

Masterarbeit

zum Erwerb des akademischen Grades eines
Diplom-Ingenieurs (Dipl.-Ing.)
der Studienrichtung Bergwesen
Masterstudium Rohstoffgewinnung und Tunnelbau
Schwerpunktfach Geotechnik und Tunnelbau

eingereicht am
Lehrstuhl für Subsurface Engineering
an der Montanuniversität Leoben

Robert Merlin

Leoben, im Juli 2011

Thema

**„Sicherheitskonzepte für lange,
tiefliegende Straßentunnel“**

Eidesstattliche Erklärung

Ich erkläre an Eides statt, dass ich diese Arbeit selbständig verfasst, andere als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel nicht benutzt und mich auch sonst keiner unerlaubter Hilfsmittel bedient habe.

Affidavit

I declare in lieu of oath, that I wrote this thesis and performed the associated research myself, using only literature cited in this volume.

(Unterschrift)

Datum

Name

Danksagung

Ich danke

meinen Eltern, die mich während der Dauer meines Studiums unterstützt haben,

Herrn Univ.-Prof. DI Dr. mont. Robert Galler für die Ausbildung am Lehrstuhl für Subsurface Engineering,

Herrn DI Dr. Andreas Goricki, der mich bei der Durchführung und Ausarbeitung dieser Arbeit unterstützt hat,

Herrn Ing. Reinhard Merlin und Herrn Ing. Wolfgang Wissounig für die Fachgespräche über die Betriebs- und Wartungserfahrungen unterschiedlicher Sicherheitseinrichtung und für die Möglichkeit die Tunnelwarte Klagenfurt und den Ehrentalerbergtunnel zu besichtigen und Fotos zu tätigen.

Herrn Richard Püntener vom Amt für Betrieb Nationalstrassen für die Auskünfte über den Gotthard Straßentunnel,

Herrn Michael Salamon vom Colorado Department of Transportation für die Auskünfte über den Eisenhower Memorial Tunnel,

und zu guter Letzt bei meinen Studienkollegen, mit denen ich meine Zeit in Leoben verbringen durfte.

Kurzfassung

Die Aufgabe dieser Arbeit ist es, die sicherheitstechnische Ausstattung für einen neu zu errichtenden Tunnel im Norden Indiens zu untersuchen. Um entsprechende Aussagen treffen zu können, wurde der Stand der Technik in Bezug auf Tunnelkonzepte und Sicherheitseinrichtungen erhoben. Weiters wurden ähnliche Bauwerke und deren Ausstattung mit einbezogen. Um detaillierte Aussagen über die Effizienz der Einrichtungen treffen zu können wurden Risikoanalysen an einem fiktiven Tunnel durchgeführt.

Abstract

The intention of this work is to study the safety equipment for a new tunnel project in the north of India. In a first step the state of the art was studied. Further the technical standards of some similar tunnel projects were collected. To be able to make conclusions regarding the efficiency of the safety equipment risk analysis were arranged.

Inhaltsverzeichnis

I	AUFGABENSTELLUNG	4
II	DEFINITION TUNNELSICHERHEIT	5
III	STAND DER TECHNIK	6
1.	TUNNELKONZEPTE.....	6
1.1.	<i>einröhrige Tunnel</i>	6
1.2.	<i>zweiröhrige Tunnel</i>	6
1.3.	<i>Tunnel mit Fluchtstollen</i>	7
1.4.	<i>alternative Konzepte</i>	7
2.	SICHERHEITSEINRICHTUNGEN IM TUNNEL.....	8
2.1.	<i>Fluchtwege</i>	8
2.2.	<i>Pannengebühren/Pannestreifen</i>	10
2.3.	<i>Belüftung</i>	11
2.4.	<i>Beleuchtung</i>	13
2.5.	<i>Löscheinrichtungen</i>	15
2.6.	<i>Leiteinrichtungen</i>	16
2.7.	<i>Wechselverkehrszeichen (WVZ)</i>	17
2.8.	<i>Lichtsignalanlagen</i>	17
2.9.	<i>Schrankenanlagen</i>	18
2.10.	<i>Brandmeldeanlagen</i>	18
2.11.	<i>Videoüberwachung</i>	19
2.12.	<i>Notrufsystem</i>	20
2.13.	<i>Tunnelfunk und Radioempfang</i>	21
2.14.	<i>Tunnelwarte</i>	22
2.15.	<i>Einsatzorganisationen</i>	23
2.16.	<i>Organisatorische Sicherheitsmaßnahmen</i>	23
2.17.	<i>Vorportaltbereich</i>	24
3.	VORSCHRIFTEN.....	26
3.1.	<i>Übergeordnete Regelwerke</i>	26
3.2.	<i>Österreich</i>	28
3.3.	<i>Schweiz</i>	30
3.4.	<i>Deutschland</i>	32
3.5.	<i>Großbritannien</i>	34
3.6.	<i>Indien</i>	35
IV	RISIKOANALYSE	37
1.	STRABENTUNNELTEST.....	37
2.	DETAILLIERTE RISIKOANALYSEN.....	38
V	BEISPIELE VON LANGEN TUNNELN	41
1.	KARAWANKENTUNNEL (AUT/SLO).....	41
2.	EISENHOWER TUNNEL (USA).....	42
3.	LAERDAL TUNNEL (NOR).....	43
4.	ARLBERG TUNNEL (AUT).....	44
5.	PLABUTSCHTUNNEL (AUT).....	45
6.	MONT BLANC TUNNEL (FRA/ITA).....	46

7.	GOTTHARD TUNNEL (CH)	47
8.	TAUERNTUNNEL (AUT).....	48
VI	UNTERSUCHUNG UNTERSCHIEDLICHER SICHERHEITSTECHNISCHER EINRICHTUNGEN.....	50
1.	TUNNELKONZEPTE.....	50
1.1.	<i>Gegenverkehrstunnel mit Längslüftung</i>	<i>50</i>
1.2.	<i>Gegenverkehrstunnel mit Querlüftung.....</i>	<i>50</i>
1.3.	<i>Gegenverkehrstunnel mit Querlüftung und Notausgängen alle 500m</i>	<i>50</i>
1.4.	<i>Richtungsverkehrstunnel mit Querlüftung und Notausgängen alle 500m.....</i>	<i>51</i>
1.5.	<i>Gegenverkehrstunnel mit Verkehrsbeeinflussungsanlage (VBA).....</i>	<i>52</i>
1.6.	<i>Gegenverkehrstunnel mit Blockabfertigung für LKW</i>	<i>53</i>
1.7.	<i>Gegenverkehrstunnel mit Tropfenzählersystem</i>	<i>53</i>
1.8.	<i>Gegenverkehrstunnel mit Fahrverbot für Gefahrguttransporter</i>	<i>53</i>
1.9.	<i>Gegenverkehrstunnel mit automatischem Löschesystem</i>	<i>54</i>
1.10.	<i>Gegenverkehrstunnel mit Schlauchhaspeln in allen Feuerlöschnischen.....</i>	<i>54</i>
1.11.	<i>Richtungsverkehrstunnel mit Querlüftung und Notausgängen alle 250m.....</i>	<i>54</i>
1.12.	<i>Richtungsverkehrstunnel mit Querlüftung und Notausgängen alle 100m.....</i>	<i>54</i>
2.	RISIKOANALYSE DER TUNNELKONZEPTE.....	55
3.	BEURTEILUNG DER VARIANTEN	57
VII	UMLEGUNG DER ERKENNTNISSE AUF EIN TUNNELPROJEKT IN INDIEN	59
1.	PROJEKTBESCHREIBUNG.....	59
2.	VEREINFACHTE RISIKOANALYSE.....	59
3.	SICHERHEITSEINRICHTUNGEN.....	61
3.1.	<i>Tunnelkonzept</i>	<i>61</i>
3.2.	<i>Fluchtwege.....</i>	<i>61</i>
3.3.	<i>Pannengebühren/Pannestreifen</i>	<i>62</i>
3.4.	<i>Belüftung.....</i>	<i>63</i>
3.5.	<i>Beleuchtung</i>	<i>63</i>
3.6.	<i>Löscheinrichtungen.....</i>	<i>63</i>
3.7.	<i>Leiteinrichtungen</i>	<i>64</i>
3.8.	<i>Wechselverkehrszeichen.....</i>	<i>65</i>
3.9.	<i>Lichtsignalanlagen.....</i>	<i>65</i>
3.10.	<i>Schrankenanlagen.....</i>	<i>65</i>
3.11.	<i>Brandmeldeanlage (BMA)</i>	<i>65</i>
3.12.	<i>Videoüberwachung</i>	<i>65</i>
3.13.	<i>Notrufsystem</i>	<i>66</i>
3.14.	<i>Tunnelfunk und Radioempfang</i>	<i>66</i>
3.15.	<i>Tunnelwarte</i>	<i>66</i>
3.16.	<i>Einsatzorganisationen.....</i>	<i>66</i>
3.17.	<i>Organisatorische Sicherheitsmaßnahmen.....</i>	<i>67</i>
4.	RISIKOANALYSE NACH RVS 09.03.11	67
VIII	ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS.....	69
IX	ABBILDUNGSVERZEICHNIS	71
X	TABELLENVERZEICHNIS	72
XI	LITERATURVERZEICHNIS	73

ANHANG A – RISIKOANALYSE FIKTIVER TUNNEL	1
1. EREIGNISBAUM AUS RVS 09.03.11	2
2. SCHEMATISCHER ABLAUF DER BERECHNUNG	3
3. INPUTDATEN	8
3.1. <i>Unveränderliche Inputdaten</i>	8
3.2. <i>Veränderliche Inputdaten</i>	9
3.2.1 GV – Tunnel mit Längslüftung.....	9
3.2.2 GV – Tunnel mit Querlüftung	10
3.2.3 GV – Tunnel mit Querlüftung und Notausgängen alle 500m	11
3.2.4 RV – Tunnel mit Querlüftung und Notausgängen alle 500m	12
3.2.5 Verkehrsbeeinflussungsanlage (VBA).....	13
3.2.6 Tropfenzählersystem	14
3.2.7 Blockabfertigung für LKW	15
3.2.8 Fahrverbot für Gefahrguttransporter.....	16
3.2.9 Einbau eines automatischen Löschsystems	17
3.2.10 Schlauchhaspeln in allen Feuerlöschnischen.....	18
3.2.11 RV – Tunnel mit Querlüftung und Notausgängen alle 250m.....	19
3.2.12 RV – Tunnel mit Querlüftung und Notausgängen alle 100m.....	20
ANHANG B – RISIKOANALYSE TUNNELPROJEKT INDIEN	1
1. TUNNELPROJEKT INDIEN	2
1.1. <i>GV und Querlüftung, NA alle 500m</i>	2
1.2. <i>GV und Querlüftung, NA alle 500m und Blockabfertigung LKW</i>	3
1.3. <i>RV und Querlüftung, NA alle 500m</i>	4
2. PLABUTSCHTUNNEL.....	5
2.1. <i>Einröhrig ohne NA (Stand 2003)</i>	5
2.2. <i>Zweiröhrig mit NA alle 500m (Stand 2011)</i>	6
3. ARLBERG - STRABENTUNNEL.....	7

I Aufgabenstellung

Ziel dieser Arbeit ist es, die sicherheitstechnische Ausstattung eines in Planung befindlichen Tunnels im Norden Indiens zu studieren. Dabei gilt es zuerst den Stand der Technik zu erheben. Rücksicht soll auf derzeit geltende Normen, ausgeführte Projekte und innovative Lösungen genommen werden.

Um eine Abschätzung treffen zu können, welche Sicherheitseinrichtungen für den in Indien zu planenden Tunnel in Frage kommen, ist es notwendig heraus zu finden, welche Einflüsse Sicherheitseinrichtungen auf die Unfallwahrscheinlichkeit bzw. deren Verlauf haben. Diese sind anhand von Erfahrungswerten und einer Risikoanalyse zu belegen.

II Definition Tunnelsicherheit

„Die Tunnelsicherheit während des Betriebes bezieht sich bei Straßentunneln in erster Linie auf die Sicherheit der Tunnelnutzer bei einem Ereignisfall.“ [41]

Diese Definition ist nicht vollständig. Ein Tunnel ist am sichersten, wenn es keine Ereignisfälle gibt. Werden Unfälle im Tunnel so gut es geht vermieden und sind die Sicherheitseinrichtungen auf dem neuesten Stand, dann ist ein Tunnel sicher.

Tunnel sind, wie aus Tabelle II-1 ersichtlich, im Vergleich zu anderen Straßen sicherer. Ereignet sich jedoch ein Unfall, sind die Folgen ungleich schwerer. Darum ist es in Tunnelbauwerken wichtig Unfälle zu vermeiden bzw. deren Folgen zu minimieren. [34]

	Autobahn	Schnellstraße	Landesstraße, Freiland	Tunnel
UPS	0,137	0,151	0,433	0,104
Getötetenrate	7,4	15,3	20,1	15,4

Tabelle II-1: Unfallrate und Unfallfolgen in Österreich [46]

UPS... Unfälle mit Personenschäden pro 1 Mio. Kfz-km
Getötetenrate... Tote pro 1 Mrd. Kfz-km

Die Unfallhäufigkeit kann durch Sensibilisierung der Autofahrer, aber auch durch Verbesserung der baulichen Situation gesenkt werden. Für den Ereignisfall sind entsprechende bauliche und organisatorische Sicherheitsvorkehrungen zu treffen. Diese sollen vor allem vom Ereignis (Feuer, Unfall) nicht betroffene Tunnelnutzer schützen.

III Stand der Technik

1. Tunnelkonzepte

In Abhängigkeit von der Lage, der Länge und dem zu erwartenden Verkehrsaufkommen wird ein Konzept entworfen, das dem Nutzer eine möglichst hohe Sicherheit im Betriebs-, aber auch im Ereignisfall bietet. Einige der gängigsten Konzepte werden hier beschrieben.

1.1. einröhrige Tunnel

Da der Individualverkehr früher nicht stark ausgeprägt war und viele Tunnel militärischen Zwecken dienen sollten, wurde auf Sicherheitstechnik wenig Wert gelegt. Das Verkehrsaufkommen war nicht groß, die Tunnel waren nicht lang und somit war auch das Gefahrenpotential gering. Mit dem steigenden Verkehrsaufkommen und dem Bau von hochrangigen Straßennetzen wurde die Fahrzeitverkürzung ein immer wichtigerer Faktor. So wurden anstatt Pässe mit kurzen Scheiteltunneln, tiefer liegende Basistunnel gebaut, die jedoch entsprechend länger sind. Aufgrund wirtschaftlicher Überlegungen wurden diese Gebirgsquerungen meist nur als einröhrige Tunnel mit Gegenverkehrsführung ausgeführt. Fluchtmöglichkeiten waren meist gar nicht vorhanden. Erst mit den Unfällen im Tauern-, Mont Blanc- und Gotthardtunnel wurde die Debatte über die Sicherheit in Tunneln in großem Maße angeregt. Mittlerweile wird auch in einröhrigen Tunneln versucht Fluchtmöglichkeiten für den Nutzer zu schaffen. Diese werden entweder unter der Fahrbahn oder in einem parallelen Rettungstollen angeordnet.

Tunnel mit Gegenverkehr und nur einer Röhre sind auch heute noch Stand der Technik. Es müssen jedoch einige Faktoren, wie geringes Verkehrsaufkommen, eventuelles Fahrverbot für Gefahrguttransporte bzw. Vorschreibung eines Begleitfahrzeuges, ein aufwendiges Lüftungssystem und entsprechende Fluchtwege beachtet werden.

1.2. zweiröhrige Tunnel

Da das Verkehrsaufkommen immer stärker wird, werden Neubauprojekte auf Autobahnen und Schnellstraßen fast ausschließlich als zweiröhrige Tunnel, die im Richtungsverkehr geführt werden, gebaut. Des Weiteren laufen die Bestrebungen dahin, einröhrige Tunnel mit einer zweiten Röhre auszustatten. In der EU müssen Tunnel auf Autobahnen und Schnellstraßen bis spätestens 2019 im Richtungsverkehr in zwei Röhren geführt werden. [27]

Dies dient in erster Linie dem Verkehrsfluss, so gehört zum Beispiel die Blockabfertigung und die daraus resultierenden Staus in den Sommermonaten vor dem Tauern- bzw. dem Katschbergtunnel mittlerweile der Geschichte an. Des Weiteren dient es der Sicherheit. Bei einem Brand oder ähnlichem Katastrophenfall

in einem Tunnel kann die zweite Röhre als Fluchtmöglichkeit für die Tunnelnutzer verwendet werden. Ebenso ist die Zufahrt der Einsatzkräfte über die nicht betroffene Röhre möglich. Entsprechende begehbare bzw. befahrbare Querschläge werden zwischen den Röhren ausgeführt.

Eine Verbesserung zum einröhrigen Tunnel ist nicht nur im Ereignisfall fest zu stellen. Bei Wartungsarbeiten wird für das Personal eine erhebliche Verbesserung erreicht. Diese sind im Gegensatz zum einröhrigen Tunnel ohne Gefahr durch den Fließverkehr möglich. Der Verkehr kann bei Arbeiten in einer Röhre durch die andere Röhre geführt werden. Eine Totalsperre des Streckenabschnittes ist somit nicht nötig.

Die entsprechende Lüftungstechnik für den Betriebs- und Ereignisfall ist ebenso wie in den einröhrigen Tunneln der Tunnellänge entsprechend zu dimensionieren.

1.3. Tunnel mit Fluchtstollen

Flucht- oder Rettungsstollen sind Bauwerke, die die Flucht aus dem Tunnel im Ereignisfall gewährleisten sollen. Oftmals werden sie im Bau als Erkundungsstollen genutzt und später zu einem Rettungsweg umfunktioniert. Fluchtstollen kommen meist bei einröhrigen Tunneln zum Einsatz. Bei Doppelröhrentunneln kann die Flucht über Querschläge in die andere Tunnelröhre erfolgen. Ob die Flucht vor einem Brand in einen Paralleltunnel mit Verkehr oder in einen reinen Fluchtstollen erfolgt ist aus sicherheitstechnischer Sicht sekundär. Es muss nur gewährleistet sein, dass der Tunnelnutzer sich in einem sicheren Bereich befindet.

Auch in Doppelröhrentunneln ist es möglich zusätzliche Fluchttunnel zu schaffen. Diese dienen jedoch meist der Frischluftzufuhr oder der Abwasserführung. Mit geringem finanziellem Aufwand können diese Bauwerke dann so adaptiert werden, dass sie als Fluchtweg dienen können.

1.4. alternative Konzepte

Da der Vortrieb bzw. der Ausbruch des Gebirges viel Geld kostet wird bei einigen Projekten versucht den ausgebrochenen Querschnitt bestmöglich zu nutzen. In

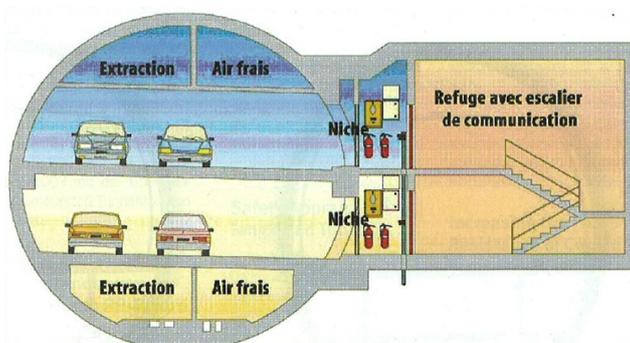


Abbildung III-1: Querschnitt des Doppelstocktunnels auf der A86 bei Paris [11]

Paris wurde zum Beispiel ein Doppelstocktunnel für PKW errichtet. Im Ernstfall dient die zweite Fahrbahnebene als Fluchtmöglichkeit. [37]

Wenn es die Verkehrsdichte erfordert, so können auch mehrere Tunnel nebeneinander aufgefahen werden. Dies kann bei kurzen innerstädtischen Tunnelbauwerken der Fall sein.

Ein solches Beispiel ist der neue Elbtunnel in Hamburg, durch den der Verkehr in insgesamt vier Röhren geführt wird.

2. Sicherheitseinrichtungen im Tunnel

2.1. Fluchtwege

Technische Notwendigkeit:

Im Brandfall breiten sich im Tunnel Hitze und Rauchgase aus. Um Personen in Sicherheit bringen zu können sind Fluchtwege erforderlich.

Funktionsweise:

In Doppelröhrentunneln werden Querschläge zwischen den beiden Röhren hergestellt. Diese sind mit brandbeständigen und rauchdichten Türen versehen, um die Fluchtwege rauchfrei zu halten. Zusätzlich sind die Fluchtwege mit entsprechender Lüftung in Überdruck zu versetzen, um ein hinein strömen des Rauches in den sicheren Bereich zu unterbinden.



Abbildung III-2: Notausgang [53]

Ist lediglich eine Röhre vorhanden, so sind auf anderem Weg Fluchtmöglichkeiten zu schaffen. Eine Möglichkeit ist es direkte Fluchtmöglichkeiten ins Freie zu schaffen. Dies ist nur bei entsprechend geringer Überlagerung möglich. Eine

Variante ist das Auffahren eines eigenen Fluchtstollens. Wird so ein Fluchttunnel gebaut, so kann die Evakuierung gleich erfolgen wie in einem Doppelröhrentunnel.

Gibt es keinen parallelen Stollen, so können Rettungsräume in Kavernen eingerichtet werden. Bei den Tunnelkatastrophen der letzten Jahre und Jahrzehnte hat man jedoch festgestellt, dass diese Lösung nicht zufrieden stellend ist. Die Brände können teilweise sehr lang andauern und eine große Hitze entwickeln. Dadurch werden die Rettungsräume im schlimmsten Fall zu einer tödlichen Falle. Heutzutage wird versucht, dass sich die Menschen auch in einröhri- gen Tunneln mit Hilfe des



Abbildung III-3: Querschlag

Selbstrettungskonzeptes nach Übertage bzw. in einen sicheren Bereich bewegen können. Bei Bestandsröhren kann der Fluchtweg gegebenenfalls in den Zuluftkanal verlegt werden. [35]

Die Rettungsräume gibt es immer noch, sie dienen jedoch nur als Zwischenstation auf dem Weg nach draußen. Sie sind mit Sprechverbindungen zur Tunnelwarte, Feuerlöschern und Erste Hilfe Material aus gestattet. Die Evakuierung der eingeschlossenen Personen erfolgt dann über Rettungsschächte. Diese sind entweder unter, über oder neben dem Fahrraum angeordnet. [45]

Ebenfalls gibt es Ansätze bzw. auch verwirklichte Projekte, in denen es angedacht ist, dass sich der Tunnelnutzer mit seinem Fahrzeug aus dem Tunnel retten kann. Dies hat den Vorteil, dass bei richtigem Verhalten der Nutzer der Tunnel schnell geräumt werden kann. Ein weiterer Vorteil ist, dass die Fahrzeuge entfernt werden, die im Brandfall eine zusätzliche Brandlast darstellen können. Die Selbstrettung mit dem Fahrzeug kommt vor allem in einröhriigen Tunneln ohne Fluchtwege zum Einsatz. Meist werden in regelmäßigen Abständen Kavernen gebaut, die ein Wenden mit den Fahrzeugen ermöglichen. Bei entsprechender baulicher Gestaltung ist die Evakuierung mit den Fahrzeugen auch in Doppelröhrentunneln möglich. Dazu ist jedoch ein umfangreiches Verkehrsleitsystem vor und im Tunnel erforderlich. [10]

Unabhängig davon wie die Fluchtmöglichkeit gestalte ist: Der Tunnelnutzer muss im Ereignisfall den Notausgang schnellstmöglich finden. Um die Orientierung zu erleichtern werden Fluchtwegbeschilderungen angebracht. Diese sollten in regelmäßigen Abständen beleuchtet sein. In Deutschland ist es zusätzlich Vorschrift, dass an den Notausgangschildern eine klare Blitzleuchte angebracht wird, um die Orientierung im verrauchten Zustand zu erleichtern. [55]

Um die Fluchtweg-markierungen auch bei komplettem Ausfall der Normal- und Notbeleuchtung finden zu können, ist der Einsatz von nachleuchtenden Fluchtwegmarkierungen möglich. Diese Markierungen speichern das durch Beleuchtung einfallende Licht und geben es bei Dunkelheit ab. Solche Markierungen sind vor allem in Straßentunneln in der Schweiz im Einsatz. [38]

An der Uni München [28] wurden Versuche durchgeführt, die mittels optischen und akustischen Signalen auf das richtige Verhalten im Ereignisfall hinweisen sollen. So wurden durch Sprachanweisung 85% der Probanden in die richtige Richtung gelotst. 89% der Versuchsteilnehmer erreichten den Notausgang im verrauchten Versuchsraum mittels Handlauf und zusätzlichem Lauflicht. Der Handlauf führt an der Tunnelwand bis zum Notausgang und leitet den Flüchtenden somit in den sicheren Bereich. Das Lauflicht erwirkt mittels optischem Effekt dasselbe.

Betrieb:

Im Notfall sind die Tunnelnutzer so schnell wie möglich von der Tunnelwarte auf das richtige Verhalten aufmerksam zu machen. Ein unverzügliches Verlassen der Gefahrenstelle bei einem Brand ist sehr wichtig. Erfolgt dies zu spät, so ist es nicht mehr möglich die Notausgänge zu erreichen, da die Rauchausbreitungsgeschwindigkeit höher als die Fluchtgeschwindigkeit eines Menschen ist. [28]

Besonderheit bei langen Tunneln:

Der Weg vom Notausgang bis ins Freie kann sich bei langen Bauwerken dementsprechend verlängern. Es sollten Möglichkeiten vorhanden sein, um Verletzte mittels Fahrzeug zu bergen.



Abbildung III-4: Pannenbucht mit
FLN, NA und NRN [53]

2.2. Pannenbuchten /Pannenstreifen

Technische Notwendigkeit:

Um den Verkehr nicht durch defekte Fahrzeuge zu behindern ist es notwendig, dass auf Autobahnen und auch in Tunneln auf Autobahnen Abstellmöglichkeiten für defekte KFZ vorhanden sind.

Funktionsweise:

Auf der rechten Seite der Fahrbahn wird ein durchgehender Pannenstreifen errichtet. Um Kosten zu sparen ist es möglich, in regelmäßigen Abständen Pannenbuchten zu errichten, in denen defekte Fahrzeuge abgestellt werden können.

Betrieb:

Um bei Pannen entsprechend reagieren zu können, sind die Abstellmöglichkeiten meist mit Notruf – und Löscheinrichtungen ausgestattet. Wird ein Fahrzeug in der Pannenbucht abgestellt, so wird dies mittels Induktionsschleifen detektiert.

Besonderheit bei langen Tunneln:

Durchgehende Pannenstreifen würden bei langen Tunneln zu erhöhten Kosten führen. Darum werden bei langen Tunneln meist Pannenbuchten errichtet.

2.3. Belüftung

Technische Notwendigkeit:

Im Normalbetrieb trägt die Belüftung zur Verbesserung der Luftqualität bei, indem sie Abluft, die mit Staub, Kohlenmonoxid, Stickoxiden und Kohlenwasserstoffverbindungen versehen ist, aus dem Tunnel befördert. Im Brandfall ist es Aufgabe der Lüftung den Rauch so gut wie möglich ab zu saugen bzw. so zu lenken, dass die flüchtenden Personen nicht durch die Rauchgase gefährdet werden.

Funktionsweise:

Für Tunnel gibt es unzählige verschiedene Lüftungskonzepte, die von der Länge, der Steigung bzw. dem Gefälle, der Seehöhe, dem Verkehrsaufkommen, der Verkehrsart (Richtungs- oder Gegenverkehr) oder aber auch von der Überlagerung abhängen. Sie alle beruhen jedoch auf einigen grundlegenden Lüftungskonzepten bzw. deren Kombinationen.



Abbildung III-5: Längslüftung [31]

Die einfachste Lüftung ist die natürliche Längslüftung. Sie kann bei entsprechenden lokalen Gegebenheiten, wie zum Beispiel Druckunterschieden an den Portalen selbst für längere Tunnel zur Anwendung kommen. In diesem Fall sind zusätzlich Strahlventilatoren an zu bringen, die im Brandfall eingesetzt werden können. Auf mechanische Lüfter kann bis zu einer Tunnelänge von ca. 500m verzichtet werden. Werden Strahlventilatoren eingesetzt, so spricht man von einer mechanischen Längslüftung. Diese Lüftungsart erfolgt vor allem bei Bauwerken mit Richtungsverkehr. Die Ventilatoren werden meist reversibel ausgeführt. Damit ist gewährleistet, dass der Luftstrom beliebig gelenkt werden kann.



Abbildung III-6: Längslüftung mit Rauchgasabsaugung [31]

Eine verbesserte Variante der Längslüftung ist die Längslüftung mit Rauchgasabsaugung im Brandfall. Die Luftsäule wird im Regelbetrieb wie bei der Längslüftung durch den Tunnel bewegt. Im Bedarfsfall kann jedoch zielgerichtet Rauch aus einzelnen Bereichen des Tunnels abgesaugt werden.

Die baulich aufwendigste Variante der Lüftung stellt die Halb- bzw. Vollquerlüftung dar. Die Frischluftzufuhr und die Abluftabfuhr erfolgen über getrennte Kanäle.

Somit wird Frischluft über den gesamten Tunnel verteilt eingebracht. Ebenso wird Abluft aus dem Fahrraum abgesaugt. Bei Anwendung dieser Lüftungsvariante bleibt die Luftqualität auf der gesamten Strecke annähernd gleich. Vor allem in langen Tunneln kommt dieses Lüftungsprinzip zum Einsatz. Bei optimal arbeitendem System ist fast keine Luftlängsströmung vorhanden. Die Luft wird fast ausschließlich quer zur Fahrtrichtung bewegt. [31]

Reicht eine Belüftung allein nicht aus, um den Fahrraum mit Frischluft zu versorgen ist es technisch möglich die Abluft aus dem Tunnel mit unterschiedlichen Filtern zu

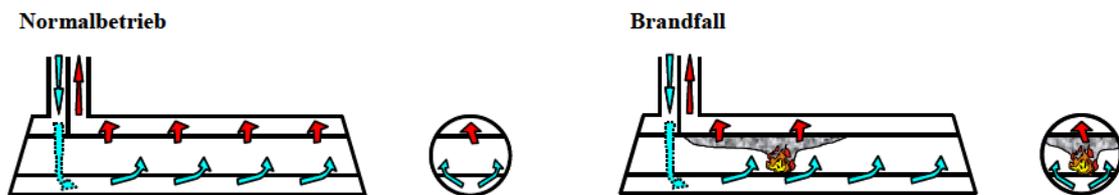


Abbildung III-7: Vollquerlüftung [31]

reinigen und dem Tunnel wieder zu zuführen. Um den Staub aus der Abluft zu filtern, können mechanische und elektrostatische Filter eingesetzt werden. Mechanische Filter setzen sich jedoch laufend mit Partikeln zu. Darum wird der Vorzug den elektrostatischen Abscheideeinrichtungen gegeben. Um die Abluft wieder zurückführen zu können müssen jedoch auch Stickoxide (NO_x), Kohlenwasserstoffe und vor allem das Kohlenmonoxid entfernt werden. Um dies zu erreichen werden Adsorptions-, Absorptions- oder biologische Filter installiert. Die Erfahrungen aus Versuchsanlagen haben jedoch gezeigt, dass nur die Reinigung der Luft von Staub erfolgreich ist. Das herausfiltern von Schadstoffen in Gasform funktioniert nur in der Theorie. [30]

Betrieb:

Die Steuerung der Lüftungseinrichtungen erfolgt automatisch aufgrund der gemessenen Werte der Sichttrübung und der CO - Konzentration, die verteilt über



Abbildung III-8: Strahlventilatoren [53]

den Tunnel öfters gemessen werden. Für den Brandfall gibt es meist fertig ausgearbeitete Lüftungsmodelle, die bei Bedarf zum Einsatz kommen. Im Verlauf der Löscharbeiten ist es möglich, die Lüftungseinrichtungen von der Tunnelwarte aus manuell zu steuern, um so ein optimales Arbeiten der Rettungskräfte zu gewährleisten. [31]

Besonderheit bei langen Tunneln:

Bei langen Tunnelbauwerken ist grundsätzlich eine Querlüftung ein zu bauen. Meist ist es zusätzlich zu den Lüftungszentralen an den Portalen nötig Schächte bzw. Stollen aufzufahren über die der Tunnel belüftet werden kann.

