

Landesbetrieb Straßenbau und Verkehr Schleswig-Holstein

## Elbquerung BAB A 20 bei Glückstadt

# Untersuchung der Wirksamkeit einer Automatischen Brandbekämpfungsanlage

Zusatzbericht zur Risikoanalyse



Mai 2010

**INHALTSVERZEICHNIS**

<b>1</b>	<b>EINLEITUNG</b>	<b>4</b>
<b>2</b>	<b>AUFGABENSTELLUNG</b>	<b>4</b>
<b>3</b>	<b>VORGEHENSWEISE</b>	<b>4</b>
<b>4</b>	<b>UNTERSUCHUNGSGRUNDLAGEN / AUSGANGSLAGE</b>	<b>4</b>
<b>5</b>	<b>UNTERSUCHUNGSVARIANTE ABBA</b>	<b>5</b>
<b>6</b>	<b>UNTERSUCHUNGSSZENARIEN</b>	<b>6</b>
6.1	Richtungs- und Gegenverkehrsbetrieb	6
6.2	Brandort	7
6.3	Brandleistung (5 MW, 30 MW, 100 MW)	7
6.4	Zeitraum (Tag/Nacht)	7
6.5	Verkehrszustände (Stau / freier Verkehr)	7
6.6	Detektion	8
6.7	Aktivierung des Lüftungssystems	8
6.8	Aktivierung des automatische Brandlöschsystems	9
6.9	Erhöhtes Schadensausmaß	9
6.10	Zusammenfassung der Untersuchungsszenarien	9
<b>7</b>	<b>DIMENSIONIERUNG / MODELLIERUNG DER ABBA</b>	<b>12</b>
7.1	Wirkungsweise	12
7.2	ABBA-Kenngrößen	13
<b>8</b>	<b>NUMERISCHE AUSBREITUNGSBERECHNUNG / BRANDSIMULATION</b>	<b>13</b>
8.1	Mathematisches Modell	13
8.2	Algorithmus	14
8.3	Modellierung der Tunnel (Preprocessing)	15
8.3.1	Brandleistung	15
8.3.2	Rauchmenge	17
8.4	Simulationsergebnisse (Postprocessing)	17
8.4.1	Temperaturverteilung 30 MW Brand	17
8.4.1.1	Untersuchungstunnel (Nullfall)	17
8.4.1.2	Untersuchungstunnel mit zusätzlicher ABBA (Planfall 3)	19
8.4.2	Rauchausbreitung 30 MW Brand	21
8.4.2.1	Untersuchungstunnel (Nullfall)	21

---

8.4.2.2	Untersuchungstunnel mit zusätzlicher ABBA (Planfall 3)	23
8.4.3	Sichtweiten 30 MW Brand	25
8.4.3.1	Untersuchungstunnel (Nullfall)	25
8.4.3.2	Untersuchungstunnel mit zusätzlicher ABBA (Planfall 43)	26
8.4.4	CO-Ausbreitung 30 MW Brand	28
8.4.4.1	Untersuchungstunnel (Nullfall)	28
8.4.4.2	Untersuchungstunnel mit zusätzlicher ABBA (Planfall 3)	30
<b>8.5</b>	<b>Detaillierte Temperaturuntersuchung</b>	<b>31</b>
<b>9</b>	<b>RISIKOBERECHNUNG</b>	<b>34</b>
<b>9.1</b>	<b>Häufigkeitsermittlung</b>	<b>34</b>
<b>9.2</b>	<b>Ausmaßermittlung</b>	<b>36</b>
9.2.1	Zusammenhang zwischen Sichtweite und Fluchtgeschwindigkeit	36
9.2.2	Toxizität von Brandgasen	37
9.2.3	Einfluss von Temperatur auf den menschlichen Organismus	38
9.2.4	Bestimmung von Selbstrettungsbereichen	40
9.2.5	Bestimmung von Personendichten	41
9.2.6	Schadenausmaßbestimmung	42
<b>9.3</b>	<b>Risikoermittlung</b>	<b>43</b>
<b>10</b>	<b>UNTERSUCHUNGSERGEBNISSE</b>	<b>44</b>
<b>10.1</b>	<b>Ermittlung der Häufigkeiten <math>H_0</math> der Initialereignisse</b>	<b>44</b>
<b>10.2</b>	<b>Ermittlung der Verzweigungswahrscheinlichkeiten <math>P_i</math> im Ereignisablauf</b>	<b>45</b>
10.2.1	Verzweigungswahrscheinlichkeiten $P_i$ infolge Brand	45
10.2.2	Verzweigungswahrscheinlichkeiten $P_i$ infolge Kollision	47
<b>10.3</b>	<b>Ausmaßabschätzung</b>	<b>47</b>
10.3.1	Schadensausmaße infolge Brand	47
10.3.2	Schadensausmaße infolge Kollision	49
<b>10.4</b>	<b>Risikoermittlung (H-A-Diagramm)</b>	<b>49</b>
<b>10.5</b>	<b>Risikowerte</b>	<b>52</b>
<b>10.6</b>	<b>Kostenwirksamkeit</b>	<b>55</b>
<b>11</b>	<b>ZUSAMMENFASSUNG UND FAZIT</b>	<b>58</b>
<b>12</b>	<b>LITERATURVERZEICHNIS</b>	<b>60</b>

## 1 Einleitung

Die aufgrund der besonderen Charakteristik der A20 Elbquerung durchgeführten quantitativen Risikoanalysen haben ergeben, dass mit der geplanten Ausführung Abweichungen im Sicherheitsniveau in Bezug auf eine Ausführung nach RABT 2006 bestehen (siehe Hauptbericht [BAL 2010]). Im Rahmen dieser Risikoanalysen konnte gezeigt werden, dass mit Zusatzmaßnahmen die vorhandenen Risiken kompensiert werden können und ein Sicherheitsniveau über dem eines richtliniengerecht ausgeführten Tunnels erzielt wird. Hinsichtlich weiterer potenzieller Maßnahmen zur Reduzierung von Schadensausmaßen nach Ereigniseintritt steht die Frage im Raum, inwieweit durch die Installation eines automatischen Brandlöschsystems ein vergleichbares Sicherheitsniveau erzielt werden kann.

## 2 Aufgabenstellung

Mit Hilfe einer quantitativen Risikoanalyse ist zu untersuchen, welches Sicherheitsniveau mit der beabsichtigten Tunnellösung (Längslüftung mit Rauchabsaugung) bei zusätzlicher Installation einer automatischen Brandbekämpfungsanlage (ABBA) erreicht werden kann.

## 3 Vorgehensweise

Analog zu der bisherigen Untersuchungsmethodik erfolgt die Bestimmung des Sicherheitsniveaus mittels einer quantitativen Risikoanalyse, wodurch sowohl **Schadensausmaße** als auch deren **Eintrittshäufigkeiten** berücksichtigt werden. Als Maß für die Sicherheit dient das Risiko, das aus der Verknüpfung der Eintrittshäufigkeiten mit den jeweiligen Schadensausmaßen resultiert.

## 4 Untersuchungsgrundlagen / Ausgangslage

Die Untersuchungsgrundlagen wie

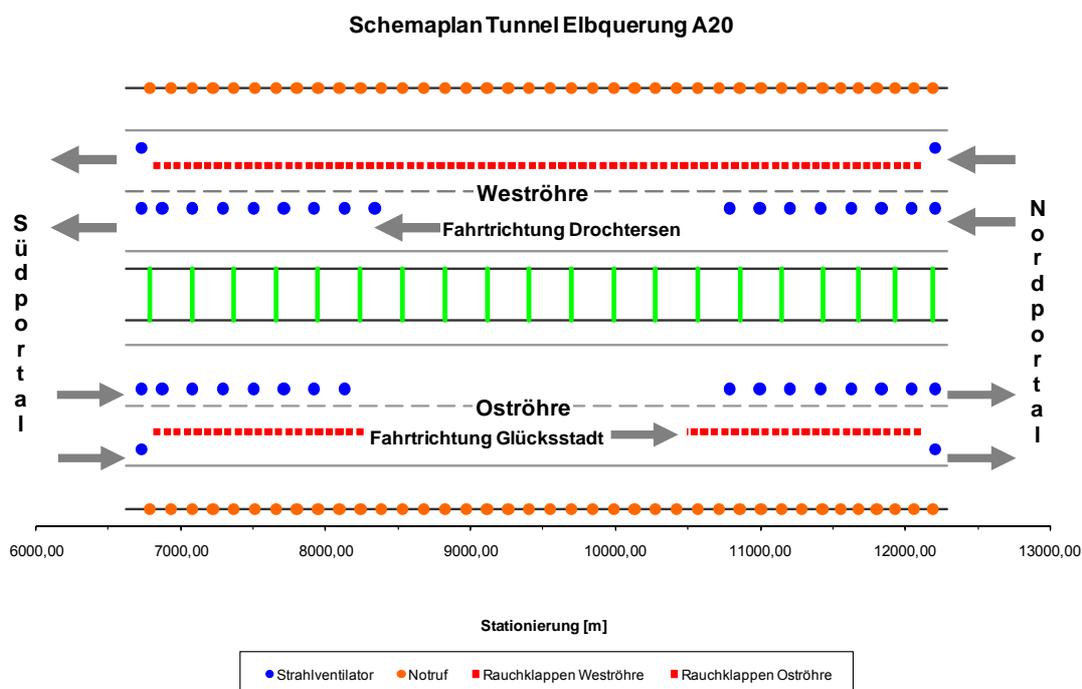
- ▶ Lage,
- ▶ Geometrische Verhältnisse,
- ▶ Verkehrsaufkommen

werden durch die zusätzlich modellierte Brandbekämpfungsanlage nicht verändert. Nähere Informationen zu den Untersuchungsgrundlagen können dem Hauptbericht [BAL 2010] im Kapitel 4 entnommen werden.

## 5 Untersuchungsvariante ABBA

Die untersuchten Varianten des Hauptberichtes unterscheiden sich in mehreren Punkten. Die maximalen Längsneigungen werden für den Referenztunnel auf 3 % begrenzt, während sie im Untersuchungstunnel Beträge von ca. 4 % erreichen. Weiteres Unterscheidungsmerkmal sind die Abstände der Querschläge zwischen den Tunnelröhren.

Nachfolgende Abbildung 1 zeigt die Anordnung der maßgeblichen Ausstattungselemente für den Referenztunnel nach RABT 2006.

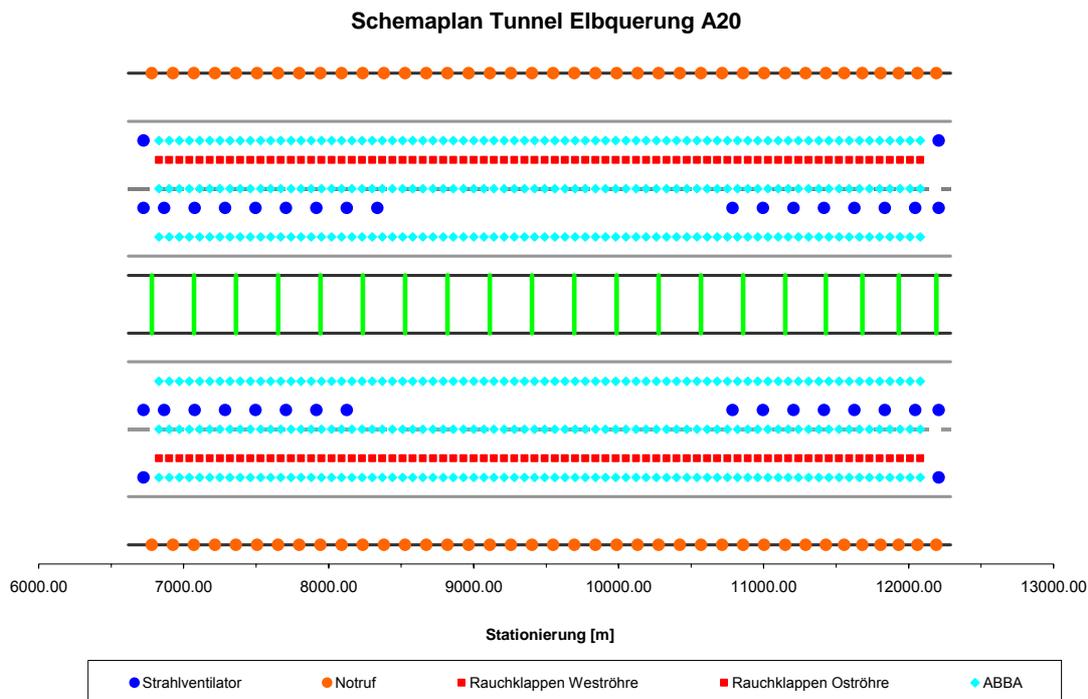


**Abbildung 1: Schemaplan Referenzfall, Notausgangsabstand 300 m Nullfall**

Der Referenztunnel sowie der Untersuchungstunnel mit seinen Varianten Nullfall, Planfall 1 (verkürzte Detektion) sowie Planfall 2 (stationäre Geschwindigkeitskontrolle) sind im Hauptbericht detailliert beschrieben. Die Untersuchung der ABBA wird nachfolgend als Planfall 3 bezeichnet.

Der Planfall 3 unterscheidet sich im Vergleich zum Nullfall des Untersuchungstunnels lediglich in der zusätzlichen Installation einer automatischen Brandbekämpfungsanlage. Die restlichen Tunnelparameter bleiben unverändert

Abbildung 2 gibt schematisch die Anordnung der Sicherheitseinrichtung für den Untersuchungstunnel im Planfall 3 wieder.



**Abbildung 2: Schemaplan Planfall 3, Untersuchungstunnel mit automatischer Brandbekämpfungsanlage (ABBA)**

## 6 Untersuchungsszenarien

Die zu untersuchenden Szenarien variieren in der Betriebsart, der Brandleistung, dem Zeitraum, dem Verkehrszustand und in der Detektionszeit. Analog zum Hauptbericht wird bei Richtungsverkehrsbetrieb, ein Brand im Bereich kurz vor dem Beginn bzw. dem Ende der Nordrampe festgelegt

### 6.1 Richtungs- und Gegenverkehrsbetrieb

Die Tunnelröhren werden ausschließlich im Richtungsverkehr betrieben. Die Betrachtung eines Gegenverkehrsbetriebs erfolgt daher nicht.

## **6.2 Brandort**

Das zu erwartende Schadensausmaß kann durch die Lage des Brandortes beeinflusst werden. Als Brandort wird im Rahmen der Untersuchung der Szenarien der Tiefpunkt beider Röhren kurz vor dem Beginn bzw. dem Ende der Nordrampe festgelegt.

## **6.3 Brandleistung (5 MW, 30 MW, 100 MW)**

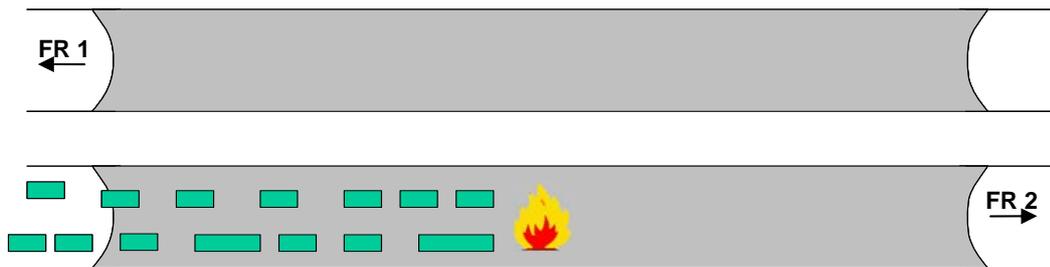
In Abhängigkeit der Fahrzeugkategorie unterscheiden sich die Brandszenarien gemäß RABT 2006. Für einen Pkw-Brand wird eine Brandleistung von 5 MW angenommen. Einem Bus- oder Lkw-Brand wird eine Brandleistung von 30 MW zugrunde gelegt. Aufgrund einer zu erwartenden Lkw-Fahrleistung von 18.534 Lkw-km pro Tag und Röhre sind nach RABT 2006 auch Brandleistungen von 100 MW zu berücksichtigen. Dies entspricht dem Brand eines Gefahrgut transportierenden Lkw bzw. dem Brand mehrerer Lkw.

