesentlich bessere statistische Abdeckung der möglichen Entwicklungen von Szenarien möglich. Effekte wie schnellere Tunnelsperre, verbesserte Detektionssysteme etc. können dadurch realitätsnahe abgebildet werden.

### 5.6.2 Anforderungen an Mappingansatz

Der Mappingansatz soll einem Simulationsszenario des groben Netzes den Wirkungsanteil eines Szenarios des feinen Netzes zuweisen. Liegt zum Beispiel das betrachtete Szenario des feinen Netzes genau zwischen zwei Simulationsszenarien (entsprechend den Stützstellen) des groben Netzes, so wird jedem der beiden Simulationsszenarien die halbe Wahrscheinlichkeit des Ereignisses zugewiesen. Die Schadensausmaße errechnen sich dann aus der Überlagerung der Gefährdung aus Stützstelle eins mit der Exposition des konkreten Falls plus der Überlagerung der Gefährdung aus Stützstelle zwei mit der Exposition des konkreten Falls.

Wenn man dies aus der Sicht des Simulationsszenarios betrachtet, so muss für alle Szenarien des feinen Netzes eine Impactfunktion  $J_{Szenario}$  definiert sein, die den Anteil der Eintretenswahrscheinlichkeit des Szenarios, welcher auf das Simulationsszenario entfällt, definiert. Da die Projektion mehrere Parameter umfasst, setzt sich diese Impactfunktion aus den jeweiligen Anteilen zusammen:

$$J_{Szenario} = \prod_{Parameter} J_p \quad 5-40$$

Für den Mappingansatz lassen sich damit folgende Anforderungen zur Verwendung im Rahmen der Risikoanalyse definieren:

1. Möglichkeit der Definition einer Mappingfunktion  $J_p$  in jeder Dimension (für jeden Parameter), welche in dieser Dimension den Anteil der Wahrscheinlichkeit eines Szenarios auf das betrachtete Simulationsszenario beschreibt.
2. Möglichkeit der Definition einer Mappingfunktion  $J_p(\xi)$ , die von einem externen Parameter abhängen, der erst während der Simulation berechnet wird (im Gegensatz zu Verkehr, Ort, etc. die schon am Beginn des Szenarios festgelegt werden. Ein Beispiel hierfür ist der Zeitpunkt des Brandausbruchs beim Sekundärszenario, welcher sich aus der Position im Stau ergibt.
3. Möglichkeit der Variation von Parametern, die in den Simulationsszenarios keiner Variation unterlagen. In diesem Modell wird der Detektionszeitpunkt zusätzlich variiert, während er in den Simulationsszenarios nur als Medianwert verwendet wird.

Im folgenden Punkt wird die Implementierung des Mappingansatzes für fixe und variable Parameter im Detail besprochen.

### 5.6.3 Implementierung des Mappingansatzes

Der Mappingansatz entspricht im Wesentlichen in jeder Dimension (für jeden Parameter) einer Interpolation. Anstatt jedoch die endgültigen Schadensausmaßwerte zu interpolieren (was bei Linearität korrekt wäre) werden die Wahrscheinlichkeiten interpoliert und mit diesen genauere mittlere Personenverteilungen für das jeweilige Simulationsszenario ermittelt.

Der Ansatz dabei ist folgender:

1. Gibt es für einen Parameterwert  $\lambda$  des feinen Netzes sowohl eine Stützstelle  $\Lambda^-$  links von  $\lambda$  als auch eine Stützstelle  $\Lambda^+$  rechts von  $\lambda$  so gilt für eine lineare Interpolation:

$$F(\lambda) = \frac{\Lambda^+ - \lambda}{\Lambda^+ - \Lambda^-} \cdot F(\Lambda^-) + \frac{\lambda - \Lambda^-}{\Lambda^+ - \Lambda^-} \cdot F(\Lambda^+) \quad 5-41$$

$$= J_p^- \cdot F(\Lambda^-) + J_p^+ \cdot F(\Lambda^+)$$

Die Koeffizienten  $J_p^- = \frac{\Lambda^+ - \lambda}{\Lambda^+ - \Lambda^-}$  und  $J_p^+ = \frac{\lambda - \Lambda^-}{\Lambda^+ - \Lambda^-}$  werden dann als Wahrscheinlichkeit betrachtet, dass Szenario mit Parameterwert  $\lambda$  auf das Simulationsszenario  $\Lambda^-$  beziehungsweise  $\Lambda^+$  fällt.

2. Gibt es für einen Parameterwert  $\lambda$  des feinen Netzes nur entweder eine Stützstelle  $\Lambda^-$  links von  $\lambda$  oder eine Stützstelle  $\Lambda^+$  rechts von  $\lambda$  so gilt der Wert dieser Stützstelle:

$$F(\lambda) = F(\Lambda^-) \quad 5-42$$

$$F(\lambda) = F(\Lambda^+)$$

Werden in der grundlegenden Variation einzelne Parameter gekoppelt mit anderen variiert – z.B. Symmetrie wird für jedes Verkehrsszenario variiert, ebenso ergibt sich der Brandort für Folgeereignisse aus der Verkehrsstärke und Symmetrie – so müssen die Stützstellen in derselben Weise selektiert werden.

### 5.6.3.1 Beispiel

Abbildung 5-21 zeigt die Impactfunktion der Berechnungsfälle eines feinen Simulationsnetzes auf ein Simulationsszenario des groben Netzes für den Variationsparameter Verkehrsstärke. Das Simulationsszenario stellt dabei den Verkehrsfall ‚mittlere Verkehrsstärke‘ dar (dieses liegt bei ca. 550 Kfz/h. Gut ersichtlich ist beispielsweise auch, dass die drei stärksten Verkehrsszenarien des feinen Netzes nicht mehr auf dieses Simulationsszenario projizieren.

Abbildung 5-22 zeigt die Impactfunktion für Symmetrie. Der dargestellte Fall zeigt den Fall ‚Überhang in negative Fahrtrichtung‘ für Verkehrsfall 12. Das Maximum der Impactfunktion in der Darstellung entspricht dem entsprechenden Wert für die Verkehrsstärke (im obigen Diagramm ebenfalls ablesbar)