Besonderheit bei hoch gelegenen Tunneln:

Mit steigender Seehöhe nimmt der CO – Ausstoß der Fahrzeuge zu. Vor allem bei benzingetriebenen Fahrzeugen tritt dieser Effekt auf. Die Lüftung ist dementsprechend zu bemessen. [29]

2.4. BeleuchtungTechnische Notwendigkeit:

Die Beleuchtung in Tunneln hat mehrere Aufgaben. In erster Linie soll sie den Übergangsbereich von der Freilandstrecke in den Tunnel beleuchten. Dem Straßennutzer soll so eine ausreichende Sicht ermöglicht werden. Weiters hat die

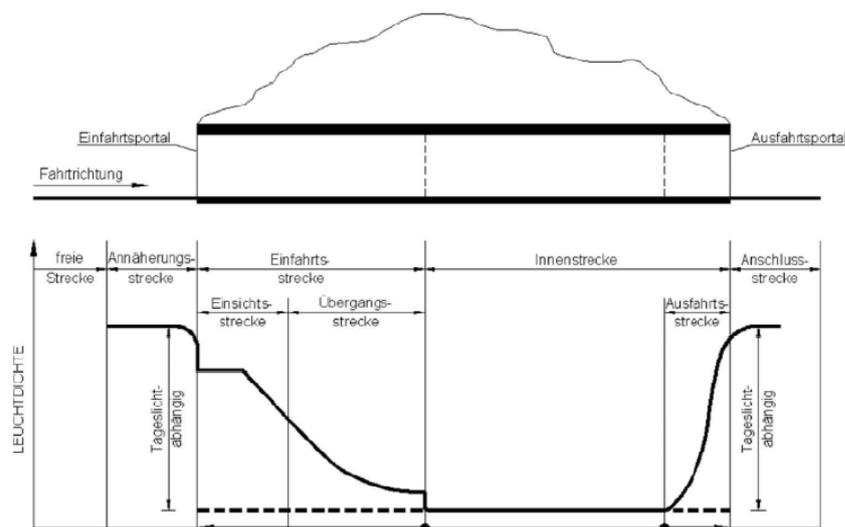


Abbildung III-9: Schematischer Verlauf der Leuchtdichte im Tagesverlauf [19]

Beleuchtung einen psychologischen Effekt. Viele Fahrer hätten in einem dunklen Tunnel Angst. Mit entsprechender Beleuchtung wird dieser Effekt vermieden. Zusätzlich zu diesen Punkten ist es nötig den Tunnel aus zu leuchten, damit die Videoüberwachung möglich ist. Diese erfolgt nämlich meist mit Tageslichtkameras. [9]

Funktionsweise:

Um dem Tunnelnutzer beste Sicht zu bieten wird der Einfahrtsbereich hell beleuchtet. Die Beleuchtungsintensität nimmt im Verlauf des Tunnels ab, da sich das menschliche Auge an die dunklere Umgebung gewöhnt. Zusätzlich wird durch verminderte Beleuchtung Energie eingespart. Im Eingangsbereich liegt die Leuchtdichte meist zwischen 100 und 400 Candela pro Quadratmeter, in der Innenstrecke kann sie bis auf 3-10 cd/m² abgesenkt werden. [9]

Stand der Technik ist der Einsatz des Prinzips der Gegenstrahlbeleuchtung. Das heißt, dass die Beleuchtung, dem Fahrzeuglenker entgegen leuchtet, ohne ihn zu blenden. Früher wurde die symmetrische Beleuchtung eingesetzt, die den Nachteil hat, dass sie bei gleichem Lichtstrom wesentlich geringere Leuchtdichten auf der Fahrbahn erzeugt. [9]

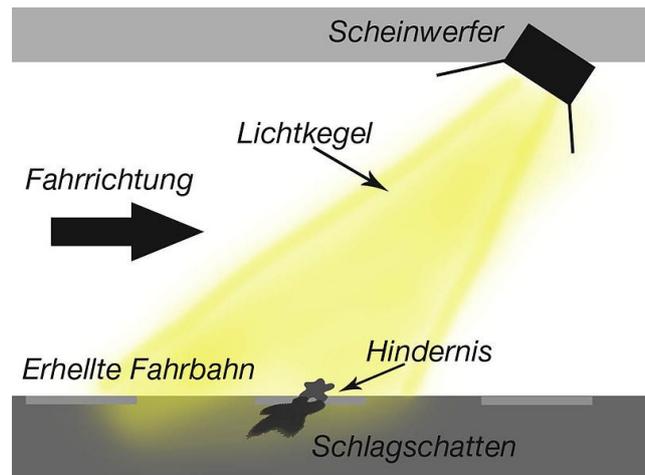


Abbildung III-10: Prinzip der Gegenstrahlbeleuchtung [60]

Derzeitiger Stand der Technik ist der Einbau von Hochdruck Entladungslampen bzw. Leuchtstofflampen. Einige Bauwerke wurden in den letzten Jahren für Versuche mit LED (light emitting diode) Beleuchtung ausgestattet. Um Vergleiche mit konventionellen Beleuchtungseinrichtungen herstellen zu können, wurden diese ebenso installiert. [47]



Abbildung III-11: Hochdruck Entladungslampen im Einfahrtsbereich

Betrieb:

Die Steuerung der Beleuchtung erfolgt automatisch. Aus diesem Grund gibt es an den Portalen Messstellen, an denen der Lichteinfall gemessen wird. Dies gewährleistet, dass zu jeder Zeit optimale Beleuchtungsverhältnisse für den Tunnelnutzer vorliegen. [9]

Besonderheit bei langen Tunneln:

Um Energie zu sparen kann die Beleuchtung bei langen Tunnelbauwerken in Tunnelmitte abgesenkt werden.

2.5. Löscheinrichtungen

Technische Notwendigkeit:

Um Brände in Tunneln bekämpfen zu können, sind Löscheinrichtungen zu installieren. Sie sollen dem Tunnelnutzer ermöglichen kleine Brände selbst zu löschen. Um bei größeren Bränden einen Löscheinsatz zu ermöglichen, ist es nötig Einrichtungen für die Einsatzkräfte zur Verfügung zu stellen.



Abbildung III-12: Feuerlöschnische mit Schlauchhaspel [53]

Funktionsweise:

In fast allen neuen Tunnelbauwerken sind Löschwasserleitungen vorhanden. Diese werden meist aus eigenen Wasserreservoirs gespeist. Bei entsprechender Verfügbarkeit kann die Löschwasserleitung an die öffentliche Wasserversorgung angeschlossen werden. Die Versorgungssicherheit des Tunnels im Brandfall muss trotzdem gewährleistet bleiben. Die Menge des zu bevorratenden Wassers hängt von länderspezifischen Richtlinien ab. Die Leitungen können als Nass- oder Trockenleitungen ausgeführt werden. Nassleitungen sind dauerhaft mit Wasser gefüllt, Trockenleitungen werden erst im Bedarfsfall befüllt.

Die Wasserentnahme aus der Leitung kann im Tunnel entweder über Schlauchhaspel mit Schaumzumischung oder über Hydranten erfolgen. Der Vorteil der Schlauchhaspel liegt darin, dass sie auch von Laien bedient werden kann. Bei der Wahl der Abstände von Schlauchhaspeln bzw. Hydranten ist es sinnvoll mit Vertretern der Feuerwehr Rücksprache zu halten.

In vielen Fällen ist es Standard, dass in den Notrufnischen bzw. bei den Notrufeinrichtungen Feuerlöscher vorhanden sind. Diese können von Tunnelnutzern bei Bedarf entnommen werden um Kleinbrände zu löschen. Es ist aber auch möglich Feuerlöscher in regelmäßigen Abständen an der Tunnelwand bzw. in kleinen Nischen zu montieren.

Einige Firmen [2] sind derzeit dabei automatische Löschesysteme für den Tunnel zu errichten, die ähnlich den Systemen in großen Gebäudekomplexen funktionieren. Die Produktpalette reicht von herkömmlichen Sprinkleranlagen bis hin zu Hochdruck Zerstäuberanlagen. Vor allem bei Hochdruckanlagen konnten im Versuchsstadium gute Löschergebnisse erzielt werden. Selbst wenn der Brand nicht vollständig gelöscht werden konnte, so wurde die Brand- und Rauchentwicklung eingedämmt. [8]

Betrieb:

Hydranten müssen für den Tunnelnutzer nicht zugänglich sein. Diese stehen nur den Einsatzkräften zur Verfügung. Feuerlöschnischen mit Schlauchhaspeln sollten gekennzeichnet und zugänglich sein, um dem Verkehrsteilnehmer die Möglichkeit zu bieten das Feuer zu löschen. Es wird empfohlen die Entnahme eines Feuerlöschers in der Tunnelwarte anzeigen zu lassen.

Besonderheit bei langen Tunneln:

Da die Fülldauer mit der Länge der Löschwasserleitung steigt sind lange Tunnel mit Nassleitungen auszustatten.

2.6. LeiteinrichtungenTechnische Notwendigkeit:

Damit der Tunnelnutzer die für ihn vorgesehenen Fahrstreifen benutzt bzw. um ihn auf etwaige Sperren einzelner Fahrstreifen im Tunnel hinzuweisen ist es notwendig, Leiteinrichtungen zu installieren.

Funktionsweise:

Die einfachsten Leiteinrichtungen sind Leitlinien bzw. Sperrlinien, die dem Tunnelnutzer den Fahrstreifenverlauf und die Fahrstreifenbegrenzung signalisieren. Um im Gegenverkehrsbereich auf das Abkommen von der richtigen Fahrspur hingewiesen zu werden, wurden in vielen Tunneln Rumpelstreifen installiert.

Die neuesten Leiteinrichtungen sind LED Leuchten, die am Fahrbahnrand bzw. am Notgehwegrand angebracht werden. Diese signalisieren im Normalbetrieb den Fahrbahnrand. Im Katastrophenfall dienen sie als zusätzliche Orientierungshilfe.

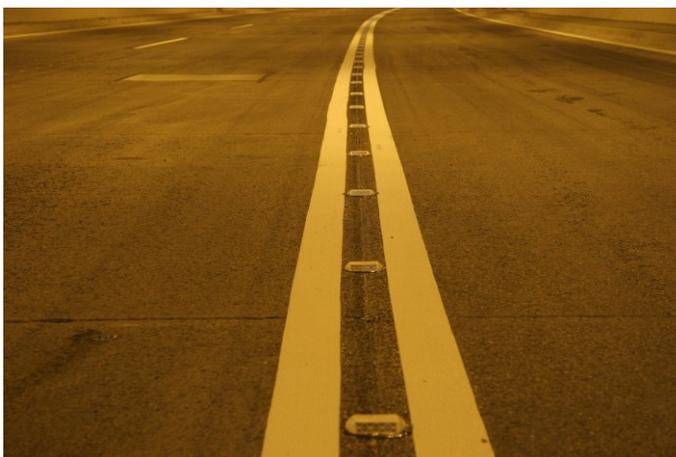


Abbildung III-13: Sperrlinie mit Rumpelstreifen [53]

Zusätzlich zu den vorhin genannten Leiteinrichtungen werden neuerdings immer öfter Fahrstreifenanzeiger angebracht, durch die es möglich ist einzelne Fahrspuren zu sperren.

Betrieb:

Bei Pannen oder Wartungsarbeiten können die LED Leiteinrichtungen von dauerleuchtend auf blinkend geschaltet werden. Somit wird

dem Fahrer signalisiert, dass im Tunnel kein Normalbetrieb herrscht und er mit Hindernissen auf der Fahrbahn oder mit abgestellten Fahrzeugen in der Pannenbucht rechnen muss. Mit den Fahrstreifenanzeigern wird der Fahrer des KFZ auf rechtzeitigen Spurwechsel bei einem Unfall bzw. bei Wartungsarbeiten hingewiesen.

2.7. Wechselverkehrszeichen (WVZ)

Technische Notwendigkeit:

Treten in einem Tunnel Ereignisse auf, die nicht alltäglich sind, können mit Hilfe von Wechselverkehrszeichen dementsprechende Verkehrsverhaltensregeln an die Fahrer weiter gegeben werden.

Funktionsweise:

Wechselverkehrszeichen sind Verkehrszeichen, die entweder durch mechanisches Umschalten der Tafel oder durch LED Signalisierung unterschiedliche Verkehrszeichen darstellen können.



Abbildung III-14: WVZ

Bei der ersten Generation von Wechselverkehrszeichen konnte nur die vorgeschriebene Höchstgeschwindigkeit geändert werden. Die neueren Wechselverkehrszeichen sind mit LED Technologie ausgestattet. Der erste Vorteil liegt darin, dass sie besser erkennbar sind, als gar nicht oder nur indirekt beleuchtete Schilder. Der zweite Vorteil liegt darin, dass unterschiedliche Verkehrszeichen dar gestellt werden können.

Betrieb:

Bei Pannen, Unfällen oder Wartungsarbeiten im Tunnel können diverse Geschwindigkeitsbeschränkungen, Überholverbot, aber auch Fahrverbot (bei Tunnelsperre) aufgeschaltet werden. Zusätzlich können die Anzeigen auf blinkend geschaltet werden, um so einen Fahrer auf sein Fehlverhalten, wie zu hohe Geschwindigkeit oder zu geringen Abstand hin zu weisen.

2.8. Lichtsignalanlagen

Technische Notwendigkeit:

Um Tunnelbenutzer vor Gefahren im Tunnel zu warnen bzw. gänzlich an der Weiterfahrt zu hindern, ist es notwendig Lichtsignalanlagen anzubringen.

Funktionsweise:

Vor den Tunnelportalen und in regelmäßigen Abständen im Tunnel werden Ampeln angebracht. Die Steuerung erfolgt über die Tunnelwarte.

Betrieb:

Bei grünem Licht ist die Durchfahrt durch den Tunnel ohne Gefahr möglich. Bei gelb blinkendem Licht, ist mit einer Gefahr (defektes KFZ, Wartungsarbeiten im Tunnel, belegte Pannenbucht) zu rechnen. Rotlicht signalisiert, dass eine Weiterfahrt zu unterlassen ist. Bei Brandalarm werden automatisch alle Ampeln auf rot geschaltet, um nachfolgende Fahrer vom Gefahrenbereich fern zu halten.



Abbildung III-15:
Lichtsignalanlage
im Tunnel

Besonderheit bei langen Tunneln:

Ampelanlagen sollten im Bereich der Pannenbuchten angebracht werden. Die Funktion ist dieselbe, wie jene der Portalampeln.

2.9. Schrankenanlagen

Technische Notwendigkeit:

Um die Autofahrer daran zu hindern rote Ampeln, die vor Gefahr warnen sollen zu ignorieren bzw. zu übersehen, werden Schrankenanlagen bei den Lichtsignalanlagen installiert.

Funktionsweise:

Bei den Ampeln werden zusätzlich Schrankenanlagen, ähnlich jenen bei Bahnüberquerungen, installiert. Die Steuerung erfolgt gekoppelt mit den Ampeln.

Betrieb:

Die Schranken sind im Normalfall geöffnet. Wird die Ampel auf Rot geschaltet, so schließen sich die Schranken automatisch. Somit verhindern sie ein weiteres Einfahren von Fahrzeugen in den bereits gesperrten Tunnel. Zusätzlich zu den Schrankenanlagen werden meist auch Info LED Paneele angebracht, um den Tunnelnutzer über den Grund der Sperre in Kenntnis zu setzen. Über das richtige Verhalten kann der Tunnelnutzer entweder über den Verkehrsfunk (siehe Kapitel 2.13) oder über Lautsprecheranlagen informiert werden.

Besonderheit bei langen Tunneln:

Dadurch, dass bei langen Tunneln in regelmäßigen Abständen Ampeln vorhanden sind, ist es nötig in denselben Abständen Schranken zu installieren.

2.10. Brandmeldeanlagen

Technische Notwendigkeit:

Brände sollen so schnell wie möglich erkannt werden, da sie eine große Gefahr für Tunnelnutzer darstellen. Dazu ist es unerlässlich Brandmeldeanlagen zu installieren.

Funktionsweise:

Um Brände so schnell wie möglich detektieren zu können, werden unterschiedliche Brandmelder verbaut.

Die einfachste Alarmierung erfolgt über Druckknöpfe, die vom Tunnelnutzer im Brandfall betätigt werden. Zusätzlich installiert werden Linienbrandmelder. Diese Brandmelder sind in immer gleich bleibenden Abständen an einem Kabel angeschlossen, das durch den gesamten Tunnel führt. Die Branddetektion kann auf zwei Arten erfolgen. Bei der ersten Variante wird die



Abbildung III-16: SOS- und Feuertaster

Absoluttemperatur gemessen. Wird ein gesetzter Maximalwert überschritten, so wird Brandalarm ausgelöst. Die zweite Variante beruht auf dem Prinzip der Relativmessung. Hier wird beurteilt wie schnell sich die Temperatur in einer gewissen Zeit erhöht. Bei einem rasanten Temperaturanstieg wird der Alarm ausgelöst. [37]

Linienbrandmelder reagieren jedoch nur auf Hitze. Darum werden in neueren Tunnels zusätzlich zu diesen Systemen Auswerteeinheiten installiert, die auf die Videobilder und die Sichttrübungsmessung zurückgreifen. Vor allem Schwelbrände verursachen zuerst Rauch bevor sich große Hitze entwickelt. Dieser Rauch wird durch die Sichttrübungsmessung, aber auch durch die Videoüberwachung registriert.

Betrieb:

Linienbrandmelder sind nahezu wartungsfrei, in der Anschaffung günstig und sehr zuverlässig in der Detektion. Bei der Auswertung der Videobilder liegt das Problem in einer Kombination aus Wetter, Technik und Mensch. Bei nasser Fahrbahn kann es zu Sprühnebelbildung kommen. Dieser wird dann von der Videoauswertung als Brand gemeldet. Da dies bei Regen oder Schneefall dauerhaft vorkommt, wird die Technik teilweise vom Bedienpersonal deaktiviert und ist somit auch für den restlichen Tunnel außer Kraft gesetzt.

2.11. Videoüberwachung

Technische Notwendigkeit:

Um Gefahrensituationen zu erkennen und dementsprechende Maßnahmen zu setzen ist eine Überwachung mittels Video in Tunneln sinnvoll.

Funktionsweise:

Eine Verkehrsüberwachung über Video ausschließlich durch den Menschen ist heute nicht mehr Stand der Technik. Neue Videosysteme greifen auf automatische Verkehrserfassung zurück. Bei diesem Verfahren werden die aufgenommenen Bilder mittels EDV-Programmen ausgewertet. Diese können Staus, liegen gebliebene Fahrzeuge, Fahrzeuge, die sich bedeutend verlangsamen, aber auch Rauch erkennen und schalten den dementsprechenden Bereich der Videoüberwachung auf. Die Auswertesoftware ist mittlerweile so gut, dass ihre Trefferquote bei über 90% liegt. Das Überwachungspersonal ist dann dafür verantwortlich, die richtigen Maßnahmen zu treffen. [7]



Abbildung III-17: Leuchtdichte- und Videokamera

Betrieb:

Bei Betätigung von SOS Knöpfen, Alarmknöpfen für Feuer, Entnahme eines Feuerlöschers, Abnahme eines Notruftelefons, Befahren einer Pannenbucht oder Anschlagen eines Brandmelders wird bei neuesten Anlagen sofort der entsprechende Bereich in der Überwachungszentrale auf geschaltet, damit sich der Verantwortliche ein Bild vom Geschehen im Tunnel machen kann. Wird eine Pannenbucht befahren oder detektiert die EDV einen Störfall, so erfolgt dieselbe Aktion.

Ein Problem, das bei der Videoüberwachung auftreten kann, ist die Verschmutzung der Kameras. Diese müssen in regelmäßigen Abständen gereinigt werden. Weitere Probleme, die mit diesem System auftreten können sind im Abschnitt 2.10 Brandmeldeanlagen beschrieben.

2.12. NotrufsystemTechnische Notwendigkeit:

Wenn es im Tunnel eine Panne, einen Unfall oder einen Brand gibt, so erreicht man die Tunnelwarte mittels Notruftelefonen. Diese können dann entsprechende Maßnahmen ergreifen, um die Sicherheit der Tunnelnutzer zu gewährleisten.



Abbildung III-18:
Notrufeinrichtung

Funktionsweise:

In regelmäßigen Abständen sind im Tunnel Notruftelefone, SOS- und Feuertaster angebracht. Bei Betätigen der Notrufeinrichtung wird eine Sprechverbindung zur Tunnelwarte aufgebaut. Bei Betätigung eines Notruftasters wird der dementsprechende Bereich der Videoüberwachung in der Tunnelwarte aufgeschaltet.

Betrieb:

Die beste Möglichkeit um Hilfe zu holen ist das Notruftelefon. Mit ihm kann eine Sprechverbindung zur Tunnelwarte hergestellt werden, um die Lage detailliert schildern zu können.

Bei Betätigung eines Feuertasters werden sofort Maßnahmen zum Schutz der übrigen Verkehrsteilnehmer getroffen. Als erstes werden die Portalampeln auf rot geschaltet, die Beleuchtung wird in diesem Bereich hochgefahren und die Videoüberwachung wird aufgeschaltet. Weitere Schritte sind dann von der Tunnelwarte aus zu setzen. Bei Betätigung der SOS-Taster wird das Licht verstärkt und die Videoüberwachung für den entsprechenden Bereich aktiviert. Eine Sperrung des Tunnels obliegt dem Verantwortlichen in der Tunnelwarte. Anzumerken ist, dass man mit dem Mobiltelefon zwar eine Sprechverbindung zu den Einsatzorganisationen herstellen kann, jedoch im Normalfall nicht zur Tunnelwarte.

2.13. Tunnelfunk und Radioempfang

Technische Notwendigkeit:

Über das UKW-Signal einzelner Radiosender kann sich die Tunnelwarte einschalten und somit auf das richtige Verhalten im Normal-, als auch Katastrophenfall hinweisen. Der Tunnelfunk ist wichtig, um die Kommunikation von Betriebsdiensten, Feuerwehr, Polizei, Rettung und sonstigen Hilfsorganisationen im Normal-, aber auch im Ereignisfall sicher zu stellen. In einigen Tunneln stellen Mobilfunkanbieter den Mobilfunkempfang sicher. Dieser soll die bestmögliche Netzabdeckung herstellen, hat sicherheitstechnisch jedoch keine Bedeutung.



Abbildung III-19: Relaisstation für Mobilfunkempfang

Funktionsweise:

Im Normalfall kann der Tunnelnutzer über das Autoradio Radiosender empfangen. Im Bedarfsfall kann die Tunnelwarte das Programm unterbrechen und Durchsagen tätigen.

Der Tunnelfunk ist ein lokales Funksystem, das auf den Tunnel und die Vorportalbereiche beschränkt ist. Ebenso ist die Verbindung mit der Tunnelwarte möglich.

Betrieb:

Über das UKW Signal können Autofahrer auf Gefahren im Tunnel aufmerksam gemacht werden. Ebenso ist es möglich im Ernstfall Lenker über das richtige Verhalten zu informieren.

Der Tunnelfunk ist bei den Einsatzorganisationen auf eigenen Kanälen hinterlegt. Findet ein Einsatz im Tunnel statt, so wird auf diese Kanäle um geschaltet. Somit ist im gesamten Bauwerk uneingeschränkte Kommunikation möglich.

2.14. Tunnelwarte

Technische Notwendigkeit:

Eine Tunnelwarte dient als zentrale Lenk- und Schaltzentrale eines Tunnels. Sie ist sowohl im Normal-, als auch im Ereignisfall für die Steuerung sämtlicher Einrichtungen zuständig.

Funktionsweise:

Der Standort der Tunnelwarten ist in der heutigen Zeit eher nebensächlich, da die Steuerungen durchwegs automatisiert sind und nicht manuell vor Ort bedient werden müssen. Meist werden mehrere Tunnel durch dieselbe Warte gemanagt.

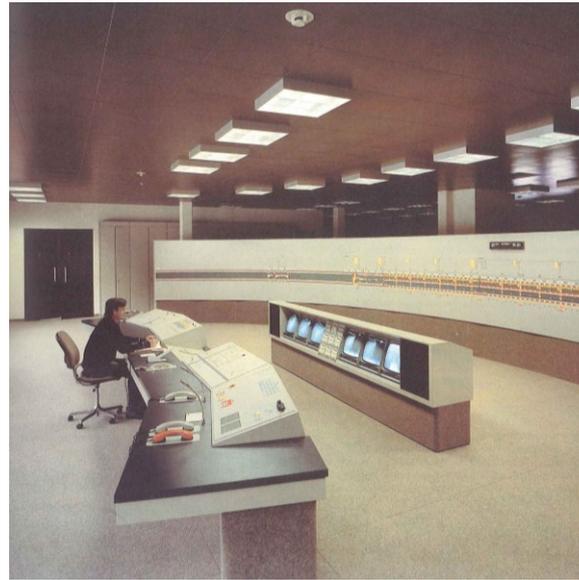


Abbildung III-20: Tunnelwarte des Arlberg Tunnels (1978) [3]

In der Warte treffen die Messdaten ein und werden ausgewertet, um so die Steuerung von Licht- und Lüftungsanlagen zu übernehmen. Ebenso werden hier die Verkehrsbilder analysiert und Notrufe entgegen genommen. Im Bedarfsfall können über die Tunnelwarte Durchsagen für die Verkehrsteilnehmer über UKW eingespeist werden. Ebenso ist die Aufschaltung der Lautsprecher im Tunnel möglich, um Anweisungen zu geben.



Abbildung III-21: Tunnelwarte Klagenfurt

Betrieb:

Um im Brandfall richtig reagieren zu können, sind in vielen Tunnels verschiedene Lüftungsprogramme hinterlegt, die im Bedarfsfall eingesetzt werden. In Absprache mit den Einsatzorganisationen kann die Tunnelwarte jedoch in diese Programme eingreifen, um ein optimales Arbeiten der Hilfskräfte zu ermöglichen.

Die Auswertung der Videoüberwachung erfolgt durch Computerprogramme, aber auch durch Mitarbeiter. Im Notfall dient die Tunnelwarte als zentrale Kommunikationsstelle der Einsatzdienste.

2.15. Einsatzorganisationen

Technische Notwendigkeit:

Um im Ereignisfall Hilfe leisten zu können ist es nötig, Einsatzorganisationen zur Verfügung zu haben, die mit den Gegebenheiten im Tunnel vertraut sind.

Funktionsweise:

Für eine bestmögliche Hilfestellung im Katastrophenfall, müssen Feuerwehren, die sich an oder in der Nähe der Tunnelportale befinden die richtige Ausstattung haben. Die Verständigung der Rettungskräfte muss im Bedarfsfall zügig und in der richtigen Reihenfolge von statten gehen.

Betrieb:

Die Ausrüstung der Rettungskräfte muss regelmäßig beübt werden, um im Umgang mit ihr vertraut zu werden. Bei Übungen ist großer Wert auf die Kommunikation zwischen den Einsatzorganisationen und dem Betreiberpersonal zu legen. Dies soll sowohl im Übungsablauf, als auch nach Abschluss der Übung der Fall sein. Gewonnene Kenntnisse aus den Übungen sollen in zukünftige Notfallpläne eingearbeitet werden. Sowohl im Übungsfall als auch im Ernstfall ist von den Einsatzorganisationen ein Verantwortlicher in die Tunnelwarte zu entsenden. Dieser dient als Mittelsmann zwischen der Einsatzleitung vor Ort und der Tunnelwarte.

Besonderheit bei langen Tunneln:

Bei langen Tunneln sind entsprechende Notfallpläne zu erarbeiten. Die Rettungskräfte sind über die Zufahrtmöglichkeiten zu den Portalen, Betriebszentralen und etwaigen Notausstiegen in Kenntnis zu setzen. Bei einzelnen Objekten kann es notwendig sein, die Feuerwehren mit Spezialgeräten auszurüsten.

2.16. Organisatorische Sicherheitsmaßnahmen

Technische Notwendigkeit:

Damit im Einsatzfall jeder Beteiligte weiß, wie er sich zu verhalten hat, sind Notfallpläne zu erstellen und Tunnelnutzer mit den Einrichtungen vertraut zu machen.

Funktionsweise:

Die Maßnahmen, die mit Einsatzkräften zu treffen sind, wurden in Kapitel 2.15 beschrieben. Tunnelnutzer sollten mittels Infokampagnen auf das richtige Verhalten im Tunnel hingewiesen werden.

Betrieb:

KFZ Lenker sollten über das Verhalten bei Tunneldurchfahrten und das richtige Verhalten in Gefahrensituationen informiert werden. Dies kann zum Beispiel mittels Infokampagnen bzw. Foldern, die an Rastplätzen in Tunnelnähe ausgegeben werden erfolgen. Sicherheitseinrichtungen erreichen nur ihre optimale Wirkung, wenn der Tunnelnutzer auch weiß, wie er sie zu benutzen hat. [15]

Besonderheit bei langen Tunneln:

Je länger ein Tunnel ist, desto länger sind auch die Anfahrtswege bei einem Ereignis im Inneren des Tunnels. Dies ist bei der Ausarbeitung der Notfallpläne zu berücksichtigen. [18] [33]

2.17. VorportalbereichTechnische Notwendigkeit:

Für Einsatzkräfte sind für den Notfall Aufstellflächen und dementsprechende Zufahrtswege bereit zu stellen, um die Anfahrtszeit zu verkürzen.

Funktionsweise:

Bei zweiröhriigen Tunneln ist es üblich für Betriebs- und Einsatzdienste eine Überfahrt zwischen Richtungsfahrspuren und eine Zufahrtsmöglichkeit aus einem niederrangigerem Straßennetz her zu stellen. Dieser Überfahrtsbereich kann zugleich als Aufstellfläche für Einsatzdienste bzw. bei Bedarf auch als Hubschrauberlandeplatz dienen. [40]



Abbildung III-22: Vorportalbereich Ehrentalerbergtunnel [39]

Bei einröhriigen Tunneln ist die Schaffung von Aufstellflächen schwieriger. Während bei Doppelröhrentunneln die Überfahrten großzügig geschaffen werden können bzw. die zweite Richtungsfahrbahn verwendet werden kann, ist dies bei einröhriigen Bauwerken nicht möglich. Darum wird meist dazu übergegangen, eigene Stellflächen seitlich der Portale zu schaffen. Ob ein eigener Hubschrauberlandeplatz ein zu richten ist, richtet sich nach den örtlichen Gegebenheiten.



Abbildung III-23: Notrufstation, Hydrant und Beschallungsanlage im Vorportalbereich

Sicherheitseinrichtungen, die (unabhängig von der Verkehrsführung im Tunnel) im Vorportalbereich installiert werden sollten sind Notruf- und Löscheinrichtungen. [21] [40] [50]

Betrieb:

Der Vorportalbereich sollte möglichst übersichtlich gestaltet werden, um den Straßennutzer nicht vom wesentlichen, nämlich vom

Tunnelportal ab zu lenken. Etwaige Vorankündigungen auf Verkehrssender,

Geschwindigkeitsbeschränkungen oder sonstige ablenkende Hinweisschilder sind vom Portal möglichst fern zu halten. [40] [50]

Besonderheit bei langen Tunneln:

Gibt es neben der bzw. den Tunnelröhren zusätzliche Fluchtmöglichkeiten, so sind am Ende jedes Fluchtweges entsprechende Aufstellflächen zu schaffen.

