

Diplomarbeit

# **EINSATZ VON RAMS ANALYSEN IN STRABENTUNNEL**

**Verfasser**

**Daniel Molnar**

**zur Erlangung der akademischen Grades**

**Diplomingenieur**

**Eingereicht am Institut für Verbrennungskraftmaschinen  
und Thermodynamik der Technischen Universität Graz**

**Vorstand: Univ.-Prof. DI Dr. Helmut Eichlseder**

**Betreuer:**

**Ao.Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Peter-Johann Sturm**

**Graz, am**





## **Danksagung**

An dieser Stelle bedanke ich mich bei meinem Vater Gerhard Molnar und Edeltraud Vasold dafür, dass sie mich während meines Studiums immer unterstützt haben.

Ich danke Herrn Ao.Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Peter-Johann Sturm für die Möglichkeit, meine Abschlussarbeit unter seiner Anleitung in einem professionellen Umfeld durchführen zu dürfen.

In diesem Zusammenhang bedanke ich mich bei Herrn Dipl.-Ing. (FH) Michael Beyer für die engagierte, kompetente und lösungsorientierte Unterstützung in technischen und organisatorischen Belangen.

Abschließend danke ich allen Kollegen am Institut für ihre Hilfsbereitschaft und Unterstützung bei der Durchführung meiner Diplomarbeit.

**Graz, im November 2013**

**Daniel Molnar**

## INHALT

|  |           |
|--|-----------|
| <b>DANKSAGUNG</b> .....  | <b>3</b>  |
| <b>FORMELZEICHEN, INDIZES UND ABKÜRZUNGEN</b> .....  | <b>6</b>  |
| <b>EIDESSTATTLICHE ERKLÄRUNG</b> .....   | <b>7</b>  |
| <b>ZUSAMMENFASSUNG</b> .....   | <b>8</b>  |
| <b>ABSTRACT</b> .....  | <b>9</b>  |
| <b>1 THEORETISCHE GRUNDLAGEN</b> .....   | <b>11</b> |
| 1.1 WAS IST RAMS MANAGEMENT? .....   | 11        |
| 1.2 ZIELE DES RAMS MANAGEMENT.....   | 11        |
| 1.3 METHODISCHE VORGANGSWEISE ZU RAMS MANAGEMENT EINES STRABENTUNNELS .....  | 12        |
| 1.3.1 <i>Der RAMS-Lebenszyklus eines Systems</i> .....   | 12        |
| 1.3.2 <i>Zielsetzungen der RAMS Phasen 1 bis 6</i> .....   | 14        |
| 1.3.3 <i>Grundlegendes zur Berechnung der RAMS Parameter</i> .....   | 18        |
| <b>2 RAMS ANALYSE SPERING TUNNEL PHASEN 1 BIS 6</b> .....  | <b>22</b> |
| 2.1 PHASE 1 – KONZEPT .....  | 22        |
| 2.1.1 <i>Zielsetzung</i> .....   | 22        |
| 2.1.2 <i>Eingangsgrößen (Input)</i> .....  | 22        |
| 2.1.3 <i>Umfang, Zusammenhang und Zweck des Systems</i> .....  | 23        |
| 2.1.4 <i>Systemumgebung</i> .....  | 25        |
| 2.2 PHASE 2 - SYSTEMDEFINITION UND ANWENDUNGS-VORAUSSETZUNGEN/ -<br>BEDINGUNGEN .....  | 28        |
| 2.2.1 <i>Zielsetzung</i> .....   | 28        |
| 2.2.2 <i>Eingangsgrößen</i> .....  | 28        |
| 2.2.3 <i>Erfüllung der Anforderungen</i> .....   | 29        |
| 2.2.4 <i>RAMS-Zielsetzungen</i> .....  | 31        |
| 2.3 PHASE 3 – RISIKOANALYSE .....  | 33        |
| 2.3.1 <i>Zielsetzung</i> .....   | 33        |
| 2.3.2 <i>Eingangsgrößen</i> .....  | 34        |
| 2.3.3 <i>Einleitung Risikoanalyse Sperring Tunnel</i> .....  | 34        |
| 2.3.4 <i>Komponenten</i> .....   | 34        |
| 2.3.5 <i>Redundanzen</i> .....   | 34        |
| 2.3.6 <i>RAMS-Modell</i> .....   | 34        |
| 2.3.7 <i>System und Komponentenübersicht</i> .....   | 35        |
| 2.3.8 <i>Ausfallswahrscheinlichkeiten für die Szenarien 1 bis 7</i> .....  | 43        |
| 2.3.9 <i>Klassifizierung und Zulässigkeit der Risiken</i> .....  | 47        |
| 2.3.10 <i>Gefahrenprotokoll (Hazard Log)</i> .....   | 49        |
| 2.3.11 <i>Berechnung der Ausfallshäufigkeit des Gesamtsystem Tunnellüftung im Sperring Tunnel</i> .....  | 57        |
| 2.3.12 <i>Berechnung der Ausfallshäufigkeit des Gesamtsystem Tunnellüftung im Sperring Tunnel mit der<br/>    Annahme eines 13. Strahlventilators:</i> ..... | 59        |
| 2.3.13 <i>Prognostiziertes Verkehrsaufkommen Tunnel Sperring</i> .....   | 59        |
| 2.4 PHASE 4 - SYSTEMANFORDERUNGEN .....  | 73        |
| 2.4.1 <i>Zielsetzung der Phase 4 Systemanforderungen</i> .....   | 73        |
| 2.4.2 <i>Eingangsgrößen</i> .....  | 73        |
| 2.4.3 <i>Erfüllung der Anforderungen RAMS-Anforderungen für das Gesamtsystem</i> .....   | 74        |
| 2.5 PHASE 5 - ZUTEILUNG DER SYSTEMANFORDERUNGEN .....  | 78        |
| 2.5.1 <i>Zielsetzung der Phase 5 Zuteilung der Systemanforderungen</i> .....   | 78        |
| 2.5.2 <i>Eingangsgrößen</i> .....  | 78        |
| 2.5.3 <i>Zuordnung der Anforderungen</i> .....   | 78        |
| 2.5.4 <i>Zuordnung der Sicherheitsanforderungen</i> .....  | 78        |
| 2.6 PHASE 6 - ENTWICKLUNG/ KONSTRUKTION UND IMPLEMENTIERUNG .....  | 79        |
| 2.6.1 <i>Zielsetzungen der Phase 6 Entwicklung Konstruktion und Implementierung</i> .....  | 79        |
| 2.6.2 <i>Eingangsgrößen</i> .....  | 79        |
| <b>3 RAMS ANALYSE GÖTSCHKA TUNNEL PHASEN 1 BIS 6</b> .....   | <b>80</b> |
| 3.1 PHASE 1 – KONZEPT .....  | 80        |
| 3.1.1 <i>Zielsetzung der Phase 1 Konzept</i> .....   | 80        |
| 3.1.2 <i>Eingangsgrößen (Input)</i> .....  | 80        |
| 3.1.3 <i>Umfang, Zusammenhang und Zweck des Systems</i> .....  | 80        |

|          |   |            |
|----------|---|------------|
| 3.1.4    | Systemumgebung .....  | 82         |
| 3.2      | PHASE 2 - SYSTEMDEFINITION UND ANWENDUNGS-VORAUSSETZUNGEN/ -<br>BEDINGUNGEN .....         | 85         |
| 3.2.1    | Zielsetzung .....   | 85         |
| 3.2.2    | Eingangsgrößen .....  | 86         |
| 3.2.3    | Erfüllung der Anforderungen .....   | 86         |
| 3.2.4    | RAMS-Zielsetzungen .....  | 90         |
| 3.2.5    | Langzeitbetriebs-Strategie, Lebens- / Nutzungsdauer .....                                 | 90         |
| 3.2.6    | Systemgrenzen .....   | 90         |
| 3.3      | PHASE 3 – RISIKOANALYSE .....   | 92         |
| 3.3.1    | Zielsetzung der Phase 3 Risikoanalyse .....   | 92         |
| 3.3.2    | Eingangsgrößen .....  | 92         |
| 3.3.3    | Einleitung .....  | 92         |
| 3.3.4    | Komponenten .....   | 92         |
| 3.3.5    | Redundanzen .....   | 93         |
| 3.3.6    | RAMS-Modell .....   | 93         |
| 3.3.7    | System und Komponentenübersicht .....   | 93         |
| 3.3.8    | Ausfallswahrscheinlichkeiten für die Szenarien 1 bis 7 .....                              | 98         |
| 3.3.9    | Klassifizierung und Zulässigkeit der Risiken .....  | 101        |
| 3.3.10   | Gefahrenprotokoll (Hazard Log) .....  | 102        |
| 3.3.11   | Berechnung der Ausfallshäufigkeit des Gesamtsystem Tunnellüftung im Götschka Tunnel... .. | 109        |
| 3.3.12   | Prognostiziertes Verkehrsaufkommen Tunnel Götschka .....                                  | 112        |
| 3.4      | PHASE 4 - SYSTEMANFORDERUNGEN .....   | 126        |
| 3.4.1    | Zielsetzung der Phase 4 Systemanforderungen .....   | 126        |
| 3.4.2    | Eingangsgrößen .....  | 127        |
| 3.4.3    | Erfüllung der Anforderungen RAMS-Anforderungen für das Gesamtsystem .....                 | 127        |
| 3.5      | PHASE 5 - ZUTEILUNG DER SYSTEMANFORDERUNGEN .....   | 131        |
| 3.5.1    | Zielsetzung der Phase 5 .....   | 131        |
| 3.5.2    | Eingangsgrößen .....  | 131        |
| 3.5.3    | Zuordnung der Anforderungen .....   | 131        |
| 3.6      | PHASE 6 - ENTWICKLUNG/KONSTRUKTION UND IMPLEMENTIERUNG .....                              | 132        |
| 3.6.1    | Zielsetzungen der Phase Entwicklung/ Konstruktion und Implementierung .....               | 132        |
| 3.6.2    | Eingangsgrößen .....  | 132        |
| <b>4</b> | <b>ERGEBNISSE .....</b>   | <b>133</b> |
| <b>5</b> | <b>SCHLUSSFOLGERUNGEN UND AUSBLICK .....</b>  | <b>133</b> |
| <b>6</b> | <b>ABBILDUNGSVERZEICHNIS .....</b>  | <b>134</b> |
| <b>7</b> | <b>TABELLENVERZEICHNIS .....</b>  | <b>135</b> |
|          | <b>LITERATURVERZEICHNIS .....</b>   | <b>137</b> |

## Formelzeichen, Indizes und Abkürzungen

### Abkürzungen

|         |  |
|---------|--|
| ALARP   | As Low As Reasonably Practicable                               |
| ASFiNAG | Autobahnen- und Schnellstraßen-Finanzierungsaktiengesellschaft |
| CO      | Kohlenmonoxid  |
| DIN     | Deutsches Institut für Normung                                 |
| EN      | Europäische Norm   |
| EWB     | Ereigniswahrscheinlichkeit Brand                               |
| EWP     | Ereigniswahrscheinlichkeit Panne                               |
| EWPB    | Ereigniswahrscheinlichkeit Panne mit Brand                     |
| EWU     | Ereigniswahrscheinlichkeit Unfall                              |
| EWUB    | Ereigniswahrscheinlichkeit Unfall mit Brand                    |
| FMEA    | Fehlermöglichkeits- und Einfluss-Analyse                       |
| GAMAB   | Globalement Au Moins Aussi Bon                                 |
| JDTV    | jährlicher durchschnittlicher täglicher Verkehr                |
| K       | Trübefaktor  |
| Kfz     | Kraftfahrzeug  |
| Kfz-km  | Kilometer die Kraftfahrzeuge fahren                            |
| LKW     | Lastkraftwagen   |
| MEM     | Minimum Endogenous Mortality                                   |
| MTBF    | Mean Time Between Failures                                     |
| MTTF    | Mean time to Failure   |
| MTTR    | Mean Time To Repair  |
| ÖNORM   | Österreichische Norm   |
| ÖVE     | Österreichischer Verband für Elektrotechnik                    |
| PKW     | Personenkraftwagen   |
| R       | Risikoäquivalenzwert   |
| RAMS    | Reliability Availability Maintainability Safety                |
| RVS     | Richtlinien und Vorschriften für das Straßenwesen              |
| SW      | Strahlventilator   |

## **Eidesstattliche Erklärung**

Ich erkläre an Eides statt, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig verfasst, andere als die angegebenen Quellen/Hilfsmittel nicht benutzt, und die den benutzten Quellen wörtlich und inhaltlich entnommenen Stellen als solche kenntlich gemacht habe.

**Graz, am**

**Daniel Molnar**

## **Zusammenfassung**

### Einsatz von RAMS Analysen in Straßentunnel

Straßen und Eisenbahntunnel sind mit komplexen Sicherheitseinrichtungen ausgestattet. Die Funktionalität des Sicherheitssystems hängt stark von der Zuverlässigkeit dieser Anlagen ab. RAMS Analysen (reliability, availability, maintainability, safety) sind Stand der Technik zur Bewertung von Industrieanlagen mit hohem Risikopotenzial. Bei langen Eisenbahntunnels und auch bei unterirdischen Verkehrsanlagen finden derartige Analysen aufgrund der notwendigen hohen Verfügbarkeit der Strecken ihre Anwendung. Der Einsatz in Straßentunnel wird angedacht. Im Rahmen dieser Diplomarbeit sollen die methodischen Vorgangsweisen dazu erarbeitet werden und eine RAMS Analyse in zwei bestehenden Straßentunnel durchgeführt werden.

## **Abstract**

### **RAMS Analysis Applied to Road Tunnels**

Road and railway tunnels are equipped with complex safety systems. The functionality of safety systems strongly depends on the reliability of the equipment. RAMS Analyses (reliability, availability, maintainability, safety) are state of the art for evaluating industrial facilities with high risk potential. These analyses are often used at long railway tunnels and other underground traffic systems with required high availabilities. The use for road tunnels is intended. This diploma thesis is to create the methodical approach and RAMS analyses for two existing road tunnels.

## Einleitung

Straßen und Eisenbahntunnel sind mit komplexen Sicherheitseinrichtungen ausgestattet. Die Funktionalität des Sicherheitssystems hängt stark von der Zuverlässigkeit dieser Anlagen ab. RAMS Analysen (reliability, availability, maintainability, safety) sind Stand der Technik zur Bewertung von Industrieanlagen mit hohem Risikopotenzial. Bei langen Eisenbahntunnels und auch bei unterirdischen Verkehrsanlagen finden derartige Analysen aufgrund der notwendigen hohen Verfügbarkeit der Strecken ihre Anwendung. Der Einsatz in Straßentunnel wird angedacht. Im Rahmen dieser Diplomarbeit sollen die methodischen Vorgangsweisen dazu erarbeitet werden und eine RAMS Analyse in zwei bestehenden Straßentunnels durchgeführt werden. Der erste Tunnel ist der Spering Tunnel aus der Tunnelkette Klaus auf der A9, der Pyhrn Autobahn. Der Spering Tunnel ist ein längsgelüfteter Tunnel mit 2,9km Länge. Der zweite Tunnel ist der Götschka Tunnel auf der S 10 Mühlviertler Schnellstraße. Das Lüftungskonzept für den Götschka Tunnel sieht im Normalbetrieb eine Längslüftung sowie im Ereignisfall eine Rauchgasabsaugung über eine Zwischendecke vor. Bei der Auslegung der Tunnelbelüftung und Entlüftung ist es unerlässlich durch sorgfältige Überlegungen ein Höchstmaß an Sicherheit zu gewährleisten. Deshalb soll hier auch erstmalig eine RAMS Analyse zum Einsatz kommen. Es gibt noch keine eigene Norm für RAMS Analysen in Straßentunnel. Deshalb wird im Rahmen dieser Diplomarbeit eine einheitliche Vorgehensweise zur Anwendung von RAMS Analysen in Straßentunnel erstellt. Dazu wird die bereits vorhandene Norm ÖNORM EN50126 „Bahnanwendungen Spezifikation und Nachweis der Zuverlässigkeit, Verfügbarkeit, Instandhaltbarkeit und Sicherheit (RAMS) [1] als Richtschnur verwendet.

# 1 Theoretische Grundlagen

## 1.1 Was ist RAMS Management?

Unter RAMS Management versteht man die konsequente Anwendung einer Methodik zur Steuerung der Zuverlässigkeit (Reliability), Verfügbarkeit (Availability), Instandhaltbarkeit (Maintainability) und Sicherheit (Safety) eines technisch komplexen Gesamtsystems, abgekürzt als „RAMS“.

In der ÖNORM EN50126 [\[1\]](#) werden die wichtigsten Begriffe wie folgt definiert:

*Zitat Anfang:*

Zuverlässigkeit: (Reliability)

Wahrscheinlichkeit dafür, dass eine Einheit ihre geforderte Funktion unter gegebenen Bedingungen für eine gegebene Zeitspanne erfüllen kann.

Verfügbarkeit: (Availability)

Fähigkeit eines Produkts, in einem Zustand zu sein, in dem es unter vorgegebenen Bedingungen zu einem vorgegebenen Zeitpunkt oder während einer vorgegebenen Zeitspanne eine geforderte Funktion erfüllen kann, unter der Voraussetzung, dass die geforderten äußeren Hilfsmittel bereitstehen.

Instandhaltbarkeit: (Maintainability)

Wahrscheinlichkeit, dass für eine Komponente unter gegebenen Einsatzbedingungen eine bestimmte Instandhaltungsmaßnahme innerhalb einer festgelegten Zeitspanne ausgeführt werden kann, wenn die Instandhaltung unter festgelegten Bedingungen erfolgt und festgelegte Verfahren und Hilfsmittel eingesetzt werden.

Sicherheit: (Safety)

Nichtvorhandensein eines unzulässigen Schadenrisikos.

## 1.2 Ziele des RAMS Management.

- Fehler schon in der Planungsphase von Projekten zu verhindern.
- Unterstützung bei der Entwicklung und Einführung von neuen Produkten.
- Unterstützung bei der Planung und Realisierung von neuen Anlagen.
- Sicherstellung der Systemverfügbarkeit und Systemsicherheit durch ständige Erfüllung der Zuverlässigkeits- und Instandhaltbarkeitsanforderungen.
- Minimierung der Gefahrenpotentiale
- Maximierung der Zuverlässigkeit und Sicherheit
- Ausgewogenheit zwischen der RAMS-Performance eines Systems und den Herstell- und Nutzungskosten (Cost of Ownership)

*Zitat Ende:*

### **1.3 Methodische Vorgangsweise zu RAMS Management eines Straßentunnels**

In diesem Abschnitt der Diplomarbeit wird eine einheitliche methodische Vorgangsweise der ersten sechs Phasen für ein RAMS-Management als Bestandteil eines vollständigen Managementprozesses festgelegt, der alle Aspekte eines kompletten Straßentunnels beschreibt. Auf der Grundlage des Systemlebenszyklus wird ein Managementprozess definiert, der die Ermittlung, Kontrolle und Beherrschung der spezifischen RAMS-Faktoren ermöglicht.

#### **1.3.1 Der RAMS-Lebenszyklus eines Systems**

Unter Lebenszyklus des Systems versteht man eine Folge von Phasen mit ihren jeweiligen Aktivitäten über die gesamte Lebensdauer des Systems, von der Anfangsplanung bis hin zur Stilllegung und Entsorgung. Der Lebenszyklus ist gegliedert in Planung, Management, Überprüfung und Überwachung aller Systemaspekte, einschließlich des RAMS-Managements, um das gewünschte System mit gewünschter Sicherheit zum gewünschten Preis innerhalb der Zeitvorgabe zu liefern.

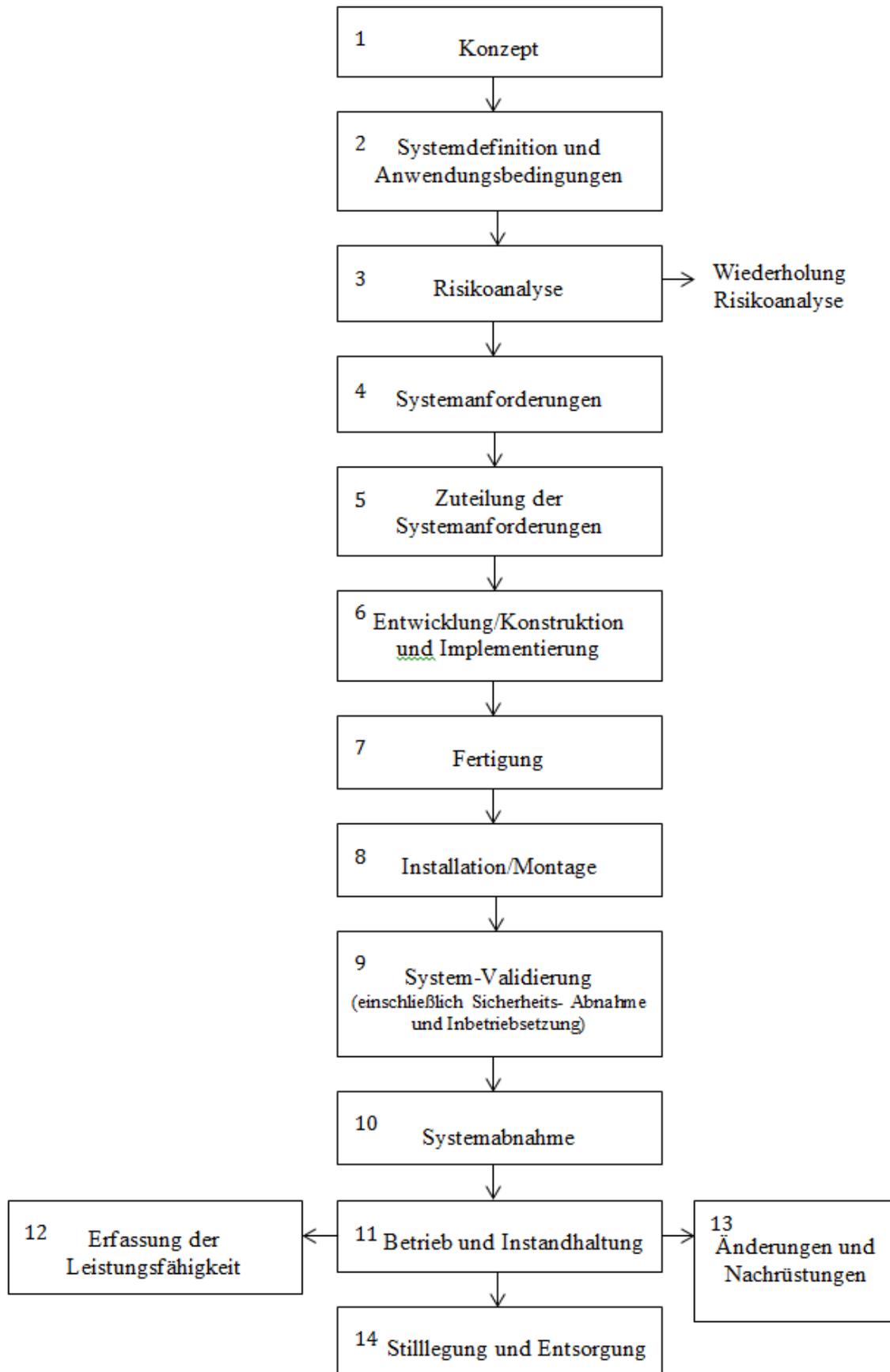


Abbildung 1: Systemlebenszyklus in 14 Phasen [1]

### 1.3.2 Zielsetzungen der RAMS Phasen 1 bis 6

Im folgenden Abschnitt werden die Ziele der ersten sechs von 14 Phasen nach RAMS gemäß [1] beschrieben.

#### 1.3.2.1 Zielsetzung der Phase 1 Konzeptphase

Das Ziel dieser Phase 1 besteht, ein ausreichendes Verständnis für die Systeme zu entwickeln und alle anschließend folgenden Lebenszyklusaufgaben erfüllen zu können. In der Konzeptphase müssen der Auftraggeber und der Hauptprojektleiter mit seinem Team ein gemeinsames Verständnis vom vollen Umfang des Gesamtsystems entwickeln. Dabei müssen die Systemziele, der Anwendungsbereich, der Zweck und der Projektumfang definiert werden. Oft ist es auch sehr hilfreich in dieser Phase Eigenschaften oder Ausführungen zu definieren, die explizit nicht zum Projektumfang gehören. Im Rahmen der Definition der Anforderungen an das Gesamtsystem ist es unerlässlich eine Stakeholder Analyse durchzuführen, um die Bedürfnisse aller vom Projekt betroffenen Personen, Institutionen sowie gesetzlichen Vorgaben berücksichtigen zu können. Weitere Aktivitäten in dieser Phase sind Machbarkeitsstudien, die Festlegung des Projektmanagements und die Definition der Qualitätsmanagementprozesse. Wenn es sich um eine Systemänderung oder Nachrüstung handelt, ist ein Review der bisher erreichten RAM-Performance und eine Überprüfung der RAM-Implikation des Projektes durchzuführen. Die Sicherheitsaktivitäten in der Konzeptphase umfassen die Untersuchung des bisher erreichten Sicherheitsgrades, die Überprüfung der Sicherheits-Implikation und die Überprüfung der Sicherheitspolitik und der Sicherheitsziele.

#### 1.3.2.2 Zielsetzungen der Phase 2 Systemdefinition und Anwendungsvoraussetzungen/-bedingungen

Das Ziel dieser Phase 2 besteht darin, folgende Punkte zu erfüllen:

*Zitat Anfang [1]:*

Diese Phase 2 Systemdefinition und Anwendungsvoraussetzungen/-bedingungen hat folgende Zielsetzungen:

- a) Festlegung des Betriebsaufgaben-Profiles des Systems
- b) Festlegung der Systemgrenzen
- c) Erstellen der Anwendungsbedingungen, die die Systemmerkmale beeinflussen
- d) Festlegung des Umfangs der Systemgefahrenanalyse (Hazard Analysis)
- e) Erstellen der RAMS-Politik für das System
- f) Erstellen des Sicherheitsplans für das System, soweit sie die mögliche RAMS-Performance des Systems betreffen

*Zitat Ende*

#### 1.3.2.3 Zielsetzungen der Phase 3 Risikoanalyse

Das Ziel dieser Phase 3 besteht gemäß darin, folgende Punkte zu erfüllen:

*Zitat Anfang [1]:*

Diese Phase 3 Risikoanalyse hat folgende Zielsetzungen:

- a) Identifikation von Gefahren, die mit dem System verbunden sind
- b) Identifikation der Ereignisse, die diese Gefahren auslösen

- c) Bestimmung des mit den Gefahren verbundenen Risikos
- d) Erstellen eines Prozesses für ein kontinuierliches Risikomanagement

### Das Risikokzept

Das Risikokzept ist die Kombination von zwei Elementen:

Die Wahrscheinlichkeit, mit der ein Ereignis oder die Kombination von Ereignissen eintritt, die zu einem Gefahrenfall führen bzw. die Häufigkeit solcher Ereignisse und die Folgen/Konsequenzen eines Gefahrenfalls.

### Die Risikoanalyse

Eine Risikoanalyse muss in den verschiedenen Phasen des Lebenszyklus des Systems durch die in dieser Phase verantwortlichen Stellen durchgeführt und dokumentiert werden. Die Dokumentation muss mindestens folgende Punkte enthalten:

- a) Das Verfahren der Analyse
- b) Die Annahmen, Grenzen und Rechtfertigung des Verfahrens
- c) Die Ergebnisse der Identifikation von Gefahren
- d) Das Ergebnis der Risikoabschätzung und deren Vertrauenswürdigkeit
- e) Die Ergebnisse von Vergleichsstudien
- f) Daten und ihre Quellen sowie deren Vertrauenswürdigkeit
- g) Referenzen

Tabelle 1 enthält, in Form von qualitativen Begriffen, typische Kategorien der Wahrscheinlichkeiten oder Häufigkeiten von Gefahrenfällen. Die Kategorien, ihre Anzahl und die numerische Reihenfolge kann entsprechend der jeweiligen Anwendung angepasst werden.

| Gefahrenstufe | Konsequenzen für Personen oder Umwelt   | Konsequenzen für Betriebs- und Dienstleistung |
|---------------|---|---|
| katastrophal  | Unfalltote und/oder zahlreiche Schwerverletzte und/oder schwere Umweltschäden       |   |
| kritisch      | einzelner Unfalltoter und/oder Schwerverletzter und/oder nennenswerte Umweltschäden | Verlust eines wichtigen Systems               |
| marginal      | kleinere Verletzung und/oder nennenswerte Bedrohung der Umwelt                      | schwere Beschädigung des Systems              |
| unbedeutend   | mögliche, geringfügige Verletzung   | geringfügige Beschädigung des Systems         |

Tabelle 1: Häufigkeit von Gefahrenfällen

Die Konsequenzen-Analyse muss eingesetzt werden, um die möglichen Auswirkungen abschätzen zu können. Tabelle 2 beschreibt typische Gefahrenstufen und die zugehörigen Konsequenzen für jede Gefahrenstufe. Die Anzahl der Gefahrenstufen und die Konsequenzen für jede der anzuwendenden Stufen muss, passend zur jeweiligen Anwendung, festgelegt werden.

| Kategorie        | Definition  |
|------------------|---|
| häufig           | Wird häufig auftreten. Die Gefahr ist ständig gegenwärtig.  |
| wahrscheinlich   | Wird mehrmals auftreten. Es ist zu erwarten, dass die Gefahr oft eintritt.  |
| gelegentlich     | Kann mehrmals auftreten. Es ist zu erwarten, dass die Gefahr mehrmals eintritt.   |
| selten           | Kann manchmal während des Lebenszyklus auftreten.<br>Es ist sinnvoll, mit dem Eintreten der Gefahr zu rechnen.                    |
| unwahrscheinlich | Das Auftreten ist unwahrscheinlich, aber möglich.<br>Es darf angenommen werden, dass diese Gefahr nur in Ausnahmefällen eintritt. |
| unvorstellbar    | Das Auftreten ist extrem unwahrscheinlich. Es darf angenommen werden, dass diese Gefahr nicht eintritt.                           |

Tabelle 2: Gefahrenstufen

## Bewertung und Akzeptanz von Risiken:

Dieser Abschnitt behandelt die Bildung einer „Häufigkeit — Konsequenz“-Matrix für die Bewertung und Beurteilung der Ergebnisse von Risikoanalysen, Einteilung in Risikokategorien, Maßnahmen zur Reduzierung von Risiken oder Beseitigung unerlaubter Risiken und für die Akzeptanz von Risiken.

Die Risikobewertung muss durch die Kombination der Häufigkeit des Eintritts eines Gefahrenfalles mit der Schwere der Konsequenzen erfolgen, um ein Risikoniveau festzulegen, welches durch den Gefahrenfall erzeugt wird. Eine „Häufigkeit — Konsequenz“-Matrix ist in Tabelle 3 dargestellt.

| Häufigkeit von Gefahrenquellen | Risikostufen   |          |          |              |
|--------------------------------|----------------|----------|----------|--------------|
| häufig                         |                |          |          |              |
| wahrscheinlich                 |                |          |          |              |
| gelegentlich                   |                |          |          |              |
| selten                         |                |          |          |              |
| unwahrscheinlich               |                |          |          |              |
| unvorstellbar                  |                |          |          |              |
|                                | unbedeutend    | marginal | kritisch | katastrophal |
|                                | Gefahrenstufen |          |          |              |

Tabelle 3: Häufigkeit - Konsequenz -Matrix

*Zitat Ende*

Die Akzeptanz von Risiken sollte sich auf ein im Grundsatz anerkanntes Prinzip abstützen. Es gibt eine Anzahl von Prinzipien, die angewendet werden können. Einige Beispiele sind nachfolgend angeführt:

- **As Low As Reasonably Practicable:** Das ALARP-Prinzip wird häufig in Großbritannien verwendet und bedeutet „So niedrig wie vernünftigerweise ausführbar“. Quelle: [2]. Dieses Prinzip ist laut Norm ISO 14971 „Medizinprodukte - Anwendung des Risikomanagements auf Medizinprodukte“ für medizinische Produkte untersagt, da es ausschließlich von ökonomischen Grundsätzen geleitet wird.
- **Globalement Au Moins Aussi Bon:** Das GAMAB-Prinzip wird häufig in Frankreich verwendet und bedeutet „Insgesamt mindestens genauso gut“. Neue Systeme dürfen kein höheres Risiko haben als die bestehenden. Quelle: [3]
- **Minimum Endogenous Mortality:** Das MEM-Prinzip wird häufig in Deutschland verwendet und bedeutet „Minimale endogene Sterblichkeit“. MEM ist ein Maß für das akzeptierte (unvermeidliche) Risiko, durch die betreffende Technologie zu Tode zu kommen. Entspricht 0,0002 Todesfälle pro Person und Jahr. Dies ist das statistische Sterberisiko eines europäischen Jugendlichen. Da jeder Mensch vielen (normiert: 20) technischen Systemen gleichzeitig ausgesetzt ist, wird pro System ein Schwellwert von  $1/20 \text{ MEM} = 0,00001 \text{ Tote/Jahr}$  festgesetzt. Quelle: [1] bzw. [3]

#### 1.3.2.4 Zielsetzungen der Phase 4 Systemanforderungen

Das Ziel dieser Phase 4 besteht darin, folgende Punkte zu erfüllen:

*Zitat Anfang [1]:*

Diese Phase 4 Systemanforderungen hat folgende Zielsetzungen:

- a) Spezifikation der gesamten RAMS-Anforderungen für das jeweilige System
- b) Spezifikation aller Nachweis- und Abnahmekriterien für RAMS für das System
- c) Erstellung des RAM-Programms für die Überwachung der RAM-Aufgaben während der folgenden Lebenszyklusphasen

*Zitat Ende*

#### 1.3.2.5 Zielsetzungen der Phase 5 Zuteilung der Systemanforderungen

Das Ziel dieser Phase 5 besteht gemäß ÖNORM EN50126 [1] darin folgende Punkte zu erfüllen:

*Zitat Anfang [1]:*

Diese Phase 5 Zuteilung der Systemanforderungen hat folgende Zielsetzungen:

- a) Zuteilung der gesamten RAMS-Systemanforderungen auf die entsprechenden Subsysteme, Komponenten und externen Einrichtungen
- b) Definition der RAMS-Abnahmekriterien für die entsprechenden Subsysteme, Komponenten und externen Einrichtungen

*Zitat Ende*

### 1.3.2.6 Zielsetzungen der Phase 6 Entwicklung/Konstruktion und Implementierung

Das Ziel dieser Phase 6 besteht darin, folgende Punkte zu erfüllen:

Zitat Anfang [1]:

Die Phase 6 Entwicklung/Konstruktion und Implementierung hat folgende Zielsetzungen:

- Entwicklung und Konstruktion der Subsysteme und Komponenten, die die RAMS-Anforderungen erfüllen
- Nachweis, das Subsysteme und Komponenten die RAMS-Anforderungen erfüllen
- Planung der nachfolgenden Lebenszyklusaufgaben im Zusammenhang mit RAMS.

Zitat Ende

### 1.3.3 Grundlegendes zur Berechnung der RAMS Parameter

Die Formeln die zur Berechnung der RAMS Parameter notwendig sind stammen aus der Norm DIN EN/IEC61709 [4] beziehungsweise von [5]

#### 1.3.3.1 MTBF: Mean Time between Failures - Berechnung der Zuverlässigkeit

MTBF: Mean Time between Failures.

Das ist die englische Bezeichnung für die mittlere Funktionsdauer eines reparierbaren Systems zwischen zwei Ausfällen. Reparierbare Systeme sind beispielsweise Autos oder Maschinen.

MTTF: Mean time to Failure.

Das ist die englische Bezeichnung für die mittlere Funktionsdauer eines nicht reparierbaren Systems. Nicht reparierbare Systeme sind zum Beispiel Glühbirnen oder Computer Platinen.

Bei den Komponenten, die in Straßentunnel verwendet werden, kann man von reparierbaren Komponenten ausgehen. MTBF beziehungsweise MTTF Werte sind Angaben zur Zuverlässigkeit von Komponenten.

Das Fehlverhalten einer Komponente lässt sich wie folgt darstellen:

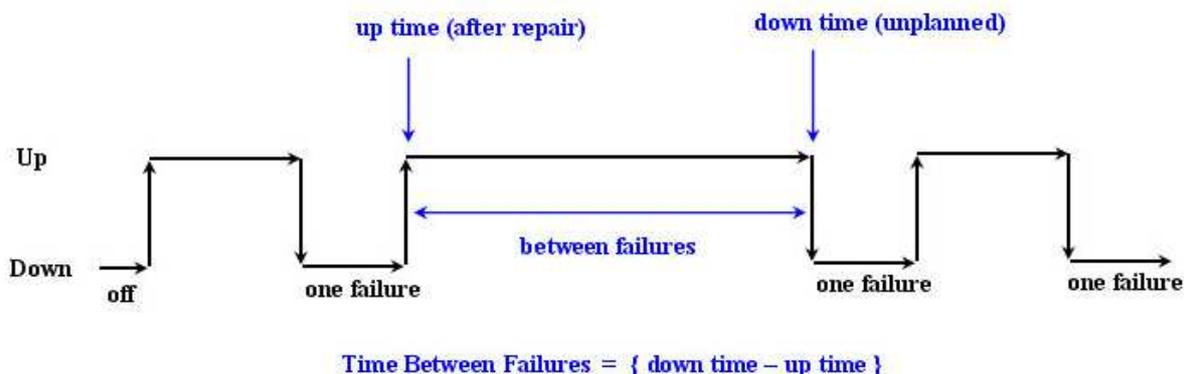


Abbildung 2: Time between Failures [15]

Abbildung 2 zeigt wie aus den Zeiten, wie lange eine Komponente in einem gewissen Zeitraum funktioniert beziehungsweise nicht funktioniert, der MTBF Wert errechnet werden kann. Auf der Abszisse befindet sich die Zeitachse und auf der Ordinate wird aufgetragen ob

das System funktioniert (up) oder nicht funktioniert (down).

$$MTBF = \frac{\sum(\text{down time} - \text{up time})}{\text{Number of Failures}}$$

Quelle: [4]

Beispiel:

Teststart 00:00 (up time); erster Ausfall um 04:00 (down time); System wird repariert; Reparaturende um 05:00 (up time); zweiter Ausfall um 15:00. MTBF errechnet sich aus 04:00 minus 00:00, ergibt 4h und aus 15:00 minus 05:00, ergibt 10h. 4h plus 10h ergibt 14h. Dividiert man die Summe durch die Anzahl der Ausfälle (2) so ergibt sich ein MTBF Wert von 7h.

Die Hersteller von technischen Erzeugnissen geben oft die MTBF Werte ihrer Produkte an. Diese sind aber an Umgebungs- und Einsatzbedingungen wie zum Beispiel Temperatur, Feuchtigkeit oder Schaltspiele geknüpft.

Beispiel: Berechnung der Zuverlässigkeit einer Festplatte.

Eine Festplatte, beispielsweise eine Samsung 840 Pro 256GB, hat eine angegebene MTBF Zeit von 1,5 Millionen Stunden. Das entspricht MTBF=171 Jahren. Diese Zeitspanne erscheint auf den ersten Blick extrem lang. Aber jetzt lässt sich aus diesem Wert die Wahrscheinlichkeit berechnen wie viel Prozent der Festplatten dieses Typs in den nächsten 5 Jahren (T) ausfallen werden.

$$\text{Zuverlässigkeit (R)} = 1 - e^{-\frac{T}{MTBF}} = 1 - e^{-\frac{5}{171}} = 2,88\%$$

Quelle: [4]

Wenn man jetzt noch berücksichtigt, dass ein Computer in dem diese Festplatte verwendet wird, noch viele weitere Komponenten braucht um zu funktionieren, dann erscheint der Wert von 171 Jahren in einem anderen Licht.

### 1.3.3.2 MTTR: Mean time to Repair Berechnung der Verfügbarkeit

MTTR: Mean time to Repair.

Das ist die englische Bezeichnung für die mittlere Zeit zwischen einem Ausfall und der Wiederinbetriebnahme eines Systems. Auf Straßentunnel übertragen setzt sich diese Zeit aus der Zeit vom Ausfall bis zum Erreichen der fehlerhaften Komponente und der eigentlichen Reparaturzeit zusammen.

Kennt man die durchschnittliche Reparaturzeit einer Komponente, dann kann man die Verfügbarkeit wie folgt berechnen.

$$\text{Verfügbarkeit (A)} = \frac{MTBF}{MTBF + MTTR}$$

Quelle: [4]

### 1.3.3.3 Zusammengesetzte Systeme MTBF

Hängt die Funktion eines Systems vom funktionieren mehrerer Komponenten ab so spricht man von zusammengesetzten Systemen. Das folgende System funktioniert nur wenn die

Komponente a und die Komponente a zur gleichen Zeit funktionieren.

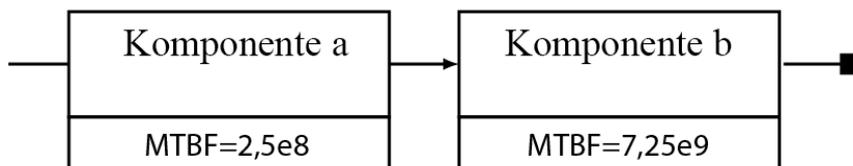


Abbildung 3: MTBF serielle Abhängigkeit

In Abbildung 3 wird ein Beispiel für eine serielle Abhängigkeit von zwei Komponenten mit unterschiedlichen MTBF Werten dargestellt. Wird für die MTTR Zeit das arithmetische Mittel aus der MTTR Zeit der einzelnen Komponenten berechnet, so lässt sich die MTBF Zeit für das System wie folgt berechnen.

Für die folgenden Rechenbeispiele wird von einer MTTR Zeit von 30h ausgegangen.

$$MTBF = \frac{1}{\frac{1}{MTBF_a} + \frac{1}{MTBF_b} + \frac{MTTR}{MTBF_a * MTBF_b}}$$

Quelle: [4]

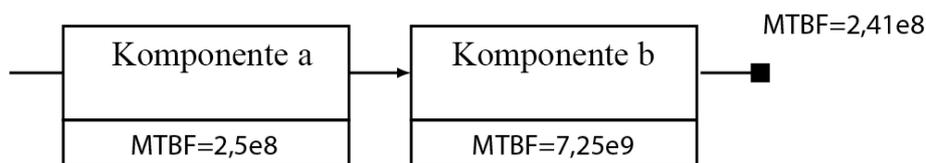


Abbildung 4: Ergebnis MTBF serielle Abhängigkeit

In Abbildung 4 erkennt man der der MTBF Wert für die serielle Abhängigkeit der Komponenten unter dem kürzesten Einzelwert der verwendeten Komponenten liegt.

Steht für die Funktion eines Systems eine zweite Komponente zur Verfügung, die bei einem Ausfall der ersten Komponente deren Funktion übernehmen kann, so spricht man von Redundanz (1/2). Durch die Parallelschaltung von zwei Komponenten kann die Zuverlässigkeit erheblich gesteigert werden.

$$MTBF = \frac{MTBF_a * MTBF_b}{MTTR} + MTBF_a + MTBF_b$$

Quelle: [4]

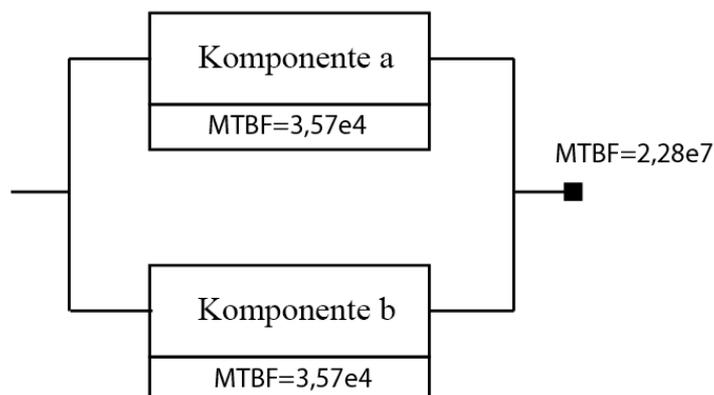


Abbildung 5: MTBF parallele Abhängigkeit

In Abbildung 5 sieht man zwei Komponenten mit gleichen MTBF Werten in paralleler Abhängigkeit. Für Redundanz (1/2) liegt der MTBF Wert für beide Komponenten weit über dem MTBF Wert einer einzelnen Komponente.

Stehen vier parallele Komponenten zur Verfügung von denen zwei funktionieren müssen (2/4) um das System betriebsbereit zu halten, ergibt sich ein Aufbau wie in Abbildung 6 dargestellt.

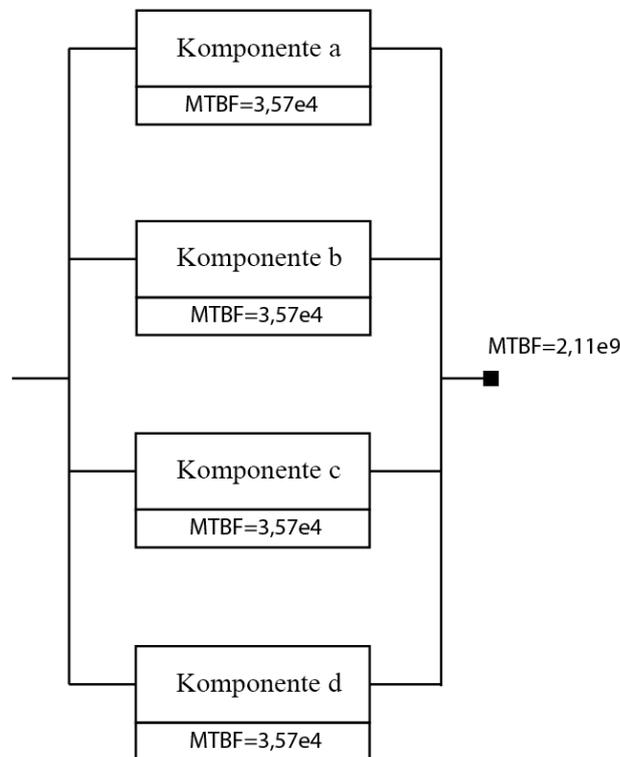


Abbildung 6: MTBF Ergebnis parallele Abhängigkeit

Da es sich viel Mal um die gleiche Komponente handelt ist der MTBF Wert aller Komponenten gleich. Hier wird die Berechnung der Zuverlässigkeit (R) etwas aufwendiger.

Zuverlässigkeit:  $R_{(t)} = e^{-\lambda t}$  mit  $\lambda = \frac{1}{MTBF}$  und  $\binom{n}{k} = \frac{n!}{k!(n-k)!}$

n.... steht für die verfügbaren Komponenten

k.....steht die Anzahl der für das Funktionieren mindestens notwendigen Komponenten

Setzt man für t=1 und MTBF in Jahren ein, bekommt man die Ausfallswahrscheinlichkeit pro Jahr.

$$R_{gesamt(t)} = \sum_{i=k}^n \binom{n}{i} R_{(t)}^i * (1 - R_{(t)})^{n-i}$$

$$R_{gesamt(t)} = \sum_{i=2}^4 \binom{4}{i} R_{(t)}^i * (1 - R_{(t)})^{4-i}$$

$$= 6R_{(t)}^2(1 - R_{(t)})^2 + 4R_{(t)}^3(1 - R_{(t)}) + R_{(t)}^4$$

$$= 3R_{(t)}^4 - 8R_{(t)}^3 - 2R_{(t)}^2$$

Quelle: [6] Vorlesung Angewandte IT-Sicherheit

Da diese Berechnungen schnell sehr aufwendig würden, gibt es fertige Softwarelösungen. Zu den kostenlosen Varianten gehören der MTBF Calculator von Polimore als Shareware oder die online Variante [7] <http://reliabilityanalyticstoolkit.appspot.com>.

### 1.3.3.4 Zusammengesetzte Systeme Verfügbarkeit (A)

Ist ein System seriell aus zwei Teilsystemen a und b zusammengesetzt, d.h. beide Teilsysteme müssen verfügbar sein, damit das Gesamtsystem funktioniert, dann gilt für die Verfügbarkeit des Gesamtsystems folgendes:

$$A_{\text{seriell}} = A_a * A_b$$

Ist ein System parallel aus zwei funktionsgleichen redundanten Teilsystemen a und b aufgebaut, und muss nur eines der Teilsysteme verfügbar sein, damit das Gesamtsystem arbeitet, dann gilt für die Verfügbarkeit des Gesamtsystems folgendes:

$$A_{\text{parallel}} = 1 - (1 - A_a) * (1 - A_b)$$

## 2 RAMS Analyse Spring Tunnel Phasen 1 bis 6

### 2.1 PHASE 1 – KONZEPT

#### 2.1.1 Zielsetzung

Das Ziel dieser Phase besteht darin, ein ausreichendes Verständnis für die Systeme zu entwickeln um alle anschließend folgenden Lebenszyklusaufgaben erfüllen zu können. Den komplexen Nahtstellen zwischen den Komponenten der Betriebslüftung des Spring Tunnels und anderen sicherheitstechnisch relevanten Anlagen ist besondere Beachtung zu schenken. Alle direkten und indirekten Abhängigkeiten sind zu berücksichtigen. Damit Neuerkenntnisse berücksichtigt werden können, ist bei Projekten dieser Komplexität ein iteratives Vorgehen unerlässlich, wobei die einzelnen RAMS Phasen überlappend sein können.

#### 2.1.2 Eingangsgrößen (Input)

Unter dem Begriff Betriebslüftung werden alle Komponenten, die zum Regelbetrieb des Spring Tunnels benötigt werden, zusammengefasst. Unter dem Begriff Ereignislüftung werden alle Komponenten, die zum Belüften und Entlüften des Spring Tunnels im Ereignisfall benötigt werden, zusammengefasst. Der Aufbau aller für den Ereignisfall notwendigen Komponenten und deren gewünschte Funktionsweise wird den Dokumenten Technischer Bericht Tunnelkette Klaus [8] und Risikoanalyse A9 – Spring Tunnel [9] entnommen. Die Norm ÖNORM EN50126 [1] dient als Richtschnur bei der Erstellung des vorliegenden Dokuments, da sie ein Verfahren zur konsequenten Anwendung eines RAMS-Managements zur Verfügung stellt.

### 2.1.3 Umfang, Zusammenhang und Zweck des Systems

Quelle: [8]

Die Pyhrn Autobahn A9 ist nicht nur eine Verbindung der Industriezentren Graz und Linz, sondern auch eine wichtige Verbindung im Europäischen Verkehrsnetz mit internationaler Bedeutung. Die A9 stellt als Teil der E57 einen wichtigen Teil der Nordwest – Südost- Achse zwischen Nürnberg und Zagreb dar. Es ist der niedrigste Ostalpenübergang in diesem Bereich. Die Transitroute über den Pyhrn gehört zu den wichtigsten Alpentransitroutes. Am 18. Dezember 2004 wurde die letzte Lücke im Abschnitt Inzersdorf - Schön geschlossen. Der Lückenschluss wurde mit Ausnahme des Abschnittes zwischen den Anschlussstellen Klaus und St. Pankraz im Vollausbau durchgeführt. Dieser Abschnitt wird in den Tunnelbereichen noch im Gegenverkehr betrieben. Der Vollausbau des verbliebenen Gegenverkehrsbereiches ist Gegenstand dieses Projektes.

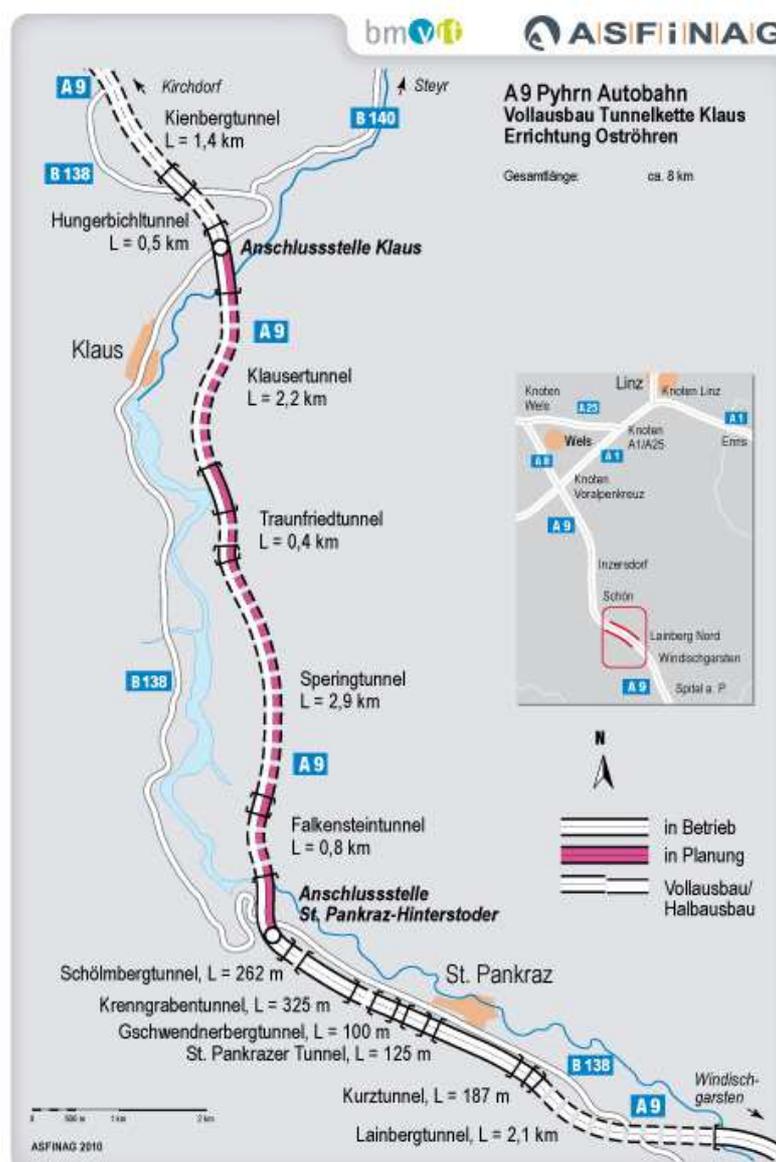


Abbildung 7: Lageskizze der Tunnelkette Klaus [8]

### 2.1.3.1 Das Lüftungskonzept:

Das Lüftungskonzept für den Spering Tunnel ist eine Längslüftung mittels Strahlventilatoren.