## **6.4 Zeitraum (Tag/Nacht)**

Einen wesentlichen Einfluss auf das zu erwartende Schadensausmaß hat die Anzahl der potenziell betroffenen Personen im Ereignisfall. Zur Berücksichtigung unterschiedlichen Personenaufkommens werden daher Zeiten mit hohem und mit schwachem Verkehrsaufkommen differenziert betrachtet.

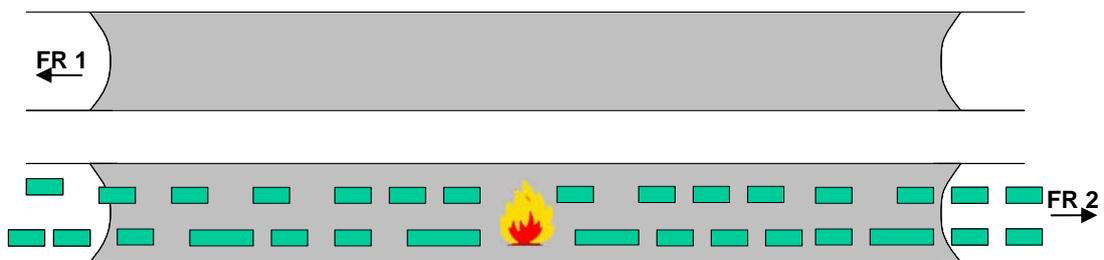
## **6.5 Verkehrszustände (Stau / freier Verkehr)**

Erhebliche Auswirkungen auf die Ausmaßermittlung hat der vorherrschende Verkehrszustand zu Beginn eines Brandereignisses. Aufgrund der potentiellen Gefahr von verkehrlicher Überlast oder durch Rückstaubildung z. B. durch einen Unfall, ist im vorliegenden Fall zwischen den Verkehrszuständen bei freiem Verkehrsfluss und Vollstau zu unterscheiden. Im Fall eines Brandereignisses bei freiem Verkehrsfluss werden sich die auf den Brand zufahrenden Fahrzeuge vor dem Brandherd aufstauen, während die auf der stromabwärtigen Seite befindlichen Fahrzeuge frei aus dem Tunnel ausfahren können. In Abbildung 3 ist die sich bei freiem Verkehrsfluss einstellende Stausituation dargestellt.



**Abbildung 3: Stausituation bei freiem Verkehrsfluss**

Eine grundsätzlich andere Situation ergibt sich im Fall eines Staus infolge von Überlastung bzw. Störungen in den nachfolgenden Streckenabschnitten. Hierbei können Tunnelnutzer beidseitig des Brandherdes der Gefahr von Rauch und Temperatur ausgesetzt sein. Abbildung 4 zeigt die Situation bei stockendem Verkehr bzw. Stau.



**Abbildung 4: Stausituation bei stockendem Verkehr bzw. Stau**

## 6.6 Detektion

Die Alarmierung der Tunnelnutzer im Brandfall sowie das Aktivieren der jeweiligen Sicherheitseinrichtungen haben signifikante Auswirkungen auf das jeweilige Schadensausmaß. Im Weiteren wird daher unterschieden zwischen einer erfolgreichen Detektion innerhalb von 60 s bzw. keiner Detektion.

## 6.7 Aktivierung des Lüftungssystems

Die Rauchausbreitung und somit das Schadensausmaß infolge Rauch- und Temperatureinwirkung ist abhängig von der Aktivierung der Lüftungseinrichtungen nach Detektion des Brandes. Somit ist der Erfolgsgrad der Aktivierung des Lüftungssystems mit zu berücksichtigen.

## 6.8 Aktivierung des automatische Brandlöschsystems

Mittels eines automatischen Brandlöschsystems lässt sich nach dessen Aktivierung die Brandausbreitung eindämmen und somit die Einwirkungen infolge Temperatur, Rauchgasen und Rauchpartikel verringern. Daher hat das erfolgreiche Aktivieren eines Brandlöschsystems einen maßgeblichen Einfluss auf das zu erwartende Schadensausmaß und ist im Ereignisablauf mit einzubeziehen.

Die Rauchausbreitung und somit das Schadensausmaß infolge Rauch- und Temperatureinwirkung werden maßgeblich durch ein automatisches Brandlöschsystem beeinflusst.

## 6.9 Erhöhtes Schadensausmaß

Bei der unmittelbaren Beteiligung von Bussen ist aufgrund der hohen Personendichte im Ereignisfall ein erhöhtes Schadensausmaß zu erwarten. Dies ist daher bei der Schadensausmaßermittlung gleichfalls mit zu berücksichtigen.

## 6.10 Zusammenfassung der Untersuchungsszenarien

Eine Zusammenfassung der zu untersuchenden Szenarien enthalten nachfolgende Tabellen.

Tabelle 1 enthält getrennt nach Untersuchungsfällen eine Zusammenstellung der im Brandfall maßgeblich den Ereignisablauf und somit das jeweilige Schadensausmaß beeinflussenden Parameter. Ab der Lage des Brandortes bedeutet jede Kategorie eine Verzweigung im Ereignisablauf. Die Anzahl der Verzweigungen und somit die Anzahl der Endzustände (Anzahl Szenarien) ergibt sich dann durch zeilenweise Multiplikation der Entscheidungspunkte je Untersuchungskategorie. Es ergeben sich somit mindestens **1.536** Endzustände, für die das jeweilige Schadensausmaß ermittelt werden muss. Die Quantifizierung der Schadensausmaße erfolgt mittels Simulationsrechnungen.

In Tabelle 2 sind die erforderlichen Simulationsrechnungen je Untersuchungsfall aufgeführt. Die hierzu notwendige Anzahl ergibt sich durch zeilenweise Multiplikation der strömungsmechanisch relevanten Entscheidungspunkte je Untersuchungskategorie. Insgesamt sind somit **24** Simulationsrechnungen erforderlich. Aufgrund der bereits für den Hauptbericht durchgeführten Simulationen und Auswertungen musste nur ein Teil der Simulationen neu durchgeführt werden.

Die für den Nachweis der ABBA notwendigen Änderungen in der Modellierung der Simulationen führten zu einer verlängerten Simulationsdauer. Pro Simulation waren zur Berechnung von 6 Minuten physikalischer Zeit bis zu 8 Tagen Simulationszeit notwendig.

Fall	Lüftungssystem	Anzahl Röhren	Betriebszustände RV / GV	Abstand Notausgänge 300m	Unfall mit Kfz-Brand ja / nein	Brandort	Brandleistung 5 MW/ 30 MW / 100 MW	Zeitraum Tag / Nacht	Verkehrszustand Frei / Stau	Detektion erfolgreich <= 60 sec ja / nein	Tunnel-sperrung ja /nein	Lüftungssystem aktiviert ja / nein	Automat. Brandlöschsystem aktiviert ja / nein	Erhöhtes Ausmaß ja / nein	Anzahl Szenarien / Endzustände
Untersuchungstunnel mit ABBA (Planfall 3) ABBA	Längslüftung mit Absaugklappen	2	1	1	2	1	3	2	2	2	2	2	2	2	1536
<b>Gesamt</b>														<b>1536</b>	

**Tabelle 1: Maßgebende zu untersuchende Szenarien**

Fall	Lüftungssystem	Anzahl Röhren	Betriebszustände RV / GV	Abstand Notausgänge 300m	Unfall mit Kfz-Brand ja / nein	Brandort	Brandleistung 5 MW/ 30 MW / 100 MW	Zeitraum Tag / Nacht	Verkehrszustand Frei / Stau	Detektion erfolgreich <= 60 sec ja / nein	Tunnel-sperrung ja /nein	Lüftungssystem aktiviert ja / nein	Automat. Brandlöschsystem aktiviert ja / nein	Erhöhtes Ausmaß ja / nein	Anzahl Simulationen
Untersuchungstunnel mit ABBA (Planfall 34) ABBA	Längslüftung mit Absaugklappen	2	1	1	1	1	3	1	2	1	1	2	2	1	48 (24)
<b>Gesamt</b>														<b>48 (24)<sup>1</sup></b>	

**Tabelle 2: Erforderliche CFD Simulationsberechnungen**

<sup>1</sup> Unter Ausnutzung von Synergien aus den bereits durchgeführten Berechnungen in den vorausgegangenen Risikoanalysen reduziert sich die erforderliche Anzahl auf 24 Simulationen

## 7 Dimensionierung / Modellierung der ABBA

Automatische Brandbekämpfungsanlagen lassen sich hinsichtlich ihrer Wirkungsweisen prinzipiell unterteilen in

- ▶ Ausschließlich wassergestützte Systeme,
- ▶ Schaumbasierte Systeme,
- ▶ Löschgassysteme (inerte, chemische Löschgase).

Aufgrund des einfacheren Systemaufbaus befinden sich im Tunnelfahrraum auf internationaler Ebene überwiegend wassergestützte Systeme im Einsatz. Hierbei ist zu unterscheiden zwischen

- ▶ konventionellen Sprinklersystemen (1 mm Tropfendurchmesser),
- ▶ Systemen mit Niederdruckwassernebel (0,1 mm Tropfendurchmesser),
- ▶ Systemen mit Hochdruckwassernebel (0,01 mm Tropfendurchmesser).

Automatische Brandbekämpfungsanlagen mit Hochdruckwassernebel versprechen im Vergleich zu konventionellen Sprinklersystemen einen um 90% reduzierten Wasserbedarf. Im Folgenden wird daher von der Installation einer Hochdruckwassernebelanlage ausgegangen und unter dem Begriff ABBA sublimiert.

### 7.1 Wirkungsweise

Bei einer Hochdruckwassernebelanlage wird Wasser unter hohem Druck über an der Tunneldecke montierten Düsen im Tunnelfahrraum zerstäubt. Die im Vergleich zu konventionellen Systemen deutlich geringere Wassertropfengröße bewirkt ein schnelleres Verdampfen und somit eine schnellere Wärmeaufnahme wodurch ein ausgeprägter Kühleffekt entsteht. Beim Verdampfen vergrößert sich außerdem das Volumen des Wassers um das 1600-fache. Dadurch wird der Luftsauerstoff verdrängt und so dem Brand entzogen. Dieser Effekt tritt jedoch nur in unmittelbarer Brandnähe auf, so dass dadurch keine Gefährdung von Tunnelnutzern zu erwarten ist.

Im Gegensatz zur herkömmlichen Brandventilation bewirkt eine ABBA damit eine aktive Brandbekämpfung, die in der Lage ist, Brände im Ausmaß, bis hin zum Erstickten eines Brandes, zu begrenzen. Die hohe Effektivität erfordert eine relativ geringe Löschwasserbevorratung und führt zu geringeren schadstoffhaltigen Abwassermengen notwendig und weniger Schadstoffe kontaminieren das Wasser.

## 7.2 ABBA-Kenngrößen

Aufgrund der Tunnelgeometrie der Röhren wird ein Rastermaß von 3 x 3 m gewählt, in dem die Düsen an der Decke installiert sind. Der Fahrbahnabstand ist durchgängig auf 5 m gesetzt. Pro Düse wird eine Wassermenge von 10 l/s bei einem Arbeitsdruck des Systems von ca. 100 bar vorgegeben. Die mittlere Wassertropfengröße beträgt hierbei 1/100 mm. Zur Erzielung der erforderlichen Löschwirkung an jedem beliebigen Ort, wäre der gesamte Tunnel mit entsprechenden Versorgungsleitungen und Düsen auszustatten. Da im Brandfall jedoch nur die Düsen im Nahbereich des Brandherdes zu aktivieren sind, erfolgt dies im vorliegenden Fall lediglich in einem Bereich von ca. 50 m. Eine größere Aktivierungsfläche bewirkt in der Regel keine signifikante Verbesserung in der Brandbekämpfung, führt aber zu einem erhöhten Wasserverbrauch. Des Weiteren wird davon ausgegangen, dass die Löschleistung analog zur Rauchabsaugung 60 sec. nach erfolgter Detektion zur Verfügung steht.

## 8 Numerische Ausbreitungsberechnung / Brandsimulation

Grundlage der Ausmaßermittlung bilden die numerischen Berechnungen zur Brandentwicklung und Rauchausbreitung. Aufgrund der zentralen Bedeutung der Simulationen werden im Folgenden das mathematische Modell, der Algorithmus und die Modellierung der maßgebenden Größen kurz erläutert.

### 8.1 Mathematisches Modell

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

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

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

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

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

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

Die zeitliche und räumliche Diskretisierung erfolgt mit Hilfe der Finiten Differenzen Methode. D. h. der Differentialquotient

$$\frac{\partial u}{\partial x} = \lim_{h \rightarrow 0} \frac{u(x+h, y) - u(x, y)}{h}$$

wird durch den Differenzenquotient

$$\frac{\partial u}{\partial x} = \frac{u(x+h, y) - u(x, y)}{h}$$

approximiert. Die zeitliche Diskretisierung erfolgt hierbei mit einem expliziten Predictor-Corrector Verfahren 2-ter Ordnung. Die räumlichen Ableitungen werden durch Finite Differenzen zweiter Ordnung approximiert. Das resultierende lineare Gleichungssystem lässt sich dann iterativ lösen.

## 8.2 Algorithmus

Der verwendete Algorithmus zählt zu den sog. Druckkorrekturverfahren. Dabei wird ein nicht divergenzfreies Geschwindigkeitsfeld mit Hilfe des Druckes durch Lösen einer Poissongleichung in ein divergenzfreies Geschwindigkeitsfeld überführt. Im Einzelnen werden folgende Schritte bis zum Erreichen der vorgegebenen physikalischen Endzeit durchlaufen:

1. Festlegung der physikalischen Endzeit der Berechnung  $t_{\text{end}}$
2. Bestimmung der Zeitschrittweite  $\delta t$
3. Berechnung eines nicht divergenzfreien Geschwindigkeitsfeldes  $u^{(n)*}$
4. Iterative Lösung einer Poissongleichung für den Druck  $p^{(n+1)}$   
mit Hilfe des nichtdivergenzenfreien Geschwindigkeitsfeldes  $u^{(n)*}$
5. Berechnung der Geschwindigkeiten  $u^{(n+1)}$  durch Korrektur des vorläufigen Geschwindigkeitsfeldes mit Hilfe des Druckes  $p^{(n+1)}$

6. Berechnung von  $T^{(n+1)}$ ,  $c^{(n+1)}$ , ...
7. Erhöhung der Zeit  $t$  um die Zeitschrittweite  $\delta t$
8. Wiederholung der Schritte 1-7 bis  $t_{\text{end}}$  erreicht

Die Zeitschrittweite bestimmt sich aus den folgenden nach Courant-Friedrichs-Lewy (1928) benannten Stabilitätsbedingungen

$$\delta t < \frac{\delta x}{|u_{\max}|} \quad \delta t < \frac{\delta y}{|v_{\max}|} \quad \delta t < \frac{\delta z}{|w_{\max}|}.$$

Danach darf sich ein Fluidteilchen innerhalb der Zeitschrittweite  $\delta t$  um nicht mehr als eine Gitterweite  $\delta x$  bewegen.

Der Zeitaufwand zur Durchführung der Simulationsrechnungen resultiert somit aus der Zeitschrittweite  $\delta t$  und den zur Lösung der Poissongleichung benötigten Iterationen. Typischerweise entstehen dadurch für ein Szenario mit einer ABBA Rechenzeiten auf einem PC von mehreren Tagen.

### 8.3 Modellierung der Tunnel (Preprocessing)

Die im Hauptbericht dargestellten Parameter hinsichtlich

- ▶ Tunnelgeometrie
- ▶ Längsneigung
- ▶ Ventilation und Rauchabsaugung
- ▶ Brandstelle / Brandherd

bleiben für den Zusatzbericht unverändert.