3. Vorschriften

3.1. Übergeordnete Regelwerke

Die Regelungen und Vorschriften, die für Tunnelbauwerke gelten, sind meist länderspezifisch unterschiedlich. Es gibt jedoch Richtlinien der EU [27] und der UN [54], die einen Mindeststandard für gewisse Tunnelbauwerke festsetzen. Verpflichtend sind diese Regelwerke jedoch nicht überall. Lediglich die EU Richtlinien sind für das transeuropäische Straßennetz in der EU verpflichtend. Weiters gibt es unterstützend zu diesen Regelwerken Empfehlungen von verschiedenen Ingenieursvereinigungen.

Eine dieser Vereinigungen ist die International Tunnelling and Underground Space Association (ITA). Diese gibt in ihrem Bericht [34] aus dem Jahr 2010 an, dass in erster Linie versucht werden sollte, Unfälle zu vermeiden. Ist dies nicht möglich, so sollen die Sicherheitseinrichtungen das Schadensausmaß so gering wie möglich halten. Um die optimale Ausstattung der Tunnel zu gewährleisten sind laut ITA technische Inspektoren, Tunnelmanager und unabhängige Sicherheitsorgane dazu angehalten die Ausstattung der Tunnel zu überprüfen und gegebenenfalls eine Verbesserung zu veranlassen.

An Mindestsicherheitseinrichtungen wird ein gut beschilderter Fluchtweg, in regelmäßigen Abständen vorhandene Feuerlöscher, ein Videoüberwachungssystem und ein durchgehend empfangbarer Verkehrsfunk über das Autoradio gefordert. Tunnel mit einer Röhre sollten nur gebaut werden, wenn das zu erwartende Verkehrsaufkommen sehr gering ist. Ansonsten sollte der Bau von zwei Röhren angestrebt werden. Bei einröhrigen Tunneln ist eine Fluchtmöglichkeit für den Katastrophenfall zu gewährleisten. Die Abstände zwischen den Notausgängen sollten unter 500m, bei zweiröhrigen Tunneln unter 350m liegen. Es ist darauf zu achten, dass Fluchtwege, die in Kavernen oder ähnlichen Bauwerken liegen und somit keinen Ausgang ins Freie haben zu vermeiden sind. Aus organisatorischer Sicht sind Notfallpläne für unterschiedliche Ereignisfälle im Tunnel zu erstellen und mit den entsprechenden Einsatzorganisationen zu koordinieren.

Im April 2004 wurde die letztgültige Richtlinie der EG [27] über Mindestanforderungen an die Tunnelsicherheit von Tunneln im transeuropäischen Straßennetz heraus gegeben. Diese sieht vor, dass für jeden in Planung, Bau oder Betrieb befindlichen Tunnel ein Manager einzusetzen ist, der für die Dokumentation von Unfällen und Störfällen verantwortlich ist. Außerdem ist er dazu angehalten einen Sicherheitsbeauftragten zu ernennen. Die Aufgaben des Sicherheitsbeauftragten liegen in der Notfallplanung, in der Planung von Betriebsabläufen, in der Schulung der Einsatzkräfte aber auch in der Überprüfung der Funktionalität von baulichen Einrichtungen und Tunnelausstattung. Über diesen zwei genannten Stellen ist eine Untersuchungsstelle zu setzen, die ihre Aufgaben stichprobenartig überprüft.

Sollte das Verkehrsaufkommen 10.000 Fahrzeuge pro Tag und Fahrstreifen übersteigen, so ist das Tunnelprojekt als Doppelröhrentunnel auszuführen. Bei Bestandstunneln, die nur über eine Röhre verfügen, ist der Ausbau zu einem Doppelröhrentunnel vorgeschrieben. Wesentlich geringer, nämlich ab 2.000 Fahrzeugen pro Tag und Fahrstreifen, müssen folgenden Anforderungen erfüllt werden. Es sind Notausgänge auszuführen, die entweder ins Freie, in eine zweite Tunnelröhre oder in einen Fluchtstollen führen. Schutzräume, die keinen Fluchtweg ins Freie bieten dürfen nicht mehr gebaut werden. Sind Notausgänge vorhanden, so darf der Abstand zwischen ihnen nicht größer als 500 Meter sein. Bei Doppelröhrentunneln ist mindestens alle 1.500m ein mit Einsatzfahrzeugen befahrbarer Querschlag herzustellen. In Gegenverkehrstunneln ab 1.500m Länge ist ein Maximalabstand zwischen den Pannenbuchten von 1.000m einzuhalten. Es ist eine Beleuchtung einzubauen, die angemessene Sichtverhältnisse über die gesamte Tunnelstrecke bietet. Fluchtwege sind deutlich zu kennzeichnen.

Ab 1.000 m Länge ist ein mechanisches Lüftungssystem vor geschrieben, das den Tunnel sowohl zu Normal-, zu Spitzenverkehrszeiten und auch im Brandfall entsprechend be- bzw. entlüften kann. Die Notrufeinrichtungen für Tunnelbenutzer dürfen einen Maximalabstand von 150 Metern aufweisen. In allen Bauwerken ist eine Löschwasserleitung vorzusehen, die höchstens alle 250m mit einem Hydrant ausgestattet werden muss.

Ab 3.000m Länge muss eine Leitstelle eingerichtet werden, die die Videoüberwachung, Lüftungs-, Verkehrs und Beleuchtungssteuerung übernimmt. In der Leitstelle muss es möglich sein, Durchsagen über die Beschallungsanlage bzw. über den Verkehrsfunk (sofern installiert) zu tätigen. Ebenfalls angesteuert werden können müssen die Lichtsignalanlagen, die sich vor den Portalen bzw. im Abstand von höchstens 1.000m im Tunnelinneren befinden. Im Tunnel vorhandene Sicherheitseinrichtungen, wie Empfangsmöglichkeit für den Verkehrsfunk, Notrufnischen, Fluchtwege, Feuerlöscher und Pannenbuchten sind zu kennzeichnen.

Zusätzlich zu diesen baulichen Maßnahmen ist es noch vorgeschrieben Notfallpläne für den Ernstfall auszuarbeiten, Informationskampagnen zur Information der Tunnelnutzer und regelmäßige Übungen für das Tunnelpersonal und Einsatzdienste abzuhalten.

Von der Arbeitsgruppe für Tunnelsicherheit der Vereinten Nationen (UN) wurde im Dezember 2001 ein Bericht [54] über die empfohlenen Standards in Tunneln veröffentlicht. Dieses Bulletin ist sehr stark an die in Europa gängigen Normen und auch an die Empfehlung der EG angelehnt. Viele Anforderungen werden nur sehr oberflächlich beschrieben. So wird der Abstand der Querschläge mit 200 – 500m (oder weniger) angegeben. Der Bericht kann zwar als Leitfaden verwendet werden, bietet aber in sicherheitstechnischer Sicht keine Änderungen zu den von der EG herausgegebenen Mindeststandards für Tunnel in der Europäischen Gemeinschaft.

3.2. Österreich

Die Sicherheitseinrichtungen, die in Tunnelbauten in Österreich vorhanden sein müssen, sind im Straßentunnel Sicherheitsgesetz (STSG) [40] vom 8.Mai 2006 geregelt. Die spezifischen baulichen Anforderungen sind in separaten Richtlinien und Vorschriften für das Straßenwesen, kurz RVS, geregelt.

So, wie auch von der EG gefordert, gibt es in Österreich eine Tunnel-Verwaltungsbehörde, einen Tunnel-Manager und einen Tunnel-Sicherheitsbeauftragten. Die Aufgaben sind gleich verteilt wie in der EG Richtlinie 2004/54/EG vom 29.04.2004. Ebenfalls gibt es Mindeststandards an Sicherheitseinrichtungen, von denen nur in Ausnahmefällen abgewichen werden darf. Der Sicherheitsstandard muss jedoch durch alternative Sicherheitseinrichtungen bzw. Bauweisen erhalten bleiben. [40]

Doppelröhrentunnel sind ab einem Verkehrsaufkommen von 10.000 Fahrzeugen pro Tag und Fahrstreifen auszuführen. Strecken, auf denen die Werte darunter liegen können mit einem Gegenverkehrstunnel ausgeführt werden. [40]

Notausgänge sind in Tunneln, in denen das Verkehrsaufkommen 2.000 Fahrzeuge pro Tag und Fahrstreifen beträgt herzustellen. Zulässig sind dabei direkte Ausgänge ins Freie, Querschläge zwischen den Tunnelröhren, Ausgänge zu einem Fluchtstollen oder Schutzräume mit einem von der Tunnelröhre getrennten Fluchtweg. Nicht zulässig sind Lösungen, bei denen der Fluchtweg in eine Schutzraum ohne Zugang ins Freie führt. Der Abstand der Notausgänge sollte bei Neubauten 250m nicht übersteigen. Es ist jedoch möglich diesen Wert auf bis zu 500m zu erhöhen, wenn eine Risikoanalyse nach RVS 09.02.31 bzw. 09.03.11 keine wesentliche Steigerung des Risikos für Tunnelnutzer zeigt. [40]

Bei zweiröhriigen Tunneln ist alle 1.000m eine von Einsatzdiensten nutzbare Überfahrmöglichkeit zwischen den beiden Röhren aus zu führen. Im selben Abstand sich auch Pannengebühren einzuplanen, wobei diese im Richtungsverkehr auf der rechten Seite der Fahrbahn liegen sollen. Bei Gegenverkehrstunneln sind die Abstellmöglichkeiten auf beiden Seiten anzuordnen. In jedem Fall ist am Beginn einer Pannengebühren eine Notrufeinrichtung einzuplanen. [40]

Der Tunnel ist durchgehend angemessen zu beleuchten. Für Ausfälle ist eine Notbeleuchtung vorzusehen, die eine minimale Sicht gewährleistet. Um die Flucht in einem Ereignisfall zu ermöglichen, sind Fluchtwegorientierungsleuchten zu installieren, die den Nutzern anzeigen, wie sie den Tunnel am schnellsten verlassen können. Die Notbeleuchtung und die Fluchtwegbeleuchtung sind an eine unterbrechungsfreie Stromversorgung anzuschließen. Die Steuerung der Beleuchtung erfolgt automatisch. Die Beleuchtungsintensität der Innenstrecke kann bei längeren Tunnelbauwerken (Richtungsverkehrstunnel ab 2.500m, Gegenverkehrstunnel ab 5.000m) um 50% herab gesetzt werden. Die Lichtstärke in

der Ausfahrtsstrecke ist im Vergleich zur Innenstrecke nicht zu erhöhen, da dies durch einfallendes Tageslicht erreicht wird. [19]

In Tunneln mit mehr als 1.000m Länge, deren Verkehrsaufkommen 2.000 Fahrzeuge pro Tag und Fahrstreifen übersteigt ist ein mechanisches Lüftungssystem einzubauen. Bei Bauwerken, die im Gegenverkehr betrieben werden wird empfohlen, eine Halb- bzw. Vollquerlüftung zu installieren. Von dieser kann nur abgesehen werden, wenn eine Risikoanalyse ergibt, dass die Art der Lüftung keinen Einfluss auf die Sicherheit der Tunnelnutzer hat. Querlüftungssysteme sollten in der Lage sein den Rauch im Brandfall direkt an der Entstehungsstelle abzusaugen. Ist der Tunnel länger als 3.000m, so sind steuerbare Abluftklappen zu installieren. Weiters ist die Geschwindigkeit des in Längsrichtung laufenden Luftstroms zu überwachen und die Steuerung der Lüftungseinrichtungen dementsprechend anzupassen. Zusätzlich beobachtet und in die Steuerung der Lüftungsanlage einfließen zu lassen ist der CO - Wert, die NO_x-Werte und die Sichttrübe. Ist ein mechanisches Lüftungssystem vorhanden, so ist eine Brandmeldeanlage anzubringen. [17]

Die Luftbedarfsberechnung ist ein komplexer Prozess, auf den hier nicht näher eingegangen werden kann. Es gibt viele Faktoren, wie PKW-Anteil, LKW-Anteil mit Diesel- bzw. Benzinmotor, Verkehrsstärke, Tunnellänge, Steigung und noch viele mehr, die bei der Berechnung berücksichtigt werden müssen. Der große Unterschied zwischen tief und hoch gelegenen Tunneln ist der Seehöheneinfluss. Dieser tritt bei benzingetriebenen Fahrzeugen auf und beeinflusst den CO-Ausstoß bei steigender Seehöhe negativ. Für Bauwerke, die über 2.000m Seehöhe liegen gibt es keine Formelwerke mehr. Diese sind gesondert zu betrachten. [17]

Notrufeinrichtungen sind mit zwei Feuerlöschern und einer Möglichkeit zur Sprechverbindung mit der Tunnelwarte auszustatten. Eine Notrufeinrichtung ist nicht als Zufluchtsort für Tunnelnutzer bei einem Brand gedacht. Darauf ist in bzw. an der Nische hinzuweisen. Der Abstand zwischen den Notrufeinrichtungen darf höchstens 150m betragen. [18]

Jeder Tunnel ist mit einer Löschwasserleitung auszustatten. Der Hochbehälter, über den die Leitung versorgt wird, muss mindestens 108 m³ Wasser beinhalten. Die Feuerlöschnischen für die Einsatzkräfte dürfen einen Maximalabstand von 250m aufweisen. In Pannenbuchten sind diese Nischen zusätzlich mit Schlauchhaspel und automatischer Schaumzumischung zu versehen. [18]

Bei Tunneln die von mehr als 2.000 Fahrzeugen pro Fahrstreifen und Tag durchfahren werden, ist eine Überwachungszentrale (Tunnelwarte) einzurichten und eine durchgehende Videoüberwachung zu gewährleisten. Ist so eine Zentrale vorhanden, und ist im Tunnel der Radioempfang möglich, so muss es für die Leitzentrale möglich sein die Radiosendungen für Sicherheitsdurchsagen zu unterbrechen. Bei durchgehender Videoüberwachung ist die Möglichkeit zu prüfen,

ob eine automatische Detektion von Staus, Fahrzeugstillstand, Rauch, Geister- und Langsamfahrer möglich ist. [40]

Um den Tunnel im Bedarfsfall sperren zu können, sind vor den Portalen Lichtsignalanlagen anzubringen. In Tunneln über 3.000m Länge wird empfohlen im Tunnelinneren alle 1.000m zusätzliche Ampeln an zu bringen. Weiters sollten an selber Stelle oder zumindest in Sichtweite davon Lautsprecher, Wechselverkehrszeichen und Infotafeln angebracht werden. Eine durchgehende Beschallungsanlage im Tunnel ist nicht vorzusehen. Im Vorportalbereich sind dieselben Anlagen anzuordnen. Diese sollen den Straßennutzer bei einer Rotschaltung über den Grund informieren und von einer Weiterfahrt abhalten. Funkanlagen für Einsatz- und Betriebsorganisationen sind ab Tunneln von 1.000m Länge vorgeschrieben. Um im Ernstfall schnell und richtig reagieren zu können, müssen für jedes Tunnelbauwerk Alarm- und Einsatzpläne aufgestellt werden. [21]

Alle Straßentunnel sind an den Leibungen mit einem hellen, reflektierenden, jedoch nicht glänzenden Anstrich zu versehen. Um die Orientierung im Tunnel im Regel- und auch Notfall zu erleichtern, sind LED Leuchteinrichtungen am Fahrbahnrand (rot/weiß) vorzusehen. [22]

3.3. Schweiz

Im August 2010 wurde vom Vorsteher des Eidgenössischen Departements für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK eine Weisung [25] erlassen, die sich mit den Sicherheitsanforderungen der Tunnel im Nationalstraßennetz beschäftigt. Im Wesentlichen decken sich diese Weisungen mit jenen, der EG Richtlinie 2004/54/EG vom 29.04.2004. Es wird auf die Wichtigkeit der Verwaltungsbehörde, der Tunnelmanager, sowie der Sicherheitsbeauftragten aufmerksam gemacht. Für die baulichen Belange wird auf die Normen „SIA 197 – Projektierung Tunnel – Grundlagen“ [49] und „SIA 197/2 – Projektierung Tunnel – Strassentunnel“ [50] verwiesen.

In der Schweiz werden fast alle Fragestellungen zum Thema Straßentunnelbau in den zwei genannten Normen beantwortet. Sicherheitseinrichtungen sind ab Tunnellängen von 300m vorgesehen. Abweichungen sind erlaubt, müssen aber begründet werden. Es wird in den Normen bei den Sicherheitseinrichtungen zwischen ein- und zweiröhrigen Tunneln unterschieden. Grundsätzlich wird jedoch immer auf ein 150m Raster bei der Anordnung der Einrichtungen zurückgegriffen.

In Tunneln mit Gegenverkehr sind die Notrufrischen mit Feuerlöschern alle 150 Meter wechselseitig anzuordnen. Ebenfalls alle 150m, jedoch einseitig, sind die Feuerlöschnischen an zu ordnen. Ebenso einseitig anzuordnen sind die Fluchtwege. Der maximale Abstand hierbei beträgt 500m, muss jedoch bei entsprechender Längsneigung bis auf 300m verringert werden. Die Fluchtwege sind ins Freie, in einen parallelen Stollen oder in einen Kanal, der außerhalb des Tunnelquerschnittes liegt zu führen. Verboten ist es Fluchtwege in einem über der Fahrbahn liegenden

Raum zu installieren und auch Rettungswege, die in Räumen ohne Ausgang ins Freie enden. Sollte in absehbarer Zeit eine zweite Röhre geplant sein, so ist ein paralleler Sondierstollen aufzufahren, der bis zum Bau der zweiten Röhre als Fluchtmöglichkeit dienen kann. Dieser muss beleuchtet sein, jedoch gibt es bezüglich der Befahrbarkeit mit Fahrzeugen keine Anforderungen. Abstellnischen sind grundsätzlich gegenüberliegend anzuordnen. Die Abstände sollten zwischen 600 und 900 Metern liegen.

Bei den Doppelröhrentunneln ändert sich der Abstand der Notrufeinrichtungen und der Hydranten zwar nicht, jedoch sind sie jeweils auf der rechten Fahrbahnseite anzuordnen. Sehr wohl ändert sich jedoch der Abstand der Fluchtwege. Dieser darf unabhängig von Längsgefälle oder Steigung maximal 300m betragen. Ab einer Tunnellänge von 1.200m ist zumindest ein Querschlag für Einsatzdienste befahrbar her zu stellen, bei längeren Tunneln jeder dritte. Die Fluchtwegtüren bzw. Tore müssen mindestens der Brandwiderstandsklasse T30 entsprechen.

Der Vorportalbereich sollte so gestaltet sein, dass bei Richtungsverkehr eine Überfahrt zwischen den Richtungsfahrbahnen möglich ist. Außerdem ist es ratsam eine Betriebszufahrt aus einem untergeordneten Straßennetz einzuplanen. Vor den Portalen sind ein Hydrant, eine Notrufeinrichtung und 2 Feuerlöscher zu positionieren.

Die Lüftungskanäle sind begehrbar auszubilden. Weiters ist darauf zu achten, dass der Abstand zwischen Zu- und Abluftbauwerken groß genug ist, um gegenseitige Beeinflussung zu verhindern.

Für den Betrieb sind in der Schweiz zwei Leitzentralen vorgesehen. Zum ersten eine Verkehrsleitzentrale, die den Betrieb überwacht und im Bedarfsfall die Einsatzkräfte alarmiert. Zum zweiten eine Betriebszentrale, die die technischen Systeme überwacht und deren Betriebstüchtigkeit gewährleistet. Beide Zentralen müssen autonom funktionieren.

Die Tunnelanlagen sind durchgehend zu beleuchten, wobei die Lichtintensität in den portalnahen Bereichen erhöht werden muss. Die Steuerung der sogenannten Adaptionsbeleuchtung, aber auch die der Durchfahrtsbeleuchtung erfolgt automatisch aufgrund von Leuchtdichtemessungen der Umgebung vor dem Portal. Erwünscht ist eine Steuerung der Durchfahrtsbeleuchtung aufgrund der Verkehrsdichte. Für den Brandfall ist eine Brandnotbeleuchtung vorzusehen, die an eine unterbrechungsfreie Stromversorgung anzuschließen ist. Die Versorgungsautonomie muss mindestens eine Stunde betragen.

Die Luftqualität im Fahrraum kann über den CO-Gehalt, die Sichttrübung, den Stickoxyd-Gehalt oder über die in der Luft enthaltenen Feinpartikel eruiert werden. Die genaue Bemessung erfolgt anhand der ASTRA Richtlinie „Lüftung der Strassentunnel“ [24]. Tunnel, die mit einem mechanischen Lüftungssystem

ausgestattet sind, sind mit einer automatischen Branddetektion auszurüsten. Ebenso sollten Bauwerke ab 600m Länge mit einer Verkehrsüberwachungsanlage, mit Tunnelfunk und mit Radioempfangsmöglichkeit ausgerüstet werden.

Die Verkehrsüberwachung mittels Videokameras dient der visuellen Beurteilung von Verkehrssituationen, der Detektion von Ereignisfällen und der Archivierung der Daten im Ereignisfall. Die Funkanlage muss die unterbrechungsfreie Funkverbindung für Polizei, Feuerwehr, Sanitäts- und Unterhaltungsdienst sicherstellen. Die Funkanlage muss außerdem die Möglichkeit bieten, das Programm von UKW Radiosendern einzuspeisen.

Jede Notrufrische ist mit zwei Handfeuerlöschern mit mindestens 6kg AB-Pulver auszustatten. Bei Entnahme des Löschers wird ein Kontakt ausgelöst, der zu einer automatischen Aufschaltung der Videoüberwachung in der Leitzentrale führt. An Löschwasser sind mindestens 250 m³ zur Verfügung zu stellen. Die Löschwasserleitung ist auf eine Entnahmemenge von 20 l/s zu dimensionieren. [50] [25]

3.4. Deutschland

In Deutschland ist die Ausstattung der Tunnel in den Richtlinien für die Ausstattung und den Betrieb von Straßentunneln, kurz RABT [29] geregelt. Die Organisation für den Betrieb ist gleich geregelt wie in der Schweiz, in Österreich und den anderen EG Staaten. In der RABT werden Tunnel ab einer Länge von 400m als lange Tunnel betrachtet und sind dementsprechend sicherheitstechnisch auszustatten. Die Einrichtungen sehen wie folgt aus:

Es ist eine rund um die Uhr besetzte Zentrale einzurichten, die den Verkehr überwacht und Notrufe entgegen nimmt bzw. in die Steuerung von Beleuchtung, Lüftung oder ähnlichem eingreifen kann. Diese Zentrale ist auch für das Notfallmanagement im Ereignisfall verantwortlich. Um das Personal zu schulen sind laufend Übungen notwendig, die möglichst realistisch durchgeführt werden und klare Ergebnisse liefern sollen.

Im Betriebsfall wird in Deutschland, im Gegensatz zu Österreich und der Schweiz wo meist 100 km/h erlaubt sind, eine Geschwindigkeitsbegrenzung von 80km/h im Tunnel empfohlen. Diese ist unabhängig von der Verkehrsführung. Die Bauwerke sind alle zu beleuchten, wobei die Berechnung der Beleuchtungsstärke aufgrund verschiedener Einflussfaktoren, wie Verkehrsstärke, Verkehrszusammensetzung und Tunnellänge erfolgt.

Die Lüftung ist für den Betriebs- und Brandfall entsprechend auszulegen. Bei Tunnelbauwerken über 3.000m Länge ist in jedem Fall eine Absaugung über die Zwischendecke mit steuerbaren Absaugöffnungen einzuplanen. Zu beachten sind bei der Auslegung die Sichttrübe und die CO – Emissionen. Die CO Konzentration kann vor allem bei hoch gelegenen Tunneln und Verkehr mit hohem Anteil an

Benzinfahrzeugen zum Problem werden. So ist für einen Benzin PKW, der auf 2.000m Seehöhe unterwegs ist, ein 11,4mal so hoher CO Ausstoß zu veranschlagen, wie für dasselbe Fahrzeug, wenn es auf Meereshöhe unterwegs wäre. Der Anstieg der Sichttrübe ist im Vergleich zu jenem des CO Gehaltes vernachlässigbar.

Bei den verkehrstechnischen Einrichtungen des Tunnels wird zwischen Mindestausstattung, Grundausrüstung und erweiterter Ausstattung unterschieden. Tunnel über 2.000m Länge sind mindestens mit der Grundausrüstung auszuführen. Besteht aus sicherheitstechnischer Sicht weiterer Bedarf, so ist die Ausstattung noch zu verbessern bzw. zu adaptieren. Bei der Grundausrüstung sind eine Verkehrsdatenerfassung, Wechselverkehrszeichen im Abstand von ca. 600m und Sperrschranken Pflicht. Als erweiterte Ausstattung können noch Dauerlichtzeichen, Wechselwegweiser und bei Bedarf weitere Wechselverkehrszeichen angebracht werden.

Um bei Bedarf anhalten zu können, sind entweder durchgehende Pannestreifen oder vor allem bei längeren Tunnelbauwerken Pannenbuchten anzuordnen. Der maximale Abstand zwischen ihnen sollte 600m nicht übersteigen. Bei Gegenverkehrstunneln sind die Buchten gegenüberliegend anzuordnen, um so im Notfall die Buchten als Wendebuchten verwenden zu können. Zur Selbstrettung ohne das KFZ sind Notausgänge in Abständen kleiner als 300m vorzusehen. Diese Rettungswege müssen entweder ins Freie, in eine andere Tunnelröhre, zu Rettungsschächten oder -stollen führen. Die Fluchtwege sind mittels Fluchtwegorientierungsleuchten zu kennzeichnen, die in Abständen von maximal 25m angebracht werden sollten.

Notrufstationen sind in regelmäßigen Abständen von weniger als 150m anzuordnen. Diese sind zusätzlich mit zwei Feuerlöschern zu versehen. Lange Tunnel sind durchgehend mittels Video zu überwachen. Ebenso über die gesamte Länge ist den Einsatzkräften und dem Straßenerhalter der Funkverkehr zu ermöglichen. Verpflichtend ist die Empfangsmöglichkeit des Verkehrsfunks im Tunnelbauwerk. Zusätzlich zu dieser Kommunikationsmöglichkeit mit dem Tunnelnutzer sind Lautsprecheranlagen zu installieren.

Es sind sowohl manuelle, als auch automatische Brandmeldeeinrichtungen zu installieren. Bei den automatischen kann von Brandmeldern abgesehen werden, sofern die Detektion über die Sichttrübemessung und Videoüberwachung mit Bilddetektion erfolgt. Für den Brandfall ist eine Löschwasserleitung zu verlegen, die, wenn möglich als Ringleitung auszuführen ist. Eine Fördermenge von 1.200 l/min für mindestens 60 min ist zu gewährleisten.

3.5. Großbritannien

Die derzeit gültige Norm stammt aus dem Jahr 1999 [52]. In Großbritannien werden Tunnel aufgrund ihrer Länge und ihres Verkehrsaufkommens in fünf Kategorien eingeteilt. Bis zu einem durchschnittlichen täglichen Gesamtverkehrsaufkommen von 3.000 Fahrzeugen hat die Verkehrsdichte keinen Einfluss auf die Kategorie. Erst darüber werden kürzere Tunnel mit stärkerem Verkehrsaufkommen höher eingestuft. Die Höchste Kategorie AA ist unabhängig von der Verkehrsdichte. Sie ist lediglich auf die Tunnellänge bezogen. Ab 3.000m Länge sind Tunnel dieser Kategorie zuzuordnen. Bei sehr hohem Verkehrsaufkommen von über 20.000 Fahrzeugen pro Tag können auch kürzere Tunnel dieser Kategorie zugeteilt werden. Die Kategorisierung der Tunnel dient dazu, um festzulegen, welche Sicherheitseinrichtungen im Tunnel den Mindeststandard darstellen.

Bei langen Tunneln der Klasse AA sind Notruftelefone, Radioempfang mit Einspeisung von Durchsagen aus der Tunnelwarte, Verkehrszählanlagen und automatische Verkehrsdetektion mittels Videoüberwachung verpflichtend. An Feuerlöscheinrichtungen sind für den Tunnelnutzer Feuerlöscher und Schlauchhaspeln, für die Feuerwehr Hydranten vorzusehen. Eine Lüftungseinrichtung ist ebenso Standard, wie Fluchtwegbeleuchtungen, Ampeln zum Anhalten des Verkehrs, Notgehwege, eine Verkehrsleitzentrale und Branddetektionssysteme. Die Notwendigkeit von Umkehrbuchten bei Bauwerken ab 5.000m Länge ist zu überprüfen.

Einzigartig in Europa sind die Abstände der Sicherheitseinrichtungen. In keiner der betrachteten Normen wird der Standard so hoch an gesetzt wie in Großbritannien. Notrufeinrichtungen inklusive Feuerlöschern und Schlauchhaspeln müssen alle 50m vorhanden sein. Als Alternative zu den Haspeln können alle 100m Hydranten gesetzt werden. In Doppelröhrentunneln sind alle 100m Querschläge als Fluchtmöglichkeit herzustellen.

Auch bei den Grenzwerten für die Luftgüte weicht Großbritannien von den in Europa üblichen Standards ab. Ist in den meisten Ländern ab einer Konzentration von 100ppm CO in der Luft der Tunnel zu schließen, so ist dies in Großbritannien erst ab 250ppm zu veranlassen. [52]

3.6. Indien

Die indische Richtlinie für den Tunnelbau [32] befasst sich vor allem mit dem Ausbruch und der Abstützung des Hohlraumes. Bei den Sicherheitseinrichtungen lehnt sie sich stark an die europäischen Normen an. So wird ein zweiröhriger Tunnel erst ab 10.000 Fahrzeugen pro Tag und Fahrstreifen empfohlen. Wobei, wie auch in Europa, der in den nächsten Jahren zu erwartende Verkehr in Betracht gezogen werden muss.

Als lange Tunnel werden in Indien solche mit einer Länge von über 1.500m eingestuft. Für diese sind ein mechanisches Lüftungssystem, entsprechende Beleuchtung, Notruftelefone und Notausgänge vorzusehen. Ebenfalls wird Bedacht auf Brandfälle genommen, weshalb zusätzlich Feuerlöscher vorgeschrieben sind. Die Abstände der Notausgänge bzw. Querschläge zwischen den Röhren sind mit 300 Metern vorgegeben. Anders als in europäischen Normen ist jedoch die Ausführung der Querschläge. Diese sollen nicht rechtwinkelig zu den Fahrbahnen angeordnet werden, sondern in einem Winkel von 30 Grad. Die Querschläge können so im Notfall befahren werden. Der Verkehr wird über die Querschläge in die gegenüberliegende Röhre gleitet und die Nutzer können sich somit in Sicherheit bringen ohne ihre Fahrzeuge verlassen zu müssen. Zusätzlich sind die Fluchtwege zu kennzeichnen und dementsprechend zu beleuchten.

Die Beleuchtung der Tunnel erfolgt nach dem gleichen Prinzip wie in Europa. Im Portalbereich wird die Beleuchtung verstärkt, im Tunnelinneren wird diese Beleuchtung jedoch abgemindert. Im Gegensatz zu den in Europa geforderten USV Systemen, die einen Notbetrieb ermöglichen sollen, ist in Indien ein Backup-System vorgeschrieben, das den gleichen Betrieb ermöglicht, wie er ohne Ausfall des Hauptsystems geplant wäre.

Die Steuerung der Lüftungseinrichtung erfolgt aufgrund von CO- bzw. Sichttrübemesswerten. Ebenso zentral gesteuert wird der Verkehrsfluss im Regel- und Katastrophenfall. Alle Steuerungen erfolgen von einer Betriebszentrale aus. Die Tunnel sind mittels Video zu überwachen, wobei der Einsatz von Videoanalyse-Systemen, die bei Detektion von Abnormalitäten (Stau, Langsamfahrer, Rauch, etc.) automatisch reagieren, zu bevorzugen ist.