*Zitat Anfang [8]:*

#### 2.1.3.1.1 Normalbetrieb:

Die Normalbetrieb – Regelung erfolgt nach den gemessenen Luftgütwerten. Unabhängig vom Verkehrsaufkommen ist die Einhaltung von Sollwerten für CO und K (Trübefaktor) sicherzustellen. Dies hat durch den Einsatz von entsprechenden Regelgliedern zu geschehen. Im Regelfall wird die Kolbenwirkung des Verkehrs ausreichen, um genug Frischluft in den Tunnel einzubringen und die Schadstoffe auf ein zuträgliches Niveau zu verdünnen.

#### 2.1.3.1.2 Bremsbetrieb mittels Strahlventilatoren:

Im Richtungsverkehr unter bestimmten Voraussetzungen kann es zu einer Längsgeschwindigkeit im Tunnel von über 10 m/s kommen. Gemäß RVS 09.02.31 [10] darf die im Tunnel auftretende Längsgeschwindigkeit jedoch 10 m/s nicht überschreiten. Falls erforderlich sind die Strahlventilatoren zur Minderung der Längsgeschwindigkeit gemäß den Prioritäten für den Normalbetrieb entgegen der Strömungsrichtung zu betreiben.

#### 2.1.3.1.3 Ereignisfall:

Im Ereignisfall werden die freigesetzten Gase und Verbrennungsprodukte mit Hilfe der Strahlventilatoren in Längsrichtung aus dem Tunnel bewegt. Dies muss unter definierten Vorgaben geschehen, um die Rauchsichtung im Tunnel möglichst lange beizubehalten. Die Vorgabe der Anzahl benötigter Lüfter wird vom Regler realisiert. Ein Regler regelt die Luftgeschwindigkeit in Tunnellängsachse zum eingestellten Sollwert durch entsprechende Schaltungen der Strahlventilatoren.

#### 2.1.3.1.4 Allgemeine Voraussetzungen für das Regelungskonzept:

Die Anwendbarkeit des Regelungskonzepts setzt folgende

Bedingungen voraus:

- Strömungsmessgeräte zur Messung der Längsströmung im Tunnel müssen richtig und mit ausreichender Genauigkeit messen.
- Die Ventilatoren müssen entsprechend dem vorgeschlagenen Regelungskonzept geschaltet werden können.

Im Abschnitt befinden sich folgende Tunnelobjekte:

| Tunnelname         | Weströhre | Oströhre |
|--------------------|-----------|----------|
| Klauser Tunnel     | 2.192 m   | 2.166 m  |
| Traunfried Tunnel  | 448 m     | 462 m    |
| Spering Tunnel     | 2.862 m   | 2.894 m  |
| Falkenstein Tunnel | 783 m     | 752 m    |

Tabelle 4: Tunnelkette Klaus

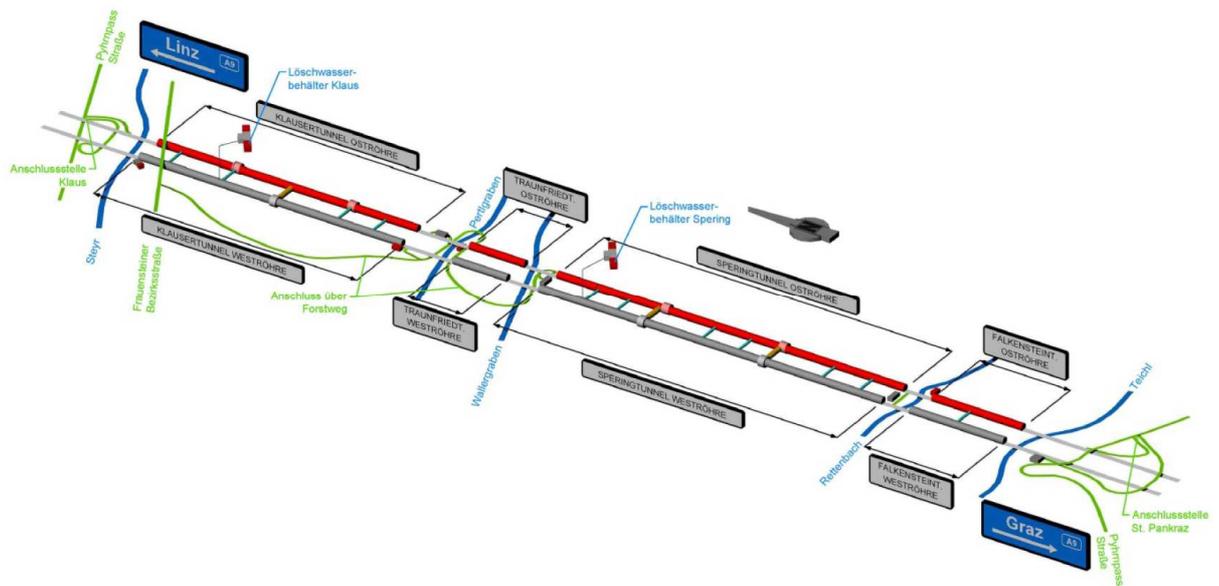


Abbildung 8: Schematische Darstellung Tunnelkette Klaus im Vollausbau

[Zitat Ende]

## 2.1.4 Systemumgebung

### 2.1.4.1 Physikalische Gesichtspunkte

Aufgrund der verschiedenen Randbedingungen und der betrieblichen, sicherheitstechnischen und lüftungstechnischen Ziele werden Strömungsverhältnisse im Tunnel entstehen, die hohe Anforderungen an die Betriebslüftung stellen. Neben den für den Normalbetrieb relevanten Beeinträchtigungen wie Temperaturen, Feuchtigkeit, Staub und Druckbelastungen sind insbesondere die Rauchentwicklung und die hohen Temperaturen im Ereignisfall zu beachten.

### 2.1.4.2 Gesichtspunkte der potenziellen Beeinflussungen an den Systemschnittstellen

Folgende potenzielle Beeinflussungen an den Schnittstellen sind zu betrachten:

- Interaktion mit anderen Systemen, insbesondere die Tunnelleittechnik zur Steuerung und Überwachung der Lüftungsanlagen des Querschlags und der Querschlags Türen.
- Die Signalübertragung zu den übergeordneten Systemen hat eine sehr große Bedeutung.
- Interaktion mit den Querschlags Türen, da diese zur Trennung zwischen Unfallort und Fluchtweg dienen.
- Interaktion mit der Stromversorgung. Die Betriebs- bzw. Ereignislüftung funktioniert nur im Zusammenspiel mit der Stromversorgung via Mittelspannungs- und Niederspannungsverteilung der Tunneltechnik.
- Interaktion mit den Kopfrechnern und der Tunnelleittechnik. Das Tunnelleitsystem ist ein in sich funktionierendes System, welches mit externen Systemen wie Rettungskräfte oder Pannendienste in Verbindung treten muss.
- Interaktion mit der Klimatisierung und Belüftung der technischen Räume, in welchen systemrelevante Komponenten untergebracht sind.

- Reaktion auf Naturereignisse (Steinschlag, Erdbeben, Unwetter, unerwarteter Wassereinbruch im Tunnel) und auf Wetterbedingungen (Glatteis, Temperatur, Feuchtigkeit, Wind) bei den Tunnelportalbereichen.
- Interaktion mit Wartungsarbeiten. Korrekte Abläufe bei der Durchführung der Wartungsarbeiten sind vorausgesetzt. Unkorrekte Zustände, zum Beispiel bei Querschlags Türen, Strahlventilatoren, Zugangstüren zu den technischen Räumen oder der Tunnelbeleuchtung, könnten die Betriebsangehörigen während der Wartungsarbeiten beträchtlich gefährden.
- Interaktion mit dem Erdungssystem der Tunnelleittechnik.

#### 2.1.4.3 Soziale Gesichtspunkte

Die sozialen Gesichtspunkte beziehen sich in erster Linie auf die Kontakte zwischen Mensch und System. Bezogen auf die Betriebs bzw. Ereignislüftung sind folgende Personengruppen direkt betroffen: Betriebspersonal, Erhaltungspersonal und Einsatzkräfte.

#### 2.1.4.4 RAMS-Auswirkungen

*RAMS-Auswirkungen von finanziellen Analysen des Systems:*

Das Verhältnis zwischen der Erfüllung der RAMS-Ziele, den Investitions- und den Betriebskosten ist zu optimieren. Konfliktpunkte und die entsprechenden Lösungen werden identifiziert und explizit dokumentiert.

*RAMS-Auswirkungen von Systemmachbarkeitsstudien:*

Allfällige Konflikte zwischen RAMS-Zielen und der technischen oder finanziellen Machbarkeit der Anlagen werden identifiziert und explizit dokumentiert.

#### 2.1.4.5 Gefahrenquellen

Eine Gefahr ist ein auf eine bestimmte Situation bzw. ein bestimmtes Projekt bezogener Vorgang oder Zustand, aus welchem potenziell ein Schaden für Mensch, Umwelt und/oder Sachgüter entstehen kann.

Die Hauptgefahrenquellen sind:

- Die Mitarbeiter, insbesondere das Erhaltungspersonal durch mögliche Wartungsfehler sowie das Betriebspersonal durch mögliche Bedienfehler
- Für die Betriebslüftung die klimatischen Bedingungen der Umgebung
- Mögliche technische Fehler und Ausfälle

Beim Zusammenführen der verschiedenen Systeme wird ferner der Einfluss einer Gefahrenquelle genau hinsichtlich der Auswirkung auf das Gesamtsystem untersucht. Die entsprechenden erkannten Gefahrenquellen sind in den nachfolgenden Kapiteln, insbesondere in der RAMS-Phase 3 Risikoanalyse, dargestellt.

#### 2.1.4.6 Daten und Informationsquellen

*Frühere RAMS-Anforderungen*

Da der Spring Tunnel nicht nach RAMS Gesichtspunkten geplant und gebaut wurde, gibt es

keine früheren RAMS-Anforderungen. Bisher wurden weder Risikoanalysen noch RAMS Kennwerte nach den RAMS Methoden ermittelt.

### *Erkannte Gefahrenquellen für die RAMS-Performance*

Die folgenden Hauptgefahrenquellen für die RAMS-Performance wurden identifiziert:

- Konflikte mit finanziellen Randbedingungen (Investitions- und/oder Betriebskosten)
- Konflikte mit Anrainern und Interessenvertretungen
- Konflikte mit der technischen Machbarkeit

Diese sind besonders die Folge von:

- Der unterirdischen Ausführung
- Des potentiell wachsenden Platzbedarfs der technischen Einrichtungen
- Änderungen an Anforderungen und Randbedingungen
- Große Abweichungen in der Vorhersage des zukünftigen Verkehrsaufkommen

### *Aktuelle Sicherheitspolitik und Sicherheitsziele*

Grundsätzlich wird eine dreigeteilte Strategie bei den Sicherheitsanstrengungen verfolgt:

1. Die Ereignisverhinderung durch ein möglichst sicheres Gesamtkonzept.
2. Prävention durch sehr gut geschulte Mitarbeiter und wiederkehrende Anstrengungen den Sicherheitsgrad zu optimieren. Zum Beispiel durch periodisch wiederkehrende Revalidierungen der Sicherheitsstandards.
3. Die Schadensausmaßminderung durch Abschwächung der Unfallfolgen und Optimierung der Selbst und Fremddrettung.

### *Aktuelle Sicherheitsgesetzgebung*

Die hier relevante Sicherheitsgesetzgebung besteht aus:

- Internationalen Richtlinien und Normen
- Nationalen Richtlinien und Normen
- Gesetzen und Verordnungen
- Regelwerken der ASFiNAG

#### **2.1.4.7 Umfang der Managementanforderungen**

2.1.4.7.1 Folgende Komponenten sind für das RAMS-Management notwendig:

- Beschreibung der RAMS-Anforderungen, Risikoanalyse und Sicherheitsnachweis
- Qualitätssicherung zur Reduktion der Projektrisiken
- Aufsicht, Zulassung, Begutachtung und Betriebsbewilligung
- Verifikation als unabhängige Begutachtung zur Reduktion der inhaltlichen Risiken
- Validierung des Gesamtsystems

2.1.4.7.2 Beschreibung der RAMS-Anforderungen, Risikoanalyse und Sicherheitsnachweis:

Die Risikoanalyse und Bestimmung Sicherheitsanforderungen sind Kernaufgaben bei der Planung. Der Sicherheitsnachweis über die Erfüllung der Anforderungen an die Anlagen des Spring Tunnels gemäß Projektplanung und der in der Ausschreibung dieser Anlagen

definierten Detailspezifikationen muss durch den Systemlieferanten erbracht werden.

#### 2.1.4.7.3 Qualitätssicherung zur Reduktion der Projektrisiken:

Die Qualitätssicherung wird auf der Projektebene durchgeführt. Der entsprechende Ablauf hat nach geeigneten Qualitätsmanagementprozessen zu erfolgen. Die Definition der Qualitätsmanagementprozesse sowie deren Dokumentation ist Aufgabe des Tunnelbetreibers.

#### 2.1.4.7.4 Aufsicht, Zulassung, Begutachtung und Betriebsbewilligung:

Die Aufsicht, Zulassung und Betriebsbewilligung ist eine Aufgabe des österreichischen Bundesministeriums für Verkehr, Innovation und Technologie in seiner Funktion als Aufsichtsbehörde des österreichischen Straßennetzes.

#### 2.1.4.8 **Verifikation als unabhängige Begutachtung zur Reduktion der inhaltlichen Risiken**

Die Verifikation der RAMS-Anforderungen sollte von einem unabhängigen Prüfer, der nicht an der Erstellung der Dokumente beteiligt war, durchgeführt werden. Sie wird im Rahmen der Freigabe der Dokumente durchgeführt.

#### 2.1.4.9 **Validierung des Gesamtsystems**

Die Validierung des Gesamtsystems hat durch den Systembetreiber zu erfolgen. Darüber hinaus hat auch der Systembetreiber dafür verantwortlich Sorge zu tragen, dass der validierte Status des Gesamtsystems aufrecht bleibt. Um das System in einem validierten Zustand zu halten, müssen alle vorgeschriebenen Wartungs- und Instandhaltungsmaßnahmen plangemäß durchzuführen. Alle Angehörigen des Betriebs- und Wartungspersonals müssen in regelmäßigen Abständen geschult und für Ereignisfälle trainiert werden. Sämtliche Maßnahmen müssen geplant, durchgeführt und dokumentiert werden.

## **2.2 PHASE 2 - SYSTEMDEFINITION UND ANWENDUNGS-VORAUSSETZUNGEN/ -BEDINGUNGEN**

### **2.2.1 Zielsetzung**

Die Phase 2 hat folgende Zielsetzungen, soweit sie die mögliche RAMS-Performance des Systems betreffen:

- Systembeschreibung und Festlegung der Betriebsaufgaben der Systeme sowie der Systemgrenzen.
- Erstellen der Anwendungsbedingungen, die die Systemmerkmale beeinflussen.
- Festlegung des Umfangs der Systemgefahrenanalyse.
- Erstellen der RAMS-Politik für das Gesamtsystem.
- Erstellen des Sicherheitsplans.

### **2.2.2 Eingangsgrößen**

Eingangsgrößen für die Phase 2 sind alle gesetzlichen Vorschriften, die Dokumente Technischer Bericht Tunnelkette Klaus [8], Risikoanalyse A9 – Sperrung [9] sowie die Ergebnisse der RAMS-Phasen 1.

Neben den bereits erwähnten Anforderungen fließen die Ergebnisse der RAMS-Phase 1 ein.

Die wichtigsten Ergebnisse sind:

- Die Anforderungen an Zuverlässigkeit, Verfügbarkeit und Instandhaltbarkeit der Betriebslüftung sind zentrale Aspekte, um eine hohe Sicherheit und Verfügbarkeit des Gesamtsystems zu gewährleisten.
- Die Tunnelumgebung stellt bezüglich Instandhaltbarkeit und Robustheit der gesamten Anlagen der Betriebslüftung erhöhte Anforderungen.
- Die hohen technischen Anforderungen an die Betriebslüftung beeinflussen besonders die Sicherheit aber auch die Verfügbarkeit des Gesamtsystems positiv.
- Die Anforderungen an die Subsysteme leiten sich von den übergeordneten Anforderungen an den Betrieb des Tunnels ab.
- Aufwendungen hinsichtlich der Systeme sind immer auch Aufwendungen zur Erfüllung der RAMS-Anforderungen des übergeordneten Gesamtsystems.
- Gefahrenquellen werden bei dem komplexen System Spring Tunnel konsequent analysiert.

Die Sicherheitspolitik und Sicherheitsstrategie umfasst:

- Verminderung der Ereignishäufigkeit
- Verminderung des Schadensausmaß im Ereignisfall

Die Hauptgefahrenquellen sind:

- Die Mitarbeiter, insbesondere das Erhaltungspersonal durch mögliche Wartungsfehler
- Das Betriebspersonal durch mögliche Bedienfehler
- Mögliche technische Fehler und Ausfälle
- Ungenügende Wartung

Beim Zusammenführen der verschiedenen Systeme wird ferner der Einfluss einer Gefahrenquelle genau hinsichtlich der Wirkung auf das Gesamtsystem untersucht.

Die Hauptgefahrenquellen für die RAMS-Performance sind:

- Konflikte mit finanziellen Randbedingungen (Investitions- und/oder Betriebskosten)
- Konflikte mit der technischen Machbarkeit

Als Folge von Besonderheiten des Werks, wie:

- Die unterirdische Ausführung
- Der potentiell wachsende Platzbedarf der technischen Einrichtungen
- Die Änderungen an Anforderungen und Randbedingungen

## **2.2.3 Erfüllung der Anforderungen**

### **2.2.3.1 Betriebsaufgaben, Systemgrenzen, Anwendungsbestimmungen, Gefahrenanalyse**

Betriebsaufgaben-Profil des Systems:

### **2.2.3.2 Lüftungsziele und Strategien:**

Das Lüftungskonzept für den Spring Tunnel ist eine Längslüftung mittels Strahlventilatoren. Der Spring Tunnel ist zusammenfassend in Abbildung 9 dargestellt. Schematisch

ingezeichnet sind die Lage der Strahlventilatoren, Längsgeschwindigkeitsmessstellen und CO/Trübe – Messstellen.



#### Legende:

- ⊙ .....Strahlventilator
- — — — — Übergeordnete Brandzone
- — — — — Längsstromungsmessgerät
- .....CO- / Trübemessung

Abbildung 9: Grundriss Spring Tunnel mit lüftungstechnischen Komponenten [8]

Zusätzlich wird in Tabelle 5 und Tabelle 6 jedem Strahlventilator eine Bezeichnung zugewiesen sowie seine Entfernung vom Einfahrtsportal und seine Einbausituation angegeben.

| Strahlventilator | Entfernung vom Nordportal [m] | Montagesituation |
|------------------|-------------------------------|------------------|
| SW1 / 2          | 190                           | paarweise        |
| SW3 / 4          | 280                           | paarweise        |
| SW5 / 6          | 1990                          | paarweise        |
| SW7 / 8          | 2070                          | paarweise        |
| SW9 / 10         | 2690                          | paarweise        |
| SW11 / 12        | 2770                          | paarweise        |

Tabelle 5: Situierung der Strahlventilatoren Spring Tunnel Weströhre [8]

| Strahlventilator | Entfernung vom Nordportal [m] | Montagesituation |
|------------------|-------------------------------|------------------|
| SO1              | 190                           | einzel           |
| SO2 / 3          | 280                           | paarweise        |
| SO4 / 5          | 810                           | paarweise        |
| SO6 / 7          | 900                           | paarweise        |
| SO8 / 9          | 2710                          | paarweise        |
| SO10 / 11        | 2800                          | paarweise        |

Tabelle 6: Situierung der Strahlventilatoren Spring Tunnel Oströhre [8]

### 2.2.3.3 Die Betriebslüftung erfüllt folgende Aufgaben:

#### Normalbetrieb:

Bedarfsorientiertes Ansaugen von Frischluft an einem Tunnelportal und Ausblasen der schadstoffbelasteten Luft am gegenüberliegenden Tunnelportal (Längslüftung). Bei durchschnittlichen Fahrzeuggeschwindigkeiten ab 10 km/h und Richtungsverkehr ist keine zusätzliche mechanische Belüftung mehr erforderlich, die Selbstbelüftungseffekte reichen aus, um genügend Frischluft durch den Tunnel zu transportieren.

#### Ereignisbetrieb:

Da der Spring Tunnel mit einem mechanischen Längslüftungssystem ausgestattet wird, werden die Rauchgase im Brandfall mit Unterstützung der Strahlventilatoren über die Tunnelportale ausgeblasen.

Die Betriebslüftung wurde primär als Sicherheitsanlage für den Ereignisfall dimensioniert. Die Sicherheit der im Tunnelsystem anwesenden Menschen steht im Vordergrund.

## 2.2.4 RAMS-Zielsetzungen

Für die Sicherheit im Tunnelbetrieb ist ein ausgewogenes Zusammenspiel baulicher, technischer, Lüftungsspezifischer, betrieblicher und rettungstechnischer Maßnahmen ausschlaggebend. Nicht die Maximierung von Einzelelementen, sondern die Optimierung des Gesamtsystems ist entscheidend. Eine hohe Systemverfügbarkeit ist von zentraler Bedeutung sowie eine einfache, einheitliche Installation sämtlicher Komponenten und definierter und geregelter Betriebsabläufe. Die ereignisverhindernden Maßnahmen bilden den eigentlichen Schwerpunkt in der Tunnelsicherheit. Kann die wahrscheinliche Häufigkeit eines Schadensereignisses nur ungenügend gesenkt werden, ist eine Reduktion des Schadensausmaßes durch geeignete Maßnahmen zu erreichen.

### 2.2.4.1 Langzeitbetriebs-Strategie, Lebens- / Nutzungsdauer:

*Zitat Anfang* [10]:

Maßgebend für die Entscheidung für ein Lüftungssystem sind die Wirtschaftlichkeit und die sicherheitstechnische Analyse im Betriebs- und Brandfall. Für die wirtschaftlichen Überlegungen ist mit einer Lebensdauer der elektromaschinellen Ausrüstungsteile von 20 Jahren zu rechnen. Für die baulichen Anlagen ist in der Regel eine Lebensdauer von 80 Jahren anzusetzen.

*Zitat Ende*

Während dieser Lebensdauer muss eine hohe Zuverlässigkeit der Komponenten gewährleistet werden, um Revisionen und Reparaturen auf ein Minimum zu reduzieren. Der Startpunkt der Lebensdauer gilt ab dem Einbauzeitpunkt der jeweiligen Komponente. Das Kalenderjahr besteht aus 365 Tage à 24 Stunden. Somit ergeben sich 8760 Stunden pro Jahr.

#### 2.2.4.2 Systemgrenzen:

Die ÖNORM EN 50126 verlangt die Definition der Schnittstellen der betrachteten Systems zur Systemumgebung. Die Dimensionierung der Betriebslüftung ist an folgende Randbedingung geknüpft:

- Bauliche Grenzen: Tunnelquerschnitt und Querschnitte der Querschlagbelüftung
- Barometrischer Druckunterschiede an Portalen
- Verkehrsdaten für den Zeitpunkt der geplanten Tunneleröffnung sowie zehnjährige Verkehrsprognose des Tunnelbetreibers
- Verkehrsart (Richtungsverkehr, Gegenverkehr, periodischer Gegenverkehr, maximale Verkehrsstärke, stockender Verkehr)
- Anlagenverhältnisse (Länge, Steigung, Querschnitt, Fluchtwege)
- Umfeld Situation (Immissionen, Schutzmaßnahmen)
- Energieversorgungssystem. Insbesondere alle für die Lüftungskomponenten erforderlichen Mittelspannungsenergieversorgungsanlagen
- Bauliche Ausführung der Tunnelportale

#### 2.2.4.3 Schnittstelle zu Personen

##### 2.2.4.3.1 Wartungspersonal:

Um das Gesamtsystem in einem validierten Zustand zu halten, dürfen sämtliche Wartungs- und Instandhaltungsarbeiten ausschließlich von geschultem Wartungspersonal durchgeführt werden. Alle Wartungsarbeiten müssen geplant, von nachgewiesenermaßen qualifiziertem Personal durchgeführt und dokumentiert werden.

##### 2.2.4.3.2 Betriebspersonal:

Im Ereignisfall ist die Entscheidung des Menschen über die notwendigen Notfallmaßnahmen wie die Wahl des richtigen Lüftungsszenarios, Verständigung der Rettungskräfte sowie Bedienung des Verkehrsleitsystems von entscheidender Bedeutung. Im Rahmen dieser RAMS Wertebestimmung wird davon ausgegangen, dass diese wichtigen Entscheidungen richtig getroffen werden.

Die nachfolgende Liste gibt einige Hinweise für Faktoren, welche die Zuverlässigkeit der richtigen Entscheidung sowie die Richtigkeit der Eingabe des Lüftungsszenarios beeinflussen:

- Anzahl der Personen in der Tunnelkontrollwarte
- Anordnung der Anzeigen und Steuergeräte in der Tunnelkontrollwarte
- Informationssicherheit und Plausibilitätschecks
- Gliederung, Reihenfolge und Übersichtlichkeit von Meldungen
- Bedienungsfreundlichkeit des Computersteuerungssystems
- Braucht es zum Starten des Lüftungsszenarios zwei Eingaben (z.B. von zwei Personen, Vier-Augen-Prinzip)?

- Wie schnell kann ein falsches Lüftungsszenario gewechselt werden?
- Wie schnell und wodurch wird die Wahl eines falschen Lüftungsszenario erkannt?

#### 2.2.4.4 Schnittstelle zur anschließenden Verkehrsinfrastruktur

Die gesamte Infrastruktur wird durch ein einzelnes Unternehmen (ASFiNAG) betrieben. Der Spring Tunnel ist ein Verkehrsinfrastrukturbestandteil, der durch ein komplexes Verkehrsüberwachungs- und Leitsystem kontrolliert wird.

#### 2.2.4.5 Anwendungsbedingungen, die das System beeinflussen

##### 2.2.4.5.1 Instandhaltungsbedingungen des Systems:

Der Instandhaltung kommt eine sehr große Bedeutung in Hinblick auf die Tunnelsicherheit zu. In Zusammenarbeit mit dem Tunnelbetreiber muss ein Verfahren zur Systemüberwachung ausgearbeitet werden. Bei der Systemüberwachung wird zwischen zwei prinzipiellen Vorgangsweisen unterschieden:

- Permanente automatische Überwachung
- Periodische manuelle Überwachung

##### 2.2.4.5.2 Permanente automatische Überwachung:

Bei der permanenten Systemüberwachung müssen über den Kopfrechner gesteuerte Prüfroutinen programmiert werden, die permanent die Verfügbarkeit der Systemkomponenten überwachen. Bei einem Ausfall einer Komponente muss sofort ein automatischer Alarm in der Tunnelkontrollwarte ausgelöst und deren Reparatur in Auftrag gegeben werden. Für alle Komponenten die Sensoren beinhalten müssen für die Sensorergebnisse geeignete Unter- und Obergrenzen, zwischen denen sich die Messergebnisse bewegen dürfen, definiert und überwacht werden. Bei mehrfach redundant ausgeführten Komponenten sind automatische Plausibilitätschecks vorzusehen.

##### 2.2.4.5.3 Periodische manuelle Überwachung:

Bei Komponenten, deren Funktion nicht permanent automatisch überwacht werden kann, sind periodisch wiederkehrende manuelle Prüfungen vorzusehen. Im Kopfrechner sind diese als zeitlich festgelegte Prüfungen zu programmieren. Der Kopfrechner gibt nach Ablauf einer definierten Zeit den Befehl zur manuellen Prüfung der Komponente. Ist die Prüfung erfolgreich absolviert, kann das Bedienpersonal das System als erfolgreich geprüft zurückmelden. Ab diesem Zeitpunkt beginnt die Zeit bis zur nächsten Prüfung erneut zu laufen. Permanente automatische Überwachungssysteme sind der periodisch manuellen Überwachung immer vorzuziehen.

## 2.3 PHASE 3 – RISIKOANALYSE

### 2.3.1 Zielsetzung

Die Phase 3 hat folgende Zielsetzungen:

- Die Identifikation von Gefahren, die mit den entsprechenden Systemen verbunden sind.
- Die Identifikation der Ereignisse, die diese Gefahren auslösen und der Umstände, die das Eintreten dieser Ereignisse ermöglichen oder begünstigen.
- Die Bestimmung des mit den Gefahren verbundenen Risikos.

- Die Erstellung eines Prozesses für ein kontinuierliches Risikomanagement.

### 2.3.2 Eingangsgrößen

Eingangsgrößen für die Phase 3 sind alle gesetzlichen Vorschriften, das Dokument Technischer Bericht Tunnelkette Klaus [8], das Dokument Risikoanalyse A9 - Spering Tunnel [9] sowie die Ergebnisse der RAMS-Phasen 1 und 2.

### 2.3.3 Einleitung Risikoanalyse Spering Tunnel

Der in dieser Risikoanalyse verwendete Aufbau des RAMS-Modells gilt für das Ereignis „Fahrzeugbrand im Spering Tunnel“. Das RAMS-Modell ist so aufgebaut, dass alle für den Ereignisfall benötigten Subsysteme und Komponenten funktionieren müssen. Ein Ausfall einer nicht redundanten Komponente oder eines nicht redundanten Subsystems führt zu einem Fehler des gesamten Systems. Bei den redundanten Komponenten führt nur die gleichzeitige Störung aller Komponenten zu einem Versagen des gesamten Systems.

### 2.3.4 Komponenten

Die verwendeten Werte für die Komponenten (MTBF, MTTR) müssen nach Möglichkeit von den Herstellern der einzelnen Komponenten bezogen werden. Da die Daten der Komponenten die im Spering Tunnel verwendet wurden für diese Diplomarbeit nicht zur Verfügung standen, wurden die entsprechenden MTBF sowie MTTR-Werte von vergleichbaren Komponenten, die im Gotthard Basistunnel zum Einsatz gekommen sind, verwendet und daraus die Verfügbarkeit des Systems berechnet. Bei straßentunnelspezifischen Komponenten, die im Gotthard Eisenbahntunnel keine Verwendung finden wurden Daten vergleichbarer Systeme im Internet recherchiert. Der MTBF-Wert beschreibt eine rein statistische Ausfallwahrscheinlichkeit der Komponente, die nur unter der Berücksichtigung der jeweiligen Randbedingungen (Temperatur, Feuchtigkeit, Druck, usw.) gültig ist.

### 2.3.5 Redundanzen

Im RAMS-Modell sind die Redundanzen immer auf die Komponenten oder Subsysteme bezogen. Redundanzen sind immer an Randbedingungen geknüpft. Beispiele: Pilot und Copilot können die Aufgaben gegenseitig übernehmen, stellen aber keine Redundanz im Falle eines Brandes in Cockpit dar. Ein Ersatzschlüssel am selben Schlüsselbund kann bei starker Abnutzung oder Bruch des ersten Schlüssels als Ersatz verwendet werden, stellt aber keine Redundanz gegen Verlust des Schlüsselbundes dar. Eine Stromversorgung, mittels nichtaktiver Alternativversorgung, muss zusätzlich alle zur Ausfallerkennung und zum Einschalten der Alternative notwendigen Komponenten berücksichtigen und stellt deshalb keine hundertprozentige Redundanz dar. Wo immer es möglich ist, sollte eine örtliche Trennung der redundanten Komponenten vorgenommen werden. Da davon ausgegangen wird, dass ein Ausfall einer Komponente keine Änderung der Umgebungsbedingungen für die redundante Komponente verursacht, und die ausgefallene Komponente in der vorgegebenen MTTR-Zeit repariert oder ersetzt wird, wurden die modellierten Redundanzen immer als hundertprozentige Redundanzen betrachtet.

### 2.3.6 RAMS-Modell

Im Folgenden wird der Aufbau des RAMS-Modells erklärt. Es gilt für den Ereignisfall „Fahrzeugbrand im Spering Tunnel“ und stellt das Grundmodell dar.

Der zu analysierende Fahrzeugbrand hat folgende Randbedingungen:

Der Fahrzeugbrand ist ein Heißbrand, der von dem im Spering Tunnel verwendeten Brandlinienmeldekabel detektiert werden kann. Die in der Einteilung der Gefahrenstufen berücksichtigten Opferzahlen beruhen ausschließlich auf Opfern, die als direkte Ursache dem Brand selbst zugeordnet werden müssen. Da in dieser Risikoanalyse die Funktionsweise der Tunnellüftung im Brandfall bewertet werden soll, werden Opfer die durch mechanische Einflüsse, wie zum Beispiel Auffahrunfälle und Kollisionen mit dem Gegenverkehr oder den Tunnelwänden zu Schaden kommen, nicht berücksichtigt.

Folgende Ausfallszenarien werden mit Anpassungen am Grundmodell analysiert:

- Ausfall der Kopfrechner trotz hundertprozentiger Redundanz
- Ausfall der Mittelspannungsversorgung trotz hundertprozentiger Redundanz
- Ausfall der Niederspannungsversorgung trotz hundertprozentiger Redundanz
- Ausfall der automatischen Branddetektion trotz hundertprozentiger Redundanz
- Ausfall der Längsströmungsmessung
- Ausfall der Strahlventilatoren
- Ausfall der Querschlagbelüftung

In den Modellen wurden folgende Annahmen getroffen:

- 1) Bei sämtlichen Komponenten werden konstante Ausfallraten vorausgesetzt.
- 2) Die Hauptstromversorgung ist zu 100% verfügbar.

### **2.3.7 System und Komponentenübersicht**

In Abbildung 10 ist Gesamtstruktur der technischen Komponenten des Spering Tunnels dargestellt. Es werden alle Komponenten, die in dieser Abbildung dargestellt sind, effektiv für dieses Brandszenario benötigt. Die rechnerischen sowie logischen Abhängigkeiten von den einzelnen Komponenten sind in weiteren Abbildungen dargestellt. Aus diesen ist ersichtlich, welche Komponenten für das vorgegebene Brandszenario benötigt werden und wie diese verknüpft sind.

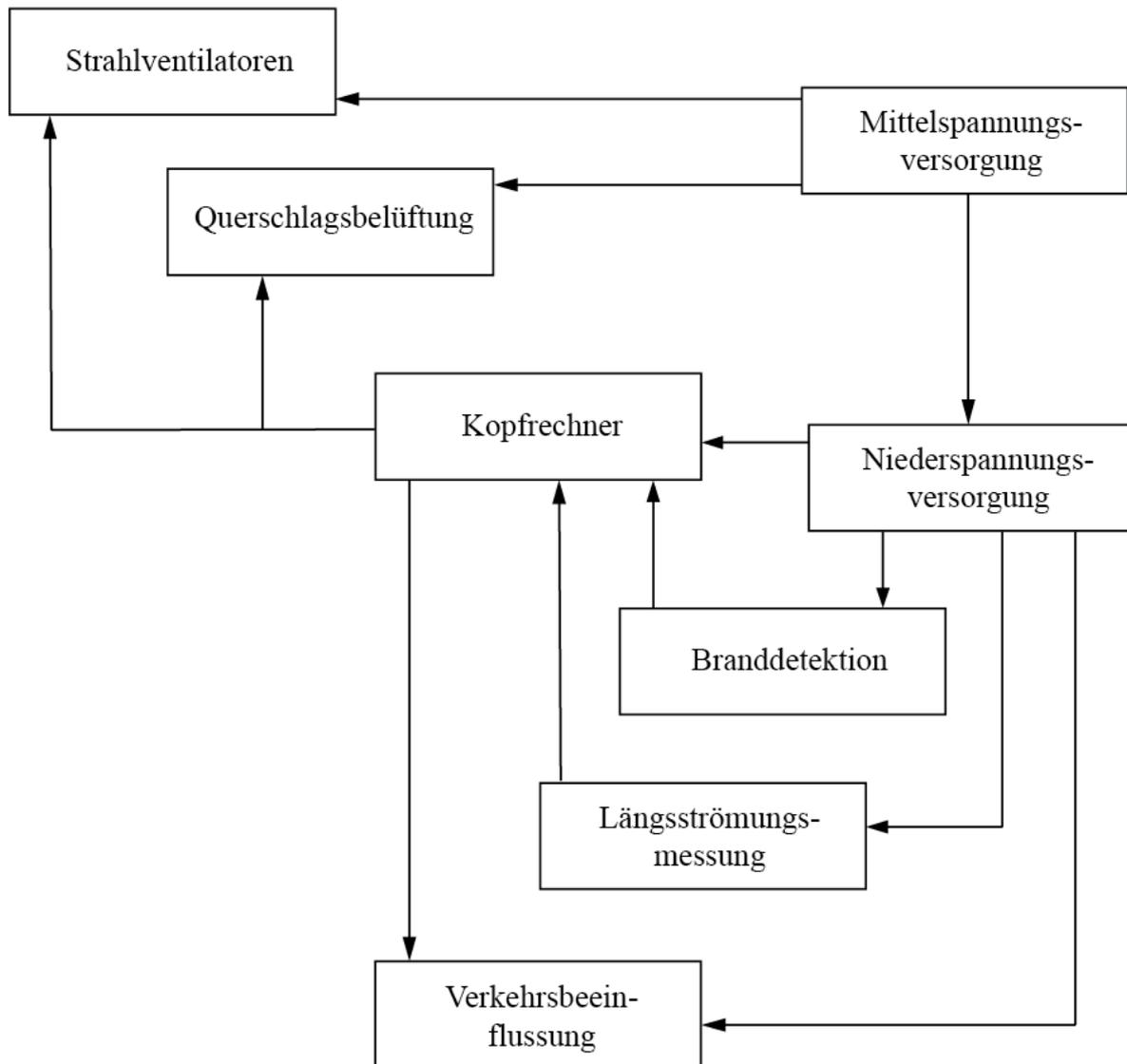


Abbildung 10: Gesamtstruktur der technischen Komponenten des Systems Spring Tunnel

| Bezeichnung                 | Komponente                  | MTBF [h] | $\lambda$ [1/h] | MTTR [h] | Reparaturzeit [h] | Zeit vor Ort [h] |
|-----------------------------|-----------------------------|----------|-----------------|----------|-------------------|------------------|
| Kopfrechner                 |                             |          |                 | 28       | -                 | -                |
|                             | Kopfrechner                 | 3,57E+04 | 2,80E-05        | 28       | 4                 | 24               |
| Mittelspannungsanlage       |                             |          |                 | 29       | -                 | -                |
|                             | Mittelspannungsschalter     | 2,13E+05 | 4,69E-06        | 29       | 5                 | 24               |
|                             | Leistungsschutzschalter     | 5,60E+05 | 1,79E-06        | 29       | 5                 | 24               |
|                             | Relais                      | 1,50E+06 | 6,67E-07        | 29       | 5                 | 24               |
| Niederspannungsanlage       |                             |          |                 | 29       | -                 | -                |
|                             | Einspeiseschalter           | 5,60E+05 | 1,79E-06        | 29       | 5                 | 24               |
|                             | Leistungsschutzschalter     | 5,60E+05 | 1,79E-06        | 29       | 5                 | 24               |
|                             | Relais                      | 1,50E+06 | 6,67E-07        | 29       | 5                 | 24               |
| Längsströmungsmessgerät     |                             |          |                 | 28,5     | -                 | -                |
|                             | Luftgeschwindigkeitsmesser  | 4,69E+04 | 2,13E-05        | 29       | 5                 | 24               |
|                             | Elektr. Steuerung/ Regelung | 1,32E+05 | 7,58E-06        | 28       | 4                 | 24               |
| Strahlventilator            |                             |          |                 | 31       | -                 | -                |
|                             | Schalter                    | 2,13E+05 | 4,69E-06        | 29       | 5                 | 24               |
|                             | Elektr. Steuerung/ Regelung | 1,32E+05 | 7,58E-06        | 32       | 8                 | 24               |
|                             | Antriebsmotor               | 1,47E+05 | 6,80E-06        | 32       | 8                 | 24               |
| Querschlags Belüftung       |                             |          |                 | 30       | -                 | -                |
|                             | Elektr. Steuerung/ Regelung | 1,32E+05 | 7,58E-06        | 32       | 8                 | 24               |
|                             | Antriebsmotor               | 1,00E+06 | 1,00E-06        | 32       | 8                 | 24               |
|                             | Lamellen                    | 7,14E+06 | 1,40E-07        | 29       | 5                 | 24               |
|                             | Klappenantrieb              | 1,75E+05 | 5,71E-06        | 29       | 5                 | 24               |
|                             | Schalter                    | 2,13E+05 | 4,69E-06        | 28       | 4                 | 24               |
| Automatische Branddetektion |                             |          |                 | 29       | -                 | -                |
|                             | Brandlinienmeldekabel       | 2,89E+05 | 3,46E-06        | 29       | 5                 | 24               |

Tabelle 7: MTBF und MTTR Werte der einzelnen Komponenten vom Spring Tunnel

Die Zeit, bis ein qualifizierter Servicetechniker mit dem zur Reparatur notwendigen Werkzeug braucht, um mit der Reparatur vor Ort beginnen zu können, wird vom Tunnelbetreiber in einem Servicevertrag vorgeschrieben. Diese Zeit hat einen großen Einfluss auf die Verfügbarkeit des Systems. Hier wird diese Zeitspanne pauschal mit 24 Stunden angenommen. Die Reparaturzeiten müssen mit dem Servicepersonal möglichst exakt erhoben werden. Da das im Rahmen dieser Diplomarbeit nicht möglich ist, werden die entsprechenden Reparaturzeiten in Tabelle 7 der Komponenten des Spring Tunnel analog zu denen beim Gotthard Basistunnel ermittelten Reparaturzeiten angenommen. Der MTTR Wert ist die Summe aus der Zeit, die benötigt wird bis der Servicetechniker vor Ort ist, und der Zeit, die er für die Reparatur inklusive eines aussagekräftigen Tests des Systems benötigt. Die in Tabelle 7 angegebenen MTBF Werte der einzelnen Komponenten aus den Spring Tunnel standen für diese Diplomarbeit leider nicht zur Verfügung und wurden analog zu denen aus den Gotthard Basistunnel festgelegt.

### 2.3.7.1 Kopfrechner

Die Kopfrechner sind redundant ausgeführt und sollten in verschiedenen Räumen stehen.

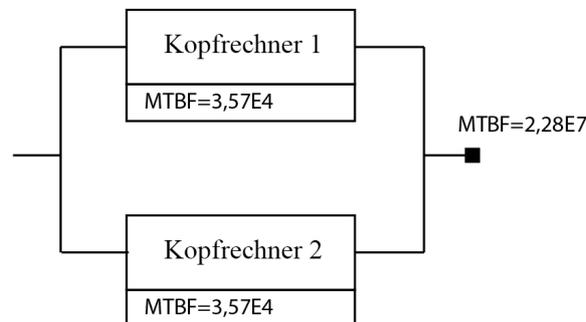


Abbildung 11: Aufbau der Kopfrechner

Abbildung 11 zeigt den redundanten Aufbau der beiden Kopfrechner mit den entsprechenden MTBF Werten. Bei einem Fahrzeugbrand im Tunnel muss einer der beiden Kopfrechner (1/2) verfügbar sein. Die für die Berechnung der gesamten MTBF des Systems notwendige MTTR ergibt sich aus dem arithmetischen Mittel von der MTTR von einer Niederspannungsversorgung und von einem Kopfrechner. (siehe Tabelle 7). Die MTBF des Systems Kopfrechner beträgt 2,28E7 Stunden.

### 2.3.7.2 Mittelspannungsanlage

In Abbildung 12 ist die Mittelspannungsanlage bestehend aus einem Mittelspannungsschalter, einem Leistungsschutzschalter und einem Relais in serieller Abhängigkeit dargestellt.

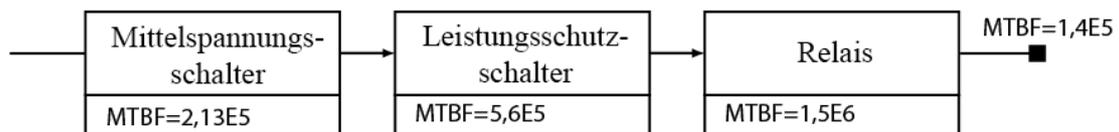


Abbildung 12: Aufbau einer Mittelspannungsanlage

Der MTBF Wert einer einzelnen Mittelspannungsanlage beträgt 1,4E5 Stunden.

### 2.3.7.3 Mittelspannungsversorgung

Die Mittelspannungsversorgung wird durch zwei parallele Mittelspannungsanlagen in redundanter Ausführung sichergestellt. Die einzelnen Mittelspannungsanlagen befinden sich an zwei voneinander getrennten Orten.

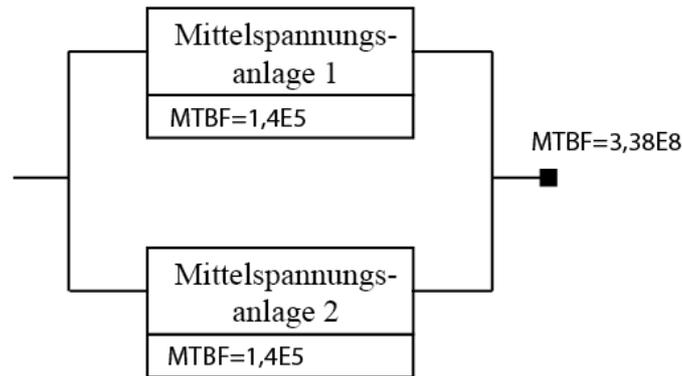


Abbildung 13: Mittelspannungsversorgung

Abbildung 13 zeigt den redundanten Aufbau der beiden Mittelspannungsanlagen mit den entsprechenden MTBF Werten. Im Brandfall muss eine der beiden Mittelspannungsanlagen (1/2) verfügbar sein um das System wie gewünscht betreiben zu können. Die MTTR für das gesamte System ergibt sich aus dem arithmetischen Mittel von der MTTR der einzelnen Komponenten (siehe Tabelle 7).

Der MTBF Wert der gesamten Mittelspannungsversorgung beträgt 3,38E8 Stunden.

#### 2.3.7.4 Niederspannungsanlage

In Abbildung 14 wird die Niederspannungsanlage bestehend aus einem Einspeiseschalter, einem Leistungsschutzschalter und einem Relais in serieller Abhängigkeit dargestellt.

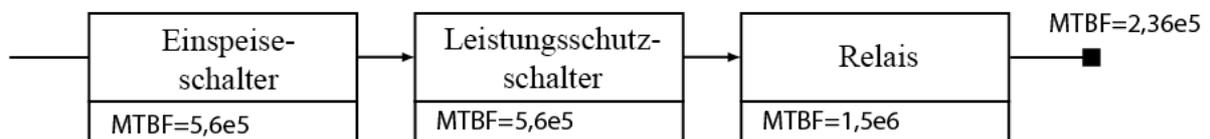


Abbildung 14: Aufbau einer Niederspannungsanlage

Der MTBF Wert einer einzelnen Niederspannungsanlage beträgt 2,36E5 Stunden.

#### 2.3.7.5 Niederspannungsversorgung

Die Niederspannungsversorgung wird durch zwei parallele Niederspannungsanlagen in redundanter Ausführung sichergestellt. Die einzelnen Niederspannungsanlagen befinden sich an zwei voneinander getrennten Orten.

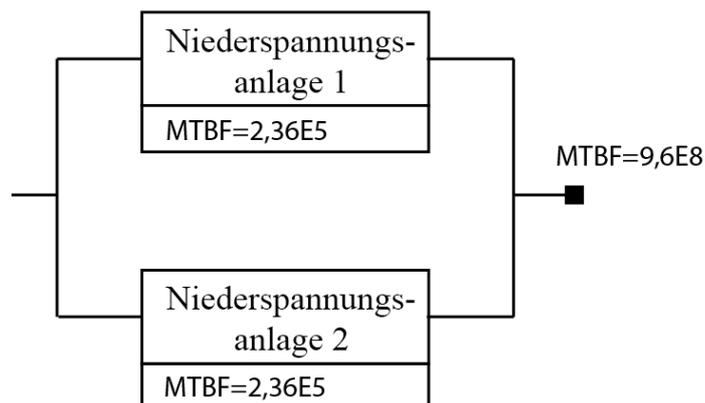


Abbildung 15: Aufbau der Niederspannungsversorgung

Die Abbildung 15 zeigt den redundanten Aufbau der beiden Niederspannungsanlagen mit den entsprechenden MTBF Werten. Im Brandfall muss eine der beiden Niederspannungsanlagen (1/2) verfügbar sein um das System wie gewünscht betreiben zu können. Die MTTR für das gesamte System ergibt sich aus dem arithmetischen Mittel von der MTTR der einzelnen Komponenten (siehe Tabelle 7).

Der MTBF Wert der gesamten Niederspannungsversorgung beträgt  $9,6E8$  Stunden.

#### 2.3.7.6 Automatische Branddetektion

Die automatische Branddetektion wird durch ein Brandlinienmeldekabel, wie in Abbildung 16 dargestellt, ausgeführt.

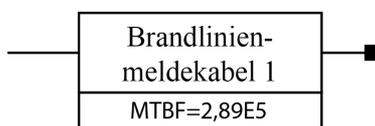


Abbildung 16: Brandlinienmeldekabel

Der MTBF Wert des Brandlinienmeldekabel beträgt  $2,89E5$  Stunden.

#### 2.3.7.7 Längsströmungsmessgerät

Ein Längsströmungsmessgerät besteht wie in Abbildung 17 dargestellt aus einem Luftgeschwindigkeitsmesser und einer elektrischen Steuer und Regeleinheit in serieller Abhängigkeit. Die MTTR für das gesamte System ergibt sich aus dem arithmetischen Mittel von der MTTR der einzelnen Komponenten (siehe Tabelle 7).

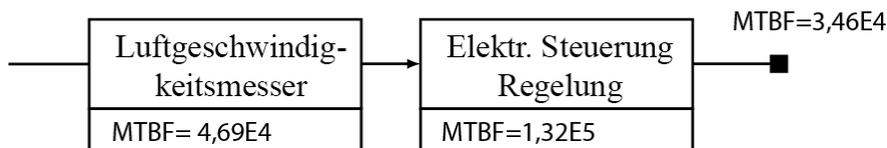


Abbildung 17: Aufbau eines Längsströmungsmessgeräts

Der MTBF Wert eines einzelnen Längsströmungsmessgeräts beträgt  $3,46E4$  Stunden.

### 2.3.7.8 Längsströmungsmessung

Die Längsströmungsmessung in Spring Tunnel erfolgt, wie in Abbildung 18 dargestellt, durch 5 Längsströmungsmessgeräte die in geeigneten Abständen im Tunnel verbaut und mit unterschiedlicher Eignung redundant verwendbar sind.

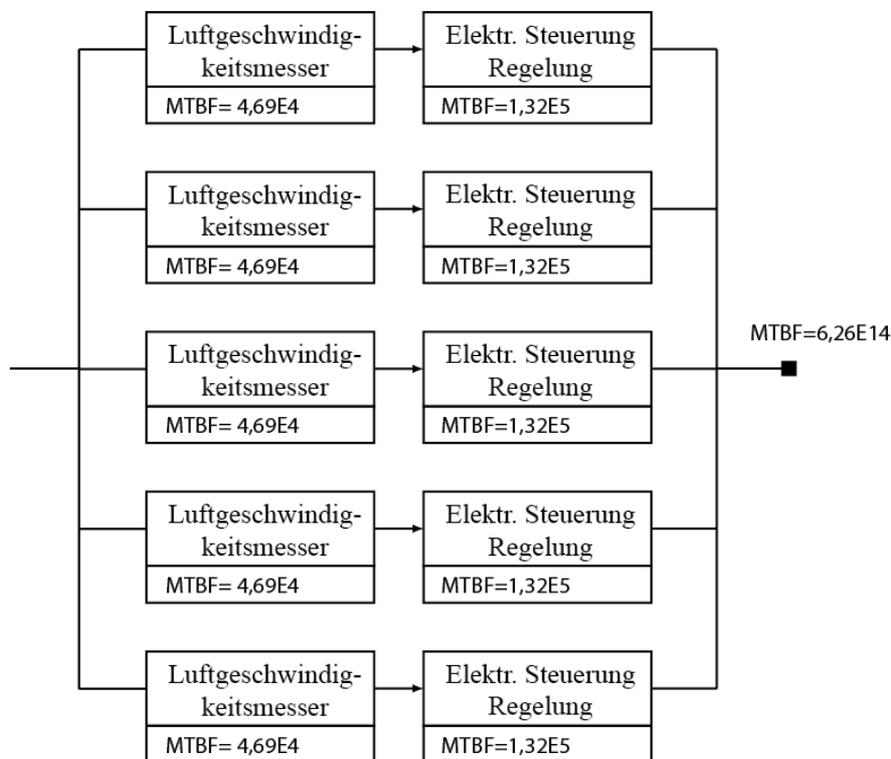


Abbildung 18: Aufbau der Längsströmungsmessung

Im Brandfall muss eines der fünf Längsströmungsmessgeräte (1/5) verfügbar sein, um das System wie gewünscht betreiben zu können.