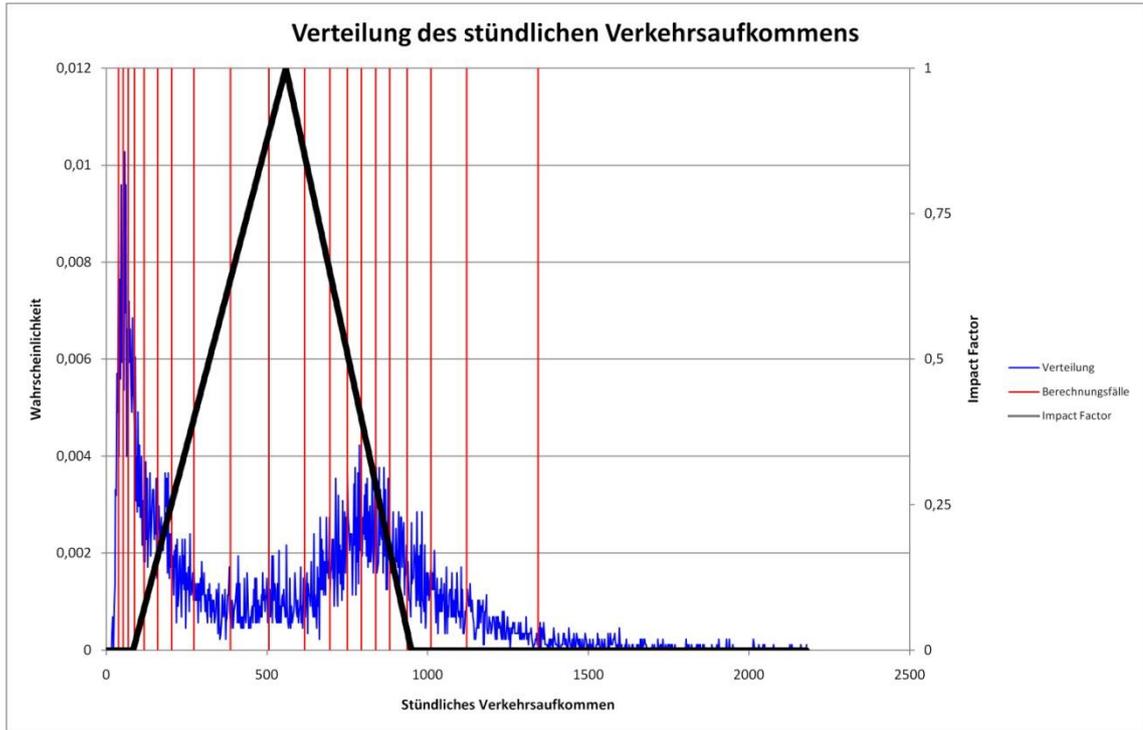


Abbildung 5-21: Impactfunktion für Verkehr

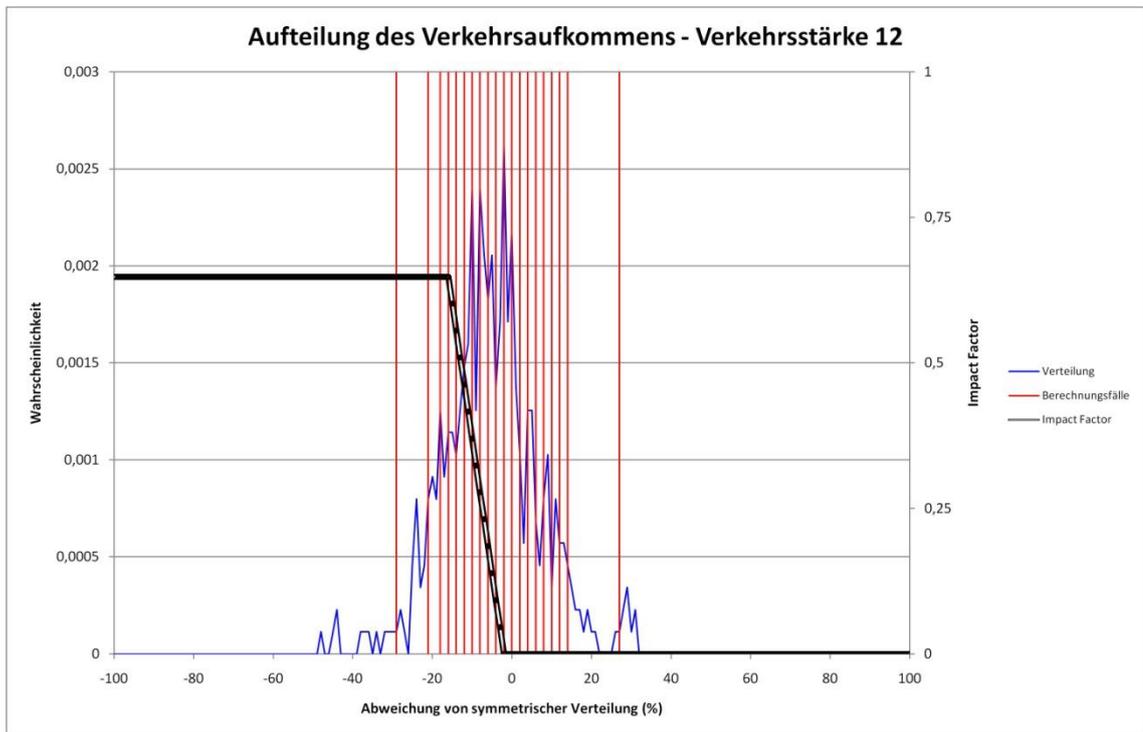


Abbildung 5-22: Impactfunktion für Symmetrie

## 5.7 Folgebrandmodell

### 5.7.1 Motivation und Übersicht

Im Folgebrandmodell wird die örtliche Verteilung von Tunnelbränden definiert. Für Primäreignisse ist diese gleich der Verteilung der Primärurfälle (diskret oder kontinuierlich). Für das Sekundäreignis bzw. Tertiäreignis ergeben sich diese aus der Simulation des sich jeweils bildenden Staus.

Mit der statistischen Verteilung der Tunnelbrände lassen sich die Verteilungen für die Notausgangskonfiguration und die Anzahl der Fahrspuren in Referenz zum Brandort bestimmen.

### 5.7.2 Anforderungen an Folgebrandmodell

Mit dem Folgebrandmodell muss es möglich sein, die genaue Lage von Tunnelbränden und die zeitliche Einordnung zu berechnen. Die Anforderungen an das Folgebrandmodell lassen sich folgendermaßen definieren:

1. Möglichkeit der örtlichen und zeitlichen Einordnung von Tunnelbränden, die sich aus Auffahrunfällen am Stauende entwickeln
2. Möglichkeit der örtlichen und zeitlichen Einordnung von Tunnelbränden, die sich aus technischen Gebrechen im Stau entwickeln

Die zeitliche Einordnung ist hierbei zur Projektion auf das richtige Simulationsszenario hinsichtlich des Zeitpunkts des Brandausbruchs nötig.

### 5.7.3 Implementierung des Folgebrandmodells

Mit der finalen Staukonfiguration mit  $n$  getrennten Stauabschnitten  $[\underline{l}_i, \underline{r}_i]$  auf Basis einer gegebenen Szenarienannahme hinsichtlich Verkehr, Ort und Sperrung kann die daraus für das Simulationsszenario relevante Verteilung der Brandwahrscheinlichkeit mittels der Impactfunktionen für einen Ort  $x$  im Tunnel bestimmt werden:

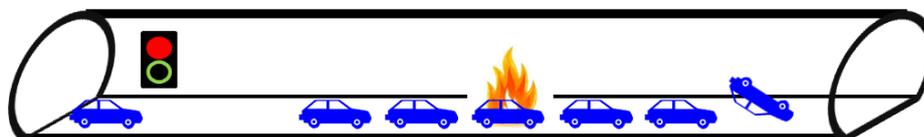
$$\mathcal{B}_{\text{Szenario}}(x) = \sum_{r=1}^n \int_{\underline{l}_r}^{\underline{r}_r} N_{FS}(\hat{x}) \cdot \mathcal{J}_{\text{Verzögerung}}(\tau(\hat{x})) \cdot d\hat{x} \quad 5-43$$

Jede Position jedes Stausegments kann also Brandort sein (Integral und innere Summe)  
Summiert über aller Variationsszenarien so erhält man

$$B(x) = \sum_{\text{Szenarien}} \mathcal{P}_{\text{Szenario}} \cdot \tilde{J}_{\text{Szenario}} \cdot \sum_{r=1}^n \int_{\mathbb{I}_r} N_{FS}(\hat{x}) \cdot J_{\text{Verzögerung}}(\tau(\hat{x})) \cdot d\hat{x} \quad 5-44$$

Wobei  $\tilde{J}_{\text{Szenario}} = J_{\text{Verkehrsstärke}} \cdot J_{\text{Symmetrie}} \cdot J_{\text{Unfallort}}$  die um die Verzögerung reduzierte Impactfunktion und  $\mathcal{P}_{\text{Szenario}}$  die Wahrscheinlichkeit des Szenarios darstellt. Die Vorgehensweise bei der Berechnung der statistischen Brandwahrscheinlichkeit durch Betrachtung der auf das Stauende auffahrenden Kfz verbunden mit dem Zeitpunkt des Auffahrens ist in Abbildung 5-23 dargestellt.