Zur Meldung von Ereignissen im Tunnel sind alle 200m Notrufeinrichtungen an zu ordnen. Der Radioempfang ist im gesamten Tunnel sicherzustellen. Feuerlöscher sollten alle 50m zur Verfügung gestellt werden. An zusätzlichen Sicherheitseinrichtungen sind die Anbringung von Ampeln und Schrankenanlagen vorgesehen. Für diese gibt es jedoch keine genauen Anforderungen bezüglich des Abstandes.

Um die Löschwasserversorgung sicherzustellen, sind Wasserreservoirs anzulegen und Löschwasserleitungen und Hydranten zu installieren. Genaue spezifische Anforderungen an diese Einrichtungen gibt es jedoch nicht. Speziell für lange

Tunnel gibt es Empfehlungen Gefahrguttransporte nur mit Begleitfahrzeugen durch den Tunnel fahren zu lassen bzw. auch den Vorschlag, einen Servicetunnel vorzusehen, der zu Wartungszwecken verwendet werden, aber auch als Fluchtmöglichkeit dienen kann.

Tunnel-system	United Nations	Europäische Gemeinschaft	ITF	Österreich	Schweiz	Deutschland	Großbritannien	Indien
Gegenverkehrstunnel	JA	JA	JA	JA	JA	JA	JA	JA
Richtungverkehrstunnel	JA	JA	JA	JA	JA	JA	JA	JA
Art	Querlüftung	Querlüftung	Querlüftung	Querlüftung	Querlüftung	Querlüftung	mechanisch	mechanisch
Belüftung	>80 empfohlen	n.d.	n.d.	120	je nach Ereignis und Tunnelquerschnitt	200	n.d.	n.d.
Raubabzugsleistung [m³/s]								
Abstand [m]	n.d.	1000	n.d.	1000	600 - 900	600	n.d.	750
Länge [m]	n.d.	n.d.	n.d.	40	33	40	n.d.	n.d.
Breite [m]	n.d.	n.d.	n.d.	3	3	2,5	n.d.	n.d.
Ausstattung	n.d.	Notrufeinrichtung	n.d.	Notrufeinrichtung Feuerlöschmische	Notrufeinrichtung Hydrant	Notrufeinrichtung	n.d.	n.d.
max. Fluchtwegabstand [m]	200 - 500	500	500	250 - 500	500 400 (bei 3% Steigung)	300	100 bei RV n.d. bei GV	300 bei RV n.d. bei GV
über der Fahrbahn	n.d.	JA	n.d.	JA	NEIN	JA	n.d.	n.d.
unter der Fahrbahn	n.d.	JA	n.d.	JA	JA	JA	n.d.	n.d.
in zweite Röhre	n.d.	JA	n.d.	JA	JA	JA	n.d.	n.d.
Fluchtwege erlaubt	n.d.	JA	n.d.	JA	JA	JA	n.d.	n.d.
neben der Fahrbahn (abgetrennt)	n.d.	JA	n.d.	JA	JA	JA	n.d.	n.d.
in einen Rettungsstollen	n.d.	JA	n.d.	JA	JA	JA	n.d.	n.d.
in Rettungsräume	n.d.	NEIN	n.d.	NEIN	NEIN	NEIN	n.d.	n.d.
(ohne Ausgang ins Freie)	n.d.	NEIN	n.d.	NEIN	NEIN	NEIN	n.d.	n.d.
keine Notausgänge	n.d.	NEIN	n.d.	NEIN	NEIN	NEIN	n.d.	n.d.
Große Reservoir [m³]	n.d.	n.d.	n.d.	108	250	72	n.d.	n.d.
mind. Durchflussmenge	n.d.	n.d.	n.d.	20 l/s	20 l/s	20 l/s	n.d.	n.d.
Abstand [m]	n.d.	250	n.d.	250	150	150	50	müssen vorh. sein kein Abstand definiert
Ausstattung	n.d.	n.d.	n.d.	120m Schlauch + Strahlrohr + Hydrantenschlüssel	Hydrant	Hydrant	Schlauchhaspel od. alle 100m Hydranten	n.d.
Notrufeinrichtungen	n.d.	150	n.d.	150	150	150	50	200
Abstand [m]	n.d.	n.d.	n.d.	begehbare Kabine	begehbare Nische	begehbare Nische	keine besondere	n.d.
Ausstattung	n.d.	begehbare Kabine	n.d.	begehbare Kabine	begehbare Nische	begehbare Nische	keine besondere	n.d.
Abstand [m]	n.d.	in jeder NRN 2 Stk.	systematisch (je nach Anforderung)	in jeder NRN 2 Stk.	in jeder NRN 2 Stk.	in jeder NRN 2 Stk.	bei den Notrufeinrichtungen	50
Ausstattung	n.d.	2 Stk.	n.d.	6kg Pulver, 9kg Schaum	6kg Pulver	6 kg Pulver	13A (2kg) Pulverlöscher	n.d.
Videobewachung	JA	JA	JA	JA	JA	JA	JA	JA

n.d..... nicht definiert

Abbildung III-24: Übersicht der geforderten Sicherheitseinrichtungen

IV Risikoanalyse

1. Straßentunneltest

Eine für den Laien nachvollziehbare Analyse der Tunnel ist der Tunneltest, der jährlich von insgesamt 15 Autofahrerclubs aus 14 Ländern durchgeführt wird. Dies ist zwar keine wissenschaftliche Auswertung, kann jedoch als Anregung für sicherheitstechnische Verbesserungen herangezogen werden.

Bei diesem Test werden Tunnel in verschiedenen Ländern besichtigt und hinsichtlich ihrer Sicherheit bewertet. Die Tests finden unter ständiger Begleitung einer EU-Kommission statt. Das Testverfahren wird inzwischen von der Weltstraßenorganisation (PIARC) und auch von der United Nations Economics Commission for Europe (UNECE) anerkannt [13]. Die Checkliste, nach der die Bauwerke beurteilt werden, wird jährlich überarbeitet. Sie richtet sich jeweils nach den derzeit aktuellen Regelwerken für Straßentunnel in Deutschland, Frankreich, Großbritannien, Österreich, der Schweiz sowie nach der EU – Richtlinie über Mindestanforderungen an Tunnel im transeuropäischen Streckennetz. Die Beurteilung ist unterteilt in insgesamt acht Kategorien mit unterschiedlicher Gewichtung. Die Kategorien sind:

- Tunnelsystem
- Beleuchtung und Energieversorgung
- Verkehr und Verkehrsüberwachung
- Kommunikation
- Flucht- und Rettungswege
- Brandschutz
- Lüftung
- Notfallmanagement

Häufige Kritikpunkte sind die zu kurze Einsatzdauer der Atemschutzgeräte der Feuerwehr, nicht vorhandene Lautsprecheranlagen im Tunnel und fehlende Hydranten an den Portalen. Weiters fehlen oft Informationstafeln vor den Portalen, um Tunnelsperrungen zu begründen. Ebenso werden meist dunkle Wände, die eine düstere Atmosphäre vermitteln und fehlende Fluchtwegkennzeichnungen bemängelt. [12]

Diese Tunneltests geben dem Straßenbenutzer einen kurzen Überblick über die Sicherheit in den europäischen Tunneln. Für den Fachmann liefern sie jedoch zu wenig Informationen. Zum ersten können die Ergebnisse der Tests nicht miteinander verglichen werden, da die Gewichtung jährlich geändert wird. Zum zweiten wird zwar die Ausstattung der Tunnel überprüft, jedoch nicht die Gebrauchstauglichkeit. Diese kann nur mittels Notfallübungen bewertet und gegebenenfalls verbessert werden.

2. Detaillierte Risikoanalysen

Aufgrund der Anordnungen in der EG Richtlinie, aber auch aufgrund der Unglücke im Mont Blanc-, Gotthard- und Tauerntunnel, haben einige Staaten und Organisationen versucht diverse Risikoanalysen für Tunnelbauwerke durch zu führen.

In Österreich kann diese Risikoanalyse auf zwei Arten erfolgen. Es gibt eine vereinfachte Risikoanalyse [17], die jedoch nur bei Tunneln angewandt werden darf, die gewisse Kriterien in Bezug auf Länge, durchschnittlichen Tagesverkehr, Stauhäufigkeit und Längsneigung nicht übersteigen. Berechnet wird ein Häufigkeitsäquivalent H , das die erwartete Häufigkeit von Unfällen mit Personenschäden pro Jahr ausweist. In die Berechnung fließen die Verkehrsdichte, die Tunnellänge, die spezifische Unfallrate, sowie Korrekturfaktoren für Verkehrsleistung, Tunnellänge und etwaige Verflechtungsstrecken ein. Dieses Häufigkeitsäquivalent wird anschließend mit einem Schadensausmaßäquivalent multipliziert um so auf ein Risikoäquivalent zu kommen. Anhand dieses Ergebnisses kann der Tunnel in die Gefährdungsklassen I – IV eingeteilt werden. Für diese vier Gefährdungsklassen gibt es nun wiederum Mindestanforderungen, welche Sicherheitseinrichtungen zu installieren sind. Somit kann auf einfache Weise abgeschätzt werden, wie der Tunnel zu konzipieren ist. Zusätzliche Sicherheitsausstattungen sind dann einzurichten, wenn erhöhtes Gefahrenpotential besteht. Dieses kann durch einen hohen Anteil an LKWs, Bussen oder Gefahrguttransportern verursacht werden, aber auch durch eine eklatante Anhebung der durchschnittlichen Verkehrsstärke an gewissen Tagen. Dies ist auf Transitrouten zu prüfen, die vor allem zu Urlaubszeiten stark frequentiert werden.

Beim Tunnel Risikoanalysemodell [16] kann die Berechnung nicht aufgrund so weniger Parameter erfolgen. An Inputdaten sind die Länge, die Verkehrsführung, das Lüftungssystem, die Verkehrsstärke, der Anteil für PKW, LKW, Busse und Gefahrguttransporter, die Stauhäufigkeit, der Abstand der Notausgänge, die Unfallrate und etwaige Verflechtungsstrecken mit einzubeziehen. Die Berechnung ist jedoch nur möglich bei Tunnelquerschnitten mit zwei Fahrstreifen, ebenen Oberflächen, Tunneln mit einer maximalen Branddetektionszeit von 150 Sekunden und Bauwerken, in denen keine kombinierten Lüftungssysteme verbaut bzw. geplant sind.

Das Analyseverfahren ist auf einer Häufigkeitsanalyse mittels Ereignisbaum und auf einer Schadensausmaßanalyse aufgebaut. Bei der Häufigkeitsanalyse werden ausgehend von einem Initialereignis verschiedene Schadensszenarien und ihre Eintrittswahrscheinlichkeit ermittelt. Diese Eintrittswahrscheinlichkeit wird dann mit dem zu erwartenden Schadensausmaß multipliziert. Summiert man diese Werte auf, so ergibt sich eine statistisch zu erwartende Anzahl an Todesopfern pro Million gefahrener KFZ-Kilometer. Multipliziert man dieses Ergebnis mit der Tunnellänge und der Verkehrsstärke pro Jahr, so erhält man die Anzahl der statistisch zu erwartenden Todesopfer für das Tunnelbauwerk pro Jahr. Anhand dieser Zahl

können die Tunnel untereinander verglichen werden. Wie schon bei der vereinfachten Berechnung kann der Tunnel anhand des errechneten Risikoäquivalents zu vier Gefährdungsklassen zugeteilt werden.

Es gibt keine Werte für sichere bzw. unsichere Tunnel. Die Berechnung erfolgt einmal für den Tunnel, wenn er genau nach den Anforderungen des STSG ausgeführt ist (Referenztunnel). Hat der geplante Tunnel eine abweichende Charakteristik, wie zum Beispiel ein höheres Verkehrsaufkommen oder einen hohen LKW Anteil, so ist der Tunnel durch geeignete sicherheitstechnische Maßnahmen auf dieselbe Zahl an statistischen Toten zu bringen. Wie viel diese Einrichtungen zur Steigerung der Sicherheit beitragen, ist in der Norm nur teilweise dar gelegt. Es sind Werte für Längs- und Vollquerlüftung vorhanden. Für die Notausgangabstände kann zwischen nicht vorhanden, 250m und 500m variiert werden. Weitere sicherheitstechnische Änderungen sind vom Planer zu untersuchen und in das Modell einzurechnen. Liegt der Wert unter dem bei Mindeststandard errechneten, so gilt der Tunnel als sicher.

Ein ähnliches Modell wird in Italien angewandt. Dort werden die Tunnel anhand von Länge, Verkehrsstärke und Verkehrsführung in insgesamt zehn Kategorien eingeteilt. Die Eintrittswahrscheinlichkeit wird so wie in Österreich aufgrund einer Ereignisbaumanalyse ermittelt.

In Italien wird als Referenz der sogenannte virtuelle Tunnel heran gezogen. Dies ist ein nur auf dem Papier existierender Tunnel, der die Mindeststandards an Sicherheitseinrichtungen beinhaltet, die von der EG gefordert werden. Es ist jedoch möglich die sicherheitstechnische Einrichtung aufgrund der Erfahrungen in einem Bestandstunnel zu planen. Bei diesem Tunnel muss sich in der Betriebsphase gezeigt haben, dass die sicherheitstechnische Ausrüstung ausreicht, um denselben Sicherheitsstandard wie der virtuelle Tunnel zu erreichen. [44]

Bei der Planung eines neuen Tunnelprojektes wird der virtuelle Tunnel als Referenz herangezogen. Der neue Tunnel muss sicherheitstechnisch so ausgestattet sein, dass statistisch weniger Todesopfer zu erwarten sind als beim virtuellen Tunnel. Mit welchen sicherheitstechnischen Einrichtungen dies erreicht wird ist Sache des Planers. [44]

In England und Frankreich werden bis jetzt nur Szenarioanalysen für einzelne Tunnelbauwerke durchgeführt. Anhand dieser Analysen werden die Bauwerke sicherheitstechnisch bewertet. Auf andere Tunnel ist dies jedoch nicht oder nur sehr schwer umlegbar. [44]

Ein in vielen Ländern angewandtes System ist das OECD/PIARC DG QRA Modell. Dies ist ein Modell, das sich ausschließlich mit dem Transport von Gefahrgütern befasst. Auch in der RVS wird auf dieses Analysemodell für Strecken mit vermehrtem Gefahrguttransport verwiesen. Bei der Analyse nach DG QRA Modell

werden, wie bei der Risikoanalyse nach RVS verschiedene Szenarien betrachtet. Jedoch geht es hier nicht um die Sicherheit eines Tunnels an sich, sondern um den Vergleich des Risikos zwischen Transporten durch den Tunnel und Transporten auf Alternativstrecken. Mithilfe dieser Bewertung der unterschiedlichen Strecken kann die für Gefahrguttransporter sicherere Strecke für den Transport gewählt werden. Eine Befahrung der Alternativroute kann zum Beispiel durch entsprechende Fahrverbote verhindert werden. [44]

Eine einheitliche Risikoanalyse für Tunnelbauwerke wäre wünschenswert. Leider existiert diese noch nicht. In der EG Richtlinie 2004/54/EG vom 29.04.2004 wurde festgelegt, dass die Mitgliedsstaaten eine Risikobewertungsmethode für ihr Land festlegen. Dies ist noch nicht in allen Mitgliedsländern erfolgt. [27]

V Beispiele von langen Tunneln

1. Karawankentunnel (AUT/SLO)

Der 7.864m lange, auf ca. 600m Seehöhe gelegene Grenztunnel zwischen Österreich und Slowenien wird täglich im Schnitt von 6.754 Fahrzeugen befahren. Das maximale Verkehrsaufkommen pro Stunde betrug im Jahr 2010 1.545 Fahrzeuge. Aufgrund dieses geringen Verkehrsaufkommens wird der Tunnel als Gegenverkehrstunnel mit jeweils einer Fahrspur pro Fahrtrichtung geführt. Der Bau eines Rettungsstollens bzw. einer zweiten Röhre ist jedoch in Diskussion. [42]

Die Lüftung erfolgt mittels Vollquerlüftung. In Tunnelmitte ist die Vollquerlüftung unterbrochen und wird durch eine Längslüftung ersetzt. Somit ist im Bedarfsfall eine Absaugung bzw. ein Steuern der Rauchschwaden möglich. Die Steuerung der Lüftung erfolgt automatisch aufgrund der von den Messstationen für CO und Sichttrübe erfassten Werte. Die Frischluftzufuhr erfolgt von den Portalen aus. Es sind trotz der großen Länge keine zusätzlichen Schächte notwendig.

Der gesamte Tunnel wird per Video überwacht. Verkehrsinfos können über zwei Frequenzen durch gegeben werden. Auf einer Frequenz wird bei Bedarf auf Deutsch, auf der zweiten in Slowenisch gesendet. Zusätzlich sind zur Verkehrssteuerung Ampelanlagen vor den Portalen und vor den Pannenbuchten angebracht. Um die Tunnelnutzer selbst bei nicht eingeschaltetem Autoradio auf das richtige Verhalten hinweisen zu können gibt es bei den Ampelanlagen Lautsprecher, auf die von der Tunnelwarte aus zugegriffen werden kann. Der Einbau von LED Infopaneelen in den Abstellnischen und an den Tunnelportalen steht unmittelbar bevor.

Der Tunnel ist auf der gesamten Länge beleuchtet, wobei die Beleuchtung in den Eingangsbereichen aufgrund des Tageslichteinfalles im Vorportalbereich gesteuert wird. An baulichen Einrichtungen gibt es zirka alle 1.000m Pannenbuchten, alle 212m Notrufnischen und alle 106m Feuerlöschnischen. In den Notrufnischen befinden sich jeweils 2 Feuerlöscher. Notausgänge sind nicht vorhanden. Die Rettung im Bedarfsfall kann nur über die Tunnelportale erfolgen. Zur Orientierung sind alle 25m Fluchtwegtafeln bzw. alle 50m Fluchtwegorientierungsleuchten angebracht.

Da der Tunnel ein Gegenverkehrstunnel ist, ist in Fahrbahnmitte ein Rumpelstreifen angebracht. Zur Kommunikation der Einsatzkräfte ist im Bauwerk ein Tunnelfunk installiert, der von Feuerwehr, Polizei, Rettung und von den Straßenerhaltungsdiensten benutzt werden kann. Die Steuerung des Verkehrsflusses erfolgt über die Schranken an den Mautstellen. Befinden sich zu viele Fahrzeuge im Tunnel, so wird der Nachfolgeverkehr angehalten. Dasselbe geschieht bei Brandfällen im Tunnel. Die Videoüberwachung des gesamten Tunnels

erfolgt im monatlichen Wechsel durch die Tunnelwarte in Klagenfurt (AUT) bzw. durch die Warte in Hrusica (SLO).

Sicherheitstechnisch wird der Tunnel derzeit aufgerüstet. Es wird ein Verkehrsdetektionssystem eingebaut, das den Nutzer auf zu hohe Geschwindigkeit bzw. zu geringen Abstand hinweist. In Kürze wird zusätzlich die Leittechnik, die Brandmeldetechnik, die Steuerung der Systeme und die Videoanlage ausgetauscht. [51]

2. Eisenhower Tunnel (USA)

Der Eisenhower Memorial Tunnel liegt in Colorado auf einer Seehöhe von 3.400m und hat eine Länge von 2.731 bzw. 2.725m. Die zwei Tunnelröhren werden im Durchschnitt von 28.000 Fahrzeugen pro Tag durchfahren. Beide Röhren verfügen über 2 Fahrspuren, jedoch über keinen Pannestreifen und keine Abstellbuchten.

Die Frischluftzufuhr bzw. die Abluftabfuhr erfolgt durch die über der Zwischendecke installierten Lüftungskanäle. Die Ost- und die Weströhre sind über Querschläge verbunden, die einen Abstand von ca. 670 m voneinander aufweisen. Die Fluchtwege sind mittels Fluchtwegtafeln und Fluchtwegorientierungsschildern beschildert.

Zur Verkehrsleitung gibt es im Tunnel Ampeln. Es ist für die Verkehrsleitzentrale

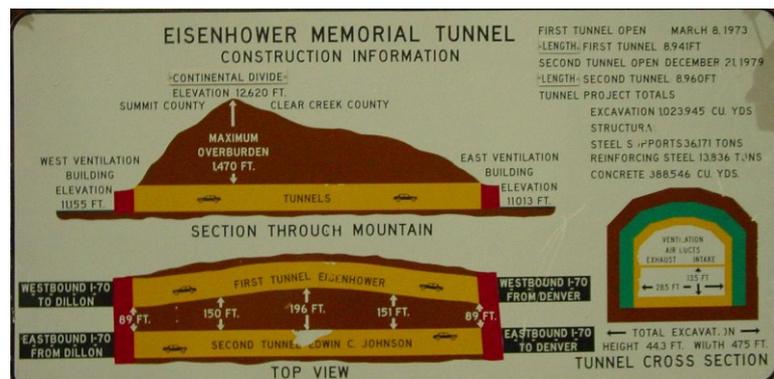


Abbildung V-1: Schema des Eisenhower Memorial Tunnels [23]

jedoch nicht möglich Durchsagen über UKW einzuspielen, da im Tunnel kein Radioempfang möglich ist. Zur Brandbekämpfung sind Feuerlöscher angebracht. Ebenfalls installiert ist eine Löschwasserleitung. Zusätzlich wird das gesamte Bauwerk mittels Video überwacht. Um Kontakt mit der Tunnelwarte aufnehmen zu können sind Notrufeinrichtungen installiert.

Um bestmöglichen Verkehrsfluss im Tunnel zu gewährleisten wird bei erhöhtem Verkehrsaufkommen der Verkehr gestoppt und nur mehr in Blöcken abgefertigt. Der Verkehr wird auch gestoppt, wenn sich nach dem Tunnel ein Unfall ereignet hat oder aufgrund der meteorologischen Bedingungen nur eine geringere Geschwindigkeit gefahren werden kann und ein Rückstau in den Tunnel zu befürchten ist. Ein weiterer Grund, um den Tunnel zu sperren liegt darin, dass Gefahrguttransporter nicht mit dem herkömmlichen Verkehr durch den Tunnel fahren dürfen. Diese müssen vor dem Portal warten und werden stündlich mit Begleitfahrzeugen durch den Tunnel eskortiert.

Bemerkenswert ist, dass der registrierte Maximalwert an CO im Jahr 2010 trotz der Höhenlage nur 30 ppm betrug. Eine Tunnelsperre würde ab 100 ppm in Kraft treten. [23]

3. Laerdal Tunnel (NOR)

Mit 24,5km Länge ist der Laerdal Tunnel der längste Straßentunnel der Welt. Der Tunnel wird als Gengenverkehrstunnel betrieben. Das Verkehrsaufkommen beträgt im Durchschnitt 1.000 Fahrzeuge pro Tag. Der maximale stündliche Verkehr wird mit 400 Fahrzeugen beziffert. Die Lüftung des Tunnels erfolgt lediglich durch eine mechanische Längslüftung. Die Luftzufuhr erfolgt über die Portale und über einen Schrägschacht, der bei Tunnelmeter 18.000 baulich angeschlossen ist. Bei Tunnelmeter 10.000 befindet sich eine Luftreinigungsanlage, die jedoch aufgrund des geringen Verkehrsaufkommens nicht in Betrieb ist.

In Summe sind 48 Pannenbuchten und 15 Umkehrpunkte vorhanden, die so groß ausgeführt wurden, dass Busse und LKWs darin wenden können. Um die Sicherheit



Abbildung V-2: Eine der Kavernen im Laerdal Tunnel [36]

im Tunnel zu erhöhen, wurden alle 250m Notrufstellen und alle 125m Feuerlöscher installiert. Der gesamte Tunnel wird per Video überwacht. Im Ernstfall können die Benutzer über Ampeln und Infotafeln über das richtige Verhalten informiert werden. Im Notfall ist auf den Tafeln „turn and drive out“ zu lesen. Um die Kommunikation im Ernstfall zu ermöglichen gelangt ein

Tunnelfunksystem zum Einsatz, das unterschiedliche Kanäle für die Polizei, Rettung und Feuerwehr bietet. Ebenso ist der Empfang von Radioprogrammen und der Empfang von Mobilfunknetzen möglich. An den Tunnelportalen ist eine Verkehrszähleinrichtung und Fahrzeugerkennung angebracht. Somit ist dem Tunnelbetreiber immer bekannt, wie viel Fahrzeuge sich derzeit im Tunnel befinden.

Um die 20 Minuten dauernde Fahrt durch den Tunnel nicht eintönig erscheinen zu lassen, wurde der Tunnel mit einem auflockernd wirkenden Innendesign versehen. Es gibt insgesamt drei Kavernen, die den Tunnel in vier farblich unterschiedlich gestaltete Abschnitte unterteilen. Weiters wurde darauf geachtet, dass die Sichtweite an keinem Punkt des Tunnels unter 1.000 Metern liegt. Um die Gefahr von Frontalkollisionen zu minimieren ist zusätzlich zur doppelten Sperrlinie in Fahrbahnmitte ein Rumpelstreifen ausgeführt. [26] [10]

4. Arlberg Tunnel (AUT)

Mit 13.972 Metern Länge ist der Arlberg Tunnel der längste Straßentunnel Österreichs. Im Grunde genommen besteht der Arlberg Straßentunnel aus zwei aufeinander folgenden Tunneln. Dies hat den Grund, dass der Tunnel auf Tiroler Seite die Rosannaschlucht quert.

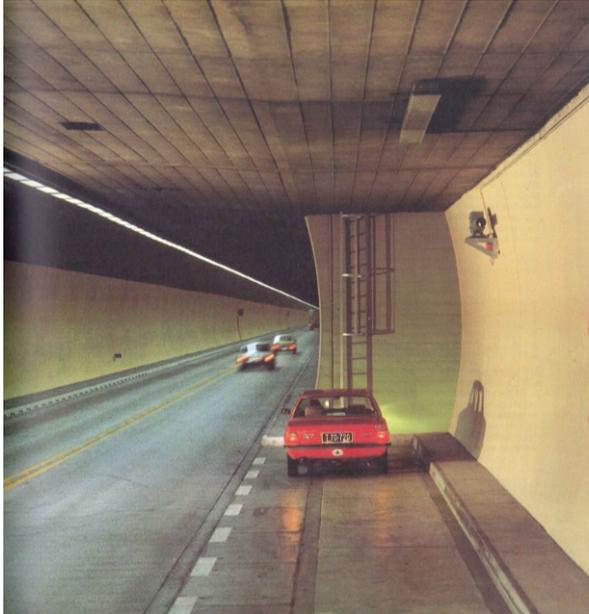


Abbildung V-3: Pannenbucht kurz nach der Eröffnung [3]

Dem Straßenbenutzer fällt dies jedoch nicht auf, da dieser Bereich aus Lärmschutzgründen überdacht wurde. Der Tunnel wird in einer Röhre mit Gegenverkehr geführt. In jede Fahrtrichtung steht eine Fahrspur zur Verfügung. Das Verkehrsaufkommen betrug im Jahr 2010 7.684 Kfz pro Tag (davon 14% LKW).

Die Frischluftzufuhr bzw. Abluftabfuhr erfolgt von insgesamt vier Lüftungszentralen aus. Jeweils eine befindet sich an den Portalen in Langen und St. Jakob. Die restlichen zwei befinden sich in den Drehtelpunkten des Tunnels und sind

mit den Schächten Albona und Maienwasen an die Oberfläche angebunden. Die somit sechs zu versorgenden Lüftungsabschnitte werden über jeweils einen Ventilator für Zu- bzw. Abluft versorgt. Die Lüftung erfolgt mittels Vollquerlüftung. Eine durchgehende Videoüberwachung ist ebenso Standard, wie auch ein durchgehendes Lichtband zur Beleuchtung und die Möglichkeit Funkverkehr im Tunnel zu betreiben. Ebenso ist der Empfang von Radioprogrammen möglich, über die sich die Tunnelwarte einschalten kann. Auf die Tunnellänge verteilt gibt es 16 Abstellnischen. Im Abstand von 212m befinden sich Notrufeinrichtungen. Um die Wasserversorgung im Ernstfall zu gewährleisten ist eine Löschwasserleitung installiert. All diese Sicherheitseinrichtungen waren schon bei der Eröffnung im Jahr 1978 vorhanden.



Abbildung V-4: Querschlag zwischen Bahn- und Straßentunnel [56]

Im Jahr 2008 konnte eine gravierende sicherheitstechnische Verbesserung in Betrieb genommen werden. Es wurden acht Verbindungsstollen zum nahezu parallel verlaufenden Eisenbahntunnel hergestellt. Die maximale Fluchtweglänge beträgt somit 1.700m. In den zwei noch folgenden Ausbaustufen sollen die Längen auf 850 und in weiterer Folge auf 425m verkürzt werden. [3] [5] [56]

5. Plabutschtunnel (AUT)

Der Tunnel ist ein Lehnentunnel, der das Stadtgebiet von Graz verkehrstechnisch entlastet. Die Länge beträgt zirka 10km. Im Durchschnitt befahren 32.000 Fahrzeuge pro Tag den Tunnel. An Spitzentagen steigt dieser Wert bis auf 41.000 Fahrzeuge an. Der LKW Anteil liegt bei 13%. Ursprünglich wurde der Tunnel als einröhriger Tunnel mit Gegenverkehr ausgeführt. Seit 2004 ist die zweite Tunnelröhre in Betrieb und der Verkehr wird in beiden Röhren im Richtungsverkehrsbetrieb geführt. Die Lüftung erfolgt mittels Vollquerlüftung. Es gibt vier Lüftungsbauwerke. Pro Tunnelröhre gibt es somit sechs Lüftungsabschnitte. Alle 106 Meter befinden sich Abluftjalousien, mit denen im Bedarfsfall gezielt Rauch abgesaugt werden kann.

Der Verkehrsweg wird auf der gesamten Länge mittels Video überwacht. Die Auswertung der Videosignale erfolgt in der Tunnelwarte, die beim Südportal des Tunnels stationiert ist. Ebenfalls an die Tunnelwarte angeschlossen ist die durchgehende Brandmeldesensorik, die sich im Fahrraum befindet. Um die Kommunikation sowohl im Normal-, als auch im Katastrophenfall zu gewährleisten wurde das gesamte Tunnelsystem mit Tunnelfunkeinrichtungen ausgestattet.



Abbildung V-5: Notausfahrt Nord [57]

Um die Flucht für die Tunnelnutzer und die Zufahrt für die Einsatzkräfte im Bedarfsfall zu ermöglichen ist der Tunnel mit vier befahrbaren und 13 begehbaren Querschlägen ausgestattet. Zusätzlich gibt es noch 2 Notausfahrten, die direkt in das Stadtgebiet von Graz einmünden. An

Sicherheitseinrichtungen findet man alle 212m eine Notrufnische, die mit zwei

Handfeuerlöschern ausgestattet ist. In halb so großem Abstand wurden Feuerlöschnischen angeordnet.

Es sind in Summe neun Pannenbuchten pro Tunnelröhre vorhanden, die gleichzeitig als sogenannte Lichthöfe zur Unterbrechung der Monotonie bei langen Tunnelfahrten dienen. Des Weiteren sind im Tunnel alle von der RVS

vorgeschriebenen Sicherheitseinrichtungen und Leiteinrichtungen, wie z.B.: Fluchtwegorientierungsleuchten, Bordsteinreflektoren, Notbeleuchtung und eine Sicherheitsstromversorgung vorhanden. [5] [57]

6. Mont Blanc Tunnel (FRA/ITA)

Die Portale des 11,6km langen Tunnels befinden sich auf 1.274 bzw. 1.381m Seehöhe. Die maximale Überlagerung beträgt zirka 2.000m. Das durchschnittliche Verkehrsaufkommen beträgt 4.946 Kraftfahrzeuge pro Tag, wobei der Anteil an LKWs mit 31,6 Prozent im Vergleich zu anderen Transitrouten recht hoch ist.