Die MTTR für das gesamte System ergibt sich aus dem arithmetischen Mittel von der MTTR der einzelnen Komponenten (siehe Tabelle 7). Der MTBF Wert der gesamten Längsströmungsmessung beträgt  $6,26E14$  Stunden. Dieser Wert erscheint gigantisch hoch und wirft die Frage auf wozu im Spring Tunnel fünf Längsströmungsmessgeräte verbaut wurden obwohl im Brandfall eines ausreichen würde, um das System wie gewünscht betreiben zu können. Hier wird ausschließlich die technische Verfügbarkeit aller fünf redundant verbauten Längsströmungsmessgeräte berechnet. Die tatsächliche Verfügbarkeit ist auf Grund von technischen Gegebenheiten viel geringer. Ein Längsströmungsmessgerät misst die Luftströmung nach dem Messprinzip der Bestimmung der richtungsgebundenen Laufzeitdifferenz von Ultraschallimpulsen. Im Tunnel werden zwei Sensoren quer über die Fahrbahn in einem Winkel zwischen  $30^\circ$  bis  $60^\circ$  zur Fahrbahnachse zueinander ausgerichtet und senden bzw. empfangen wechselseitig Ultraschallimpulse. Die Laufzeit des Schallimpulses ist von der Laufrichtung abhängig, wenn Luftströmung entlang des Messpfades auftritt. Diese Zeitdifferenz wird präzise ermittelt und in die Messgrößen Luftgeschwindigkeit und Strömungsrichtung umgerechnet. Wenn aber ein großes Fahrzeug (LKW, Bus) genau zwischen dem Ultraschallsender und Empfänger zum Stehen kommt, ist das Signal unterbrochen. Starke Rauchentwicklung führt ebenfalls zu falschen Messwerten. In diesem Fall ist das Längsströmungsmessgerät zwar technisch immer noch vorhanden, praktisch aber nicht mehr zur Längsströmungsmessung verfügbar. Dann muss der Kopfrechner auf das nächste verfügbare Längsströmungsmessgerät zugreifen. Die Prioritäten zur Verwendungsreihenfolge der Längsströmungsmessgeräte können im Dokument Technischer Bericht Tunnelkette Klaus [8] dem Kapitel 12.2 entnommen werden. Der MTBF

Wert berücksichtigt nur die Zeit, in der das Längsströmungsmessgerät technisch einwandfrei funktioniert. Aus diesem Grund ist die technische Verfügbarkeit der Längsströmungsmessung mit  $6,26E14$  Stunden so extrem hoch.

### 2.3.7.9 Strahlventilator

In Abbildung 19 ist ein Strahlventilator bestehend aus einem Schalter, einer elektrischen Steuer- und Regeleinheit und einem Antriebsmotor in serieller Abhängigkeit dargestellt.



Abbildung 19: Aufbau eines Strahlventilators

Der MTBF Wert eines einzelnen Strahlventilators beträgt  $5,24E4$  Stunden.

### 2.3.7.10 Strahlventilatoren

Im Spring Tunnel sind, wie in Abbildung 20 dargestellt, 12 Strahlventilatoren verbaut.

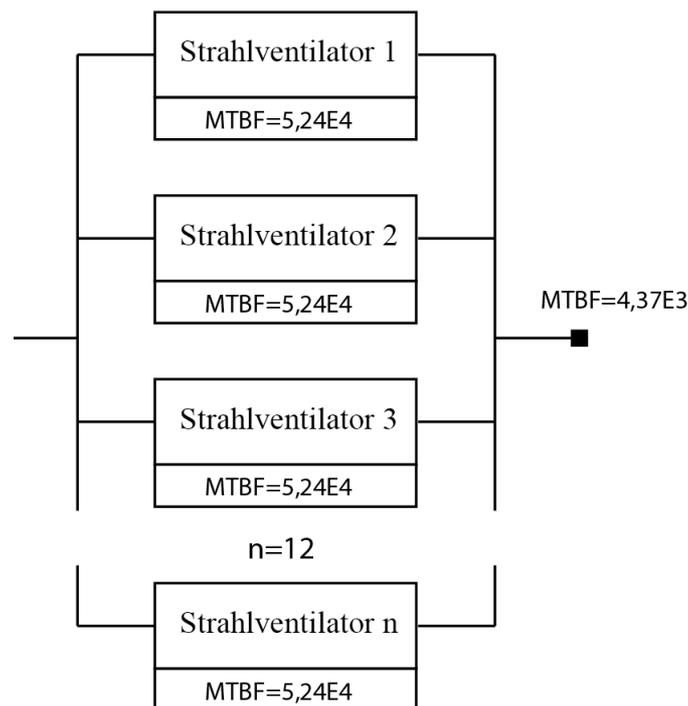


Abbildung 20: Aufbau der Strahlventilatoren

Für einen Normbrand von 30MW müssen alle 12 Strahlventilatoren (12/12) verfügbar sein. Die Lage des Brandortes kann das Betreiben der beiden nächstgelegenen Strahlventilatoren verbieten. In diesem Fall werden nur 10 der 12 Strahlventilatoren verwendet. Da das System nach diesen Gesichtspunkten ausgelegt wurde reichen 10 Strahlventilatoren aus um die Tunnellüftung, wie gewünscht, betreiben zu können. Die Prioritäten zur Verwendungsreihenfolge der Strahlventilatoren können im Dokument Technischer Bericht Tunnelkette Klaus [8] dem Kapitel 8.2.3 entnommen werden. Die MTTR für das gesamte System ergibt sich aus dem arithmetischen Mittel von der MTTR der einzelnen Komponenten (siehe Tabelle 7).

Der MTBF Wert aller Strahlventilatoren beträgt  $4,37E3$  Stunden.

### 2.3.7.11 Querschlagbelüftung

In Abbildung 21 ist die Querschlagbelüftung, bestehend aus einer elektrischen Steuer- und Regeleinheit, einem Antriebsmotor, einer Lamelleneinheit, einem Klappenantrieb und einem Schalter in serieller Abhängigkeit dargestellt.

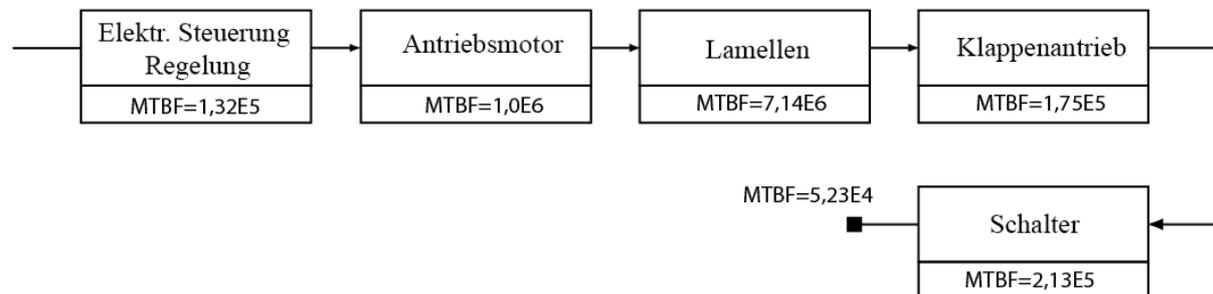


Abbildung 21 Aufbau einer Querschlagbelüftung

Der MTBF Wert der Querschlagbelüftung beträgt 5,23E4 Stunden.

## 2.3.8 Ausfallswahrscheinlichkeiten für die Szenarien 1 bis 7

### 2.3.8.1 Ausfallswahrscheinlichkeit für Szenario 1: Ausfall der Kopfrechner im Spring Tunnel

Im Ausfallsszenario 1 wird der MTBF Wert für die Kopfrechner in Abhängigkeit aller für den Betrieb notwendigen Systemkomponenten berechnet.

In der Abbildung 10 können die Abhängigkeiten von den anderen Systemkomponenten leicht erkannt werden. Für den planmäßigen Betrieb der Kopfrechner ist die Stromversorgung durch die Niederspannungsversorgung notwendig. Wie in Abbildung 22 dargestellt besteht eine serielle Abhängigkeit zwischen den Kopfrechnern und der Niederspannungsversorgung. Die zusätzlich vorhandene unabhängige Spannungsversorgung wurde hier nicht zusätzlich berücksichtigt.

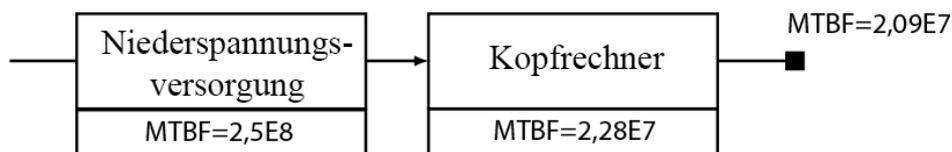


Abbildung 22 Systemkomponentenabhängigkeit der Kopfrechner

Der MTBF Wert für den Ausfall der Kopfrechner beträgt 2,09E7 Stunden. Das entspricht 2386 Jahren. Die Ausfallswahrscheinlichkeit pro Jahr beträgt:

$$\text{Ausfallswahrscheinlichkeit} = \frac{1}{2386} = 4,19E - 5$$

### 2.3.8.2 Ausfallsszenario 2: Ausfall der Mittelspannungsversorgung im Spring Tunnel

Im Ausfallsszenario 2 wird der MTBF Wert für die Mittelspannungsversorgung in Abhängigkeit aller für den Betrieb notwendigen Systemkomponenten berechnet.

In der Abbildung 10 können die Abhängigkeiten von den anderen Systemkomponenten leicht erkannt werden. Wie in Abbildung 23 dargestellt besteht keine weitere Abhängigkeit zu anderen Komponenten im System.

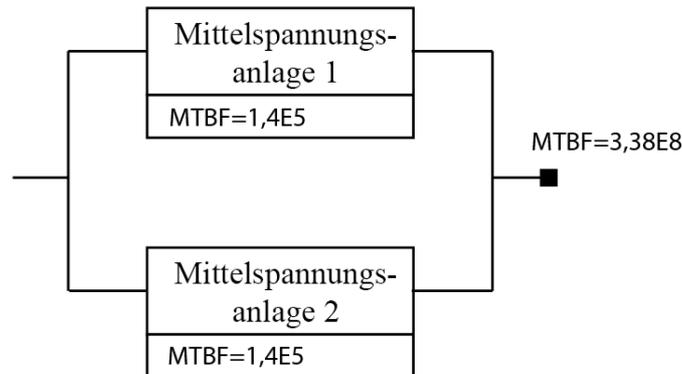


Abbildung 23 Systemkomponentenabhängigkeit der Mittelspannungsversorgung

Abbildung 23 zeigt den redundanten Aufbau der Mittelspannungsversorgung. Für den Betrieb reicht eine der beiden Mittelspannungsanlagen aus (1/2). Der MTBF Wert der gesamten Mittelspannungsversorgung beträgt  $3,38E8$  Stunden. Das entspricht 38584 Jahren. Die Ausfallswahrscheinlichkeit pro Jahr beträgt:

$$\text{Ausfallswahrscheinlichkeit} = \frac{1}{38584} = 2,59E - 5$$

### 2.3.8.3 Ausfallsszenario 3: Ausfall der Niederspannungsversorgung im Spring Tunnel

Im Ausfallsszenario 3 wird der MTBF Wert für die Niederspannungsversorgung in Abhängigkeit aller für den Betrieb notwendigen Systemkomponenten berechnet.

In der Abbildung 10 können die Abhängigkeiten von den anderen Systemkomponenten leicht erkannt werden. Abbildung 24 zeigt den redundanten Aufbau der Niederspannungsversorgung. Für den Betrieb reicht eine der beiden Niederspannungsanlagen aus (1/2).

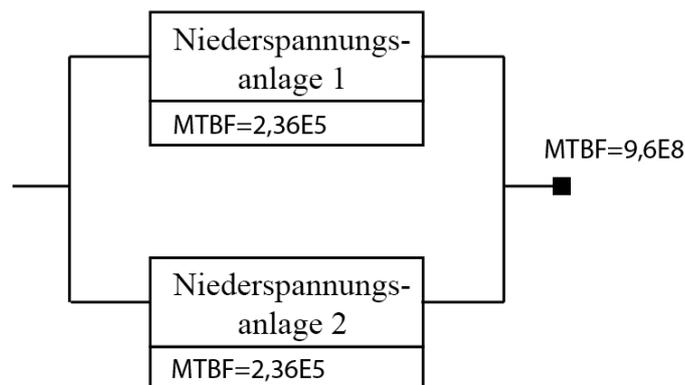


Abbildung 24 Aufbau der Niederspannungsversorgung

In Abbildung 25 sind die anderen, für den Betrieb notwendigen Komponenten, des Systems dargestellt. Für den planmäßigen Betrieb der Niederspannungsversorgung ist die Stromversorgung durch die Mittelspannungsversorgung notwendig. Es besteht eine serielle Abhängigkeit zwischen der der Mittelspannungsversorgung und der

Niederspannungsversorgung.

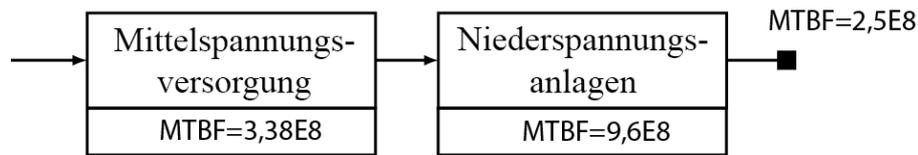


Abbildung 25 Systemkomponentenabhängigkeit der Niederspannungsversorgung

Der MTBF Wert der gesamten Niederspannungsversorgung beträgt 2,5E8 Stunden. Das entspricht 28539 Jahren. Die Ausfallswahrscheinlichkeit pro Jahr beträgt:

$$\text{Ausfallswahrscheinlichkeit} = \frac{1}{28539} = 3,5E - 5$$

#### 2.3.8.4 Ausfallsszenario 4: Ausfall der automatischen Branddetektion im Spring Tunnel

Im Ausfallsszenario 4 wird der MTBF Wert für die automatische Branddetektion in Abhängigkeit aller für den Betrieb notwendigen Systemkomponenten berechnet.

In der Abbildung 10 können die Abhängigkeiten von den anderen Systemkomponenten leicht erkannt werden. Für den planmäßigen Betrieb der automatischen Branddetektion ist die Stromversorgung durch die Niederspannungsversorgung notwendig. Wie in Abbildung 26 dargestellt besteht eine serielle Abhängigkeit zwischen der Niederspannungsversorgung und der automatischen Branddetektion.

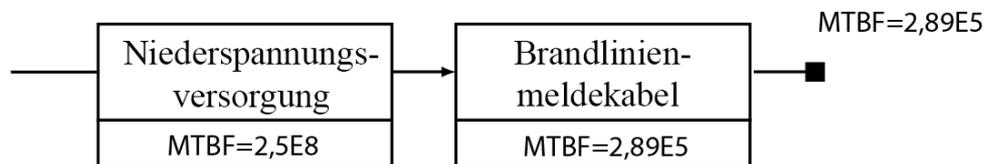


Abbildung 26: Systemkomponentenabhängigkeit der automatischen Branddetektion

Der MTBF Wert für den Ausfall der automatischen Branddetektion beträgt 2,89E5 Stunden. Das entspricht 33 Jahren. Die Ausfallswahrscheinlichkeit pro Jahr beträgt:

$$\text{Ausfallswahrscheinlichkeit} = \frac{1}{33} = 3,03E - 2$$

#### 2.3.8.5 Ausfallsszenario 5: Ausfall der Längsströmungsmessung im Spring Tunnel

Im Ausfallsszenario 5 wird der MTBF Wert für die Längsströmungsmessung in Abhängigkeit aller für den Betrieb notwendigen Systemkomponenten berechnet.

In der Abbildung 10 können die Abhängigkeiten von den anderen Systemkomponenten leicht erkannt werden. Wie in Abbildung 27 dargestellt ist für den planmäßigen Betrieb der Längsströmungsmessung die Stromversorgung durch die Niederspannungsversorgung notwendig. Es besteht eine serielle Abhängigkeit zwischen der Niederspannungsversorgung und der Längsströmungsmessung.

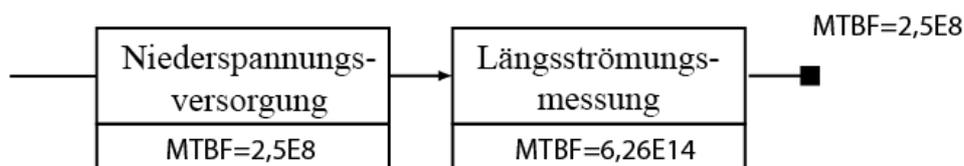


Abbildung 27: Systemkomponentenabhängigkeit der Längsströmungsmessung

Der MTBF Wert für den Ausfall der Längsströmungsmessung beträgt 2,5E8 Stunden. Das entspricht 28539 Jahren. Die Ausfallswahrscheinlichkeit pro Jahr beträgt:

$$\text{Ausfallswahrscheinlichkeit} = \frac{1}{28539} = 3,5E - 5$$

### 2.3.8.6 Ausfallsszenario 6: Ausfall der Strahlventilatoren im Spring Tunnel

Im Ausfallsszenario 6 wird der MTBF Wert für die Strahlventilatoren in Abhängigkeit aller für den Betrieb notwendigen Systemkomponenten berechnet.

In der Abbildung 10 können die Abhängigkeiten von den anderen Systemkomponenten leicht erkannt werden. Wie in Abbildung 28 dargestellt ist für den planmäßigen Betrieb der Strahlventilatoren die Stromversorgung durch die Mittelspannungsversorgung und die Steuerung durch die Kopfrechner notwendig. Es besteht eine serielle Abhängigkeit zwischen den Kopfrechnern, der Mittelspannungsversorgung und den Strahlventilatoren.

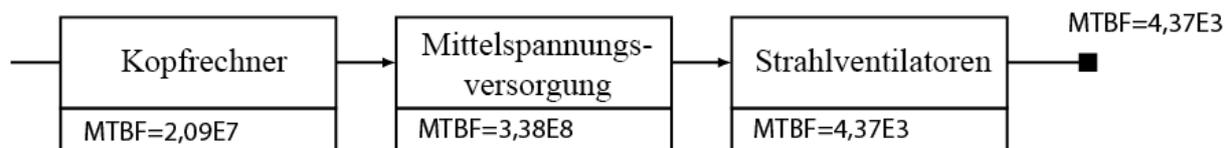


Abbildung 28: Systemkomponentenabhängigkeit der Strahlventilatoren

Der MTBF Wert für den Ausfall der Strahlventilatoren beträgt 4,37E3 Stunden. Das entspricht 0,499 Jahren. Die Ausfallswahrscheinlichkeit pro Jahr beträgt:

$$\text{Ausfallswahrscheinlichkeit} = \frac{1}{0,499} = 2$$

### 2.3.8.7 Ausfallsszenario 7: Ausfall der Querschlags Belüftung im Spring Tunnel.

Im Ausfallsszenario 7 wird der MTBF Wert für die Querschlagbelüftung in Abhängigkeit aller für den Betrieb notwendigen Systemkomponenten berechnet.

In der Abbildung 10 können die Abhängigkeiten von den anderen Systemkomponenten leicht erkannt werden. Der planmäßige Betrieb beider Querschlagbelüftungen (2/2) wird in Abbildung 29 dargestellt. Da es keine serielle Abhängigkeit zwischen den beiden Querschlagbelüftungen gibt ist die parallele Darstellung notwendig. Weil beide Querschlagbelüftungen unabhängig voneinander funktionieren müssen, kann man hier nicht von Redundanz sprechen.

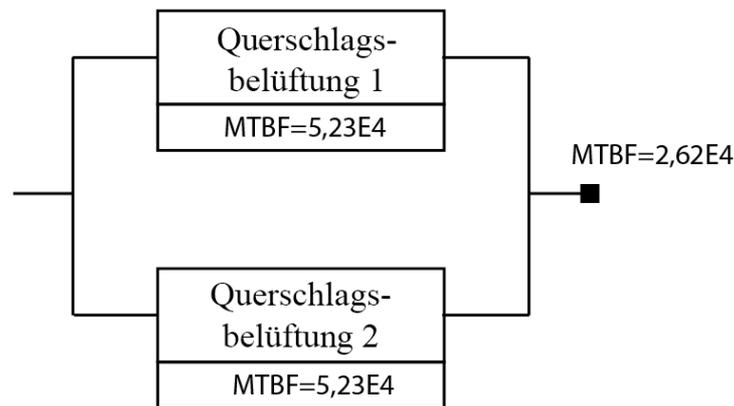


Abbildung 29: Aufbau der Querschlagbelüftungen

Wie in Abbildung 30 dargestellt besteht eine serielle Abhängigkeit zwischen den Kopfrechnern, der Mittelspannungsversorgung und der Querschlagbelüftung. Die MTBF Zeit der Querschlagbelüftungen beruht auf der Annahme des permanenten Betriebs der Komponenten. Da die Querschlagbelüftung ausschließlich im Ereignisfall und zu Test sowie Wartungszwecken betrieben wird muss ein sogenannter Duty Cycle Faktor berücksichtigt werden. Dieser Faktor gibt das Verhältnis zum Dauerbetrieb an und wird für die Querschlagbelüftung mit 10% angesetzt.

$$MTBF = \frac{2,62E4}{0,1} = 2,62E5$$

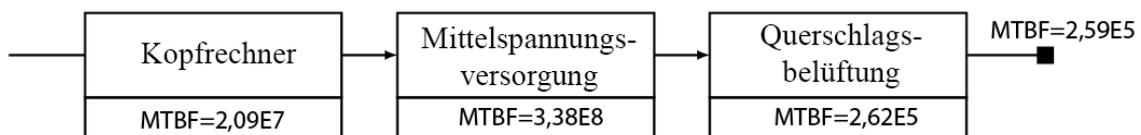


Abbildung 30: Systemkomponentenabhängigkeit der Querschlagbelüftungen

Der MTBF Wert für den Ausfall der Querschlagbelüftungen beträgt 2,59E5 Stunden.

Das entspricht 29,6 Jahren. Die Ausfallswahrscheinlichkeit pro Jahr beträgt:

$$\text{Ausfallswahrscheinlichkeit} = \frac{1}{29,6} = 3,38E - 2$$

## 2.3.9 Klassifizierung und Zulässigkeit der Risiken

### 2.3.9.1 Definition der Ausfallshäufigkeiten

Für die Durchführung der Risikoanalyse ist es notwendig die Häufigkeit des Auftretens eines Ereignisses zu quantifizieren. Die Beurteilung der Häufigkeit von Gefahren erfolgt nach den folgenden Kategorien. Die Ausfallwahrscheinlichkeiten pro Jahr basieren auf den Kategorien gemäß ÖNORM EN50126 [1]. Die Zahlenwerte der Tabelle 8, in der Spalte Ausfallwahrscheinlichkeit pro Jahr, werden nicht von der ÖNORM EN50126 [1] vorgegeben. Sie stellen eine subjektive Expertenmeinung dar und können für jede Risikoanalyse frei gewählt werden. Die hier verwendeten Zahlenwerte wurden in Anlehnung an die RAMS Analyse der Gotthard Basistunnel [16] definiert.

Die Ausfallwahrscheinlichkeit pro Jahr gilt für den gesamten Spring Tunnel.

| Kategorie        |   | Ausfallwahrscheinlichkeit pro Jahr    | Definition   |
|------------------|---|---------------------------------------|--|
| Häufig           | 6 | ca. 1                                 | Wird häufig auftreten. Gefahr ständig gegenwärtig  |
| Wahrscheinlich   | 5 | $> 8.8 \times 10e-1$                  | Wird mehrmals auftreten. Zu erwarten, dass die Gefahr oft eintritt                                     |
| Gelegentlich     | 4 | $8.8 \times 10e-1 - 8.8 \times 10e-2$ | Kann mehrmals auftreten. Zu erwarten, dass die Gefahr mehrmals auftritt                                |
| Selten           | 3 | $8.8 \times 10e-2 - 8.8 \times 10e-4$ | Kann manchmal während auftreten. Sinnvoll, mit dem Eintreten der Gefahr zu rechnen.                    |
| Unwahrscheinlich | 2 | $8.8 \times 10e-4 - 10e-8$            | Auftreten unwahrscheinlich aber möglich. Anzunehmen, dass diese Gefahr nur in Ausnahmefällen eintritt. |
| Unvorstellbar    | 1 | $< 10e-8$                             | Auftreten extrem unwahrscheinlich. Anzunehmen, dass die Gefahr nicht eintritt.                         |

Tabelle 8: Häufigkeit von Gefahrenfällen

### 2.3.9.2 Definition der Gefahrenstufen

Die Gefahrenstufen werden in Anlehnung an die ÖNORM EN50126 [1] wie folgt definiert:

| Gefahrenstufe | Auswirkung auf den Menschen  |
|---------------|--|
| Verheerend    | 5 Mehrere Unfalltote und zahlreiche Schwerverletzte >20 Todesopfer |
| Katastrophal  | 4 Unfalltote und / oder zahlreiche Schwerverletzte 3-20 Todesopfer |
| Kritisch      | 3 Einzelner Unfalltoter und/oder Schwerverletzter 1-2 Todesopfer   |
| Marginal      | 2 Kleinere Verletzungen, keine Todesopfer                          |
| Unbedeutend   | 1 Mögliche geringfügige Verletzung, keine Todesopfer               |

Tabelle 9: Gefahrenstufen

Die Zahlenwerte der Tabelle 9, in der Spalte Auswirkungen auf den Menschen, werden nicht von der ÖNORM EN50126 [1] vorgegeben. Sie stellen eine subjektive Expertenmeinung dar und können für jede Risikoanalyse frei gewählt werden. Die hier verwendeten Zahlenwerte für zu erwartende Opfer wurden in Anlehnung an die RAMS Analyse der Gotthard Basistunnel [16] definiert.

### 2.3.9.3 Definition der Risikobewertung nach deren Akzeptanz

Die nachfolgende Tabelle 10 zeigt die zugrunde gelegte Risikobewertung für die Akzeptanz der Risiken. Für die Beurteilung der Ausfälle und die Evaluierung der sicherheitsrelevanten Fehlerarten werden die Wahrscheinlichkeit des Eintretens eines Ereignisses quantitativ und die Gefahrenstufen qualitativ bewertet.

|                    |                  |                   |                   |                   |                   |
|--------------------|------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|
| Häufig 6           | unerwünscht      | nicht tolerierbar | nicht tolerierbar | nicht tolerierbar | nicht tolerierbar |
| Wahrscheinlich 5   | tolerabel        | unerwünscht       | nicht tolerierbar | nicht tolerierbar | nicht tolerierbar |
| Gelegentlich 4     | tolerabel        | unerwünscht       | unerwünscht       | nicht tolerierbar | nicht tolerierbar |
| Selten 3           | vernachlässigbar | tolerabel         | unerwünscht       | unerwünscht       | nicht tolerierbar |
| Unwahrscheinlich 2 | vernachlässigbar | vernachlässigbar  | tolerabel         | tolerabel         | unerwünscht       |
| Unvorstellbar 1    | vernachlässigbar | vernachlässigbar  | vernachlässigbar  | vernachlässigbar  | tolerabel         |
|                    | Unbedeutend 1    | Marginal 2        | Kritisch 3        | Katastrophal 4    | Verheerend 5      |

Tabelle 10: Risikobewertung

Welche Kombinationen aus Häufigkeit von Gefahrenfällen und Gefahrenstufen wie bewertet werden wird nicht von der ÖNORM EN50126 [1] vorgeschrieben. Sie stellen eine subjektive

Expertenmeinung dar und können für jede Risikoanalyse frei gewählt werden. Die hier verwendeten Zahlenwerte für zu erwartende Opfer wurden in Anlehnung an die RAMS Analyse der Gotthard Basistunnel [16] definiert.

Maßnahmen zu den Risikostufen aus der Risikobewertung:

- Nicht tolerierbare Risiken:  
Müssen ausgeschlossen werden.
  
- Unerwünschte Risiken:  
Durch bauliche Maßnahmen, System-Design und Schutzeinrichtungen zu vermeiden.  
Dürfen nur akzeptiert werden, wenn eine Risikominderung praktisch nicht durchführbar ist und eine Zustimmung des Tunnelbetreibers und der zuständigen Aufsichtsbehörde vorliegt.
  
- Tolerable Risiken:  
Akzeptierbar bei angemessener Risikobeherrschung durch Überwachung und Instandhaltung und mit Zustimmung des Tunnelbetreibers.
  
- Vernachlässigbare Risiken:  
Akzeptierbar ohne Zustimmung des Tunnelbetreibers.

### 2.3.10 Gefahrenprotokoll (Hazard Log)

Eine der wesentlichen Anforderungen der RAMS Phase 3 besteht im systematischen Erkennen und Einordnen aller unter normalen Umständen vorhersehbaren Gefahren und in der Ermittlung bzw. Abschätzung des Systemrisikos für jede Gefahr. Die Aufgabenstellung besteht in der qualitativen Ermittlung der Auswirkungen, die Ausfälle unterschiedlicher Art von Subsystemen und Komponenten auf ein System haben. Die Vorgehensweise ist induktiv. Induktive Ansätze gehen von der Annahme eines auslösenden Ereignisses (z.B. Versagen einer Komponente) aus und versuchen die Frage nach möglichen Folgen methodisch vorwärtsgerichtet zu beantworten. Das der Bewertung zu Grunde liegende RAMS Modell wurde im Kapitel 2.3.6 beschrieben.

Für die Komponenten des Spring Tunnels wurden im Kapitel 2.3.6 folgende Ausfallsszenarien identifiziert:

- Ausfall der Kopfrechner trotz hundertprozentiger Redundanz
- Ausfall der Mittelspannungsversorgung trotz hundertprozentiger Redundanz
- Ausfall der Niederspannungsversorgung trotz hundertprozentiger Redundanz
- Ausfall der automatischen Branddetektion
- Ausfall der Längsströmungsmessung
- Ausfall der Strahlventilatoren
- Ausfall der Querschlagbelüftung

Diese Ausfallsszenarien werden im Gefahrenprotokoll und nach Gefahrenstufe und Häufigkeit der Gefahrenfälle klassifiziert. Die abgeschätzten Häufigkeiten sind nur im Zusammenhang mit den angegebenen Auswirkungen gültig. Das heißt, die Wahrscheinlichkeit eines Ereignisses muss ebenfalls bei den Häufigkeiten eines Ausfalles der Komponente berücksichtigt werden (Gleichzeitigkeit Ereignis und Ausfall der Komponente). Damit wird für jede Gefahr das Systemrisiko ermittelt und im Gefahrenprotokoll dokumentiert. Die Beurteilung erfolgt qualitativ und stellt eine subjektive Einschätzung dar. Die Bewertungen ergeben sich durch die Kombination der Wahrscheinlichkeit, mit der ein

Komponentenausfall während eines KFZ Brandes auftritt, und den Auswirkungen auf die am Brand beteiligten Personen, die durch den Ausfall der Komponente hervorgerufen wurden.

### 2.3.10.1 Risikobewertung Szenario 1: Ausfall der Kopfrechner

Mögliche Ausfallsursachen die zum Versagen eines oder beider Kopfrechner führen:

Die beiden redundant ausgeführten Kopfrechner sollten an unterschiedlichen Orten in der Tunnelkontrollwarte betrieben werden, um die Wahrscheinlichkeit beide Rechner gleichzeitig zu verlieren geringer zu halten. Wie in Abbildung 10 ersichtlich hängen die beiden Kopfrechner an der ebenfalls redundant ausgeführten Niederspannungsversorgung.

Mögliche Ausfallsursachen, die zum Versagen eines oder beider Kopfrechner führen:

- Ein kompletter Ausfall der Niederspannungsversorgung würde die Funktionsfähigkeit der Kopfrechner verhindern.
- Eine Überschreitung der Höchstzahl an Betriebsstunden kann das System zu einem Ausfall bringen.
- Die Kopfrechner können durch fehlerhafte Software insbesondere durch Updates versagen.
- Eine zu hohe Raumtemperatur, speziell im Sommer, kann die Kopfrechner überhitzen.
- Starke Verschmutzungen im Rechnerinneren können die Lüftung des Rechnergehäuses beeinträchtigen und so ein Systemversagen hervorrufen.

Auswirkungen durch den Ausfall der Kopfrechner:

- Keine Steuerung der Strahlventilatoren
- Keine Steuerung der Querschlagbelüftung
- Keine automatische Branddetektion durch Brandlinienmeldekabel
- Keine Branddetektion durch Verkehrskameras
- Keine Branddetektion durch Notfallknopf, Feuerlöscher Entnahme oder Öffnen der Notfalls Türen.
- Keine Verkehrsbeeinflussung möglich

Mögliche Ausfallserkennung bei Versagen der Kopfrechner:

- Durch das Bedienpersonal
- Durch Überwachungseinrichtungen
- Automatischer Alarm in der übergeordneten Verkehrsleitzentrale

Maßnahmen, um einem Ausfall der Kopfrechner vorzubeugen:

- 100% Redundanz der Kopfrechner
- 100% Redundanz der Stromversorgung
- Kopfrechner nach definierter Anzahl an Betriebsstunden austauschen
- Umfangreiche Prüfung und offline Systemtests nach Software Updates
- Klimatisierung der Räumlichkeiten in denen die Kopfrechner untergebracht sind
- Periodische Wartung bzw. Reinigungsintervalle durchführen

Auswirkung auf den Menschen, Gefahrenstufe (siehe Tabelle 9) und Häufigkeit von Gefahrenfällen (siehe Tabelle 8) beim Ausfall der Kopfrechner für PKW, LKW und Reisebusse im Brandfall:

Auswirkung auf den Menschen:

PKW: Unfalltote und/oder zahlreiche Schwerverletzte

LKW: Unfalltote und/oder zahlreiche Schwerverletzte

Reisebusse: Unfalltote und/oder zahlreiche Schwerverletzte

Gefahrenstufe:

PKW Gefahrenstufe: 4

LKW Gefahrenstufe: 4

Reisebusse Gefahrenstufe: 4

Ausfallswahrscheinlichkeit pro Jahr:  $4,19E - 4$

Das entspricht der Häufigkeit von Gefahrenfällen Stufe 2 unwahrscheinlich. (siehe Tabelle 8)

### 2.3.10.2 Risikobewertung Szenario 2: Ausfall der Mittelspannungsversorgung

Die beiden redundant ausgeführten Mittelspannungsanlagen sind an unterschiedlichen Orten im Tunnel unterzubringen, um die Ausfallswahrscheinlichkeit durch einen Brand oder mechanische Zerstörung gering zu halten.

Mögliche Ausfallsursachen, die zum Versagen einer oder beider Mittelspannungsanlagen führen:

- Ein kompletter Ausfall der Hauptstromversorgung würde die Mittelspannungsversorgung unterbrechen.
- Ungenügende Wartung der Mittelspannungsanlage
- Ein Kurzschluss in der Mittelspannungsanlage

Auswirkungen durch den Ausfall der Mittelspannungsversorgung:

Wie in Abbildung 10 ersichtlich hängen die Strahlventilatoren und die Querschlags Lüftung an der Mittelspannungsversorgung.

- Ein kompletter Ausfall der Mittelspannungsversorgung würde alle Strahlventilatoren stilllegen.
- Ein kompletter Ausfall der Mittelspannungsversorgung würde die Querschlagbelüftung verhindern.

Mögliche Ausfallserkennung bei Versagen der Mittelspannungsversorgung:

- Durch das Bedienpersonal
- Durch Überwachungseinrichtungen
- Durch regelmäßige Kontrolle

Maßnahmen, um einem Ausfall der Mittelspannungsversorgung vorzubeugen:

- 100% Redundanz der Mittelspannungsversorgung.
- Mittelspannungsversorgung nach definierter Anzahl an Betriebsstunden austauschen.
- Periodische Wartung durchführen.
- Durchgehende automatische Überwachung durch Kopfrechner

Auswirkung auf den Menschen, Gefahrenstufe (siehe Tabelle 9) und Häufigkeit von Gefahrenfällen (siehe Tabelle 8) beim Ausfall der Kopfrechner für PKW, LKW und Reisebusse im Brandfall:

Auswirkung auf den Menschen:

PKW: Unfalltote und/oder zahlreiche Schwerverletzte

LKW: Unfalltote und/oder zahlreiche Schwerverletzte

Reisebusse: Unfalltote und/oder zahlreiche Schwerverletzte

Gefahrenstufe:

PKW Gefahrenstufe: 4

LKW Gefahrenstufe: 4

Reisebusse Gefahrenstufe: 4

Ausfallswahrscheinlichkeit pro Jahr:  $2,59E - 5$

Das entspricht der Häufigkeit von Gefahrenfällen Stufe 2 unwahrscheinlich. (siehe Tabelle 8)

### 2.3.10.3 Risikobewertung Szenario 3: Ausfall der Niederspannungsversorgung

Die beiden redundant ausgeführten Niederspannungsanlagen sind an unterschiedlichen Orten im Tunnel unterzubringen, um die Ausfallswahrscheinlichkeit durch einen Brand oder mechanische Zerstörung gering zu halten.

Mögliche Ausfallsursachen, die zum Versagen einer oder beider Niederspannungsanlagen führen:

- Ein kompletter Ausfall der Hauptstromversorgung würde die Niederspannungsanlagen unterbrechen.
- Ungenügende Wartung der Niederspannungsanlagen
- Ein Kurzschluss in der Niederspannungsanlagen

Auswirkungen durch den Ausfall der Niederspannungsanlagen:

Wie in Abbildung 10 ersichtlich hängen die Strahlventilatoren und die Querschlags Lüftung an der Niederspannungsversorgung.

- Ein kompletter Ausfall der Niederspannungsversorgung würde die Kopfrechner stilllegen.
- Ein kompletter Ausfall der Niederspannungsversorgung würde die automatische Branddetektion verhindern.
- Ein kompletter Ausfall der Niederspannungsversorgung würde keine Verkehrsbeeinflussung zulassen.
- Ein kompletter Ausfall der Niederspannungsversorgung würde Längsströmungsmessung verhindern.

Mögliche Ausfallserkennung bei Versagen der Niederspannungsversorgung:

- Durch das Bedienpersonal
- Durch Überwachungseinrichtungen
- Durch regelmäßige Kontrolle

Maßnahmen, um einem Ausfall der Niederspannungsversorgung vorzubeugen:

- 100% Redundanz der Niederspannungsversorgung.
- Niederspannungsversorgung nach definierter Anzahl an Betriebsstunden austauschen.
- Periodische Wartung durchführen.
- Durchgehende automatische Überwachung durch Kopfrechner

Auswirkung auf den Menschen, Gefahrenstufe (siehe Tabelle 9) und Häufigkeit von Gefahrenfällen (siehe Tabelle 8) beim Ausfall der Kopfrechner für PKW, LKW und Reisebusse im Brandfall:

Auswirkung auf den Menschen:

PKW: Unfalltote und/oder zahlreiche Schwerverletzte  
LKW: Unfalltote und/oder zahlreiche Schwerverletzte  
Reisebusse: Unfalltote und/oder zahlreiche Schwerverletzte

Gefahrenstufe:

PKW Gefahrenstufe: 4  
LKW Gefahrenstufe: 4  
Reisebusse Gefahrenstufe: 4

Ausfallswahrscheinlichkeit pro Jahr:  $3,5E - 5$

Das entspricht der Häufigkeit von Gefahrenfällen Stufe 2 unwahrscheinlich. (siehe Tabelle 8)

#### 2.3.10.4 Risikobewertung Szenario 4: Ausfall der automatischen Branddetektion

Das Brandlinienmeldekabel ist an der Tunneldecke angebracht.

Mögliche Ausfallsursachen die zum Versagen einer oder beider Brandlinienmeldekabel führen:

- Ein kompletter Ausfall der Niederspannungsversorgung würde die Brandlinienmeldekabel ausfallen lassen.
- Ein kompletter Ausfall der Mittelspannungsversorgung würde die Brandlinienmeldekabel ausfallen lassen.
- Ein kompletter Ausfall der Hauptspannungsversorgung würde die Brandlinienmeldekabel ausfallen lassen.
- Überschreitung der maximalen Betriebsstunden
- Ein Kurzschluss im Brandlinienmeldekabel
- Mechanische Zerstörung durch flatternde Planen auf LKW Anhängern

Auswirkungen durch den Ausfall der automatischen Branddetektion:

- Ein kompletter Ausfall der automatischen Branddetektion würde die Zeit bis zur Branddetektion erhöhen.
- Ein kompletter Ausfall der automatischen Branddetektion würde die Zeit bis zum Bestimmen des exakten Brandortes erhöhen.

Mögliche Ausfallserkennung bei Versagen der automatischen Branddetektion:

- Durch Überwachungseinrichtungen
- Durch regelmäßige Kontrolle

Maßnahmen, um einem Ausfall der automatischen Branddetektion vorzubeugen:

- 100% Redundanz der Mittelspannungsversorgung
- 100% Redundanz der Niederspannungsversorgung
- Brandlinienmeldekabel nach definierter Anzahl an Betriebsstunden austauschen
- Periodische Kontrollen durchführen
- Durchgehende automatische Überwachung durch Kopfrechner

Auswirkung auf den Menschen, Gefahrenstufe (siehe Tabelle 9) und Häufigkeit von Gefahrenfällen (siehe Tabelle 8) beim Ausfall der Kopfrechner für PKW, LKW und Reisebusse im Brandfall:

Auswirkung auf den Menschen:

PKW: Kleinere Verletzungen

LKW: Einzelner Unfalltoter und/oder Schwerverletzter

Reisebusse: Unfalltote und/oder zahlreiche Schwerverletzte

Gefahrenstufe:

PKW Gefahrenstufe: 2

LKW Gefahrenstufe: 3

Reisebusse Gefahrenstufe: 4

Ausfallswahrscheinlichkeit pro Jahr:  $3,03 \cdot 10^{-2}$

Das entspricht der Häufigkeit von Gefahrenfällen Stufe 2 unwahrscheinlich. (siehe Tabelle 8)

### 2.3.10.5 Risikobewertung Szenario 5: Ausfall der Längsströmungsmessung

Die Längsströmungsmessgeräte sind an unterschiedlichen Orten im Tunnel untergebracht was die Ausfallswahrscheinlichkeit durch einen Brand oder mechanische Zerstörung gering hält.

Mögliche Ausfallsursachen die zum Versagen einzelner oder aller Längsströmungsmessgeräte führen:

- Ein kompletter Ausfall der Niederspannungsversorgung würde die Längsströmungsmessung unterbrechen.
- Ein kompletter Ausfall der Mittelspannungsversorgung würde die Längsströmungsmessung unterbrechen.
- Ein kompletter Ausfall der Hauptspannungsversorgung würde die Längsströmungsmessung unterbrechen.
- Ungenügende Wartung der Längsströmungsmessgeräte
- Ein Kurzschluss im Längsströmungsmessgerät
- Überschreitung der maximalen Betriebsstunden

Auswirkungen durch den Ausfall der Längsströmungsmessung:

- Ein kompletter Ausfall der Längsströmungsmessung würde die gezielte Regelung der Lüftungsgeschwindigkeit durch die Strahlventilatoren unmöglich machen.

Mögliche Ausfallserkennung bei Versagen der Längsströmungsmessung:

- Durch Überwachungseinrichtungen
- Durch regelmäßige Kontrolle

Maßnahmen, um einem Ausfall der Längsströmungsmessung vorzubeugen:

- Mehr Längsströmungsmessgeräte verbauen als mindestens notwendig
- Längsströmungsmessgeräte nach definierter Anzahl an Betriebsstunden austauschen
- 100% Redundanz der Mittelspannungsversorgung
- 100% Redundanz der Niederspannungsversorgung
- Periodische Wartung durchführen
- Durchgehende automatische Überwachung durch die Kopfrechner
- Periodische Plausibilitätschecks durch die Kopfrechner

Auswirkung auf den Menschen, Gefahrenstufe (siehe Tabelle 9) und Häufigkeit von Gefahrenfällen (siehe Tabelle 8) beim Ausfall der Kopfrechner für PKW, LKW und Reisebusse im Brandfall:

Auswirkung auf den Menschen:

PKW: Einzelner Unfalltoter und/oder Schwerverletzter

LKW: Unfalltote und/oder zahlreiche Schwerverletzte

Reisebusse: Unfalltote und/oder zahlreiche Schwerverletzte

Gefahrenstufe:

PKW Gefahrenstufe: 3

LKW Gefahrenstufe: 4

Reisebusse Gefahrenstufe: 4

Ausfallswahrscheinlichkeit pro Jahr:  $3,5E - 5$

Das entspricht der Häufigkeit von Gefahrenfällen Stufe 2 unwahrscheinlich. (siehe Tabelle 8)

### 2.3.10.6 Risikobewertung Szenario 6: Ausfall der Strahlventilatoren

Mögliche Ausfallsursachen die zum Versagen eines oder aller Strahlventilatoren führen:

Die Strahlventilatoren sind an unterschiedlichen Orten im Tunnel angebracht was Ausfallswahrscheinlichkeit aller Strahlventilatoren durch einen Brand oder mechanische Zerstörung gering hält. Wie in Abbildung 10 ersichtlich hängen alle Strahlventilatoren an der redundant ausgeführten Mittelspannungsversorgung.

- Ein kompletter Ausfall der Mittelspannungsversorgung würde die Funktionsfähigkeit aller Strahlventilatoren verhindern.
- Überschreitung der maximalen Betriebsstunden
- Ungenügende Wartung des Strahlventilators
- Ein Kurzschluss im Strahlventilator
- Mechanische Zerstörung

Auswirkungen durch den Ausfall der Strahlventilatoren:

- Keine Tunnelbelüftung
- Keine Tunnelentlüftung
- Die Selbstrettungsmöglichkeiten der Unfallopfer werden extrem eingeschränkt.
- Die Fremdrettung wird extrem erschwert.
- Hohes Unfallrisiko anderer Verkehrsteilnehmer durch schlechte Sicht
- Keine Übersicht vom Unfallgeschehen durch Verkehrskameras

Mögliche Ausfallserkennung bei Versagen eines Strahlventilators:

- Durch Überwachungseinrichtungen
- Durch regelmäßige Kontrolle

Maßnahmen, um einem Ausfall der Strahlventilatoren vorzubeugen:

- Verbau von mehr Strahlventilatoren als mindestens notwendig.
- 100% Redundanz der Mittelspannungsversorgung.
- Strahlventilatoren nach definierter Anzahl an Betriebsstunden austauschen.
- Durchgehende periodische Überwachung durch Kopfrechner.
- Periodische Wartung durchführen.

Auswirkung auf den Menschen, Gefahrenstufe (siehe Tabelle 9) und Häufigkeit von Gefahrenfällen (siehe Tabelle 8) beim Ausfall der Kopfrechner für PKW, LKW und Reisebusse im Brandfall:

Auswirkung auf den Menschen:

PKW: Einzelner Unfalltoter und/oder Schwerverletzter

LKW: Unfalltote und/oder zahlreiche Schwerverletzte

Reisebusse: Unfalltote und/oder zahlreiche Schwerverletzte

Gefahrenstufe:

PKW Gefahrenstufe: 3

LKW Gefahrenstufe: 4

Reisebusse Gefahrenstufe: 4

Ausfallswahrscheinlichkeit pro Jahr: 2

Das entspricht der Häufigkeit von Gefahrenfällen Stufe 6 häufig. (siehe Tabelle 8)

### 2.3.10.7 Risikobewertung Szenario 7: Ausfall der Querschlagbelüftung

Mögliche Ausfallsursachen die zum Versagen der Querschlagbelüftung führen:

Wie in Abbildung 10 ersichtlich hängt die Querschlagbelüftung an der redundant ausgeführten Mittelspannungsversorgung und der Steuerung durch die Kopfrechner.

- Ein kompletter Ausfall der Hauptstromversorgung würde die Querschlagbelüftung verhindern.
- Ein kompletter Ausfall der Mittelspannungsversorgung würde die Querschlagbelüftung verhindern.
- Ein kompletter Ausfall der Niederspannungsversorgung würde die Steuerung der Querschlagbelüftung durch die Kopfrechner verhindern.
- Ein kompletter Ausfall der Kopfrechner würde die Steuerung der Querschlagbelüftung verhindern.
- Überschreitung der maximalen Betriebsstunden.
- Ungenügende Wartung der Querschlagbelüftung.
- Ein Kurzschluss in der Querschlagbelüftung.
- Mechanische Zerstörung.

Auswirkungen durch den Ausfall der Querschlagbelüftung:

- Keine Belüftung in den Querschlägen
- Keine Entlüftung in den Querschlägen
- Die Selbstrettungsmöglichkeiten der Unfallopfer werden eingeschränkt.

Mögliche Ausfallserkennung bei der Querschlagbelüftung:

- Durchgehende periodische Tests
- Durch regelmäßige Kontrolle

Maßnahmen, um einem Ausfall der Querschlagbelüftung vorzubeugen:

- 100% Redundanz der Mittelspannungsversorgung.
- 100% Redundanz der Niederspannungsversorgung.
- 100% Redundanz der Kopfrechner.
- Querschlagbelüftung nach definierter Anzahl an Betriebsstunden austauschen.
- Durchgehende periodische Überwachung durch die Kopfrechner.
- Periodische Wartung durchführen.

Auswirkung auf den Menschen, Gefahrenstufe (siehe Tabelle 9) und Häufigkeit von Gefahrenfällen (siehe Tabelle 8) beim Ausfall der Kopfrechner für PKW, LKW und Reisebusse im Brandfall:

Auswirkung auf den Menschen:

PKW: Kleinere Verletzungen

LKW: Kleinere Verletzungen

Reisebusse: Kleinere Verletzungen

Gefahrenstufe:

PKW Gefahrenstufe: 2

LKW Gefahrenstufe: 2

Reisebusse Gefahrenstufe: 2

Ausfallswahrscheinlichkeit pro Jahr:  $3,38E-2$

Das entspricht der Häufigkeit von Gefahrenfällen Stufe 3 selten. (siehe Tabelle 8)

### 2.3.11 Berechnung der Ausfallshäufigkeit des Gesamtsystem Tunnellüftung im Spring Tunnel

Die Summe aller Ausfallshäufigkeiten der einzelnen Komponenten ergibt die Ausfallshäufigkeit des Gesamtsystem Tunnellüftung.

| Szenario | Ausfall                   | Ausfallshäufigkeit pro Jahr |
|----------|---------------------------|-----------------------------|
| 1        | Kopfrechner               | 4,19E-04                    |
| 2        | Mittelspannungsversorgung | 2,59E-05                    |
| 3        | Niederspannungsversorgung | 3,50E-05                    |
| 4        | Autom. Branddetektion     | 3,03E-02                    |
| 5        | Längsströmungsmessung     | 3,50E-05                    |
| 6        | Strahlventilatoren        | 2,00E+00                    |
| 7        | Querschlags Belüftung     | 3,38E-02                    |
| alle     | Summe                     | 2,06E+00                    |

Tabelle 11: Summe Ausfallshäufigkeit pro Jahr

Die Summe der einzelnen Ausfallswahrscheinlichkeiten aller Systemkomponenten pro Jahr beträgt: 2,06 pro Jahr. Es werden 2,06 Komponenten im Jahr ausfallen. An dieser Stelle sieht man, dass die nicht redundant ausgeführten Strahlventilatoren das Gesamtergebnis massiv verschlechtern. Die RAMS Risikoanalyse nach EN 50126 kennt für eine Komponente nur zwei Zustände. Entweder funktioniert sie oder sie funktioniert nicht. Im Fall der 12 Strahlventilatoren müssen alle 12 Stück zur selben Zeit verfügbar sein, um die an sie gestellten Betriebsanforderungen zu erfüllen. Da bei einem PKW Brand nicht alle 12 Strahlventilatoren benötigt werden, könnte man in einer weiteren Risikoanalyse mit einer geringeren Anzahl verfügbarer Strahlventilatoren trotzdem zu einem akzeptablen Restrisiko kommen. Die Eintrittswahrscheinlichkeit von 2 Ausfällen pro Jahr ist, wie in Tabelle 12 dargestellt, aber auch für einen möglichen LKW- oder Reisebus- Brand, nicht akzeptabel. Im Szenario 6 wurden für die Häufigkeit des Gefahrenfalles die Stufe 6 häufig und für die Gefahrenstufen PKW 3 kritisch, LKW 4 katastrophal und Reisebus 4 katastrophal ermittelt. Werden nun die Häufigkeit des Gefahrenfalles und die Gefahrenstufe in die Risikobewertungsmatrix eingetragen, ergibt sich in Tabelle 12 folgendes Bild:

|                    |                  | PKW               |                   | LKW,<br>Reisebus  |                   |
|--------------------|------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|
| Häufig 6           | unerwünscht      | nicht tolerierbar | nicht tolerierbar | nicht tolerierbar | nicht tolerierbar |
| Wahrscheinlich 5   | tolerabel        | unerwünscht       | nicht tolerierbar | nicht tolerierbar | nicht tolerierbar |
| Gelegentlich 4     | tolerabel        | unerwünscht       | unerwünscht       | nicht tolerierbar | nicht tolerierbar |
| Selten 3           | vernachlässigbar | tolerabel         | unerwünscht       | unerwünscht       | nicht tolerierbar |
| Unwahrscheinlich 2 | vernachlässigbar | vernachlässigbar  | tolerabel         | tolerabel         | unerwünscht       |
| Unvorstellbar 1    | vernachlässigbar | vernachlässigbar  | vernachlässigbar  | vernachlässigbar  | tolerabel         |
|                    | Unbedeutend 1    | Marginal 2        | Kritisch 3        | Katastrophal 4    | Verheerend 5      |

Tabelle 12: Risikobewertungsmatrix

Nicht tolerierbare Risiken müssen ausgeschlossen werden. Daher wird für den folgenden Abschnitt der Risikoanalyse ein weiterer Strahlventilator als Redundanz angenommen. Für die volle Erfüllung der Betriebsanforderung müssen 12/13 Strahlventilatoren funktionieren.