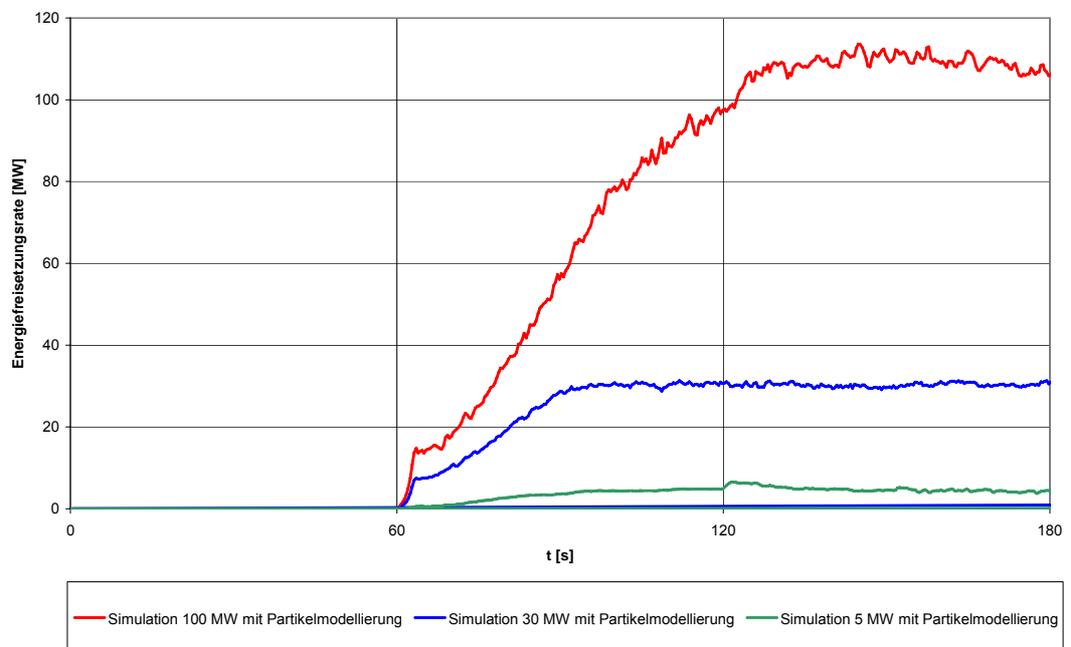
#### 8.3.1 Brandleistung

Als Brandleistung wird in der Regel die maximale Energiefreisetzungsrate, welche über eine signifikante Zeitdauer auftritt, bezeichnet. Die Energiefreisetzungsrate bestimmt die Rauchgastemperatur und ist die treibende Kraft hinter der Rauchausbreitung. Eine Zusammenstellung der typischerweise während eines Fahrzeugbrandes auftretenden Brandleistungen enthält Tabelle 3.

Kfz	Brandleistung [MW]
Pkw	3-5
Van	5
Transporter	15
Bus / Lkw	30
Lkw, beladen (Gefahrgut)	50 (100)

**Tabelle 3: Reale Energiefreisetzungsraten**

Im Rahmen dieser Untersuchung werden Brandleistungen von 5 MW, 30 MW und 100 MW betrachtet. Abbildung 5 beinhaltet den zeitlichen Verlauf der simulierten Energiefreisetzungsrate. Um die hochdynamischen sowie mehrphasigen Vorgänge bei der Abbildung eines Löschesystems berücksichtigen zu können, erfolgt im Gegensatz zu den bisherigen Modellierungen die Abbildung des Brennstoffes mit Hilfe eines Partikelmodells. Die Energiefreisetzung erfolgt hierbei über simulierte Benzinpartikel, die in ihren chemisch-physikalischen Eigenschaften abgebildet werden. Die daraus resultierenden Energiefreisetzungsrate sind jedoch mit denen der bisherigen Modellierung vergleichbar.



**Abbildung 5: Simulierte Energiefreisetzungsrate**

### **8.3.2 Rauchmenge**

Wesentlichen Einfluss auf die sich einstellenden Sichtbedingungen haben die durch einen Brand freigesetzten Rauchpartikel. Analog zu den vorherigen Untersuchungsfällen werden dieselben Ruß- und CO-Entstehungsanteile angenommen. Für Ruß wurde dabei ein Anteil von 0,1 kg/kg angenommen. Für CO ergibt sich ein Wert von 0,004 kg/kg.

## **8.4 Simulationsergebnisse (Postprocessing)**

Die Ausbreitungsberechnungen erfolgten wie gehabt unter Annahme des Brandherdes in den Tiefpunkten der Tunnelröhren kurz vor dem Beginn bzw. dem Ende der Nordrampe. Im Folgenden werden exemplarisch Ergebnisse aus den numerischen Berechnungen zu den 30 MW Bränden in der Oströhre (FR Nord) des Untersuchungstunnels für das Szenario Stau erläutert. Eine umfassende Zusammenstellung der Simulationsergebnisse für sämtliche weiteren Untersuchungsszenarien ist im Anhang dargestellt. Der Start des Brandes erfolgt in allen Szenarien 60 Sekunden nach Simulationsbeginn. Die Darstellung der Rechenergebnisse in den Ausbreitungsplots erfolgt zehnfach überhöht.

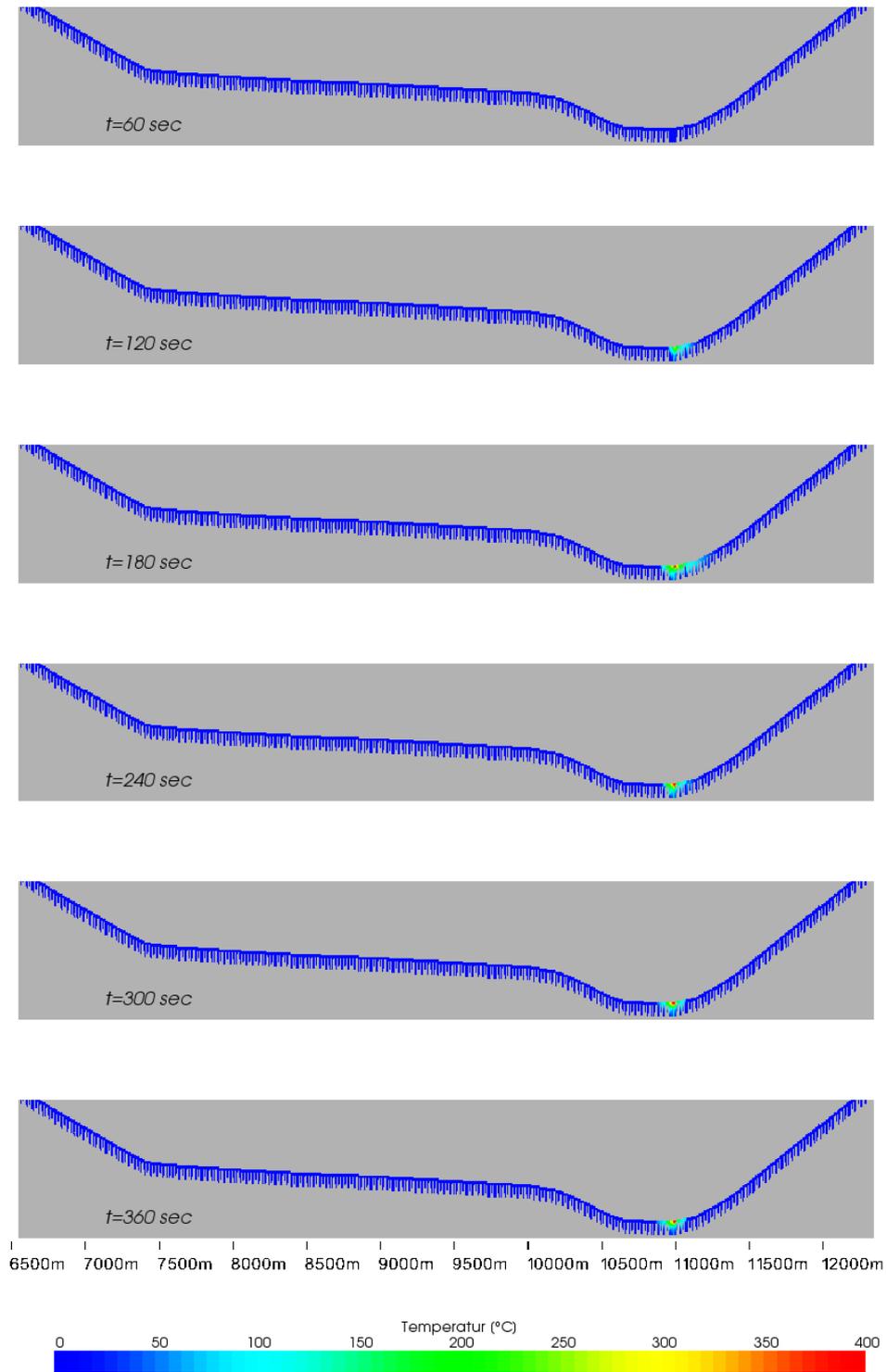
Zur Verdeutlichung der Unterschiede werden die Grafiken für den Nullfall hier erneut aufgeführt

### **8.4.1 Temperaturverteilung 30 MW Brand**

#### **8.4.1.1 Untersuchungstunnel (Nullfall)**

Abbildung 6 zeigt die Temperaturverteilungen für den Untersuchungstunnel infolge eines 30 MW-Brandes in der Oströhre.

Im Fall eines Brandes wird nach dem Aktivieren des Brandprogramms durch die Lüftungssteuerung eine kontrollierte Ausbreitung zu beiden Seiten des Brandherdes erreicht. Im betrachteten Zeitintervall treten im Nullfall für den Tunnelnutzer kritische Temperaturen von über 100 °C in einem Bereich von ca. 350 m auf und bleiben hierbei überwiegend auf den unmittelbaren Brandherdbereich und den Deckenbereich beschränkt. Die größte Ausdehnung wird zum Simulationszeitpunkt 180 s erreicht. Ab diesem Zeitpunkt ist die Brandventilation aktiv. Ein Temperaturanstieg über die Absaugzone hinaus ist nach Anlaufen des Brandprogramms nicht festzustellen.

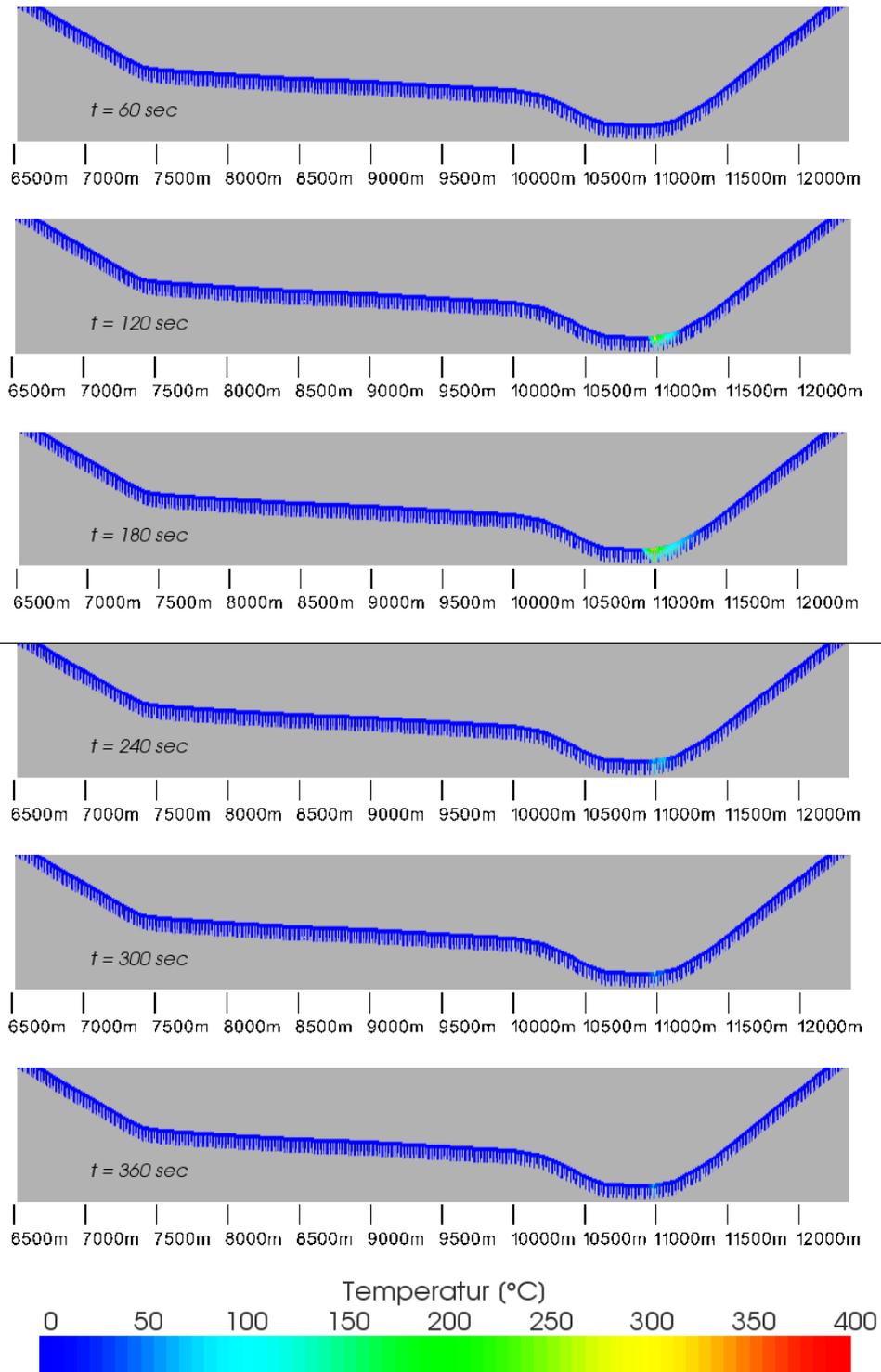


**Abbildung 6: Temperaturverteilung in der Oströhre – Untersuchungstunnel (Nullfall)**

#### **8.4.1.2 Untersuchungstunnel mit zusätzlicher ABBA (Planfall 3)**

Abbildung 7 zeigt die Temperaturverteilungen für den Untersuchungstunnel infolge eines 30 MW-Brandes in der Oströhre aktiver ABBA.

Ab dem Zeitpunkt der Aktivierung der ABBA (120 sec nach Brandbeginn) sind deutliche Unterschiede zum Nullfall erkennbar. Es tritt sehr schnell eine Temperaturverringering ein. Erhöhte Temperaturen sind zum Simulationsende nur noch im unmittelbaren Brandnahbereich festzustellen.