Bei einem Brand im Jahre 1999 wurden die Schwächen des 1965 eröffneten Tunnels offensichtlich. So gab es zum Beispiel keine Fluchtmöglichkeiten, die ins Freie führten, sondern nur Schutzräume, die allerdings nur für eine begrenzte Zeit sicher waren und anschließend zur tödlichen Falle wurden. Weiters hat sich gezeigt, dass Verzögerungen bei der Alarmierung der Einsatzkräfte auftreten können, wenn dies nicht über eine, sondern zwei Tunnelwarten geschieht. Diese Probleme wurden bei der Generalsanierung des Tunnels beseitigt.



Abbildung V-6: Schutzraum [45]

Die Lüftung erfolgt über eine Querlüftung. Zur Rauchgasabsaugung im Bedarfsfall gibt es 116 Abzugsöffnungen. Es gibt derzeit 37 Schutzräume, die in weiterer Folge mit dem Frischluftkanal verbunden sind, um so eine Flucht ins Freie zu ermöglichen.

In Summe sind 36 Pannenbuchten, 10 Radaranlagen zur Abstands- bzw. Geschwindigkeitskontrolle, eine vollständige Videoüberwachung, eine Löschwasserleitung, 78 Brandschutznischen und ein durchgehendes Brandmeldekabel mit 3.860 Sensoren im Tunnel vorhanden. Um mit der Tunnelwarte in Kontakt treten zu können gibt es 116 Notrufrnischen, die mit jeweils zwei Feuerlöschern bestückt sind.

An Informations- und Verkehrsleiteinrichtungen findet man Ampeln an den Portalen, 20 Ampeln je Fahrtrichtung im Tunnel, 20 an der Tunneldecke befestigte Informationspaneele und zusätzlich noch halbseitige Schranken auf Höhe der Ampeln. Der Verkehrsfunk kann über zwölf Frequenzen in drei unterschiedlichen Sprachen empfangen werden.

Zusätzlich zur Sicherheitsausstattung gibt es umfangreiche administrative Maßnahmen, um Gefahrensituationen zu vermeiden. So ist die Durchfahrt für LKW, die ihre Zulassung vor dem 1. Oktober 1996 erhalten haben bzw. LKW mit Abgasklasse Euro 0 und 1 verboten. Um die Kontrolle zu gewährleisten müssen LKWs vor ihrer Durchfahrt zu den entsprechenden Akkreditierungsstellen. Sind die Vorgaben erfüllt, so werden Lastkraftwagen jeweils in Fünferblöcken mit einem zusätzlichen Begleitfahrzeug durch den Tunnel eskortiert. Die Mindest- bzw. Maximalgeschwindigkeit ist mit 50km/h bzw. 70 km/h festgesetzt. Ebenso reglementiert ist der Mindestabstand von 150m zwischen den einzelnen Fahrzeugen. Geschwindigkeits- bzw. Abstandsregelungen gelten sowohl für den LKW, als auch für den PKW Verkehr. Um den Sicherheitsabstand von 150m zu gewährleisten werden die Fahrzeuge mittels Intervallschaltung in den Tunnel gelotst. Im Tunnel befinden sich Markierungen, anhand derer der Autofahrer erkennen kann ob er den vorgegebenen Sicherheitsabstand einhält.

Zur Vermeidung von Bränden in Folge überhitzter mechanischer Bauteile bei LKWs und Bussen sind an den Portalen Thermoscanner installiert. Schlägt dieses System an, so wird das Fahrzeug vor der Einfahrt in den Tunnel angehalten. [45] [59]

7. Gotthard Tunnel (CH)

Mit 16.918 Metern Länge ist der Gotthard Straßentunnel der drittlängste Straßentunnel der Welt. Die Portale liegen auf einer Höhe von 1.080 bzw. 1.146m. Die Alpenquerung ist als einröhriger Tunnel ausgeführt und wird im Gegenverkehr betrieben. Parallel dazu verläuft ein Rettungstollen, der als Vorleistung für einen späteren zweiröhrigen Ausbau erstellt wurde.

Die Lüftung erfolgt von den Portalen und zusätzlich von vier Schächten aus. Insgesamt ist der Tunnel in zehn Lüftungsabschnitte unterteilt. Im Tunnel wird das System der Vollquerlüftung angewandt. Somit werden Luftlängsströmungen vermieden. Im Bedarfsfall werden Brandklappen in der Tunneldecke geöffnet, um



Abbildung V-7: Tropfenzählersystem [43]

eine Rauchgasabsaugung direkt an der Entstehungsstelle zu gewährleisten. Mit diesem Konzept wird die Möglichkeit zur Selbstrettung der Verkehrsteilnehmer im Bedarfsfall erleichtert, da die Fluchtwege rauchfrei gehalten werden können.

Im Abstand von 250 Metern befinden sich Schutzräume, die zwischen dem Fahrtunnel und dem Fluchtstollen liegen.

Alle 750 Meter sind wechselseitig Pannenbuchten angeordnet. Feuerlöscher und Notrufeinrichtungen sind im Abstand von 125 Metern installiert. Der Tunnel ist durchgehend beleuchtet, wobei für den Katastrophenfall jede zehnte Beleuchtungseinheit an eine Notstromversorgung angeschlossen ist. Vor den Portalen, wie auch im Tunnel befinden sich Ampelanlagen. Im Tunnel beträgt der Abstand der Signaleinrichtungen 250m.

Um möglichst schnell auf Brandereignisse reagieren zu können sind über die gesamte Länge Brand- und Rauchmelder installiert. Damit sich die Verantwortlichen in der Tunnelwarte im Ereignisfall möglichst schnell ein Bild von der Situation machen können wird der Tunnel lückenlos videoüberwacht.

Für den Benutzer des Tunnels ist der Empfang von Radioprogrammen während der gesamten Durchfahrt möglich. Ebenso ist ein Tunnelfunk installiert, der die Kommunikation der Einsatzkräfte und des Erhaltungsdienstes gewährleistet.

Für Lastkraftwagen ist wie im Mont Blanc Tunnel ein Mindestabstand von 150 Metern vorgeschrieben. Dieser wird durch ein Tropfenzählersystem gewährleistet, das LKWs nur in einem vorgegebenen Intervall in den Tunnel einfahren lässt. [48] [58]

8. Tauerntunnel (AUT)

Der Tauerntunnel liegt auf einer Seehöhe von ca. 1.300m und hat im Vollausbau zwei Röhren mit 6.546 bzw. 6.765m Länge. Mit einem Verkehrsaufkommen von 16.759 Fahrzeugen pro Tag (davon 19% LKW Anteil) ist der Tunnel im Schnitt nicht hoch frequentiert. In den Sommermonaten, und dabei vor allem zu den Wochenenden steigt das Verkehrsaufkommen durch Urlauber jedoch drastisch an.

Die Lüftung erfolgte schon in der Bestandsröhre mittels Vollquerlüftung. Dieses System wird auch in der neuen zweiten Tunnelröhre angewandt. Die Luftzu- und -abfuhr erfolgt über die Portale und einen 700m langen Schacht. Somit ist jede Röhre in vier Lüftungsabschnitte eingeteilt. Für den Rauchabzug gibt es in beiden Röhren Rauchabzugsöffnungen im Abstand von 50m (Bestand) bzw. 80m (Neubau), die 120m³/s Luft absaugen können.

Pannenbuchten befinden sich im Abstand von 800 – 900m. Die Abstände der Feuerlösch- und Notrufrischen variieren je nach Tunnelröhre. In der Bestandsröhre sind diese 106 bzw. 212m, in der Neubauröhre liegen diese bei 125 bzw. 250m. Der Abstand zwischen den Querschlägen beträgt 170 bis 250m. In Summe gibt es 26 Querschläge, von denen 19 als begehbare, vier als mit Einsatzfahrzeugen befahrbare und drei als befahrbare Querschläge ausgeführt wurden. Befahrbare Querschläge waren einst dazu angedacht, um den Verkehr im Tunnel zwischen den Röhren umleiten zu können. Von diesem Gedanken ist man jedoch mittlerweile ab gekommen.

Als Rettungskonzept war von Anfang an ein Selbstrettungskonzept vorgesehen, die Rettung ist über Querschläge in die zweite Röhre konzipiert. Fluchtwegkennzeichnungen gibt es im Abstand von 25m. Beleuchtete Fluchtwegorientierungsleuchten haben einen Abstand von 50m.

Vor jeder Pannenbucht, wie auch vor den Tunnelportalen gibt es Ampelanlagen, Beschallungsanlagen und LED Infopaneele, die bei Wartungsarbeiten, aber auch im Ereignisfall aktiviert werden können. Die Infotafeln waren vor dem Vollausbau noch nicht installiert. Hinsichtlich des richtigen Verhaltens können die Verkehrsteilnehmer über das Autoradio informiert werden. Die Tunnelwarte kann sich auf die Frequenzen von Ö1, Ö2, Ö3, sowie auf die Frequenz von Antenne Salzburg einschalten.

An Feuerlöscheinrichtungen gibt es zwei Feuerlöscher pro Notrufrische und eine Löschwasserleitung mit Hydranten in den Feuerlöschnischen. Zusätzlich gibt es in den Pannenbuchten noch Schlauchhaspeln mit integrierter Schaumzumischung. Die Videoüberwachung des Tunnels erfolgt von der Tunnelwarte St. Michael aus. [4] [5]

VI Untersuchung unterschiedlicher sicherheitstechnischer Einrichtungen

1. Tunnelkonzepte

1.1. Gegenverkehrstunnel mit Längslüftung

Diese Variante ist mit sämtlichen in Österreich geforderten Sicherheitseinrichtungen ausgestattet. Abweichungen sind lediglich bei der Lüftung und den Notausgängen gegeben. Es wird davon ausgegangen, dass keine Notausgänge vorhanden sind. Die Evakuierung im Ereignisfall erfolgt über die Portale. Die Werte für die Risikoanalyse werden aus jenen von Tunneln mit 700m und 1500m Länge extrapoliert. Die Längslüftung bei langen Tunneln ist nicht Stand der Technik, wird jedoch zur Veranschaulichung der erhöhten Risiken bei falscher Bauweise herangezogen.

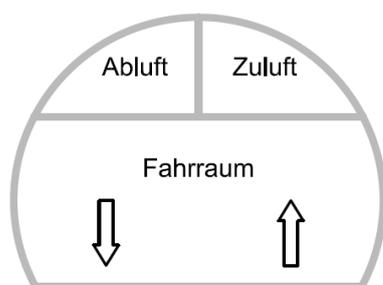


Abbildung VI-1: Querschnitt
ohne Fluchtmöglichkeit

1.2. Gegenverkehrstunnel mit Querlüftung

Das Konzept ist dem vorherigen ähnlich. Jedoch wird anstelle der Längslüftung eine Querlüftung verbaut. Die Evakuierung im Ereignisfall erfolgt bei diesem Konzept ebenfalls über die Portale. Durch die Rauchgasabsaugung an der Brandstelle wird ein wesentlicher Beitrag zur Rauchfreihaltung des Fluchtweges geleistet. Diese Bauform ist für Neubauten in Europa nicht mehr zulässig. Es gibt

jedoch noch Bestandstunnel, die diesen Standard aufweisen.

1.3. Gegenverkehrstunnel mit Querlüftung und Notausgängen alle 500m

Der Unterschied zur Variante 1.2 liegt darin, dass es im Abstand von 500 Metern Notausgänge gibt. Wo diese Notausgänge angeordnet sind, hat auf die Risikobewertung keinen Einfluss. Die Rettungswege können zum Beispiel in einen separaten Fluchtstollen führen.

Alternative Varianten sind in den Abbildungen VI-2, VI-3 und VI-4 zu sehen. Beim System in Abb. VI-3 wird der Fluchtweg von der Fahrbahn baulich abgetrennt. Probleme kann bei dieser Variante das schwierige Lüftungskonzept für den Fluchtweg bereiten.

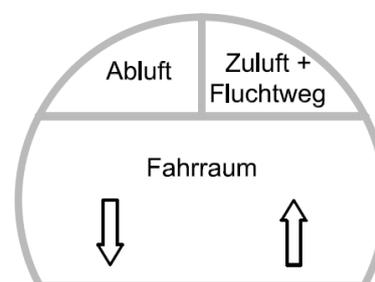


Abbildung VI-2: Querschnitt mit
Fluchtmöglichkeit
über der Fahrbahn

Fluchtwege im Zuluftkanal (Abb. VI-2 und VI-4) werden derzeit in vielen

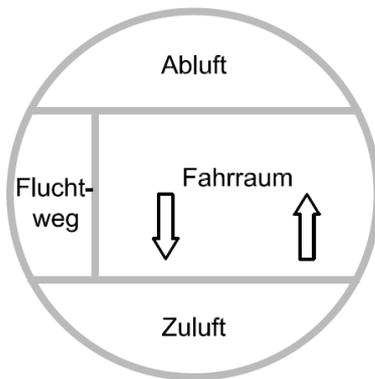


Abbildung VI-3: Querschnitt mit baulich abgetrenntem Fluchtweg

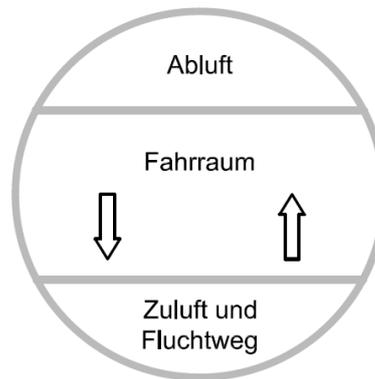


Abbildung VI-4: Querschnitt mit Fluchtmöglichkeit unter der Fahrbahn

Bestandsröhren nach gerüstet. Dafür sind lediglich kleine Kavernen nötig, über die der Zutritt zu den Kanälen erfolgen kann. Die Fluchtwege können über oder unter dem Fahrraum angeordnet werden.

Die Ausstattung dieser beschriebenen

Tunnelkonzepte entspricht dem Referenz-tunnel (siehe Kapitel IV) für einröhrige Tunnelbauwerke. Die sicherheitstechnischen Verbesserungen, die in den Punkten 1.5 – 1.10 diskutiert werden beruhen auf dieser baulichen Ausführung des Tunnels.

1.4. Richtungsverkehrstunnel mit Querlüftung und Notausgängen alle 500m

Bei höherem Verkehrsaufkommen kann auf das Konzept des Doppelröhrentunnels zurückgegriffen werden. Die zwei Röhren werden über Querschläge miteinander verbunden. Somit sind Fluchtwege zwischen den einzelnen Röhren gegeben. Um die Rauchfreiheit der Parallelröhre zu gewährleisten sind die Querschläge als Schleusen auszuführen. Die Lüftung erfolgt mittels Querlüftung und kann somit im Bedarfsfall die beiden Röhren rauchfrei halten.



Abbildung VI-3: über Querschläge verbundener, zweiröhriger Tunnel

Eine Abwandlung dieses Systems ist der Bau eines zusätzlichen Wartungstollens, der als Fluchtstollen bzw. als Zufahrt für Einsatzkräfte dienen kann.

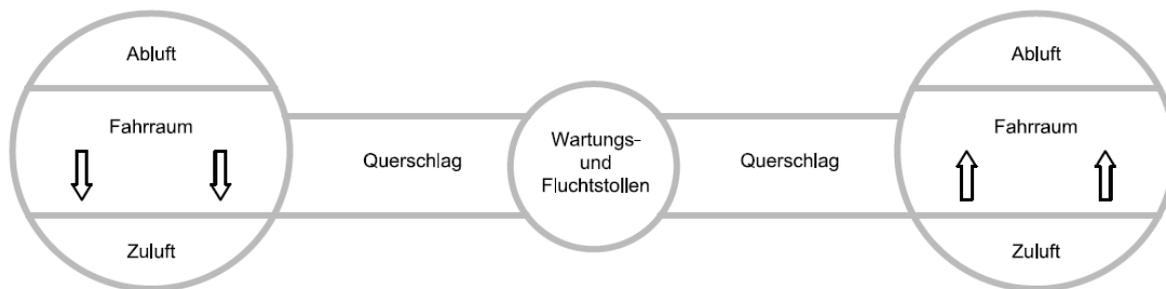


Abbildung VI-6: zweiröhriger Tunnel mit Wartungs- bzw. Fluchttunnel

In den Abbildungen VI-7 und VI-8 sind Konzepte zu sehen, die bei zukünftigen Projekten verwirklicht werden könnten. Beide beruhen darauf, aus nur einem vorgetriebenen Tunnel zwei getrennte Richtungsverkehrstunnel entstehen zu lassen. Als Fluchtweg dient, wie auch beim traditionellen zweiröhrigen Tunnel, die andere Richtungsverkehrsröhre. Zu- und Abluftkanäle können ober- und unterhalb des Fahrraumes untergebracht werden.

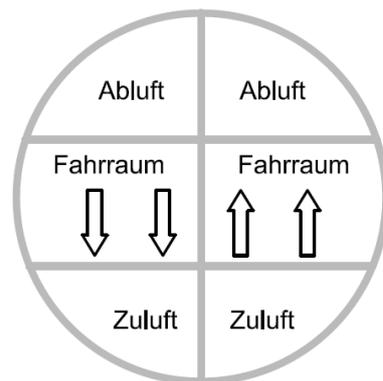


Abbildung VI-7: Querschnitt mit baulicher Trennung der Richtungs-fahrbahnen

Diese Ausführungsvarianten dienen als Referenz-tunnel für das System des zweiröhrigen Richtungsverkehrstunnels. Bei der Risikoanalyse sind für alle vier Varianten dieselben Eingangsparameter zu wählen.

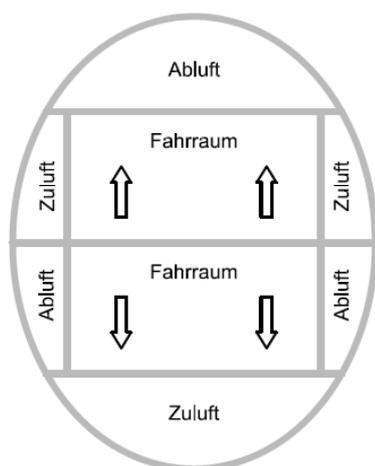


Abbildung VI-4: einröhriger Tunnel mit getrennten Richtungs-fahrbahnen

1.5. Gegenverkehrstunnel mit Verkehrsbeeinflussungsanlage (VBA)

Mit Hilfe einer Verkehrsbeeinflussungs-anlage (VBA) kann der Fahrzeuglenker auf Fehlverhalten, aber auch auf drohende Gefahren hingewiesen werden. Eine VBA beinhaltet mehrere Komponenten, wie zum Beispiel Geschwindigkeitsmessung, Abstandsmessung, Wechselverkehrszeichen, Infopaneele oder Ampelanlagen. Mit diesen technischen Hilfsmitteln ist es möglich den Fahrzeuglenker auf zu hohe Geschwindigkeit oder geringen Abstand hinzuweisen. Bei

hohem Verkehrsaufkommen kann die Höchstgeschwindigkeit herabgesetzt werden. Über Infopaneele kann der Nutzer über mögliche Gefahren im Tunnel, wie zum Beispiel Wartungsarbeiten oder defekte Fahrzeuge informiert werden. Über

dieselben Paneele kann der Grund einer Tunnelsperre ebenso mitgeteilt werden, wie Anweisungen im Ernstfall.

35% der Unfalltypen können mit einer VBA zumindest teilweise verhindert werden [6]. Für die Risikoanalyse wird angenommen, dass von diesen 35 beeinflussbaren Prozent der Unfälle tatsächlich 20% verhindert werden können. Somit ergibt sich eine Verringerung der Gesamtunfallzahlen um 7%.

1.6. Gegenverkehrstunnel mit Blockabfertigung für LKW

Eine Variante, um das Unfallrisiko zu senken ist die Blockabfertigung von Lastkraftwagen. Vor den Tunnelportalen werden die Lastwägen angehalten und nur zu bestimmten Zeiten durch den Tunnel gelassen. Eine Variante ist eine stündliche Vollsperrung, um den Schwerverkehr jeweils ohne Gegenverkehr im Konvoi durch den Tunnel zu lotsen. Durch diese Maßnahme können LKW Unfälle mit Beteiligung des Gegenverkehrs fast gänzlich ausgeschalten werden. Am Gotthard Tunnel hat sich gezeigt, dass die Unfälle um 60% und die Pannen um 50% zurückgegangen sind [1]. Diese Werte werden auch für die Risikoanalyse heran gezogen.

1.7. Gegenverkehrstunnel mit Tropfenzählersystem

Um den Verkehrsfluss der Lastkraftwagen nicht wie in Punkt 1.6 beschrieben zum vollständigen Erliegen zu bringen, kann er mittels Tropfenzählersystem gesteuert werden. Das System kann auch für den PKW Verkehr eingesetzt werden. Somit wird die Staubildung im Tunnel verhindert. Weiters wird gewährleistet, dass der Abstand der einzelnen Fahrzeuge zueinander groß genug ist. Seit der Einführung dieses Systems am Gotthard Straßentunnel sind die Pannen- und Unfallzahlen erheblich zurückgegangen. Die Reduktion der Pannen und Unfälle ist ähnlich hoch wie bei einer Blockabfertigung. Für die Risikoanalyse werden dieselben Werte heran gezogen. Diese liefern folglich dieselben Ergebnisse.

1.8. Gegenverkehrstunnel mit Fahrverbot für Gefahrguttransporter

Gefahrguttransporter, die bei einem Unfall eine hohe Brandlast aufweisen, werden aus dem Tunnel mittels Fahrverbot fern gehalten. Um dieses Verbot im Realfall durchsetzen zu können ist eine Risikoanalyse über die Gefährlichkeit von Alternativrouten zu erstellen. Für den betrachteten fiktiven Tunnel wird angenommen, dass es eine andere Route gibt. Als Ansatz für die Risikoanalyse wird der Anteil an Gefahrguttransporten auf null gesetzt. Die restliche Verkehrszusammensetzung und das Schadensausmaß bei Ereignisfällen bleiben unverändert.

1.9. Gegenverkehrstunnel mit automatischem Löschesystem

Automatische Löschesysteme dienen vor allem dazu, ein Ausbreiten des Brandes zu verhindern und den entstehenden Rauch nieder zu schlagen. Die Brandbekämpfung erfolgt anschließend durch die Einsatzdienste. Durch den Einbau eines solchen Systems soll die Zeitspanne bis zur Verrauchung des Tunnels verlängert werden. Somit werden Unbeteiligte nicht durch die Rauchgase gefährdet.

Laut Auskunft der Firma AQUASYS [8] ist es in Feldversuchen gelungen KFZ Brände mit dem Löschesystem gänzlich zu löschen. Bei einem 200MW Feuer konnte die Umgebungstemperatur auf ein erträgliches Maß gesenkt werden. Aufgrund dieser Angaben wird für Risikoanalyse angenommen, dass 75% aller PKW- und 50% aller LKW- und Busbrände so verlaufen, dass keine Gefährdung für die restlichen Verkehrsteilnehmer auftritt.

1.10. Gegenverkehrstunnel mit Schlauchhaspeln in allen Feuerlöschnischen

Bei dieser Variante wird der Abstand der Feuerlöschnischen verkürzt, jede Nische mit einer Schlauchhaspel ausgestattet und auf Feuerlöscher gänzlich verzichtet. Dies hat den Grund, dass Hydranten für die Erstbekämpfung des Brandes durch den Tunnelnutzer ungeeignet sind und Feuerlöscher eine begrenzte Kapazität haben. Für diesen Vorschlag der sicherheitstechnischen Ausrüstung gibt es keine Vergleichsobjekte von denen sich gewisse Trends ableiten lassen. Als Annahme wird eine Schadensausmaßminderung von 10% für PKW und LKW Brände angenommen. Für Gefahrguttransporter wird eine Minderung von 5% angesetzt.

1.11. Richtungsverkehrstunnel mit Querlüftung und Notausgängen alle 250m

Diese Variante wurde grundsätzlich im Punkt 1.4 erklärt. Der Tunnel wird als Richtungsverkehrstunnel ausgeführt. Alle 250m befinden sich Querschläge zwischen den beiden Röhren. Durch die Verkürzung der Fluchtwegabstände wird versucht die Dauer bis zur Evakuierung des Tunnels im Brandfall zu verkürzen. Mit der Verkürzung der Evakuierungsdauer wird gehofft, dass sich eine Schadensausmaßminderung einstellt.

1.12. Richtungsverkehrstunnel mit Querlüftung und Notausgängen alle 100m

Das Konzept bleibt mit Ausnahme der Fluchtwegabstände zu Punkt 1.11 unverändert. Diese werden auf 100m verkürzt. Die Werte für die Berechnung werden aus jenen von 250 bzw. 500m Fluchtwegabstand linear extrapoliert.

2. Risikoanalyse der Tunnelkonzepte

Um eine Risikoanalyse durchführen zu können sind wesentliche Eingangsdaten, wie Verkehrsstärke, Tunnellänge und Lüftungssystem nötig. Diese sind in Tab. VI-1 festgelegt. Die Berechnungen wurden nach RVS 09.03.11 durchgeführt und sind im Anhang A zu finden.

Straßenart	Autobahn	
Tunnellänge:	10,0	km
Verkehrsstärke:	15.000	Kfz/d
Anteil PKW-Verkehr:	76,3	%
Anteil LKW-Verkehr:	20,2	%
Anteil Bus-Verkehr:	3,5	%
Anteil der Gefahrguttransporte am Schwerverkehr:	3,0	%
Stauhäufigkeit:	150	h/Jahr
	1,71	%

Tabelle VI-2: Daten für den fiktiven Tunnel

Szenario	Tote/Jahr	Teilsummen Tote/Jahr		
		mechanisch	Brand	Gefahrgut
[1] Gegenverkehr + Längslüftung, keine Notausgänge	4,8536	1,080464	3,502988	0,270104
[2] Gegenverkehr + Querlüftung, keine Notausgänge	1,5920	1,080464	0,471446	0,040086
[3] Gegenverkehr + Querlüftung, Notausgangabstand: 500m	1,4319	1,080464	0,315840	0,035630
[4] Richtungsverkehr + Querlüftung, Notausgangabstand: 500m	0,2399	0,236243	0,002800	0,000843
[5] wie [3] + Verkehrsbeeinflussungsanlage	1,3427	1,004832	0,302988	0,034852
[6] wie [3] + Tropfenzählersystem	0,5885	0,432186	0,139561	0,016704
[7] wie [3] + Blockabfertigung LKW	0,5820	0,432186	0,136171	0,013639
[8] wie [3] + Fahrverbot Gefahrguttransporter	1,3966	1,080464	0,316148	0,000000
[9] wie [3] + automatisches Feuerlöschsystem	1,2089	1,080464	0,110581	0,017815
[10] wie [3] + Schlauchhaspeln in den FLN	1,3986	1,080464	0,284256	0,033848
[11] Richtungsverkehr + Querlüftung, Notausgangabstand: 250m	0,2383	0,236243	0,001205	0,000820
[12] Richtungsverkehr + Querlüftung, Notausgangabstand: 100m	0,2381	0,236243	0,001077	0,000806

Tabelle VI-1: erwartbare Tote pro Jahr

RV...	Richtungsverkehr	VBA...	Verkehrsbeeinflussungsanlage
GV...	Gegenverkehr	Gfg...	Gefahrguttransporter
QL...	Querlüftung	FLN...	Feuerlöschnische
LL...	Längslüftung	NA...	Notausgangabstand

Die Ergebnisse der Berechnungen sind in Tabelle VI-2 und Abbildung VI-5 dargestellt. Die Zahl der Todesopfer pro Jahr, die Auskunft über den Sicherheitsstand des Tunnels gibt, setzt sich aus den Einzelwerten von Todesopfern durch mechanische Einwirkungen, Brand und Brand mit Gefahrgutbeteiligung zusammen. Bei allen untersuchten Szenarien zeigt sich, dass sich die zu erwartenden Todesopfer durch einen Brand mit Gefahrgutbeteiligung bezogen auf die Todesopfer pro Jahr fast gar nicht auswirken. Der Großteil der Opfer kommt durch mechanische Einwirkungen (direkte Unfallschäden) zu Tode.

Bei Bränden kann die Wahl der falschen Lüftungsmethode eine hohe Zahl von Opfern verursachen. Am deutlichsten sieht man diesen Effekt beim Gegenverkehrstunnel mit Längslüftung. Hier übersteigt die Zahl der zu erwartenden Brandtoten jene der Todesopfer durch mechanische Einwirkungen. Dies ist bei allen anderen Varianten mit verbesserter Lüftung umgekehrt.

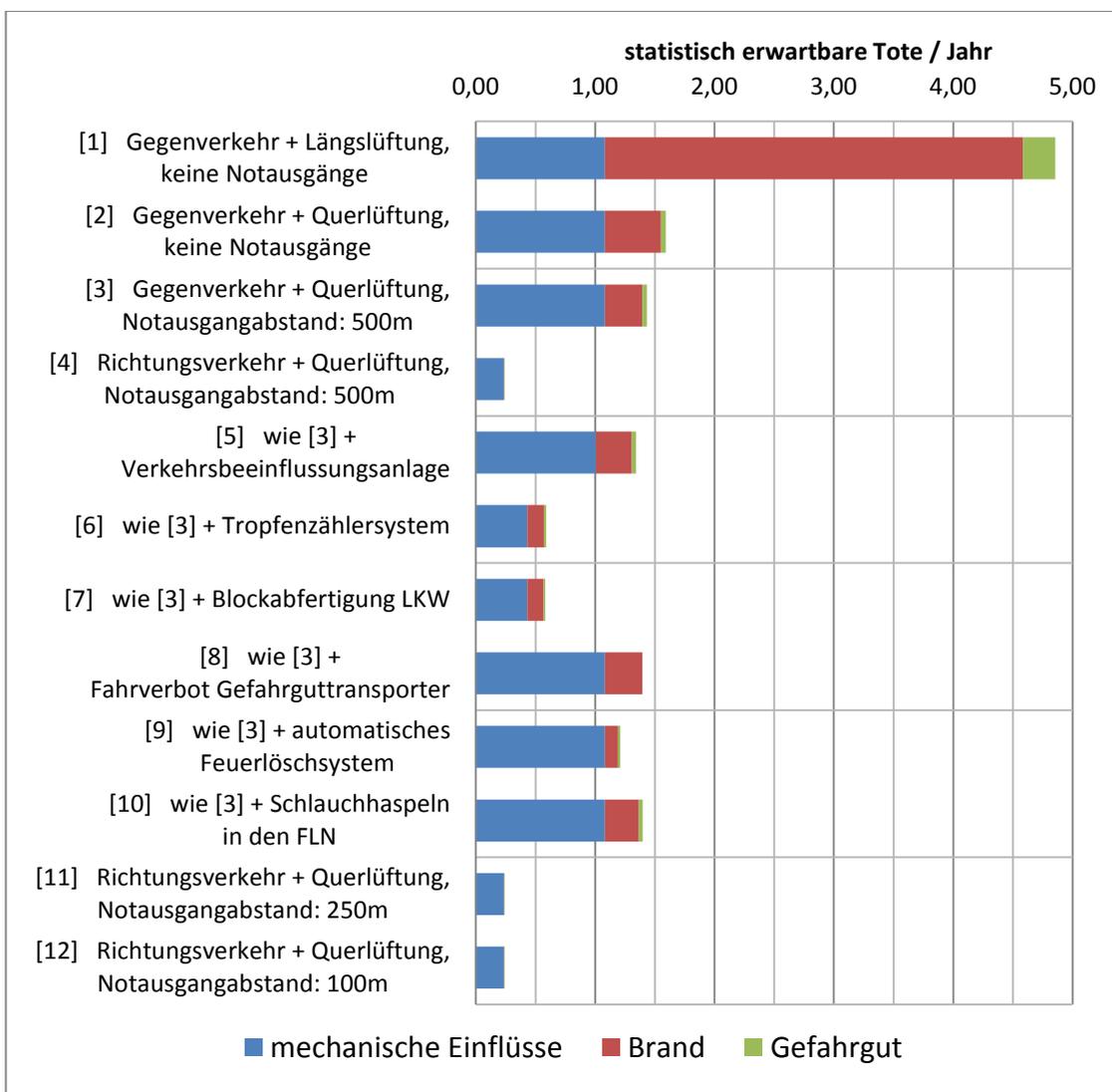


Abbildung VI-5: erwartbare Todesopfer pro Jahr bei entspr. Tunnelausrüstung

Eine deutliche Verbesserung der sicherheitstechnischen Situation im einröhrigen Tunnel kann durch die Einführung eines Tropfenzählersystems erreicht werden. Bei Verwendung dieses Systems kann die Opferzahl um mehr als die Hälfte reduziert werden. Alle anderen Einbauten bzw. Konzepte haben ebenso einen positiven Effekt auf die Sicherheit. Dieser ist jedoch wesentlich geringer als bei Verwendung des Tropfenzählersystems.