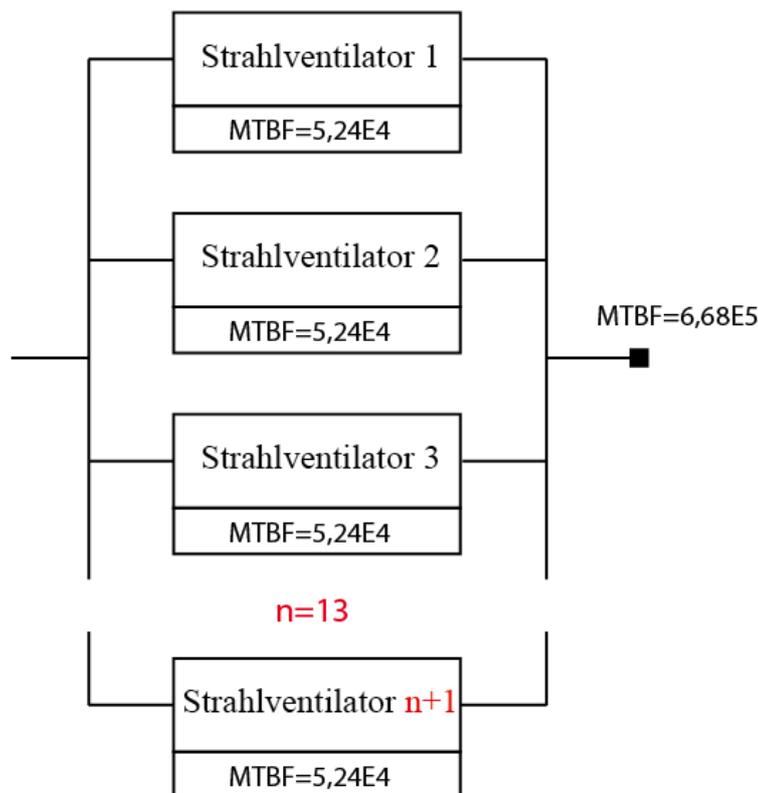


Abbildung 31: Aufbau Strahlventilatoren mit Redundanz 12/13

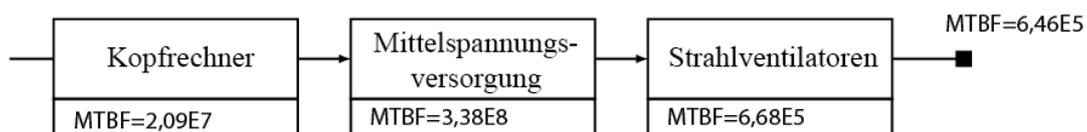


Abbildung 32: Systemkomponentenabhängigkeit der Strahlventilatoren mit Redundanz

Der neue MTBF Wert für den Ausfall der Strahlventilatoren mit Redundanz beträgt  $6,46E5$  Stunden. Das entspricht 73,8 Jahren. Die Ausfallwahrscheinlichkeit pro Jahr beträgt:

$$\text{Ausfallwahrscheinlichkeit} = \frac{1}{73,8} = 1,36E - 2$$

Das entspricht der Häufigkeit von Gefahrenfällen Stufe 3 selten. (siehe Tabelle 8)

### 2.3.12 Berechnung der Ausfallshäufigkeit des Gesamtsystem Tunnellüftung im Spering Tunnel mit der Annahme eines 13. Strahlventilators

Tabelle 13 zeigt die Ausfallshäufigkeiten der einzelnen Komponenten und gibt die gesamte Ausfallshäufigkeit des Gesamtsystem Tunnellüftung an.

| Szenario | Ausfall                   | Ausfallshäufigkeit pro Jahr |
|----------|---------------------------|-----------------------------|
| 1        | Kopfrechner               | 4,19E-04                    |
| 2        | Mittelspannungsversorgung | 2,59E-05                    |
| 3        | Niederspannungsversorgung | 3,50E-05                    |
| 4        | Autom. Branddetektion     | 3,03E-02                    |
| 5        | Längsströmungsmessung     | 3,50E-05                    |
| 6        | Strahlventilatoren        | 1,36E-02                    |
| 7        | Querschlags Belüftung     | 3,38E-02                    |
| alle     | Summe                     | 7,82E-02                    |

Tabelle 13: Summe Ausfallshäufigkeit pro Jahr neu

Die Summe der einzelnen Ausfallwahrscheinlichkeiten aller Systemkomponenten pro Jahr beträgt: 7,82E-2. Es wird zu 7,8% eine Komponente im Jahr ausfallen. Daraus ergibt sich im Umkehrschluss die Wahrscheinlichkeit, dass das gesamte System voll verfügbar ist als Funktionswahrscheinlichkeit und beträgt: 9,22E-1 das entspricht 92,2%.

### 2.3.13 Prognostiziertes Verkehrsaufkommen Tunnel Spering

Die Risikoanalyse A9 - Spering Tunnel [9] berücksichtigt die für das Jahr 2019 prognostizierten Anteile von PKW, LKW und Bussen am Verkehrsaufkommen:

PKW: 82%                      LKW: 15,3%                      Busse: 2,7%

Prognostizierte Verkehrsstärke JDTV (jährlich durchschnittlicher täglicher Verkehr) für das Jahr 2019: 20.329 Kfz/24h Tunnellänge Oströhre: 2894 m

Der Basiswert der Pannenrate im Tunnel beträgt: 2,372 Pannen/1Mio. Kfz-km.

Der Basiswert der Unfallrate für Richtungsverkehrstunnel beträgt: 0,112 UPS/1Mio. Kfz-km (Unfälle mit Personenschaden) Quelle: [11] Seite 7 Unfälle ohne Personenschaden werden in der Kategorie Pannen geführt.

#### 2.3.13.1 Berechnung der Ereigniswahrscheinlichkeit eines Fahrzeugbrandes im Spering Tunnel

Die Ereigniswahrscheinlichkeit Pannen (EWP) pro Jahr errechnet sich aus der prognostizierten Verkehrsstärke JDTV, der Tunnellänge und dem Basiswert der Pannenrate.

$$EWP = \frac{20329 * 365 * 2,372}{1000000} = 21,47$$

Die Ereigniswahrscheinlichkeit Unfall (EWU) pro Jahr errechnet sich aus der prognostizierten Verkehrsstärke JDTV, der Tunnellänge und dem Basiswert der Unfallrate.

$$EWU = \frac{20329 * 365 * 0,112}{1000000} = 0,831$$

Der Folgebrandanteil bei Pannen im Tunnel beträgt 1,19%

Der Folgebrandanteil bei Alleinunfällen im Tunnel beträgt 2,3%

Der Folgebrandanteil bei Unfällen im Richtungsverkehr im Tunnel beträgt 0,5%

Quelle: [11] Seite 12

Die Ereigniswahrscheinlichkeit Panne mit anschließendem Fahrzeugbrand (EWPB) pro Jahr errechnet sich aus die Ereigniswahrscheinlichkeit Panne und dem Folgebrandanteil bei Pannen von 1,19%

$$EWPB = 21,47 * 0,0119 = 0,2555$$

Die Ereigniswahrscheinlichkeit Unfall mit anschließendem Fahrzeugbrand (EWUB) pro Jahr errechnet sich aus Ereigniswahrscheinlichkeit Unfall, dem Folgebrandanteil bei Alleinunfällen und dem Folgebrandanteil bei Unfällen im Richtungsverkehr.

$$EWUB = 0,831 * (0,023 + 0,005) = 0,0233$$

Die Ereigniswahrscheinlichkeit für einen Brand (EWB) im Spering Tunnel pro Jahr ist die Summe der Ereigniswahrscheinlichkeiten aus Panne mit anschließendem Fahrzeugbrand und Unfall mit Folgebrand.

$$EWB = 0,256 + 0,0233 = 0,2788$$

$$EWB=2,79E-1$$

### 2.3.13.2 Zuordnung der Gefahrenstufe auf die verschiedenen Ausfallszenarien

Mittels Ereignisbaumanalyse wurden die Wahrscheinlichkeiten der verschiedenen Ereignisse berechnet. Die Ereignisbaumanalyse unterscheidet nach der Art des Verkehrsteilnehmers.

In Abbildung 33 wird der Ereignisbaum für den Brand eines PKW im Spering Tunnel dargestellt:

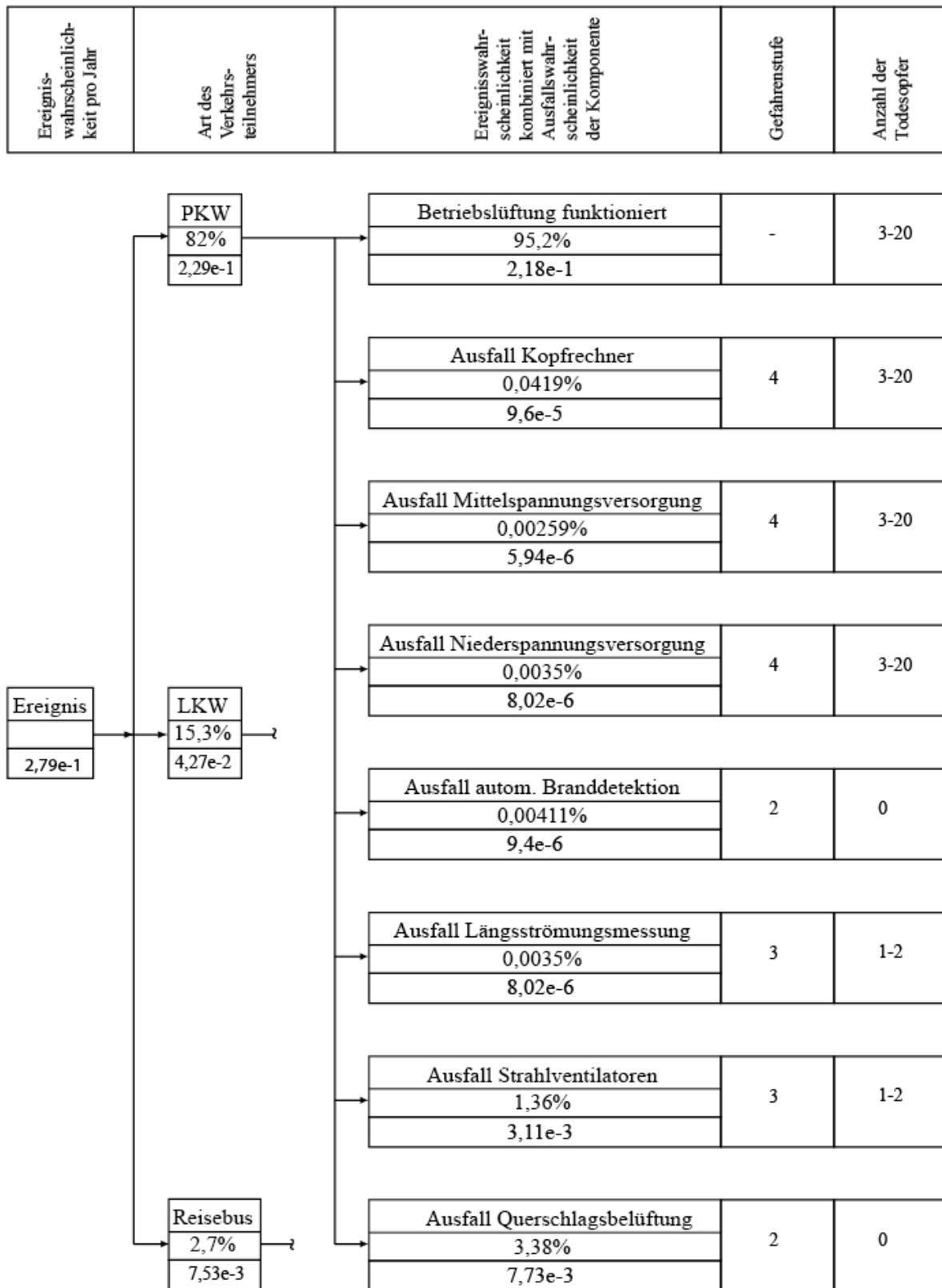


Abbildung 33: Ereignisbaumanalyse für PKW

Tabelle 14 zeigt die Beurteilungen der Ausfallszenarien bei einem PKW-Brand im Spring Tunnel.

| Risikobewertung nach EN50126  |                  |          |                  |                   |                   |                   |                   |
|-------------------------------|------------------|----------|------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|
| Häufigkeit von Gefahrenfällen |                  |          | Risikostufen     |                   |                   |                   |                   |
| 6                             | häufig           |          | unerwünscht      | nicht tolerierbar | nicht tolerierbar | nicht tolerierbar | nicht tolerierbar |
|                               |                  | Anzahl   |                  |                   |                   |                   |                   |
|                               |                  | Szenario |                  |                   |                   |                   |                   |
| 5                             | wahrscheinlich   |          | tolerierbar      | unerwünscht       | nicht tolerierbar | nicht tolerierbar | nicht tolerierbar |
|                               |                  | Anzahl   |                  |                   |                   |                   |                   |
|                               |                  | Szenario |                  |                   |                   |                   |                   |
| 4                             | gelegentlich     |          | tolerierbar      | unerwünscht       | unerwünscht       | nicht tolerierbar | nicht tolerierbar |
|                               |                  | Anzahl   |                  |                   |                   |                   |                   |
|                               |                  | Szenario |                  |                   |                   |                   |                   |
| 3                             | selten           |          | vernachlässigbar | tolerierbar       | unerwünscht       | unerwünscht       | nicht tolerierbar |
|                               |                  | Anzahl   |                  | 1                 | 1                 |                   |                   |
|                               |                  | Szenario |                  | S7                | S6                |                   |                   |
| 2                             | unwahrscheinlich |          | vernachlässigbar | vernachlässigbar  | tolerierbar       | tolerierbar       | unerwünscht       |
|                               |                  | Anzahl   |                  | 1                 | 1                 | 3                 |                   |
|                               |                  | Szenario |                  | S4                | S5                | S1,S2,S3          |                   |
| 1                             | unvorstellbar    |          | vernachlässigbar | vernachlässigbar  | vernachlässigbar  | vernachlässigbar  | tolerierbar       |
|                               |                  | Anzahl   |                  |                   |                   |                   |                   |
|                               |                  | Szenario |                  |                   |                   |                   |                   |
|                               |                  |          | unbedeutend      | marginal          | kritisch          | katastrophal      | verheerend        |
|                               |                  |          | 1                | 2                 | 3                 | 4                 | 5                 |
|                               |                  |          | Gefahrenstufen   |                   |                   |                   |                   |

Tabelle 14: Risikobewertung für das Ereignis PKW- Brand im Spring Tunnel

Legende:

- Szenario S1: Ausfall der Kopfrechner
- Szenario S2: Ausfall der Mittelspannungsversorgung
- Szenario S3: Ausfall der Niederspannungsversorgung
- Szenario S4: Ausfall der automatischen Branddetektion
- Szenario S5: Ausfall der Längsströmungsmessung
- Szenario S6: Ausfall der Strahlventilatoren
- Szenario S7: Ausfall der Querschlagbelüftung

In Tabelle 15 wird die Anzahl Subsysteme, die in den Kategorien „vernachlässigbar“, „tolerabel“, „unerwünscht“ und „nicht tolerabel“ identifiziert wurden, zusammengefasst.

|        | vernachlässigbar | tolerabel | unerwünscht | nicht tolerabel |
|--------|------------------|-----------|-------------|-----------------|
| Anzahl | 1                | 5         | 1           | 0               |

Tabelle 15: Anzahl der Komponenten je Gefahrenstufe für das Ereignis PKW- Brand im Spring Tunnel

| Kat.5                     | Mehrere Unfalltote und zahlreiche Schwerverletzte | ID | Komponente und Brandfall                        | Gefahrenstufe | Gefahrenhäufigkeit | Ausfallswahrscheinlichkeit pro Jahr | $\lambda$ [1/h] | $\lambda$ [1/h] redundant | PKW Brand Wahrscheinlichkeit [1/a] | Risiko-bewertung   |
|---------------------------|---|----|---|---------------|--------------------|-------------------------------------|-----------------|---------------------------|------------------------------------|--------------------|
|                           |   | -  | -   |               |                    |                                     |                 |                           |                                    |                    |
| Kat.4                     | Unfalltote und/oder zahlreiche Schwerverletzte    | ID | Komponente und Brandfall                        | Gefahrenstufe | Gefahrenhäufigkeit | Ausfallswahrscheinlichkeit pro Jahr | $\lambda$ [1/h] | $\lambda$ [1/h] redundant | PKW Brand Wahrscheinlichkeit [1/a] | Risiko-beurteilung |
|                           |   | S1 | Ausfall eines Kopfrechner                       | -             | 3                  | 5,62E-02                            | 2,80E-05        |                           | 2,29E-01                           | verna.             |
|                           |   | S1 | Ausfall der Kopfrechner (1 von 2)               | 4             | 2                  | 9,60E-05                            |                 | 4,78E-08                  | 2,29E-01                           | toler.             |
|                           |   | S2 | Ausfall einer Mittelspannungsanlage             | -             | 3                  | 1,43E-02                            | 7,14E-06        |                           | 2,29E-01                           | verna.             |
|                           |   | S2 | Ausfall der Mittelspannungsversorgung (1 von 2) | 4             | 2                  | 5,94E-06                            |                 | 2,96E-09                  | 2,29E-01                           | toler.             |
|                           |   | S3 | Ausfall einer Niederspannungsanlage             | -             | 3                  | 8,50E-03                            | 4,24E-06        |                           | 2,29E-01                           | verna.             |
|                           |   | S3 | Ausfall der Niederspannungsversorgung (1 von 2) | 4             | 2                  | 8,02E-06                            |                 | 4,00E-09                  | 2,29E-01                           | toler.             |
| Summe der Gefahrenstufe 4 |   |    |   | 4             |                    | 1,10E-04                            |                 |                           |                                    |                    |
| Kat.3                     | Einzelner Unfalltoter und/oder Schwerverletzter   | ID | Komponente und Brandfall                        | Gefahrenstufe | Gefahrenhäufigkeit | Ausfallswahrscheinlichkeit pro Jahr | $\lambda$ [1/h] | $\lambda$ [1/h] redundant | PKW Brand Wahrscheinlichkeit [1/a] | Risiko-beurteilung |
|                           |   | S5 | Ausfall eines Längsströmungsmessgeräts          | -             | 3                  | 5,80E-02                            | 2,89E-05        |                           | 2,29E-01                           | verna.             |
|                           |   | S5 | Ausfall der Längsströmungsmessung (1 von 5)     | 3             | 2                  | 8,02E-06                            |                 | 4,00E-09                  | 2,29E-01                           | toler.             |
|                           |   | S6 | Ausfall eines Strahlventilators                 | -             | 3                  | 3,83E-02                            | 1,91E-05        |                           | 2,29E-01                           | verna.             |
|                           |   | S6 | Ausfall der Strahlventilatoren (12 von 13)      | 3             | 3                  | 3,11E-03                            |                 | 1,55E-06                  | 2,29E-01                           | unerw.             |
| Summe der Gefahrenstufe 3 |   |    |   | 3             |                    | 3,11E-03                            |                 |                           |                                    |                    |

Tabelle 16: Ausfallwahrscheinlichkeiten pro Jahr für die Ausmaßkategorien 3, 4 und 5 bei einem PKW- Brand im Spring Tunnel

Alle Szenarien, bei deren Eintritt mit Todesopfern zu rechnen ist, werden entsprechend ihrer Gefahrenstufen zusammengefasst. Aus Tabelle 16 können die Gefahrenstufen und Häufigkeiten für die einzelnen Szenarien sowie die Summen der Störungen entnommen werden.

Die Summe der Störungen in der Gefahrenstufe 3 (Einzelner Unfalltoter und/oder Schwerverletzter) ergibt eine Wahrscheinlichkeit von  $3,11E - 3$  pro Jahr.

Die Summe der Störungen in der Gefahrenstufe 4 (Unfalltote und/oder zahlreiche Schwerverletzten) ergibt eine Wahrscheinlichkeit von  $1,1E - 4$  pro Jahr.

### 2.3.13.3 Überprüfung der Ergebnisse gemäß Akzeptanzlinie

Ermittlung der Akzeptanzlinie zur Bestimmung des maximal akzeptierten Schadensausmaßes pro Jahr. Entsprechend der Risikoanalyse A9 - Spring Tunnel [9] ergibt sich aus dem errechneten Wert „R“ gem. RVS eine Einteilung in die Gefährdungskategorie III.

Die Gefährdungskategorie III erlaubt laut RVS 09.02.31 [10] eine Obergrenze für den Risikoäquivalenzwert R von 0,5. Der Risikoäquivalentwert R entspricht dem Risikoerwartungswert (statistisch erwartbare Tote /Jahr) des untersuchten Tunnels bezogen auf ein Jahr.

In der Abbildung 34 ist die Akzeptanzlinien, die nach der RVS 09.02.31 [10] entwickelt wurde, dargestellt. Die einzelnen Szenarien, welche zu einem Ausmaß mit Todesopfern führen, sind gemäß Vorgabe von RAMS als Punkte in der Mitte der Gefahrenstufe aufgeführt. Es wird davon ausgegangen, dass die Verteilung der Wahrscheinlichkeit in einer Gefahrenstufe die gleiche Steigung wie die Akzeptanzlinie hat. Der Punkt in der Mitte der Gefahrenstufe steht repräsentativ für die gesamte Gefahrenstufe. Nicht nur die Einzelereignisse alleine müssen unterhalb der Akzeptanzlinie sein, sondern auch die Summe aller Ereignisse einer Gefahrenstufe.

Werden diese Ergebnisse in dem Wahrscheinlichkeits- Ausmaßdiagramm Diagramm dargestellt, ergibt sich folgendes Bild:

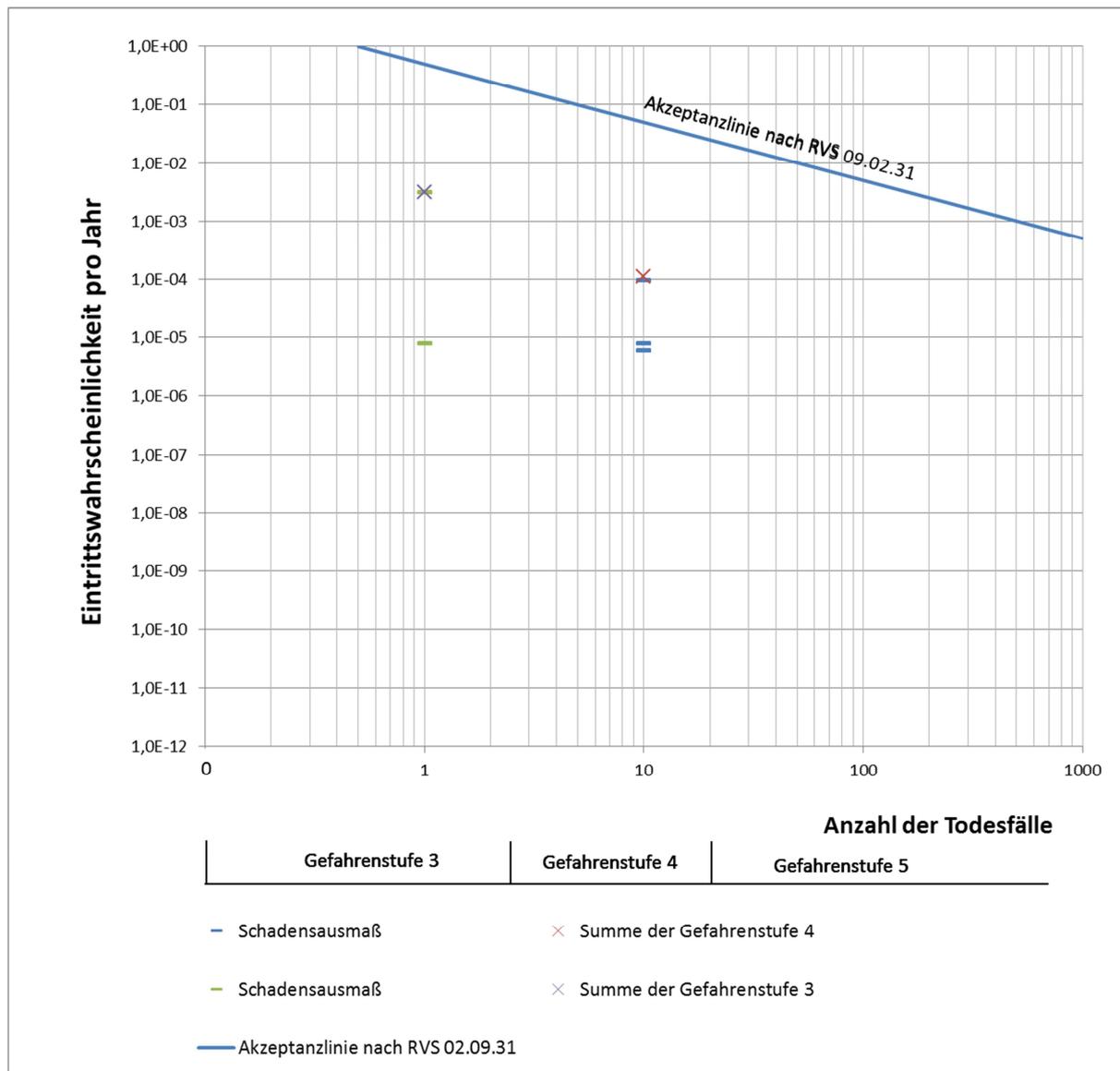


Abbildung 34: Akzeptanzlinie PKW- Brand im Sperring Tunnel

In Abbildung 34 erkennt man, dass alle Szenarien und die Summen der einzelnen Gefahrenstufen sich unterhalb der Akzeptanzlinie befinden.

Ereignisbaumanalyse LKW:

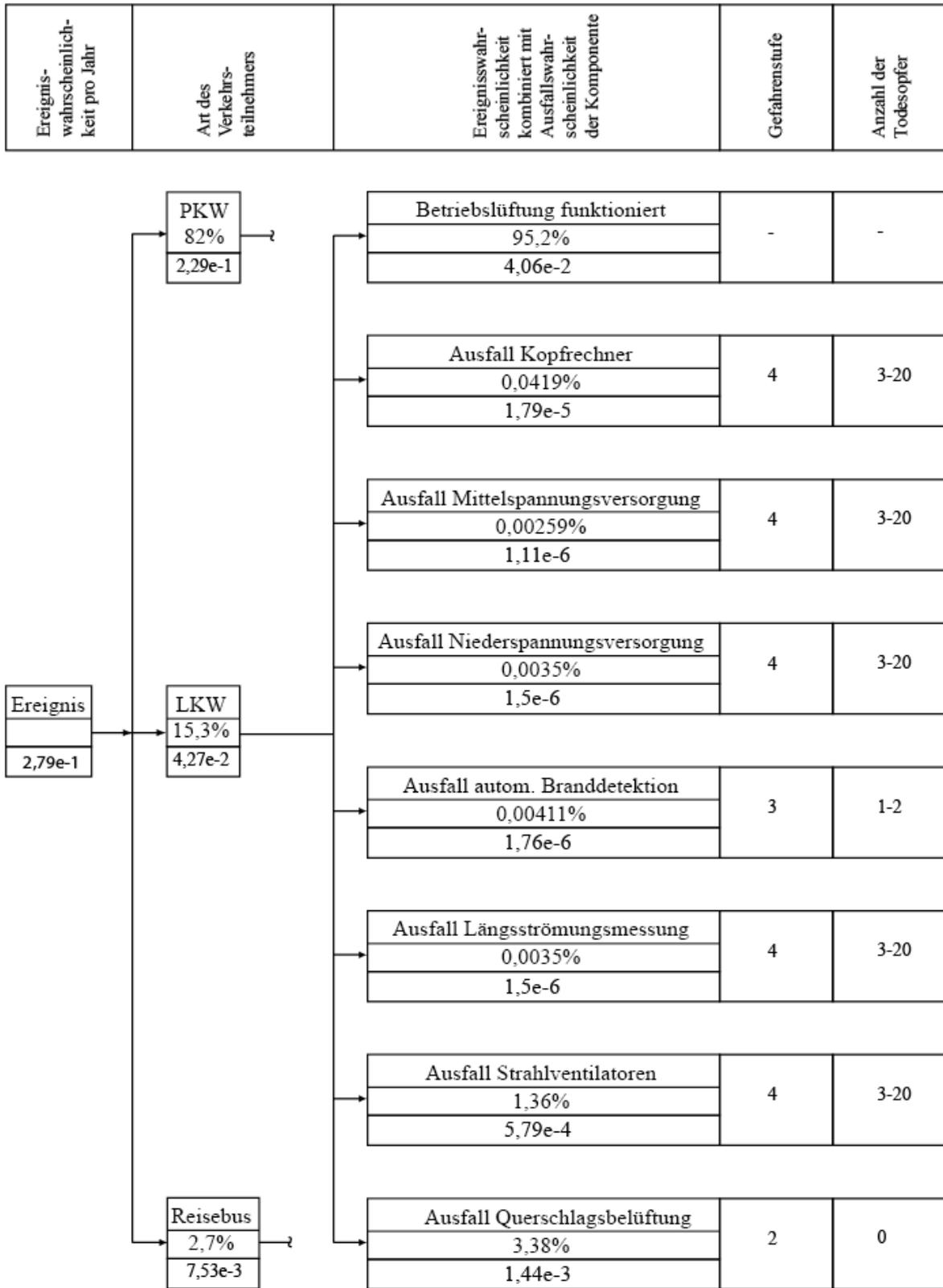


Abbildung 35: Ereignisbaumanalyse für LKW

Tabelle 17 zeigt die Beurteilungen der Ausfallszenarien bei einem LKW-Brand im Spring Tunnel.

| Risikobewertung nach EN50126  |                  |          |                  |                   |                   |                   |                   |
|-------------------------------|------------------|----------|------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|
| Häufigkeit von Gefahrenfällen |                  |          | Risikostufen     |                   |                   |                   |                   |
| 6                             | häufig           |          | unerwünscht      | nicht tolerierbar | nicht tolerierbar | nicht tolerierbar | nicht tolerierbar |
|                               |                  | Anzahl   |                  |                   |                   |                   |                   |
|                               |                  | Szenario |                  |                   |                   |                   |                   |
| 5                             | wahrscheinlich   |          | tolerierbar      | unerwünscht       | nicht tolerierbar | nicht tolerierbar | nicht tolerierbar |
|                               |                  | Anzahl   |                  |                   |                   |                   |                   |
|                               |                  | Szenario |                  |                   |                   |                   |                   |
| 4                             | gelegentlich     |          | tolerierbar      | unerwünscht       | unerwünscht       | nicht tolerierbar | nicht tolerierbar |
|                               |                  | Anzahl   |                  |                   |                   |                   |                   |
|                               |                  | Szenario |                  |                   |                   |                   |                   |
| 3                             | selten           |          | vernachlässigbar | tolerierbar       | unerwünscht       | unerwünscht       | nicht tolerierbar |
|                               |                  | Anzahl   |                  | 1                 | 1                 |                   |                   |
|                               |                  | Szenario |                  | S7                | S4                |                   |                   |
| 2                             | unwahrscheinlich |          | vernachlässigbar | vernachlässigbar  | tolerierbar       | tolerierbar       | unerwünscht       |
|                               |                  | Anzahl   |                  |                   |                   | 5                 |                   |
|                               |                  | Szenario |                  |                   |                   | S1,S2,S3,S5,S6    |                   |
| 1                             | unvorstellbar    |          | vernachlässigbar | vernachlässigbar  | vernachlässigbar  | vernachlässigbar  | tolerierbar       |
|                               |                  | Anzahl   |                  |                   |                   |                   |                   |
|                               |                  | Szenario |                  |                   |                   |                   |                   |
|                               |                  |          | unbedeutend      | marginal          | kritisch          | katastrophal      | verheerend        |
|                               |                  |          | 1                | 2                 | 3                 | 4                 | 5                 |
| Gefahrenstufen                |                  |          |                  |                   |                   |                   |                   |

Tabelle 17: Risikobewertung für das Ereignis LKW- Brand im Spring Tunnel

Legende:

- Szenario S1: Ausfall der Kopfrechner
- Szenario S2: Ausfall der Mittelspannungsversorgung
- Szenario S3: Ausfall der Niederspannungsversorgung
- Szenario S4: Ausfall der automatischen Branddetektion
- Szenario S5: Ausfall der Längsströmungsmessung
- Szenario S6: Ausfall der Strahlventilatoren
- Szenario S7: Ausfall der Querschlagbelüftung

In Tabelle 18 wird die Anzahl Subsysteme, die in den Kategorien „vernachlässigbar“, „tolerabel“, „unerwünscht“ und „nicht tolerabel“ identifiziert wurden, zusammengefasst.

|        | vernachlässigbar | tolerabel | unerwünscht | nicht tolerabel |
|--------|------------------|-----------|-------------|-----------------|
| Anzahl | 0                | 6         | 1           | 0               |

Tabelle 18: Anzahl der Komponenten je Gefahrenstufe für das Ereignis LKW- Brand im Spring Tunnel

| Kat.5 | Mehere Unfalltote und/oder zahlreiche Schwerverletzte | ID                        | Komponente und Brandfall                        | Gefahrenstufe | Gefahrenhäufigkeit | Ausfallswahrscheinlichkeit pro Jahr | $\lambda$ [1/h] | $\lambda$ [1/h] redundant | LKW Brand Wahrscheinlichkeit [1/a] | Risiko-bewertung   |
|-------|---|---------------------------|---|---------------|--------------------|-------------------------------------|-----------------|---------------------------|------------------------------------|--------------------|
|       |   | -                         | -   |               |                    |                                     |                 |                           |                                    |                    |
| Kat.4 | Unfalltote und/oder zahlreiche Schwerverletzte        | ID                        | Komponente und Brandfall                        | Gefahrenstufe | Gefahrenhäufigkeit | Ausfallswahrscheinlichkeit pro Jahr | $\lambda$ [1/h] | $\lambda$ [1/h] redundant | LKW Brand Wahrscheinlichkeit [1/a] | Risiko-beurteilung |
|       |   | S1                        | Ausfall eines Kopfrechner                       | -             | 3                  | 1,05E-02                            | 2,80E-05        |                           | 4,27E-02                           | verna.             |
|       |   | S1                        | Ausfall der Kopfrechner (1 von 2)               | 4             | 2                  | 1,79E-05                            |                 | 4,78E-08                  | 4,27E-02                           | toler.             |
|       |   | S2                        | Ausfall einer Mittelspannungsanlage             | -             | 3                  | 2,67E-03                            | 7,14E-06        |                           | 4,27E-02                           | verna.             |
|       |   | S2                        | Ausfall der Mittelspannungsversorgung (1 von 2) | 4             | 2                  | 1,11E-06                            |                 | 2,96E-09                  | 4,27E-02                           | toler.             |
|       |   | S3                        | Ausfall einer Niederspannungsanlage             | -             | 3                  | 1,58E-03                            | 4,24E-06        |                           | 4,27E-02                           | verna.             |
|       |   | S3                        | Ausfall der Niederspannungsversorgung (1 von 2) | 4             | 2                  | 1,50E-06                            |                 | 4,00E-09                  | 4,27E-02                           | toler.             |
|       |   | S5                        | Ausfall eines Längsströmungsmessgeräts          | -             | 3                  | 1,08E-02                            | 2,89E-05        |                           | 4,27E-02                           | verna.             |
|       |   | S5                        | Ausfall der Längsströmungsmessung (1 von 5)     | 4             | 2                  | 1,50E-06                            |                 | 4,00E-09                  | 4,27E-02                           | toler.             |
|       |   | S6                        | Ausfall eines Strahlventilators                 | -             | 3                  | 7,14E-03                            | 1,91E-05        |                           | 4,27E-02                           | verna.             |
|       |   | S6                        | Ausfall der Strahlventilatoren (12 von 13)      | 4             | 2                  | 5,79E-04                            |                 | 1,55E-06                  | 4,27E-02                           | toler.             |
|       |   | Summe der Gefahrenstufe 4 |   | 4             |                    | 6,01E-04                            |                 |                           |                                    |                    |
| Kat.3 | Einzelner Unfalltoter und/oder Schwerverletzter       | ID                        | Komponente und Brandfall                        | Gefahrenstufe | Gefahrenhäufigkeit | Ausfallswahrscheinlichkeit pro Jahr | $\lambda$ [1/h] | $\lambda$ [1/h] redundant | LKW Brand Wahrscheinlichkeit [1/a] | Risiko-beurteilung |
|       |   | S4                        | Ausfall der autom. Branddetektion               | 3             | 3                  | 1,29E-03                            | 3,46E-06        |                           | 4,27E-02                           | unerv.             |
|       |   | Summe der Gefahrenstufe 3 |   | 3             |                    | 1,29E-03                            |                 |                           |                                    |                    |

Tabelle 19: Ausfallwahrscheinlichkeiten pro Jahr für die Ausmaßkategorien 3, 4 und 5 bei einem LKW- Brand im Spring Tunnel

Alle Szenarien, bei deren Eintritt mit Todesopfern zu rechnen ist, werden entsprechend ihrer Gefahrenstufen zusammengefasst. Aus Tabelle 19 können die Gefahrenstufen und Häufigkeiten für die einzelnen Szenarien sowie die Summen der Störungen entnommen werden.

Die Summe der Störungen in der Gefahrenstufe 3 (Einzelner Unfalltoter und/oder Schwerverletzter) ergibt eine Wahrscheinlichkeit von  $1,29 \cdot E^{-3}$  pro Jahr.

Die Summe der Störungen in der Gefahrenstufe 4 (Unfalltote und/oder zahlreiche Schwerverletzten) ergibt eine Wahrscheinlichkeit von  $6,01 \cdot E^{-4}$  pro Jahr.

In der Abbildung 36 ist die Akzeptanzlinien, die nach der RVS 09.02.31 [10] entwickelt wurde, dargestellt. Die einzelnen Szenarien, welche zu einem Ausmaß mit Todesopfern führen, sind gemäß Vorgabe von RAMS als Punkte in der Mitte der Gefahrenstufe aufgeführt. Es wird davon ausgegangen, dass die Verteilung der Wahrscheinlichkeit in einer Gefahrenstufe die gleiche Steigung wie die Akzeptanzlinie hat. Der Punkt in der Mitte der Gefahrenstufe steht repräsentativ für die gesamte Gefahrenstufe. Nicht nur die Einzelereignisse alleine müssen unterhalb der Akzeptanzlinie sein, sondern auch die Summe

alle Ereignisse einer Gefahrenstufe.

Werden diese Ergebnisse in dem Wahrscheinlichkeits- Ausmaßdiagramm Diagramm dargestellt, ergibt sich folgendes Bild:

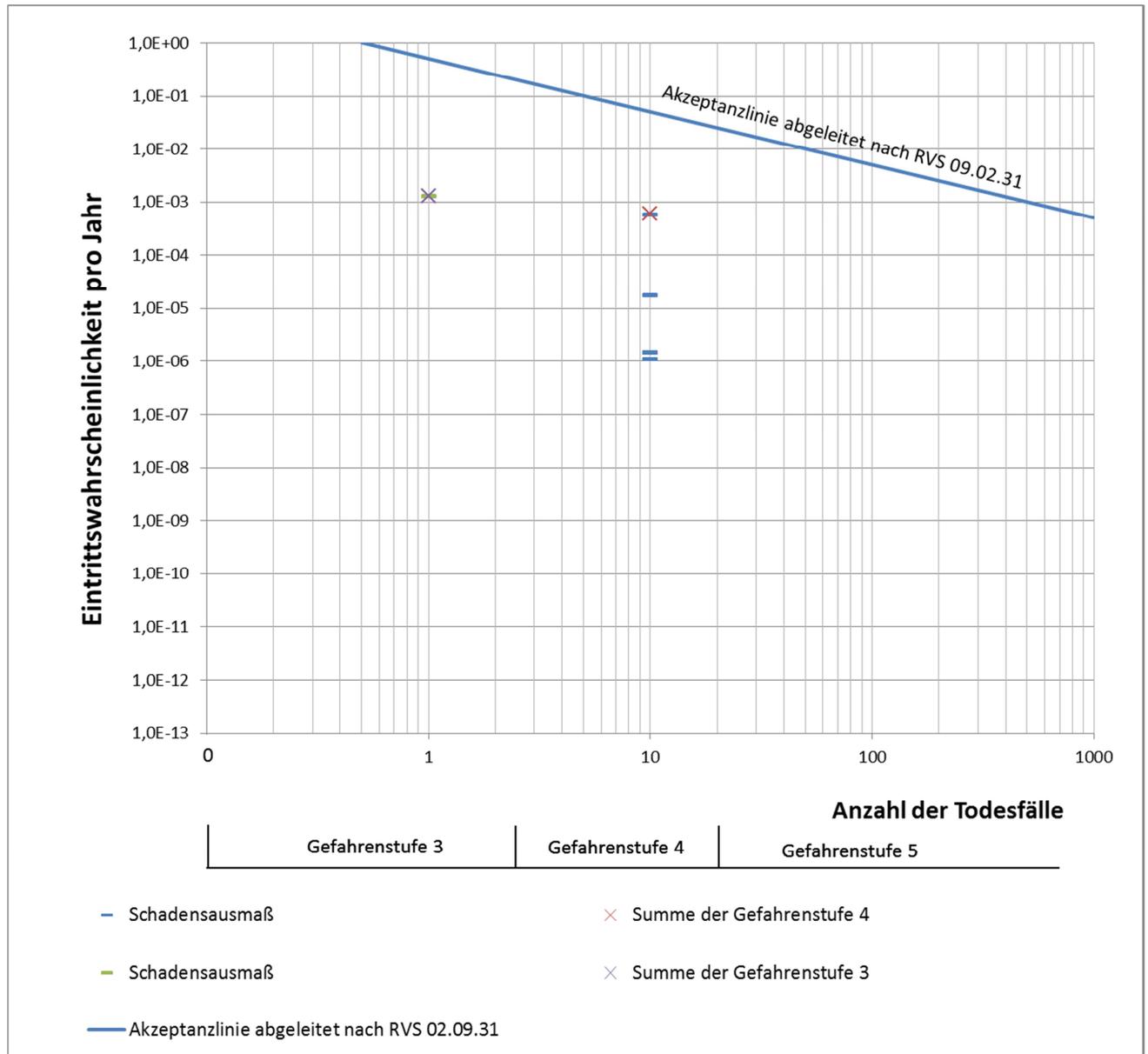


Abbildung 36: Akzeptanzlinie LKW- Brand im Spring Tunnel

In Abbildung 36 erkennt man, dass alle Szenarien und die Summen der einzelnen Gefahrenstufen sich unterhalb der Akzeptanzlinie befinden.

Ereignisbaumanalyse Reisebus:

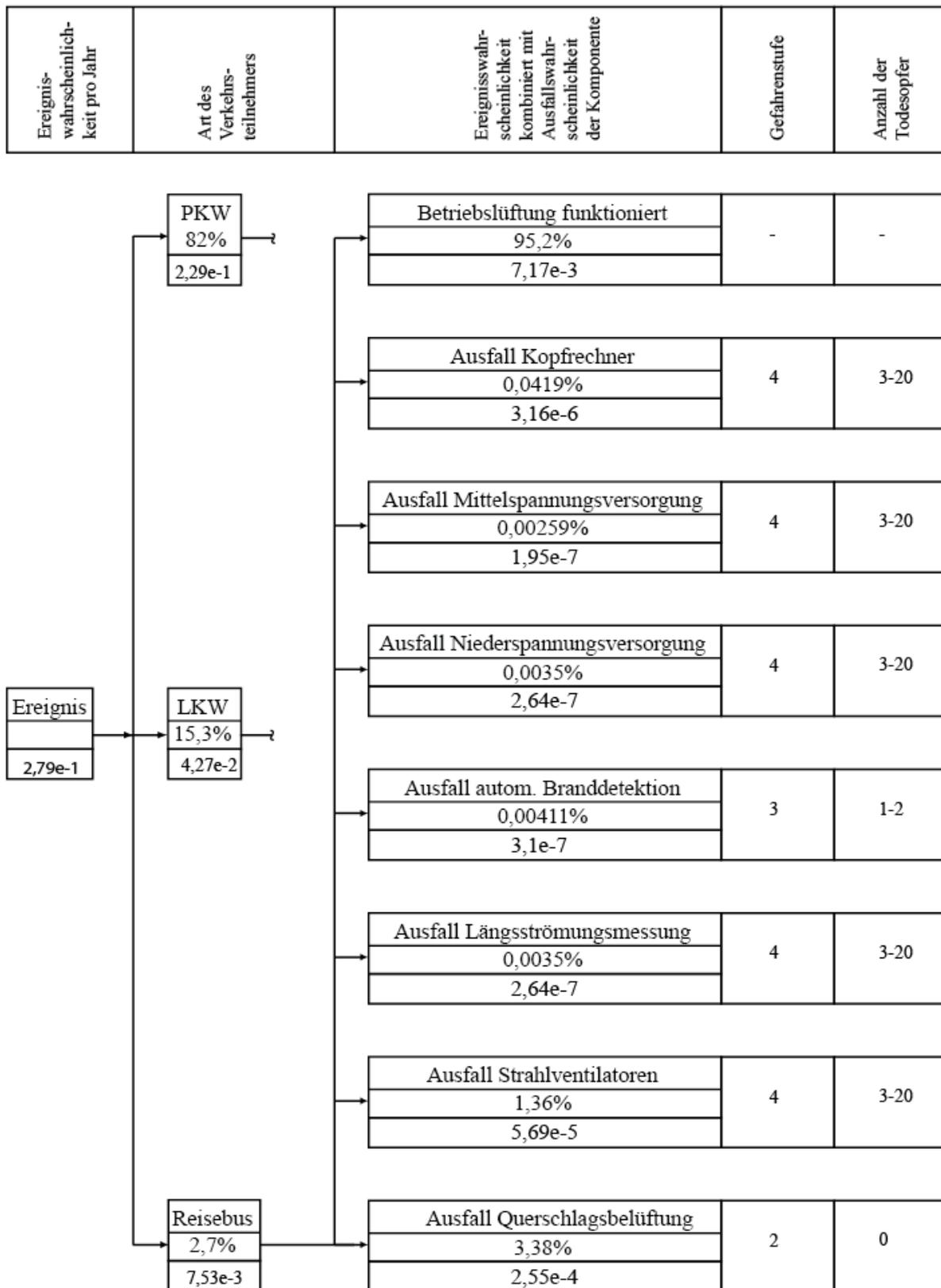


Abbildung 37: Ereignisbaumanalyse für einen Reisebus

Tabelle 20 zeigt die Beurteilungen der Ausfallszenarien bei einem Reisebus- Brand im

## Spring Tunnel.

| Risikobewertung nach EN50126  |                  |          |                  |                   |                   |                   |                   |
|-------------------------------|------------------|----------|------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|
| Häufigkeit von Gefahrenfällen |                  |          | Risikostufen     |                   |                   |                   |                   |
| 6                             | häufig           |          | unerwünscht      | nicht tolerierbar | nicht tolerierbar | nicht tolerierbar | nicht tolerierbar |
|                               |                  | Anzahl   |                  |                   |                   |                   |                   |
|                               |                  | Szenario |                  |                   |                   |                   |                   |
| 5                             | wahrscheinlich   |          | tolerierbar      | unerwünscht       | nicht tolerierbar | nicht tolerierbar | nicht tolerierbar |
|                               |                  | Anzahl   |                  |                   |                   |                   |                   |
|                               |                  | Szenario |                  |                   |                   |                   |                   |
| 4                             | gelegentlich     |          | tolerierbar      | unerwünscht       | unerwünscht       | nicht tolerierbar | nicht tolerierbar |
|                               |                  | Anzahl   |                  |                   |                   |                   |                   |
|                               |                  | Szenario |                  |                   |                   |                   |                   |
| 3                             | selten           |          | vernachlässigbar | tolerierbar       | unerwünscht       | unerwünscht       | nicht tolerierbar |
|                               |                  | Anzahl   |                  |                   |                   | 1                 |                   |
|                               |                  | Szenario |                  |                   |                   | S4                |                   |
| 2                             | unwahrscheinlich |          | vernachlässigbar | vernachlässigbar  | tolerierbar       | tolerierbar       | unerwünscht       |
|                               |                  | Anzahl   |                  | 1                 |                   | 5                 |                   |
|                               |                  | Szenario |                  | S7                |                   | S1,S2,S3,S5,S6    |                   |
| 1                             | unvorstellbar    |          | vernachlässigbar | vernachlässigbar  | vernachlässigbar  | vernachlässigbar  | tolerierbar       |
|                               |                  | Anzahl   |                  |                   |                   |                   |                   |
|                               |                  | Szenario |                  |                   |                   |                   |                   |
|                               |                  |          | unbedeutend      | marginal          | kritisch          | katastrophal      | verheerend        |
|                               |                  |          | 1                | 2                 | 3                 | 4                 | 5                 |
| Gefahrenstufen                |                  |          |                  |                   |                   |                   |                   |

Tabelle 20: Risikobewertung für das Ereignis Reisebus- Brand im Spring Tunnel

Abbildung: Risikobewertung für das Ereignis Reisebus- Brand im Spring Tunnel

Legende:

- Szenario S1: Ausfall der Kopfrechner
- Szenario S2: Ausfall der Mittelspannungsversorgung
- Szenario S3: Ausfall der Niederspannungsversorgung
- Szenario S4: Ausfall der automatischen Branddetektion
- Szenario S5: Ausfall der Längsströmungsmessung
- Szenario S6: Ausfall der Strahlventilatoren
- Szenario S7: Ausfall der Querschlagbelüftung

In Tabelle 21 wird die Anzahl Subsysteme, die in den Kategorien „vernachlässigbar“, „tolerabel“, „unerwünscht“ und „nicht tolerabel“ identifiziert wurden, zusammengefasst.

|        | vernachlässigbar | tolerabel | unerwünscht | nicht tolerabel |
|--------|------------------|-----------|-------------|-----------------|
| Anzahl | 1                | 5         | 1           | 0               |

Tabelle 21: Anzahl der Komponenten je Gefahrenstufe für das Ereignis LKW- Brand in Spring Tunnel

| Kat.5 | Mehere Unfalltote und zahlreiche Schwerverletzte | ID  | Komponente und Brandfall | Gefahrenstufe | Gefahrenhäufigkeit | Ausfallswahrscheinlichkeit pro Jahr | $\lambda$ [1/h] | $\lambda$ [1/h] redundant | Bus Brand Wahrscheinlichkeit [1/a] | Risiko-bewertung   |
|-------|--|---|--------------------------|---------------|--------------------|-------------------------------------|-----------------|---------------------------|------------------------------------|--------------------|
|       |  | -   | -                        |               |                    |                                     |                 |                           |                                    |                    |
| Kat.4 | Unfalltote und/oder zahlreiche Schwerverletzte   | ID  | Komponente und Brandfall | Gefahrenstufe | Gefahrenhäufigkeit | Ausfallswahrscheinlichkeit pro Jahr | $\lambda$ [1/h] | $\lambda$ [1/h] redundant | Bus Brand Wahrscheinlichkeit [1/a] | Risiko-beurteilung |
|       | S1   | Ausfall eines Kopfrechner                       |                          | -             | 3                  | 1,85E-03                            | 2,80E-05        |                           | 7,53E-03                           | verna.             |
|       | S1   | Ausfall der Kopfrechner (1 von 2)               |                          | 4             | 2                  | 3,16E-06                            |                 | 4,78E-08                  | 7,53E-03                           | toler.             |
|       | S2   | Ausfall einer Mittelspannungsanlage             |                          | -             | 2                  | 4,71E-04                            | 7,14E-06        |                           | 7,53E-03                           | verna.             |
|       | S2   | Ausfall der Mittelspannungsversorgung (1 von 2) |                          | 4             | 2                  | 1,95E-07                            |                 | 2,96E-09                  | 7,53E-03                           | toler.             |
|       | S3   | Ausfall einer Niederspannungsanlage             |                          | -             | 2                  | 2,81E-04                            | 4,26E-06        |                           | 7,53E-03                           | verna.             |
|       | S3   | Ausfall der Niederspannungsversorgung (1 von 2) |                          | 4             | 2                  | 2,64E-07                            |                 | 4,00E-09                  | 7,53E-03                           | toler.             |
|       | S5   | Ausfall eines Längsströmungsmessgeräts          |                          | -             | 3                  | 1,91E-03                            | 2,89E-05        |                           | 7,53E-03                           | verna.             |
|       | S5   | Ausfall der Längsströmungsmessung (1 von 5)     |                          | 4             | 2                  | 2,64E-07                            |                 | 4,00E-09                  | 7,53E-03                           | toler.             |
|       | S6   | Ausfall eines Strahlventilators                 |                          | -             | 3                  | 1,26E-03                            | 1,91E-05        |                           | 7,53E-03                           | verna.             |
|       | S6   | Ausfall der Strahlventilatoren (12 von 13)      |                          | 4             | 2                  | 1,02E-04                            |                 | 1,55E-06                  | 7,53E-03                           | toler.             |
|       | S4   | Ausfall der autom. Branddetektion               |                          | 4             | 3                  | 2,28E-04                            | 3,46E-06        |                           | 7,53E-03                           | unerw.             |
|       | Summe der Gefahrenstufe 4                        |   |                          | 4             |                    | 3,34E-04                            |                 |                           |                                    |                    |
| Kat.3 | Einzelner Unfalltoter und/oder Schwerverletzter  | ID  | Komponente und Brandfall | Gefahrenstufe | Gefahrenhäufigkeit | Ausfallswahrscheinlichkeit pro Jahr | $\lambda$ [1/h] | $\lambda$ [1/h] redundant | Bus Brand Wahrscheinlichkeit [1/a] | Risiko-beurteilung |
|       |  | -   | -                        |               |                    |                                     |                 |                           |                                    |                    |

Tabelle 22: Ausfallwahrscheinlichkeiten pro Jahr für die Ausmaßkategorien 3, 4 und 5 bei einem Reisebus- Brand im Spring Tunnel

Alle Szenarien, bei deren Eintritt mit Todesopfern zu rechnen ist, werden entsprechend ihrer Gefahrenstufen zusammengefasst. Aus Tabelle 22 können die Gefahrenstufen und Häufigkeiten für die einzelnen Szenarien sowie die Summen der Störungen entnommen werden.

Die Summe der Störungen in der Gefahrenstufe 4 (Unfalltote und/oder zahlreiche Schwerverletzte) ergibt eine Wahrscheinlichkeit von  $3,34E-4$  pro Jahr.

In der Abbildung 38 ist die Akzeptanzlinien, die nach der RVS 09.02.31 [10] entwickelt wurde, dargestellt. Die einzelnen Szenarien, welche zu einem Ausmaß mit Todesopfern führen, sind gemäß Vorgabe von RAMS als Punkte in der Mitte der Gefahrenstufe aufgeführt. Es wird davon ausgegangen, dass die Verteilung der Wahrscheinlichkeit in einer Gefahrenstufe die gleiche Steigung wie die Akzeptanzlinie hat. Der Punkt in der Mitte der Gefahrenstufe steht repräsentativ für die gesamte Gefahrenstufe. Nicht nur die Einzelereignisse alleine müssen unterhalb der Akzeptanzlinie sein, sondern auch die Summe alle Ereignisse einer Gefahrenstufe.