Tunnel mit endgültiger Staukonfiguration



Berechnung der Folgebrandwahrscheinlichkeit

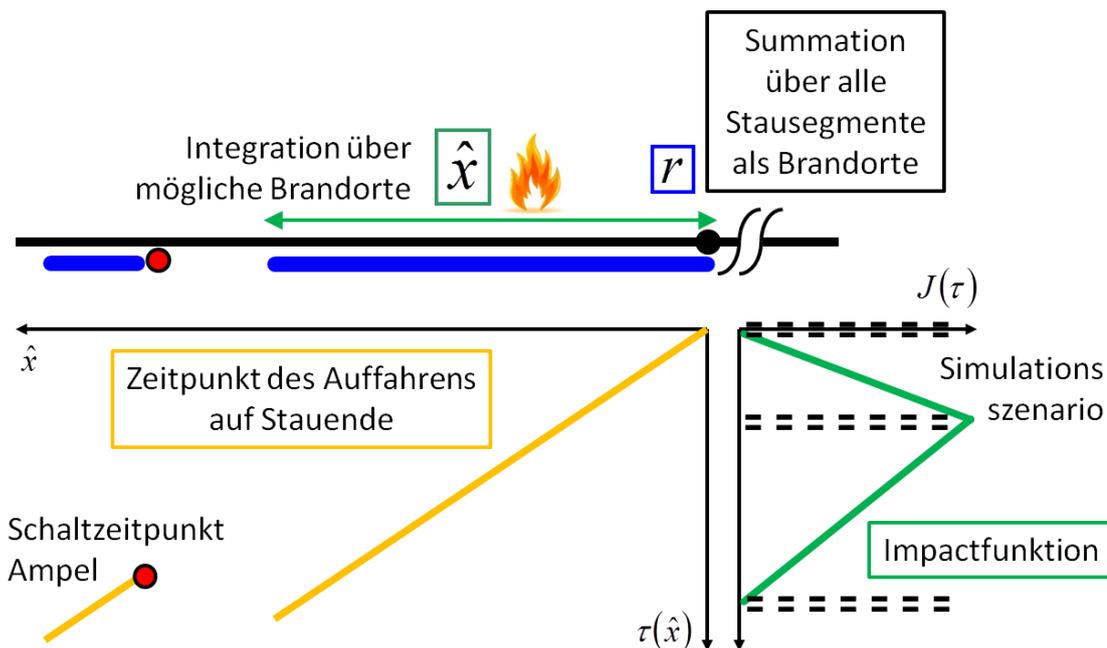


Abbildung 5-23: Berechnung der statistischen Brandwahrscheinlichkeit

In Abbildung 5-24 ist die resultierende Wahrscheinlichkeitsdichte für Unfälle der drei Typen mit der Impactfunktion für den Brandort bezogen auf das Simulationsszenario bei ca. 4500m dargestellt.

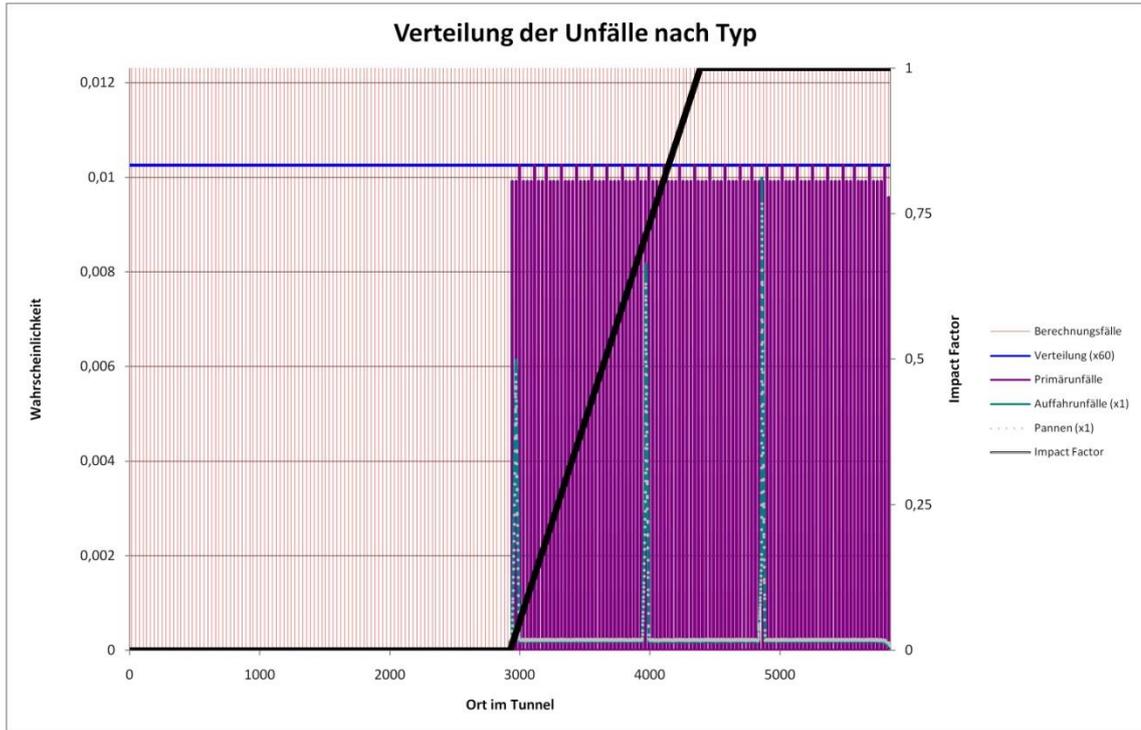


Abbildung 5-24: Verteilung der Brandorte nach Typ und Impactfunktion für Brandort

## 5.8 Überlebensmodell

### 5.8.1 Motivation und Übersicht

Im Überlebensmodell wird die für Personen zurücklegbare Distanz aus dem Evakuierungsmodell mit der repräsentativen Fluchtwegskonfiguration überlagert. Daraus ergibt sich eine Todeswahrscheinlichkeit in Abhängigkeit des Ausgangsorts  $x$  für eine durchschnittliche Person  $\bar{P}$ . Diese Bereiche sind ‚Bereiche mit Personengefährdung‘

Die Motivation für die Definition der repräsentativen Fluchtwegskonfiguration war, dass zwei eigentlich entgegengesetzte Bewertungsansätze vergleichbar gemacht werden mussten:

1. Einerseits soll die genaue Lage von Notausgängen abgebildet werden, damit u.a. lokale Überschreitungen oder lokal verkürzte Abstände bewertet werden können.
2. Andererseits soll dem Referenztunnel immer ein Notausgangsabstand gemäß Richtlinie (STSG: 500m) zugewiesen werden können.

Würde man im Überlebensmodell nur testen, ob ein Notausgang erreicht werden kann, so würde es auch der genauen Festlegung von Notausgangspositionen beim Referenz-tunnel bedürfen. Dies wiederum hätte zur Folge, dass ein 1200m langer Tunnel einen Referenz-tunnel mit 400m Notausgangsabstand zur Folge hätte.