Eine gravierende Verbesserung der Sicherheit tritt durch ein zweiröhriges Tunnelkonzept ein. Hier wird die Opferzahl im Vergleich zum einröhrigen Tunnel deutlich gesenkt. Selbst bei Anwendung der besten sicherheitstechnischen Maßnahmen im Gegenverkehrstunnel kann der Sicherheitsstandard des Richtungsverkehrstunnels nicht erreicht werden. Keine wesentliche Verbesserung der Sicherheit kann durch eine Verringerung der Notausgangabstände auf unter 500m erzielt werden.

3. Beurteilung der Varianten

Um die Wirtschaftlichkeit der einzelnen Varianten zu untersuchen wurde eine vereinfachte Beurteilung durchgeführt. Als Referenz für Todesopfer pro Jahr und für Baukosten wird dabei der Gegenverkehrstunnel mit Querlüftung und Notausgängen (gelb hinterlegt) heran gezogen. Die Prozentzahlen der Toten pro Jahr bei den anderen Ausführungsvarianten werden aus Tabelle VI-2 (jeweils bezogen auf die Referenzvariante) errechnet. Die Kostenfaktoren für die Varianten beruhen auf Schätzungen aus bisher ausgeführten Tunnelprojekten der 3G (Gruppe Geotechnik Graz). Die Kosten für sicherheitstechnische Ausstattungen bei Tunnelbauwerken sind im Vergleich zu jenen eines Mehrausbruches an Material relativ gering. Darum steigen die Kosten beim Doppelröhrentunnel erheblich.

	Tote/Jahr [%]	Kosten- faktor [%]	Tote x Kosten [%]
RV + QL, NA: 500m	16,75	190,00	31,83
RV + QL, NA: 250m	16,64	192,00	31,95
RV + QL, NA: 100m	16,63	197,00	32,76
GV + Blockabfertigung LKW	40,64	100,00	40,64
GV + Tropfenzählersystem	41,09	101,00	41,51
GV + autom. Feuerlöschsystem	84,42	102,00	86,11
GV + Fahrverbot Gfg	97,53	100,00	97,53
GV + Schlauchhaspeln in FLN	97,67	100,00	97,67
GV + VBA	93,77	105,00	98,45
GV + QL, NA: 500m	100,00	100	100
RV + QL, k.NA	111,18	90,00	100,06
RV + LL, k. NA	338,95	85,00	288,11

Tabelle VI-3: Todesopfer zu Anschaffungskosten

RV...	Richtungsverkehr	GV...	Gegenverkehr
QL...	Querlüftung	LL...	Längslüftung
NA...	Notausgangabstand	VBA...	Verkehrsbeeinflussungsanlage
Gfg...	Gefahrguttransporter	FLN...	Feuerlöschnische

Schlauchhaspeln, automatische Feuerlöschsysteme bzw. das Tropfenzählersystem verursachen nur eine geringe Steigerung des Kostenfaktors, da sie auf die Gesamtauftragssumme gesehen, nur einen kleinen Teilbetrag ausmachen. Nicht berücksichtigt sind bei den Kostenfaktoren für Sicherheitseinrichtungen die Wartung und Instandhaltung.

Aus Tabelle VI-3 ist ersichtlich, dass der Richtungsverkehrstunnel trotz der hohen Baukosten bei dieser Betrachtung einen Vorteil gegenüber dem einröhrigen Tunnel aufweist. Die etwa doppelt so hohen Baukosten werden durch die Reduktion der Todesopfer gerechtfertigt.

Bei einröhrigen Tunneln kann durch die Einführung eines Tropfenzählersystems bzw. einer LKW Blockabfertigung mit geringem finanziellem Aufwand eine deutliche Verbesserung der Sicherheit erzielt werden. Für Bestandstunnel mit geringem Verkehrsaufkommen ist dies eine wirksame Maßnahme, um die Sicherheit zu erhöhen. Der Einbau einer Verkehrsbeeinflussungsanlage, eines automatischen Feuerlöschsystems oder Schlauchhaspeln in allen Feuerlöschnischen bringt laut Risikoanalyse nur eine geringe Verbesserung der Sicherheit. Um genaue Aussagen über die Wirtschaftlichkeit treffen zu können wäre es notwendig detailliertere Untersuchungen anzustreben. Zu beachten sind dabei auch die Kosten für den Betrieb, die Wartung und Instandhaltung der Systeme.

VII Umlegung der Erkenntnisse auf ein Tunnelprojekt in Indien

1. Projektbeschreibung

Der geplante Tunnel liegt im Nordwesten Indiens im Staat Kashmir. Er soll eine wintersichere Verbindung zwischen zwei Tälern gewährleisten. Die

Verkehrsführung erfolgt derzeit über eine steile, schwierig zu befahrende Passstraße. Der Tunnel wird ein Teil des geplanten Highways 1D. Aufgrund der topographischen Verhältnisse ist die Tunnellänge mit zirka 13km vorgegeben. Durch die Lage der Portale vorgegeben ist die Längsneigung des



Abbildung VII-1: Die derzeitige Passstraße

Bauwerkes, welche zirka 3,3% betragen wird. An Verkehr sind ca. 7.500 Fahrzeuge pro Tag zu erwarten, wobei davon ca. 2.500 auf LKW entfallen werden.

2. Vereinfachte Risikoanalyse

Zur vereinfachten Abschätzung der im Tunnel notwendigen Sicherheitseinrichtungen wird eine vereinfachte Risikoanalyse [17] durchgeführt. Die Berechnung ist im Vergleich zum Tunnelrisikomodell stark vereinfacht. Es wird ein Häufigkeitsäquivalent (Unfälle mit Personenschäden) errechnet. Dieses resultiert aus dem jahresdurchschnittlichen täglichen Verkehr, der Tunnellänge, der spezifischen Unfallrate und den Ab- bzw. Aufwertungsfaktoren für Tunnellänge, Verkehrsstärke und Verflechtungsstrecken. Das Äquivalent wird mit dem zu erwartenden Schadensausmaß multipliziert und liefert somit die Anzahl der zu erwartenden Todesopfer pro Jahr. Mit diesem errechneten Wert wird der Tunnel in eine Gefahrenklasse nach RVS 09.02.31 eingeteilt. Anhand dieser Gefahrenklasse kann die notwendige Ausstattung des Tunnels ermittelt werden.

Anzumerken ist, dass gemäß RVS die vereinfachte Risikoanalyse für das Tunnelprojekt in Indien nicht zulässig ist, da dieses Verfahren für Tunnel über 7,5 km Länge bzw. über 3% Längsneigung nicht eingesetzt werden darf. Für eine erste grobe Aussage zu diesem Projekt wird die genannte Analyse trotz Nichteinhaltung der RVS-Kriterien durchgeführt.

$$H = JDTV * 3,65 * 10^{-4} * L_{TU} * U_R * f_{VK} * f_{TL} * f_{VF}$$

$$f_{VK,GV} = \frac{3,217 * 10^{-14} * x^3 - 2,209 * 10^{-9} * x^2 + 5,021 * 10^{-5} * x - 0,2781}{0,077}$$

$$f_{VK,GV} = 0,45805$$

$$x = JDTV = 7500 \text{ Kfz}/24h \text{ (zur Berechnung müssen 10.000 heran gezogen werden)}$$

$$f_{TL} = 1$$

$$f_{VF} = 1$$

$$H = 7500 * 3,65 * 10^{-4} * 13,0 * 0,077 * 0,45805 * 1 * 1$$

$$H = 1,25517$$

$$R = H * SA$$

$$SA = 0,24386 * 1,244 \text{ (lt. RVS 09.02.31 – Tab. 5 \& 6, da Lkw Anteil 33\%)}$$

$$R = 1,25517 * 0,30336$$

$$\mathbf{R = 0.3808}$$

JDTV...	jährliche durchschnittliche tägliche Verkehrsstärke am gesamten Querschnitt
L _{TU} ...	Tunnellänge + Portalbereich [km]
U _R ...	spezifische Unfallrate [UPS / 1Mio. Kfz-km]
f _{VK,GV} ...	Korrekturfaktor Verkehrsleistung
f _{TL} ...	Korrekturfaktor Tunnellänge
f _{VF} ...	Korrekturfaktor Verflechtungsstrecke
H...	Häufigkeitsäquivalent [Unfälle mit Personenschäden / Jahr]
SA...	Schadensausmaß [Todesopfer/Ereignis]
R...	Risiko [Todesopfer / Jahr]

Aus dieser vereinfachten Risikoanalyse ergibt sich, dass der Tunnel ein Bauwerk der Gefährdungsklasse III nach RVS 09.02.31 (Tab. 7) ist. Somit ergeben sich laut österreichischen Richtlinien [17] folgenden Betriebs- und Sicherheitseinrichtungen, die eingebaut werden müssen:

- Verkehrslichtsignalanlage dreibegriffig bei Pannenbuchten
- Geschwindigkeitsbegrenzung
- Überholverbot bei GV
- Leiteinrichtungen selbstleuchtend
- Akustische Fahrstreifenabtrennung bei GV
- LED Fluchtwegmarkierungen
- Pannenbucht Belegung (mittels Induktionsschleife o.ä.)
- Videoüberwachung

- Notrufanlagen
- Telefonanlage
- Beschallungsanlage
- Automatische Brandmelder
- Tunnelfunkanlage
- Tragbare Feuerlöscher
- Nasslöschleitung

Optional dazu können folgende Einrichtungen geplant werden, um die Sicherheit zu erhöhen:

- Fahrstreifensignale
- Gefahrenzeichen „Achtung Gegenverkehr“
- Wechselverkehrszeichen
- Infotafeln
- Videobildauswertung
- Videobildaufzeichnung
- Gefahrguttransportüberwachung

3. Sicherheitseinrichtungen

3.1. Tunnelkonzept

Das geringe zu erwartende Verkehrsaufkommen von 7.500Kfz/d spricht für einen einröhriigen Tunnel. Um im Bedarfsfall eine Fluchtmöglichkeit bieten zu können ist eine Fluchtmöglichkeit im Zuluftkanal der Lüftung zu schaffen.

Ein Doppelröhrentunnel wird empfohlen, wenn die Risikoanalyse zeigen sollte, dass dadurch eine erhebliche Verbesserung der Tunnelsicherheit zu erwarten ist.

	United Nations	Europäische Gemeinschaft	ITA	Österreich	Schweiz	Deutschland	Großbritannien	Indien
Gegenverkehrstunnel	JA	JA	JA	JA	JA	JA	JA	JA
Richtungsverkehrstunnel	JA	JA	JA	JA	JA	JA	JA	JA

Tabelle VII-1: erlaubte Konzepte im internationalen Vergleich

3.2. Fluchtwege

Die Abstände der Notausgänge sind unabhängig von der Verkehrsführung im Tunnel mit 500m zu wählen. Wie aus Tabelle VII-3 ersichtlich ist, ist dies in den gängigen Normen der Maximalabstand, der ausgeführt werden darf. Aufgrund der geringen Verkehrsdichte im Tunnel wird von einer Verringerung dieses Abstandes abgesehen.

Bei einem Gegenverkehrstunnel werden die Fluchtwege im Zuluftkanal geführt. Die Anbindung vom Fahrraum zu den Fluchtwegen erfolgt über Schutzräume, die als Schleusen dienen. Diese sind mit Notruftelefon, Feuerlöschern und Verbandsmaterial auszustatten. Ein Konzept mit Fluchtmöglichkeiten direkt ins Freie ist hier nicht realisierbar, da die Überlagerung zu hoch ist.

Beim Doppelröhrentunnel sind Querschläge zwischen den beiden Röhren her zu stellen. Diese Querschläge sind als Schleusen auszuführen, um eine Rauchausbreitung in die Parallelröhre zu verhindern.

		United Nations	Europäische Gemeinschaft	ITA	Österreich	Schweiz	Deutschland	Großbritannien	Indien
	max. Fluchtwegabstand [m]	200 - 500	500	500	250 - 500	500 400 (bei 3% Steigung)	300	100 bei RV n.d. bei GV	300 bei RV n.d. bei GV
Fluchtwege erlaubt	über der Fahrbahn	n.d.	JA	n.d.	JA	NEIN	JA	n.d.	n.d.
	unter der Fahrbahn	n.d.	JA	n.d.	JA	JA	JA	n.d.	n.d.
	in zweite Röhre	n.d.	JA	n.d.	JA	JA	JA	n.d.	n.d.
	neben der Fahrbahn (abgetrennt)	n.d.	JA	n.d.	JA	JA	JA	n.d.	n.d.
	in einen Rettungsstollen	n.d.	JA	n.d.	JA	JA	JA	n.d.	n.d.
	in Rettungsräume (ohne Ausgang ins Freie)	n.d.	NEIN	n.d.	NEIN	NEIN	NEIN	n.d.	n.d.
	keine Notausgänge	n.d.	NEIN	n.d.	NEIN	NEIN	NEIN	n.d.	n.d.

n.d.... nicht definiert

Tabelle VII-2: Fluchtwege: Abstand und Anordnung

3.3. Pannenbuchten/Pannenstreifen

Ein durchgehender Pannenstreifen ist aus wirtschaftlicher Überlegung nicht sinnvoll. Auf Pannenbuchten kann jedoch nicht verzichtet werden. Die Abmessungen sind mit zirka 3 mal 40m zu wählen. Als Abstand werden aufgrund der Steigung 750m empfohlen. Damit ist zusätzlich die Forderung der indischen Norm erfüllt.

	United Nations	Europäische Gemeinschaft	ITA	Österreich	Schweiz	Deutschland	Großbritannien	Indien
Abstand [m]	n.d.	1000	n.d.	1000	600 - 900	600	n.d.	750
Länge [m]	n.d.	n.d.	n.d.	40	33	40	n.d.	n.d.
Breite [m]	n.d.	n.d.	n.d.	3	3	2,5	n.d.	n.d.
Ausstattung	n.d.	Notrufeinrichtung	n.d.	Notrufeinrichtung Feuerlöschnische	Notrufeinrichtung Hydrant	Notrufeinrichtung	n.d.	n.d.

n.d.... nicht definiert

Tabelle VII-3: Pannenbuchten: Abstand und Abmessungen

3.4. Belüftung

Eine mechanische Belüftung für einen so langen Tunnel ist unumgänglich. In den britischen und indischen Richtlinien wird nur eine mechanische Lüftung gefordert. In den restlichen in Betracht gezogenen Normen und technischen Richtlinien wird eine Querlüftung gefordert. Bei der Risikoanalyse im Kapitel VI hat sich gezeigt, welche Wirkung unterschiedliche Lüftungssysteme haben können. Daraus resultiert, dass es notwendig ist, den geplanten Tunnel mit einer Vollquerlüftung auszurüsten.

	United Nations	Europäische Gemeinschaft	ITA	Österreich	Schweiz	Deutschland	Großbritannien	Indien
Art	Quer- lüftung	Quer- lüftung	Quer- lüftung	Quer- lüftung	Quer- lüftung	Quer- lüftung	mech. Lüftung	mech. Lüftung
Raubabzugs- leistung [m ³ /s]	>80 empfohlen	n.d.	n.d.	120	je nach Ereignis und Tunnelquerschnitt fest zu legen	200	n.d.	n.d.

n.d.... nichtdefiniert

Tabelle VII-4: empfohlene Lüftungsart

3.5. Beleuchtung

Eine Beleuchtung des Bauwerkes ist unbedingt erforderlich. Diese wird von allen betrachteten Normen und Regelwerken gefordert. Für den Notfallbetrieb ist eine unterbrechungsfreie Stromversorgung (USV) zu errichten. Ob diese mittels Batterien oder Notstromaggregaten gewährleistet wird, ist sekundär.

3.6. Löscheinrichtungen

Im Tunnel ist eine Löschwasserleitung zu installieren. Die Leitung ist als Nassleitung auszuführen. Dies hat den Grund, dass die Fülldauer für eine Trockenleitung zu lang ist.

Die Größe des Löschwasserreservoirs richtet sich nach der Entnahmemenge und nach der konzipierten Löszeit. Werden 20l/s angenommen und als Löszeit eine Stunde angesetzt, so beträgt die benötigte Menge 72m³.

Beim betrachteten Tunnel sollte aufgrund der langen Anfahrtszeit der Rettungskräfte von reinen Feuerlöschnischen für die Feuerwehr abgesehen werden. Es ist ratsam die Nischen mit Schlauchhaspeln mit automatischer Schaumzumischung auszurüsten, die im Bedarfsfall von jedem Tunnelnutzer bedient werden können. Die Abstände der Nischen sind so zu wählen, dass jeder Punkt des Tunnels mit den installierten Schläuchen erreicht werden kann. Das Anbringen von Feuerlöschern kann bei dieser Variante komplett entfallen.

Auf Hydranten kann nicht gänzlich verzichtet werden, da diese zur Tunnelwäsche, zur Drainagespülung, aber auch zu Nachlöscharbeiten benutzt werden können. Es ist jedoch ausreichend die Abstände mit 250 oder 500m zu wählen.

	Löschwasser		Feuerlöschnischen		Feuerlöscher	
	Größe Reservoir [m³]	mind. Durchflussmenge [l/s]	Abstand [m]	Ausstattung	Abstand [m]	Ausstattung
United Nations	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
Europäische Gemeinschaft	n.d.	n.d.	250	n.d.	in jeder NRN	2 Stk.
ITA	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	systematisch (je nach Anforderung)	n.d.
Österreich	108	20	250	120m Schlauch + Strahlrohr + Hydrantenschlüssel	in jeder NRN	6kg Pulver, 9kg Schaum
Schweiz	250	20	150	Hydrant	in jeder NRN	2 x 6kg Pulver
Deutschland	72	20	150	Hydrant	in jeder NRN	2 x 6 kg Pulver
Großbritannien	n.d.	n.d.	50	Schlauchhaspeln od. alle 100m Hydranten	bei den Notrufeinrichtungen	13A (2kg) Pulverlöscher
Indien	n.d.	n.d.	müssen vorh. sein kein Abstand definiert	n.d.	50	n.d.

n.d.... nicht definiert

Tabelle VII-5: Übersicht Löscheinrichtungen

3.7. Leiteinrichtungen

Leit- bzw. Sperrlinien werden aufgebracht, um die Fahrspuren klar ab zu grenzen. Am Fahrbahnrand sind LED Leiteinrichtungen anzubringen. Auf Fahrstreifenanzeiger wird verzichtet.

3.8. Wechselverkehrszeichen

Wechselverkehrszeichen sind vor und im Tunnel zu installieren. Die Gestaltung ist einfach zu halten. Es reicht, wenn die Höchstgeschwindigkeit verändert werden kann bzw. einzelne andere Verkehrszeichen aufgeschaltet werden können. Auf eine Abstands- bzw. Geschwindigkeitskontrolle mit Hinweis auf das Fehlverhalten wird verzichtet.

3.9. Lichtsignalanlagen

Vor den Portalen sind Lichtsignalanlagen anzubringen. Auch wenn das Verkehrsaufkommen im Tunnel gering sein wird, wird trotzdem empfohlen Ampeln bei den Pannenbuchten zu situieren. Die Steuerung hat über die Tunnelwarte oder bei gewissen Ereignissen (Belegung Pannenbucht, Feueralarm) automatisiert zu erfolgen.

3.10. Schrankenanlagen

Schrankenanlagen sind nicht zwingend erforderlich. Ampelanlagen sind zur Anhaltung bzw. Warnung des Verkehrs ausreichend.

3.11. Brandmeldeanlage (BMA)

Der Einbau einer Brandmeldeanlage ist bei Tunnelbauwerken nötig. Zur Branddetektion sind Linienbrandmelder zu installieren. Diese sind zuverlässig, einfach zu warten und wenig störungsanfällig. Branddetektion mittels Sichttrübungsmessung oder Videobildauswertung erfordert eine stetige Wartung und ist zudem weniger zuverlässig bzw. störungsanfällig.

3.12. Videoüberwachung

Da die Steuerung der Sicherheitssysteme nach jetzigem Stand der Technik durchwegs durch zentrale Tunnelwarten vollzogen wird, ist eine Videoüberwachung unumgänglich. Ein Problem bei diesem Projekt könnte der hohe Schadstoffausstoß der Fahrzeuge in Indien sein. Dadurch ist es sehr wahrscheinlich, dass die Kameras schnell verschmutzen und keine Sicht mehr auf das Verkehrsgeschehen erlauben. Dies muss durch erhöhten Wartungsaufwand kompensiert werden.

United Nations	Europäische Gemeinschaft	ITA	Österreich	Schweiz	Deutschland	Großbritannien	Indien
JA	JA	JA	JA	JA	JA	JA	JA

Tabelle VII-6: Übersicht Videoüberwachung

3.13. Notrufsystem

Im Tunnel ist ein Notrufsystem zu installieren. Die Notrufe sind direkt an die Tunnelwarte weiter zu leiten. Die Notrufnischen sind gegenüber bzw. neben den Feuerlöschnischen anzuordnen. Der Intervallabstand kann doppelt so hoch sein, wie jener der Feuerlöschnischen. Die Notrufeinrichtung ist in einer begehbaren Nische unter zu bringen, um die Verbindungsqualität durch Umgebungsgeräusche nicht zu mindern.

		United Nations	Europäische Gemeinschaft	ITA	Österreich	Schweiz	Deutschland	Großbritannien	Indien
Notruf-einrichtungen	Abstand [m]	n.d.	150	n.d.	150	150	150	50	200
	Ausstattung	n.d.	begehbare Kabine	n.d.	begehbare Kabine	begehbare Nische	begehbare Nische	n.d.	n.d.

n.d.... nicht definiert

Tabelle VII-7: Notrufeinrichtungen: Abstand und Ausführung

3.14. Tunnelfunk und Radioempfang

Der Tunnelfunk ist für die Kommunikation zwischen Erhalterdiensten und Tunnelwarte wichtig. Ein Funksystem ist somit unbedingt zu installieren. Es ist darauf zu achten, dass auch die Einsatzkräfte in das Funksystem mit eingebunden werden. Der Radioempfang im Tunnel ist zu gewährleisten. Es sind jedoch nur Frequenzen von Sendern frei zu schalten, die Verkehrsmeldungen durch geben.

3.15. Tunnelwarte

Eine eigene Tunnelwarte für jeden Tunnel ist nicht notwendig. Die Steuerung der Betriebseinrichtungen kann von einer Zentrale für mehrere Tunnel aus erfolgen. Die Situierung der Warte ist nebensächlich. Alle im Tunnelbetrieb benötigten Anlagen sind mittels Fernsteuerung zu bedienen. Eine manuelle Steuerung der Anlagen vor Ort ist zu ermöglichen. Dies kann bei Wartungen oder im Ernstfall nötig sein. Hierfür sind Schaltelemente in Tunnelnischen bzw. in den Betriebszentralen an den Portalen anzubringen.

3.16. Einsatzorganisationen

Da sich das Bauwerk in einer entlegenen Gegend befindet, ist es ratsam eine lokale Feuerwehr einzurichten. Vorstellbar ist der kombinierte Einsatz der Mannschaft als Straßenerhalter bzw. im Bedarfsfall als Feuerwehr. Entsprechende Fahrzeuge und Räumlichkeiten sind anzukaufen bzw. zu errichten.

3.17. Organisatorische Sicherheitsmaßnahmen

Der zu erwartende LKW-Anteil ist mit ca. 30% sehr hoch. Darum ist es sinnvoll bei der einröhrigen Variante eine Blockabfertigung anzuwenden. Bei diesem System werden die LKWs auf Sammelplätzen vor dem Tunnel angehalten und zu fixen Zeiten mit Begleitfahrzeugen durch den Tunnel eskortiert. Wie sehr dieses System zur Steigerung der Verkehrssicherheit beiträgt wird durch die Risikoanalyse gezeigt.

4. Risikoanalyse nach RVS 09.03.11

Zur Beurteilung der Sicherheit im Tunnel wurde eine Risikoanalyse für drei verschiedene Varianten durchgeführt:

- Richtungsverkehrstunnel (zweiröhrig)
- Gegenverkehrstunnel (einröhrig)
- Gegenverkehrstunnel (einröhrig) mit Blockabfertigung für LKW

Diese Analyse ist notwendig, da die Werte aus Kapitel VI nicht übernommen werden können. Diese ändern sich mit der Tunnellänge, Verkehrszusammensetzung und Verkehrsstärke. Um einen Vergleich zu ähnlichen, bereits bestehenden Tunneln zu haben, wurden der Plabutsch- (Stand 2003 und 2011) und der Arlbergtunnel (Stand 2011) einer Risikoanalyse unterzogen. Am ehesten dem geplanten Tunnel entspricht der Arlbergtunnel. Er weist eine Länge von 14km und eine Verkehrsstärke von 8.000Kfz/d auf. Ein großer Unterschied liegt in der Zusammensetzung des Verkehrs. Für das indische Tunnelprojekt wird ein LKW-Anteil von 30% erwartet. Am Arlbergtunnel beträgt dieser lediglich 11%.

Szenario	Tote/Jahr	Teilsummen Tote/Jahr		
		mechanisch	Brand	Gefahrgut
GV + QL, NA: 500m	0,5220	0,354583	0,139479	0,027941
GV + Blockabfertigung LKW	0,2135	0,141833	0,061134	0,010582
RV + QL, NA: 500m	0,1575	0,156626	0,000628	0,000271
Plabutschtunnel einröhrig	2,1820	1,407887	0,741329	0,032785
Plabutschtunnel zweiröhrig	0,9644	0,957662	0,007425	0,001000
Arlbergtunnel	0,4804	0,246826	0,220234	0,013346

Tabelle VII-8: Übersicht Risikoanalyse Tunnelprojekt Indien und Vergleichstunnel

- GV... Gegenverkehr
 RV... Richtungsverkehr
 QL... Querlüftung
 NA... Notausgangabstand

Die sicherheitstechnische Ausstattung des Plabutschtunnels soll in etwa jener des geplanten Tunnels entsprechen. Abweichungen gibt es bei den Notausgängen. Beim Plabutschtunnel (Stand 2003) sind keine vorhanden. Des Weiteren gibt es

Abweichungen bei der Verkehrsstärke. Als Berechnungsgrundlage für den Plabutschtunnel wurden die entsprechenden Werte der Jahre 2003 (23.000Kfz/d) 2011 (32.500Kfz/d) erhoben. [5] Die detaillierten Berechnungen sind im Anhang B zu finden.

Anhand der Ergebnisse wird klar, wieso es nicht sinnvoll ist, verschiedene Tunnel miteinander zu vergleichen. Ändert sich die Länge des Bauwerkes oder ist ein

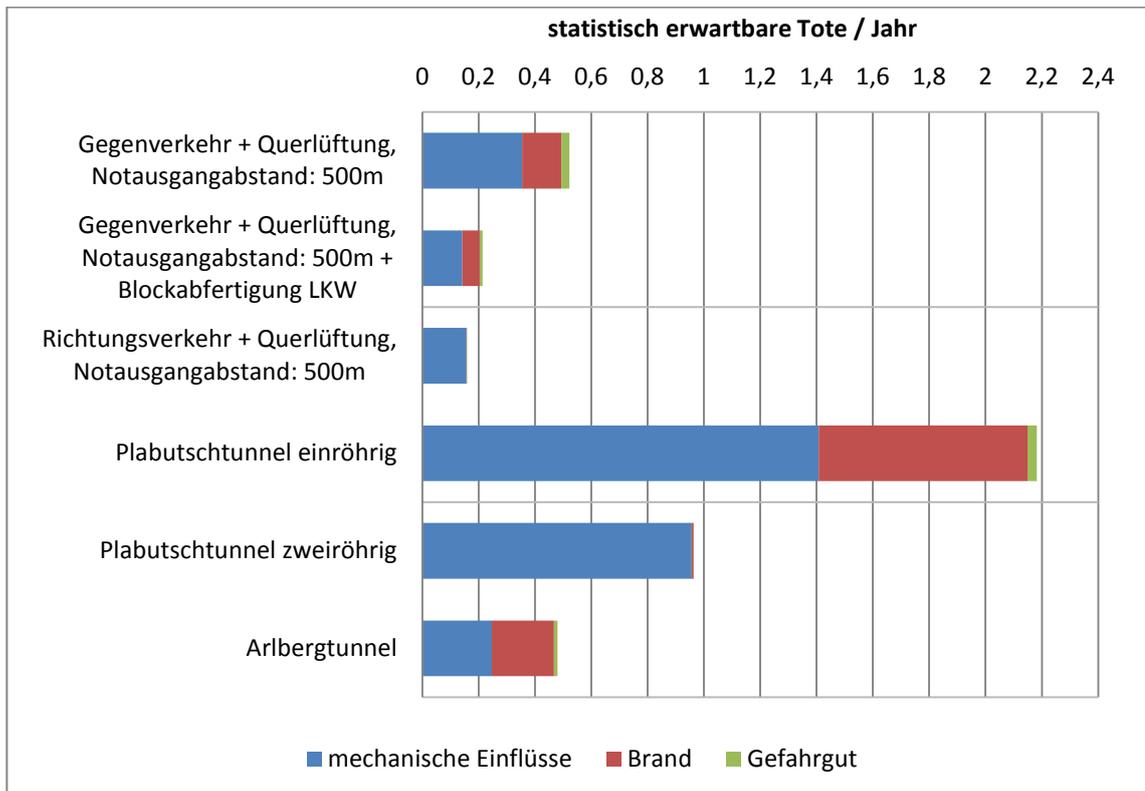


Abbildung VII-2: Übersicht Risikoanalyse Tunnelprojekt Indien

höheres Verkehrsaufkommen vorhanden, so ändern sich auch die zu erwartenden Opferzahlen. Der einröhrige Arlbergtunnel ist laut Risikoanalyse sicherer als der zweiröhrige Plabutschtunnel. Diese geringere Anzahl an Unfällen mit Todesfolge resultiert jedoch nur aus dem geringeren Verkehrsaufkommen.

Die sicherste Variante für das Projekt ist ein Doppelröhrentunnel. Wird der Vergleich zwischen Plabutsch, Arlberg- und dem indischen Tunnel angestellt, so relativiert sich dieses Ergebnis. Selbst die schlechteste der drei Varianten für das indische Tunnelprojekt ist annähernd gleich sicher wie der Arlbergtunnel. Im Vergleich zum Plabutschtunnel schneidet der indische Tunnel hervorragend ab. Die Gründe dafür wurden schon genannt.

Aus wirtschaftlicher und sicherheitstechnischer Sicht ist der Gegenverkehrstunnel mit Blockabfertigung für LKW zur Ausführung zu bringen. Sowohl die geringen Baukosten, als auch der hohe Sicherheitsstandard dieser Variante sind dafür ausschlaggebend.