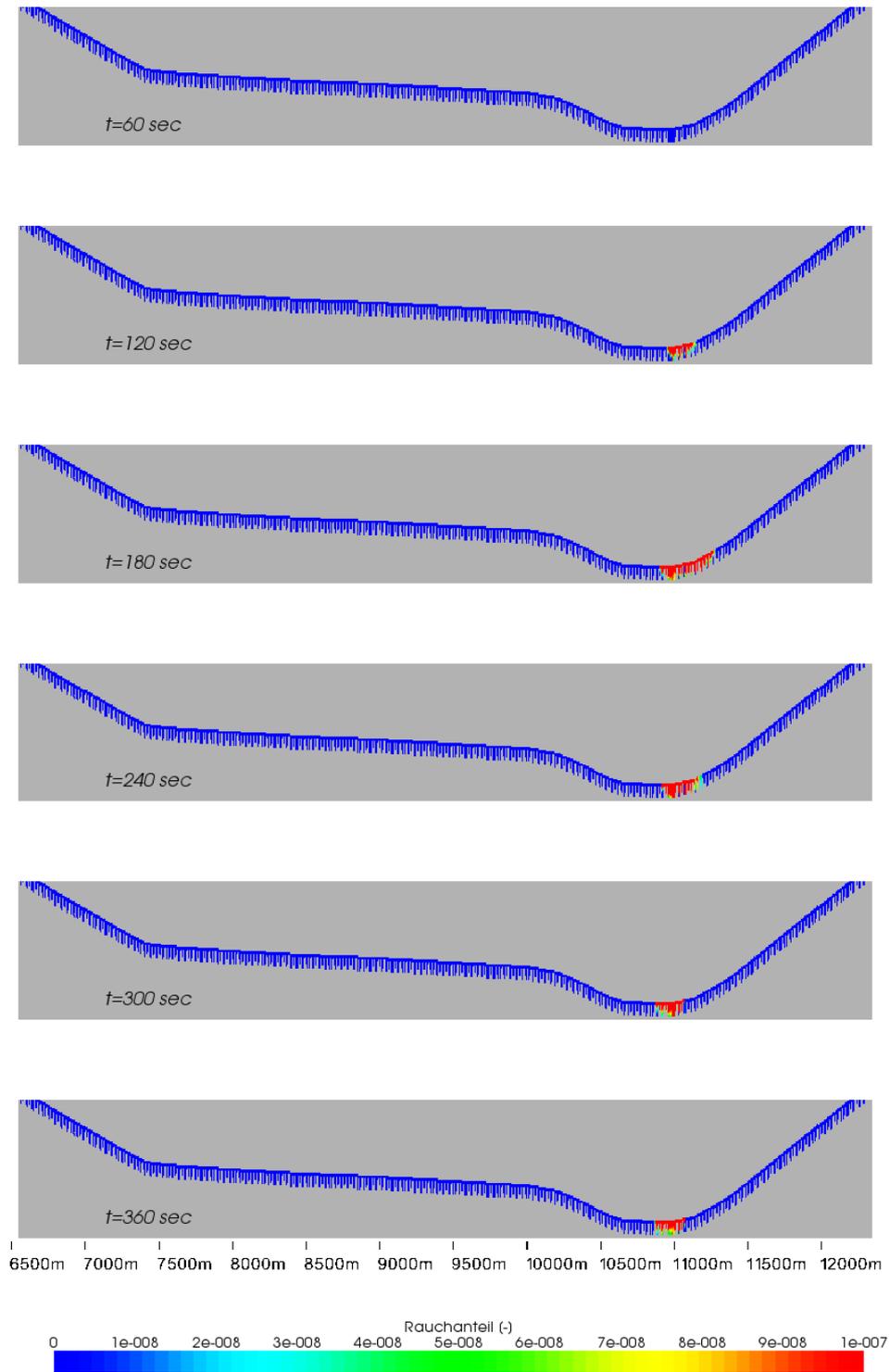
**Abbildung 7: Temperaturverteilung in der Oströhre – Untersuchungstunnel mit zusätzlicher ABBA (Planfall 3)**

## **8.4.2      Rauchausbreitung 30 MW Brand**

### **8.4.2.1    Untersuchungstunnel (Nullfall)**

Abbildung 8 zeigt die berechneten Rauchausbreitungen für einen 30 MW-Brand während eines Staus im Untersuchungstunnel.

Im Fall eines Brandes kommt es aufgrund der Lage des Brandortes in Verbindung mit der Kaminwirkung und der im Tunnel vorherrschenden Grundströmung von ca. 1,0 – 1,5 m/s zu einer Verschiebung der Rauchausbreitung in Richtung Nordportal. Ab Simulationszeitpunkt 180 s wirkt die Rauchabsaugung. Sie ist in der Lage, innerhalb von 60 s die Rauchausbreitung zu stoppen und die Rauchfront wieder in Richtung Brandherd zurück zu ziehen. Zum Simulationszeitpunkt 300 s ist der Rauch auf den Bereich der geöffneten Rauchklappen beschränkt. Aufgrund des freigesetzten Rauchvolumens und der durch die Ventilatoren verursachten Turbulenzen findet jedoch unmittelbar nach Brandausbruch eine Verteilung des Rauches über den gesamten Querschnitt statt. Drei Minuten nach Brandausbruch ist eine Verrauchung über eine Abschnittlänge von 400 m eingetreten.



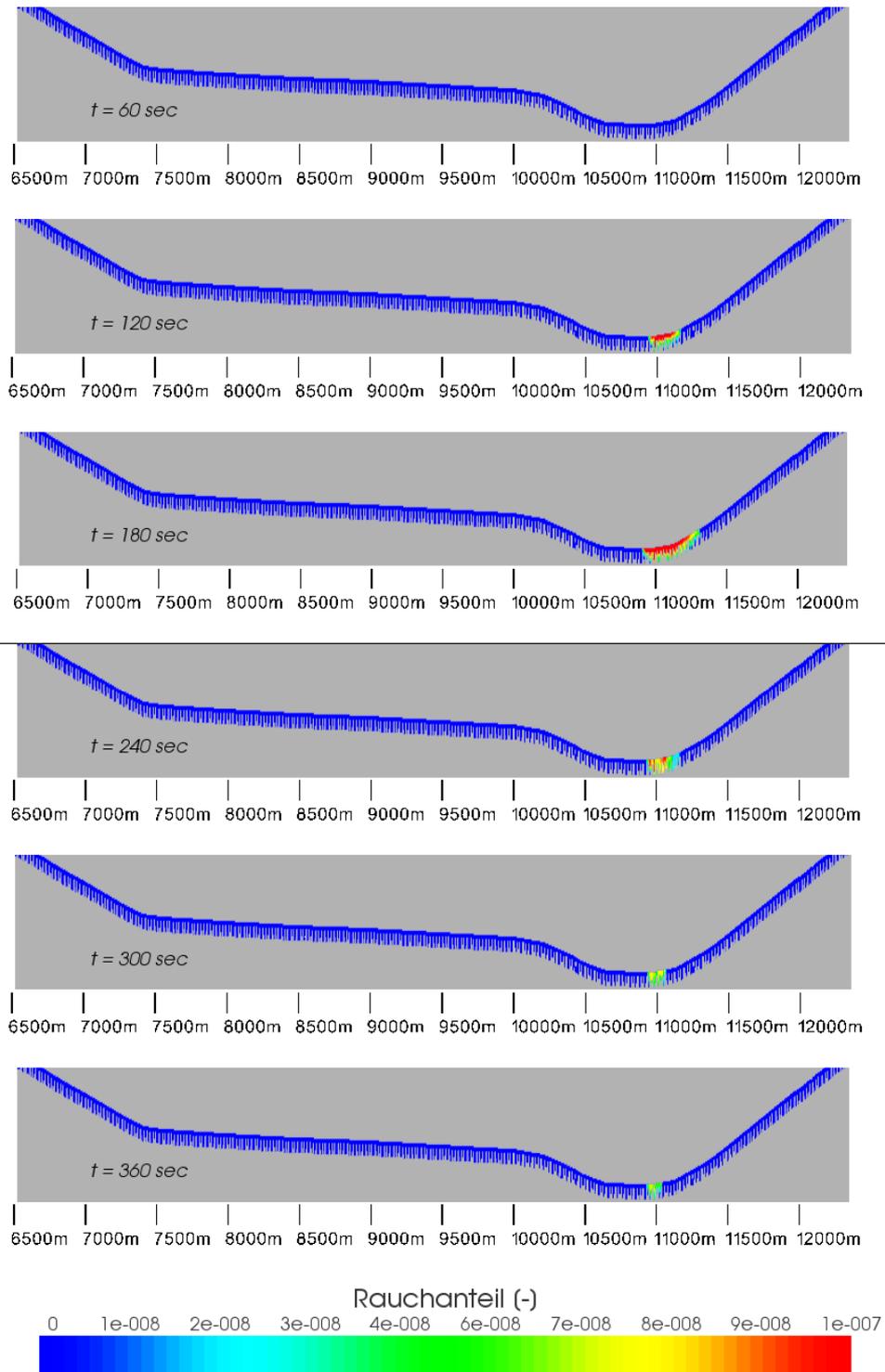
**Abbildung 8: Rauchausbreitung in Oströhre — Untersuchungstunnel (Nullfall)**

---

#### **8.4.2.2 Untersuchungstunnel mit zusätzlicher ABBA (Planfall 3)**

Abbildung 9 zeigt die berechneten Rauchausbreitungen für einen 30 MW-Brand während eines Staus im Untersuchungstunnel mit aktivierter ABBA.

Auch hier ist die positive Wirkung auf die Rauchausbreitung 120 sec nach Brandbeginn aus dem Rauchausbreitungsbild abzulesen. Vergleicht man Abbildung 8 und Abbildung 9 zur Simulationssekunde 240 miteinander, so sind die Unterschiede deutlich erkennbar. Die Rauchabsaugung in Kombination mit der ABBA bewirken eine schnelle Begrenzung der Ausbreitung und der Rauchdichte.



**Abbildung 9: Rauchausbreitung in Oströhre – Untersuchungstunnel mit zusätzlicher ABBA (Planfall 3)**

---

### **8.4.3 Sichtweiten 30 MW Brand**

#### **8.4.3.1 Untersuchungstunnel (Nullfall)**

Abbildung 10 zeigt die ermittelten Sichtweiten für einen 30 MW-Brand während eines Stauereignisses.

Aufgrund des zugrunde liegenden Lüftungskonzeptes in Verbindung mit dem Brandherd im Tiefpunkt der Röhre und dem unmittelbar anschließenden Steigungsbereich ergibt sich bei einem Brand eine Verschiebung der Rauchausbreitung zum nördlichen Portal. Daraus resultiert, wie aus Abbildung 11 ersichtlich, 2 Minuten nach Brandausbruch ein Abschnitt von ca. 400 m Länge mit nicht ausreichenden Sichtverhältnissen. Danach setzt die Brandventilation ein, bei der die Rauchabsaugung in der Lage ist, die Ausbreitung zu begrenzen. Sie ist 4 Minuten nach Brandausbruch stabil auf einer Länge von ca. 200 - 250 m.

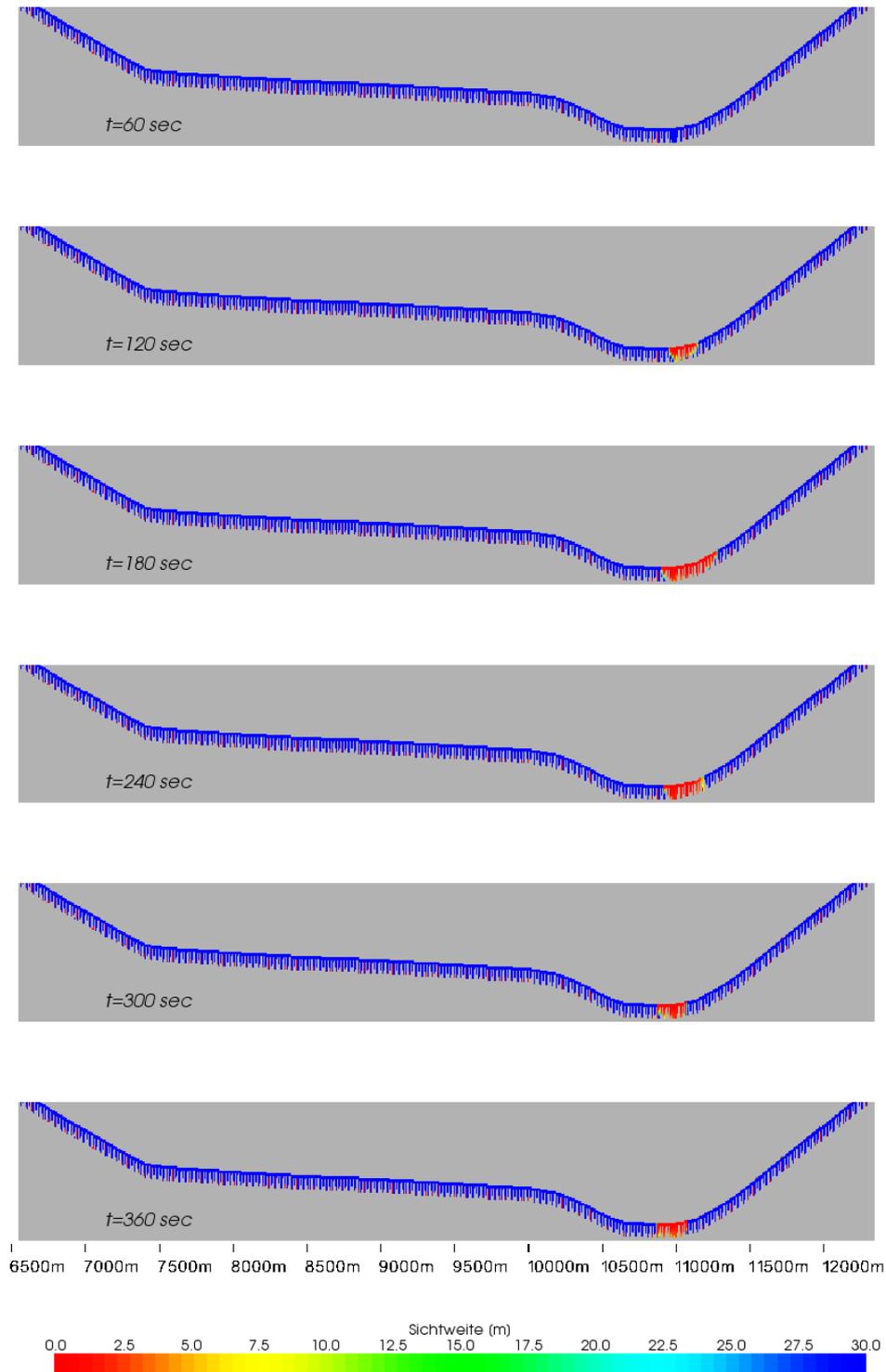
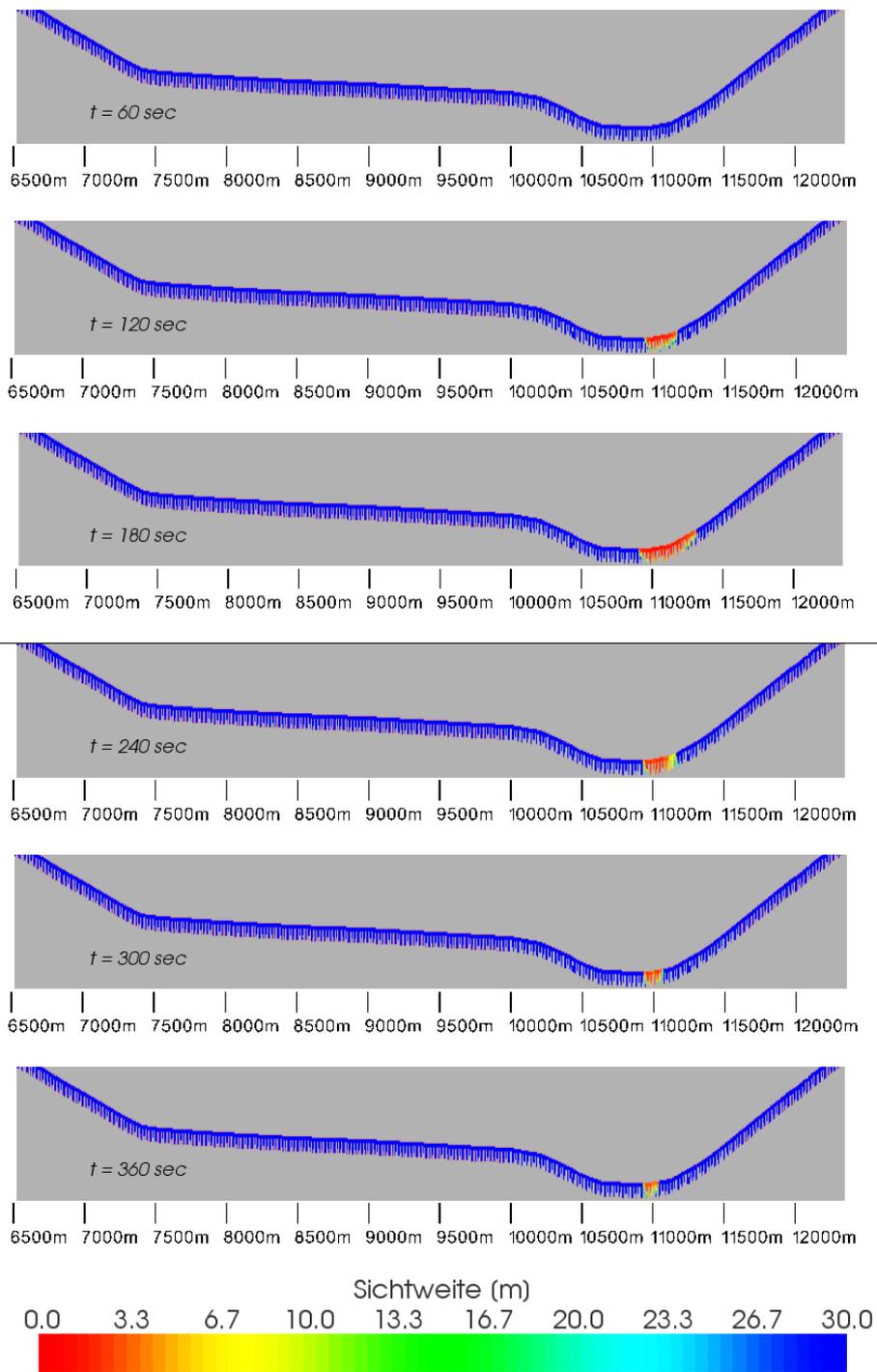


Abbildung 10: Sichtweiten in Oströhre – Untersuchungstunnel (Nullfall)

#### 8.4.3.2 Untersuchungstunnel mit zusätzlicher ABBA (Planfall 43)

Abbildung 11 zeigt die entsprechenden Sichtweiten für einen 30 MW-Brand während eines Stauereignisses mit zusätzlich installierter ABBA.