Abhilfe schafft die Statistik, da 1.4 *Querschläge* zwar eine technisch eher schwer umsetzbare Variante darstellen, statistisch jedoch die korrekte Bewertungsgrundlage schaffen. Gebaut werden muss der Referenz-tunnel ohnehin nicht.

### 5.8.2 Anforderungen für Überlebensmodell

Um für einen Simulationsfall die Bereiche mit Personengefährdung zu berechnen ist zuerst eine Berechnung der repräsentativen Fluchtwegskonfiguration nötig.

Es muss angemerkt werden, dass hier eine wesentlich höhere Genauigkeit der simulierten Szenarien möglich ist, als dies im Falle der dreidimensionalen Rauchausbreitungssimulationen möglich wäre. Somit ist eine Projektion von vielen in Verkehrsstärke, Symmetrie, Ereignisort und Verzögerung variierten Szenarien auf die Stützstellen des groben Netzes durchzuführen. Dieses ‚Mapping‘ wird in Kapitel 5.6 im Detail beschrieben.

Es müssen in dem verwendeten Überlebensmodell folgende Effekte abgebildet werden können:

1. Möglichkeit der Verarbeitung unterschiedlicher Fluchtdistanzen für unterschiedliche Ausgangslagen in Referenz zum Feuer.

2. Möglichkeit der Verarbeitung unterschiedlicher Fluchtdistanzen für unterschiedliche Personengruppen. Diese sind vom Verkehr *unabhängig!*
3. Möglichkeit der Verarbeitung unterschiedlicher Fluchtdistanzen für unterschiedliche Fluchtzeitpunkte pro Ausgangslage. Diese sind vom Verkehr *abhängig!*
4. Möglichkeit zur genaueren Berechnung der repräsentativen Notausgangskonfiguration als auf Rauchausbreitungslevel, i.e. der Integration eines Mappingansatzes
5. Möglichkeit zur direkten Definition der ‚repräsentativen Notausgangskonfiguration‘ für Referenztunnel
6. Möglichkeit zur Definition von unterschiedlichen Notausgangskonfigurationen für Primärszenario, Sekundärszenario und Tertiärszenario

Insgesamt wird dadurch eine sehr detailgenaue Berechnung der statistisch erwartbaren Bereiche mit Personengefährdung möglich. In den folgenden Punkten ist die Vorgehensweise bei der Berechnung der repräsentativen Notausgangskonfiguration angeführt.

### 5.8.3 Implementierung der Einflussfaktoren

#### 5.8.3.1 Berechnung der repräsentativen Notausgangskonfiguration

##### 5.8.3.1.1 Referenztunnel

Da beim Referenztunnel die Vorgehensweise zur Berechnung des repräsentativen Notausgangsabstands wesentlich einfacher ersichtlich ist wird hiermit begonnen.

Die Idee ist, dass die Vorschrift, dass an jedem Ort im Tunnel die maximale Distanz zwischen zwei Notausgängen nicht mehr als  $500m$  betragen darf, auch bedeutet, dass an jedem Punkt  $x$  im Tunnel die Dichte von Notausgängen  $\rho_{NA} = \frac{1}{500} \cdot \frac{1}{m}$  ist.

Dies wiederum führt zu folgenden Überlegungen:

1. Wenn eine Person nach Aufforderung flieht, so ist das Kriterium für Bedrohung noch nicht erreicht. Die Person wird (durch Beschilderung gelenkt) zum nächsten Notausgang geleitet, der in 50% Wahrscheinlichkeit in positive Richtung und in 50% Wahrscheinlichkeit in negative Richtung liegen wird.

Jede Person muss somit mindestens  $1m$  in eine der beiden Richtungen gehen und maximal  $250m$ .

2. Wenn eine Person vor der Gefahr flieht, so stehen nur Notausgänge auf der einen Seite des Brandes zur Verfügung, da Personen grundsätzlich verrauchte Bereiche vermeiden [18]. Es kann damit vorkommen, dass Personen die volle maximale Fluchtwegdistanz von  $500m$  zurücklegen müssen. Dies kann in positive als auch in negative Richtung erfolgen. Der Brand wird generell nicht passiert.

Die daraus resultierenden Verteilungsfunktion  $\tilde{\Omega}(x, d)$  beschreiben die Wahrscheinlichkeit, dass eine Person vom Ausgangsort  $x$  in Referenz zum Brandort eine Distanz von  $d$  oder mehr zurücklegen muss. Für den Referenztunnel sind diese  $\tilde{\Omega}(x, d) \equiv \tilde{\Omega}(d)$  für alle  $x$  identisch. Die daraus resultierenden zweidimensionalen Funktionen sind in Abbildung 5-25 angegeben. In Bereichen um den Brandort ergibt sich jedoch dasselbe Übergangsmuster wie unten für den realen Tunnel abgebildet.

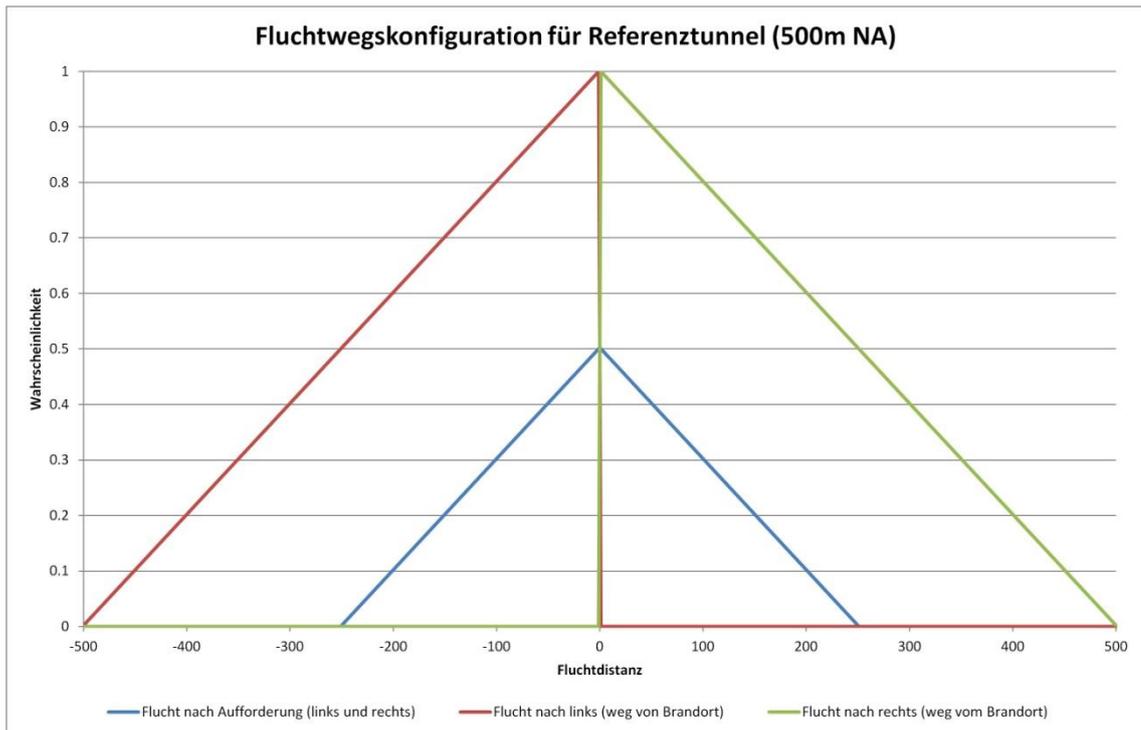


Abbildung 5-25: Notausgangskonfiguration Referenztunnel

### 5.8.3.1.2 Tatsächlicher Tunnel

Führt man die eben getroffenen Überlegungen für einen allgemeinen Tunnel mit lokalisierten Notausgängen durch, so erhält man für die Dichtefunktion der Notausgänge  $\rho_{NA}$ :

$$\rho_{NA}(x, d) = \int_{\text{Brandorte}} \mathcal{B}(\hat{x}) \cdot \int_{\text{Domain}} \delta(x - \tilde{x}) \cdot \delta((\hat{x} + x - x_{NA}) - d) d\tilde{x} d\hat{x} \quad 5-45$$