VIII Abkürzungsverzeichnis

ASN	...Abstellnische
ASTRA	...Bundesamt für Straßen (SUI)
BMA	...Brandmeldeanlage
cd/m ²	...Leuchtdichte in Candela pro Quadratmeter
CO	...Kohlenmonoxid
EG	...Europäische Gemeinschaft
FLN	...Feuerlöschnische
f _{VK}	...Korrekturfaktor Verkehrsstärke
f _{TU}	...Korrekturfaktor Tunnellänge
f _{VF}	...Korrekturfaktor Verflechtungsstrecken
Gfg	...Gefahrgut
GV	...Gegenverkehr
H	...Häufigkeitsäquivalent
ITA	...International Tunnelling and Underground Space Association
JDTV	...jahresdurchschnittlicher täglicher Verkehr
KFZ	...Kraftfahrzeug
km	...Kilometer
l	...Liter
LED	...light emitting diode
LKW	...Lastkraftwagen
LL	...Längslüftung
L _{TU}	...Tunnellänge inklusive Einfahrtsbereich
l/min	...Liter pro Minute
m	...Meter
m ²	...Quadratmeter
m ³	...Kubikmeter
min	...Minute
MW	...Megawatt
NA	...Notausgang
NO _x	...Stickoxid
NRN	...Notrufnische
n.d.	...nicht definiert
OECD	...Organization for Economic Co-operation and Development
PIARC	...World Road Association
PKW	...Personenkraftwagen
ppm	...parts per Million
QL	...Querlüftung
R	...Risiko
RABT	...Richtlinien für die Ausstattung und den Betrieb von Straßentunneln
RV	...Richtungsverkehr
RVS	...Richtlinien und Vorschriften für das Straßenwesen
SA	...Schadensausmaß

UKW ...Ultrakurzwelle

UN ...United Nations – Vereinte Nationen

UNECE...United Nations Economics for Europe

UPS ...Unfälle mit Personenschäden

USV ...unterbrechungsfreie Stromversorgung

UVEK ...Eidgenössisches Departement für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation

VBA ...Verkehrsbeeinflussungsanlage

WVZ ...Wechselverkehrszeichen

IX Abbildungsverzeichnis

ABBILDUNG III-1: QUERSCHNITT DES DOPPELSTOCKTUNNELS AUF DER A86 BEI PARIS [11]	7
ABBILDUNG III-2: NOTAUSGANG [53]	8
ABBILDUNG III-3: QUERSCHLAG	8
ABBILDUNG III-4: PANNENBUCHT MIT FLN, NRN UND NA [53]	10
ABBILDUNG III-5: LÄNGSLÜFTUNG [31]	11
ABBILDUNG III-6: LÄNGSLÜFTUNG MIT RAUCHGASABSAUGUNG [31]	11
ABBILDUNG III-7: VOLLQUERLÜFTUNG [31]	12
ABBILDUNG III-8: STRAHLVENTILATOREN [53]	12
ABBILDUNG III-9: SCHEMATISCHER VERLAUF DER LEUCHTDICHTE IM TAGESVERLAUF [19]	13
ABBILDUNG III-10: PRINZIP DER GEGENSTRAHLBELEUCHTUNG [60]	14
ABBILDUNG III-11: HOCHDRUCK ENTLADUNGSLAMPEN IM EINFAHRTSBEREICH	14
ABBILDUNG III-12: FEUERLÖSCHNISCHE MIT SCHLAUCHHASPEL [53]	15
ABBILDUNG III-13: SPERRLINIE MIT RUMPELSTREIFEN [53]	16
ABBILDUNG III-14: WVZ	17
ABBILDUNG III-15: LICHTSIGNALANLAGE IM TUNNEL	17
ABBILDUNG III-16: SOS- UND FEUERTASTER	18
ABBILDUNG III-17: LEUCHTDICHTE-UND VIDEOKAMERA	19
ABBILDUNG III-18: NOTRUF EINRICHTUNG	20
ABBILDUNG III-19: RELAISSTATION FÜR MOBILFUNKEMPFANG	21
ABBILDUNG III-20: TUNNELWARTE DES ARLBERG TUNNELS (1978) [3]	22
ABBILDUNG III-21: TUNNELWARTE KLAGENFURT	22
ABBILDUNG III-22: VORPORTALBEREICH EHRENTALERBERGTUNNEL [39]	24
ABBILDUNG III-23: NOTRUFSTATION, HYDRANT UND BESCHALLUNGSANLAGE IM VORPORTALBEREICH	24
ABBILDUNG III-24: ÜBERSICHT DER GEFORDERTEN SICHERHEITSEINRICHTUNGEN	36
ABBILDUNG V-1: SCHEMA DES EISENHOWER MEMORIAL TUNNELS [23]	42
ABBILDUNG V-2: EINE DER KAVERNEN IM LAERDAL TUNNEL [36]	43
ABBILDUNG V-3: PANNENBUCHT KURZ NACH ERÖFFNUNG (1978) [3]	44
ABBILDUNG V-4: QUERSCHLAG ZWISCHEN BAHN- UND STRAßENTUNNEL [56]	44
ABBILDUNG V-5: NOTAUSFAHRT NORD [57]	45
ABBILDUNG V-6: SCHUTZRAUM [45]	46
ABBILDUNG V-7: TROPFENZÄHLERSYSTEM [43]	47
ABBILDUNG VI-1: QUERSCHNITT OHNE FLUCHTMÖGLICHKEIT	50
ABBILDUNG VI-2: QUERSCHNITT MIT FLUCHTMÖGLICHKEIT ÜBER DER FAHRBAHN	50
ABBILDUNG VI-3: QUERSCHNITT MIT BAULICH ABGETRENNTEM FLUCHTWEG	51
ABBILDUNG VI-4: QUERSCHNITT MIT FLUCHTWEG UNTER DER FAHRBAHN	51
ABBILDUNG VI-5: ÜBER QUERSCHLÄGE VERBUNDENER, ZWEIRÖHRIGER TUNNEL	51
ABBILDUNG VI-7: QUERSCHNITT MIT BAULICHER TRENNUNG DER RICHTUNGSFAHRBAHNEN	52
ABBILDUNG VI-6: ZWEIRÖHRIGER TUNNEL MIT WARTUNGS- BZW. FLUCHTTUNNEL	52
ABBILDUNG VI-8: EINRÖHRIGER TUNNEL MIT GETRENNTEN RICHTUNGSFAHRBAHNEN	52
ABBILDUNG VI-9: ERWARTBARE TODESOPFER PRO JAHR BEI ENTSPR. TUNNELAUSRÜSTUNG	56
ABBILDUNG VII-1: DIE DERZEITIGE PASSSTRASSE	59
ABBILDUNG VII-2: ÜBERSICHT RISIKOANALYSE TUNNELPROJEKT INDIEN	68

X Tabellenverzeichnis

<i>TABELLE II-1: UNFALLRATE UND UNFALLFOLGEN IN ÖSTERREICH [46]</i>	5
<i>TABELLE VI-1: DATEN FÜR DEN FIKTIVEN TUNNEL</i>	55
<i>TABELLE VI-2: ERWARTBARE TOTE PRO JAHR</i>	55
<i>TABELLE VI-3: TODESOPFER ZU ANSCHAFFUNGSKOSTEN</i>	57
<i>TABELLE VII-1: ERLAUBTE KONZEPTE IM INTERNATIONALEN VERGLEICH</i>	61
<i>TABELLE VII-2: FLUCHTWEGE: ABSTAND UND ANORDNUNG</i>	62
<i>TABELLE VII-3: PANNENBUCHTEN: ABSTAND UND ABMESSUNGEN</i>	62
<i>TABELLE VII-4: EMPFOHLENE LÜFTUNGSART</i>	63
<i>TABELLE VII-5: ÜBERSICHT LÖSCHEINRICHTUNGEN</i>	64
<i>TABELLE VII-6: ÜBERSICHT VIDEOÜBERWACHUNG</i>	65
<i>TABELLE VII-7: NOTRUF EINRICHTUNGEN: ABSTAND UND AUSFÜHRUNG</i>	66
<i>TABELLE VII-8: ÜBERSICHT RISIKOANALYSE TUNNELPROJEKT INDIEN UND VERGLEICHSTUNNEL</i>	67

XI Literaturverzeichnis

- [1] **Amt für Betrieb Nationalstrassen** Statistiken Gotthard Strassentunnel 1980 - 2010. - 2010.
- [2] **AQUASYS Technik GmbH** Rauchgaskühlung Gleinalmtunnel. - 2010.
- [3] **Arlberg Strassentunnel Aktiengesellschaft** Der Arlberg Strassentunnel und die Zufahrtsrampen. - 1981.
- [4] **ASFINAG** A10 Tauern Autobahn Vollausbau Tauerntunnel. - 2010.
- [5] **ASFINAG** Autobahnen und Schnellstraßen-Finanzierungs-Aktiengesellschaft ASFINAG. - April 2011. - <http://www.asfinag.at/dauerzaehlstellen-2010>.
- [6] **ASFINAG Verkehrstelematik GmbH** Verkehrstechnische Grundsätze zur Planung von Verkehrstelematikanlagen. - 2007.
- [7] **Becher Thorsten Dipl.-Ing.** Ereignisdetektion mittels digitaler Bildauswertung // Sicherheit und Schutz von Straßentunneln - Aktuelle Fragestellungen und Entwicklungen. - : Bundesanstalt für Straßenwesen, 2009.
- [8] **Biberauer Gerald** Firma Aquasys. - Telefonat im April 2011.
- [9] **Bodenhaupt Frank DI** Strassenbeleuchtung. - 2011. - http://www.strassenlicht.de/index.php?option=com_content&view=article&id=81:tunnelbeleuchtung&catid=37:beleuchtungssituationen&Itemid=53.
- [10] **Brekke Arne** The world's longest road tunnel. - Bergen Guide, - 2011 - <http://www.bergen-guide.com/538.htm>.
- [11] **Brunx G.** 3.Fachtagung: Tunnel sind sicher! - Sind Tunnel sicher? // Tunnel. - 01/2005. - S. 46-49.
- [12] **Brunx G.** Sicherheit in Straßentunneln // Tunnel. - 06/2010.
- [13] **Brunx G.** Sicherheit in Straßentunneln // Tunnel. - 06/2004. - S. 40-47.
- [14] **Brunx G.** Tunnel sind sicher! - Sind Tunnel sicher? // Tunnel. - 01/2004. - S. 39-43.
- [15] **Bundesministerium für Verkehr Bau und Stadtentwicklung, Bundesanstalt für Straßenwesen.** - 2011. - www.bast.de.
- [16] **Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie** Tunnel - Sicherheit // RVS 09.03.11- Tunnel Risikoanalysemodell. - : Österreichische Forschungsgesellschaft Straße-Schiene-Verkehr, 2008.
- [17] **Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie** Tunnel, Ausrüstung, Belüftung // RVS 09.02.32 - Luftbedarfsberechnung. - : Österreichische Forschungsgesellschaft Straße - Schiene - Verkehr, 2010.

- [18] **Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie** Tunnel, Tunnelausrüstung, Betrieb und Sicherheit // RVS 09.02.22 - Tunnelausrüstung. - : Österreichische Forschungsgesellschaft Straße - Schiene - Verkehr, 2010.
- [19] **Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie** Tunnel, Tunnelausrüstung, Lichttechnik // RVS 09.02.41 - Beleuchtung. - : Österreichische Forschungsgesellschaft Straße - Schiene - Verkehr, 2009.
- [20] **Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie** Tunnel, Tunnelbau, Bauliche Gestaltung // RVS 09.01.23 - Innenausbau. - : Österreichische Forschungsgesellschaft Straße - Schiene - Verkehr, 2009.
- [21] **Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie** Tunnel, Tunnelbau, Bauliche Gestaltung // RVS 09.01.25 - Vorportalbereich. - : Österreichische Forschungsgesellschaft Straße - Schiene - Verkehr, 2009.
- [22] **Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie** Tunnel, Tunnelbau, Bauliche Gestaltung // RVS 09.01.24 - Bauliche Anlagen. - : Österreichische Forschungsgesellschaft Straße - Schiene - Verkehr, 2009.
- [23] **Colorado Department of Transportation** Eisenhower Tunnel - CDOT. - 2011. - <http://www.coloradodot.info/travel/eisenhower-tunnel>.
- [24] **Eidgenössisches Departement für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK** Lüftung der Strassentunnel - Systemwahl, Dimensionierung und Ausstattung. - Bundesamt für Strassen ASTRA, - 2006.
- [25] **Eidgenössisches Departement für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK** Sicherheitsanforderungen an Tunnel im Nationalstrassennetz. - Bundesamt für Strassen - ASTRA, - 2010.
- [26] **Engineering.com** Laerdal Tunnel > Engineering.com. - 2011. - <http://www.engineering.com/Library/ArticlesPage/tabid/85/articleType/ArticleView/articleId/60/categoryId/6/Laerdal-Tunnel.aspx>.
- [27] **Europäische Gemeinschaft** Richtlinie 2004/54/EG des Europäischen Parlamentes und des Rates. - 2004.
- [28] **Färber, B. & Färber, B.A.** Verhaltensanweisungen bei Notsituationen in Straßentunneln. - 2009.
- [29] **Forschungsgesellschaft für Strassen- und Verkehrswesen** Richtlinien für die Ausstattung und den Betrieb von Straßentunneln. - 2006.
- [30] **HBI Haerter AG** Reinigung von Abluft aus Strassentunneln Stand der Technik. - 2008.
- [31] **HBI Haerter AG** Stand und aktuelle Entwicklung bei der Lüftung und Entrauchung von Strassen - und Bahntunneln in Mitteleuropa. - 2003.
- [32] **Indian Roads Congress** Guidelines for Road Tunnels. - 2010.

- [33] **Innenministerium Bayern** Innenministerium Bayern. - 2011. - <http://www.innenministerium.bayern.de/bauen/strassenbau/aufgaben/08979/>.
- [34] **ITA - International Tunnelling and Underground Space Association** Long tunnels at great depth. - 2010. - ISBN:978-2-9700624-3-1.
- [35] **ITA - PIARC** A Comparative Analysis of the Mont Blanc, Tauern and Gotthard Tunnel Fires // Routes & Roads. - 10/2004. - S. 19-63. - 0004-556 X.
- [36] **Kunderka** Wikimedia Commons. - April 2011. - http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/9/9d/Laerdal_Tunnel_inside.JPG?uselang=de.
- [37] **Listec GmbH** Brandfrüherkennungssystem im Autobahntunnel Paris A86 // Tunnel. - 05/2006.
- [38] **Longlite Technologies AG** Der Einsatz nachleuchtender Fluchtwegmarkierungen in Tunnels. - Longlite, 2011. - www.longlite.ch.
- [39] **Microsoft** Bing Maps 3D [Online].
- [40] **Nationalrat** Bundesgesetzblatt für die Republik Österreich // Straßentunnel-Sicherheitsgesetz - STSG und Änderung der Straßenverkehrsordnung 1960. - 2006.
- [41] **Naumann MR DI Joachim** Sicherheit von Straßentunneln in Deutschland - 2009.
- [42] **ORF.at** kaernten.orf.at - 12. 11 2010. - <http://kaernten.orf.at/stories/481256/>.
- [43] **Panoramio** [Online]. - April 2011 - <http://www.panoramio.com/photo/11618357>.
- [44] **PIARC Technical Committee C3.3 Road tunnel operation** Risk Analysis For Road Tunnels - PIARC - 2008.
- [45] **Piazzale Sud del Traforo del Monte Bianco TMB** - Benutzerinfo - März 2011 - <http://www.tunnelmb.net/v3.0/de/indexde.asp>.
- [46] **Robatsch K, DI; Nussbaumer C, DI** Sicherheitsvergleich von Tunnels - Kuratorium für Verkehrssicherheit - 2005.
- [47] **Robinson Nicole** LEDs leading lighting // Tunnels & Tunneling International - August 2010. - S. 36-38.
- [48] **Schweizerische Eidgenossenschaft** Amt für Betrieb Nationalstrassen - 2011 - <http://www.gotthard-strassentunnel.ch/>.
- [49] **SIA Zürich** SIA 197 - Projektierung Tunnel - Grundlagen - 2004.
- [50] **SIA Zürich** SIA 197/2 - Projektierung Tunnel – Strassentunnel - 2004.
- [51] **Tauernautobahn AG** Der Karawanken-Strassentunnel und die Zufahrtsrampen - Frohnweiler Druck GesmbH, 1991.

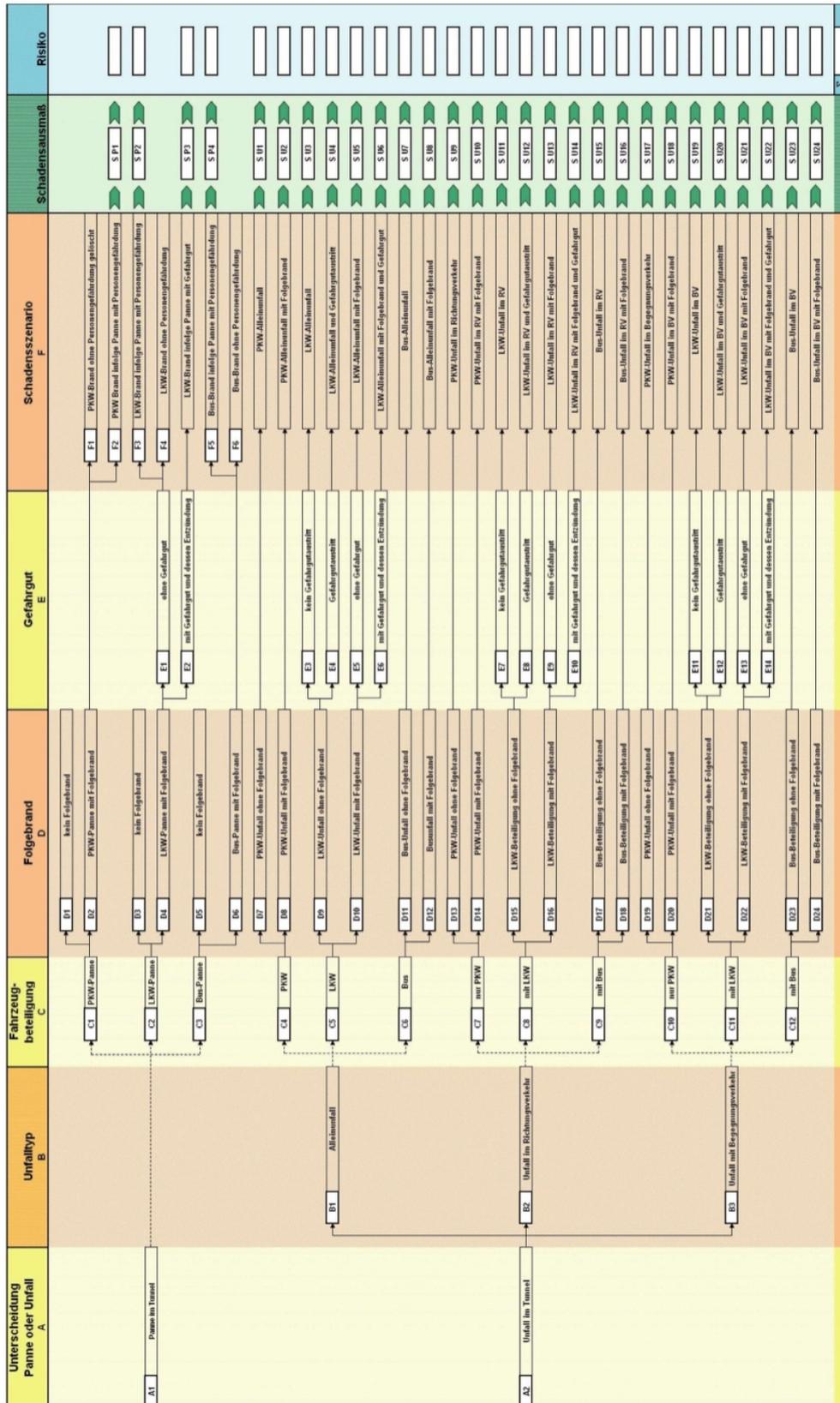
- [52] **The Highways Agency** BD 78/99 - Design of Road Tunnels - 1999.
- [53] **Tschermanegg Udo DI** - Gruppe Geotechnik Graz.
- [54] **United Nations - Economic and Social Council** Recommendations of the group of experts on safets in road tunnels - final report - 2001.
- [55] **Verma** Signaltechnische Anforderungen in Straßentunneln // Tunnel. - 03/2006. - S. 58-61.
- [56] Wikipedia [Online]. - Mai 2010. - http://de.wikipedia.org/wiki/Arlberg_Straßentunnel.
- [57] Wikipedia [Online]. - Februar 2011. - <http://de.wikipedia.org/wiki/Plabutschunnel>.
- [58] Wikipedia [Online]. - März 2011. - <http://de.wikipedia.org/wiki/Mont-Blanc-Tunnel>.
- [59] Wikipedia [Online]. - Januar 2011. - <http://de.wikipedia.org/wiki/Gotthard-Strassentunnel>.
- [60] Wikipedia [Online] // Gegenstrahlbeleuchtung. - 2011 - <http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Datei:Gegenstrahl.jpg&filetimestamp=20090303103320>.

Anhang A – Risikoanalyse fiktiver Tunnel

Inhaltsverzeichnis

ANHANG A – RISIKOANALYSE FIKTIVER TUNNEL	A 1
1. EREIGNISBAUM AUS RVS 09.03.11	A 2
2. SCHEMATISCHER ABLAUF DER BERECHNUNG	A 3
3. INPUTDATEN	A 8
3.1. <i>Unveränderliche Inputdaten</i>	A 8
3.2. <i>Veränderliche Inputdaten</i>	A 9
3.2.1 GV – Tunnel mit Längslüftung.....	A 9
3.2.2 GV – Tunnel mit Querlüftung	A 10
3.2.3 GV – Tunnel mit Querlüftung und Notausgängen alle 500m	A 11
3.2.4 RV – Tunnel mit Querlüftung und Notausgängen alle 500m	A 12
3.2.5 Verkehrsbeeinflussungsanlage (VBA).....	A 13
3.2.6 Tropfenzählersystem	A 14
3.2.7 Blockabfertigung für LKW	A 15
3.2.8 Fahrverbot für Gefahrguttransporter.....	A 16
3.2.9 Einbau eines automatischen Löschsystems	A 17
3.2.10 Schlauchhaspeln in allen Feuerlöschnischen.....	A 18
3.2.11 RV – Tunnel mit Querlüftung und Notausgängen alle 250m	A 19
3.2.12 RV – Tunnel mit Querlüftung und Notausgängen alle 100m.....	A 20

1. Ereignisbaum aus RVS 09.03.11



2. Schematischer Ablauf der Berechnung

<i>Inputdaten</i>	
Verkehrsführung:	Richtungsverkehr
Straßenart	Autobahn
Tunnellänge:	1,5 km
Lüftungssystem:	Längslüftung
L _{TU}	1,6 km
Verkehrsstärke:	22.000 Kfz/d
Anteil PKW-Verkehr:	74,5 %
Anteil LKW-Verkehr:	23,0 %
Anteil Bus-Verkehr:	2,5 %
Anteil der Gefahrguttransporte am Schwerverkehr:	4,0 %
Stauhäufigkeit:	120 h/Jahr
	1,37 %
Abstand Notausgänge:	Keine NA

Korrekturfaktor Verkehrsleistung:

$$f_{VK} = (7,39 * 10^{-2} * \ln(22.000) - 0,6935) / 0,112 = 0,8911126$$

Korrekturfaktor Tunnellänge:

$$f_{TU} = (0,1081 * 1,6^{-0,3543}) / 0,112 = 0,8171240$$

Korrekturfaktor Verflechtungsstrecken:

$$f_{VF} = [(3,15 * 0,112 + 0,05 * 2 * 0,112) / 3,2] / 0,112 = 1,0156250$$

Häufigkeitsanalyse

A1 und A2: Pannen- und Unfallrate

A1	2,372	Pannen/1 Mio. Kfz-km
----	-------	----------------------

	0,112	UPS/1 Mio. Kfz-km	f _{VK}	0,8911126079
			f _{TU}	0,8171239905
			f _{VF}	1,01562500
A2	0,0828270045	UPS/1 Mio. Kfz-km		

B1 bis B3: Einteilung der Unfalltypen

B1	40%	0,0331308018	UPS/ 1Mio. Kfz-km
B2	59%	0,0488679327	UPS/ 1Mio. Kfz-km
B3	1%	0,0008282700	UPS/ 1Mio. Kfz-km

C1 bis C3: Fahrzeugbeteiligung bei Pannen

	Basiswert P	P bei geänderter Verkehrszusammensetzung		
C1	75,7%	73,91	1,7532437484	Ereignisse/ 1Mio. Kfz-km
C2	20,9%	23,80	0,5644655446	Ereignisse/ 1Mio. Kfz-km
C3	3,4%	2,43	0,0576057143	Ereignisse/ 1Mio. Kfz-km

B1 bis B3: Einteilung der Unfalltypen

B1	40%	0,0331308018	UPS/ 1Mio. Kfz-km
B2	59%	0,0488679327	UPS/ 1Mio. Kfz-km
B3	1%	0,0008282700	UPS/ 1Mio. Kfz-km

C1 bis C3: Fahrzeugbeteiligung bei Pannen

	Basiswert P	P bei geänderter Verkehrszusammensetzung		
C1	75,7%	73,91	1,7532437484	Ereignisse/ 1Mio. Kfz-km
C2	20,9%	23,80	0,5644655446	Ereignisse/ 1Mio. Kfz-km
C3	3,4%	2,43	0,0576057143	Ereignisse/ 1Mio. Kfz-km

C4 bis C12: Fahrzeugbeteiligung bei Unfällen

Alleinunfälle:

	Basiswert U	U bei geänderter Verkehrszusammensetzung		
C4	90,6%	88,23	0,0292317612	Ereignisse/ 1Mio. Kfz-km
C5	9,3%	10,70	0,0035433393	Ereignisse/ 1Mio. Kfz-km
C6	0,1%	0,07	0,0000236649	Ereignisse/ 1Mio. Kfz-km

Unfälle im Richtungsverkehr:

	Basiswert U	U bei geänderter Verkehrszusammensetzung		
C7	63,6%	60,32	0,0294761500	Ereignisse/ 1Mio. Kfz-km
C8	34,4%	39,33	0,0192204076	Ereignisse/ 1Mio. Kfz-km
C9	2,0%	1,44	0,0007016661	Ereignisse/ 1Mio. Kfz-km

Unfälle im Begegnungsverkehr:

	Basiswert U	U bei geänderter Verkehrszusammensetzung		
C10	37,7%	35,75	0,0002961440	Ereignisse/ 1Mio. Kfz-km
C11	59,0%	67,46	0,0005587328	Ereignisse/ 1Mio. Kfz-km
C12	3,3%	2,37	0,0000196229	Ereignisse/ 1Mio. Kfz-km

D1 bis D6: Folgebrand bei Pannen

D1	98,81%	1,7323801478	Ereignisse/ 1Mio. Kfz-km
D2	1,19%	0,0208636006	Ereignisse/ 1Mio. Kfz-km
D3	98,81%	0,5577484046	Ereignisse/ 1Mio. Kfz-km
D4	1,19%	0,0067171400	Ereignisse/ 1Mio. Kfz-km
D5	98,81%	0,0569202063	Ereignisse/ 1Mio. Kfz-km
D6	1,19%	0,0006855080	Ereignisse/ 1Mio. Kfz-km

D7 bis D27: Folgebrand bei Unfällen

D7	97,7%	0,0285594307	Ereignisse/ 1Mio. Kfz-km
D8	2,3%	0,0006723305	Ereignisse/ 1Mio. Kfz-km
D9	97,7%	0,0034618424	Ereignisse/ 1Mio. Kfz-km
D10	2,3%	0,0000814968	Ereignisse/ 1Mio. Kfz-km
D11	97,7%	0,0000231206	Ereignisse/ 1Mio. Kfz-km
D12	2,3%	0,0000005443	Ereignisse/ 1Mio. Kfz-km
D13	99,5%	0,0293287692	Ereignisse/ 1Mio. Kfz-km
D14	0,5%	0,0001473807	Ereignisse/ 1Mio. Kfz-km
D15	99,5%	0,0191243056	Ereignisse/ 1Mio. Kfz-km
D16	0,5%	0,0000961020	Ereignisse/ 1Mio. Kfz-km
D17	99,5%	0,0006981577	Ereignisse/ 1Mio. Kfz-km
D18	0,5%	0,0000035083	Ereignisse/ 1Mio. Kfz-km
D19	95,1%	0,0002816330	Ereignisse/ 1Mio. Kfz-km
D20	4,9%	0,0000145111	Ereignisse/ 1Mio. Kfz-km
D21	95,1%	0,0005313549	Ereignisse/ 1Mio. Kfz-km
D22	4,9%	0,0000273779	Ereignisse/ 1Mio. Kfz-km
D23	95,1%	0,0000186613	Ereignisse/ 1Mio. Kfz-km
D24	4,9%	0,0000009615	Ereignisse/ 1Mio. Kfz-km

E1 bis E14: Gefahrgutbeteiligung am Ereignis

E1	98,50%	0,0066163829	Ereignisse/ 1Mio. Kfz-km
E2	1,50%	0,0001007571	Ereignisse/ 1Mio. Kfz-km
E3	99,92%	0,0034590730	Ereignisse/ 1Mio. Kfz-km
E4	0,08%	0,0000027695	Ereignisse/ 1Mio. Kfz-km
E5	98,50%	0,0000802744	Ereignisse/ 1Mio. Kfz-km
E6	1,50%	0,0000012225	Ereignisse/ 1Mio. Kfz-km
E7	99,92%	0,0191090061	Ereignisse/ 1Mio. Kfz-km
E8	0,08%	0,0000152994	Ereignisse/ 1Mio. Kfz-km
E9	98,50%	0,0000946605	Ereignisse/ 1Mio. Kfz-km
E10	1,50%	0,0000014415	Ereignisse/ 1Mio. Kfz-km
E11	99,92%	0,0005309298	Ereignisse/ 1Mio. Kfz-km
E12	0,08%	0,0000004251	Ereignisse/ 1Mio. Kfz-km
E13	98,50%	0,0000269672	Ereignisse/ 1Mio. Kfz-km
E14	1,50%	0,0000004107	Ereignisse/ 1Mio. Kfz-km

F1 bis F6: Personengefährdung bei Brand infolge Panne

F1	95,0%	0,0198204206	Ereignisse/ 1Mio. Kfz-km
F2	5,0%	0,0010431800	Ereignisse/ 1Mio. Kfz-km
F3	5,0%	0,0003308191	Ereignisse/ 1Mio. Kfz-km
F4	95,0%	0,0062855637	Ereignisse/ 1Mio. Kfz-km
F5	5,0%	0,0000342754	Ereignisse/ 1Mio. Kfz-km
F6	95,0%	0,0006512326	Ereignisse/ 1Mio. Kfz-km

Schadensausmaßanalyse

		SA
S P1	PKW-Brand infolge Panne mit Personengefährdung	0,0297260
S P2	LKW-Brand infolge Panne mit Personengefährdung	0,4794521
S P3	LKW-Brand mit Gefahrgut infolge Panne mit Personengefährdung	0,6164384
S P4	Bus-Brand infolge Panne mit Personengefährdung	0,6712329
S U1	PKW-Alleinunfall	0,1750000
S U2	PKW-Alleinunfall mit Folgebrand	0,2047260
S U3	LKW-Alleinunfall	0,0830000
S U4	LKW-Alleinunfall mit Gefahrstoffaustritt	0,6994384
S U5	LKW-Alleinunfall mit Folgebrand	0,5624521
S U6	LKW-Alleinunfall mit Gefahrstoffaustritt und Folgebrand	1,1788904
S U7	Bus-Alleinunfall	0,1000000
S U8	Bus-Alleinunfall mit Folgebrand	0,7712329
S U9	PKW-Unfall im Richtungsverkehr	0,0100000
S U10	PKW-Unfall im Richtungsverkehr mit Folgebrand	0,0397260
S U11	LKW-Unfall im Richtungsverkehr	0,0930000
S U12	LKW-Unfall im Richtungsverkehr mit Gefahrgutaustritt	0,7094384
S U13	LKW-Unfall im Richtungsverkehr mit Folgebrand	0,5724521
S U14	LKW-Unfall im Richtungsverkehr mit Gefahrgutaustritt und Folgebrand	1,1888904
S U15	Bus-Unfall im Richtungsverkehr	0,1000000
S U16	Bus-Unfall im Richtungsverkehr mit Folgebrand	0,7712329
S U17	PKW-Unfall im Begegnungsverkehr	0,2500000
S U18	PKW-Unfall im Begegnungsverkehr mit Folgebrand	0,2797260
S U19	LKW-Unfall im Begegnungsverkehr	0,4290000
S U20	LKW-Unfall im Begegnungsverkehr mit Gefahrgutaustritt	1,0454384
S U21	LKW-Unfall im Begegnungsverkehr mit Folgebrand	0,9084521
S U22	LKW-Unfall im Begegnungsverkehr mit Gefahrgutaustritt und Folgebrand	1,5248904
S U23	Bus-Unfall im Begegnungsverkehr	0,7500000
S U24	Bus-Unfall im Begegnungsverkehr mit Folgebrand	1,4212329