Mit aktiver ABBA wird die Sichtweite zum Ende der Simulationsdauer nur noch im Brandnahbereich auf ca. 50 m Länge beeinträchtigt.



**Abbildung 11: Sichtweiten in Oströhre — Untersuchungstunnel mit zusätzlicher ABBA (Planfall 3)**

#### **8.4.4 CO-Ausbreitung 30 MW Brand**

##### **8.4.4.1 Untersuchungstunnel (Nullfall)**

Abbildung 12 zeigt beispielhaft die Rechenergebnisse zur CO-Ausbreitung infolge eines 30 MW-Brandes im Untersuchungstunnel während eines Stauereignisses. In der Abbildung sind dabei die Ergebnisse für den Fall eines Brandes in der Oströhre dargestellt.

Die CO-Ausbreitung erfolgt in ähnlicher Weise zur Temperatúrausbreitung. Zu Beginn der Freisetzung erfolgt im Fall eines Brandes im Haupttunnel die Ausbreitung zunächst ebenfalls im oberen Querschnittsbereich. Mit zunehmender Ausbreitungsdauer ist jedoch auch auf Fahrbahnhöhe mit nennenswerten CO-Konzentrationen zu rechnen. Mit Aktivierung der Rauchabsaugung bleiben die Höchstkonzentrationen auf den Bereich der beiden dem Brandherd nächstgelegenen Rauchabsaugungsquerschnitte begrenzt. Im Bereich der Tunneldecke betragen die ermittelten CO-Konzentrationen bis zu 2.370 ppm. Auf Fahrbahnhöhe sind im vorliegenden Fall CO-Konzentrationen von 475 ppm zu verzeichnen.

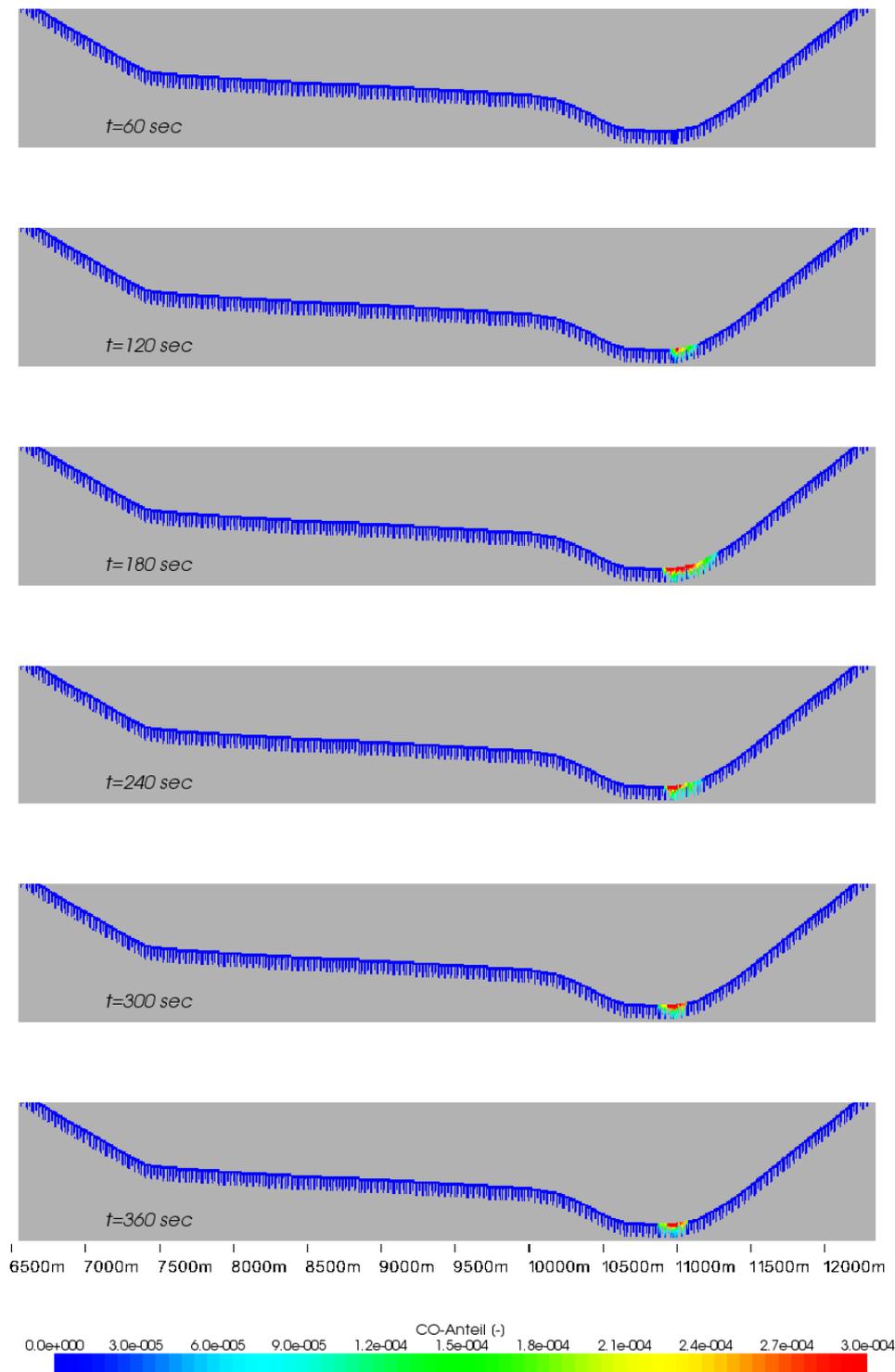
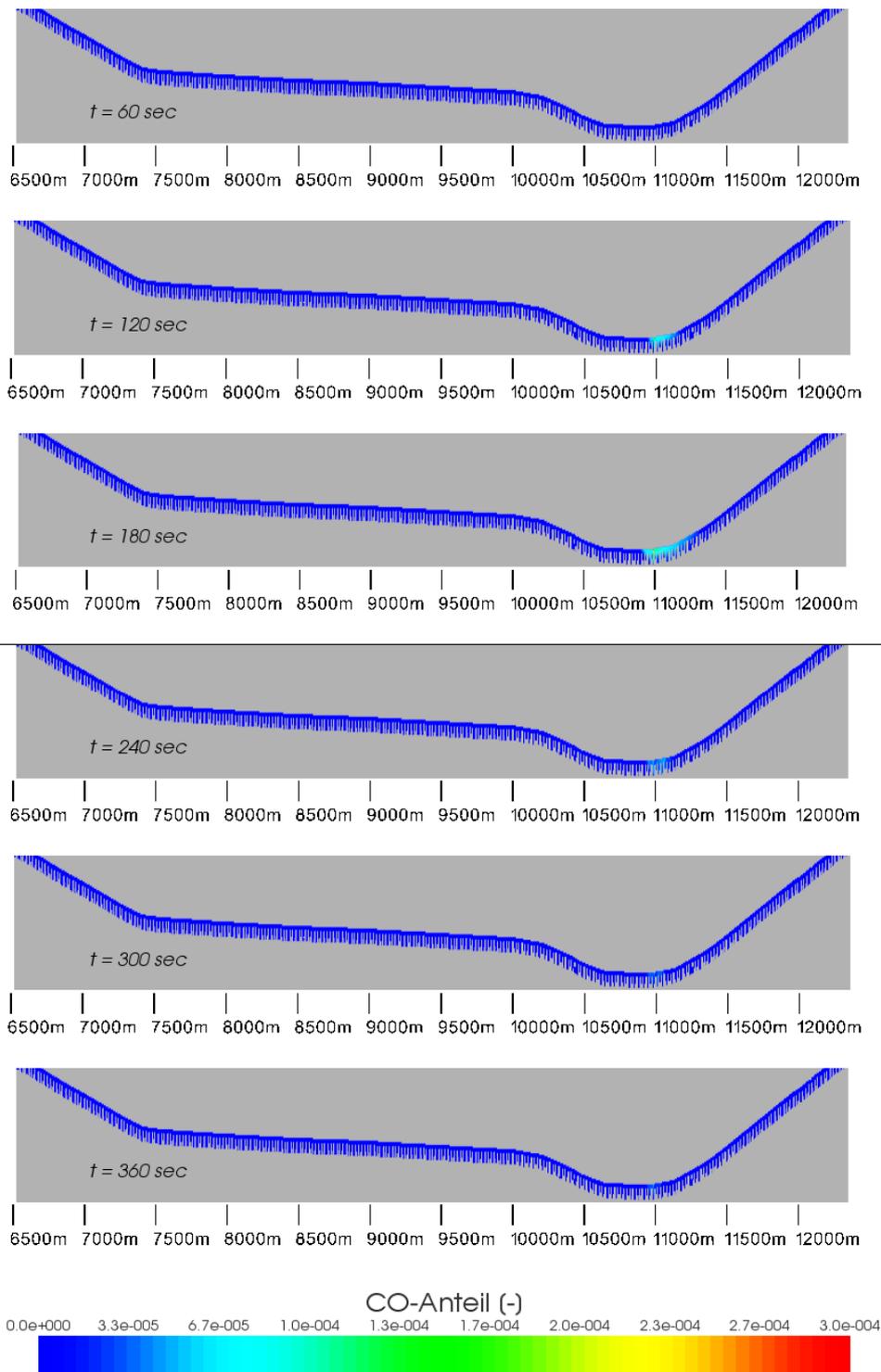


Abbildung 12: CO-Ausbreitung in Oströhre – Untersuchungstunnel (Nullfall)

#### 8.4.4.2 Untersuchungstunnel mit zusätzlicher ABBA (Planfall 3)

Beim Schadstoff CO sind die positiven Auswirkungen deutlich erkennbar. Durch die schnelle Eindämmung des Brandes durch die ABBA kann die parallel aktive Rauchabsaugung die Ausbreitung schnell eindämmen.

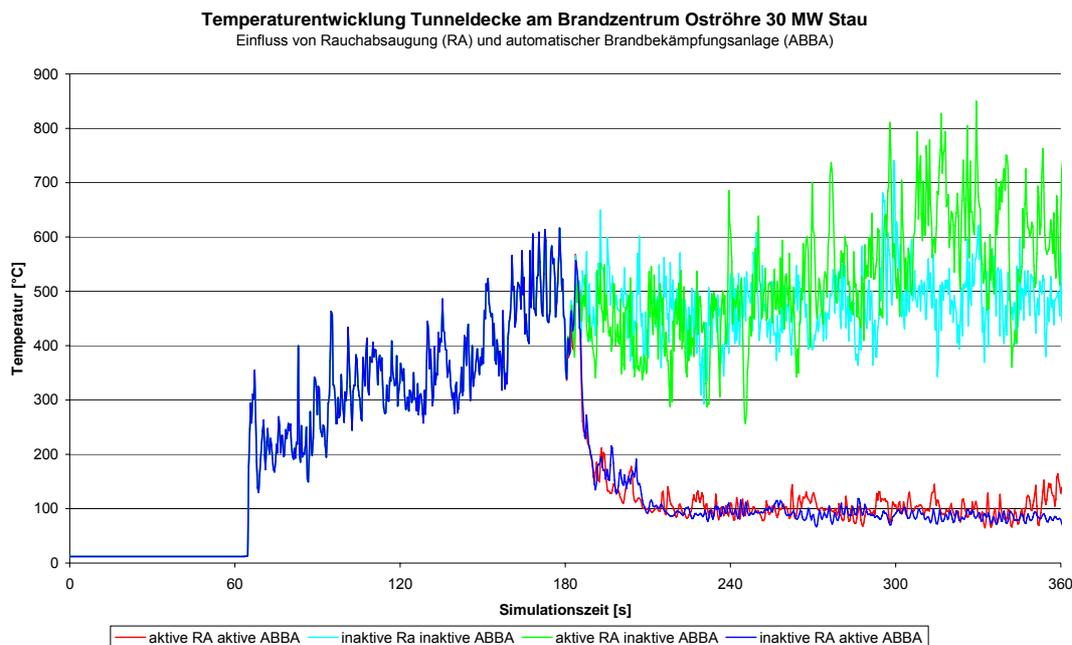


**Abbildung 13: CO-Ausbreitung in Oströhre – Untersuchungstunnel mit zusätzlicher ABBA (Planfall 3)**

### 8.5 Detaillierte Temperaturuntersuchung

Ein wesentlicher Aspekt bei der Wirkung einer ABBA ist die Begrenzung der Temperatur. Die feinsten Wassernebeltropfen werden durch den Brand sehr schnell in

Wasserdampf umgewandelt und führen infolge der Wärmeaufnahme zu einer Abkühlung der Umgebung. Zum Nachweis dieses Kühleffektes werden für ausgewählte Simulationen Temperaturdetektoren an der Tunneldecke installiert und ausgewertet. Die nachfolgende Abbildung 14 zeigt den Verlauf der Temperaturen im Bereich der Decke direkt über dem Brandherd für die Fälle mit und ohne aktiver ABBA bzw. Rauchabsaugung.

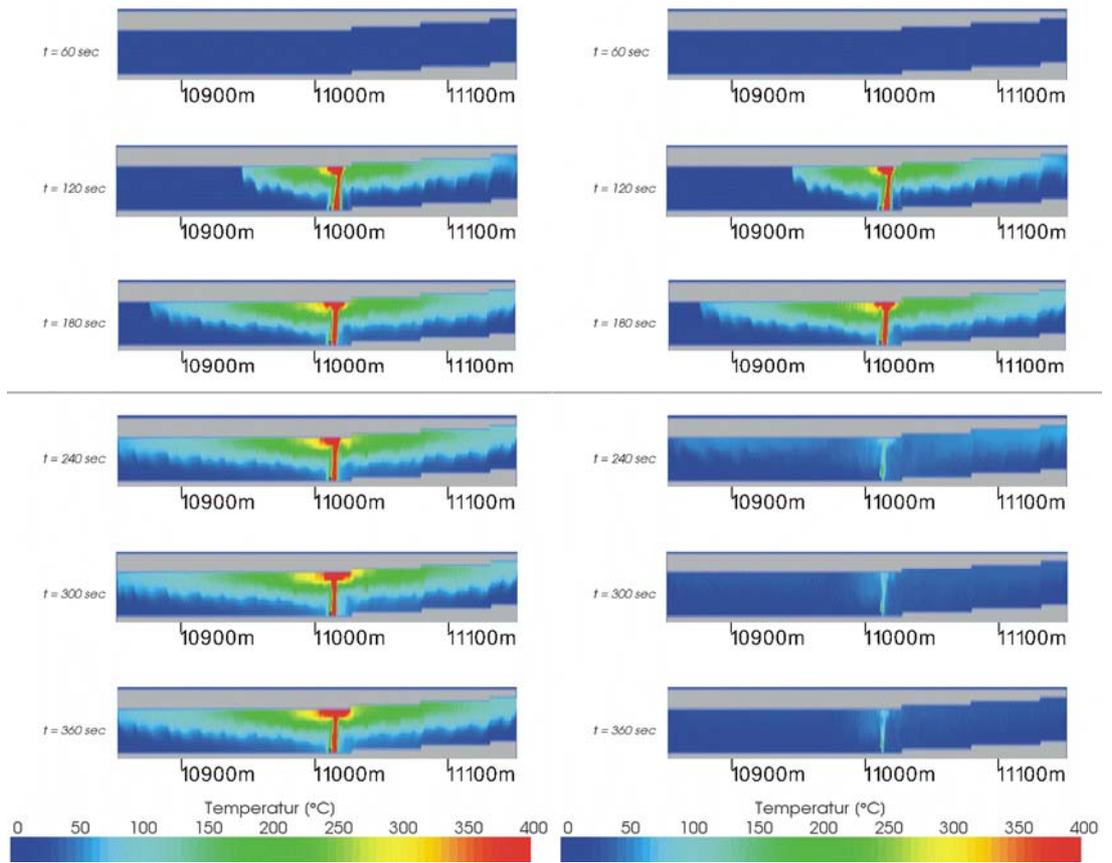


**Abbildung 14: Temperaturentwicklung im Bereich der Decke für die Fälle mit und ohne aktiver ABBA bzw. Rauchabsaugung**

Alle 4 Varianten zeigen bis zur Aktivierung des Brandprogramms die gleiche Charakteristik. Innerhalb von 2 Minuten steigt die Temperatur an der Decke von 12°C auf 500-600 °C an.