Dabei steckt die Impactfunktion aus dem Mappingalgorithmus  $\mathcal{I}_{\text{Szenario}} = \mathcal{I}_{\text{Verkehrsstärke}} \cdot \mathcal{I}_{\text{Symmetrie}} \cdot \mathcal{I}_{\text{Unfallort}} \cdot \mathcal{I}_{\text{Zeitverzögerung}}$  im Ausdruck  $\mathcal{B}(\hat{x})$ . Die Dichtefunktion ist somit als Summe über alle anwendbaren Szenarien definiert und muss noch mit

$$\int_{-\infty}^{+\infty} \rho_{NA}(x, \tilde{d}) d\tilde{d} = 1 \quad 5-46$$

normiert werden.  $d^\pm = (\hat{x} + x - x_{NA})$  bezeichnet den Abstand zum nach obigen Überlegungen gefundenen angesteuerten Notausgang.  $P_{Brand}(\hat{x})$  ist die aus der Unfallhäufigkeit abgeleitete Ereignisdichte für Brände. Die Vorgehensweise ist in Abbildung 5-26 dargestellt.

Tunnel mit gegebener Notausgangskonfiguration



Berechnung repräsentativer Notausgangskonfiguration

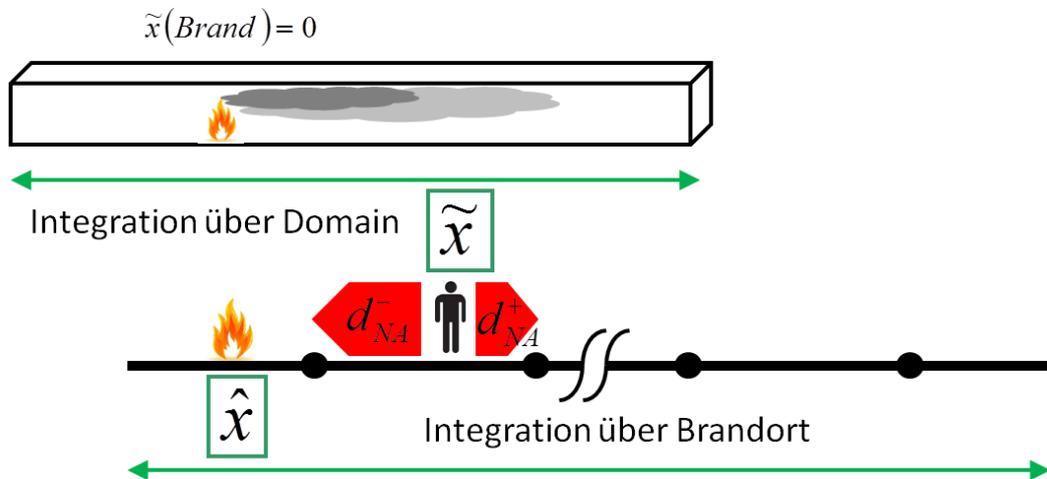


Abbildung 5-26: Berechnung der repräsentativen Notausgangskonfiguration

Die Verteilungsfunktion  $\Omega(x, d)$  erhält man durch Integration  $\Omega(x, d) = \int_{\hat{x}=0}^x \rho_{NA}(\hat{x}, d) \cdot d\hat{x}$ .

In Abbildung 5-26 ist die resultierende Notausgangskonfiguration für einen realen Fall abgebildet.

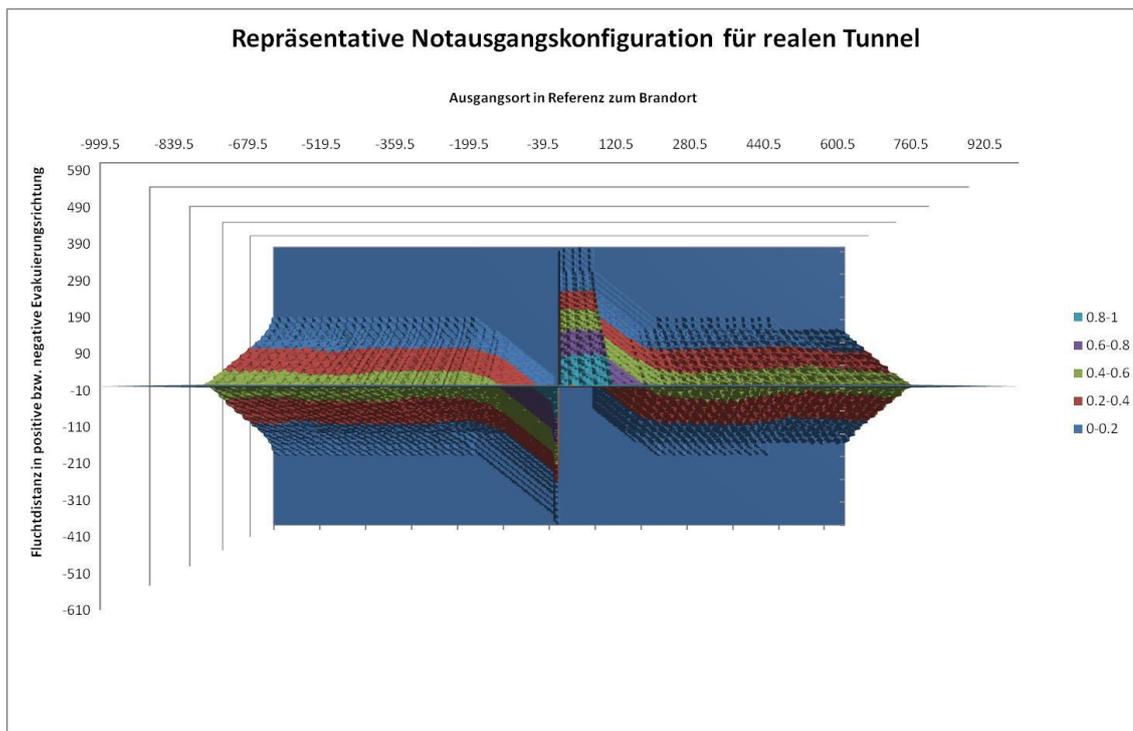


Abbildung 5-27: Notausgangskonfiguration realer Tunnel

Es ist klar ersichtlich, dass Personen auf der rechten Seite des Brandes vor dem Brand fliehen, also über einen gewissen Bereich dieselbe Notausgangskonfiguration haben, die sich aus selbst eingeleiteter Flucht ergibt. Der anschließende Bereich ergibt sich aus der Tatsache, dass der Brandort nicht passiert werden kann. Dasselbe gilt für die linke Seite. Es ist schön zu erkennen, dass die Wahrscheinlichkeit zunimmt, einen Notausgang zwischen sich und dem Brandort zu haben. Ab einer gewissen Distanz ist diese dann wieder 50% und die Verteilung wird wieder symmetrisch.