SA_{mech}		GV - Tunnel	RV - Tunnel
Unfalltyp 0 (Alleinunfall)	PKW	0,138	0,175
	LKW	0,083	0,083
	Bus	0,100	0,100
Unfalltyp 1 (Unfall im Richtungsverkehr)	PKW	0,019	0,010
	LKW	0,419	0,093
	Bus	0,100	0,100
Unfalltyp 2 (Unfall im Begegnungsverkehr)	PKW	0,250	0,250
	LKW	0,429	0,429
	Bus	0,750	0,750

SA_{Brand}/SA_{Gfg}	$SA_{Brand, Stau}/SA_{Gfg, Stau}$
0,00	2,17
0,00	35,00
0,00	45,00
0,00	49,00

Risikoberechnung

Häufigkeit		SA		Risiko
F2	0,0010431800	S P1	0,0297260274	0,0000310096
F3	0,0003308191	S P2	0,4794520548	0,0001586119
E2	0,0001007571	S P3	0,6164383562	0,0000621105
F5	0,0000342754	S P4	0,6712328767	0,0000230068
D7	0,0285594307	S U1	0,1750000000	0,0049979004
D8	0,0006723305	S U2	0,2047260274	0,0001376436
E3	0,0034590730	S U3	0,0830000000	0,0002871031
E4	0,0000027695	S U4	0,6994383562	0,0000019371
E5	0,0000802744	S U5	0,5624520548	0,0000451505
E6	0,0000012225	S U6	1,1788904110	0,0000014411
D11	0,0000231206	S U7	0,1000000000	0,0000023121
D12	0,0000005443	S U8	0,7712328767	0,0000004198
D13	0,0293287692	S U9	0,0100000000	0,0002932877
D14	0,0001473807	S U10	0,0397260274	0,0000058549
E7	0,0191090061	S U11	0,0930000000	0,0017771376
E8	0,0000152994	S U12	0,7094383562	0,0000108540
E9	0,0000946605	S U13	0,5724520548	0,0000541886
E10	0,0000014415	S U14	1,1888904110	0,0000017138
D17	0,0006981577	S U15	0,1000000000	0,0000698158
D18	0,0000035083	S U16	0,7712328767	0,0000027057
D19	0,0002816330	S U17	0,2500000000	0,0000704082
D20	0,0000145111	S U18	0,2797260274	0,0000040591
E11	0,0005309298	S U19	0,4290000000	0,0002277689
E12	0,0000004251	S U20	1,0454383562	0,0000004444
E13	0,0000269672	S U21	0,9084520548	0,0000244984
E14	0,0000004107	S U22	1,5248904110	0,0000006262
D23	0,0000186613	S U23	0,7500000000	0,0000139960
D24	0,0000009615	S U24	1,4212328767	0,0000013665
			Σ R	0,0083073723

statistisch erwartbare
Tote/1 Mio. Kfz-km

$0,0083073723 * 22.000 * 1,6 * 365 / 1.000.000 = \mathbf{0,10673}$ **statistisch erwartbare Tote/Jahr**

3. Inputdaten

3.1. Unveränderliche Inputdaten

SA_{mech}		GV - Tunnel	RV - Tunnel
Unfalltyp 0 (Alleinunfall)	PKW	0,138	0,175
	LKW	0,083	0,083
	Bus	0,100	0,100
Unfalltyp 1 (Unfall im Richtungsverkehr)	PKW	0,019	0,010
	LKW	0,419	0,093
	Bus	0,100	0,100
Unfalltyp 2 (Unfall im Begegnungsverkehr)	PKW	0,250	0,250
	LKW	0,429	0,429
	Bus	0,750	0,750

3.2. Veränderliche Inputdaten

3.2.1 GV – Tunnel mit Längslüftung

Verkehrsführung:	Gegenverkehr
Straßenart	Autobahn
Tunnellänge:	10,0 km
Lüftungssystem:	Längslüftung
L_{TU}	10,1 km
Verkehrsstärke:	15.000 Kfz/d
Anteil PKW-Verkehr:	76,3 %
Anteil LKW-Verkehr:	20,2 %
Anteil Bus-Verkehr:	3,5 %
Anteil der Gefahrguttransporte am Schwerverkehr:	3,0 %
Stauhäufigkeit:	150 h/Jahr
	1,71 %
Abstand Notausgänge:	keine NA
Verflechtungsstrecken:	keine

A1 und A2: Pannen- und Unfallrate				
A1	2,372	Pannen/1 Mio. Kfz-km		
	0,077	UPS/1 Mio. Kfz-km	fvk	1,1246590909
			fTL	1
			fVF	1
A2	0,08659875	UPS/1 Mio. Kfz-km		
B1 bis B3: Einteilung der Unfalltypen				
B1	17%	0,0147217875	UPS/ 1Mio. Kfz-km	
B2	50%	0,0432993750	UPS/ 1Mio. Kfz-km	
B3	33%	0,0285775875	UPS/ 1Mio. Kfz-km	

SA_{Brand}/SA_{Gfg}	$SA_{Brand, Stau}/SA_{Gfg, Stau}$
1,50	1,17
42,00	8,83
50,50	8,83
84,00	8,83

3.2.2 GV – Tunnel mit Querlüftung

Verkehrsführung:	Gegenverkehr	
Straßenart	Autobahn	
Tunnellänge:	10,0	km
Lüftungssystem:	Querlüftung	
L_{TU}	10,1	km
Verkehrsstärke:	15.000	Kfz/d
Anteil PKW-Verkehr:	76,3	%
Anteil LKW-Verkehr:	20,2	%
Anteil Bus-Verkehr:	3,5	%
Anteil der Gefahrguttransporte am Schwerverkehr:	3,0	%
Stauhäufigkeit:	150	h/Jahr
	1,71	%
Abstand Notausgänge:	keine NA	
Verflechtungsstrecken:	keine	

A1 und A2: Pannen- und Unfallrate				
A1	2,372	Pannen/1 Mio. Kfz-km		
	0,077	UPS/1 Mio. Kfz-km	f_{vk}	1,1246590909
			f_{TL}	1
			f_{VF}	1
A2	0,0865987500	UPS/1 Mio. Kfz-km		
B1 bis B3: Einteilung der Unfalltypen				
B1	17%	0,0147217875	UPS/ 1Mio. Kfz-km	
B2	50%	0,0432993750	UPS/ 1Mio. Kfz-km	
B3	33%	0,0285775875	UPS/ 1Mio. Kfz-km	

SA_{Brand}/SA_{Gfg}	$SA_{Brand, Stau}/SA_{Gfg, Stau}$
2,50	1,00
2,50	1,00
7,50	1,00
3,00	1,00

3.2.3 GV – Tunnel mit Querlüftung und Notausgängen alle 500m

Verkehrsführung:	Gegenverkehr
Straßenart	Autobahn
Tunnellänge:	10,0 km
Lüftungssystem:	Querlüftung
L_{TU}	10,1 km
Verkehrsstärke:	15.000 Kfz/d
Anteil PKW-Verkehr:	76,3 %
Anteil LKW-Verkehr:	20,2 %
Anteil Bus-Verkehr:	3,5 %
Anteil der Gefahrguttransporte am Schwerverkehr:	3,0 %
Stauhäufigkeit:	150 h/Jahr
	1,71 %
Abstand Notausgänge:	500 m
Verflechtungsstrecken:	keine

A1 und A2: Pannen- und Unfallrate				
A1	2,372	Pannen/1 Mio. Kfz-km		
	0,077	UPS/1 Mio. Kfz-km	f_{vk}	1,1246590909
			f_{TL}	1
			f_{VF}	1
A2	0,0865987500	UPS/1 Mio. Kfz-km		
B1 bis B3: Einteilung der Unfalltypen				
B1	17%	0,0147217875	UPS/ 1Mio. Kfz-km	
B2	50%	0,0432993750	UPS/ 1Mio. Kfz-km	
B3	33%	0,0285775875	UPS/ 1Mio. Kfz-km	

SA_{Brand}/SA_{Gfg}	$SA_{Brand, Stau}/SA_{Gfg, Stau}$
1,67	0,67
1,67	0,67
6,67	0,67
2,17	0,67

3.2.4 RV – Tunnel mit Querlüftung und Notausgängen alle 500m

Verkehrsführung:	Richtungsverkehr	
Straßenart	Autobahn	
Tunnellänge:	10,0	km
Lüftungssystem:	Querlüftung	
L_{TU}	10,1	km
Verkehrsstärke:	15.000	Kfz/d
Anteil PKW-Verkehr:	76,3	%
Anteil LKW-Verkehr:	20,2	%
Anteil Bus-Verkehr:	3,5	%
Anteil der Gefahrguttransporte am Schwerverkehr:	3,0	%
Stauhäufigkeit:	150	h/Jahr
	1,71	%
Abstand Notausgänge:	500	m
Verflechtungsstrecken:	keine	

A1 und A2: Pannen- und Unfallrate				
A1	2,372	Pannen/1 Mio. Kfz-km		
	0,112	UPS/1 Mio. Kfz-km	f_{vk}	0,6198036321
			f_{TL}	0,6539787107
			f_{VF}	1
A2	0,0453978986	UPS/1 Mio. Kfz-km		
B1 bis B3: Einteilung der Unfalltypen				
B1	40%	0,0181591594	UPS/ 1Mio. Kfz-km	
B2	59%	0,0267847602	UPS/ 1Mio. Kfz-km	
B3	1%	0,0004539790	UPS/ 1Mio. Kfz-km	

SA_{Brand}/SA_{Gfg}	$SA_{Brand, Stau}/SA_{Gfg, Stau}$
0,00	1,33
0,00	2,00
0,00	12,00
0,00	2,50

3.2.5 Verkehrsbeeinflussungsanlage (VBA)

Verkehrsführung:	Gegenverkehr
Straßenart	Autobahn
Tunnellänge:	10,0 km
Lüftungssystem:	Querlüftung
L_{TU}	10,1 km
Verkehrsstärke:	15.000 Kfz/d
Anteil PKW-Verkehr:	76,3 %
Anteil LKW-Verkehr:	20,2 %
Anteil Bus-Verkehr:	3,5 %
Anteil der Gefahrguttransporte am Schwerverkehr:	3,0 %
Stauhäufigkeit:	150 h/Jahr
	1,71 %
Abstand Notausgänge:	500 m
Verflechtungsstrecken:	keine

A1 und A2: Pannen- und Unfallrate				
A1	2,372	Pannen/1 Mio. Kfz-km		
	0,07161	UPS/1 Mio. Kfz-km	f_{vk}	1,1246590909
			f_{TL}	1
			f_{VF}	1
A2	0,0805368375	UPS/1 Mio. Kfz-km		
B1 bis B3: Einteilung der Unfalltypen				
B1	17%	0,0136912624	UPS/ 1Mio. Kfz-km	
B2	50%	0,0402684188	UPS/ 1Mio. Kfz-km	
B3	33%	0,0265771564	UPS/ 1Mio. Kfz-km	

SA_{Brand}/SA_{Gfg}	$SA_{Brand, Stau}/SA_{Gfg, Stau}$
1,67	0,67
1,67	0,67
6,67	0,67
2,17	0,67

3.2.6 Tropfenzählersystem

Verkehrsführung:	Gegenverkehr
Straßenart	Autobahn
Tunnellänge:	10,0 km
Lüftungssystem:	Querlüftung
L_{TU}	10,1 km
Verkehrsstärke:	15.000 Kfz/d
Anteil PKW-Verkehr:	76,3 %
Anteil LKW-Verkehr:	20,2 %
Anteil Bus-Verkehr:	3,5 %
Anteil der Gefahrguttransporte am Schwerverkehr:	3,0 %
Stauhäufigkeit:	150 h/Jahr
	1,71 %
Abstand Notausgänge:	500 m
Verflechtungsstrecken:	keine

A1 und A2: Pannen- und Unfallrate				
A1	1,186	Pannen/1 Mio. Kfz-km		
	0,0308	UPS/1 Mio. Kfz-km	f_{vk}	1,1246590909
			f_{TL}	1
			f_{VF}	1
A2	0,0346395000	UPS/1 Mio. Kfz-km		
B1 bis B3: Einteilung der Unfalltypen				
B1	17%	0,0058887150	UPS/ 1Mio. Kfz-km	
B2	50%	0,0173197500	UPS/ 1Mio. Kfz-km	
B3	33%	0,0114310350	UPS/ 1Mio. Kfz-km	

SA_{Brand}/SA_{Gfg}	$SA_{Brand, Stau}/SA_{Gfg, Stau}$
1,67	0,67
1,67	0,67
6,67	0,67
2,17	0,67

3.2.7 Blockabfertigung für LKW

Verkehrsführung:	Gegenverkehr
Straßenart	Autobahn
Tunnellänge:	10,0 km
Lüftungssystem:	Querlüftung
L_{TU}	10,1 km
Verkehrsstärke:	15.000 Kfz/d
Anteil PKW-Verkehr:	76,3 %
Anteil LKW-Verkehr:	20,2 %
Anteil Bus-Verkehr:	3,5 %
Anteil der Gefahrguttransporte am Schwerverkehr:	3,0 %
Stauhäufigkeit:	150 h/Jahr
	1,71 %
Abstand Notausgänge:	500 m
Verflechtungsstrecken:	keine

A1 und A2: Pannen- und Unfallrate				
A1	1,186	Pannen/1 Mio. Kfz-km		
	0,0308	UPS/1 Mio. Kfz-km	f_{vk}	1,1246590909
			f_{TL}	1
			f_{VF}	1
A2	0,0346395000	UPS/1 Mio. Kfz-km		
B1 bis B3: Einteilung der Unfalltypen				
B1	17%	0,0058887150	UPS/ 1Mio. Kfz-km	
B2	50%	0,0173197500	UPS/ 1Mio. Kfz-km	
B3	33%	0,0114310350	UPS/ 1Mio. Kfz-km	

SA_{Brand}/SA_{Gfg}	$SA_{Brand, Stau}/SA_{Gfg, Stau}$
1,67	0,67
1,67	0,67
6,67	0,67
2,17	0,67

3.2.8 Fahrverbot für Gefahrguttransporter

Verkehrsführung:	Gegenverkehr	
Straßenart	Autobahn	
Tunnellänge:	10,0	km
Lüftungssystem:	Querlüftung	
L_{TU}	10,1	km
Verkehrsstärke:	15.000	Kfz/d
Anteil PKW-Verkehr:	76,3	%
Anteil LKW-Verkehr:	20,2	%
Anteil Bus-Verkehr:	3,5	%
Anteil der Gefahrguttransporte am Schwerverkehr:	0,0	%
Stauhäufigkeit:	150	h/Jahr
	1,71	%
Abstand Notausgänge:	500	m
Verflechtungsstrecken:	keine	

A1 und A2: Pannen- und Unfallrate				
A1	2,372	Pannen/1 Mio. Kfz-km		
	0,077	UPS/1 Mio. Kfz-km	f_{vk}	1,1246590909
			f_{TL}	1
			f_{VF}	1
A2	0,0865987500	UPS/1 Mio. Kfz-km		
B1 bis B3: Einteilung der Unfalltypen				
B1	17%	0,0147217875	UPS/ 1Mio. Kfz-km	
B2	50%	0,0432993750	UPS/ 1Mio. Kfz-km	
B3	33%	0,0285775875	UPS/ 1Mio. Kfz-km	

SA_{Brand}/SA_{Gfg}	$SA_{Brand, Stau}/SA_{Gfg, Stau}$
1,67	0,67
1,67	0,67
6,67	0,67
2,17	0,67

3.2.9 Einbau eines automatischen Löschsystems

Verkehrsführung:	Gegenverkehr
Straßenart	Autobahn
Tunnellänge:	10,0 km
Lüftungssystem:	Querlüftung
L_{TU}	10,1 km
Verkehrsstärke:	15.000 Kfz/d
Anteil PKW-Verkehr:	76,3 %
Anteil LKW-Verkehr:	20,2 %
Anteil Bus-Verkehr:	3,5 %
Anteil der Gefahrguttransporte am Schwerverkehr:	3,0 %
Stauhäufigkeit:	150 h/Jahr
	1,71 %
Abstand Notausgänge:	500 m
Verflechtungsstrecken:	keine

A1 und A2: Pannen- und Unfallrate				
A1	2,372	Pannen/1 Mio. Kfz-km		
	0,077	UPS/1 Mio. Kfz-km	f_{vk}	1,1246590909
			f_{TL}	1
			f_{VF}	1
A2	0,0865987500	UPS/1 Mio. Kfz-km		
B1 bis B3: Einteilung der Unfalltypen				
B1	17%	0,0147217875	UPS/ 1Mio. Kfz-km	
B2	50%	0,0432993750	UPS/ 1Mio. Kfz-km	
B3	33%	0,0285775875	UPS/ 1Mio. Kfz-km	

SA_{Brand}/SA_{Gfg}	$SA_{Brand, Stau}/SA_{Gfg, Stau}$
0,42	0,17
0,84	0,34
3,34	0,34
1,09	0,34

3.2.10 Schlauchhaspeln in allen Feuerlöschnischen

Verkehrsführung:	Gegenverkehr
Straßenart	Autobahn
Tunnellänge:	10,0 km
Lüftungssystem:	Querlüftung
L_{TU}	10,1 km
Verkehrsstärke:	15.000 Kfz/d
Anteil PKW-Verkehr:	76,3 %
Anteil LKW-Verkehr:	20,2 %
Anteil Bus-Verkehr:	3,5 %
Anteil der Gefahrguttransporte am Schwerverkehr:	3,0 %
Stauhäufigkeit:	150 h/Jahr
	1,71 %
Abstand Notausgänge:	500 m
Verflechtungsstrecken:	keine

A1 und A2: Pannen- und Unfallrate				
A1	2,372	Pannen/1 Mio. Kfz-km		
	0,077	UPS/1 Mio. Kfz-km	f_{vk}	1,1246590909
			f_{TL}	1
			f_{VF}	1
A2	0,0865987500	UPS/1 Mio. Kfz-km		
B1 bis B3: Einteilung der Unfalltypen				
B1	17%	0,0147217875	UPS/ 1Mio. Kfz-km	
B2	50%	0,0432993750	UPS/ 1Mio. Kfz-km	
B3	33%	0,0285775875	UPS/ 1Mio. Kfz-km	

SA_{Brand}/SA_{Gfg}	$SA_{Brand, Stau}/SA_{Gfg, Stau}$
1,50	0,60
1,50	0,60
6,34	0,64
1,95	0,60

3.2.11 RV – Tunnel mit Querlüftung und Notausgängen alle 250m

Verkehrsführung:	Richtungsverkehr	
Straßenart	Autobahn	
Tunnellänge:	10,0	km
Lüftungssystem:	Querlüftung	
L_{TU}	10,1	km
Verkehrsstärke:	15.000	Kfz/d
Anteil PKW-Verkehr:	76,3	%
Anteil LKW-Verkehr:	20,2	%
Anteil Bus-Verkehr:	3,5	%
Anteil der Gefahrguttransporte am Schwerverkehr:	3,0	%
Stauhäufigkeit:	150	h/Jahr
	1,71	%
Abstand Notausgänge:	250	m
Verflechtungsstrecken:	keine	

A1 und A2: Pannen- und Unfallrate				
A1	2,372	Pannen/1 Mio. Kfz-km		
	0,112	UPS/1 Mio. Kfz-km	f_{vk}	0,6198036321
			f_{TL}	0,6539787107
			f_{VF}	1
A2	0,0453978986	UPS/1 Mio. Kfz-km		
B1 bis B3: Einteilung der Unfalltypen				
B1	40%	0,0181591594	UPS/ 1Mio. Kfz-km	
B2	59%	0,0267847602	UPS/ 1Mio. Kfz-km	
B3	1%	0,0004539790	UPS/ 1Mio. Kfz-km	

SA_{Brand}/SA_{Gfg}	$SA_{Brand, Stau}/SA_{Gfg, Stau}$
0,00	0,33
0,00	1,67
0,00	11,67
0,00	2,17

3.2.12 RV – Tunnel mit Querlüftung und Notausgängen alle 100m

Verkehrsführung:	Richtungsverkehr	
Straßenart	Autobahn	
Tunnellänge:	10,0	km
Lüftungssystem:	Querlüftung	
L_{TU}	10,1	km
Verkehrsstärke:	15.000	Kfz/d
Anteil PKW-Verkehr:	76,3	%
Anteil LKW-Verkehr:	20,2	%
Anteil Bus-Verkehr:	3,5	%
Anteil der Gefahrguttransporte am Schwerverkehr:	3,0	%
Stauhäufigkeit:	150	h/Jahr
	1,71	%
Abstand Notausgänge:	100	m
Verflechtungsstrecken:	keine	

A1 und A2: Pannen- und Unfallrate				
A1	2,372	Pannen/1 Mio. Kfz-km		
	0,112	UPS/1 Mio. Kfz-km	f_{vk}	0,6198036321
			f_{TL}	0,6539787107
			f_{VF}	1
A2	0,0453978986	UPS/1 Mio. Kfz-km		
B1 bis B3: Einteilung der Unfalltypen				
B1	40%	0,0181591594	UPS/ 1Mio. Kfz-km	
B2	59%	0,0267847602	UPS/ 1Mio. Kfz-km	
B3	1%	0,0004539790	UPS/ 1Mio. Kfz-km	

SA_{Brand}/SA_{Gfg}	$SA_{Brand, Stau}/SA_{Gfg, Stau}$
0,00	0,30
0,00	1,47
0,00	11,47
0,00	1,97

Anhang B – Risikoanalyse Tunnelprojekt Indien

ANHANG B – RISIKOANALYSE TUNNELPROJEKT INDIEN	B 1
1. TUNNELPROJEKT INDIEN	B 2
1.1. <i>GV und Querlüftung, NA alle 500m.....</i>	<i>B 2</i>
1.2. <i>GV und Querlüftung, NA alle 500m und Blockabfertigung LKW.....</i>	<i>B 3</i>
1.3. <i>RV und Querlüftung, NA alle 500m</i>	<i>B 4</i>
2. PLABUTSCHTUNNEL.....	B 5
2.1. <i>Einröhrig ohne NA (Stand 2003)</i>	<i>B 5</i>
2.2. <i>Zweiröhrig mit NA alle 500m (Stand 2011).....</i>	<i>B 6</i>
3. ARLBERG - STRABENTUNNEL.....	B 7

1. Tunnelprojekt Indien

1.1. GV und Querlüftung, NA alle 500m

Verkehrsführung:	Gegenverkehr
Straßenart	Autobahn
Tunnellänge:	13,1 km
Lüftungssystem:	Querlüftung
L_{TU}	13,2 km
Verkehrsstärke:	7.500 Kfz/d
Anteil PKW-Verkehr:	67,0 %
Anteil LKW-Verkehr:	30,0 %
Anteil Bus-Verkehr:	3,0 %
Anteil der Gefahrguttransporte am Schwerverkehr:	3,0 %
Stauhäufigkeit:	50 h/Jahr
	0,57 %
Abstand Notausgänge:	500 m
Verflechtungsstrecken:	keine

A1 und A2: Pannen- und Unfallrate				
A1	2,372	Pannen/1 Mio. Kfz-km		
	0,077	UPS/1 Mio. Kfz-km	f_{vk}	0,4580519481
			f_{TL}	1
			f_{VF}	1
A2	0,0352700000	UPS/1 Mio. Kfz-km		
B1 bis B3: Einteilung der Unfalltypen				
B1	17%	0,0059959000	UPS/ 1Mio. Kfz-km	
B2	50%	0,0176350000	UPS/ 1Mio. Kfz-km	
B3	33%	0,0116391000	UPS/ 1Mio. Kfz-km	

SA_{Brand}/SA_{Gfg}	$SA_{Brand, Stau}/SA_{Gfg, Stau}$
1,67	0,67
1,67	0,67
6,67	0,67
2,17	0,67

1.2. GV und Querlüftung, NA alle 500m und Blockabfertigung LKW

Verkehrsführung:	Gegenverkehr
Straßenart	Autobahn
Tunnellänge:	13,1 km
Lüftungssystem:	Querlüftung
L_{TU}	13,2 km
Verkehrsstärke:	7.500 Kfz/d
Anteil PKW-Verkehr:	67,0 %
Anteil LKW-Verkehr:	30,0 %
Anteil Bus-Verkehr:	3,0 %
Anteil der Gefahrguttransporte am Schwerverkehr:	3,0 %
Stauhäufigkeit:	50 h/Jahr
	0,57 %
Abstand Notausgänge:	500 m
Verflechtungsstrecken:	keine

A1 und A2: Pannen- und Unfallrate				
A1	1,186	Pannen/1 Mio. Kfz-km		
	0,0308	UPS/1 Mio. Kfz-km	f_{vk}	0,4580519481
			f_{TL}	1
			f_{VF}	1
A2	0,0141080000	UPS/1 Mio. Kfz-km		
B1 bis B3: Einteilung der Unfalltypen				
B1	17%	0,0023983600	UPS/ 1Mio. Kfz-km	
B2	50%	0,0070540000	UPS/ 1Mio. Kfz-km	
B3	33%	0,0046556400	UPS/ 1Mio. Kfz-km	

SA_{Brand}/SA_{Gfg}	$SA_{Brand, Stau}/SA_{Gfg, Stau}$
1,67	0,67
1,67	0,67
6,67	0,67
2,17	0,67

1.3. RV und Querlüftung, NA alle 500m

Verkehrsführung:	Richtungsverkehr
Straßenart	Autobahn
Tunnellänge:	13,1 km
Lüftungssystem:	Querlüftung
L_{TU}	13,2 km
Verkehrsstärke:	7.500 Kfz/d
Anteil PKW-Verkehr:	67,0 %
Anteil LKW-Verkehr:	30,0 %
Anteil Bus-Verkehr:	3,0 %
Anteil der Gefahrguttransporte am Schwerverkehr:	3,0 %
Stauhäufigkeit:	50 h/Jahr
	0,57 %
Abstand Notausgänge:	500 m
Verflechtungsstrecken:	keine

A1 und A2: Pannen- und Unfallrate				
A1	2,372	Pannen/1 Mio. Kfz-km		
	0,112	UPS/1 Mio. Kfz-km	f_{vk}	0,6198036321
			f_{TL}	0,6539787107
			f_{VF}	1
A2	0,0453978986	UPS/1 Mio. Kfz-km		
B1 bis B3: Einteilung der Unfalltypen				
B1	40%	0,0181591594	UPS/ 1Mio. Kfz-km	
B2	59%	0,0267847602	UPS/ 1Mio. Kfz-km	
B3	1%	0,0004539790	UPS/ 1Mio. Kfz-km	

SA_{Brand}/SA_{Gfg}	$SA_{Brand, Stau}/SA_{Gfg, Stau}$
0,00	1,33
0,00	2,00
0,00	12,00
0,00	2,50

2. Plabutschunnel

2.1. Einröhrig ohne NA (Stand 2003)

Verkehrsführung:	Gegenverkehr
Straßenart	Autobahn
Tunnellänge:	10,0 km
Lüftungssystem:	Querlüftung
L_{TU}	10,1 km
Verkehrsstärke:	23.000 Kfz/d
Anteil PKW-Verkehr:	87,0 %
Anteil LKW-Verkehr:	10,0 %
Anteil Bus-Verkehr:	3,0 %
Anteil der Gefahrguttransporte am Schwerverkehr:	3,0 %
Stauhäufigkeit:	200 h/Jahr
	2,28 %
Abstand Notausgänge:	keine NA
Verflechtungsstrecken:	keine

A1 und A2: Pannen- und Unfallrate				
A1	2,372	Pannen/1 Mio. Kfz-km		
	0,077	UPS/1 Mio. Kfz-km	f_{vk}	1,2932648052
			f_{TL}	1
			f_{VF}	1,0198019800
A2	0,1015532987	UPS/1 Mio. Kfz-km		
B1 bis B3: Einteilung der Unfalltypen				
B1	17%	0,0172640608	UPS/ 1Mio. Kfz-km	
B2	50%	0,0507766493	UPS/ 1Mio. Kfz-km	
B3	33%	0,0335125886	UPS/ 1Mio. Kfz-km	

SA_{Brand}/SA_{Gfg}	$SA_{Brand, Stau}/SA_{Gfg, Stau}$
2,50	1,00
2,50	1,00
7,50	1,00
3,00	1,00

2.2. Zweiröhrig mit NA alle 500m (Stand 2011)

Verkehrsführung:	Richtungsverkehr	
Straßenart	Autobahn	
Tunnellänge:	10,0	km
Lüftungssystem:	Querlüftung	
L_{TU}	10,1	km
Verkehrsstärke:	32.500	Kfz/d
Anteil PKW-Verkehr:	87,0	%
Anteil LKW-Verkehr:	10,0	%
Anteil Bus-Verkehr:	3,0	%
Anteil der Gefahrguttransporte am Schwerverkehr:	3,0	%
Stauhäufigkeit:	150	h/Jahr
	1,71	%
Abstand Notausgänge:	500	m
Verflechtungsstrecken:	keine	

A1 und A2: Pannen- und Unfallrate				
A1	2,372	Pannen/1 Mio. Kfz-km		
	0,112	UPS/1 Mio. Kfz-km	f_{vk}	1,1675258261
			f_{TL}	0,6539787107
			f_{vF}	1,0099009900
A2	0,0863628424	UPS/1 Mio. Kfz-km		
B1 bis B3: Einteilung der Unfalltypen				
B1	40%	0,0345451370	UPS/ 1Mio. Kfz-km	
B2	59%	0,0509540770	UPS/ 1Mio. Kfz-km	
B3	1%	0,0008636284	UPS/ 1Mio. Kfz-km	

SA_{Brand}/SA_{Gfg}	$SA_{Brand, Stau}/SA_{Gfg, Stau}$
0,00	1,33
0,00	2,00
0,00	12,00
0,00	2,50

3. Arlberg - Straßentunnel

Verkehrsführung:	Gegenverkehr
Straßenart	Autobahn
Tunnellänge:	14,0 km
Lüftungssystem:	Querlüftung
L_{TU}	14,1 km
Verkehrsstärke:	8.000 Kfz/d
Anteil PKW-Verkehr:	86,0 %
Anteil LKW-Verkehr:	11,0 %
Anteil Bus-Verkehr:	3,0 %
Anteil der Gefahrguttransporte am Schwerverkehr:	3,0 %
Stauhäufigkeit:	50 h/Jahr
	0,57 %
Abstand Notausgänge:	1700 m
Verflechtungsstrecken:	keine

A1 und A2: Pannen- und Unfallrate				
A1	2,372	Pannen/1 Mio. Kfz-km		
	0,077	UPS/1 Mio. Kfz-km	f_{vk}	0,4580519481
			f_{TL}	1
			f_{VF}	1
A2	0,0352700000	UPS/1 Mio. Kfz-km		
B1 bis B3: Einteilung der Unfalltypen				
B1	17%	0,0059959000	UPS/ 1Mio. Kfz-km	
B2	50%	0,0176350000	UPS/ 1Mio. Kfz-km	
B3	33%	0,0116391000	UPS/ 1Mio. Kfz-km	

SA_{Brand}/SA_{Gfg}	$SA_{Brand, Stau}/SA_{Gfg, Stau}$
2,50	1,00
2,50	1,00
7,50	1,00
3,00	1,00