Die höchsten Deckentemperaturen werden in der Konstellation mit aktiver Rauchabsaugung und deaktivierter bzw. nicht vorhandener ABBA erreicht. Durch die Absaugklappen, die sich ebenfalls an der Decke befinden, werden die heißen Rauchgase abgeführt. Es ergeben sich hier Temperaturen von über 800 °C mit einem Mittelwert von ca. 600 °C. Sind beide Systeme deaktiviert liegt das Temperaturniveau geringfügig niedriger, da hier die heißen Brandgase nicht aktiv nach oben abgeleitet werden wie im Fall mit aktiver Rauchabsaugung. Die mittlere Temperatur beträgt hierbei ca. 500 °C.





**Abbildung 16: Vergleich Temperaturoauswertung inaktive /aktive ABBA (links / rechts) bei jeweils abgeschalteter Rauchabsaugung**

## 9 Risikoberechnung

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

$$\text{Risiko} = \text{Häufigkeit des Eintritts} * \text{Größe der Auswirkungen} * \text{Aversionsfaktor}$$

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

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

Der Aversionsfaktor trägt dem Wunsch Rechnung seltenerere Ereignisse mit größeren Ausmaßen stärker zu gewichten als häufigere Ereignisse mit geringeren Auswirkungen, da sie von der Öffentlichkeit als schwerwiegender empfunden werden. Nachfolgend werden die Prinzipien der im Rahmen dieser Untersuchung eingesetzten Methoden zur Häufigkeits- und Ausmaßermittlung erläutert.

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

### 9.1 Häufigkeitsermittlung

Zur Häufigkeitsermittlung werden von einem auslösenden Ereignis (Initialereignis, Top Event) ausgehend deduktiv alle möglichen Zwischenzustände bis hin zu den Endzuständen des Systems ermittelt und diese hinsichtlich ihrer zu erwartenden Häufigkeit quantifiziert. Zu Beginn der Modellierung des Ablaufes steht die Identifizierung der möglichen Systemantworten. Dabei handelt es sich um die Reaktion des Systems auf technische Betriebs- und Sicherheitssysteme sowie die Reaktion auf Eingriffe von Menschen. Vom auslösenden Ereignis (Initialereignis, Top Event) aus werden die angeforderten Systemantworten (zum Beispiel die eines Sicherheitssystems) abgefragt und es wird unterschieden, ob ein Erfolg oder ein Versagen vorliegt. An diesem Punkt verzweigt sich der Ereignisablauf in weitere Zwischenzustände. Die Zwischenzustände werden analog zu denen des auslösenden Ereignisses auf Systemantworten untersucht. So entstehen bis zum Erreichen eines Endzustandes unterschiedliche Zweige des Ereignisablaufes. Zur besseren Veranschaulichung dieses Ereignisablaufes werden s. g. Ereignisbäume verwen-

det, die über Linien eine graphische Darstellung des Ablaufes wiedergeben (siehe Abbildung 17).

Bei der Modellierung der Ereignisbäume sind folgende Regeln zu beachten:

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

Eine weitere Betrachtung für beherrschte Ereignisabläufe (zum Beispiel Erfolg eines Sicherheitssystems) kann notwendig sein, wenn sich die Randbedingungen durch Einflussfaktoren wie Zeit oder andere Systemausfälle ändern können.

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

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

$$H_{ei} = H_0 \prod ( \text{Verzweigungswahrscheinlichkeiten } P \text{ im Zweig } i )$$

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

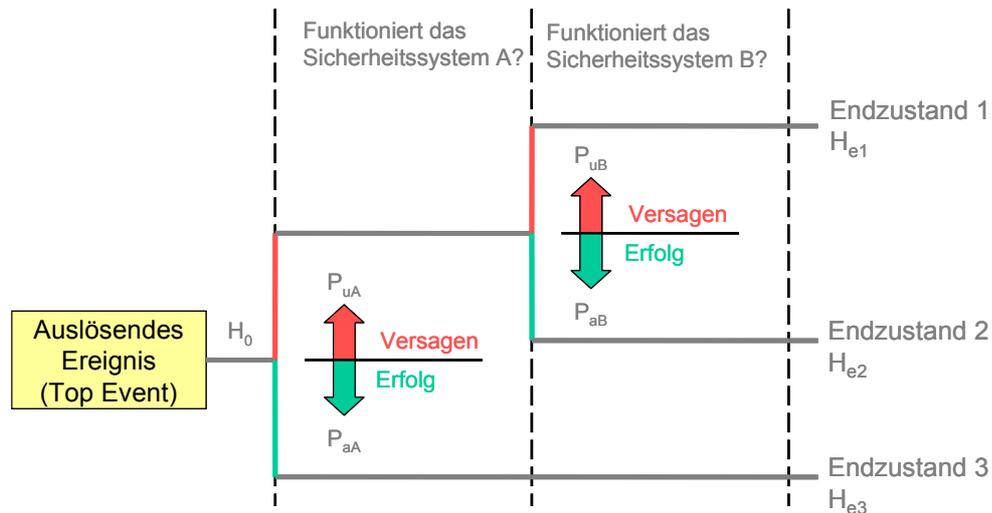


Abbildung 17: Beispiel für einen Ereignisbaum

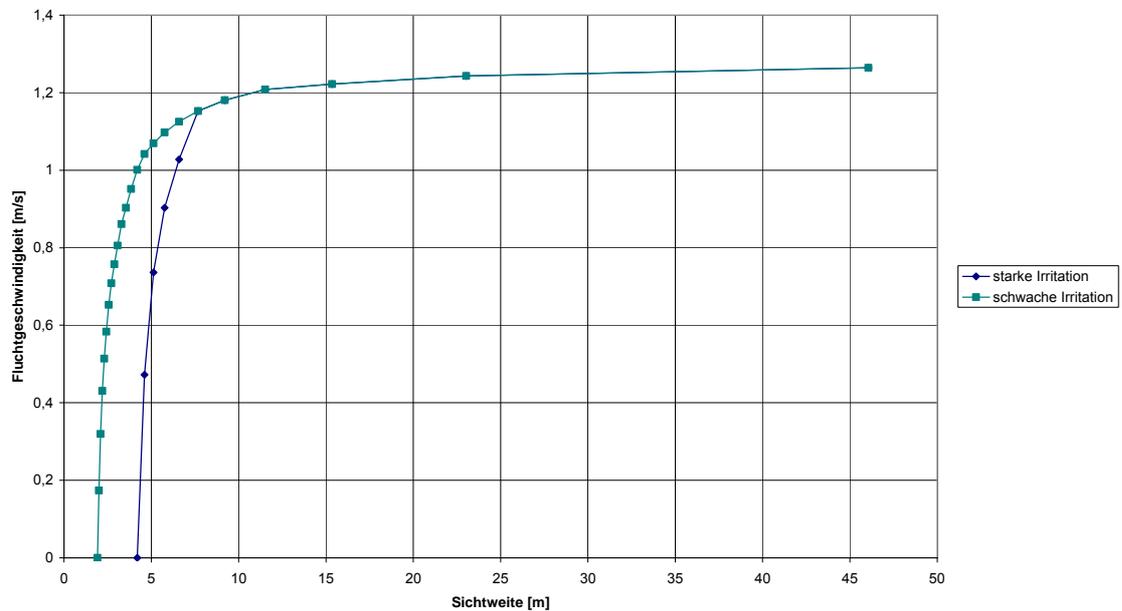
## 9.2 Ausmaßermittlung

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

### 9.2.1 Zusammenhang zwischen Sichtweite und Fluchtgeschwindigkeit

In Untersuchungen konnte gezeigt werden, dass die Fluchtgeschwindigkeit direkt abhängig ist von der vorhandenen Sichtweite. Wie aus Abbildung 18 ersichtlich, ist ab einer Sichtweite von 10 m mit einem drastischen Rückgang der Fluchtgeschwindigkeiten zu rechnen. Abhängig von der Rauchzusammensetzung ist bei einer starken Irritation der Augen und Atemwege, wie sie bei real ablaufenden Fahrzeugbränden i. d. R. anzutreffen ist, bei ca. 5 m Sichtweite keine Fortbewegung mehr möglich. Zu berücksichtigen ist hierbei jedoch, dass eine Orientierungslosigkeit schon deutlich früher einsetzt. Ein gezieltes Aufsuchen von Notausgängen ist nur möglich, wenn diese auch erkannt werden, bzw. entsprechende Ein-

richtungen den Flüchtenden dorthin führen. Für den Flüchtenden im Tunnel bedeutet dies, dass er mindestens die Fluchtwegkennzeichen wahrnehmen können muss. Bei einem Abstand von 25 m müssen diese daher im Extremfall auf mindestens diese Entfernung vom Flüchtenden erkannt werden.



**Abbildung 18:** Zusammenhang zwischen Sichtweite und Fluchtgeschwindigkeit für reflektierende Objekte

### 9.2.2 Toxizität von Brandgasen

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

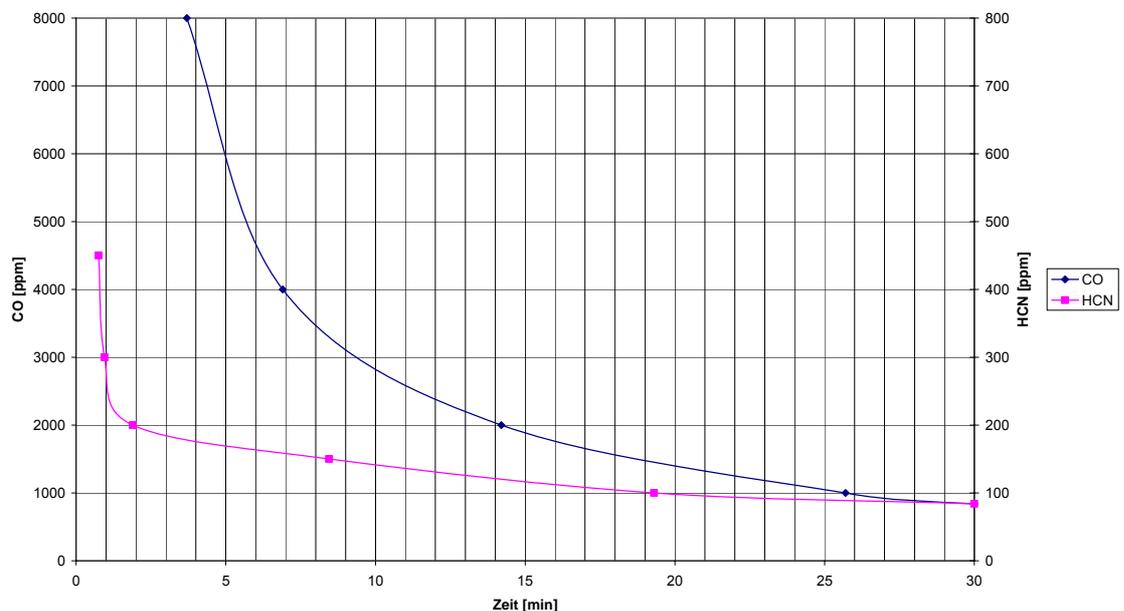
Kohlenmonoxid entsteht bei praktisch jedem Verbrennungsvorgang infolge unvollständiger Verbrennungsprozesse. Es gehört zu der Gruppe der farb- und geruchslosen Gase. Es ist darüber hinaus schwer wasserlöslich und dringt daher bis in tiefe Lungenregionen vor. Seine schädigende Wirkung liegt in der gegenüber dem Sauerstoff ca. 250-fach höheren Affinität zum Blutfarbstoff Hämoglobin. Das dabei entstehende Carboxyhämoglobin (CO-Hb) reduziert den Sauerstofftransport im Blut. Bereits ab einem Anteil von ca. 20 % CO-Hb im Blut treten erste toxische

Wirkungen auf und führen ab einem Anteil von ca. 40 % zur Bewusstlosigkeit. CO-Hb-Konzentrationen zwischen 50 % und 70 % führen schließlich zum Tod.

Blausäure weist gegenüber Kohlenmonoxid eine ca. zehnmal höhere Toxizität auf (vgl. Abbildung 19). Es entsteht bei der Verbrennung stickstoffhaltiger Materialien. Hierzu zählen beispielsweise Acryl, Nylon, Polyurethan und Wolle. Das Blausäuregas ist im Gegensatz zum Kohlenmonoxid leicht wasserlöslich und kann daher durch den menschlichen Organismus sowohl oral als auch durch Inhalation aufgenommen werden. Untersuchungen zeigen, dass bereits Konzentrationen von 180 bis 270 ppm in der Atemluft bei kurzzeitiger Exposition und Konzentrationen von 90 ppm bei längerer Exposition zum Tode führen.

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

In Abbildung 19 sind die Konzentrationen für Kohlenmonoxid (CO) und Blausäure (HCN) in Abhängigkeit von der Expositionszeit aufgetragen, ab denen mit Bewusstlosigkeit zu rechnen ist.



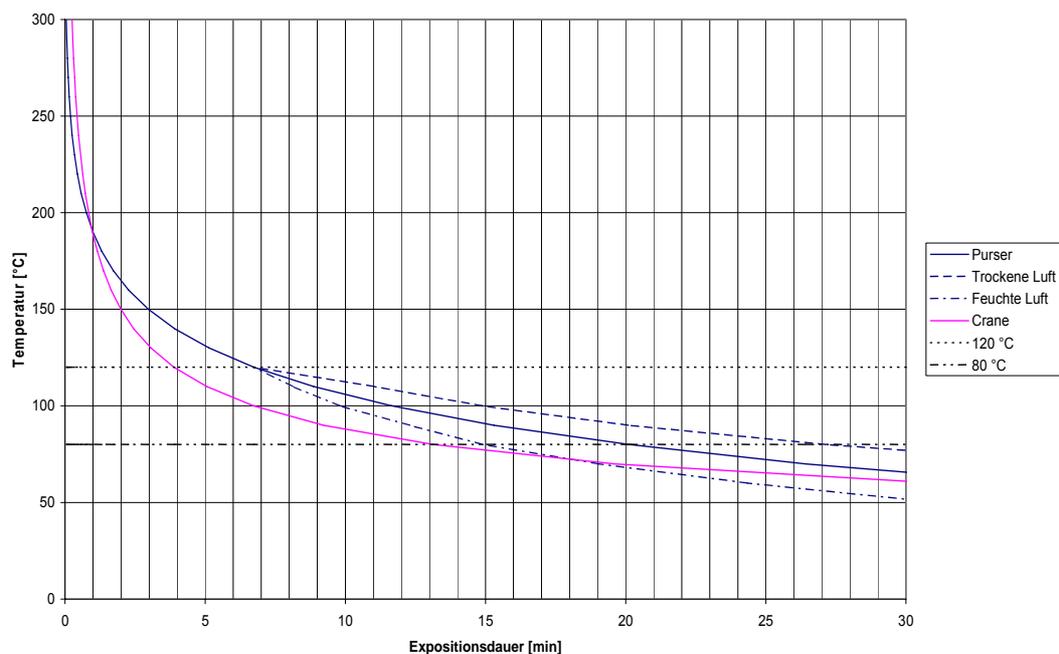
**Abbildung 19: Letalitäten infolge CO- bzw. HCN-Exposition**

### 9.2.3 Einfluss von Temperatur auf den menschlichen Organismus

Die infolge eines Brandes freigesetzte Energie kann auf den Menschen durch Wärmestrahlung oder infolge konvektiver Wärmeübertragung schädigend wirken. Effekte durch Wärmestrahlung beschränken sich in der Regel auf den unmittelba-

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

Neben der Umgebungstemperatur hat der Feuchtegehalt der Luft einen wesentlichen Einfluss auf die Art der Schädigung (siehe Abbildung 20). Nach Purser (1995) ist in trockener Luft bis zu einer Temperatur von 120°C mit überwiegender Wärmestaubildung zu rechnen. Temperaturen über 120°C führen schließlich zu Verbrennungen der Haut.