Werden diese Ergebnisse in dem Wahrscheinlichkeits- Ausmaßdiagramm Diagramm dargestellt, ergibt sich folgendes Bild:

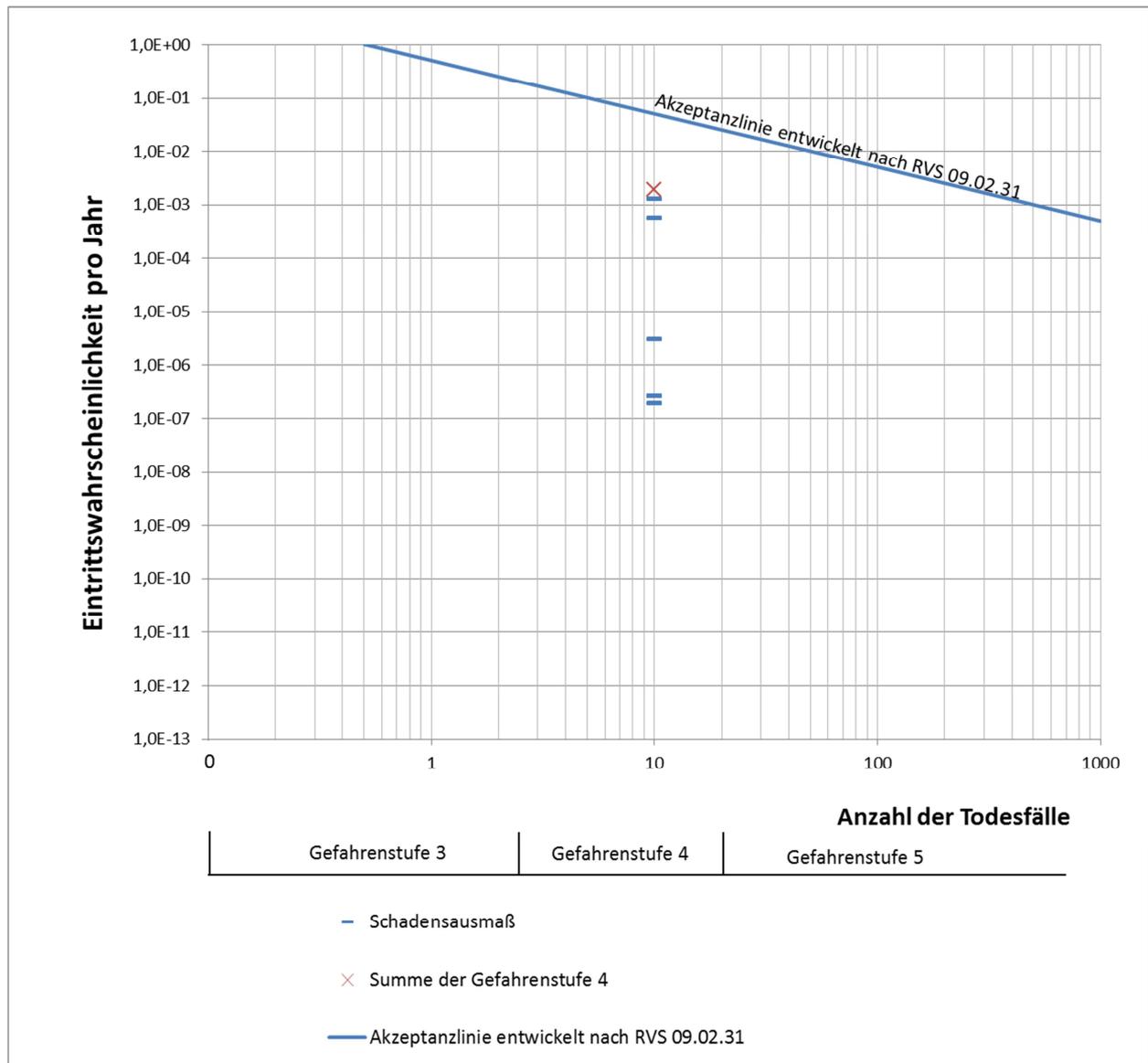


Abbildung 38: Akzeptanzlinie Reisebus- Brand im Spring Tunnel

In Abbildung 38 erkennt man, dass alle Szenarien und die Summen der einzelnen Gefahrenstufen sich unterhalb der Akzeptanzlinie befinden.

## 2.4 PHASE 4 - SYSTEMANFORDERUNGEN

### 2.4.1 Zielsetzung der Phase 4 Systemanforderungen

Die Phase 4 hat folgende Zielsetzungen, soweit sie die mögliche RAMS-Performance des Systems betreffen:

- Spezifikation der gesamten RAMS-Anforderungen für das System.
- Spezifikation von Nachweis- und Abnahmekriterien bezüglich RAMS für das System.
- Erstellung des RAM-Programms für die Überwachung der RAM-Aufgaben während der Lebenszyklusphasen.

### 2.4.2 Eingangsgrößen

Eingangsgrößen für die Phase 4 Systemanforderungen sind alle gesetzlichen Vorschriften, das Dokument Technischer Bericht Tunnelkette Klaus [8] und dem Dokument Risikoanalyse A9 -

Tunnel Sperring gemäß RVS 09.03.11[9] sowie die Ergebnisse der RAMS-Phasen 1 bis 3.

### 2.4.3 Erfüllung der Anforderungen RAMS-Anforderungen für das Gesamtsystem

Die RAMS-Ziele an die Betriebslüftung sind im Rahmen des übergeordneten RAMS Konzepts für die Tunnellüftung von den Vorgaben aus dem Dokument Technisches Planungshandbuch der ASFiNAG [12], RVS 09.02.31 [10] und RVS 09.03.11 [11] abgeleitet worden.

Explizite RAMS-Ziele wurden für folgende Ausfälle/Störungen der Betriebslüftung definiert:

- Ausfall der Kopfrechner trotz hundertprozentiger Redundanz
- Ausfall der Mittelspannungsversorgung trotz hundertprozentiger Redundanz
- Ausfall der Niederspannungsversorgung trotz hundertprozentiger Redundanz
- Ausfall der automatischen Branddetektion trotz hundertprozentiger Redundanz
- Ausfall der Längsströmungsmessung
- Ausfall der Strahlventilatoren
- Ausfall der Querschlagbelüftung

#### 2.4.3.1 RAMS Ziel für die Verfügbarkeit (A) der Tunnelbelüftung

Berechnung der Systemverfügbarkeit:

Über die MTBF und MTTR Werte kann die Verfügbarkeit (Availability) des Systems berechnet werden.

$$A = \frac{MTBF}{MTBF + MTTR}$$

Aus der Verfügbarkeit der einzelnen Komponenten lässt sich die Gesamtverfügbarkeit eines Systems errechnen. Die Gesamtverfügbarkeit des Systems ist nur dann gewährleistet wenn alle Komponenten zur Verfügung stehen. Auf Grund der seriellen Abhängigkeit der einzelnen Komponenten ergibt sich für die Verfügbarkeit des Gesamtsystems:

$$A_{Gesamt} = A_1 * A_2 * \dots * A_n$$

In Tabelle 23 sind die Verfügbarkeitswerte (A) sämtlicher Komponenten dargestellt.

| Bezeichnung                        | Komponente                | MTBF [h] | MTTR [h] | A[%]       |
|------------------------------------|---------------------------|----------|----------|------------|
| Kopfrechner 1/2                    |                           | 2,09E+07 | 28       | 99,999866% |
|                                    | Kopfrechner 1             | 3,57E+04 | 28       |            |
|                                    | Kopfrechner 2             | 3,57E+04 | 28       |            |
| Mittelspannungs-<br>versorgung 1/2 |                           | 3,38E+08 | 29       | 99,999991% |
|                                    | Mittelspannungsanlage 1   | 1,40E+05 | 29       |            |
|                                    | Mittelspannungsanlage 2   | 1,40E+05 | 29       |            |
| Niederspannungs-<br>versorgung 1/2 |                           | 2,50E+08 | 29       | 99,999988% |
|                                    | Niederspannungsanlage 1   | 2,36E+05 | 29       |            |
|                                    | Niederspannungsanlage 2   | 2,36E+05 | 29       |            |
| Längsströmungs-<br>messung 1/5     |                           | 9,60E+08 | 28,5     | 99,999988% |
|                                    | Längsströmungsmessgerät 1 | 3,46E+04 | 28,5     |            |
|                                    | Längsströmungsmessgerät 2 | 3,46E+04 | 28,5     |            |
|                                    | Längsströmungsmessgerät n | 3,46E+04 | 28,5     |            |
| Strahl-<br>ventilatoren 12/13      |                           | 6,46E+05 | 31       | 99,99520%  |
|                                    | Strahlventilator 1        | 5,24E+04 | 31       |            |
|                                    | Strahlventilator 2        | 5,24E+04 | 31       |            |
|                                    | Strahlventilator n        | 5,24E+04 | 31       |            |
| Querschlags<br>Belüftung 2/2       |                           | 2,59E+05 | 30       | 99,98842%  |
|                                    | Querschlags Belüftung 1   | 5,23E+04 | 30       |            |
|                                    | Querschlags Belüftung 2   | 5,23E+04 | 30       |            |
| Automatische<br>Branddetektion     |                           | 2,89E+05 | 29       | 99,989966% |
|                                    | Brandlinienmeldekabel     | 2,89E+05 | 29       |            |

|                      |         |
|----------------------|---------|
| Gesamtverfügbarkeit: | 99,973% |
|----------------------|---------|

Tabelle 23: Komponentenverfügbarkeit im Spring Tunnel

Durch Multiplikation der einzelnen Verfügbarkeitswerte ergibt sich die Gesamtverfügbarkeit (A) der Tunnelbelüftung. (siehe Tabelle 23)

### 2.4.3.2 RAMS Ziel für die Wartbarkeit (M) der Tunnelbelüftung

#### 2.4.3.2.1 Instandhaltbarkeit

Alle Elemente der Betriebslüftung müssen durch regelmäßige Inspektionen, Funktionskontrollen, periodischen Unterhalt und Erneuerung aufrechterhalten bleiben. Die Zuverlässigkeit der Systeme hängt neben den Kontroll- und Wartungsintervallen auch von den Intervallen für das Ersetzen der Einzelteile ab. Die Störanfälligkeit nimmt mit zunehmendem Alter der Bauteile überproportional zu. Es ist eine hohe Lebensdauer für die einzelnen Bauteile anzustreben. Ebenfalls ist ein Austausch vor dem Versagen vorzunehmen.

#### 2.4.3.2.2 Vorbeugende Instandhaltung

Die Anlage soll so weit wie möglich wartungsfrei konstruiert werden. Sind Wartungsarbeiten

dennoch nötig, so sind die Aufwendungen zu quantifizieren. Diese müssen die Wartungsarten, die mittleren Wartungsintervalle Mean Time Between Maintenance (MTBM) und die mittleren Wartungszeiten Mean Time To Maintenance (MTTM) beinhalten. Wartungsarten können Inspektionen, kleinere Arbeiten und Revisionen enthalten. Gemäß Definition fließt diese vorbeugende Instandhaltung nicht in die MTTR-Werte ein. Deswegen hat die Instandhaltung keinen Einfluss auf die gesamte Verfügbarkeit der Tunnellüftung. Die in Tabelle 24 zusammengestellten MTBM- und MTTM-Werte basieren auf Erfahrungen. (eine Reduktion dieser Zeiten ist anzustreben)

| Revisionsart  | MTBM/Stück | MTTM/Stück |
|---|------------|------------|
| Sicht- und Funktionskontrolle Strahlventilatoren                  | 6 Monate   | 2h         |
| Austausch Motor Strahlventilator                                  | 10 Jahre   | 8h         |
| Sicht- und Funktionskontrolle Energieversorgung Stahlventilatoren | 1 Jahr     | 8h         |
| Erneuerung Steuerung Strahlventilatoren                           | 25 Jahre   | 40h        |
| Neustart und Reinigung Steuerung Strahlventilatoren               | 6 Monate   | 1h         |
| Messwertkontrolle Tunnel Sensorik Co und K Wert                   | 1 Jahr     | 30min      |
| Austausch Tunnel Sensorik CO und K Wert                           | 15 Jahre   | 2h         |
| Sicht- und Funktionskontrolle Querschlagbelüftung Ventilatoren    | 6 Monate   | 1h         |
| Neustart und Reinigung Steuerung Querschlagbelüftung Ventilatoren | 6 Monate   | 1h         |
| Austausch Querschlagbelüftung Ventilatoren                        | 10 Jahre   | 8h         |
| Sichtkontrolle und Reinigung Kopfrechner                          | 1 Jahr     | 2h         |
| Austausch Kopfrechner   | 4 Jahre    | 8h         |
| Sicht- und Funktionskontrolle Klappen Querschlag Belüftung        | 1 Jahr     | 1h         |
| Austausch Klappen Querschlag Belüftung                            | 15 Jahre   | 8h         |
| Sicht- und Funktionskontrolle Mittelspannungsversorgung           | 1 Jahr     | 30min      |
| Sicht- und Funktionskontrolle Niederspannungsversorgung           | 1 Jahr     | 30min      |
| Sicht- und Messwertkontrolle Längsströmungsmessgerät              | 1 Jahr     | 1h         |
| Austausch Längsströmungsmessgerät                                 | 15 Jahre   | 4h         |
| Sicht- und Funktionskontrolle Brandlinienmeldekabel               | 1 Jahr     | 8h         |
| Austausch Brandlinienmeldekabel                                   | 15 Jahre   | 40h        |

Tabelle 24: MTBM und MTTM Werte

#### 2.4.3.2.3 Reparaturzeit

Der Aufbau der Anlage soll einen raschen Austausch der ausgefallenen Komponente ermöglichen. Die geschätzten Reparaturzeiten (Austausch- oder Reparatur am Ort der ausgefallenen Komponenten) können der Tabelle 7 entnommen werden. Die Reparaturzeiten müssen nicht mit den Wartungszeiten übereinstimmen, da dies zwei verschiedene Aspekte sind. In der Reparaturzeit sind Ab- und Anmontieren der ausgefallenen Komponenten, Inbetriebsetzung und Prüfung der Anlage enthalten.

Festgelegter Zeitrahmen bis ein Reparaturteam vor Ort ist:

In langen Tunnels spielen für die Berechnung der Ausfallzeiten die Zeitverhältnisse, bis das Reparaturteam vor Ort ist, eine wesentliche Rolle. Im vorliegenden Dokument werden die Zeitannahmen festgelegt, die bis zum Eintreffen des Reparaturteams vor Ort für die Komponenten der Tunnelbelüftungsanlagen zu verwenden sind. Nachfolgend sind in Tabelle 25 die Richtzeiten definiert, bis ein Reparatur-Team vor Ort bereit ist (inklusive Zeiten für Ferndiagnose, Bereitstellung von Ersatzteilen und Anfahrt):

| Störungsart  | Zeit bis Reparaturteam vor Ort | Ausfallszeit        |
|--|--------------------------------|---------------------|
| Störung mit Beeinträchtigung der Funktionalität der Betriebslüftung  | 24h                            | 24h + Reparaturzeit |
| Störung ohne Beeinträchtigung der Funktionalität der Betriebslüftung | 72h                            | 72h + Reparaturzeit |

Tabelle 25: Richtzeiten

### 2.4.3.3 RAMS Ziel für die Sicherheit (S) und Zuverlässigkeit (R) der Tunnelbelüftung

Als Sicherheitsanforderung (S) wird für die Zuverlässigkeit (R) aller Komponenten, deren Ausfall mit der Gefahrenstufe 3 oder höher bewertet wurde, wie folgt definiert:

- 99,9% während 20 Tagen/Jahr
- 99,99% während (365 – 20) Tagen/Jahr

Durchschnittlich, über ein ganzes Jahr betrachtet, weist die Tunnellüftung die folgende Verfügbarkeit auf:  $(99,9\% * 20 \text{ Tage} + 99,99\% * (365-20) \text{ Tage}) / 365 \text{ Tage} = 99,985\%$ . Das bedeutet im Jahr muss jede einzelne Komponente zu 99,985% oder mehr verfügbar sein. Dieser Verfügbarkeitswert und auch die Mindestverfügbarkeit werden in Zusammenarbeit mit dem Tunnelbetreiber als Betreiberanforderung definiert. Im Rahmen dieser Diplomarbeit werden in Anlehnung an die Risikoanalyse des Gotthard Basistunnel [16] die gleiche Zuverlässigkeitsvorgabe und Mindestverfügbarkeit vorgeschrieben. Für die Gesamtverfügbarkeit werden 99,5% definiert.

| Komponente                  | MTBF     | Zuverlässigkeit |
|-----------------------------|----------|-----------------|
| Kopfrechner                 | 2,09E+07 | 99,958%         |
| Mittelspannungsversorgung   | 3,38E+08 | 99,997%         |
| Niederspannungsversorgung   | 2,50E+08 | 99,996%         |
| Automatische Branddetektion | 2,89E+05 | 97,014%         |
| Längsströmungsmessung       | 2,50E+08 | 99,996%         |
| Strahlventilatoren          | 6,68E+05 | 98,697%         |

Tabelle 26: Übersicht der Zuverlässigkeit

Die Sicherheitsanforderungen (S) sind:

- Gesamtverfügbarkeit des Systems größer 99,5%
- Zuverlässigkeit jeder Komponente mindestens 99,985%

Die Gesamtverfügbarkeit (A) des Systems wie in Tabelle Tabelle 23 dargestellt ist mit 99,973% größer als die geforderte von 99,5%.

Die Zuverlässigkeit (R) der Komponenten, deren Ausfall mit der Gefahrenstufe 3 oder höher bewertet wurde, wird von den Kopfrechnern, der automatischen Branddetektion und den Strahlventilatoren nicht erreicht.

## 2.5 PHASE 5 - ZUTEILUNG DER SYSTEMANFORDERUNGEN

### 2.5.1 Zielsetzung

Die Phase 5 hat folgende Zielsetzungen:

- Zuteilung der gesamten RAMS-Systemanforderungen auf die entsprechenden Subsysteme bzw. Komponenten.
- Definition der RAMS-Abnahmekriterien für die entsprechenden Subsysteme, Komponenten und externen Einrichtungen.

### 2.5.2 Eingangsgrößen

Eingangsgrößen für die Phase 5 sind alle gesetzlichen Vorschriften, das Dokument Technischer Bericht Tunnelkette Klaus [8] und dem Dokument Risikoanalyse A9 - Spring Tunnel [9] sowie die Ergebnisse der RAMS-Phasen 1 bis 4.

Die wichtigsten Ergebnisse sind:

- Es wurden messbare Zuverlässigkeits-, Instandhaltbarkeitsziele für die Tunnellüftung abgeleitet.
- Die Verfügbarkeitsziele sind definiert.
- Die in der RAMS-Phase 3 durchgeführte Risikoanalyse hat relevante Risiken der Gefahrenstufen 3 und 4 identifiziert. Die Kopfrechner, die automatische Branddetektion und Strahlventilatoren erfüllen die gewünschte Zuverlässigkeitsanforderung nicht.
- Die Erfüllung der RAMS-Anforderungen ist erst anlässlich der RAMS-Phase 6 (Entwicklung, Projektierung) nachzuweisen. Auch in den folgenden RAMS-Phasen ist die Erfüllung der Anforderungen zu verfolgen.

### 2.5.3 Zuordnung der Anforderungen

Neben den RAMS-Anforderungen sind vor allem die Anforderungen an die Betriebslüftung bezüglich Tunnelgeometrie, der meteorologischen Verhältnisse und Verkehrsdaten im Dokument Technischer Bericht Tunnelkette Klaus [8] formuliert.

Es kann nicht ausgeschlossen werden, dass eine weitere Detaillierung in Folge von Neuerkenntnissen in einer späteren RAMS-Phase notwendig sein wird. In einem solchen Fall wären die Aussagen des vorliegenden Kapitels zu hinterfragen und gegebenenfalls anzupassen.

### 2.5.4 Zuordnung der Sicherheitsanforderungen

Die Risikoanalyse Kapitel 2.3 zeigt, dass die Betriebslüftung bei einem PKW Brand ein unerwünschtes Restrisiko durch die Strahlventilatoren verursacht. Da bei einem PKW Brand nicht alle 12 Strahlventilatoren benötigt werden, könnte man in einer weiteren Risikoanalyse mit einer geringeren Anzahl notwendigerweise verfügbarer Strahlventilatoren ein akzeptables Restrisiko nachweisen. Bei einem LKW- oder Reisebus- Brand kommt es beim Szenario 4, Ausfall der automatischen Branddetektion, zur Risikobewertung unerwünscht. Da in der RAMS Analyse die Ausfallswahrscheinlichkeit nur vom MTBF Wert des Herstellers abhängig macht wird, wurden Ausfälle durch mechanische Beschädigungen nicht berücksichtigt. Brandlinienkabel sind der Gefahr der Zerstörung durch lose LKW- Planen ausgesetzt. Eine redundante Auslegung der Brandlinienmeldekabel sollte angedacht werden.

## 2.6 PHASE 6 - ENTWICKLUNG/ KONSTRUKTION UND IMPLEMENTIERUNG

### 2.6.1 Zielsetzungen

Die vorliegende RAMS-Analyse Phase 6 basiert bezüglich der Systemanforderungen auf dem Kenntnisstand zum Zeitpunkt der Projektierungsphase. Die ermittelten RAMS Kennzahlen stellen daher einerseits zwingende Anforderungen an die Realisierung dar, andererseits mussten zum Teil auch Annahmen getroffen werden. Eine sukzessive Kontrolle, Überarbeitung und Anpassung der RAMS- Risikoanalyse ist vorzunehmen. Man muss sich der Tatsache bewusst sein, dass für Komponenten der Betriebslüftung die RAMS-Werte theoretisch festgelegt werden müssen, unter anderem weil zum heutigen Zeitpunkt zu wenige Betriebserfahrungen unter vergleichbaren Randbedingungen vorliegen. Da es für die verwendeten Komponenten kaum verlässliche Zahlenwerte für MTBF und MTTR seitens der Komponentenhersteller oder des Tunnelbetreibers gibt, wurden die Werte in Anlehnung an die im Gotthard Basistunnel [16] verwendeten Werte übernommen beziehungsweise geschätzt. Die MTTR Werte müssen in Zukunft bei allen durchzuführenden Reparaturen und Wartungsarbeiten gewissenhaft erfasst und dokumentiert werden. Es ist für die Aussagekraft der ermittelten RAMS Parameter von großer Bedeutung, dass Neuerkenntnisse und Maßnahmen, die auf Erfahrungen mit den eingebauten Komponenten beziehungsweise vergleichbaren Anwendungen in anderen Tunneln basieren, laufend in RAMS-Betrachtungen einfließen.

Die Phase 6 hat folgende Zielsetzungen:

- Entwicklung und Konstruktion der Subsysteme und Komponenten, die die RAMS-Anforderungen erfüllen.
- Nachweis, dass die Subsysteme und Komponenten die RAMS-Anforderungen erfüllen.
- Planung der nachfolgenden Lebenszyklusaufgaben im Zusammenhang mit RAMS.

### 2.6.2 Eingangsgrößen

Eingangsgrößen für die Phase 6 Entwicklung Konstruktion und Implementierung sind alle gesetzlichen Vorschriften, das Dokument Technischer Bericht Tunnelkette Klaus [8] und das Dokument Risikoanalyse A9 - Spring Tunnel [9] sowie die Ergebnisse der RAMS-Phasen 1 bis 5.

Die wichtigsten Ergebnisse sind:

- Die Erkenntnisse der RAMS-Phase 3, 4 und 5 bezüglich Anforderungen, Abnahmekriterien, -prozesse und -verfahren können übernommen werden.
- Sobald genauere MTBF und MTTR Werte vorliegen müssen die RAMS Phasen 1 bis 5 aktualisiert werden.

#### 2.6.2.1 Erfüllung der funktionalen Anforderungen

Die Betriebslüftung ist entsprechend aller bisher beschriebenen funktionalen Forderungen, gemäß RAMS-Phase 5, zu planen und wird alle gestellten Anforderungen erfüllen.

#### 2.6.2.2 Erfüllung der Sicherheitsanforderungen

Da die Anlagen der Betriebslüftung in erster Linie Sicherheitsanlagen darstellen, steht die Erfüllung der hohen Sicherheitsziele im Vordergrund. Im Punkt 3.4.3.3 für die Sicherheit (S)

der Tunnelbelüftung konnte gezeigt werden, dass die Gesamtverfügbarkeit (A) der Komponenten über 99,5% liegt. Die Zuverlässigkeit (R) der Komponenten, deren Ausfall mit der Gefahrenstufe 3 oder höher bewertet wurde, wird von den Kopfrechnern, der automatischen Branddetektion und den Strahlventilatoren nicht erreicht.

## **3 RAMS Analyse Götschka Tunnel Phasen 1 bis 6**

### **3.1 PHASE 1 – KONZEPT**

#### **3.1.1 Zielsetzung**

Das Ziel dieser Phase besteht darin, ein ausreichendes Verständnis für die Systeme zu entwickeln und alle anschließend folgenden Lebenszyklusaufgaben erfüllen zu können. Den komplexen Nahtstellen zwischen den Komponenten der Betriebslüftung des Götschka Tunnels und anderen sicherheitstechnisch relevanten Anlagen ist besondere Beachtung zu schenken. Alle direkten und indirekten Abhängigkeiten sind zu berücksichtigen. Damit Neuerkenntnisse berücksichtigt werden können, ist bei Projekten dieser Komplexität ein iteratives Vorgehen unerlässlich, wobei die einzelnen RAMS Phasen überlappend sein können.

#### **3.1.2 Eingangsgrößen (Input)**

Unter dem Begriff Betriebslüftung werden alle Komponenten die zum Regelbetrieb des Götschka Tunnels benötigt werden. Unter dem Begriff Ereignislüftung werden alle Komponenten die zum Belüften und Entlüften des Götschka Tunnels im Ereignisfall benötigt werden. Der Aufbau aller für den Ereignisfall notwendigen Komponenten und deren gewünschte Funktionsweise wird dem Dokument [13] entnommen.

Die Norm ÖNORM EN 50126 [1] dient als Richtschnur bei der Erstellung des vorliegenden Dokuments, da sie ein Verfahren zur konsequenten Anwendung eines RAMS-Managements zur Verfügung stellt.

#### **3.1.3 Umfang, Zusammenhang und Zweck des Systems**

Die S 10 Mühlviertler Schnellstraße verläuft von Unterweikersdorf (A 7) über Freistadt bis nach Wulowitz. Die S 10 ist eines der wichtigsten Straßenbauprojekte in Oberösterreich. Sie ist für die Erschließung des Mühlviertels und für die wirtschaftlich wichtige gute Erreichbarkeit für die Standortsicherung des Bezirk Freistadt von großer Bedeutung. Auch überregional betrachtet wird durch die Mühlviertler Schnellstraße der oberösterreichische Zentralraum an den südböhmischen sowie den Ostseeraum angebunden.

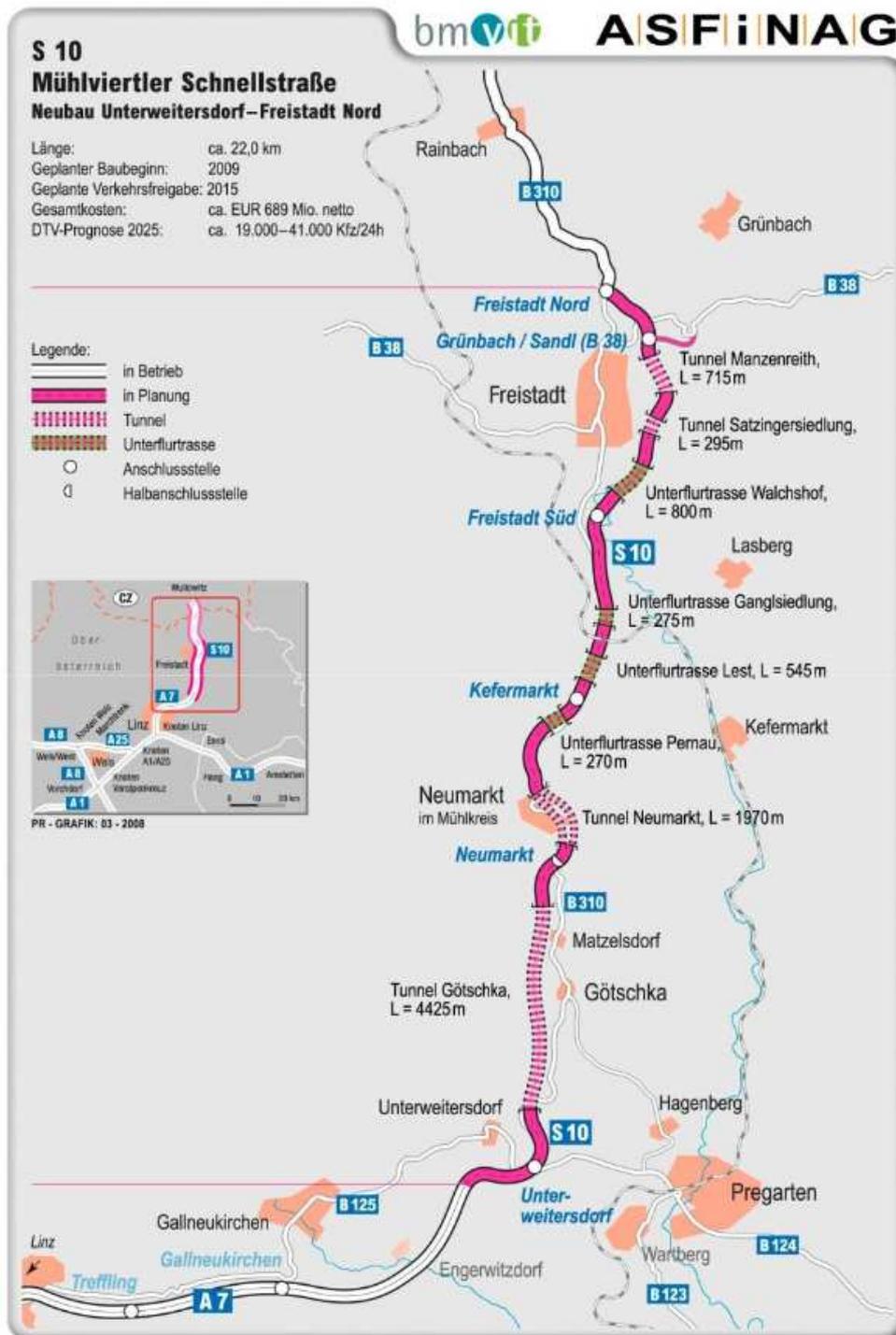


Abbildung 39: Lageskizze des Götschka Tunnel (Quelle: [14])

Zitat Anfang [13]:

### 3.1.3.1 Das Lüftungskonzept

Das Lüftungskonzept für den Tunnel sieht im Normalbetrieb eine Längslüftung sowie im Ereignisfall eine Rauchgasabsaugung über eine Zwischendecke vor. Die Kontrolle der Längsströmungsgeschwindigkeit erfolgt mit Strahlventilatoren.

#### 3.1.3.1.1 Längslüftung im Normalbetrieb:

Unabhängig vom Verkehrsaufkommen ist die Einhaltung von Sollwerten für CO und K (Trübefaktor) sicherzustellen. Bei flüssigem Verkehr reicht die Kolbenwirkung der Fahrzeuge in der Regel aus, um ausreichend Zuluft in die Tunnelröhren zu induzieren.

Bei drohenden CO- oder Trübe Grenzwertüberschreitungen zum Beispiel infolge von stockendem Verkehr oder Stau werden die Strahlventilatoren in Fahrtrichtung eingeschaltet. Für die Oströhre in Fahrtrichtung Prag wurden 16 Strahlventilatoren und für die Weströhre in Fahrtrichtung Linz 14 Strahlventilatoren festgelegt. Im weiteren Vorgehen wird im Rahmen dieser RAMS Untersuchung die Oströhre betrachtet. Auf Grund des geringen Unterschieds zwischen den beiden Tunnelröhren und der Tatsache, dass der aufwendigere Tunnel betrachtet wird, können die Ergebnisse auch für die Weströhre als repräsentativ betrachtet werden.

#### 3.1.3.1.2 Bremsbetrieb mittels Strahlventilatoren

Im Richtungsverkehr unter bestimmten Voraussetzungen kann es zu einer Längsgeschwindigkeit im Tunnel von über 10 m/s kommen. Gemäß RVS 09.02.31[10] darf die im Tunnel auftretende Längsgeschwindigkeit jedoch 10 m/s nicht überschreiten. Falls erforderlich sind die Strahlventilatoren zur Minderung der Längsgeschwindigkeit gemäß den Prioritäten für den Normalbetrieb entgegen der Strömungsrichtung zu betreiben.

#### 3.1.3.1.3 Querschlagbelüftung im Normalbetrieb

Eine Belüftung der als Schleusen ausgebildeten befahrbaren Querschläge erfolgt im Normalbetrieb nicht, um die Verschmutzung dieser Räumlichkeiten durch die belastete Tunnelluft zu beschränken.

#### 3.1.3.1.4 Ereignisfall

Im Brandfall werden die Rauchgase über steuerbare Abluftklappen, die sich in der Zwischendecke befinden, konzentriert abgezogen. Im Brandfall muss mittels der Strahlventilatoren sichergestellt werden, dass die Längsgeschwindigkeit in Fahrtrichtung vor dem Absaugbereich 1,2 m/s nicht unterschreitet. Die begehbaren Querschläge GQ sowie die befahrbaren Querschläge EQ3 und EQ15 sind ohne Schleusensystem ausgeführt. Laut RVS 09.02.31[10] Kapitel 7.6 Seite 23 muss in geöffneten Fluchttüren eine Längsgeschwindigkeit von mindestens 2,5 m/s erzielt werden können. Dies erfolgt durch eine Überdruckerzeugung in der brandfreien Röhre.

*Zitat Ende*

### 3.1.4 Systemumgebung

#### 3.1.4.1 Physikalische Gesichtspunkte

Aufgrund der verschiedenen Randbedingungen und der betrieblichen, sicherheitstechnischen und lüftungstechnischen Ziele werden Strömungsverhältnisse im Tunnel entstehen, die hohe Anforderungen an die Betriebslüftung stellen. Neben den für den Normalbetrieb relevanten Beeinträchtigungen wie Temperaturen, Feuchtigkeit, Staub und Druckbelastungen sind insbesondere die Rauchentwicklung und die hohen Temperaturen im Ereignisfall zu beachten.

#### 3.1.4.2 Gesichtspunkte der potenziellen Beeinflussungen an den Systemschnittstellen

Folgende potenzielle Beeinflussungen an den Schnittstellen sind zu betrachten:

- Interaktion mit anderen Systemen, insbesondere die Tunnelleittechnik zur Steuerung und Überwachung der Lüftungsanlagen des Querschlags und der Querschlags Türen.

- Die Signalübertragung zu den übergeordneten Systemen hat eine sehr große Bedeutung.
- Interaktion mit den Querschlags Türen, da diese zur Trennung zwischen Unfallort und Fluchtweg dienen.
- Interaktion mit der Stromversorgung. Die Betriebs- bzw. Ereignislüftung funktioniert nur im Zusammenspiel mit der Stromversorgung via Mittelspannungs- und Niederspannungsverteilung der Tunneltechnik.
- Interaktion mit den Kopfrechnern und der Tunnelleittechnik. Das Tunnelleitsystem ist ein in sich funktionierendes System, welches mit externen Systemen wie Rettungskräfte oder Pannendienste in Verbindung treten muss.
- Interaktion mit der Klimatisierung und Belüftung der technischen Räume, in welchen systemrelevante Komponenten untergebracht sind.
- Reaktion auf Naturereignisse (Steinschlag, Erdbeben, Unwetter, unerwarteter Wassereinbruch im Tunnel) und auf Wetterbedingungen (Glatteis, Temperatur, Feuchtigkeit, Wind) bei den Tunnelportalbereichen.
- Interaktion mit Wartungsarbeiten. Korrekte Abläufe bei der Durchführung der Wartungsarbeiten sind vorausgesetzt. Unkorrekte Zustände, zum Beispiel bei Querschlags Türen, Strahlventilatoren, Zugangstüren zu den technischen Räumen oder der Tunnelbeleuchtung, könnten die Betriebsangehörigen während der Wartungsarbeiten beträchtlich gefährden.
- Interaktion mit dem Erdungssystem der Tunnelleittechnik.

#### 3.1.4.3 Soziale Gesichtspunkte

- Die sozialen Gesichtspunkte beziehen sich in erster Linie auf die Kontakte zwischen Mensch und System. Bezogen auf die Betriebs bzw. Ereignislüftung sind folgende Personengruppen direkt betroffen: Betriebspersonal, Erhaltungspersonal, und Einsatzkräfte.

#### 3.1.4.4 RAMS-Auswirkungen

##### 3.1.4.4.1 RAMS-Auswirkungen von finanziellen Analysen des Systems

Das Verhältnis zwischen der Erfüllung der RAMS-Ziele, den Investitions- und den Betriebskosten ist zu optimieren. Konfliktpunkte und die entsprechenden Lösungen werden identifiziert und explizit dokumentiert.

##### 3.1.4.4.2 RAMS-Auswirkungen von Systemmachbarkeitsstudien

Allfällige Konflikte zwischen RAMS-Zielen und der technischen oder finanziellen Machbarkeit der Anlagen werden identifiziert und explizit dokumentiert.

#### 3.1.4.5 Gefahrenquellen

Eine Gefahr ist ein auf eine bestimmte Situation bzw. ein bestimmtes Projekt bezogener Vorgang oder Zustand, aus welchem potenziell ein Schaden für Mensch, Umwelt und/oder Sachgüter entstehen kann.

Die Hauptgefahrenquellen sind:

- Die Mitarbeiter, insbesondere das Erhaltungspersonal durch mögliche Wartungsfehler sowie das Betriebspersonal durch mögliche Bedienfehler
- Für die Betriebslüftung die klimatischen Bedingungen der Umgebung

- Mögliche technische Fehler und Ausfälle

Beim Zusammenführen der verschiedenen Systeme wird ferner der Einfluss einer Gefahrenquelle genau hinsichtlich der Auswirkung auf das Gesamtsystem untersucht. Die entsprechenden erkannten Gefahrenquellen sind in den nachfolgenden Kapiteln, insbesondere in der RAMS-Phase 3 Risikoanalyse, dargestellt.

### 3.1.4.6 Daten und Informationsquellen

#### 3.1.4.6.1 Frühere RAMS-Anforderungen

Da der Götschka Tunnel nicht nach RAMS Gesichtspunkten geplant und gebaut wurde, gibt es keine früheren RAMS-Anforderungen. Bisher wurden weder Risikoanalysen noch RAMS Kennwerte nach den RAMS Methoden ermittelt.

#### 3.1.4.6.2 Erkannte Gefahrenquellen für die RAMS-Performance

Die folgenden Hauptgefahrenquellen für die RAMS-Performance wurden identifiziert:

- Konflikte mit finanziellen Randbedingungen (Investitions- und/oder Betriebskosten)
- Konflikte mit Anrainern und Interessenvertretungen
- Konflikte mit der technischen Machbarkeit

Diese sind besonders die Folge von:

- Der unterirdischen Ausführung
- Des potentiell wachsenden Platzbedarfs der technischen Einrichtungen
- Änderungen an Anforderungen und Randbedingungen
- Große Abweichungen in der Vorhersage des zukünftigen Verkehrsaufkommens

#### 3.1.4.6.3 Aktuelle Sicherheitspolitik und Sicherheitsziele

Grundsätzlich wird eine dreigeteilte Strategie bei den Sicherheitsanstrengungen verfolgt:

1. Die Ereignisverhinderung durch ein möglichst sicheres Gesamtkonzept.
2. Prävention durch sehr gut geschulte Mitarbeiter und wiederkehrende Anstrengungen die Sicherheitsgrad zu optimieren. Zum Beispiel durch periodisch wiederkehrende Revalidierungen der Sicherheitsstandards.
3. Die Schadensausmaßminderung durch Abschwächung der Unfallfolgen und Optimierung der Selbst und Fremddrettung.

#### 3.1.4.6.4 Aktuelle Sicherheitsgesetzgebung

Die hier relevante Sicherheitsgesetzgebung besteht aus:

- Internationalen Richtlinien und Normen
- Nationalen Richtlinien und Normen
- Gesetzen und Verordnungen
- Regelwerken der ASFiNAG

### 3.1.4.7 Umfang der Managementanforderungen

#### 3.1.4.7.1 Folgende Komponenten sind für das RAMS-Management notwendig:

- Beschreibung der RAMS-Anforderungen, Risikoanalyse und Sicherheitsnachweis.

- Qualitätssicherung zur Reduktion der Projektrisiken.
- Aufsicht, Zulassung, Begutachtung und Betriebsbewilligung.
- Verifikation als unabhängige Begutachtung zur Reduktion der inhaltlichen Risiken.
- Validierung des Gesamtsystems.

#### 3.1.4.7.2 Beschreibung der RAMS-Anforderungen, Risikoanalyse und Sicherheitsnachweis

Die endgültige Festlegung der RAMS-Anforderungen ist Gegenstand der RAMS-Phasen 4 und 5. Die Risikoanalyse ist Gegenstand der RAMS-Phase 3. Die Risikoanalyse und Bestimmung Sicherheitsanforderungen sind Kernaufgaben bei der Planung. Der Sicherheitsnachweis über die Erfüllung der Anforderungen an die Anlagen des Götschka Tunnels gemäß Projektplanung und der in der Ausschreibung dieser Anlagen definierten Detailspezifikationen muss durch den Systemlieferanten erbracht werden.

#### 3.1.4.7.3 Qualitätssicherung zur Reduktion der Projektrisiken

Die Qualitätssicherung wird auf der Projektebene durchgeführt. Der entsprechende Ablauf hat nach geeigneten Qualitätsmanagementprozessen zu erfolgen. Die Definition der Qualitätsmanagementprozesse sowie deren Dokumentation ist Aufgabe des Tunnelbetreibers.

#### 3.1.4.7.4 Aufsicht, Zulassung, Begutachtung und Betriebsbewilligung

Die Aufsicht, Zulassung und Betriebsbewilligung ist eine Aufgabe des österreichischen Bundesministeriums für Verkehr, Innovation und Technologie in seiner Funktion als Aufsichtsbehörde des österreichischen Straßennetzes.

#### 3.1.4.8 **Verifikation als unabhängige Begutachtung zur Reduktion der inhaltlichen Risiken**

Die Verifikation der RAMS-Anforderungen sollte von einem unabhängigen Prüfer der nicht an der Erstellung der Dokumente beteiligt war durchgeführt werden. Sie wird im Rahmen der Freigabe der Dokumente durchgeführt.

#### 3.1.4.9 **Validierung des Gesamtsystems**

Die Validierung des Gesamtsystems hat durch den Systembetreiber zu erfolgen. Darüber hinaus hat auch der Systembetreiber dafür verantwortlich Sorge zu tragen, dass der validierte Status des Gesamtsystems aufrecht bleibt. Um das System in einem validierten Zustand zu halten, müssen alle vorgeschriebenen Wartungs- und Instandhaltungsmaßnahmen plangemäß durchzuführen. Alle Angehörigen des Betriebs- und Wartungspersonals müssen in regelmäßigen Abständen geschult und für Ereignisfälle trainiert werden. Sämtliche Maßnahmen müssen geplant, durchgeführt und dokumentiert werden.

## 3.2 **PHASE 2 - SYSTEMDEFINITION UND ANWENDUNGS-VORAUSSETZUNGEN/ -BEDINGUNGEN**

### 3.2.1 **Zielsetzung**

Die Phase 2 hat folgende Zielsetzungen, soweit sie die mögliche RAMS-Performance des Systems betreffen:

- Systembeschreibung und Festlegung der Betriebsaufgaben der Systeme sowie der Systemgrenzen.
- Erstellen der Anwendungsbedingungen, die die Systemmerkmale beeinflussen.

- Festlegung des Umfangs der Systemgefahrenanalyse.
- Erstellen der RAMS-Politik für das Gesamtsystem.
- Erstellen des Sicherheitsplans.

### 3.2.2 Eingangsgrößen

Eingangsgrößen für die Phase 2 Systemdefinition und Anwendungsvoraussetzungen/-Bedingungen sind alle gesetzlichen Vorschriften, das Dokument [13] sowie die Ergebnisse der RAMS-Phasen 1.

Neben den bereits erwähnten Anforderungen fließen die Ergebnisse der RAMS-Phase 1 ein. Die wichtigsten Ergebnisse sind:

- Die Anforderungen an Zuverlässigkeit, Verfügbarkeit und Instandhaltbarkeit der Betriebslüftung sind zentrale Aspekte, um eine hohe Sicherheit und Verfügbarkeit des Gesamtsystems zu gewährleisten.
- Die Tunnelumgebung stellt bezüglich Instandhaltbarkeit und Robustheit der gesamten Anlagen der Betriebslüftung erhöhte Anforderungen.
- Die hohen technischen Anforderungen an die Betriebslüftung beeinflussen besonders die Sicherheit aber auch die Verfügbarkeit des Gesamtsystems positiv.
- Die Anforderungen an die Subsysteme leiten sich aus den übergeordneten Anforderungen an den Betrieb des Tunnels ab.
- Aufwendungen hinsichtlich der Systeme sind immer auch Aufwendungen zur Erfüllung der RAMS-Anforderungen des übergeordneten Gesamtsystems.
- Gefahrenquellen werden bei dem komplexen System Götschka Tunnel konsequent analysiert.

Die Sicherheitspolitik und Sicherheitsstrategie umfasst:

- Verminderung der Ereignishäufigkeit
- Verminderung des Schadensausmaß im Ereignisfall

Die Hauptgefahrenquellen sind:

- Die Mitarbeiter, insbesondere das Erhaltungspersonal durch mögliche Wartungsfehler
- Das Betriebspersonal durch mögliche Bedienfehler
- Mögliche technische Fehler und Ausfälle
- Ungenügende Wartung

Beim Zusammenführen der verschiedenen Systeme wird ferner der Einfluss einer Gefahrenquelle genau hinsichtlich der Wirkung auf das Gesamtsystem untersucht. Die Hauptgefahrenquellen für die RAMS-Performance sind:

- Konflikte mit finanziellen Randbedingungen (Investitions- und/oder Betriebskosten)
- Konflikte mit der technischen Machbarkeit

Als Folge von Besonderheiten des Werks, wie:

- Die unterirdische Ausführung
- Der potentiell wachsende Platzbedarf der technischen Einrichtungen
- Die Änderungen an Anforderungen und Randbedingungen

### 3.2.3 Erfüllung der Anforderungen

### 3.2.3.1 Betriebsaufgaben, Systemgrenzen, Anwendungsbestimmungen, Gefahrenanalyse

Betriebsaufgaben-Profil des Systems:

*Zitat Anfang*[13]:

#### 3.2.3.1.1 Lüftungsziele und Strategien

Das Ziel der betrieblichen Lüftungsregelung ist die Einhaltung von Luftgütwerten, die ein gefahrloses Passieren der Tunnelanlage ermöglichen. Da diese Luftgütwerte (CO-Gehalt und Trübsicht) ständig gemessen werden, werden diese Messwerte auch zur Führung der Lüftungsregelung herangezogen. Die Luftgütemesswerte beinhalten inhärent alle Einflüsse des Verkehrs und der Umwelt wie die Verkehrsfrequenz, den unterschiedlichen Emissionsgrad aller Fahrzeuge, die Belastungsunterschiede durch Steigung oder Gefälle, die Tunnelverschmutzung sowie auch die meteorologischen Einflüsse. Sie sind das Ergebnis aller Einflüsse in Summe. Wichtig für den wirtschaftlichen Betrieb sind die optimale Einstellung der Regelglieder einerseits und eine ausreichende Wartung der Luftgütemesseinrichtung andererseits. Überschreitet der Maximalwert der Längsgeschwindigkeitsmessungen einer Tunnelröhre den zulässigen Wert von 10 m/s, so werden Strahlventilatoren in Gegenrichtung mittels eines Geschwindigkeitsregelkreises in Betrieb genommen, um die Geschwindigkeit auf diesen Wert zu begrenzen.

#### 3.2.3.1.2 Lüftungsbetrieb im Ereignisfall

Das Lüftungskonzept im Ereignisfall berücksichtigt drei unterschiedliche und zeitlich versetzte Phasen:

1. Während der ersten Phase direkt nach der Ereignisdetektion und noch vor dem Eintreffen der Rettungskräfte hat die Selbstrettung der Personen höchste Priorität. Die Lüftung wird in dieser Phase automatisch betrieben.
2. In der sich anschließenden zweiten Phase wird die Evakuierung der Personen durch die Rettungskräfte unterstützt. Normalerweise wird die Lüftung weiter automatisch betrieben, ein manueller Eingriff durch ausgebildete Spezialisten ist jedoch möglich.
3. Während der Löschphase hängt der Betrieb der Lüftung von den Anforderungen der Einsatzkräfte ab. Je nach Bedarf können die Lüftungsfunktionen manuell der Einsatzstrategie angepasst werden.

Die ersten 5-10 Minuten eines Ereignisses sind für die Selbstrettung entscheidend. Die automatischen Abläufe der Lüftungssteuerung müssen in diesem Zeitfenster die bestmöglichen Rettungsbedingungen schaffen. Die nachfolgend aufgelisteten Grundsätze werden in den folgenden Kapiteln weiter vertieft. Sie bilden die Basis für den Lüftungsbetrieb im Ereignisfall:

1. Im Ereignisfall bei fließendem Richtungsverkehr mit Ereignisort innerhalb des Tunnels wird der Rauch über die zwei dem Ereignisort am nächsten liegenden Abluftklappen konzentriert abgezogen. Die Längsströmung vor dem Absaugbereich muss mindestens 1.2 m/s betragen RVS 09.02.31 [10] Kapitel 7.5.4 Seite 22). Die Strahlventilatoren werden zur Kontrolle dieser Längsströmungsanforderungen eingesetzt.
2. Im Ereignisfall bei stockendem Richtungsverkehr oder Stau ( $V_{\text{mittel}} < 30$  km/h) mit Ereignisort innerhalb des Tunnels wird der Rauch ebenfalls über die dem Ereignisort am nächsten liegenden Abluftklappen konzentriert abgezogen. Es muss nun eine

gleich große Luftlängsgeschwindigkeit im Fahrraum von beiden Seiten zum Brandbereich erzeugt werden RVS 09.02.31 [10] Kapitel 7.5.4 Seite 22. Die Strahlventilatoren werden wiederum zur Kontrolle der Längsströmungsanforderungen eingesetzt.

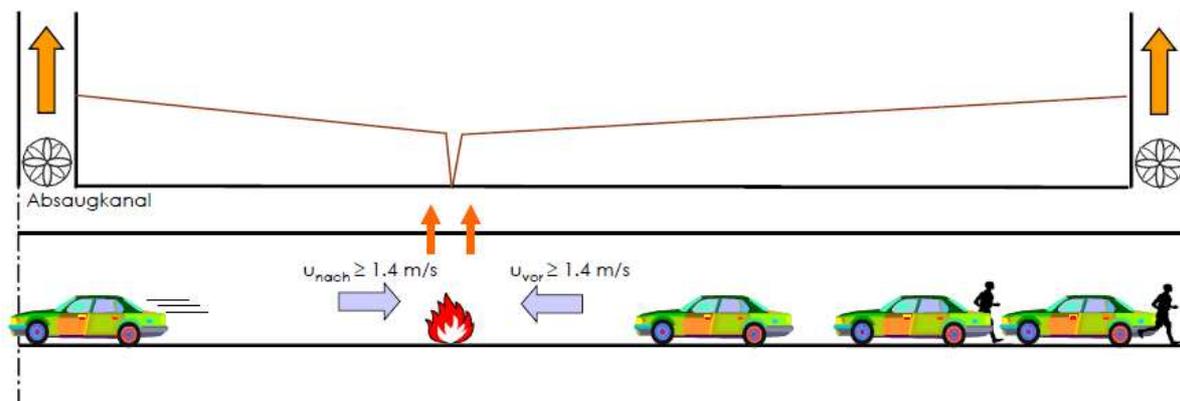


Abbildung 40: Schematische Darstellung eines Ereignisfalls und konzentrierter Absaugung

### 3.2.3.1.3 Klappensteuerung

Die zwei dem Ereignisort zugeordneten Abluftklappen werden sofort nach der Ereignisdetektion voll geöffnet. Die Zuordnung erfolgt über vordefinierte Brandzonen. Bei fließendem Verkehr werden Klappen in Fahrtrichtung geöffnet, bei stockendem Verkehr oder Stau symmetrisch zum Ereignisort. Sollten sich Klappen der betroffenen Brandzone nicht öffnen, werden Ersatzklappen bestimmt und betätigt. Sobald die Lüftungssteuerung von den Abluftklappenendschaltern die Rückmeldung erhält, dass diese effektiv geöffnet sind, werden alle anderen, eventuell vorher offen gewesenen Abluftklappen geschlossen. Die Position der Abluftklappen im Normalbetrieb ist geschlossen. Sollte die Klappensteuerung versagen und eine Rückmeldung von geöffneten Abluftklappen ausbleiben, werden die Abluftventilatoren nicht in Betrieb genommen, sondern wird der Tunnel abhängig von der Verkehrssituation längsgelüftet.

### 3.2.3.1.4 Ventilatoren Steuerung

Um den freigesetzten Rauch abzusaugen, werden beide Abluftventilatoren in den Portalzentralen simultan in Betrieb genommen und simultan hochgefahren, um aerodynamische Instabilitäten aufgrund der festen Laufschaufeln zu vermeiden. Diese Synchronisierung ist über eine automatische Steuerung zu realisieren. Steht einer dieser Ventilatoren nicht zur Verfügung, wird nur der verbleibende Ventilator eingeschaltet.

Es ist weiterhin mittels der automatischen Steuerung sicherzustellen, dass im Falle eines zeitversetzten Zuschaltens des zweiten Ventilators (z. B. bei Handbetrieb) der schon in Betrieb befindliche Ventilator zuvor auf seine minimale Leistung zurückgenommen wird, um dann synchron mit dem zweiten Ventilator wieder hochzufahren. Die Fördermengen der Ventilatoren werden nach Brandzonenabhängigen Sollwertvorgaben eingeregelt.

### 3.2.3.1.5 Betrieb der Strahlventilatoren

Die Strahlventilatoren der Tunnelröhre werden abhängig von der gemessenen Längsgeschwindigkeit geregelt. Bei fließendem Richtungsverkehr muss die Längsströmung gegen den Ereignisort vor dem Absaugbereich mindestens  $\geq 1.2$  m/s betragen. Bei stockendem Richtungsverkehr oder Stau muss die Längsströmung vor und nach dem Absaugbereich jedoch den gleichen Betrag aufweisen RVS 09.02.31 [10].