### 5.8.3.2 Berechnung der Mortalitätsrate

Mit der oben berechneten repräsentativen Konfiguration von Notausgängen  $\Phi(x, d)$ , der maximal zurücklegbaren Distanzen  $X(x, \mathcal{P}, \mathcal{T})$  für eine Person  $\mathcal{P}$  und dem Zeitpunkt der Fluchteinleitung  $\mathcal{T}$  lässt sich mit der Wahrscheinlichkeit eines Fluchtzeitpunkts  $P(\mathcal{T})$  resultierend aus der Verkehrszusammensetzung (Busanteil) und der Personenzusammensetzung  $P(\mathcal{P})$  die Sterblichkeit  $\Psi(x)$  einer Person am Ausgangsort  $x$  ableiten zu:

$$\Psi(x) = \sum_{\{\mathcal{P}\}} \sum_{\{\mathcal{T}\}} P(\mathcal{T}) \cdot P(\mathcal{P}) \cdot \Omega(x, X(x, \mathcal{P}, \mathcal{T})) \quad 5-47$$

Der Hintergrund dabei ist, dass eine Person, die 300m flüchten kann unter oben für den Referenztunnel getroffenen Annahmen (Flucht weg vom Brand) diesen mit 40% Wahrscheinlichkeit nicht erreicht. Die daraus erhaltene Sterblichkeit kann in weiterer Folge mit den Tunnelbereichen mit Personenbelegung überlagert werden.

## 5.9 Expositionsmodell

### 5.9.1 Motivation und Übersicht

Im Expositionsmodell wird die für das jeweilige Simulationsszenario erwartbare Verkehrskonfiguration berechnet. Es können durch die wesentlich höhere Anzahl von Fällen auf dieser Ebene sehr genaue Dichtefunktionen von Kfz  $Y(x)$  und somit statistisch erwartbare Personendichten  $\Phi(x)$  ermittelt werden. Insbesondere in Gegenverkehrstunneln jedoch auch in Richtungsverkehrstunneln mit Anhaltmöglichkeit im Tunnel ist dabei die paarweise Interaktion zweier getrennter Staubereiche zu berücksichtigen, das heißt von jedem sich aufbauendem Stauende kann ein Folgeunfall mit Brandentwicklung ausgehen.

### 5.9.2 Anforderungen an Expositionsmodell

Das Expositionsmodell greift im Grunde genommen auf die im Verkehrsmodell definierten Kfz Konfigurationen für ein gewisses Verkehrsszenario zurück, wie es auch in den beiden Levels der Strömungssimulation verwendet wird. Es ist jedoch für die statistisch repräsentative Abbildung eine große Anzahl von Fällen zu berechnen. Daraus ergeben sich für das Expositionsmodell folgende Anforderungen:

1. Möglichkeit zur Berechnung der Exposition eines Staubereichs durch einen räumlich getrennten zweiten Staubereich
2. Möglichkeit zur genaueren Berechnung der Personenkonfiguration als auf Rauchausbreitungslevel, i.e. der Integration eines Mappingansatzes
3. Möglichkeit zur Abbildung des Unfallzeitpunkts (Zeitpunkt des Auffahrens auf den Stau) für Mappingansatz

Insgesamt wird dadurch eine sehr detailgenaue Berechnung der statistisch erwartbaren Bereiche mit Personenbelegung möglich. In den folgenden Punkten ist die Vorgehensweise bei der Berechnung dieser Bereiche angeführt.

### 5.9.3 Implementierung der Einflussfaktoren

#### 5.9.3.1 Bestimmung des Zeitpunkts des Brandausbruchs

Für die Bestimmung des Einflusses des am Ort  $x$  auf den Stau auffahrenden Fahrzeugs auf das Simulationsszenario ist es nötig, den Zeitpunkt  $\tau$  des Auffahrens dieses Kfz zu bestimmen. Der Einfluss bestimmt sich dann aus den Impactfunktionen  $J_{\text{Zeitverzögerung}}(\tau)$ . Sie stellt die Anzahl der auf das Stauende auffahrenden Kfz dar. Multipliziert mit der Wahrscheinlichkeit eines Auffahrunfalls mit Brandentwicklung ergibt sich

die Wahrscheinlichkeit von Folgebränden am Stauende, die das Simulationsszenario betreffen.

Falls auch Brandausbruch im sich bildenden Stau durch technische Gebrechen (Tertiäreignis aus fließendem Verkehr) abgebildet werden soll, so muss auch eine eigene Impactfunktion  $\bar{J}_{\text{Zeitverzögerung}}(\tau, t_{OFF})$  mit dem Zeitpunkt (oder Verteilungsfunktion der Außerbetriebnahme bzw. der Abnahme des technisch bedingten Brandrisikos)  $t_{OFF}$ . Die stellt die Zeit eines Fahrzeugs dar, die es im Stau hinter der Verkehrsstörung verbringt. Multipliziert mit der Wahrscheinlichkeit eines pannenbedingten Brandausbruchs pro Betriebsstunde ergibt sich die Wahrscheinlichkeit eines Folgebrandes im Stau. Es muss jedoch angemerkt werden, dass dieser Effekt einen vernachlässigbaren Einfluss auf das Brandrisiko aufweist.

Für das Primäreignis ist der Zeitpunkt des Brandausbruchs trivialerweise konstant null.

$$\tau_{\text{Primär}} \equiv 0 \quad 5-48$$

Für das Sekundär – und Tertiäreignis errechnet sich Zeitpunkt  $\tau$  aus dem Abstand zum vorderen Stauende  $\chi$  (Unfallort mit dem Zeitpunkt des Anhaltens  $\tau_0 = 0$  oder einer Anhaltemöglichkeit im Tunnel [Ampel, Schranken, etc.] mit dem Schaltzeitpunkt  $\tau_0 = t_{STOP}$ ):

$$\tau_{\text{Sekundär}}(x) = \frac{(\chi - x)}{\varphi_{Kfz}} \cdot \varrho_{\text{Stau}} \cdot \bar{N}_{FS}(\bar{\chi x}) \quad 5-49$$

Wobei  $\varrho_{\text{Stau}} = 150^{Pkw - E} / km \cdot N_{FS}$ ,  $\bar{N}_{FS}(\bar{\chi x})$  die über die Distanz  $\bar{\chi x}$  gemittelte Anzahl der Fahrspuren und  $\varphi_{Kfz}$  die Verkehrsdichte in  $Pkw - E$  mit  $\varphi_{Kfz} = \frac{1}{3600} \cdot \frac{Pkw - E}{h}$  bezeichnen. Dabei entspricht ein  $Pkw$  einer  $Pkw - E$  und ein Schwerfahrzeug zwei  $Pkw - E$ . Zur genaueren Berechnung kann bei einem Wechsel der Fahrstreifenanzahl auch mit mehreren Abschnitten anstelle von Mittelung der Fahrpuranzahl gerechnet werden. Diese  $\bar{N}_{FS}(\bar{\chi x})$  beziehen sich jedoch auf die konkrete Distanz  $\bar{\chi x}$  und sind nicht mit der repräsentativen Fahrspuranzahl im nächsten Punkt zu verwechseln.