**Abbildung 20: Letalitäten infolge Temperatureinwirkung**

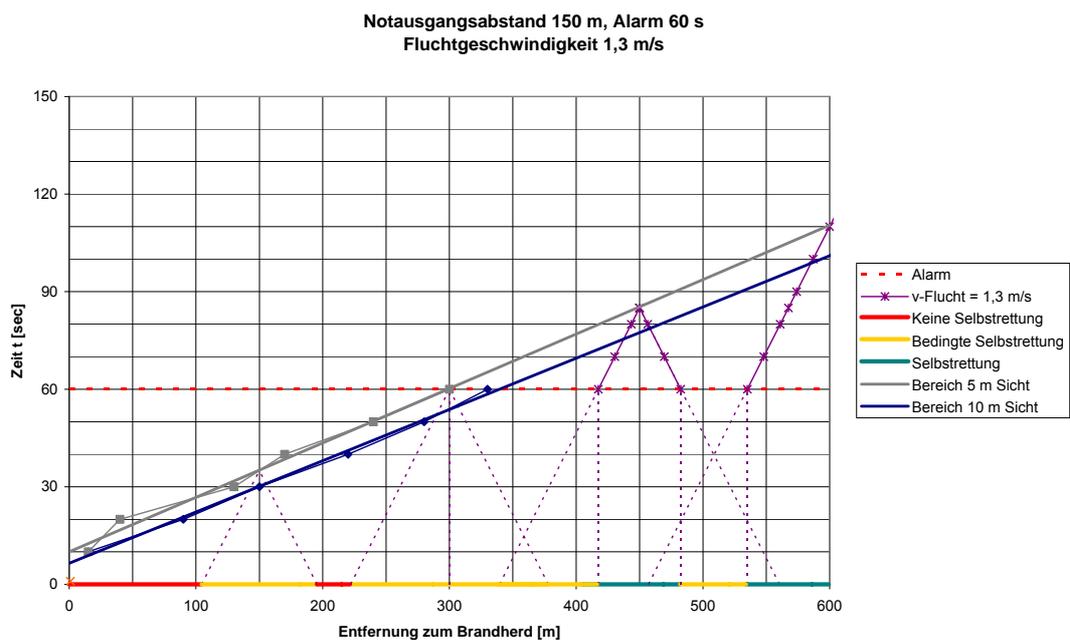
#### 9.2.4 Bestimmung von Selbstrettungsbereichen

Das erfolgreiche Flüchten von Tunnelnutzern im Ereignisfall in sichere Bereiche wird maßgeblich von den lokal vorherrschenden Umgebungsbedingungen bestimmt. Als Maß zur Abschätzung der Fluchtbedingungen dienen Letalitätskurven

für Einwirkungen infolge von Druck, Temperatur sowie Gas- und Partikelkonzentrationen. Basierend auf den Ergebnissen aus den numerischen Berechnungen lassen sich somit in Abhängigkeit von der Fluchtgeschwindigkeit und den gegebenen Fluchtweglängen Bereiche ableiten, aus denen eine erfolgreiche Selbstrettung oder nur eine bedingte bzw. keine Selbstrettung unter den gegebenen Randbedingungen möglich ist.

Hierzu wird für den Tunnelnutzer bei noch ausreichenden Bedingungen eine Fluchtgeschwindigkeit von 1,3 m/s angenommen. Werden Grenzwerte unterschritten, so wird davon ausgegangen, dass keine weitere Fortbewegung möglich ist und die Selbstrettung fehlschlägt.

Bereiche mit erfolgreicher Selbstrettung ergeben sich aus dem Weg, der bei der angenommenen Fluchtgeschwindigkeit durch den Tunnelnutzer zum nächstgelegenen Notausgang bzw. Portal bei unverzüglichem Einleiten der Flucht nach Alarmauslösung zurückgelegt werden kann. Die Bereiche, aus denen sich Tunnelnutzer retten können, wenn sie bereits vor Alarmierung durch die betriebstechnischen Einrichtungen selbstständig mit der Flucht beginnen, werden als Bereiche mit bedingter Selbstrettung bezeichnet. Keine Selbstrettung ist schließlich aus den Bereichen möglich, aus denen bei der zugrunde liegenden Fluchtgeschwindigkeit ein Notausgang bzw. ein Portal nicht mehr erreicht werden kann. Die folgende Abbildung 21 zeigt exemplarisch die Ermittlung der verschiedenen Selbstrettungsbereiche.



**Abbildung 21: Selbstrettungsbereiche**

### 9.2.5 Bestimmung von Personendichten

Die Bestimmung der Fahrzeugmengen wird wesentlich durch nachfolgende Faktoren beeinflusst:

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

Maßgeblichen Einfluss auf die Anzahl der potentiell betroffenen Tunnelnutzer hat hierbei die Zeit bis zur Detektion eines Unfallereignisses<sup>2</sup>, da nach der Detektion in der Regel eine sofortige Tunnelschließung erfolgt. Dadurch werden nachfolgende Verkehrsteilnehmer daran gehindert, in den Gefahrenbereich einzufahren. Die entsprechende Zeitspanne ist jedoch abhängig vom jeweiligen Unfallszenario.

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

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

Zur Ermittlung des Ausmaßes muss zunächst die Gesamtanzahl  $P$  der sich im Tunnel befindlichen Personen bestimmt werden. Dabei müssen die folgenden Fälle unterschieden werden:

Stau

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

freier Verkehr (Tunnelsperrung erfolgreich)

---

<sup>2</sup> Folgende Alarmierungsarten können u.a. zu einer Tunnelschließung führen: Erkennen des Unfalls per Videoüberwachungssystem, Alarmierung durch Tunnelbenutzer, Brandmeldekabel etc.

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

freier Verkehr (Tunnelsperrung nicht erfolgreich)

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

### 9.2.6 Schadenausmaßbestimmung

Die Bestimmung der Schadensausmaße erfolgt durch Überlagerung der nach Kapitel 9.2.5 ermittelten Personendichten mit den in Kapitel 9.2.4 bestimmten Bereichen für „Selbstrettung“, „bedingte Selbstrettung“ und „keine Selbstrettung“. Für die Bereiche mit bedingter Selbstrettung wird zur Bestimmung der Schadensausmaße die Annahme getroffen, dass sich die Hälfte der betroffenen Personen aus diesem Bereich retten kann.

### 9.3 Risikoermittlung

Zur Darstellung der Risiken werden die über die Ereignisbäume ermittelten Häufigkeiten der Endzustände und das jeweils zugehörige Schadensausmaß nach der Größe des Ausmaßes sortiert und als Summenhäufigkeiten in H-A-Diagrammen aufgetragen. Dadurch lassen sich ermittelte Risiken in vergleichbarer Form darstellen. In Abbildung 22 ist beispielhaft der Verlauf von Risiken in Abhängigkeit von Maßnahmen dargestellt.

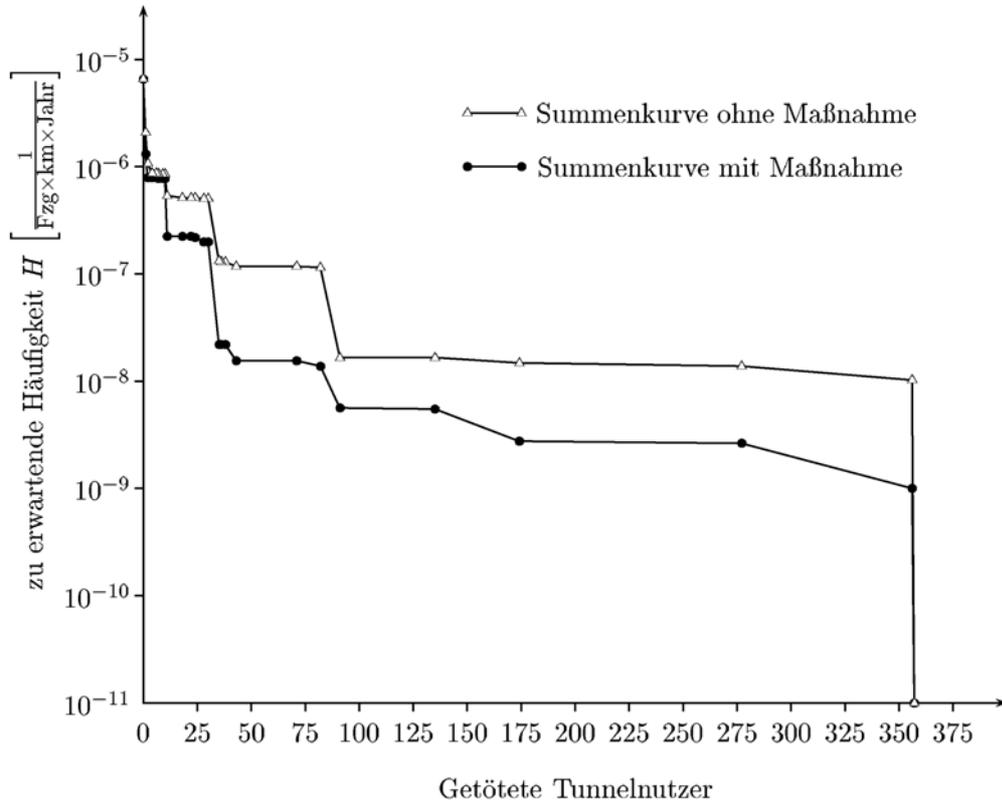


Abbildung 22: Beispiel eines H-A-Diagramms

## 10 Untersuchungsergebnisse

Nachfolgend werden die Strukturen der im Rahmen dieser Untersuchung verwendeten Ereignisbäume erläutert sowie die Ergebnisse der Quantifizierung vorgestellt.

### 10.1 Ermittlung der Häufigkeiten $H_0$ der Initialereignisse

Die Methode der Ereignisablaufanalyse erfordert nach der Identifizierung der auslösenden Ereignisse die Bestimmung der zugehörigen Eintrittshäufigkeiten. Um eine differenzierte Betrachtung des resultierenden Sicherheitsniveaus in Abhängigkeit von maßgeblichen Ereignisursachen zu ermöglichen, wird im Folgenden zwischen den Initialereignissen Kollision, Brand infolge Kollision sowie Brand infolge Selbstzündung unterschieden. Die entsprechenden Eintrittshäufigkeiten basieren auf statistischen Angaben. In nachfolgender Tabelle 4 sind die Eintrittshäufigkeiten für das jeweilige Initialereignis zusammengefasst.

Initialereignis (Top Event)		Beschreibung
[0.1]	Initialereignis Kollision (ohne Brand)	Beim Initialereignis Kollision handelt es sich um die Häufigkeit eines zu erwartenden Unfalls. Die eingesetzten Werte basieren auf dem Forschungsbericht Bewertung der Sicherheit von Straßentunneln [BAL 2007a]. Die Unfallrate für Richtungsverkehrstunnel ohne Zu- und Abfahrten beträgt $2,28 \cdot 10^{-7}$ [1 / Fahrzeug*km]. Diese wird daher für die Tunnelröhren des Referenz- und Untersuchungsfalles herangezogen.
[0.2]	Initialereignis Brand infolge Kollision	Der eingesetzte Wert basiert auf den in [BAL 2007a] angegebenen Werten zur Brandwahrscheinlichkeit infolge eines Unfalls. Es wird angenommen, dass in 0,30 % der Unfälle mit einem Kfz-Brand zu rechnen ist
[0.3]	Initialereignis Brand infolge Selbstzündung	Beim Initialereignis Selbstzündung handelt es sich um einen Kfz-Brand infolge eines technischen Defekts. Die entsprechende Häufigkeit eines Fahrzeugbrandes resultiert auf Grundlage der in [BAL 2007a] hergeleiteten Brandrate von $3,0 \cdot 10^{-9}$ [1 / Fahrzeug*km].

**Tabelle 4: Häufigkeiten  $H_0$**

## 10.2 Ermittlung der Verzweigungswahrscheinlichkeiten $P_i$ im Ereignisablauf

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

### 10.2.1 Verzweigungswahrscheinlichkeiten $P_i$ infolge Brand

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

- ▶ Fahrzeugtyp (Pkw = 5 MW, Bus / Lkw = 30 MW / Lkw 100 MW)
- ▶ Zeitpunkt des Ereignisses (Tag / Nacht)
- ▶ Verkehrszustand (freier Verkehrsfluss / Stau)
- ▶ Detektion erfolgreich (ja / nein)
- ▶ Tunnelsperrung/Alarmierung erfolgreich (ja / nein)
- ▶ Lüftungssystem aktiviert (ja / nein)
- ▶ Erhöhtes Ausmaß (Reisebus ja / nein)

Die zur Bestimmung der Eintrittshäufigkeiten der Endzustände erforderlichen Wahrscheinlichkeiten in den Verzweigungspunkten des Ereignisablaufes werden in nachfolgender Tabelle 5 näher erläutert.

Verzweigung im Ereignisbaum		Beschreibung
[1]	5 MW / 30 MW / 100 MW	Für den Tunnel Elbquerung A 20 wird in der Verkehrsuntersuchung ein Lkw-Anteil von 16,28% ausgewiesen. Der Gefahrgutanteil liegt bei 3,8 % des Schwerverkehrs. Hierdurch ergibt sich eine Wahrscheinlichkeitsverteilung von 83,7 : 15,7 : 0,06, dass bei einem Unfall mit Brandfolge ein 5, 30 oder 100 MW Brand entsteht. Die gleiche Verteilung gilt für die Selbstzünder infolge eines technischen Defekts.
[2]	Tageszeit Tag/Nacht	Das Verkehrsaufkommen ist tageszeitabhängig. Der Zeitpunkt eines Brandes hat deshalb einen Einfluss auf das jeweilige Ausmaß. Als Tageszeit werden die Stunden mit hoher Verkehrsdichte von 06.00 bis 22.00 Uhr betrachtet, als Nachtzeit die Stunden von 22.00 bis 06.00 Uhr. Bezogen auf 24 h entspricht hierbei der Anteil der Stunden bei Tag 67% und der Anteil der Stunden bei Nacht 33%.

Verzweigung im Ereignisbaum		Beschreibung
[3]	Verkehrszustand Freier Verkehr / Stau	Die Anzahl der potentiell betroffenen Tunnelnutzer ist auch vom vorherrschenden Verkehrszustand abhängig. Im Fall von Stau bzw. stockendem Verkehr können bedeutend mehr Personen als bei freiem Verkehrsfluss lebensbedrohlichen Einwirkungen ausgesetzt sein. Da es sich bei dem Untersuchungstunnel um einen Überlandtunnel mit geringer Stauneigung handelt, wird die Annahme getroffen, dass Stau im Tunnel mit einer Wahrscheinlichkeit von 0,34 %, d. h. in ca. 30 h/Jahr, eintritt.
[4]	Detektion Ja / Nein	Im Sinne einer konservativen Annahme wird davon ausgegangen, dass bei einem Fahrzeugbrand eine Detektion zu 99% innerhalb von 60 s erfolgt.
[5]	Tunnelsperrung Ja / Nein	Von einem Brand im Tunnel können auch technische Einrichtungen im Tunnel betroffen sein. Dies (oder andere technische Probleme) führt unter Umständen dazu, dass die Sperreinrichtungen nicht ordnungsgemäß funktionieren und somit eine Tunnelschließung nicht erfolgen kann. Es wird (im Sinne einer konservativen Annahme) davon ausgegangen, dass dies in einem von hundert Fällen eintritt.
[6]	Lüftungssystem Ja / Nein	Die Belüftung der Tunnel erfolgt im Fall des Längslüftungsbetriebs ausschließlich über Strahlventilatoren und im Rauchabsaugbetrieb mittels einzeln ansteuerbaren Rauchabsaugvorrichtungen. Nach erfolgter Detektion wird mit Hilfe entsprechender Steuerungsprogramme die Ausbreitung der Rauchgase bzw. des Brandes beeinflusst. Es wird die Annahme getroffen, dass in einem von hundert Fällen (1%) das Aktivieren des entsprechenden Lüftungsprogramms nicht erfolgt.
[7]	ABBA Ja / Nein	Die Aktivierung der ABBA erfolgt analog zur Rauchabsaugung 120 sec nach Brandbeginn und 60 sec nach erfolgter Detektion. Dadurch werden an eine ABBA dieselben Anforderungen gestellt, wie sie die RABT 2006 für ein Lüftungssystem fordern
[8]	Erhöhtes Ausmaß Ja / Nein	Befindet sich beispielsweise ein Reisebus zum Zeitpunkt des Ereignisses im Gefahrenbereich, so ist mit einem erhöhten Schadensausmaß zu rechnen. Es wird die Annahme getroffen, dass in 1% der Fälle mit einem erhöhten Ausmaß zu rechnen ist. Für die Erhöhung des Ausmaßes wird, wenn Bereiche mit keiner möglichen Selbstrettung auftreten, pauschal eine Menge von 20 Personen zu Grunde gelegt. Treten nur Bereiche mit bedingter Selbstrettung auf, so werden pauschal 10 Personen des Busses zum errechneten Ausmaß addiert.