*Zitat Ende*

Die Betriebslüftung wurde primär als Sicherheitsanlage für den Ereignisfall dimensioniert. Die Sicherheit der im Tunnelsystem anwesenden Menschen steht im Vordergrund.

### 3.2.4 RAMS-Zielsetzungen

Für die Sicherheit im Tunnelbetrieb ist ein ausgewogenes Zusammenspiel baulicher, technischer, lüftungsspezifischer, betrieblicher und rettungstechnischer Maßnahmen ausschlaggebend. Nicht die Maximierung von Einzelelementen, sondern die Optimierung des Gesamtsystems ist entscheidend. Eine hohe Systemverfügbarkeit ist von zentraler Bedeutung sowie eine einfache, einheitliche Installation sämtlicher Komponenten und definierter und geregelter Betriebsabläufe. Die ereignisverhindernden Maßnahmen bilden den eigentlichen Schwerpunkt in der Tunnelsicherheit. Kann die wahrscheinliche Häufigkeit eines Schadensereignisses nur ungenügend gesenkt werden, ist eine Reduktion des Schadensausmaßes durch geeignete Maßnahmen zu erreichen.

#### 3.2.4.1 Langzeitbetriebs-Strategie, Lebens- / Nutzungsdauer

*Zitat Anfang[10]:*

Maßgebend für die Entscheidung für ein Lüftungssystem sind die Wirtschaftlichkeit und die sicherheitstechnische Analyse im Betriebs- und Brandfall. Für die wirtschaftlichen Überlegungen ist mit einer Lebensdauer der elektromaschinellen Ausrüstungsteile von 20 Jahren zu rechnen. Für die baulichen Anlagen ist in der Regel eine Lebensdauer von 80 Jahren anzusetzen.

*Zitat Ende*

Während dieser Lebensdauer muss eine hohe Zuverlässigkeit der Komponenten gewährleistet werden, um Revisionen und Reparaturen auf ein Minimum zu reduzieren. Der Startpunkt der Lebensdauer gilt ab dem Einbauzeitpunkt der jeweiligen Komponente. Das Kalenderjahr besteht aus 365 Tage à 24 Stunden. Somit ergeben sich 8760 Stunden pro Jahr.

#### 3.2.4.2 Systemgrenzen

Die ÖNORM EN 50126 verlangt die Definition der Schnittstellen der betrachteten Systems zur Systemumgebung. Die Dimensionierung der Betriebslüftung ist an folgende Randbedingung geknüpft:

- Bauliche Grenzen: Tunnelquerschnitt und Querschnitte der Querschlagbelüftung
- Barometrischer Druckunterschiede an Portalen
- Verkehrsdaten für den Zeitpunkt der geplanten Tunneleröffnung sowie zehnjährige Verkehrsprognose des Tunnelbetreibers
- Verkehrsart (Richtungsverkehr, Gegenverkehr, periodischer Gegenverkehr, maximale Verkehrsstärke, stockender Verkehr)
- Anlagenverhältnisse (Länge, Steigung, Querschnitt, Fluchtwege)
- Umfeld Situation (Immissionen, Schutzmaßnahmen)
- Energieversorgungssystem. Insbesondere alle für die Lüftungskomponenten erforderlichen Mittelspannungsenergieversorgungsanlagen
- Bauliche Ausführung der Tunnelportale

### 3.2.4.3 Schnittstelle zu Personen

#### 3.2.4.3.1 Wartungspersonal:

Um das Gesamtsystem in einem validierten Zustand zu halten, dürfen sämtliche Wartungs- und Instandhaltungsarbeiten ausschließlich von geschultem Wartungspersonal durchgeführt werden. Alle Wartungsarbeiten müssen geplant, von nachgewiesenermaßen qualifiziertem Personal durchgeführt und dokumentiert werden.

#### 3.2.4.3.2 Betriebspersonal:

Im Ereignisfall ist die Entscheidung des Menschen über die notwendigen Notfallmaßnahmen wie die Wahl des richtigen Lüftungsszenarios, Verständigung der Rettungskräfte sowie Bedienung des Verkehrsleitsystems von entscheidender Bedeutung. Im Rahmen dieser RAMS Wertebestimmung wird davon ausgegangen, dass diese wichtigen Entscheidungen richtig getroffen werden.

Die nachfolgende Liste gibt einige Hinweise für Faktoren, welche die Zuverlässigkeit der richtigen Entscheidung sowie die Richtigkeit der Eingabe des Lüftungsszenarios beeinflussen:

- Anzahl der Personen in der Tunnelkontrollwarte
- Anordnung der Anzeigen und Steuergeräte in der Tunnelkontrollwarte
- Informationssicherheit und Plausibilitätschecks
- Gliederung, Reihenfolge und Übersichtlichkeit von Meldungen
- Bedienungsfreundlichkeit des Computersteuerungssystems
- Braucht es zum Starten des Lüftungsszenarios zwei Eingaben (z.B. von zwei Personen, Vier-Augen-Prinzip)?
- Wie schnell kann ein falsches Lüftungsszenario gewechselt werden?
- Wie schnell und wodurch wird die Wahl eines falschen Lüftungsszenario erkannt?

### 3.2.4.4 Schnittstelle zur anschließenden Verkehrsinfrastruktur

Die gesamte Infrastruktur wird durch ein einzelnes Unternehmen (ASFiNAG) betrieben. Der Götschka Tunnel ist ein Verkehrsinfrastrukturbestandteil, der durch eine komplexes Verkehrsüberwachungs- und Leitsystem überwacht wird.

### 3.2.4.5 Anwendungsbedingungen, die das System beeinflussen

#### 3.2.4.5.1 Instandhaltungsbedingungen des Systems:

Der Instandhaltung kommt eine sehr große Bedeutung in Hinsicht auf die Tunnelsicherheit zu. In Zusammenarbeit mit dem Tunnelbetreiber muss ein Verfahren zur Systemüberwachung ausgearbeitet werden. Bei der Systemüberwachung wird zwischen zwei prinzipiellen Vorgangsweisen unterschieden:

- Permanente automatische Überwachung
- Periodische manuelle Überwachung

#### 3.2.4.5.2 Permanente automatische Überwachung

Bei der permanenten Systemüberwachung müssen über den Kopfrechner gesteuerte Prüfrutinen programmiert werden die permanent die Verfügbarkeit der Systemkomponenten überwachen. Bei einem Ausfall einer Komponente muss sofort ein automatischer Alarm in der Tunnelkontrollwarte ausgelöst und deren Reparatur in Auftrag gegeben werden. Für alle Komponenten die Sensoren beinhalten müssen für die Sensorergebnisse geeignete Unter und

Obergrenzen, zwischen denen sich die Messergebnisse bewegen dürfen, definiert und überwacht werden. Bei redundant ausgeführten Komponenten sind automatische Plausibilitätschecks vorzusehen.

#### 3.2.4.5.3 Periodische manuelle Überwachung

Bei Komponenten, deren Funktion nicht permanent automatisch überwacht werden kann, sind periodisch wiederkehrende manuelle Prüfungen vorzusehen. Im Kopfrechner sind diese als zeitlich festgelegte Prüfungen zu programmieren. Der Kopfrechner gibt nach Ablauf einer definierten Zeit den Befehl zur manuellen Prüfung der Komponente. Ist die Prüfung erfolgreich absolviert, kann das Bedienpersonal das System als erfolgreich geprüft zurückmelden. Ab diesem Zeitpunkt beginnt die Zeit bis zur nächsten Prüfung erneut zu laufen. Permanente automatische Überwachungssysteme sind der periodisch manuellen Überwachung immer vorzuziehen.

### 3.3 PHASE 3 – RISIKOANALYSE

#### 3.3.1 Zielsetzung der Phase 3 Risikoanalyse

Die Phase 3 hat folgende Zielsetzungen:

- Die Identifikation von Gefahren, die mit den entsprechenden Systemen verbunden sind.
- Die Identifikation der Ereignisse, die diese Gefahren auslösen und der Umstände, die das Eintreten dieser Ereignisse ermöglichen oder begünstigen.
- Die Bestimmung des mit den Gefahren verbundenen Risikos.
- Die Erstellung eines Prozesses für ein kontinuierliches Risikomanagement.

#### 3.3.2 Eingangsgrößen

Eingangsgrößen für die Phase 3 sind alle gesetzlichen Vorschriften, das Dokument [\[13\]](#) sowie die Ergebnisse der RAMS-Phasen 1 und 2.

#### 3.3.3 Einleitung

Der in dieser Risikoanalyse verwendete Aufbau des RAMS-Modells gilt für das Ereignis „Fahrzeugbrand im Götschka Tunnel“.

Das RAMS-Modell ist so aufgebaut, dass alle für den Ereignisfall benötigten Subsysteme und Komponenten funktionieren müssen. Ein Ausfall einer nicht redundanten Komponente oder eines nicht redundanten Subsystems führt zu einem Fehler des gesamten Systems. Bei den redundanten Komponenten führt nur die gleichzeitige Störung aller Komponenten zu einem Versagen des gesamten Systems.

#### 3.3.4 Komponenten

Die verwendeten Werte für die Komponenten (MTBF, MTTR) müssen nach Möglichkeit von den Herstellern der einzelnen Komponenten bezogen werden. Da die Daten der Komponenten die im Götschka Tunnel verwendet wurden für diese Diplomarbeit nicht zur Verfügung standen, wurden die entsprechenden MTBF sowie MTTR-Werte von vergleichbaren Komponenten, die im Gotthard Basistunnel zum Einsatz gekommen sind, verwendet und daraus die Verfügbarkeit des Systems berechnet. Bei Straßentunnel spezifischen Komponenten die im Gotthard Eisenbahntunnel keine Verwendung finden wurden Daten

vergleichbarer Systeme im Internet recherchiert. Der MTBF-Wert beschreibt eine rein statistische Ausfallwahrscheinlichkeit der Komponente, die nur unter der Berücksichtigung der jeweiligen Randbedingungen (Temperatur, Feuchtigkeit, Druck, usw.) gültig ist.

### 3.3.5 Redundanzen

Im RAMS-Modell sind die Redundanzen immer auf die Komponenten oder Subsysteme bezogen. Redundanzen sind immer an Randbedingungen geknüpft. Wo immer es möglich ist, sollte eine örtliche Trennung der redundanten Komponenten vorgenommen werden. Da davon ausgegangen wird, dass ein Ausfall einer Komponente keine Änderung der Umgebungsbedingungen für die redundante Komponente verursacht, und die ausgefallene Komponente in der vorgegebenen MTTR-Zeit repariert oder ersetzt wird, wurden die modellierten Redundanzen immer als hundertprozentige Redundanzen betrachtet.

### 3.3.6 RAMS-Modell

Im Folgenden wird der Aufbau des RAMS-Modells erklärt. Es gilt für den Ereignisfall „Fahrzeugbrand im Götschka Tunnel“ und stellt das Grundmodell dar.

Der zu analysierende Fahrzeugbrand hat folgende Randbedingungen:

Der Fahrzeugbrand ist ein Heißbrand, der von dem im Götschka Tunnel verwendeten Brandlinienmeldekabel detektiert werden kann. Die in der Einteilung der Gefahrenstufen berücksichtigten Opferzahlen beruhen ausschließlich auf Opfern, die als direkte Ursache dem Brand selbst zugeordnet werden müssen. Da in dieser Risikoanalyse die Funktionsweise der Tunnellüftung im Brandfall bewertet werden soll, werden Opfer die durch mechanische Einflüsse, wie zum Beispiel Auffahrunfälle und Kollisionen mit dem Gegenverkehr oder den Tunnelwänden zu Schaden kommen, nicht berücksichtigt.

Folgende Ausfallszenarien werden mit Anpassungen am Grundmodell analysiert:

- Ausfall der Kopfrechner trotz hundertprozentiger Redundanz
- Ausfall der Mittelspannungsversorgung trotz hundertprozentiger Redundanz
- Ausfall der Niederspannungsversorgung trotz hundertprozentiger Redundanz
- Ausfall der automatischen Branddetektion trotz hundertprozentiger Redundanz
- Ausfall der Längsströmungsmessung
- Ausfall der Strahlventilatoren
- Ausfall der Querschlagbelüftung
- Ausfall der Axialventilation
- Ausfall der Abluftklappen

In den Modellen wurden folgende Annahmen getroffen:

- 1) Bei sämtlichen Komponenten werden konstante Ausfallraten vorausgesetzt.
- 2) Die Hauptstromversorgung ist zu 100% verfügbar.

### 3.3.7 System und Komponentenübersicht

In der folgenden Abbildung ist ein Prinzip Schema des Götschka Tunnels dargestellt. Es werden alle Komponenten, die in dieser Abbildung dargestellt sind, effektiv für dieses Brandszenario benötigt. Die rechnerischen sowie logischen Abhängigkeiten von den einzelnen Komponenten sind in weiteren Abbildungen dargestellt. Aus diesen ist ersichtlich welche Komponenten für das vorgegebene Brandszenario benötigt werden und wie diese verknüpft sind.

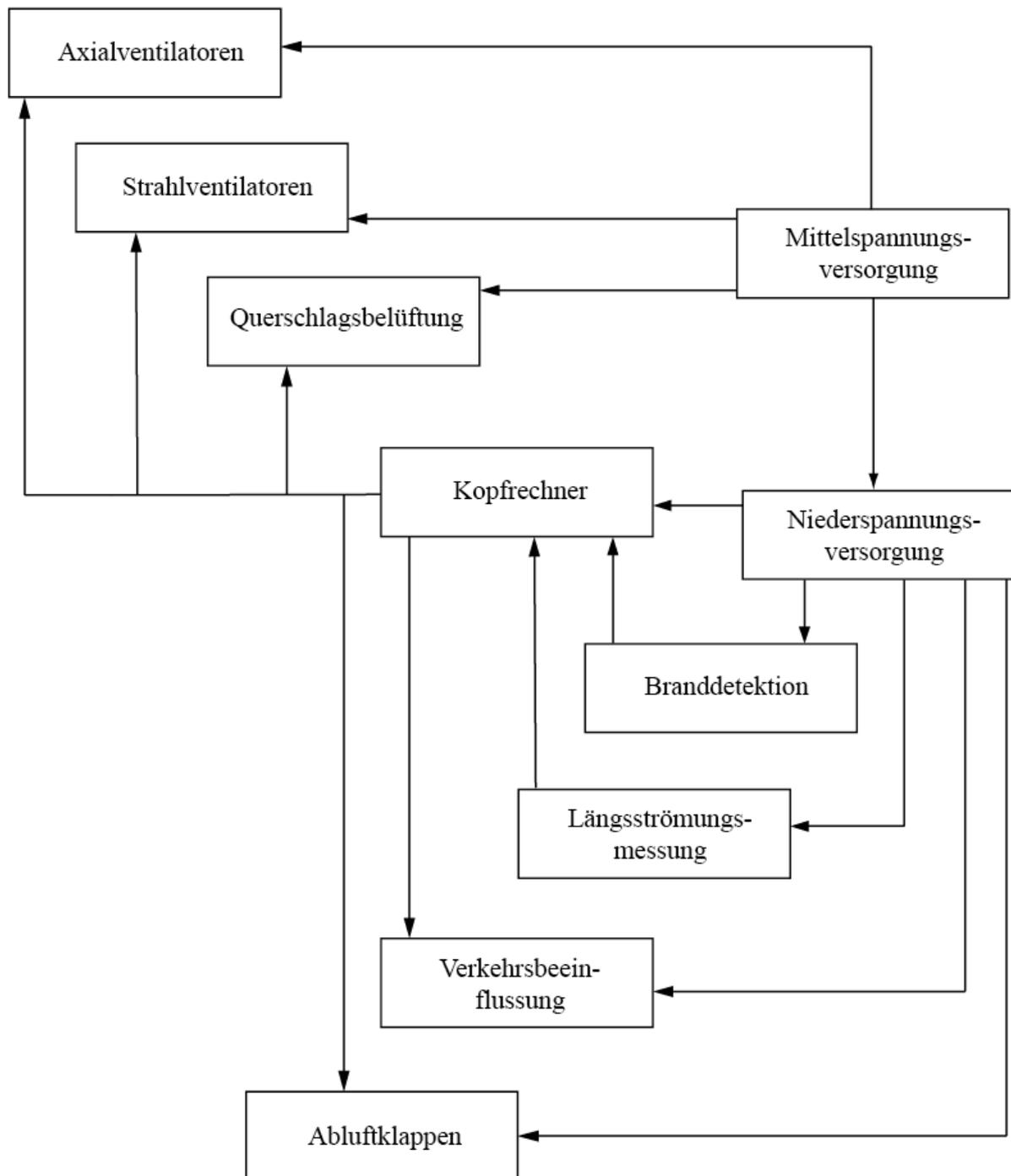


Abbildung 42: Gesamtstruktur der technischen Komponenten des Systems Götschka Tunnel

| Bezeichnung                 | Komponente                  | MTBF [h] | $\lambda$ [1/h] | MTTR [h] | Reparaturzeit [h] | Zeit vor Ort [h] |
|-----------------------------|-----------------------------|----------|-----------------|----------|-------------------|------------------|
| Kopfrechner                 |                             |          |                 | 28       | -                 | -                |
|                             | Kopfrechner                 | 3,57E+04 | 2,80E-05        | 28       | 4                 | 24               |
| Mittelspannungsanlage       |                             |          |                 | 29       | -                 | -                |
|                             | Mittelspannungsschalter     | 2,13E+05 | 4,69E-06        | 29       | 5                 | 24               |
|                             | Leistungsschutzschalter     | 5,60E+05 | 1,79E-06        | 29       | 5                 | 24               |
|                             | Relais                      | 1,50E+06 | 6,67E-07        | 29       | 5                 | 24               |
| Niederspannungsanlage       |                             |          |                 | 29       | -                 | -                |
|                             | Einspeiseschalter           | 5,60E+05 | 1,79E-06        | 29       | 5                 | 24               |
|                             | Leistungsschutzschalter     | 5,60E+05 | 1,79E-06        | 29       | 5                 | 24               |
|                             | Relais                      | 1,50E+06 | 6,67E-07        | 29       | 5                 | 24               |
| Längsströmungsmessgerät     |                             |          |                 | 28,5     | -                 | -                |
|                             | Luftgeschwindigkeitsmesser  | 4,69E+04 | 2,13E-05        | 29       | 5                 | 24               |
|                             | Elektr. Steuerung/ Regelung | 1,32E+05 | 7,58E-06        | 28       | 4                 | 24               |
| Strahlventilator            |                             |          |                 | 31       | -                 | -                |
|                             | Schalter                    | 2,13E+05 | 4,69E-06        | 29       | 5                 | 24               |
|                             | Elektr. Steuerung/ Regelung | 1,32E+05 | 7,58E-06        | 32       | 8                 | 24               |
|                             | Antriebsmotor               | 1,47E+05 | 6,80E-06        | 32       | 8                 | 24               |
| Querschlags Belüftung       |                             |          |                 | 30       | -                 | -                |
|                             | Elektr. Steuerung/ Regelung | 1,32E+05 | 7,58E-06        | 32       | 8                 | 24               |
|                             | Antriebsmotor               | 1,00E+06 | 1,00E-06        | 32       | 8                 | 24               |
|                             | Lamellen                    | 7,14E+06 | 1,40E-07        | 29       | 5                 | 24               |
|                             | Klappenantrieb              | 1,75E+05 | 5,71E-06        | 29       | 5                 | 24               |
|                             | Schalter                    | 2,13E+05 | 4,69E-06        | 28       | 4                 | 24               |
| Automatische Branddetektion |                             |          |                 | 29       | -                 | -                |
|                             | Brandlinienmeldekabel       | 2,89E+05 | 3,46E-06        | 29       | 5                 | 24               |
| Axialventilator             |                             |          |                 | 28,5     | -                 | -                |
|                             | Mittelspannungsschalter     | 2,13E+05 | 4,69E-06        | 29       | 5                 | 24               |
|                             | Transformator               | 5,00E+05 | 2,00E-06        | 28       | 4                 | 24               |
|                             | Frequenzumrichter           | 8,00E+04 | 1,25E-05        | 28       | 4                 | 24               |
|                             | Motor                       | 2,00E+05 | 5,00E-06        | 28       | 4                 | 24               |
|                             | Laufschaufelverstellung     | 4,00E+06 | 2,50E-07        | 29       | 5                 | 24               |
|                             | Fremdkühlung                | 2,00E+06 | 5,00E-07        | 29       | 5                 | 24               |
| Abluftklappe                |                             |          |                 | 30       | -                 | -                |
|                             | Elektr. Steuerung/ Regelung | 1,32E+05 | 7,58E-06        | 32       | 8                 | 24               |
|                             | Lamellen                    | 7,14E+06 | 1,40E-07        | 29       | 5                 | 24               |
|                             | Klappenantrieb              | 1,75E+05 | 5,71E-06        | 29       | 5                 | 24               |

Tabelle 27: MTBF und MTTR Werte der einzelnen Komponenten vom Götschka Tunnel

Die Zeit, bis ein qualifizierter Servicetechniker mit dem zur Reparatur notwendigen Werkzeug braucht, um mit der Reparatur vor Ort beginnen zu können, wird vom Tunnelbetreiber vorgeschrieben. Diese Zeit hat einen sehr großen Einfluss auf die Verfügbarkeit des Systems. Hier wird diese Zeitspanne pauschal mit 24 Stunden angenommen. Die Reparaturzeiten müssen mit dem Servicepersonal möglichst exakt erhoben werden. Da das im Rahmen dieser Diplomarbeit nicht möglich ist, werden die entsprechenden Reparaturzeiten der Komponenten des Götschka Tunnel analog zu denen bei Gotthard Basistunnel ermittelten Reparaturzeiten angenommen. Der MTTR Wert ist die Summe aus der Zeit die benötigt wird bis der Servicetechniker vor Ort ist und der Zeit die er für die Reparatur inklusive eines aussagekräftigen Tests des Systems benötigt. Die in Tabelle 27 angegebenen MTBF Werte der einzelnen Komponenten aus den Götschka Tunnel standen für diese Diplomarbeit leider nicht zur Verfügung und wurden analog zu denen aus den Gotthard Basistunnel festgelegt.

#### **3.3.7.1 Kopfrechner**

Siehe Kapitel 2.3.7.1

#### **3.3.7.2 Mittelspannungsanlage**

Siehe Kapitel 2.3.7.2

#### **3.3.7.3 Mittelspannungsversorgung**

Siehe Kapitel 2.3.7.3

#### **3.3.7.4 Niederspannungsanlage**

Siehe Kapitel 2.3.7.4

#### **3.3.7.5 Niederspannungsversorgung**

Siehe Kapitel 2.3.7.5

#### **3.3.7.6 Automatische Branddetektion**

Siehe Kapitel 2.3.7.6

#### **3.3.7.7 Längsströmungsmessgerät**

Siehe Kapitel 2.3.7.7

#### **3.3.7.8 Längsströmungsmessung**

Siehe Kapitel 2.3.7.8

#### **3.3.7.9 Strahlventilator**

Siehe Kapitel 2.3.7.9

#### **3.3.7.10 Strahlventilatoren**

Im Götschka Tunnel sind, wie in Abbildung 43 dargestellt 16 Strahlventilatoren verbaut.

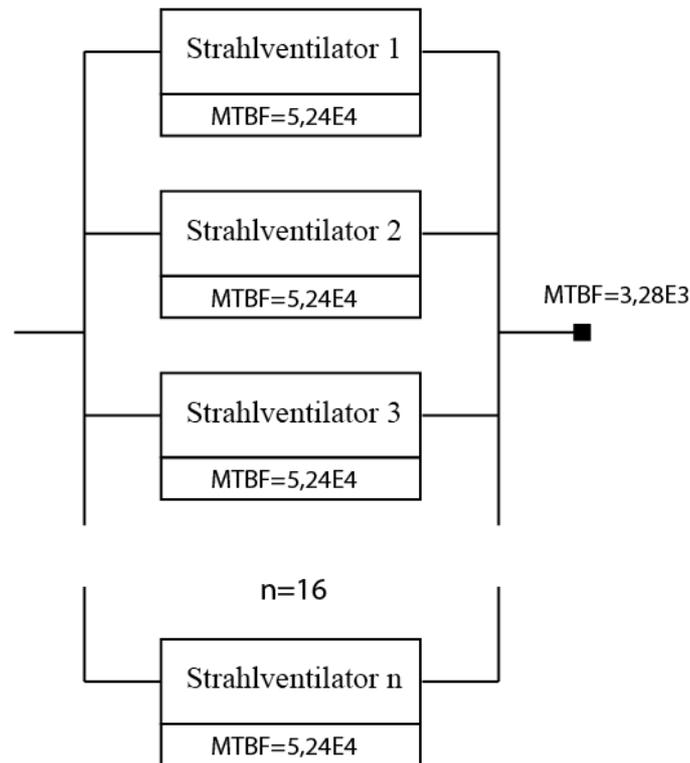


Abbildung 43 Aufbau der Strahlventilatoren

Für einen Normbrand von 30MW müssen alle 16 Strahlventilatoren (16/16) verfügbar sein. Die Lage des Brandortes kann das Betreiben der beiden nächstgelegenen Strahlventilatoren verbieten. In diesem Fall werden nur 14 der 16 Strahlventilatoren verwendet. Da das System nach diesen Gesichtspunkten ausgelegt wurde reichen 14 Strahlventilatoren aus um die Tunnellüftung, wie gewünscht, betreiben zu können. Die Prioritäten zur Verwendungsreihenfolge der Strahlventilatoren können im Dokument Planung der Tunnellüftungsanlagen Götschka Tunnel [13] entnommen werden. Die MTTR für das gesamte System ergibt sich aus dem arithmetischen Mittel von der MTTR der einzelnen Komponenten (siehe Tabelle 27).

Der MTBF Wert aller Strahlventilatoren beträgt  $3,28E3$  Stunden.

### 3.3.7.11 Querschlagbelüftung

Siehe Kapitel 2.3.7.11

### 3.3.7.12 Axialventilator

In Abbildung 44 ist der Axialventilator bestehend aus einem Mittelspannungsschalter, einem Transformator, einem Frequenzumrichter, einem Motor, einer Laufschaufelverstellung und einer Fremdkühlung in serieller Abhängigkeit dargestellt.

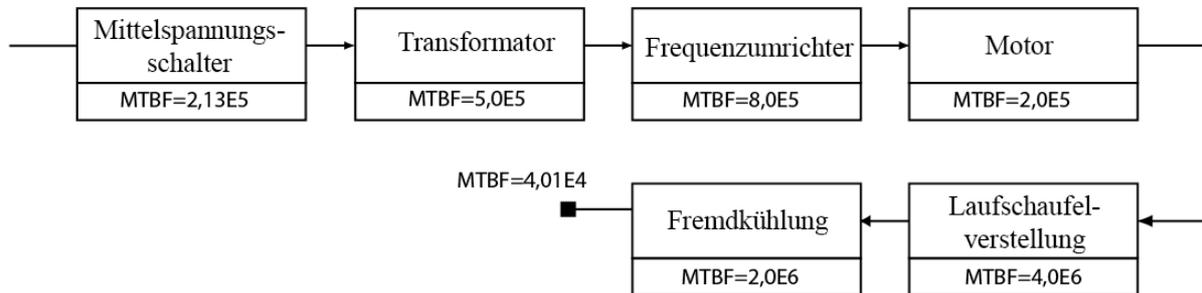


Abbildung 44: Aufbau Axialventilator

Der MTBF Wert eines einzelnen Axialventilators beträgt 4,01E4 Stunden.

### 3.3.7.13 Abluftklappe

In Abbildung 45 ist eine Abluftklappe bestehend aus einer elektrischen Steuer und Regeleinheit, Lamellen und einem Klappenantrieb in serieller Abhängigkeit dargestellt.

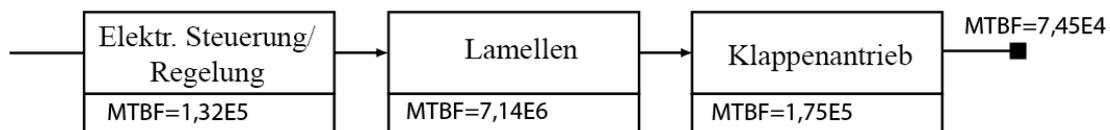


Abbildung 45: Aufbau Abluftklappe

Der MTBF Wert einer einzelnen Abluftklappe beträgt 7,45E5 Stunden.

## 3.3.8 Ausfallswahrscheinlichkeiten für die Szenarien 1 bis 7

### 3.3.8.1 Ausfallswahrscheinlichkeit für Szenario 1: Ausfall der Kopfrechner im Götschka Tunnel

Siehe Kapitel 2.3.8.1

### 3.3.8.2 Ausfallsszenario 2: Ausfall der Mittelspannungsversorgung im Götschka Tunnel

Siehe Kapitel 2.3.8.2

### 3.3.8.3 Ausfallsszenario 3: Ausfall der Niederspannungsversorgung im Götschka Tunnel

Siehe Kapitel 2.3.8.3

### 3.3.8.4 Ausfallsszenario 4: Ausfall der automatischen Branddetektion im Götschka Tunnel

Siehe Kapitel 2.3.8.4

### 3.3.8.5 Ausfallsszenario 5: Ausfall der Längsströmungsmessung im Götschka Tunnel

Siehe Kapitel 2.3.8.5

### 3.3.8.6 Ausfallsszenario 6: Ausfall der Strahlventilatoren im Götschka Tunnel

Im Ausfallsszenario 6 wird der MTBF Wert für die Strahlventilatoren in Abhängigkeit aller für den Betrieb notwendigen Systemkomponenten berechnet.

In der Abbildung 42 können die Abhängigkeiten von den anderen Systemkomponenten leicht erkannt werden. Wie in Abbildung 46 dargestellt ist für den planmäßigen Betrieb der Strahlventilatoren die Stromversorgung durch die Mittelspannungsversorgung und die Steuerung durch die Kopfrechner notwendig. Es besteht eine serielle Abhängigkeit zwischen den Kopfrechnern, der Mittelspannungsversorgung und den Strahlventilatoren.

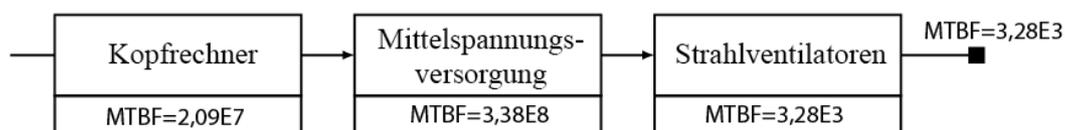


Abbildung 46: Systemkomponentenabhängigkeit der Strahlventilatoren

Der MTBF Wert für den Ausfall der Strahlventilatoren beträgt 3,28E3 Stunden. Das entspricht 0,374 Jahren. Die Ausfallswahrscheinlichkeit pro Jahr beträgt:

$$\text{Ausfallswahrscheinlichkeit} = \frac{1}{0,374} = 2,67$$

### 3.3.8.7 Ausfallsszenario 7: Ausfall der Querschlagbelüftung im Götschka Tunnel

Siehe Kapitel 2.3.8.7

### 3.3.8.8 Ausfallsszenario 8: Ausfall der Axialventilation im Götschka Tunnel

Im Ausfallsszenario 8 wird der MTBF Wert für die Axialventilation in Abhängigkeit aller für den Betrieb notwendigen Systemkomponenten berechnet.

In der Abbildung 42 können die Abhängigkeiten von den anderen Systemkomponenten leicht erkannt werden.

Im Götschka Tunnel ist an jedem Tunnelportal ein Axialventilator verbaut. Wie in Abbildung 47 dargestellt müssen beide Axialventilatoren (2/2) funktionieren um im Brandfall die entstehenden Rauchgase absaugen zu können. Da es keine serielle Abhängigkeit zwischen den beiden Axialventilatoren gibt ist die parallele Darstellung notwendig. Weil beide Axialventilatoren unabhängig voneinander funktionieren müssen, kann man hier nicht von Redundanz sprechen. Die MTTR für das gesamte System ergibt sich aus dem arithmetischen Mittel von der MTTR der einzelnen Komponenten (Tabelle 27).

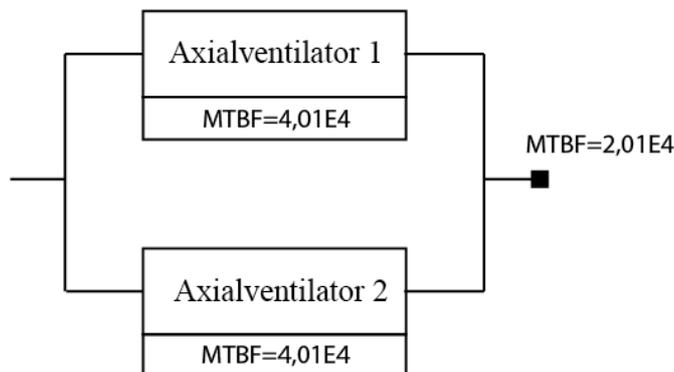


Abbildung 47: Zusammenhang zwischen beiden Axialventilatoren

Die MTBF Zeit der Axialventilatoren beruht auf der Annahme des permanenten Betriebs der Komponenten. Da die Axialventilatoren ausschließlich im Ereignisfall und zu Test sowie Wartungszwecken betrieben wird muss ein sogenannter Duty Cycle Faktor berücksichtigt

werden. Dieser Faktor gibt das Verhältnis zum Dauerbetrieb an und wird für die Axialventilatoren mit 10% angesetzt.  $MTBF = \frac{2,01E4}{0,1} = 2,01E5$

Die Axialventilation besteht, wie in Abbildung 48 dargestellt, aus dem Kopfrechner, der Mittelspannungsversorgung und den beiden Axialventilatoren, und in serieller Abhängigkeit.



Abbildung 48: Aufbau Axialventilation

Der MTBF Wert der Axialventilation beträgt 1,99E5 Stunden. Das entspricht 22,7 Jahren. Die Ausfallswahrscheinlichkeit pro Jahr beträgt:

$$\text{Ausfallswahrscheinlichkeit} = \frac{1}{22,7} = 4,4E - 2$$

### 3.3.8.9 Ausfallsszenario 9: Ausfall der Abluftklappen im Götschka Tunnel

Im Ausfallsszenario 9 wird der MTBF Wert für die Abluftklappen in Abhängigkeit aller für den Betrieb notwendigen Systemkomponenten berechnet.

Im Götschka Tunnel sind wie in Abbildung 49 dargestellt 40 Abluftklappen verbaut. Im Dokument [13] unter Punkt 10.6.1 auf Seite 130 Lüftungsanlagen des Straßentunnels steht für die Funktionsfähigkeit der Abluftklappen folgendes:

*Zitat Anfang [13]:*

- Ist eine Abluftklappe nicht verfügbar und offen, muss der Betrieb sie innerhalb eines noch zu definierenden Zeitraums manuell schließen. Nach diesem Zeitraum sind die minimalen Betriebsbedingungen nicht mehr erfüllt.
- Sind mehr als eine Abluftklappe nicht verfügbar und offen, sind die minimalen Betriebsbedingungen nicht mehr erfüllt.
- Wenn mehr als 3 nicht aufeinanderfolgende und geschlossene Abluftklappen nicht verfügbar sind, sind die minimalen Betriebsbedingungen nicht mehr erfüllt.
- Wenn mehr als 2 aufeinanderfolgende und geschlossene Abluftklappen nicht verfügbar sind, sind die minimalen Betriebsbedingungen nicht mehr erfüllt.

*Zitat Ende*

Daraus folgt für die MTBF Wertermittlung (39/40) Abluftklappen müssen funktionieren um die minimalen Betriebsbedingungen zu erfüllen.

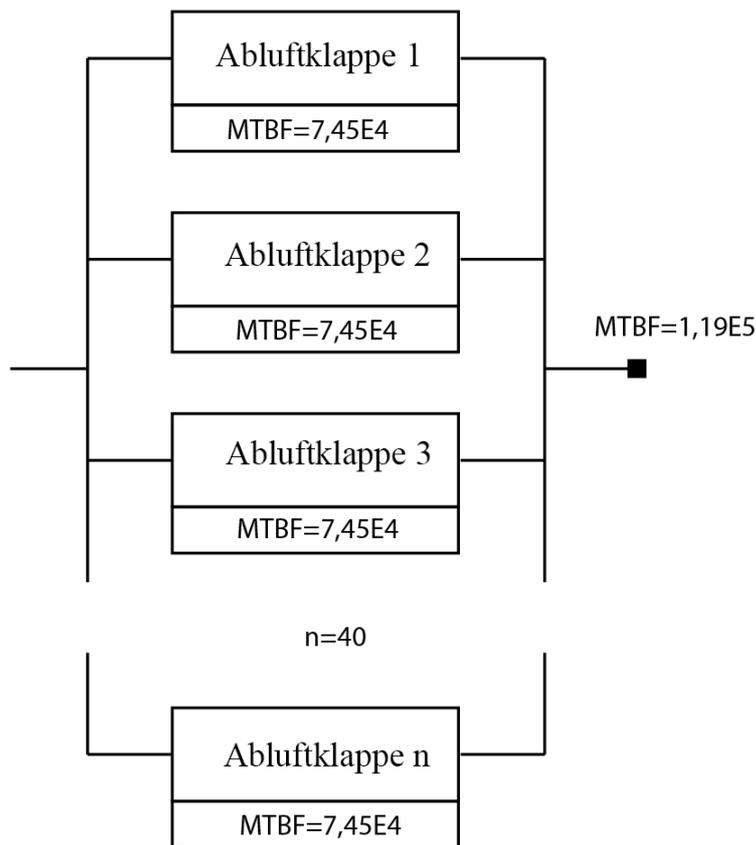


Abbildung 49: Aufbau Abluftklappen

Die MTBF Zeit der Abluftklappen beruht auf der Annahme des permanenten Betriebs der Komponenten. Da die Abluftklappen ausschließlich im Ereignisfall und zu Test sowie Wartungszwecken betrieben wird muss ein sogenannter Duty Cycle Factor berücksichtigt werden. Dieser Faktor gibt das Verhältnis zum Dauerbetrieb an und wird für die Abluftklappen mit 10% angesetzt.  $MTBF = \frac{1,19E5}{0,1} = 1,19E6$

In der Abbildung 50 wird der Zusammenhang der Abluftklappen mit den anderen Komponenten, die zum Betreiben der Abluftklappen benötigt werden, dargestellt.

Die MTTR für das gesamte System ergibt sich aus dem arithmetischen Mittel von der MTTR der einzelnen Komponenten (Tabelle 27).

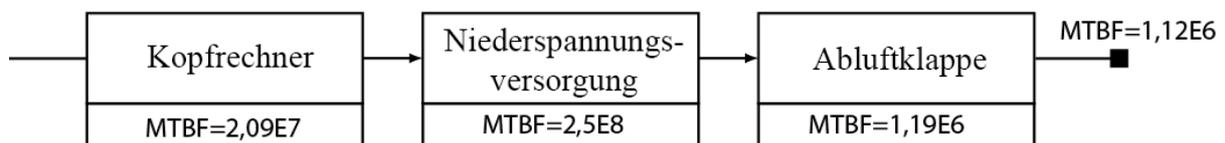


Abbildung 50: Aufbau der Abluftklappen im System

Der MTBF Wert für 39/40 ergibt 1,12E6 Stunden. . Das entspricht 128 Jahren. Die Ausfallswahrscheinlichkeit pro Jahr beträgt:

$$\text{Ausfallswahrscheinlichkeit} = \frac{1}{128} = 7,82E - 3$$

### 3.3.9 Klassifizierung und Zulässigkeit der Risiken

Siehe Kapitel 2.3.9

### 3.3.9.1 Definition der Ausfallshäufigkeiten

Siehe Kapitel 2.3.9.1

### 3.3.9.2 Definition der Gefahrenstufen

Siehe Kapitel 2.3.9.2

### 3.3.9.3 Definition der Risikobewertung nach deren Akzeptanz

Siehe Kapitel 2.3.9.3

## 3.3.10 Gefahrenprotokoll (Hazard Log)

Eine der wesentlichen Anforderungen der RAMS Phase 3 besteht im systematischen Erkennen und Einordnen aller unter normalen Umständen vorhersehbaren Gefahren und in der Ermittlung bzw. Abschätzung des Systemrisikos für jede Gefahr. Die Aufgabenstellung besteht in der qualitativen Ermittlung der Auswirkungen, die Ausfälle unterschiedlicher Art von Subsystemen und Komponenten auf ein System haben. Die Vorgehensweise ist induktiv. Induktive Ansätze gehen von der Annahme eines auslösenden Ereignisses (z.B. Versagen einer Komponente) aus und versuchen die Frage nach möglichen Folgen methodisch vorwärtsgerichtet zu beantworten. Das der Bewertung zu Grunde liegende RAMS Modell wurde im Kapitel 3.3.6 beschrieben.

Für die Komponenten des Götschka Tunnels wurden im Kapitel 3.3.6 folgende Ausfallsszenarien identifiziert:

- Ausfall der Kopfrechner trotz hundertprozentiger Redundanz
- Ausfall der Mittelspannungsversorgung trotz hundertprozentiger Redundanz
- Ausfall der Niederspannungsversorgung trotz hundertprozentiger Redundanz
- Ausfall der automatischen Branddetektion
- Ausfall der Längsströmungsmessung
- Ausfall der Strahlventilatoren
- Ausfall der Querschlagbelüftung
- Ausfall der Axialventilation
- Ausfall der Abluftklappen

Diese Ausfallsszenarien werden im Gefahrenprotokoll und nach Gefahrenstufe und Häufigkeit der Gefahrenfälle klassifiziert. Die abgeschätzten Häufigkeiten sind nur im Zusammenhang mit den angegebenen Auswirkungen gültig. Das heißt, die Wahrscheinlichkeit eines Ereignisses muss ebenfalls bei den Häufigkeiten eines Ausfalles der Komponente berücksichtigt werden (Gleichzeitigkeit Ereignis und Ausfall der Komponente). Damit wird für jede Gefahr das Systemrisiko ermittelt und im Gefahrenprotokoll dokumentiert. Die Beurteilung erfolgt qualitativ und stellt eine subjektive Einschätzung dar. Die Bewertungen ergeben sich durch die Kombination der Wahrscheinlichkeit, mit der ein Komponentenausfall während eines KFZ Brandes auftritt, und den Auswirkungen auf die am Brand beteiligten Personen, die durch den Ausfall der Komponente hervorgerufen wurden.

### 3.3.10.1 Risikobewertung Szenario 1: Ausfall der Kopfrechner

Die beiden redundant ausgeführten Kopfrechner sollten an unterschiedlichen Orten in der Tunnelkontrollwarte betrieben werden, um die Wahrscheinlichkeit beide Rechner gleichzeitig zu verlieren geringer zu halten. Wie in Abbildung 42 ersichtlich hängen die beiden Kopfrechner an der ebenfalls redundant ausgeführten Niederspannungsversorgung.

Mögliche Ausfallsursachen, die zum Versagen eines oder beider Kopfrechner führen:

- Ein kompletter Ausfall der Niederspannungsversorgung würde die Funktionsfähigkeit der Kopfrechner verhindern.
- Eine Überschreitung der Höchstzahl an Betriebsstunden kann das System zu Ausfall bringen.
- Die Kopfrechner können durch fehlerhafte Software insbesondere durch Updates versagen.
- Eine zu hohe Raumtemperatur speziell im Sommer kann die Kopfrechner überhitzen.
- Starke Verschmutzungen im Rechnerinneren können die Lüftung des Rechnergehäuses beeinträchtigen und so ein Systemversagen hervorrufen.

Auswirkungen durch den Ausfall der Kopfrechner:

- Keine Steuerung der Strahlventilatoren
- Keine Steuerung der Querschlagbelüftung
- Keine Steuerung der Abluftklappen
- Keine Steuerung der Axialventilatoren
- Keine automatische Branddetektion durch Brandlinienmeldekabel
- Keine Branddetektion durch Verkehrskameras
- Keine Branddetektion durch Notfallknopf, Feuerlöscher Entnahme oder öffnen der Notfalls Türen.
- Keine Verkehrsbeeinflussung möglich

Mögliche Ausfallserkennung bei Versagen der Kopfrechner:

- Durch das Bedienpersonal
- Durch Überwachungseinrichtungen
- Automatischer Alarm in der übergeordneten Verkehrsleitzentrale

Maßnahmen, um einem Ausfall der Kopfrechner vorzubeugen:

- 100% Redundanz der Kopfrechner
- 100% Redundanz der Stromversorgung
- Kopfrechner nach definierter Anzahl an Betriebsstunden austauschen
- Umfangreiche Prüfung und offline Systemtests nach Software Updates
- Klimatisierung der Räumlichkeiten in denen die Kopfrechner untergebracht sind
- Periodische Wartung bzw. Reinigungsintervalle durchführen

Auswirkung auf den Menschen, Gefahrenstufe (siehe Tabelle 9) und Häufigkeit von Gefahrenfällen (siehe Tabelle 8) beim Ausfall der Kopfrechner für PKW, LKW und Reisebusse im Brandfall:

Auswirkung auf den Menschen:

PKW: Unfalltote und/oder zahlreiche Schwerverletzte

LKW: Unfalltote und/oder zahlreiche Schwerverletzte

Reisebusse: Unfalltote und/oder zahlreiche Schwerverletzte

Gefahrenstufe:

PKW Gefahrenstufe: 4

LKW Gefahrenstufe: 4

Reisebusse Gefahrenstufe: 4

Ausfallswahrscheinlichkeit pro Jahr:  $4,19E - 4$

Das entspricht der Häufigkeit von Gefahrenfällen Stufe 2 unwahrscheinlich. (siehe Tabelle 8)

### 3.3.10.2 Risikobewertung Szenario 2: Ausfall der Mittelspannungsversorgung

Die beiden redundant ausgeführten Mittelspannungsanlagen sind an unterschiedlichen Orten im Tunnel unterzubringen um die Wahrscheinlichkeit beide Mittelspannungsanlagen gleichzeitig zu verlieren geringer zu halten.

Mögliche Ausfallsursachen, die zum Versagen einer oder beider Mittelspannungsanlagen führen:

- Ein kompletter Ausfall der Hauptstromversorgung würde die Mittelspannungsversorgung unterbrechen.
- Ungenügende Wartung der Mittelspannungsanlage.
- Ein Kurzschluss in der Mittelspannungsanlage.

Auswirkungen durch den Ausfall der Mittelspannungsversorgung:

Wie in Abbildung 42 ersichtlich hängen die Strahlventilatoren, die Axialventilatoren und die Querschlagbelüftung an der Mittelspannungsversorgung.

- Ein kompletter Ausfall der Mittelspannungsversorgung würde alle Strahlventilatoren stilllegen.
- Ein kompletter Ausfall der Mittelspannungsversorgung würde die Axialventilatoren stilllegen.
- Ein kompletter Ausfall der Mittelspannungsversorgung würde die Querschlagbelüftung verhindern.

Mögliche Ausfallserkennung bei Versagen der Mittelspannungsversorgung:

- Durch das Bedienpersonal
- Durch Überwachungseinrichtungen
- Durch regelmäßige Kontrolle

Maßnahmen, um einem Ausfall der Mittelspannungsversorgung vorzubeugen:

- 100% Redundanz der Mittelspannungsversorgung
- Mittelspannungsversorgung nach definierter Anzahl an Betriebsstunden austauschen
- Periodische Wartung durchführen
- Durchgehende automatische Überwachung durch die Kopfrechner

Auswirkung auf den Menschen, Gefahrenstufe (siehe Tabelle 9) und Häufigkeit von Gefahrenfällen (siehe Tabelle 8) beim Ausfall der Kopfrechner für PKW, LKW und Reisebusse im Brandfall:

Auswirkung auf den Menschen:

PKW: Unfalltote und/oder zahlreiche Schwerverletzte

LKW: Unfalltote und/oder zahlreiche Schwerverletzte

Reisebusse: Unfalltote und/oder zahlreiche Schwerverletzte

Gefahrenstufen:

PKW Gefahrenstufe: 4

LKW Gefahrenstufe: 4

Reisebusse Gefahrenstufe: 4

Ausfallswahrscheinlichkeit pro Jahr:  $2,59E - 5$

Das entspricht der Häufigkeit von Gefahrenfällen Stufe 2 unwahrscheinlich. (siehe Tabelle 8)

### 3.3.10.3 Risikobewertung Szenario 3: Ausfall der Niederspannungsversorgung

Die beiden redundant ausgeführten Niederspannungsanlagen sind an unterschiedlichen Orten im Tunnel unterzubringen um die Wahrscheinlichkeit beide Niederspannungsanlagen gleichzeitig zu verlieren geringer zu halten.

Mögliche Ausfallsursachen, die zum Versagen einer oder beider Niederspannungsanlagen führen:

- Ein kompletter Ausfall der Hauptstromversorgung würde die Versorgung der Niederspannungsanlagen unterbrechen.
- Ein kompletter Ausfall der Mittelspannungsversorgung würde die Versorgung der Niederspannungsanlagen unterbrechen.
- Ungenügende Wartung der Niederspannungsanlagen
- Ein Kurzschluss in einer Niederspannungsanlage

Auswirkungen durch den Ausfall der Niederspannungsanlagen:

Wie in Abbildung 42 ersichtlich hängt die automatische Branddetektion, die Längsströmungsmessung, die Kopfrechner, die Abluftklappen und die Verkehrsbeeinflussung an der Niederspannungsversorgung.

- Ein kompletter Ausfall der Niederspannungsversorgung würde:
  - die Kopfrechner stilllegen
  - die automatische Branddetektion verhindern
  - keine Verkehrsbeeinflussung zulassen
  - die Längsströmungsmessung verhindern
  - die Steuerung der Abluftklappen verhindern
- Ein kompletter Ausfall der Mittelspannungsversorgung würde die Versorgung Niederspannungsversorgung unterbrechen.
- Ein kompletter Ausfall der Hauptstromversorgung würde die Versorgung der Niederspannungsanlagen unterbrechen.

Mögliche Ausfallserkennung bei Versagen der Niederspannungsversorgung:

- Durch das Bedienpersonal
- Durch Überwachungseinrichtungen
- Durch regelmäßige Kontrolle

Maßnahmen, um einem Ausfall der Niederspannungsversorgung vorzubeugen:

- 100% Redundanz der Niederspannungsversorgung
- 100% Redundanz der Mittelspannungsversorgung
- Niederspannungsversorgung nach definierter Anzahl an Betriebsstunden austauschen
- Periodische Wartung durchführen
- Durchgehende, automatische Überwachung durch Kopfrechner

Auswirkung auf den Menschen, Gefahrenstufe (siehe Tabelle 9) und Häufigkeit von Gefahrenfällen (siehe Tabelle 8) beim Ausfall der Kopfrechner für PKW, LKW und Reisebusse im Brandfall:

Auswirkung auf den Menschen:

PKW: Unfalltote und/oder zahlreiche Schwerverletzte

LKW: Unfalltote und/oder zahlreiche Schwerverletzte

Reisebusse: Unfalltote und/oder zahlreiche Schwerverletzte

Gefahrenstufe:

PKW Gefahrenstufe: 4

LKW Gefahrenstufe: 4

Reisebusse Gefahrenstufe: 4

Ausfallswahrscheinlichkeit pro Jahr:  $3,5E-5$

Das entspricht der Häufigkeit von Gefahrenfällen Stufe 2 unwahrscheinlich. (siehe Tabelle 8)

#### 3.3.10.4 **Risikobewertung Szenario 4: Ausfall der automatischen Branddetektion**

Siehe Kapitel 2.3.10.4

#### 3.3.10.5 **Risikobewertung Szenario 5: Ausfall der Längsströmungsmessung**

Siehe Kapitel 2.3.10.5

#### 3.3.10.6 **Risikobewertung Szenario 6: Ausfall der Strahlventilatoren**

Mögliche Ausfallsursachen, die zum Versagen eines oder aller Strahlventilatoren führen:

Die Strahlventilatoren sind an unterschiedlichen Orten im Tunnel angebracht was Ausfallswahrscheinlichkeit aller Strahlventilatoren durch einen Brand oder mechanische Zerstörung gering hält. Wie in Abbildung 42 ersichtlich hängen alle Strahlventilatoren an der redundant ausgeführten Mittelspannungsversorgung und den ebenfalls redundant ausgeführten Kopfrechnern.

- Ein kompletter Ausfall der Mittelspannungsversorgung würde die Stromversorgung aller Strahlventilatoren unterbrechen.
- Ein kompletter Ausfall der Niederspannungsversorgung würde die Steuerung aller Strahlventilatoren durch die Kopfrechner unmöglich machen.
- Ein Totalausfall der Kopfrechner würde die Steuerung der Strahlventilatoren zum Erliegen bringen.
- Überschreitung der maximalen Betriebsstunden
- Ungenügende Wartung des Strahlventilators
- Ein Kurzschluss im Strahlventilator
- Mechanische Zerstörung

Auswirkungen durch den Ausfall der Strahlventilatoren:

- Keine gesteuerte Tunnelbelüftung
- Die Tunnelentlüftung kann nur durch die Axialventilation erfolgen.
- Die Selbstrettungsmöglichkeiten der Unfallopfer werden eingeschränkt.
- Die Fremdrettung wird erschwert.
- Höheres Unfallrisiko anderer Verkehrsteilnehmer durch schlechtere Sicht
- Schlechtere Übersicht vom Unfallgeschehen durch Verkehrskameras

Mögliche Ausfallserkennung bei Versagen eines Strahlventilators:

- Durch Überwachungseinrichtungen
- Durch regelmäßige Kontrolle

Maßnahmen, um einem Ausfall der Strahlventilatoren vorzubeugen:

- Verbau von mehr Strahlventilatoren als für den Betrieb mindestens notwendig
- 100% Redundanz der Niederspannungsversorgung
- 100% Redundanz der Mittelspannungsversorgung
- 100% Redundanz der Kopfrechner
- Strahlventilatoren nach definierter Anzahl an Betriebsstunden austauschen
- Durchgehende periodische Überwachung durch Kopfrechner
- Periodische Wartung durchführen

Auswirkung auf den Menschen, Gefahrenstufe (siehe Tabelle 9) und Häufigkeit von Gefahrenfällen (siehe Tabelle 8) beim Ausfall der Kopfrechner für PKW, LKW und Reisebusse im Brandfall:

Auswirkung auf den Menschen:

PKW: Kleiner Verletzungen

LKW: Einzelner Unfalltoter und/oder Schwerverletzter

Reisebusse: Einzelner Unfalltoter und/oder Schwerverletzter

Gefahrenstufe:

PKW Gefahrenstufe: 2

LKW Gefahrenstufe: 3

Reisebusse Gefahrenstufe: 3

Ausfallswahrscheinlichkeit pro Jahr: 2,67

Das entspricht der Häufigkeit von Gefahrenfällen Stufe 1 häufig. (siehe Tabelle 8)

### 3.3.10.7 Risikobewertung Szenario 7: Ausfall der Querschlagbelüftung

Siehe Kapitel 2.3.10.7

### 3.3.10.8 Risikobewertung Szenario 8: Ausfall der Axialventilation

Mögliche Ausfallsursachen, die zum Versagen der Axialventilation führen:

Wie in Abbildung 42 ersichtlich hängt die Axialventilation an der redundant ausgeführten Mittelspannungsversorgung sowie an den redundant ausgeführten Kopfrechnern. Die Axialventilation funktioniert nur in Abhängigkeit mit den Abluftklappen.