### 5.9.3.2 Berechnung der repräsentativen Fahrspuranzahl

Die repräsentative Anzahl von Fahrspuren berechnet sich in Analogie zur Berechnung der statistischen Notausgangsdichte mit Gleichung 5-44 in Kapitel 5.7 nach

$$\eta_{FS}(x) = \frac{1}{\Sigma} \int_{\text{Brandorte}} \mathcal{B}(\hat{x}) \cdot \int_{\text{Domain}} N_{FS}(\hat{x} + x) \cdot \delta(x - \tilde{x}) d\tilde{x} d\hat{x} \quad 5-50$$

Und der Normierung mit

$$\Sigma = \int_{\text{Brandorte}} \mathcal{B}(\hat{x}) \cdot \int_{\text{Domain}} \delta(x - \tilde{x}) d\tilde{x} d\hat{x} \quad 5-51$$

### 5.9.3.3 Berechnung der repräsentativen Personenbesetzung

Die repräsentative für das Simulationsszenario berechnet sich aus der statistisch erwartbaren Verkehrszusammensetzung

$$\bar{P}_{Pkw} = \frac{1}{\Sigma} \sum_{Szenarien} P_{Szenario} \cdot J_{Szenario} \cdot P_{Pkw}^{Szenario} \quad 5-52$$

$$\bar{P}_{Lkw} = \frac{1}{\Sigma} \sum_{Szenarien} P_{Szenario} \cdot J_{Szenario} \cdot P_{Lkw}^{Szenario}$$

$$\bar{P}_{Bus} = \frac{1}{\Sigma} \sum_{Szenarien} P_{Szenario} \cdot J_{Szenario} \cdot P_{Bus}^{Szenario}$$

Und der Normierung

$$\Sigma = \sum_{Szenarien} P_{Szenario} \cdot J_{Szenario} \quad 5-53$$

$\bar{P}_{Pkw}, \bar{P}_{Lkw}$  und  $\bar{P}_{Bus}$  bezeichnen dabei die Verkehrsanteile (entsprechend der Wahrscheinlichkeit, dass ein Kfz ein PKW bzw. LKW oder Bus ist). Daraus errechnet sich die statistische Kfz Dichte pro PKW Einheit zu

$$\bar{\rho} = \frac{P(Kfz)}{P(Pkw - E)} = \frac{1}{1 + \bar{P}_{Lkw} + \bar{P}_{Bus}} \quad 5-54$$

Und die statistische Personenbelegung pro Kfz zu

$$\bar{v} = \frac{N_{Pers}}{Kfz} = \bar{P}_{Pkw} \cdot N_{Pkw} + \bar{P}_{Lkw} \cdot N_{Lkw} + \bar{P}_{Bus} \cdot N_{Bus} \quad 5-55$$

Wobei  $N_{Pkw}, N_{Lkw}$  und  $N_{Bus}$  die durchschnittliche Personenbesetzung bezeichnen.

### 5.9.3.4 Berechnung der repräsentativen Kfz Dichte

Mit der finalen Staukonfiguration mit  $n$  getrennten Stauabschnitten  $[\mathbb{l}_i, \mathbb{r}_i]$  auf Basis einer gegebenen Szenarienannahme hinsichtlich Verkehr, Ort und Sperrung kann die daraus für das Simulationsszenario relevante Verkehrskonfiguration mittels der Impactfunktionen bestimmt werden für einen Ort  $x$  vor oder hinter dem Ort der Brandentwicklung:

$$Y_{Szenario}(x) = \quad 5-56$$

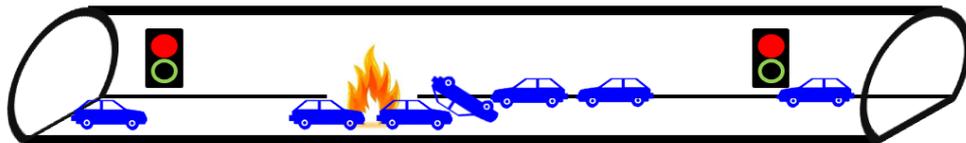
$$Q_{Stau} \cdot \sum_{r,s=1}^n \sum_{\mathbb{l}_r}^{\mathbb{r}_r} \int N_{FS}(\hat{x}) \cdot J_{Verzögerung}(\tau(\hat{x})) \cdot \int_{Domain} \eta_{FS}(x) \cdot \delta(x - \tilde{x}) \cdot \theta(\mathbb{l}_s - \hat{x}, \mathbb{r}_s - \hat{x}) d\tilde{x} d\hat{x}$$

Jede Position jedes Stausegments kann also Brandort sein (Integral über  $\tilde{x}$  und Summe über  $r$ ) und kann jeden Stausegment treffen (Summe über  $s$ ). Summiert über alle Variationsszenarien so erhält man

$$Y(x) = \rho_{Stau} \cdot \eta_{FS}(x) \cdot \sum_{Szenarien} P_{Szenario} \cdot \tilde{J}_{Szenario} \cdot \sum_{r,s=1}^n \sum_{\mathbb{I}_r} \int_{\mathbb{I}_r} N_{FS}(\hat{x}) \cdot J_{Verzögerung}(\tau(\hat{x})) \cdot \int_{Domain} \delta(x - \tilde{x}) \cdot \theta(\mathbb{I}_s - \hat{x}, \mathbb{I}_s - \hat{x}) d\tilde{x} d\hat{x} \tag{5-57}$$

Wobei  $\tilde{J}_{Szenario} = J_{Verkehrsstärke} \cdot J_{Symmetrie} \cdot J_{Unfallort}$  die um die Verzögerung reduzierte Impactfunktion darstellt. Die Vorgehensweise bei der Berechnung der statistisch erwartbaren Kfz und Personendichte ist in Abbildung 5-28 erläutert.

Tunnel mit endgültiger Staukonfiguration



Berechnung der statistisch erwartbaren Personendichte

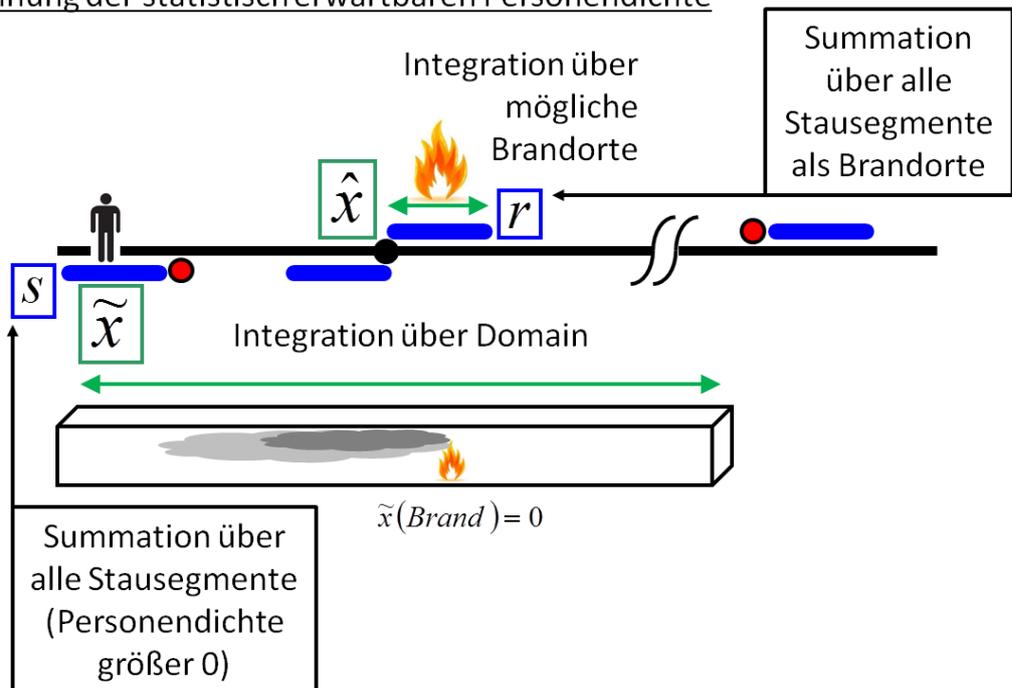


Abbildung 5-28: Berechnung der statistisch erwartbaren Kfz und Personendichte

### 5.9.3.5 Berechnung der statistisch erwartbaren Personendichte

Die statistisch erwartbare Personendichte berechnet sich aus Gleichung 5-57 mit der Anzahl Personen pro Fahrzeug  $\bar{v} = \frac{N_{Pers}}{Kfz}$  zu