- Ein kompletter Ausfall der Hauptstromversorgung würde die Axialventilation stilllegen.
- Ein kompletter Ausfall der Mittelspannungsversorgung würde die Funktionsfähigkeit der Axialventilation verhindern.
- Ein kompletter Ausfall der Kopfrechner würde die Steuerung der Axialventilation durch die Kopfrechner verhindern.
- Ein kompletter Ausfall der Niederspannungsversorgung würde die Steuerung der Axialventilation durch die Kopfrechner verhindern.
- Ein Ausfall der Abluftklappen würde die Axialventilation verhindern.
- Überschreitung der maximalen Betriebsstunden
- Ungenügende Wartung der Axialventilation
- Ein Kurzschluss in der Axialventilation
- Mechanische Zerstörung

Auswirkungen durch den Ausfall der Axialventilation:

- Keine Entlüftung des Fahrraums durch die Tunneldecke.
- Die Selbstrettungsmöglichkeiten der Unfallopfer werden eingeschränkt.

- Die Fremdrettung wird erschwert.
- Höheres Unfallrisiko anderer Verkehrsteilnehmer durch schlechte Sicht
- Schlechtere Übersicht vom Unfallgeschehen durch Verkehrskameras
- Die Tunnellüftung erfolgt nur mittels Strahlventilatoren.

Mögliche Ausfallserkennung bei Versagen der Axialventilation:

- Durchgehende periodische Tests
- Durch regelmäßige Kontrolle

Maßnahmen, um einem Ausfall der Axialventilation vorzubeugen:

- 100% Redundanz der Mittelspannungsversorgung
- 100% Redundanz der Niederspannungsversorgung
- 100% Redundanz der Kopfrechner
- Axialventilation nach definierter Anzahl an Betriebsstunden austauschen
- Periodische Überwachung durch Kopfrechner
- Periodische Wartung durchführen

Auswirkung auf den Menschen, Gefahrenstufe (siehe Tabelle 9) und Häufigkeit von Gefahrenfällen (siehe Tabelle 8) beim Ausfall der Kopfrechner für PKW, LKW und Reisebusse im Brandfall:

Auswirkung auf den Menschen:

PKW: Kleinere Verletzungen

LKW: Kleinere Verletzungen

Reisebusse: Einzelner Unfalldoter und/oder Schwerverletzter

Gefahrenstufe:

PKW Gefahrenstufe: 2

LKW Gefahrenstufe: 2

Reisebusse Gefahrenstufe: 3

Ausfallswahrscheinlichkeit pro Jahr:  $4,4E-2$

Das entspricht der Häufigkeit von Gefahrenfällen Stufe 3 selten. (siehe Tabelle 8)

### 3.3.10.9 Risikobewertung Szenario 9: Ausfall der Abluftklappen

Mögliche Ausfallsursachen, die zum Versagen der Abluftklappen führen:

Wie in Abbildung 42 ersichtlich hängen die Abluftklappen an der redundant ausgeführten Niederspannungsversorgung sowie an den redundant ausgeführten Kopfrechnern.

- Ein kompletter Ausfall der Hauptstromversorgung würde die Abluftklappen stilllegen.
- Ein kompletter Ausfall der Niederspannungsversorgung würde die Funktionsfähigkeit der Abluftklappen verhindern.
- Ein kompletter Ausfall der Mittelspannungsversorgung würde die Stromversorgung der Niederspannungsanlagen unterbrechen.
- Ein kompletter Ausfall der Kopfrechner würde die Steuerung der Abluftklappen unmöglich machen.
- Überschreitung der maximalen Betriebsstunden
- Ungenügende Wartung der Abluftklappen
- Ein Kurzschluss im Klappenantrieb

- Mechanische Zerstörung

Auswirkungen durch den Ausfall der Abluftklappen:

- Keine Entlüftung des Fahrraums durch die Tunneldecke
- Vom Unfallort weiter entfernte Absaugung der Rauchgase
- Die Selbstrettungsmöglichkeiten der Unfallopfer werden eingeschränkt.
- Die Fremdrettung wird erschwert.
- Erhöhtes Unfallrisiko anderer Verkehrsteilnehmer durch schlechte Sicht
- Schlechte Übersicht vom Unfallgeschehen durch Verkehrskameras
- Die Tunnellüftung erfolgt nur mittels Strahlventilatoren.

Mögliche Ausfallserkennung bei Versagen der Abluftklappen:

- Periodische Tests
- Durch regelmäßige Kontrolle

Maßnahmen, um einem Ausfall der Abluftklappen vorzubeugen:

- 100% Redundanz der Niederspannungsversorgung
- 100% Redundanz der Mittelspannungsversorgung
- 100% Redundanz der Kopfrechner
- Abluftklappen nach definierter Anzahl an Betriebsstunden austauschen
- Periodische Überwachung durch Kopfrechner
- Periodische Wartung durchführen

Auswirkung auf den Menschen, Gefahrenstufe (siehe Tabelle 9) und Häufigkeit von Gefahrenfällen (siehe Tabelle 8) beim Ausfall der Kopfrechner für PKW, LKW und Reisebusse im Brandfall:

Auswirkung auf den Menschen:

PKW: Kleinere Verletzungen

LKW: Kleinere Verletzungen

Reisebusse: Einzelner Unfalltoter und/oder Schwerverletzter

Gefahrenstufe:

PKW Gefahrenstufe: 2

LKW Gefahrenstufe: 2

Reisebusse Gefahrenstufe: 3

Ausfallswahrscheinlichkeit pro Jahr:  $7,82E-3$

Das entspricht der Häufigkeit von Gefahrenfällen Stufe 3 selten. (siehe Tabelle 8)

### **3.3.11 Berechnung der Ausfallshäufigkeit des Gesamtsystem Tunnellüftung im Götschka Tunnel**

Die Summe aller Ausfallshäufigkeiten der einzelnen Komponenten ergibt die Ausfallshäufigkeit des Gesamtsystem Tunnellüftung.

| Szenario | Ausfall                   | Ausfallshäufigkeit pro Jahr |
|----------|---------------------------|-----------------------------|
| 1        | Kopfrechner               | 4,19E-04                    |
| 2        | Mittelspannungsversorgung | 2,59E-05                    |
| 3        | Niederspannungsversorgung | 3,50E-05                    |
| 4        | Autom. Branddetektion     | 3,03E-02                    |
| 5        | Längsströmungsmessung     | 3,50E-05                    |
| 6        | Strahlventilatoren        | 2,67E+00                    |
| 7        | Querschlagbeelüftung      | 3,38E-02                    |
| 8        | Axialventilation          | 4,40E-02                    |
| 9        | Abluftklappen             | 7,82E-03                    |
| alle     | Summe                     | 2,79E+00                    |

Tabelle 28: Ausfallswahrscheinlichkeit pro Jahr

Die Summe der einzelnen Ausfallwahrscheinlichkeiten aller Systemkomponenten pro Jahr beträgt: 2,79. Es werden 2,79 Komponenten im Jahr ausfallen. An dieser Stelle sieht man, dass die nicht redundant ausgeführten Strahlventilatoren das Gesamtergebnis massiv verschlechtern. Die RAMS Risikoanalyse nach EN 50126 kennt für eine Komponente nur zwei Zustände. Entweder funktioniert sie oder sie funktioniert nicht. Im Fall der 16 Strahlventilatoren müssen alle 16 Stück zur selben Zeit funktionieren um die an sie gestellten Betriebsanforderungen zu erfüllen. Im Szenario 6 wurden für die Häufigkeit des Gefahrenfalles die Stufe 6 häufig und für die Gefahrenstufen PKW 2 marginal, LKW 3 kritisch und Reisebus 3 kritisch ermittelt. Werden nun die Häufigkeit des Gefahrenfalles und die Gefahrenstufe in die Risikobewertungsmatrix eingetragen ergibt sich in Tabelle 29 folgendes Bild:

|                    |                  | PKW               | LKW,<br>Reisebus  |                   |                   |
|--------------------|------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|
| Häufig 6           | unerwünscht      | nicht tolerierbar | nicht tolerierbar | nicht tolerierbar | nicht tolerierbar |
| Wahrscheinlich 5   | tolerabel        | unerwünscht       | nicht tolerierbar | nicht tolerierbar | nicht tolerierbar |
| Gelegentlich 4     | tolerabel        | unerwünscht       | unerwünscht       | nicht tolerierbar | nicht tolerierbar |
| Selten 3           | vernachlässigbar | tolerabel         | unerwünscht       | unerwünscht       | nicht tolerierbar |
| Unwahrscheinlich 2 | vernachlässigbar | vernachlässigbar  | tolerabel         | tolerabel         | unerwünscht       |
| Unvorstellbar 1    | vernachlässigbar | vernachlässigbar  | vernachlässigbar  | vernachlässigbar  | tolerabel         |
|                    | Unbedeutend 1    | Marginal 2        | Kritisch 3        | Katastrophal 4    | Verheerend 5      |

Tabelle 29: Risikobewertungsmatrix

Nicht tolerierbare Risiken müssen ausgeschlossen werden. Daher wird für den folgenden Abschnitt der Risikoanalyse ein weiterer Strahlventilator als Redundanz angenommen. Für die volle Erfüllung der Betriebsanforderung müssen 16/17 Strahlventilatoren funktionieren.

Die abgeschätzten Häufigkeiten sind nur im Zusammenhang mit den angegebenen Auswirkungen gültig. Das heißt, die Wahrscheinlichkeit eines Ereignisses muss ebenfalls bei den Häufigkeiten eines Ausfalles der Komponente berücksichtigt werden (Gleichzeitigkeit Ereignis und Ausfall der Komponente). Damit wurde für jede Gefahr das Systemrisiko ermittelt und ein Gefahrenprotokoll erstellt. Die Beurteilung erfolgt qualitativ. Die Bewertungen ergeben sich durch die Kombination der Wahrscheinlichkeit, mit der eine Ausfallart auftritt, und der Auswirkung auf die am Brand beteiligten Personen.

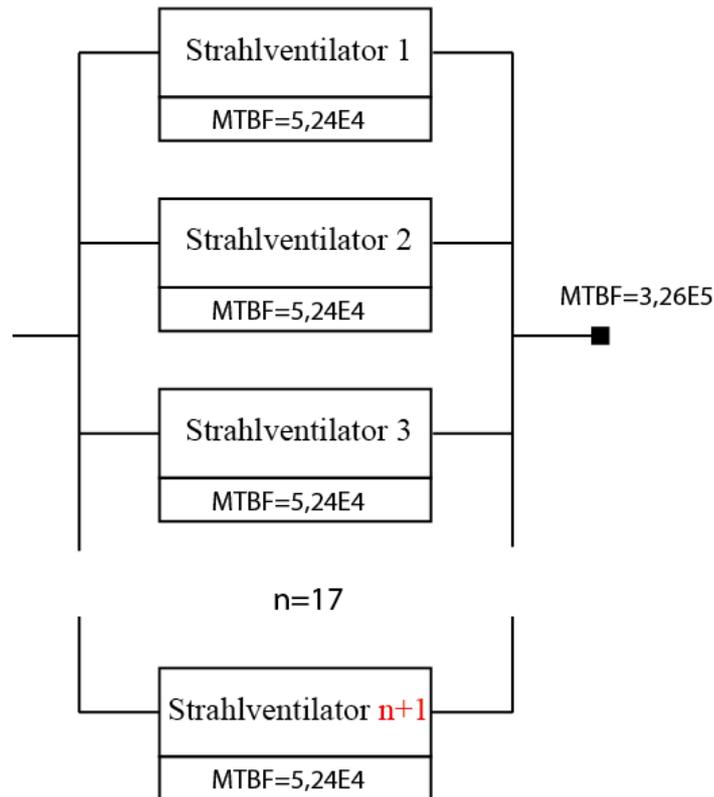


Abbildung 51: Aufbau Strahlventilatoren mit Redundanz (16/17)

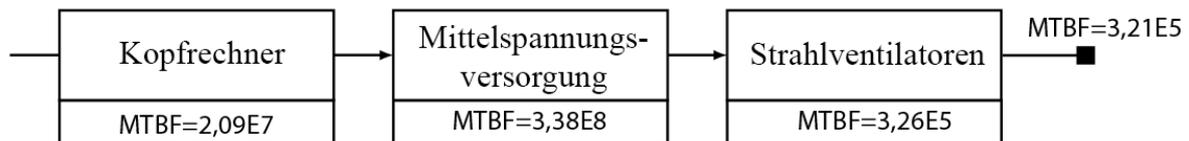


Abbildung 52: Systemkomponentenabhängigkeit der Strahlventilatoren mit Redundanz

Der neue MTBF Wert für den Ausfall der Strahlventilatoren mit Redundanz beträgt 3,21E5 Stunden. Das entspricht 36,7 Jahren. Die Ausfallwahrscheinlichkeit pro Jahr beträgt:

$$\text{Ausfallwahrscheinlichkeit} = \frac{1}{36,7} = 2,73\text{E-}2$$

Das entspricht der Häufigkeit von Gefahrenfällen Stufe 3 selten. (siehe Tabelle 8)

### 3.3.11.1 Berechnung der Ausfallhäufigkeit des Gesamtsystem Tunnellüftung im Götschka Tunnel mit der Annahme eines 17. Strahlventilators

Die Summe aller Ausfallhäufigkeiten der einzelnen Komponenten ergibt die Ausfallhäufigkeit des Gesamtsystem Tunnellüftung.

| Szenario | Ausfall                   | Ausfallshäufigkeit pro Jahr |
|----------|---------------------------|-----------------------------|
| 1        | Kopfrechner               | 4,19E-04                    |
| 2        | Mittelspannungsversorgung | 2,59E-05                    |
| 3        | Niederspannungsversorgung | 3,50E-05                    |
| 4        | Autom. Branddetektion     | 3,03E-02                    |
| 5        | Längsströmungsmessung     | 3,50E-05                    |
| 6        | Strahlventilatoren        | 1,36E-02                    |
| 7        | Querschlagbelüftung       | 3,38E-02                    |
| 8        | Axialventilation          | 4,40E-02                    |
| 9        | Abluftklappen             | 7,82E-03                    |
| alle     | Summe                     | 1,30E-01                    |

Tabelle 30: Summe Ausfallshäufigkeit pro Jahr neu

Tabelle 30 zeigt, dass die Summe der einzelnen Ausfallwahrscheinlichkeiten aller Systemkomponenten pro Jahr 1,30E-1 beträgt. Es wird zu 13% eine Komponente im Jahr ausfallen. Daraus ergibt sich im Umkehrschluss die Wahrscheinlichkeit dass das gesamte System voll verfügbar ist als Funktionswahrscheinlichkeit und beträgt: 8,7E-1 das entspricht 87%.

### 3.3.12 Prognostiziertes Verkehrsaufkommen Tunnel Götschka

Das Dokument [13] Seite 14 berücksichtigt die für das Jahr 2025 prognostizierten Anteile von PKW, LKW und Bussen am Verkehrsaufkommen:

PKW: 84%                      LKW: 14%                      Busse: 2%

Prognostizierte Verkehrsstärke JDTV (jährlich durchschnittlicher täglicher Verkehr) für das Jahr 2025: 31.130 Kfz/24h. Die Tunnellänge der Oströhre beträgt: 4432 m

Der Basiswert der Pannenrate im Tunnel beträgt: 2,372 Pannen/1Mio. Kfz-km

Der Basiswert der Unfallrate für Richtungsverkehrstunnel beträgt: 0,112 UPS/1Mio. Kfz-km (Unfälle mit Personenschaden) Quelle: [11] Seite 7. Unfälle ohne Personenschaden werden in der Kategorie Pannen geführt.

#### 3.3.12.1 Berechnung der Ereigniswahrscheinlichkeit eines Fahrzeugbrandes im Götschka Tunnel

Die Ereigniswahrscheinlichkeit Pannen (EWP) pro Jahr errechnet sich aus der prognostizierten Verkehrsstärke JDTV, der Tunnellänge und dem Basiswert der Pannenrate.

$$EWP = \frac{31130 * 365 * 2,372}{1000000} = 26,95$$

Die Ereigniswahrscheinlichkeit Unfall (EWU) pro Jahr errechnet sich aus der prognostizierten Verkehrsstärke JDTV, der Tunnellänge und dem Basiswert der Unfallrate.

$$EWU = \frac{31130 * 365 * 0,112}{1000000} = 1,27$$

Der Folgebrandanteil bei Pannen im Tunnel beträgt 1,19%.

Der Folgebrandanteil bei Alleinunfällen im Tunnel beträgt 2,3%.

Der Folgebrandanteil bei Unfällen im Richtungsverkehr im Tunnel beträgt 0,5%.

Quelle: RSV 09.03.11 Tunnel Risikoanalysemodell Seite 12.

Die Ereigniswahrscheinlichkeit Panne mit anschließendem Fahrzeugbrand (EWPB) pro Jahr errechnet sich aus die Ereigniswahrscheinlichkeit Panne und dem Folgebrandanteil bei Pannen von 1,19%.

$$EWPB = 26,95 * 0,0119 = 0,321$$

Die Ereigniswahrscheinlichkeit Unfall mit anschließendem Fahrzeugbrand (EWUB) pro Jahr errechnet sich aus Ereigniswahrscheinlichkeit Unfall, dem Folgebrandanteil bei Alleinunfällen und dem Folgebrandanteil bei Unfällen im Richtungsverkehr.

$$EWUB = 1,27 * (0,023 + 0,005) = 0,0356$$

Die Ereigniswahrscheinlichkeit für einen Brand (EWB) im Götschka Tunnel pro Jahr ist die Summe der Ereigniswahrscheinlichkeiten aus Panne mit anschließendem Fahrzeugbrand und Unfall mit Folgebrand.

$$EWB = 0,321 + 0,0356 = 0,357$$

$$EWB=3,57E-1$$

### 3.3.12.2 Zuordnung der Gefahrenstufe auf die verschiedenen Ausfallszenarien

Mittels Ereignisbaumanalyse wurden die Wahrscheinlichkeiten der verschiedenen Ereignisse berechnet. Die Ereignisbaumanalyse unterscheidet nach der Art des Verkehrsteilnehmers.

Ereignisbaumanalyse PKW:

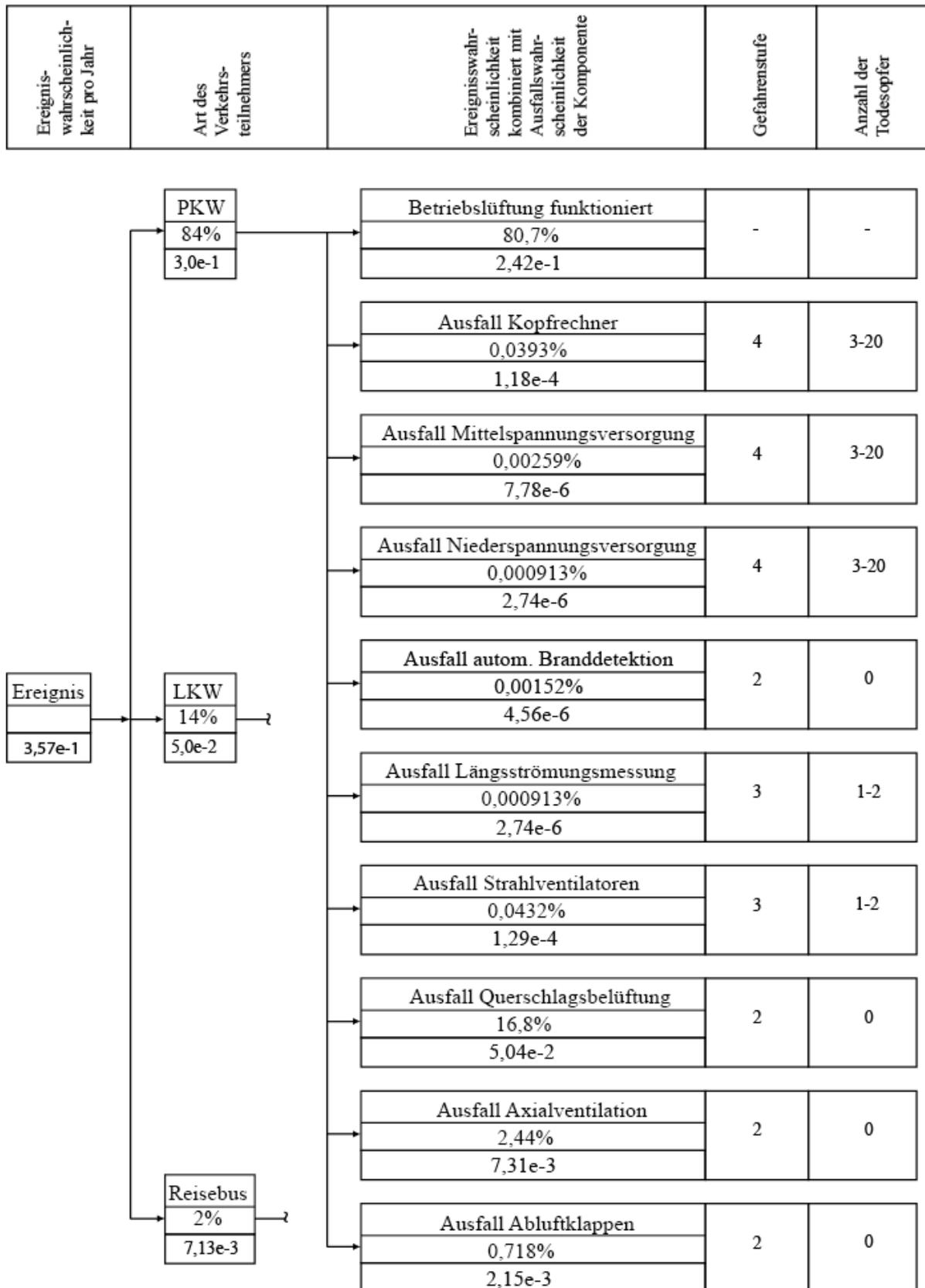


Abbildung 53: Ereignisbaumanalyse für PKW

Tabelle 14 zeigt die Beurteilungen der Ausfallszenarien bei einem PKW-Brand im Götschka Tunnel.

| Risikobewertung nach EN50126  |                  |              |                  |                   |                   |                   |                   |
|-------------------------------|------------------|--------------|------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|
| Häufigkeit von Gefahrenfällen |                  | Risikostufen |                  |                   |                   |                   |                   |
| 6                             | häufig           |              | unerwünscht      | nicht tolerierbar | nicht tolerierbar | nicht tolerierbar | nicht tolerierbar |
|                               |                  | Anzahl       |                  |                   |                   |                   |                   |
| 5                             | wahrscheinlich   |              | tolerierbar      | unerwünscht       | nicht tolerierbar | nicht tolerierbar | nicht tolerierbar |
|                               |                  | Anzahl       |                  |                   |                   |                   |                   |
| 4                             | gelegentlich     |              | tolerierbar      | unerwünscht       | unerwünscht       | nicht tolerierbar | nicht tolerierbar |
|                               |                  | Anzahl       |                  |                   |                   |                   |                   |
| 3                             | selten           |              | vernachlässigbar | tolerierbar       | unerwünscht       | unerwünscht       | nicht tolerierbar |
|                               |                  | Anzahl       |                  | 3                 |                   |                   |                   |
| 2                             | unwahrscheinlich |              | vernachlässigbar | vernachlässigbar  | tolerierbar       | tolerierbar       | unerwünscht       |
|                               |                  | Anzahl       |                  | 2                 | 1                 | 3                 |                   |
| 1                             | unvorstellbar    |              | vernachlässigbar | vernachlässigbar  | vernachlässigbar  | vernachlässigbar  | tolerierbar       |
|                               |                  | Anzahl       |                  |                   |                   |                   |                   |
|                               |                  |              | unbedeutend      | marginal          | kritisch          | katastrophal      | verheerend        |
|                               |                  |              | 1                | 2                 | 3                 | 4                 | 5                 |
|                               |                  |              | Gefahrenstufen   |                   |                   |                   |                   |

Tabelle 31: Risikobewertung für das Ereignis PKW- Brand im Götschka Tunnel

Legende:

- Szenario S1: Ausfall der Kopfrechner
- Szenario S2: Ausfall der Mittelspannungsversorgung
- Szenario S3: Ausfall der Niederspannungsversorgung
- Szenario S4: Ausfall der automatischen Branddetektion
- Szenario S5: Ausfall der Längsströmungsmessung
- Szenario S6: Ausfall der Strahlventilatoren
- Szenario S7: Ausfall der Querschlagbelüftung
- Szenario S8: Ausfall der Axialventilation
- Szenario S9: Ausfall der Abluftklappen

In Tabelle 32 wird die Anzahl Subsysteme, die in den Kategorien „vernachlässigbar“, „tolerabel“, „unerwünscht“ und „nicht tolerabel“ identifiziert wurden, zusammengefasst.

|        |                  |           |             |                 |
|--------|------------------|-----------|-------------|-----------------|
|        | vernachlässigbar | tolerabel | unerwünscht | nicht tolerabel |
| Anzahl | 2                | 7         | 0           | 0               |

Tabelle 32: Anzahl der Komponenten je Gefahrenstufe für das Ereignis PKW- Brand im Götschka Tunnel

Tabelle 33 zeigt die Anzahl der Komponenten je Gefahrenstufe für das Ereignis PKW- Brand im Götschka Tunnel.

| Kat.5 | Mehere Unfalltote und zahlreiche Schwerverletzte | ID  | Komponente und Brandfall | Gefahrenstufe | Gefahrenhäufigkeit | Ausfallswahrscheinlichkeit pro Jahr | $\lambda$ [1/h] | $\lambda$ [1/h] redundant | PKW Brand Wahrscheinlichkeit [1/a] | Risiko-bewertung   |
|-------|--|---|--------------------------|---------------|--------------------|-------------------------------------|-----------------|---------------------------|------------------------------------|--------------------|
|       |  | -   | -                        |               |                    |                                     |                 |                           |                                    |                    |
| Kat.4 | Unfalltote und/oder zahlreiche Schwerverletzte   | ID  | Komponente und Brandfall | Gefahrenstufe | Gefahrenhäufigkeit | Ausfallswahrscheinlichkeit pro Jahr | $\lambda$ [1/h] | $\lambda$ [1/h] redundant | PKW Brand Wahrscheinlichkeit [1/a] | Risiko-beurteilung |
|       | S1   | Ausfall eines Kopfrechner                       | -                        | 3             | 7,36E-02           | 2,80E-05                            |                 | 3,00E-01                  | verna.                             |                    |
|       | S1   | Ausfall der Kopfrechner (1 von 2)               | 4                        | 2             | 1,26E-04           |                                     | 4,78E-08        | 3,00E-01                  | toler.                             |                    |
|       | S2   | Ausfall einer Mittelspannungsanlage             | -                        | 3             | 1,88E-02           | 7,14E-06                            |                 | 3,00E-01                  | verna.                             |                    |
|       | S2   | Ausfall der Mittelspannungsversorgung (1 von 2) | 4                        | 2             | 7,78E-06           |                                     | 2,96E-09        | 3,00E-01                  | toler.                             |                    |
|       | S3   | Ausfall einer Niederspannungsanlage             | -                        | 3             | 1,12E-02           | 4,26E-06                            |                 | 3,00E-01                  | verna.                             |                    |
|       | S3   | Ausfall der Niederspannungsversorgung (1 von 2) | 4                        | 2             | 1,05E-05           |                                     | 4,00E-09        | 3,00E-01                  | toler.                             |                    |
|       | Summe der Gefahrenstufe 4                        |   |                          | 4             |                    | 1,44E-04                            |                 |                           |                                    |                    |
| Kat.3 | Einzelner Unfalltoter und/oder Schwerverletzter  | ID  | Komponente und Brandfall | Gefahrenstufe | Gefahrenhäufigkeit | Ausfallswahrscheinlichkeit pro Jahr | $\lambda$ [1/h] | $\lambda$ [1/h] redundant | PKW Brand Wahrscheinlichkeit [1/a] | Risiko-beurteilung |
|       | S5   | Ausfall eines Längsströmungsmessgeräts          | -                        | 3             | 7,60E-02           | 2,89E-05                            |                 | 3,00E-01                  | verna.                             |                    |
|       | S5   | Ausfall der Längsströmungsmessung (1 von 5)     | 3                        | 2             | 1,05E-05           |                                     | 4,00E-09        | 3,00E-01                  | toler.                             |                    |
|       | Summe der Gefahrenstufe 3                        |   |                          | 3             |                    | 1,05E-05                            |                 |                           |                                    |                    |

Tabelle 33 Ausfallwahrscheinlichkeiten pro Jahr für die Ausmaßkategorien 3, 4 und 5 bei einem PKW- Brand im Götschka Tunnel

Alle Szenarien, bei deren Eintritt mit Todesopfern zu rechnen ist, werden entsprechend ihrer Gefahrenstufen zusammengefasst. Aus Tabelle 33 können die Gefahrenstufen und Häufigkeiten für die einzelnen Szenarien sowie die Summen der Störungen entnommen werden.

Die Summe der Störungen in der Gefahrenstufe 3 (Einzelner Unfalltoter und/oder Schwerverletzter) ergibt eine Wahrscheinlichkeit von 1,05E-5 pro Jahr.

Die Summe der Störungen in der Gefahrenstufe 4 (Unfalltote und/oder zahlreiche Schwerverletzten) ergibt eine Wahrscheinlichkeit von 1,44E-4 pro Jahr.

### 3.3.12.3 Überprüfung der Ergebnisse gemäß Akzeptanzlinie

Ermittlung der Akzeptanzlinie zur Bestimmung des maximal akzeptierten Schadensausmaßes pro Jahr. Entsprechend Dokument [13] Seite 28 ergibt sich aus dem errechneten Wert „R“

eine Einteilung in die Gefährdungsklasse III.

Die Gefährdungsklasse III erlaubt laut RVS 09.03.31 [10] Seite 29 eine Obergrenze für den Risikoäquivalenzwert  $R$  von 0,5. Der Risikoäquivalentwert  $R$  entspricht dem Risikoerwartungswert (statistisch erwartbare Tote /Jahr) des untersuchten Tunnels bezogen auf ein Jahr.

In der Abbildung 54 ist die Akzeptanzlinien des gemäß RVS 09.02.31 [10] dargestellt. Die einzelnen Szenarien, welche zu einem Ausmaß mit Todesopfern führen, sind gemäß Vorgabe von RAMS als Punkte in der Mitte der Gefahrenstufe aufgeführt. Es wird davon ausgegangen, dass die Verteilung der Wahrscheinlichkeit in einer Gefahrenstufe die gleiche Steigung wie die Akzeptanzlinie hat. Der Punkt in der Mitte der Gefahrenstufe steht repräsentativ für die gesamte Gefahrenstufe. Nicht nur die Einzelereignisse alleine müssen unterhalb der Akzeptanzlinie sein, sondern auch die Summe alle Ereignisse einer Gefahrenstufe.

Werden diese Ergebnisse in dem Wahrscheinlichkeits- Ausmaßdiagramm Diagramm dargestellt, ergibt sich folgendes Bild:

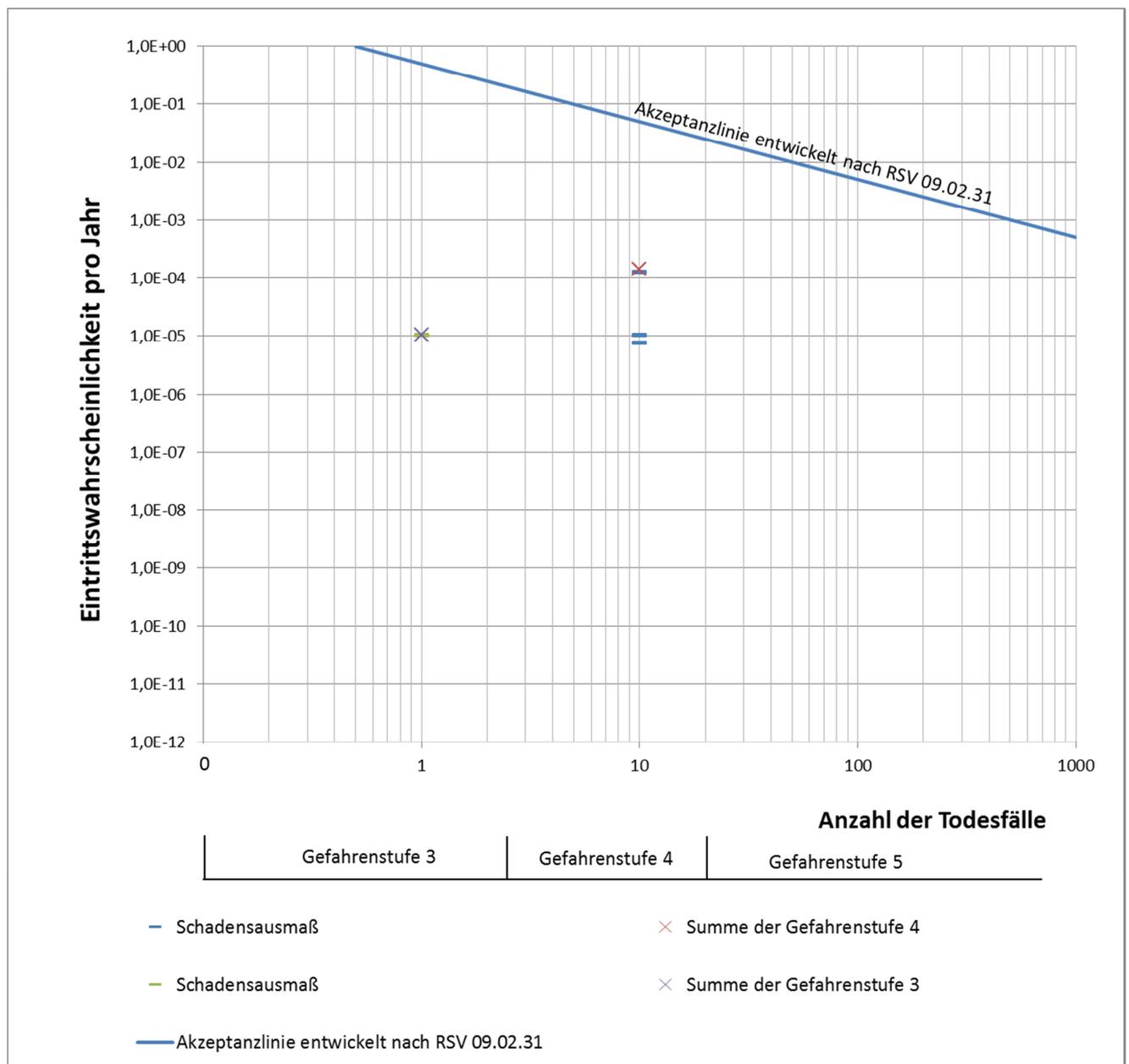


Abbildung 54: Akzeptanzlinie PKW- Brand im Götschka Tunnel

In Abbildung 54 erkennt man, dass alle Szenarien und die Summen der einzelnen Gefahrenstufen sich unterhalb der Akzeptanzlinie befinden.

Ereignisbaumanalyse LKW:

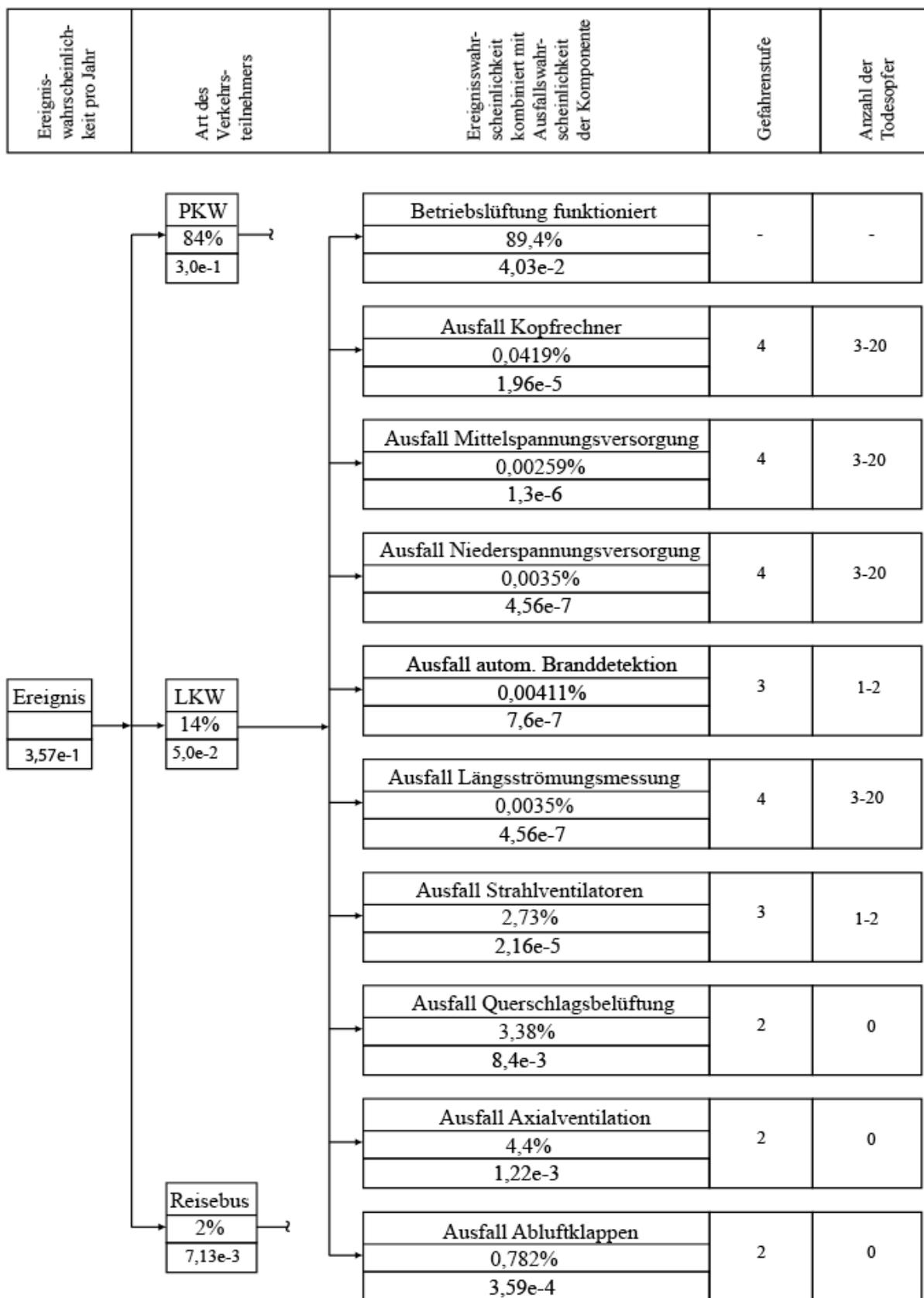


Abbildung 55: Ereignisbaumanalyse für LKW

Tabelle 34 zeigt die Beurteilungen der Ausfallszenarien bei einem LKW-Brand im Götschka Tunnel.

| Risikobewertung nach EN50126  |                  |          |                  |                   |                   |                   |                   |
|-------------------------------|------------------|----------|------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|
| Häufigkeit von Gefahrenfällen |                  |          | Risikostufen     |                   |                   |                   |                   |
| 6                             | häufig           |          | unerwünscht      | nicht tolerierbar | nicht tolerierbar | nicht tolerierbar | nicht tolerierbar |
|                               |                  | Anzahl   |                  |                   |                   |                   |                   |
|                               |                  | Szenario |                  |                   |                   |                   |                   |
| 5                             | wahrscheinlich   |          | tolerierbar      | unerwünscht       | nicht tolerierbar | nicht tolerierbar | nicht tolerierbar |
|                               |                  | Anzahl   |                  |                   |                   |                   |                   |
|                               |                  | Szenario |                  |                   |                   |                   |                   |
| 4                             | gelegentlich     |          | tolerierbar      | unerwünscht       | unerwünscht       | nicht tolerierbar | nicht tolerierbar |
|                               |                  | Anzahl   |                  |                   |                   |                   |                   |
|                               |                  | Szenario |                  |                   |                   |                   |                   |
| 3                             | selten           |          | vernachlässigbar | tolerierbar       | unerwünscht       | unerwünscht       | nicht tolerierbar |
|                               |                  | Anzahl   |                  | 2                 | 2                 |                   |                   |
|                               |                  | Szenario |                  | S7,S8             | S4,S6             |                   |                   |
| 2                             | unwahrscheinlich |          | vernachlässigbar | vernachlässigbar  | tolerierbar       | tolerierbar       | unerwünscht       |
|                               |                  | Anzahl   |                  | 1                 |                   | 4                 |                   |
|                               |                  | Szenario |                  | S9                |                   | S1,S2,S3,S5       |                   |
| 1                             | unvorstellbar    |          | vernachlässigbar | vernachlässigbar  | vernachlässigbar  | vernachlässigbar  | tolerierbar       |
|                               |                  | Anzahl   |                  |                   |                   |                   |                   |
|                               |                  | Szenario |                  |                   |                   |                   |                   |
|                               |                  |          | unbedeutend      | marginal          | kritisch          | katastrophal      | verheerend        |
|                               |                  |          | 1                | 2                 | 3                 | 4                 | 5                 |
|                               |                  |          | Gefahrenstufen   |                   |                   |                   |                   |

Tabelle 34: Risikobewertung für das Ereignis LKW- Brand im Götschka Tunnel

Legende:

- Szenario S1: Ausfall der Kopfrechner
- Szenario S2: Ausfall der Mittelspannungsversorgung
- Szenario S3: Ausfall der Niederspannungsversorgung
- Szenario S4: Ausfall der automatischen Branddetektion
- Szenario S5: Ausfall der Längsströmungsmessung
- Szenario S6: Ausfall der Strahlventilatoren
- Szenario S7: Ausfall der Querschlagbelüftung
- Szenario S8: Ausfall der Axialventilation
- Szenario S9: Ausfall der Abluftklappen

In Tabelle 35 wird die Anzahl Subsysteme, die in den Kategorien „vernachlässigbar“, „tolerabel“, „unerwünscht“ und „nicht tolerabel“ identifiziert wurden, zusammengefasst.

|        | vernachlässigbar | tolerabel | unerwünscht | nicht tolerabel |
|--------|------------------|-----------|-------------|-----------------|
| Anzahl | 1                | 6         | 2           | 0               |

Tabelle 35: Anzahl der Komponenten je Gefahrenstufe für das Ereignis LKW- Brand im Götschka Tunnel

| Kat.5 | Mehere Unfalltote und zahlreiche Schwerverletzte | ID | Komponente und Brandfall                        | Gefahrenstufe | Gefahrenhäufigkeit | Ausfallswahrscheinlichkeit pro Jahr | $\lambda$ [1/h] | $\lambda$ [1/h] redundant | LKW Brand Wahrscheinlichkeit [1/a] | Risiko-bewertung   |
|-------|--|----|---|---------------|--------------------|-------------------------------------|-----------------|---------------------------|------------------------------------|--------------------|
|       |  | -  | -   |               |                    |                                     |                 |                           |                                    |                    |
| Kat.4 | Unfalltote und/oder zahlreiche Schwerverletzte   | ID | Komponente und Brandfall                        | Gefahrenstufe | Gefahrenhäufigkeit | Ausfallswahrscheinlichkeit pro Jahr | $\lambda$ [1/h] | $\lambda$ [1/h] redundant | LKW Brand Wahrscheinlichkeit [1/a] | Risiko-beurteilung |
|       |  | S1 | Ausfall eines Kopfrechner                       | -             | 3                  | 1,23E-02                            | 2,80E-05        |                           | 5,00E-02                           | verna.             |
|       |  | S1 | Ausfall der Kopfrechner (1 von 2)               | 4             | 2                  | 2,10E-05                            |                 | 4,78E-08                  | 5,00E-02                           | toler.             |
|       |  | S2 | Ausfall einer Mittelspannungsanlage             | -             | 3                  | 3,13E-03                            | 7,14E-06        |                           | 5,00E-02                           | verna.             |
|       |  | S2 | Ausfall der Mittelspannungsversorgung (1 von 2) | 4             | 2                  | 1,30E-06                            |                 | 2,96E-09                  | 5,00E-02                           | toler.             |
|       |  | S3 | Ausfall einer Niederspannungsanlage             | -             | 3                  | 1,86E-03                            | 4,26E-06        |                           | 5,00E-02                           | verna.             |
|       |  | S3 | Ausfall der Niederspannungsversorgung (1 von 2) | 4             | 2                  | 1,75E-06                            |                 | 4,00E-09                  | 5,00E-02                           | toler.             |
|       |  | S5 | Ausfall eines Längsströmungsmessgeräts          | -             | 3                  | 1,27E-02                            | 2,89E-05        |                           | 5,00E-02                           | verna.             |
|       |  | S5 | Ausfall der Längsströmungsmessung (1 von 5)     | 4             | 2                  | 1,75E-06                            |                 | 4,00E-09                  | 5,00E-02                           | toler.             |
|       |  |    | Summe der Gefahrenstufe 4                       | 4             |                    | 2,58E-05                            |                 |                           |                                    |                    |
| Kat.3 | Einzelner Unfalltoter und/oder Schwerverletzter  | ID | Komponente und Brandfall                        | Gefahrenstufe | Gefahrenhäufigkeit | Ausfallswahrscheinlichkeit pro Jahr | $\lambda$ [1/h] | $\lambda$ [1/h] redundant | LKW Brand Wahrscheinlichkeit [1/a] | Risiko-beurteilung |
|       |  | S4 | Ausfall der autom. Branddetektion               | 3             | 3                  | 1,52E-03                            | 3,46E-06        |                           | 5,00E-02                           | unerw.             |
|       |  | S6 | Ausfall eines Strahlventilators                 | -             | 3                  | 8,36E-03                            | 1,91E-05        |                           | 5,00E-02                           | verna.             |
|       |  | S6 | Ausfall der Strahlventilatoren (16 von 17)      | 3             | 3                  | 1,36E-03                            |                 | 3,12E-06                  | 5,00E-02                           | unerw.             |
|       |  |    | Summe der Gefahrenstufe 3                       | 3             |                    | 2,88E-03                            |                 |                           |                                    |                    |

Tabelle 36: Ausfallwahrscheinlichkeiten pro Jahr für die Ausmaßkategorien 3, 4 und 5 bei einem LKW- Brand im Götschka Tunnel

Alle Szenarien, bei deren Eintritt mit Todesopfern zu rechnen ist, werden entsprechend ihrer Gefahrenstufen zusammengefasst. Aus Tabelle 36 können die Gefahrenstufen und Häufigkeiten für die einzelnen Szenarien sowie die Summen der Störungen entnommen werden.

Die Summe der Störungen in der Gefahrenstufe 3 (Einzelner Unfalltoter und/oder Schwerverletzter) ergibt eine Wahrscheinlichkeit von 2,88E-3pro Jahr.

Die Summe der Störungen in der Gefahrenstufe 4 (Unfalltote und/oder zahlreiche Schwerverletzten) ergibt eine Wahrscheinlichkeit von 2,58E-5pro Jahr.

In der Abbildung 56 ist die Akzeptanzlinien des gemäß RVS 09.02.31 [10] dargestellt. Die einzelnen Szenarien, welche zu einem Ausmaß mit Todesopfern führen, sind gemäß Vorgabe von RAMS als Punkte in der Mitte der Gefahrenstufe aufgeführt. Es wird davon ausgegangen, dass die Verteilung der Wahrscheinlichkeit in einer Gefahrenstufe die gleiche Steigung wie

die Akzeptanzlinie hat. Der Punkt in der Mitte der Gefahrenstufe steht repräsentativ für die gesamte Gefahrenstufe. Nicht nur die Einzelereignisse alleine müssen unterhalb der Akzeptanzlinie sein, sondern auch die Summe alle Ereignisse einer Gefahrenstufe.

Werden diese Ergebnisse in dem Wahrscheinlichkeits- Ausmaßdiagramm Diagramm dargestellt, ergibt sich folgendes Bild:

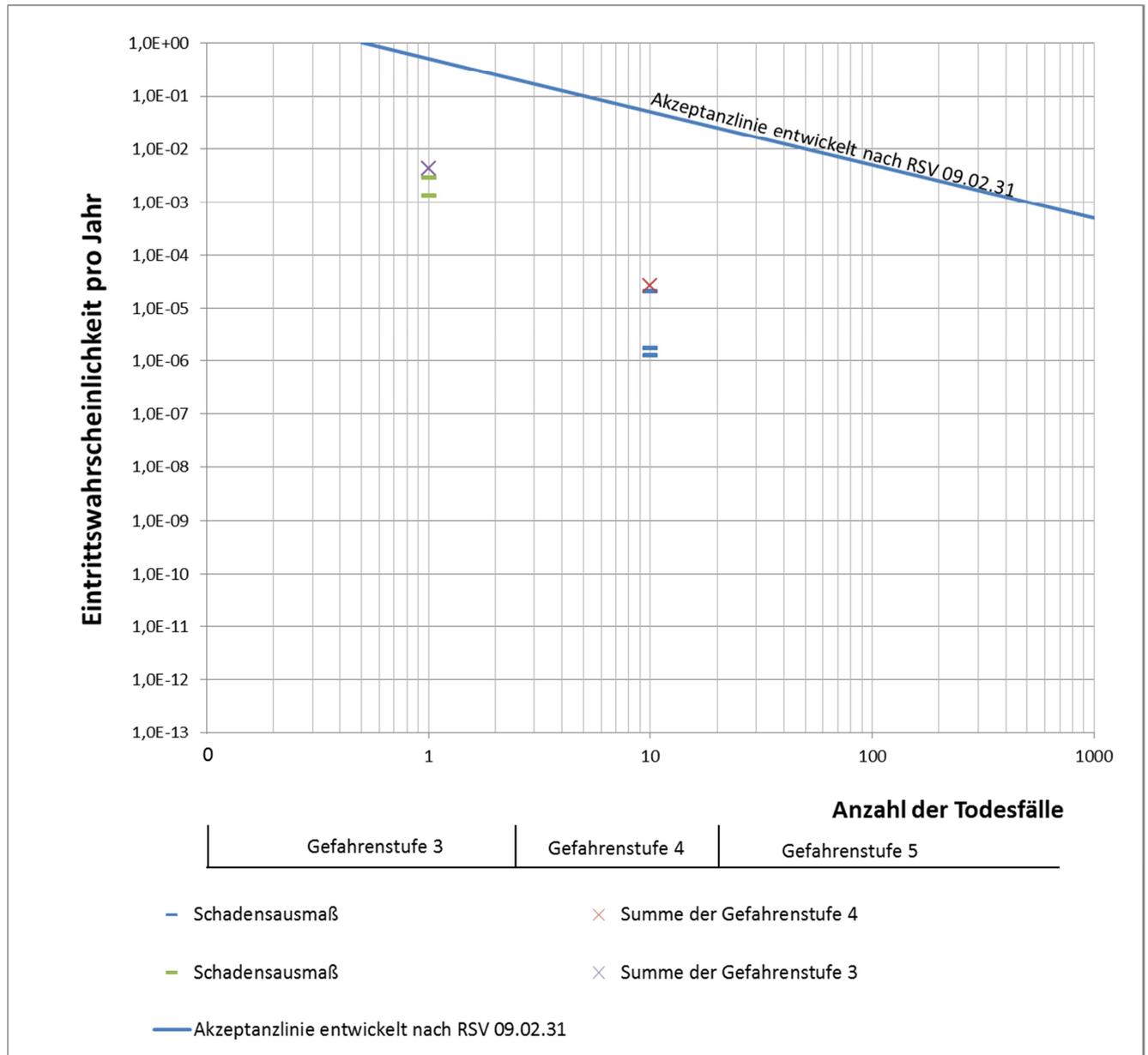


Abbildung 56: Akzeptanzlinie LKW- Brand im Götschka Tunnel

In Abbildung 56 erkennt man, dass alle Szenarien und die Summen der einzelnen Gefahrenstufen sich unterhalb der Akzeptanzlinie befinden.

Ereignisbaumanalyse Reisebus:

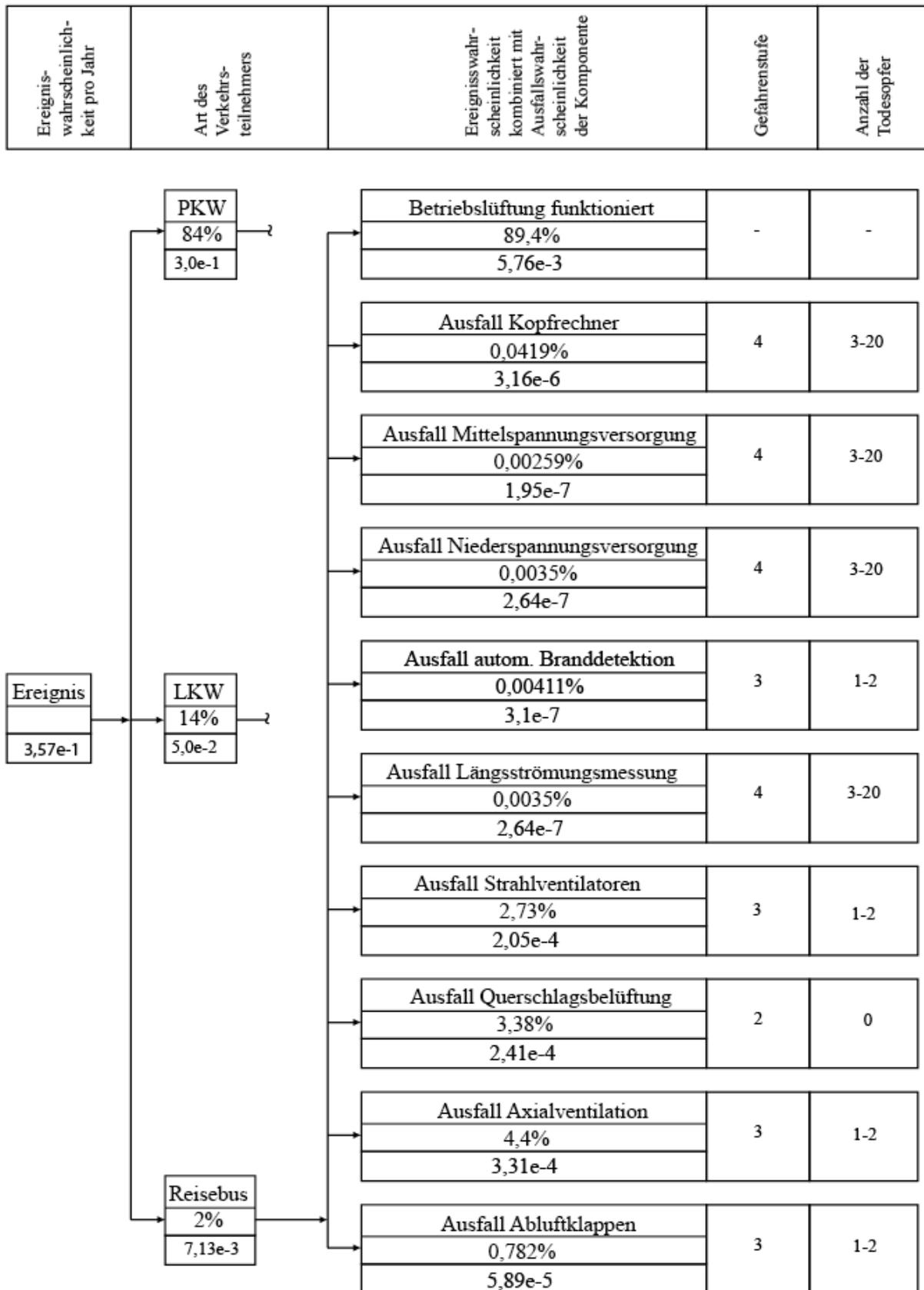


Abbildung 57: Ereignisbaumanalyse für einen Reisebus

Tabelle 37 zeigt die Beurteilungen der Ausfallszenarien eines Reisebus- Brandes im Götschka

## Tunnel.

| Risikobewertung nach EN50126  |                  |          |                  |                   |                   |                   |                   |
|-------------------------------|------------------|----------|------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|
| Häufigkeit von Gefahrenfällen |                  |          | Risikostufen     |                   |                   |                   |                   |
| 6                             | häufig           |          | unerwünscht      | nicht tolerierbar | nicht tolerierbar | nicht tolerierbar | nicht tolerierbar |
|                               |                  | Anzahl   |                  |                   |                   |                   |                   |
|                               |                  | Szenario |                  |                   |                   |                   |                   |
| 5                             | wahrscheinlich   |          | tolerierbar      | unerwünscht       | nicht tolerierbar | nicht tolerierbar | nicht tolerierbar |
|                               |                  | Anzahl   |                  |                   |                   |                   |                   |
|                               |                  | Szenario |                  |                   |                   |                   |                   |
| 4                             | gelegentlich     |          | tolerierbar      | unerwünscht       | unerwünscht       | nicht tolerierbar | nicht tolerierbar |
|                               |                  | Anzahl   |                  |                   |                   |                   |                   |
|                               |                  | Szenario |                  |                   |                   |                   |                   |
| 3                             | selten           |          | vernachlässigbar | tolerierbar       | unerwünscht       | unerwünscht       | nicht tolerierbar |
|                               |                  | Anzahl   |                  |                   |                   |                   |                   |
|                               |                  | Szenario |                  |                   |                   |                   |                   |
| 2                             | unwahrscheinlich |          | vernachlässigbar | vernachlässigbar  | tolerierbar       | tolerierbar       | unerwünscht       |
|                               |                  | Anzahl   |                  | 1                 | 3                 | 5                 |                   |
|                               |                  | Szenario |                  | S7                | S6,S8,S9          | S1,S2,S3,S4,S5    |                   |
| 1                             | unvorstellbar    |          | vernachlässigbar | vernachlässigbar  | vernachlässigbar  | vernachlässigbar  | tolerierbar       |
|                               |                  | Anzahl   |                  |                   |                   |                   |                   |
|                               |                  | Szenario |                  |                   |                   |                   |                   |
|                               |                  |          | unbedeutend      | marginal          | kritisch          | katastrophal      | verheerend        |
|                               |                  |          | 1                | 2                 | 3                 | 4                 | 5                 |
|                               |                  |          | Gefahrenstufen   |                   |                   |                   |                   |

Tabelle 37: Risikobewertung für das Ereignis Reisebus- Brand im Götschka Tunnel

Legende:

- Szenario S1: Ausfall der Kopfrechner
- Szenario S2: Ausfall der Mittelspannungsversorgung
- Szenario S3: Ausfall der Niederspannungsversorgung
- Szenario S4: Ausfall der automatischen Branddetektion
- Szenario S5: Ausfall der Längsströmungsmessung
- Szenario S6: Ausfall der Strahlventilatoren
- Szenario S7: Ausfall der Querschlagbelüftung
- Szenario S8: Ausfall der Axialventilation
- Szenario S9: Ausfall der Abluftklappen

In Tabelle 38 wird die Anzahl Subsysteme, die in den Kategorien „vernachlässigbar“, „tolerabel“, „unerwünscht“ und „nicht tolerabel“ identifiziert wurden, zusammengefasst.

|        | vernachlässigbar | tolerabel | unerwünscht | nicht tolerabel |
|--------|------------------|-----------|-------------|-----------------|
| Anzahl | 1                | 8         | 0           | 0               |

Tabelle 38: Anzahl der Komponenten je Gefahrenstufe für das Ereignis Reisebus- Brand im

## Götschka Tunnel

| Kat.5 | Mehere Unfalltote und zahlreiche Schwerverletzte | ID                        | Komponente und Brandfall                        | Gefahrenstufe | Gefahrenhäufigkeit | Ausfallswahrscheinlichkeit pro Jahr | $\lambda$ [1/h] | $\lambda$ [1/h] redundant | Bus Brand Wahrscheinlichkeit [1/a] | Risiko-bewertung   |
|-------|--|---------------------------|---|---------------|--------------------|-------------------------------------|-----------------|---------------------------|------------------------------------|--------------------|
|       |  | -                         | -   |               |                    |                                     |                 |                           |                                    |                    |
| Kat.4 | Unfalltote und/oder zahlreiche Schwerverletzte   | ID                        | Komponente und Brandfall                        | Gefahrenstufe | Gefahrenhäufigkeit | Ausfallswahrscheinlichkeit pro Jahr | $\lambda$ [1/h] | $\lambda$ [1/h] redundant | Bus Brand Wahrscheinlichkeit [1/a] | Risiko-beurteilung |
|       |  | S1                        | Ausfall eines Kopfrechner                       | -             | 3                  | 1,85E-03                            | 2,80E-05        |                           | 7,53E-03                           | verna.             |
|       |  | S1                        | Ausfall der Kopfrechner (1 von 2)               | 4             | 2                  | 3,16E-06                            |                 | 4,78E-08                  | 7,53E-03                           | toler.             |
|       |  | S2                        | Ausfall einer Mittelspannungsanlage             | -             | 2                  | 4,71E-04                            | 7,14E-06        |                           | 7,53E-03                           | verna.             |
|       |  | S2                        | Ausfall der Mittelspannungsversorgung (1 von 2) | 4             | 2                  | 1,95E-07                            |                 | 2,96E-09                  | 7,53E-03                           | toler.             |
|       |  | S3                        | Ausfall einer Niederspannungsanlage             | -             | 2                  | 2,81E-04                            | 4,26E-06        |                           | 7,53E-03                           | verna.             |
|       |  | S3                        | Ausfall der Niederspannungsversorgung (1 von 2) | 4             | 2                  | 2,64E-07                            |                 | 4,00E-09                  | 7,53E-03                           | toler.             |
|       |  | S5                        | Ausfall eines Längsströmungsmessgeräts          | -             | 3                  | 1,91E-03                            | 2,89E-05        |                           | 7,53E-03                           | verna.             |
|       |  | S5                        | Ausfall der Längsströmungsmessung (1 von 5)     | 4             | 2                  | 2,64E-07                            |                 | 4,00E-09                  | 7,53E-03                           | toler.             |
|       |  | S4                        | Ausfall der autom. Branddetektion               | 4             | 2                  | 2,28E-04                            | 3,46E-06        |                           | 7,53E-03                           | toler.             |
|       |  | Summe der Gefahrenstufe 4 |   | 4             |                    | 2,32E-04                            |                 |                           |                                    |                    |
| Kat.3 | Einzelner Unfalltoter und/oder Schwerverletzter  | ID                        | Komponente und Brandfall                        | Gefahrenstufe | Gefahrenhäufigkeit | Ausfallswahrscheinlichkeit pro Jahr | $\lambda$ [1/h] | $\lambda$ [1/h] redundant | Bus Brand Wahrscheinlichkeit [1/a] | Risiko-beurteilung |
|       |  | S6                        | Ausfall eines Strahlventilators                 | -             | 3                  | 1,26E-03                            | 1,91E-05        |                           | 7,53E-03                           | verna.             |
|       |  | S6                        | Ausfall der Strahlventilatoren (16 von 17)      | 3             | 2                  | 2,05E-04                            |                 | 3,12E-06                  | 7,53E-03                           | toler.             |
|       |  | S8                        | Ausfall eines Axialventilators                  | 3             | 2                  | 3,31E-04                            |                 | 5,03E-06                  | 7,53E-03                           | toler.             |
|       |  | S9                        | Ausfall einer Abluftklappe                      | -             | 2                  | 8,85E-05                            | 1,34E-06        |                           | 7,53E-03                           | verna.             |
|       |  | S9                        | Ausfall der Abluftklappen 39/40                 | 3             | 2                  | 5,89E-05                            |                 | 8,93E-07                  | 7,53E-03                           | toler.             |
|       |  | Summe der Gefahrenstufe 3 |   | 3             |                    | 5,96E-04                            |                 |                           |                                    |                    |

Tabelle 39: Ausfallwahrscheinlichkeiten pro Jahr für die Ausmaßkategorien 3, 4 und 5 bei einem Reisebus- Brand im Götschka Tunnel

Alle Szenarien, bei deren Eintritt mit Todesopfern zu rechnen ist, werden entsprechend ihrer Gefahrenstufen zusammengefasst. Aus Tabelle 39 können die Gefahrenstufen und Häufigkeiten für die einzelnen Szenarien sowie die Summen der Störungen entnommen werden.

Die Summe der Störungen in der Gefahrenstufe 3 (Einzelner Unfalltoter und/oder Schwerverletzter) ergibt eine Wahrscheinlichkeit von 5,96E-4 pro Jahr.

Die Summe der Störungen in der Gefahrenstufe 4 (Unfalltote und/oder zahlreiche Schwerverletzte) ergibt eine Wahrscheinlichkeit von 2,32E-4 pro Jahr.

In der Abbildung 58 ist die Akzeptanzlinien des gemäß RVS 09.02.31 [10] dargestellt. Die einzelnen Szenarien, welche zu einem Ausmaß mit Todesopfern führen, sind gemäß Vorgabe von RAMS als Punkte in der Mitte der Gefahrenstufe aufgeführt. Es wird davon ausgegangen, dass die Verteilung der Wahrscheinlichkeit in einer Gefahrenstufe die gleiche Steigung wie

die Akzeptanzlinie hat. Der Punkt in der Mitte der Gefahrenstufe steht repräsentativ für die gesamte Gefahrenstufe. Nicht nur die Einzelereignisse alleine müssen unterhalb der Akzeptanzlinie sein, sondern auch die Summe alle Ereignisse einer Gefahrenstufe.

Werden diese Ergebnisse in dem Wahrscheinlichkeits- Ausmaßdiagramm Diagramm dargestellt, ergibt sich folgendes Bild:

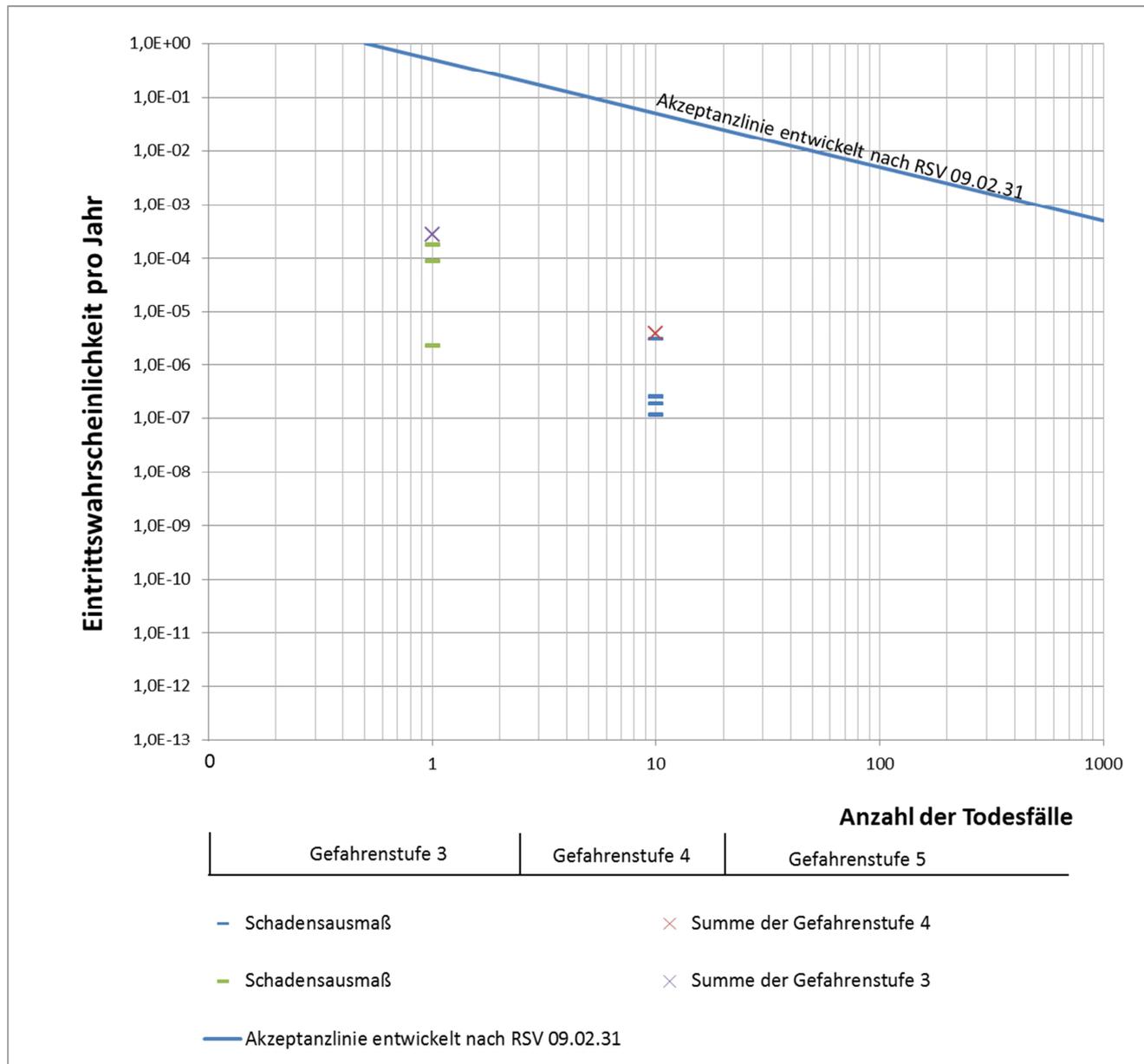


Abbildung 58: Akzeptanzlinie Reisebus- Brand im Götschka Tunnel

In Abbildung 58 erkennt man, dass alle Szenarien und die Summen der einzelnen Gefahrenstufen sich unterhalb der Akzeptanzlinie befinden.

### 3.4 PHASE 4 - SYSTEMANFORDERUNGEN

#### 3.4.1 Zielsetzung der Phase 4 Systemanforderungen

Die Phase 4 hat folgende Zielsetzungen:

- Spezifikation der gesamten RAMS-Anforderungen für das System.
- Spezifikation von Nachweis- und Abnahmekriterien bezüglich RAMS für das System.

- Erstellung des RAM-Programms für die Überwachung der RAM-Aufgaben während der Lebenszyklusphasen.

### 3.4.2 Eingangsgrößen

Eingangsgrößen für die Phase 4 sind alle gesetzlichen Vorschriften, das Dokument [13] sowie die Ergebnisse der RAMS-Phasen 1 bis 3.

### 3.4.3 Erfüllung der Anforderungen RAMS-Anforderungen für das Gesamtsystem

Die RAMS-Ziele an die Betriebslüftung sind im Rahmen des übergeordneten RAMS Konzepts für die Tunnellüftung von den Vorgaben aus den Dokumenten [12], [10] und [11] abgeleitet worden.

Explizite RAMS-Ziele wurden für folgende Ausfälle/Störungen der Betriebslüftung definiert:

- Ausfall der Kopfrechner trotz hundertprozentiger Redundanz
- Ausfall der Mittelspannungsversorgung trotz hundertprozentiger Redundanz
- Ausfall der Niederspannungsversorgung trotz hundertprozentiger Redundanz
- Ausfall der automatischen Branddetektion
- Ausfall der Längsströmungsmessung
- Ausfall der Strahlventilatoren
- Ausfall der Querschlagbelüftung
- Ausfall der Axialventilation
- Ausfall der Abluftklappen

#### 3.4.3.1 RAMS Ziel für die Verfügbarkeit (A) der Tunnelbelüftung

Berechnung der Systemverfügbarkeit:

Über die MTBF und MTTR Werte kann die Verfügbarkeit (Availability) des Systems berechnet werden.

$$A = \frac{MTBF}{MTBF + MTTR}$$

Aus der Verfügbarkeit der einzelnen Komponenten lässt sich die Gesamtverfügbarkeit eines Systems errechnen. Die Gesamtverfügbarkeit des Systems ist nur dann gewährleistet wenn alle Komponenten zur Verfügung stehen. Auf Grund der seriellen Abhängigkeit der einzelnen Komponenten ergibt sich für die Verfügbarkeit des Gesamtsystems:

$$A_{Gesamt} = A_1 * A_2 * \dots * A_n$$

In Tabelle 40 sind die Verfügbarkeitswerte (A) sämtlicher Komponenten dargestellt.

| Bezeichnung                        | Komponente                | MTBF [h] | MTTR [h] | A[%]       |
|------------------------------------|---------------------------|----------|----------|------------|
| Kopfrechner 1/2                    |                           | 2,09E+07 | 28       | 99,999866% |
|                                    | Kopfrechner 1             | 3,57E+04 | 28       |            |
|                                    | Kopfrechner 2             | 3,57E+04 | 28       |            |
| Mittelspannungs-<br>versorgung 1/2 |                           | 3,38E+08 | 29       | 99,999991% |
|                                    | Mittelspannungsanlage 1   | 1,40E+05 | 29       |            |
|                                    | Mittelspannungsanlage 2   | 1,40E+05 | 29       |            |
| Niederspannungs-<br>versorgung 1/2 |                           | 2,50E+08 | 29       | 99,999988% |
|                                    | Niederspannungsanlage 1   | 2,36E+05 | 29       |            |
|                                    | Niederspannungsanlage 2   | 2,36E+05 | 29       |            |
| Längsströmungs-<br>messung 1/5     |                           | 9,60E+08 | 28,5     | 99,999988% |
|                                    | Längsströmungsmessgerät 1 | 3,46E+04 | 28,5     |            |
|                                    | Längsströmungsmessgerät 2 | 3,46E+04 | 28,5     |            |
|                                    | Längsströmungsmessgerät n | 3,46E+04 | 28,5     |            |
| Strahl-<br>ventilatoren 16/17      |                           | 3,21E+05 | 31       | 99,99034%  |
|                                    | Strahlventilator 1        | 5,24E+04 | 31       |            |
|                                    | Strahlventilator 2        | 5,24E+04 | 31       |            |
|                                    | Strahlventilator n        | 5,24E+04 | 31       |            |
| Querschlags<br>Belüftung           |                           | 2,59E+05 | 30       | 99,98842%  |
|                                    | Querschlags Belüftung     | 5,23E+04 | 30       |            |
| Automatische<br>Branddetektion     |                           | 2,89E+05 | 29       | 99,989966% |
|                                    | Brandlinienmeldekabel     | 2,89E+05 | 29       |            |
| Axialventilatoren 2/2              |                           | 1,99E+05 | 28,5     | 99,98568%  |
|                                    | Axialventilator 1         | 3,59E+05 | 28,5     |            |
|                                    | Axialventilator 2         | 3,59E+05 | 28,5     |            |
| Abluftklappen 39/40                |                           | 1,19E+06 | 30       | 99,99748%  |
|                                    | Abluftklappe 1            | 7,45E+05 | 30       |            |
|                                    | Abluftklappe 2            | 7,45E+05 | 30       |            |
|                                    | Abluftklappe n            | 7,45E+05 | 30       |            |

|                             |                |
|-----------------------------|----------------|
| <b>Gesamtverfügbarkeit:</b> | <b>99,952%</b> |
|-----------------------------|----------------|

Tabelle 40: Komponentenverfügbarkeit im Götschka Tunnel

Durch Multiplikation der einzelnen Verfügbarkeitswerte ergibt sich die Gesamtverfügbarkeit (A) der Tunnelbelüftung. (siehe Tabelle 40)

### 3.4.3.2 RAMS Ziel für die Wartbarkeit (M) der Tunnelbelüftung

#### 3.4.3.2.1 Instandhaltbarkeit

Alle Elemente der Betriebslüftung müssen durch regelmäßige Inspektionen, Funktionskontrollen, periodischen Unterhalt und Erneuerung aufrechterhalten bleiben. Die

Zuverlässigkeit der Systeme hängt neben den Kontroll- und Wartungsintervallen auch von den Intervallen für das Ersetzen der Einzelteile ab. Die Störanfälligkeit nimmt mit zunehmendem Alter der Bauteile überproportional zu. Es ist eine hohe Lebensdauer für die einzelnen Bauteile anzustreben. Ebenfalls ist ein Austausch vor dem Versagen vorzunehmen.

#### 3.4.3.2.2 Vorbeugende Instandhaltung

Die Anlage soll so weit wie möglich wartungsfrei konstruiert werden. Sind Wartungsarbeiten dennoch nötig, so sind die Aufwendungen zu quantifizieren. Diese müssen die Wartungsarten, die mittleren Wartungsintervalle Mean Time Between Maintenance (MTBM) und die mittleren Wartungszeiten Mean Time To Maintenance (MTTM) beinhalten. Wartungsarten können Inspektionen, kleinere Arbeiten und Revisionen enthalten. Gemäß Definition fließt diese vorbeugende Instandhaltung nicht in die MTTR-Werte ein. Deswegen hat die Instandhaltung keinen Einfluss auf die gesamte Verfügbarkeit der Tunnellüftung. Die in Tabelle 41 zusammengestellten MTBM- und MTTM-Werte basieren auf Erfahrungen. (eine Reduktion dieser Zeiten ist anzustreben)

| Revisionsart  | MTBM/Stück | MTTM/Stück |
|---|------------|------------|
| Sicht- und Funktionskontrolle Strahlventilatoren                  | 6 Monate   | 2h         |
| Austausch Motor Strahlventilator                                  | 10 Jahre   | 8h         |
| Sicht- und Funktionskontrolle Energieversorgung Stahlventilatoren | 1 Jahr     | 8h         |
| Erneuerung Steuerung Strahlventilatoren                           | 25 Jahre   | 40h        |
| Neustart und Reinigung Steuerung Strahlventilatoren               | 6 Monate   | 1h         |
| Messwertkontrolle Tunnel Sensorik Co und K Wert                   | 1 Jahr     | 30min      |
| Austausch Tunnel Sensorik CO und K Wert                           | 15 Jahre   | 2h         |
| Sicht- und Funktionskontrolle Querschlagbelüftung Ventilatoren    | 6 Monate   | 1h         |
| Neustart und Reinigung Steuerung Querschlagbelüftung Ventilatoren | 6 Monate   | 1h         |
| Austausch Querschlagbelüftung Ventilatoren                        | 10 Jahre   | 8h         |
| Sichtkontrolle und Reinigung Kopfrechner                          | 1 Jahr     | 2h         |
| Austausch Kopfrechner   | 4 Jahre    | 8h         |
| Sicht- und Funktionskontrolle Klappen Querschlag Belüftung        | 1 Jahr     | 1h         |
| Austausch Klappen Querschlag Belüftung                            | 15 Jahre   | 8h         |
| Sicht- und Funktionskontrolle Mittelspannungsversorgung           | 1 Jahr     | 30min      |
| Sicht- und Funktionskontrolle Niederspannungsversorgung           | 1 Jahr     | 30min      |
| Sicht- und Messwertkontrolle Längsströmungsmessgerät              | 1 Jahr     | 1h         |
| Austausch Längsströmungsmessgerät                                 | 15 Jahre   | 4h         |
| Technische Kontrolle Axialventilatoren, pro Stück                 | 1 Jahr     | 4h         |
| Austausch Motor / Laufschaufeln Axialventilatoren, pro Stück      | 10 Jahre   | 240h       |
| Sicht-, Last-, Temperaturkontrolle Trafo Axialventilatoren        | 1 Jahr     | 1h         |
| Sicht- und Funktionskontrolle Frequenzumrichter Axialventilatoren | 3 Monate   | 1h         |
| Erneuerung Antrieb Abluftklappen, pro Stück                       | 15 Jahre   | 5h         |
| Reinigung Mechanik Abluftklappen, pro Stück                       | 6 Monate   | 1h         |
| Sicht- und Funktionskontrolle Brandlinienmeldekabel               | 1 Jahr     | 8h         |
| Austausch Brandlinienmeldekabel                                   | 15 Jahre   | 40h        |

Tabelle 41: MTBM und MTTM Werte

### 3.4.3.2.3 Reparaturzeit

Der Aufbau der Anlage soll einen raschen Austausch der ausgefallenen Komponente ermöglichen. Die geschätzten Reparaturzeiten (Austausch- oder Reparatur am Ort der ausgefallenen Komponenten) können der Tabelle 27 entnommen werden. Die Reparaturzeiten müssen nicht mit den Wartungszeiten übereinstimmen, da dies zwei verschiedene Aspekte sind. In der Reparaturzeit sind Ab- und Anmontieren der ausgefallenen Komponenten, Inbetriebsetzung und Prüfung der Anlage enthalten.

Festgelegter Zeitrahmen bis ein Reparaturteam vor Ort ist:

In langen Tunnels spielen für die Berechnung der Ausfallzeiten die Zeitverhältnisse, bis das Reparaturteam vor Ort ist, eine wesentliche Rolle. Im vorliegenden Dokument werden die Zeitannahmen festgelegt, die bis zum Eintreffen des Reparaturteams vor Ort für die Komponenten der Tunnelbelüftungsanlagen zu verwenden sind. Nachfolgend sind in Tabelle 42 die Richtzeiten definiert, bis ein Reparatur-Team vor Ort bereit ist (inklusive Zeiten für Ferndiagnose, Bereitstellung von Ersatzteilen und Anfahrt):

| Störungsart  | Zeit bis Reparaturteam vor Ort | Ausfallszeit        |
|--|--------------------------------|---------------------|
| Störung mit Beeinträchtigung der Funktionalität der Betriebslüftung  | 24h                            | 24h + Reparaturzeit |
| Störung ohne Beeinträchtigung der Funktionalität der Betriebslüftung | 72h                            | 72h + Reparaturzeit |

Tabelle 42: Richtzeiten

### 3.4.3.3 RAMS Ziel für die Sicherheit (S) und Zuverlässigkeit (R) der Tunnelbelüftung

Als Sicherheitsvorgabe wird für die Zuverlässigkeit (R) aller Komponenten, deren Ausfall mit der Gefahrenstufe 3 oder höher bewertet wurde, wie folgt definiert:

- 99.9% während 20 Tagen/Jahr
- 99.95% während (365 – 20) Tagen/Jahr

Durchschnittlich, über ein ganzes Jahr betrachtet, weist die Tunnellüftung die folgende Verfügbarkeit auf:  $(99.9\% * 20 \text{ Tage} + 99.95\% * (365-20) \text{ Tage}) / 365 \text{ Tage} = 99.947\%$ . Das bedeutet im Jahr muss jede einzelne Komponente zu 99,947% oder mehr verfügbar sein. Dieser Verfügbarkeitswert und auch die Mindestverfügbarkeit werden in Zusammenarbeit mit dem Tunnelbetreiber als Betreiberanforderung definiert. Im Rahmen dieser Diplomarbeit werden in Anlehnung an die Risikoanalyse des Gotthard Basistunnel [16] die gleiche Zuverlässigkeitsvorgabe und Mindestverfügbarkeit vorgeschrieben. Für die Gesamtverfügbarkeit werden 99,5% definiert.

| Komponente                  | MTBF     | Zuverlässigkeit |
|-----------------------------|----------|-----------------|
| Kopfrechner                 | 2,09E+07 | 99,958%         |
| Mittelspannungsversorgung   | 3,38E+08 | 99,997%         |
| Niederspannungsversorgung   | 2,50E+08 | 99,996%         |
| Automatische Branddetektion | 2,89E+05 | 97,014%         |
| Längsströmungsmessung       | 2,50E+08 | 99,996%         |
| Strahlventilatoren          | 3,21E+05 | 97,308%         |
| Abluftklappen               | 1,19E+06 | 99,267%         |
| Axialventilatoren           | 1,99E+05 | 95,693%         |

Tabelle 43: Übersicht der Zuverlässigkeit

Die Sicherheitsanforderungen (S) sind:

- Gesamtverfügbarkeit des Systems größer 99,5%
- Zuverlässigkeit jeder Komponente mindestens 99,985%

Die Gesamtverfügbarkeit (A) des Systems wie in Tabelle Tabelle 23 dargestellt ist mit 99,973% größer als die geforderte von 99,5%.

Die Zuverlässigkeit (R) der Komponenten, deren Ausfall mit der Gefahrenstufe 3 oder höher bewertet wurde, wird von den Kopfrechnern, der automatischen Branddetektion, den Strahlventilatoren, den Abluftklappen und den Axialventilatoren nicht erreicht.

## 3.5 PHASE 5 - ZUTEILUNG DER SYSTEMANFORDERUNGEN

### 3.5.1 Zielsetzung der Phase 5

Die Phase 5 hat folgende Zielsetzungen:

- Zuteilung der gesamten RAMS-Systemanforderungen auf die entsprechenden Subsysteme, Komponenten und externen Einrichtungen.
- Definition der RAMS-Abnahmekriterien für die entsprechenden Subsysteme, Komponenten und externen Einrichtungen.

### 3.5.2 Eingangsgrößen

Eingangsgrößen für die Phase 5 sind alle gesetzlichen Vorschriften, das Dokument [\[13\]](#) sowie die Ergebnisse der RAMS-Phasen 1 bis 4.

Die wichtigsten Ergebnisse sind:

- Es wurden messbare Zuverlässigkeits-, Instandhaltbarkeitsziele für die Tunnellüftung abgeleitet.
- Die Verfügbarkeitsziele sind definiert.
- Die in der RAMS-Phase 3 durchgeführte Risikoanalyse hat relevante Risiken der Gefahrenstufe 4 und 5 identifiziert. Die Kopfrechner, die automatische Branddetektion und Strahlventilatoren erfüllen die gewünschte Zuverlässigkeitsanforderung nicht.
- Die Erfüllung der RAMS-Anforderungen ist erst anlässlich der RAMS-Phase 6 (Entwicklung, Projektierung) nachzuweisen. Auch in den folgenden RAMS-Phasen ist die Erfüllung der Anforderungen zu verfolgen.

### 3.5.3 Zuordnung der Anforderungen

Neben den RAMS-Anforderungen sind vor allem die Anforderungen an die Betriebslüftung bezüglich Tunnelgeometrie, der meteorologischen Verhältnisse und Verkehrsdaten im Dokument [13] formuliert. Es kann nicht ausgeschlossen werden, dass eine weitere Detaillierung in Folge von Neuerkenntnissen in einer späteren RAMS-Phase notwendig sein wird. In einem solchen Fall wären die Aussagen des vorliegenden Kapitels zu hinterfragen und gegebenenfalls anzupassen.

### 3.5.3.1 Zuordnung der Sicherheitsanforderungen

Die Risikoanalyse Kapitel 3 zeigt, dass die Betriebslüftung nur tolerable Restrisiken verursacht. Aus diesen Gründen erübrigt sich eine weitergehende Zuordnung.

## 3.6 PHASE 6 - ENTWICKLUNG/KONSTRUKTION UND IMPLEMENTIERUNG

### 3.6.1 Zielsetzungen der Phase Entwicklung/ Konstruktion und Implementierung

Die vorliegende RAMS-Analyse Phase 6 basiert bezüglich der Systemanforderungen auf dem Kenntnisstand zum Zeitpunkt der Projektierungsphase. Die ermittelten RAMS Kennzahlen stellen daher einerseits zwingende Anforderungen an die Realisierung dar, andererseits mussten zum Teil auch Annahmen getroffen werden. Eine sukzessive Kontrolle, Überarbeitung und Anpassung der RAMS- Risikoanalyse ist vorzunehmen. Man muss sich der Tatsache bewusst sein, dass für Komponenten der Betriebslüftung die RAMS-Werte theoretisch festgelegt werden müssen, unter anderem weil zum heutigen Zeitpunkt zu wenige Betriebserfahrungen unter vergleichbaren Randbedingungen vorliegen. Da es für die verwendeten Komponenten kaum verlässliche Zahlenwerte für MTBF und MTTR seitens der Komponentenhersteller oder des Tunnelbetreibers gibt, wurden die Werte in Anlehnung an die im Gotthard Basistunnel verwendeten Werte übernommen beziehungsweise geschätzt. Die MTTR Werte müssen in Zukunft bei allen durchzuführenden Reparaturen und Wartungsarbeiten gewissenhaft erfasst und dokumentiert werden. Es ist für die Aussagekraft der ermittelten RAMS Parameter von großer Bedeutung, dass Neuerkenntnisse und Maßnahmen, die auf Erfahrungen mit den eingebauten Komponenten beziehungsweise vergleichbaren Anwendungen in anderen Tunneln basieren, laufend in RAMS-Betrachtungen einfließen.

Die Phase 6 hat folgende Zielsetzungen:

- Entwicklung und Konstruktion der Subsysteme und Komponenten, die die RAMS-Anforderungen erfüllen.
- Nachweis, dass die Subsysteme und Komponenten die RAMS-Anforderungen erfüllen.
- Planung der nachfolgenden Lebenszyklusaufgaben im Zusammenhang mit RAMS.

### 3.6.2 Eingangsgrößen

Eingangsgrößen für die Phase 6 Entwicklung Konstruktion und Implementierung sind alle gesetzlichen Vorschriften, das Dokument [13] sowie die Ergebnisse der RAMS-Phasen 1 bis 5.

Die wichtigsten Ergebnisse sind:

- Die Erkenntnisse der RAMS-Phase 3, 4 und 5 bezüglich Anforderungen, Abnahmekriterien, -prozesse und -verfahren können übernommen werden.
- Sobald genauere MTBF und MTTR Werte vorliegen müssen die RAMS Phasen 1 bis 5 aktualisiert werden.

### 3.6.2.1 Erfüllung der funktionalen Anforderungen

Die Betriebslüftung ist entsprechend aller bisher beschriebenen funktionalen Forderungen, gemäß RAMS-Phase 5, zu planen und wird alle gestellten Anforderungen erfüllen.

### 3.6.2.2 Erfüllung der Sicherheitsanforderungen

Da die Anlagen der Betriebslüftung in erster Linie Sicherheitsanlagen darstellen, steht die Erfüllung der hohen Sicherheitsziele im Vordergrund. Im Punkt 3.4.33 RAMS Ziel für die Sicherheit (S) und Zuverlässigkeit (R) der Tunnelbelüftung konnte gezeigt werden, dass die Zuverlässigkeit jeder einzelne Komponente über 99,947% liegt.

## 4 Ergebnisse

Beide Tunnel, Spering wie auch Götschka, bleiben bei der Anzahl der erwartbaren Toten deutlich unter der Akzeptanzlinie nach RSV 09.09.31. Hier muss aber berücksichtigt werden dass die Gefahr durch einen Brand im Tunnel zu sterben nicht die Einzige ist. Die Strahlventilatoren sind für die RAMS Risikoanalyse ein schwieriges Thema. Es gibt nur die zwei Systemzustände funktioniert oder funktioniert nicht. Die Anzahl der Strahlventilatoren die im Tunnel verbaut werden müssen wird für besonders ungünstige Umgebungsbedingungen ausgelegt. Bei diesen Bedingungen sind alle Strahlventilatoren notwendig um die benötigte Lüftung zu gewährleisten. Auf der anderen Seite ist die MTBF Berechnung für 12 bzw. 16 Komponenten ohne Redundanz sehr unergiebig. Auch bei der Zuverlässigkeit schneiden die nicht redundant ausgeführten Komponenten schlecht ab.

## 5 Schlussfolgerungen und Ausblick

RAMS Analysen für Straßentunnel sind möglich und erscheinen sehr sinnvoll. Die Tatsache dass es feste Zahlenwerte als Ergebnis ermittelt werden, ermöglicht eine Vergleichbarkeit von verschiedenen Tunneln. Vorausgesetzt es werden dieselben Maßstäbe bei der Ermittlung der RAMS Parameter angesetzt. Eine RAMS Analyse kann keine Mindestanzahl an notwendigen Strahlventilatoren errechnen, dazu braucht man weiterhin das RSV 09.03.11 Tunnel Risikoanalysemodell. Eine RAMS Analyse gibt aber Aufschluss darüber welche Komponenten durch eine Qualitätsverbesserung oder redundante Ausführung die größtmögliche Verbesserung bei der Ausfallssicherheit bewirken. Wenn mehrere Straßentunnel nach RAMS analysiert werden, gibt es auch die notwendige Erfahrung um die Ergebnisse bestmöglich nutzen zu können. RAMS Analysen erlauben es Systeme anders als nach dem bewährten RSV 09.03.11 Tunnel Risikoanalysemodell zu analysieren und zu bewerten.

## 6 Abbildungsverzeichnis

|  |    |
|--|----|
| Abbildung 1: Systemlebenszyklus in 14 Phasen [1] .....                                 | 13 |
| Abbildung 2: Time between Failures [15] .....  | 18 |
| Abbildung 3: MTBF serielle Abhängigkeit .....  | 20 |
| Abbildung 4: Ergebnis MTBF serielle Abhängigkeit .....                                 | 20 |
| Abbildung 5: MTBF parallele Abhängigkeit .....   | 20 |
| Abbildung 6: MTBF Ergebnis parallele Abhängigkeit .....                                | 21 |
| Abbildung 7: Lageskizze der Tunnelkette Klaus [8] .....                                | 23 |
| Abbildung 8: Schematische Darstellung Tunnelkette Klaus im Vollausbau .....            | 25 |
| Abbildung 9: Grundriss Spering Tunnel mit Lüftungstechnischen Komponenten [8] .....    | 30 |
| Abbildung 10: Gesamtstruktur der technischen Komponenten des Systems Spering Tunnel.   | 36 |
| Abbildung 11: Aufbau der Kopfrechner .....   | 38 |
| Abbildung 12: Aufbau einer Mittelspannungsanlage.....                                  | 38 |
| Abbildung 13: Mittelspannungsversorgung .....  | 39 |
| Abbildung 14: Aufbau einer Niederspannungsanlage .....                                 | 39 |
| Abbildung 15: Aufbau der Niederspannungsversorgung .....                               | 40 |
| Abbildung 16: Brandlinienmeldekabel .....  | 40 |
| Abbildung 17: Aufbau eines Längsströmungsmessgeräts .....                              | 40 |
| Abbildung 18: Aufbau der Längsströmungsmessung .....                                   | 41 |
| Abbildung 19: Aufbau eines Strahlventilators .....                                     | 42 |
| Abbildung 20: Aufbau der Strahlventilatoren.....                                       | 42 |
| Abbildung 21 Aufbau einer Querschlagbelüftung .....                                    | 43 |
| Abbildung 22 Systemkomponentenabhängigkeit der Kopfrechner .....                       | 43 |
| Abbildung 23 Systemkomponentenabhängigkeit der Mittelspannungsversorgung.....          | 44 |
| Abbildung 24 Aufbau der Niederspannungsversorgung.....                                 | 44 |
| Abbildung 25 Systemkomponentenabhängigkeit der Niederspannungsversorgung.....          | 45 |
| Abbildung 26: Systemkomponentenabhängigkeit der automatischen Branddetektion.....      | 45 |
| Abbildung 27: Systemkomponentenabhängigkeit der Längsströmungsmessung.....             | 46 |
| Abbildung 28: Systemkomponentenabhängigkeit der Strahlventilatoren.....                | 46 |
| Abbildung 29: Aufbau der Querschlagbelüftungen .....                                   | 47 |
| Abbildung 30: Systemkomponentenabhängigkeit der Querschlagbelüftungen .....            | 47 |
| Abbildung 31: Aufbau Strahlventilatoren mit Redundanz 12/13.....                       | 58 |
| Abbildung 32: Systemkomponentenabhängigkeit der Strahlventilatoren mit Redundanz ..... | 58 |
| Abbildung 33: Ereignisbaumanalyse für PKW .....  | 61 |
| Abbildung 34: Akzeptanzlinie PKW- Brand im Spering Tunnel .....                        | 64 |

|   |     |
|---|-----|
| Abbildung 35: Ereignisbaumanalyse für LKW .....   | 65  |
| Abbildung 36: Akzeptanzlinie LKW- Brand im Spering Tunnel .....                         | 68  |
| Abbildung 37: Ereignisbaumanalyse für einen Reisebus.....                               | 70  |
| Abbildung 38: Akzeptanzlinie Reisebus- Brand im Spering Tunnel.....                     | 73  |
| Abbildung 39: Lageskizze des Götschka Tunnel (Quelle: ASFiNAG) .....                    | 81  |
| Abbildung 40: Schematische Darstellung eines Ereignisfalls und konzentrierter Absaugung | 88  |
| Abbildung 41: Grundriss Götschka Tunnel mit lüftungstechnischen Komponenten .....       | 89  |
| Abbildung 42: Gesamtstruktur des Systems Götschka Tunnel.....                           | 94  |
| Abbildung 43 Aufbau der Strahlventilatoren .....  | 97  |
| Abbildung 44: Aufbau Axialventilator .....  | 98  |
| Abbildung 45: Aufbau Abluftklappe.....  | 98  |
| Abbildung 46: Systemkomponentenabhängigkeit der Strahlventilatoren.....                 | 99  |
| Abbildung 47: Zusammenhang zwischen beiden Axialventilatoren.....                       | 99  |
| Abbildung 48: Aufbau Axialventilation.....  | 100 |
| Abbildung 49: Aufbau Abluftklappen.....   | 101 |
| Abbildung 50: Aufbau der Abluftklappen im System .....                                  | 101 |
| Abbildung 51: Aufbau Strahlventilatoren mit Redundanz (16/17).....                      | 111 |
| Abbildung 52: Systemkomponentenabhängigkeit der Strahlventilatoren mit Redundanz ....   | 111 |
| Abbildung 53: Ereignisbaumanalyse für PKW .....   | 114 |
| Abbildung 54: Akzeptanzlinie PKW- Brand im Götschka Tunnel.....                         | 117 |
| Abbildung 55: Ereignisbaumanalyse für LKW .....   | 118 |
| Abbildung 56: Akzeptanzlinie LKW- Brand im Götschka Tunnel.....                         | 121 |
| Abbildung 57: Ereignisbaumanalyse für einen Reisebus.....                               | 123 |
| Abbildung 58: Akzeptanzlinie Reisebus- Brand im Götschka Tunnel .....                   | 126 |

## 7 Tabellenverzeichnis

|   |    |
|---|----|
| Tabelle 1: Häufigkeit von Gefahrenfällen.....                                     | 15 |
| Tabelle 2: Gefahrenstufen .....   | 16 |
| Tabelle 3: Häufigkeit - Konsequenz -Matrix .....                                  | 16 |
| Tabelle 4: Tunnelkette Klaus .....  | 24 |
| Tabelle 5: Situierung der Strahlventilatoren Spering Tunnel Weströhre [8] .....   | 30 |
| Tabelle 6: Situierung der Strahlventilatoren Spering Tunnel Oströhre [8].....     | 31 |
| Tabelle 7: MTBF und MTTR Werte der einzelnen Komponenten vom Spering Tunnel ..... | 37 |
| Tabelle 8: Häufigkeit von Gefahrenfällen.....                                     | 48 |
| Tabelle 9: Gefahrenstufen .....   | 48 |

|  |     |
|--|-----|
| Tabelle 10: Risikobewertung .....  | 48  |
| Tabelle 11: Summe Ausfallshäufigkeit pro Jahr .....  | 57  |
| Tabelle 12: Risikobewertungsmatrix .....   | 58  |
| Tabelle 13: Summe Ausfallshäufigkeit pro Jahr neu .....  | 59  |
| Tabelle 14: Risikobewertung für das Ereignis PKW- Brand im Spering Tunnel .....  | 62  |
| Tabelle 15: Anzahl der Komponenten je Gefahrenstufe für das Ereignis PKW- Brand im Spering Tunnel .....                                | 62  |
| Tabelle 16: Ausfallswahrscheinlichkeiten pro Jahr für die Ausmaßkategorien 3, 4 und 5 bei einem PKW- Brand im Spering Tunnel .....     | 63  |
| Tabelle 17: Risikobewertung für das Ereignis LKW- Brand im Spering Tunnel.....   | 66  |
| Tabelle 18: Anzahl der Komponenten je Gefahrenstufe für das Ereignis LKW- Brand im Spering Tunnel .....                                | 67  |
| Tabelle 19: Ausfallswahrscheinlichkeiten pro Jahr für die Ausmaßkategorien 3, 4 und 5 bei einem LKW- Brand im Spering Tunnel.....      | 67  |
| Tabelle 20: Risikobewertung für das Ereignis Reisebus- Brand im Spering Tunnel.....  | 71  |
| Tabelle 21: Anzahl der Komponenten je Gefahrenstufe für das Ereignis LKW- Brand in Spering Tunnel .....                                | 71  |
| Tabelle 22: Ausfallswahrscheinlichkeiten pro Jahr für die Ausmaßkategorien 3, 4 und 5 bei einem Reisebus- Brand im Spering Tunnel..... | 72  |
| Tabelle 23: Komponentenverfügbarkeit im Spering Tunnel.....  | 75  |
| Tabelle 24: MTBM und MTTM Werte.....   | 76  |
| Tabelle 25: Richtzeiten.....   | 77  |
| Tabelle 26: Übersicht der Zuverlässigkeit .....  | 77  |
| Tabelle 27: MTBF und MTTR Werte der einzelnen Komponenten vom Götschka Tunnel ...  | 95  |
| Tabelle 28: Ausfallswahrscheinlichkeit pro Jahr .....  | 110 |
| Tabelle 29: Risikobewertungsmatrix .....   | 110 |
| Tabelle 30: Summe Ausfallshäufigkeit pro Jahr neu .....  | 112 |
| Tabelle 31: Risikobewertung für das Ereignis PKW- Brand im Götschka Tunnel .....   | 115 |
| Tabelle 32: Anzahl der Komponenten je Gefahrenstufe für das Ereignis PKW- Brand im Götschka Tunnel .....                               | 116 |
| Tabelle 33 Ausfallswahrscheinlichkeiten pro Jahr für die Ausmaßkategorien 3, 4 und 5 bei einem PKW- Brand im Götschka Tunnel .....     | 116 |
| Tabelle 34: Risikobewertung für das Ereignis LKW- Brand im Götschka Tunnel .....   | 119 |
| Tabelle 35: Anzahl der Komponenten je Gefahrenstufe für das Ereignis LKW- Brand im Götschka Tunnel .....                               | 120 |
| Tabelle 36: Ausfallswahrscheinlichkeiten pro Jahr für die Ausmaßkategorien 3, 4 und 5 bei einem LKW- Brand im Götschka Tunnel .....    | 120 |
| Tabelle 37: Risikobewertung für das Ereignis Reisebus- Brand im Götschka Tunnel.....   | 124 |
| Tabelle 38: Anzahl der Komponenten je Gefahrenstufe für das Ereignis Reisebus- Brand im Götschka Tunnel .....                          | 124 |

|   |     |
|---|-----|
| Tabelle 39: Ausfallswahrscheinlichkeiten pro Jahr für die Ausmaßkategorien 3, 4 und 5 bei einem Reisebus- Brand im Götschka Tunnel..... | 125 |
| Tabelle 40: Komponentenverfügbarkeit im Götschka Tunnel.....  | 128 |
| Tabelle 41: MTBM und MTTM Werte.....  | 129 |
| Tabelle 42: Richtzeiten.....  | 130 |
| Tabelle 43: Übersicht der Zuverlässigkeit .....   | 131 |

## Literaturverzeichnis

|      |  |
|------|--|
| [1]  | ÖNORM EN50126/AC „Bahnanwendungen Spezifikation und Nachweis der Zuverlässigkeit, Verfügbarkeit, Instandhaltbarkeit und Sicherheit (RAMS); Ausgabe 2011-05-01  |
| [2]  | Application of QRA in operational safety issues; Andrew Franks, Richard Whitehead, Phil Crossthwaite and Louise Smal; Ausgabe: Health and Safety Executive 2002; ISBN 0 7176 2570 2  |
| [3]  | Handbuch Eisenbahninfrastruktur, Lothar Fendrich, Springer Verlag, ISBN-10 3-540-29581-X Kapitel 14.3 Seite 663  |
| [4]  | DIN EN/IEC61709 Elektrische Bauelemente - Zuverlässigkeit - Referenzbedingungen für Ausfallraten und Beanspruchungsmodelle zur Umrechnung; Autor: Patrick Gehlen; 2. Auflage, ISBN 978-3-89578-366-1; Kapitel 3.14; Seite 171;                       |
| [5]  | Taschenbuch automatisierte Montage- und Prüfsysteme; Autor Stephan Sommer; ISBN 3446414665; Verlag: Hanser; Ausgabe: 2008  |
| [6]  | Universität Mannheim; Lehrstuhl für Praktische Informatik; Skriptum der Vorlesung Angewandte IT-Sicherheit; Übung 3; von Prof. Dr. Felix C. Freiling   |
| [7]  | <a href="http://reliabilityanalyticstoolkit.appspot.com">http://reliabilityanalyticstoolkit.appspot.com</a> (Zugriff vom 19.11.2013)   |
| [8]  | A9 PYHRN AUTOBAHN TUNNELKETTE KLAUS VOLLAUSBAU ; Technischer Bericht Tunnelkette Klaus Dimensionierung der Tunnellüftung Spering Tunnel; Plannummer ASFINAG 3061770 / E16/0 - 509 / TTK / T1A; Version 1.0; Bericht Nr.: FVT-04/13/FB V&U 27/13/6400 |
| [9]  | A9 PYHRN AUTOBAHN TUNNELKETTE KLAUS VOLLAUSBAU; SPERINGTUNNEL, RV-PHASE VOLLAUSBAU; RISIKOANALYSE GEM RVS 09.03.11; Plannummer ASFINAG 3061770 / A12 /0 - 509 / TTK / T1A; Stand: 15.02.2013   |
| [10] | Richtlinien und Vorschriften für das Straßenwesen RVS 09.02.31 Tunnel Tunnelausrüstung Belüftung; ÖSTERREICHISCHE FORSCHUNGS-GESELLSCHAFT STRASSE • SCHIENE • VERKEHR; Ausgabe: 1. August 2008   |
| [11] | Richtlinien und Vorschriften für das Straßenwesen RSV 09.03.11 Tunnel Risikoanalysemodell Merkblatt; ; ÖSTERREICHISCHE FORSCHUNGS-   |

|      |  |
|------|--|
|      | GESELLSCHAFT STRASSE • SCHIENE • VERKEHR; Ausgabe: 1.Juni 2008   |
| [12] | Technisches Planungshandbuch der ASFiNAG Tunnel- Lüftung (TLü) Technische Richtlinie; Dokument-Nr.: 800.542.1000, Version 2.0  |
| [13] | S10 Mühlviertler Schnellstraße; Planung der Tunnellüftungsanlagen Tunnel Götschka Lüftungstechnischer Bericht Ausführungsplanung, U.Ref.: 6156.0-R-006E, Minusio, April 2011, LOMBARDI AG  |
| [14] | <a href="http://www.asfinag.at">www.asfinag.at</a> Mühlviertler Schnellstraße S10 (Zugriff am 12.11.2013)<br><a href="http://www.asfinag.at/unterwegs/bauprojekte/oberoesterreich/-/asset_publisher/1_47143/content/s-10-muhlviertler-schnellstrasse-unterweilersdorf-%E2%80%93-freistadt-nord-b-310-?p_o_p_id=56_INSTANCE_I8LKwiYWAPVa">http://www.asfinag.at/unterwegs/bauprojekte/oberoesterreich/-/asset_publisher/1_47143/content/s-10-muhlviertler-schnellstrasse-unterweilersdorf-%E2%80%93-freistadt-nord-b-310-?p_o_p_id=56_INSTANCE_I8LKwiYWAPVa</a> |
| [15] | <a href="http://de.wikipedia.org/wiki/Mean_Time_Between_Failures">http://de.wikipedia.org/wiki/Mean_Time_Between_Failures</a> (zugriff am 12.11.2013)  |
| [16] | Gotthard Basistunnel Los C, „Betriebslüftung GBT“; Alp Transit Gotthard San Gottardo; Ingenieurgemeinschaft Gotthard; DMS-Nr.: LZ01-#161501; Bericht-Nr.: 220444 – 343234; vom 31.3.2009   |