$$\begin{aligned} \Phi(x) = & \varrho_{Stau} \cdot \bar{v} \cdot \eta_{FS}(x) \cdot \sum_{Szenarien} \mathcal{P}_{Szenario} \cdot \tilde{J}_{Szenario} \\ & \cdot \sum_{r,s=1}^n \sum_{\mathbb{I}_r} \int N_{FS}(\hat{x}) \cdot \mathcal{J}_{Verzögerung}(\tau(\hat{x})) \\ & \cdot \int_{Domain} \delta(x - \tilde{x}) \cdot \theta(\mathbb{I}_s - \hat{x}, \mathbb{I}_s - \hat{x}) d\tilde{x} d\hat{x} \end{aligned} \quad 5-58$$

Mit dieser und der vorhin abgeleiteten Sterblichkeitswahrscheinlichkeit  $\Psi(x)$  kann das Risiko des Simulationsszenarios berechnet werden.

## 5.9.4 Parameterwerte für Expositionsmodell

### 5.9.4.1 Staudichte

Die bereits eingeführte Staudichte  $\varrho_{Stau}$  stellt die Anzahl an PKW-Einheiten pro Kilometer und Fahrspur dar, die im Stau (vollständiger Verkehrsstillstand) erreicht wird. Sie wird mit

$$\varrho_{Stau} = 150^{Pkw} - E/km \cdot N_{FS} \quad 5-59$$

angegeben [2].

### 5.9.4.2 Personenbelegung

Für PKW, LKW und Busse werden folgende Personenbelegungen pro Fahrzeug angegeben [2]:

$$N_{Pkw} = 1.4 \text{ Personen} \quad 5-60$$

$$N_{Lkw} = 1.0 \text{ Personen}$$

$$N_{Bus} = 40 \text{ Personen}$$

## 5.10 Überlagerung

Der finale Schritt für die Berechnung der repräsentativen Schadensausmaße für ein Simulationsszenario ist kein eigentliches Modell mehr und wird hier nur im Sinne der Vollständigkeit angeführt.

Mit der statistisch erwartbaren Mortalität  $\Psi(x)$  und der statistische erwartbaren Personendichte  $\Phi(x)$  ergibt sich für den Risikoanteil des Simulationsszenarios  $\mathcal{S}_i$  am Gesamtrisiko  $\mathcal{R}_{GES}$

$$\mathcal{R}_i = \int_{\text{Domain}} \Phi_i(x) \cdot \Psi_i(x) dx \quad 5-61$$

Summation über alle Simulationsszenarien  $\mathcal{S}_i$  ergibt den Risikoerwartungswert

$$\mathcal{R}_{GES} = \sum_{\substack{\text{Simulations} \\ \text{szenarien}}} \mathcal{R}_i = \sum_{\substack{\text{Simulations} \\ \text{szenarien}}} \int_{\text{Domain}} \Phi_i(x) \cdot \Psi_i(x) dx \quad 5-62$$

Die durchschnittlichen Schadensausmaße der einzelnen Simulationsszenarien können mit  $\mathcal{M}_i = \mathcal{R}_i / \mathcal{P}_i$  durch Division durch die Wahrscheinlichkeit berechnet werden mit

$$\mathcal{P}_i = \sum_{\text{Szenarien}} \mathcal{P}_{\text{Szenario}} \cdot \tilde{\mathcal{J}}_{\text{Szenario}}$$

Dieser Risikoerwartungswert stellt die Anzahl der durch Brandwirkung pro Ereignis zu Tode kommenden Personen dar. Eine getrennte Ausgabe für Brandgrößen und Tunnelröhren ist nötig (jeweils normiert auf 1). Die Summation über die Simulationsszenarien darf also erst ab der Variation der Verkehrsstärke (nach der in Kapitel 4.3.2 angegebenen Reihenfolge) beginnen.

## 6 LITERATURVERZEICHNIS

- [1] Österreichische Forschungsgesellschaft Straße-Schiene-Verkehr, „RVS 09.03.11 Tunnel-Risikoanalysemodell,“ 2015.
- [2] ILF Beratende Ingenieure, „Bewertung der Sicherheit in Straßentunneln, Analyse der Standardrisiken in Straßentunneln 'Entwicklung einer Methode für eine Risikoanalyse gemäß EU-Richtlinie Tunnelsicherheit Artikel 13',“ 22.12.2008.
- [3] ASFINAG, „Datenbank Tunnelunfälle,“ 2006 - 2012.
- [4] ILF Beratende Ingenieure, „RVS-Arbeitsausschuss 09.03.11 TuRisMo: Auswertung der ASFINAG-Tunnelbrandstatistik 2006-2012,“ 14.10.2013.
- [5] Österreichische Forschungsgesellschaft Straße-Schiene-Verkehr, „RVS 09.03.12 Risikobewertung von Gefahrguttransporten in Straßentunneln,“ 2012.
- [6] ASFINAG, „Dauerzählstellen im höherrangigen Strassennetz,“ 2011.
- [7] F. Tarada, „Design, testing and Application of an Energy-Efficient Longitudinal Ventilation System,“ in *14th International Symposium on Aerodynamics and Ventilation of Tunnels*, Dundee, 2011.
- [8] Österreichische Forschungsgesellschaft Straße-Schiene-Verkehr, „RVS 09.02.31 Belüftung Grundlagen“.
- [9] ASFINAG Autobahnen- und Schnellstrassen-Finanzierungs AG, „Technisches Planungshandbuch - Tunnel - Lüftung (TLü) - Technische Richtlinie,“ 2012.
- [10] I. E. Idelchik, *Handbook of Hydraulic Resistance*, 3. Edition, Mumbai: Jaico Publishing House, 2006.
- [11] FVT Forschungsgesellschaft für Verbrennungskraftmaschinen und Thermodynamik mbH, ILF Beratende Ingenieure ZT GmbH, „Betrachtung der Wärmefreisetzung im Brandfall,“ Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie, 2010.
- [12] D. A. Purser, „Modeling time to incapacitation and death from toxic and physical hazards in aircraft fires,“ *AGARD*, Bd. 467, pp. 41/1-41/12, 1989.
- [13] UGMT Ltd., University of Greenwich, *buildingExodus V4.0 - User Guide and Technical Manual*, Greenwich, 2004.
- [14] Statistik Austria, „Statistisches Jahrbuch 2003“.

- [15] Statistik Austria, „Bevölkerungsdaten  
([http://www.statistik.austria.at/Fachbereich\\_03/bevoelkerung\\_tab2.shtml](http://www.statistik.austria.at/Fachbereich_03/bevoelkerung_tab2.shtml)),“  
2004.
- [16] K. Ando, H. Ota und T. Oki, „Forecasting the flow of people,“ *Railway  
Research Review*, Bd. 45, Nr. 8, 1988.
- [17] E. Kuligowski, „The process of human behavior in fires,“ US Department of  
Commerce, National Institute of Standards and Technology (NIST), 2009.
- [18] D. A. Purser, „Behavioural impairment in smoke environments,“ *Toxicology*,  
Bd. 115, Nr. 1-3, pp. 25-40, 1996.