Tabelle 5: Verzweigungen im Ereignisablauf infolge eines Brandes

### **10.2.2 Verzweigungswahrscheinlichkeiten $P_i$ infolge Kollision**

Durch die Berücksichtigung der ABBA ergeben sich für die Unfallauswertungen keine Änderungen, so dass hier die Annahmen des Hauptberichtes gelten.

### **10.3 Ausmaßabschätzung**

Bei der Ermittlung von Schadensausmaßen ist aufgrund ihrer unterschiedlichen Wirkungsmechanismen zu unterscheiden zwischen Schadensausmaßen infolge Brand und infolge Kollision.

#### **10.3.1 Schadensausmaße infolge Brand**

Nachfolgend sind exemplarisch die Selbstrettungsbereiche infolge eines 30 MW-Brandes für den Untersuchungstunnel im Nullfall (Abbildung 23) sowie im Planfall 3 mit zusätzlicher ABBA (Abbildung 24) dargestellt. Daraus wird ersichtlich, dass bis zur Aktivierung der Sicherheitssysteme zur Simulationssekunde 180 die Rauchausbreitung nahezu identisch verläuft. Die vorhandenen Unterschiede zwischen Nullfall und Planfall 3 sind vernachlässigbar gering und eher in der unterschiedlichen Modellierung begründet. Ab dem Aktivierungszeitpunkt 180 s zeigt sich, dass im Vergleich zum Nullfall die zusätzlich installierte ABBA (Planfall 3) eine deutlich schnellere Begrenzung der Rauchausbreitung bewirkt. Ohne ABBA ist im Nullfall bei Simulationseende ein Bereich von ca. 200 m mit nicht ausreichender Sicht vorhanden. Im Fall einer aktiven ABBA verringert sich dieser Bereich auf ca. 20 m. Somit werden für die Bestimmung der Selbstrettungsbereiche die Rauchausbreitungen bis zur Simulationssekunde 180 maßgebend. Aufgrund der identischen Rauchausbreitung bis zum Aktivierungszeitpunkt sind durch das Aktivieren einer ABBA im Vergleich zum Nullfall mit Rauchabsaugung hinsichtlich des zu erwartenden Schadensausmaßes keine signifikanten Veränderungen möglich.

Sämtliche weiteren Untersuchungsszenarien (z. B. mit unterschiedlichen Brandraten und Verkehrssituationen) sind im Anhang dokumentiert.

Über die Verknüpfung mit den Personendichten werden im Anschluss wie im Hauptbericht aus den hier ermittelten Selbstrettungsbereichen anschließend für die einzelnen Bereiche die jeweiligen Betroffenenzahlen bestimmt.

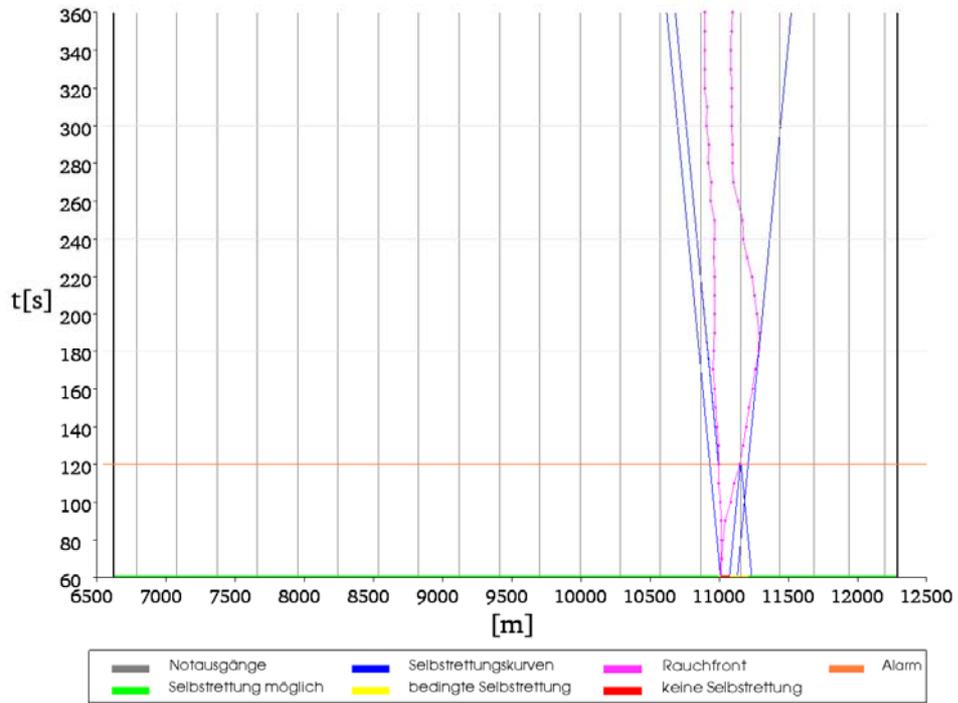


Abbildung 23: Selbstrettungsbereiche infolge. 30 MW - Brand, Untersuchungstunnel (Nullfall), Oströhre, Stau

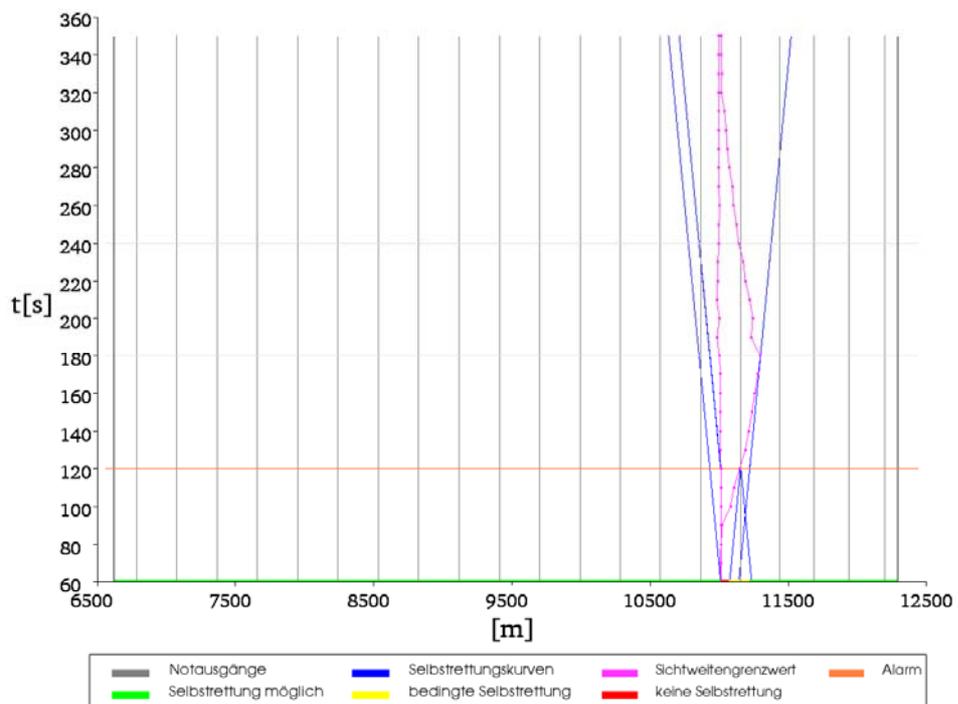


Abbildung 24: Selbstrettungsbereiche infolge. 30 MW - Brand, Untersuchungstunnel mit zusätzlicher ABBA (Planfall 3), Oströhre, Stau

### 10.3.2 Schadensausmaße infolge Kollision

Das zu erwartende Ausmaß infolge einer Kollision wird auf Grundlage des im FE 03.0378/2004/FRB vorgegebenen Zusammenhangs gemäß nachfolgender Tabelle 6 bestimmt.

Schadensausmaßklasse	Erwartetes Ausmaß
Keine Todesopfer	0 Todesopfer
1 Todesopfer	1 Todesopfer
2-3 Todesopfer	2 Todesopfer
4-9 Todesopfer	5 Todesopfer
10-30 Todesopfer	15 Todesopfer
>30 Todesopfer	35 Todesopfer

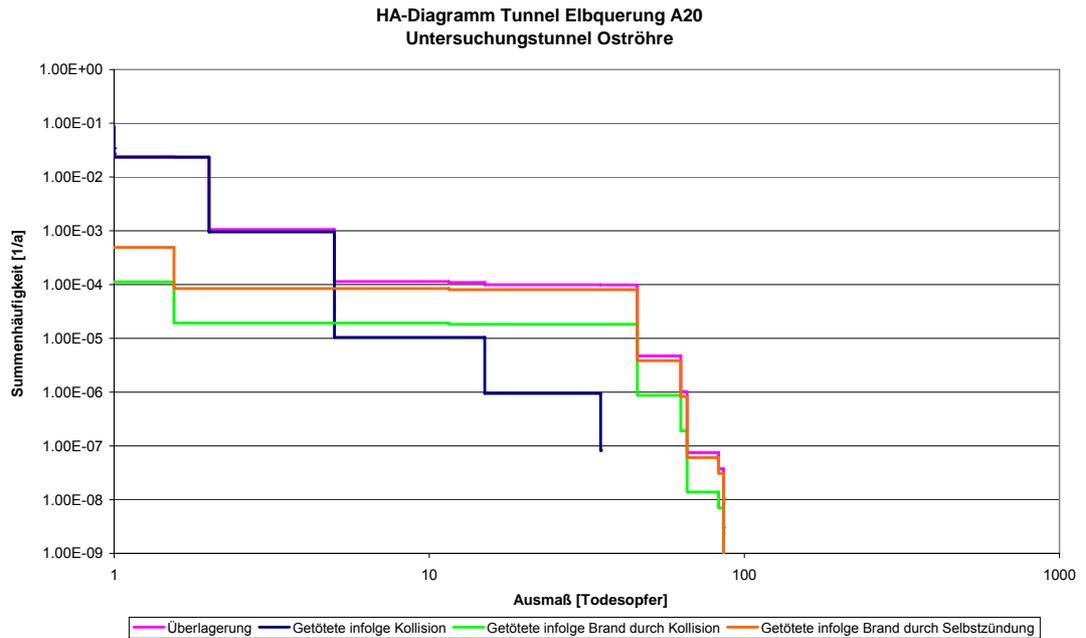
**Tabelle 6: Schadensausmaße infolge Kollision**

### 10.4 Risikoermittlung (H-A-Diagramm)

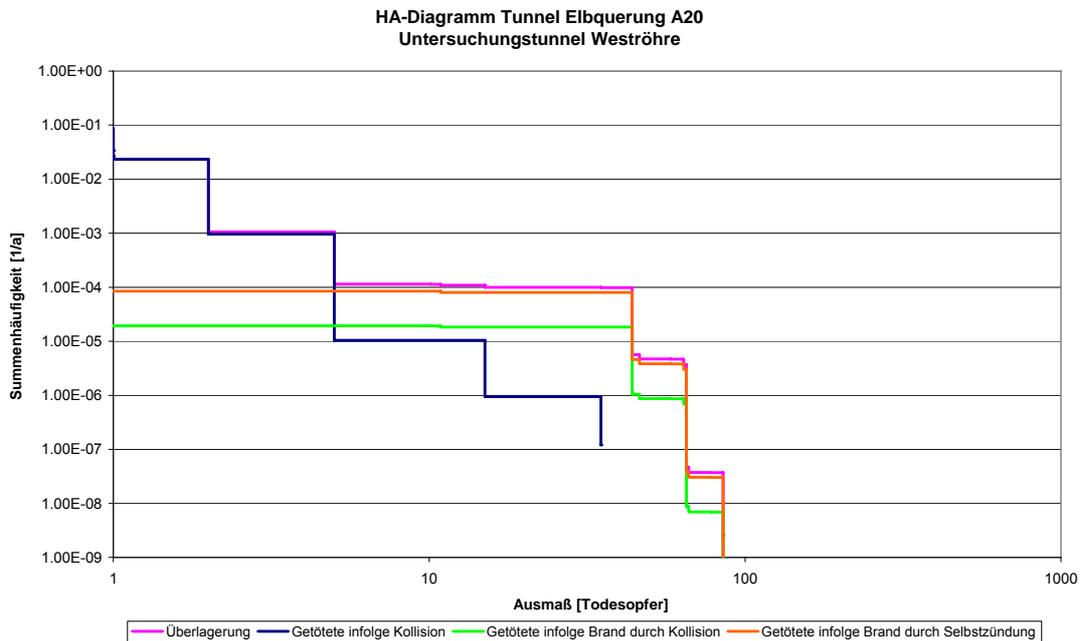
Zur Bestimmung und Darstellung der Risiken werden die in den vorausgehenden Kapiteln 10.1 und 10.2 ermittelten Häufigkeiten der Endzustände und die jeweils zugehörigen Schadensausmaße nach Kapitel 10.3 zunächst getrennt für das jeweilige Initialereignis nach der Größe der Schadensausmaße sortiert, und als Summenhäufigkeiten in einem HA-Diagramm aufgetragen. In einem zweiten Schritt werden die so ermittelten Einzelergebnisse miteinander überlagert, um das Gesamtrisiko zu erhalten. Im Folgenden werden die Ergebnisse in aggregierter Form dargestellt.

In Abbildung 25 und Abbildung 26 sind die Ergebnisse der Risikoermittlung für den Fall mit zusätzlicher ABBA (Planfall 3) als Summenhäufigkeitslinien getrennt nach Fahrtrichtungen für die Ost- und die Weströhre dargestellt. Daraus wird ersichtlich, dass im Bereich der Oströhre ein höheres Gefährdungspotential vorliegt. Sowohl die Eintrittshäufigkeit als auch das Ausmaß sind in der Weströhre geringer.

Aufgrund der Annahme, dass im Tunnelbereich eine Stausituation nur während 30 h im Jahr auftritt, liegt in über 99% der Zeit im Tunnel freier Verkehr vor. Dabei wird durch die Kolbenwirkung der Fahrzeuge eine genügend große Eigengrundströmung im Tunnel aufgebaut, so dass keine zusätzliche mechanische Längsventilation notwendig ist.



**Abbildung 25: HA-Diagramm für Fahrtrichtung Nord (Oströhre), Planfall 3**



**Abbildung 26: HA-Diagramm für Fahrtrichtung Süd (Weströhre); Planfall 3**

In Abbildung 27 und Abbildung 28 sind die Ergebnisse der Risikoermittlung für den Referenzstunnel nach RABT 2006 und die ermittelten Risiken für den Untersuchungstunnel im Nullfall und den Planfällen vergleichend gegenüber gestellt. Die Ergebnisse der Häufigkeitsausmaßermittlung infolge Kollision und Brand sind

überlagert dargestellt. Die dargestellten Summenhäufigkeitslinien repräsentieren somit das zu erwartende Gesamtrisiko pro Tunnelröhre.

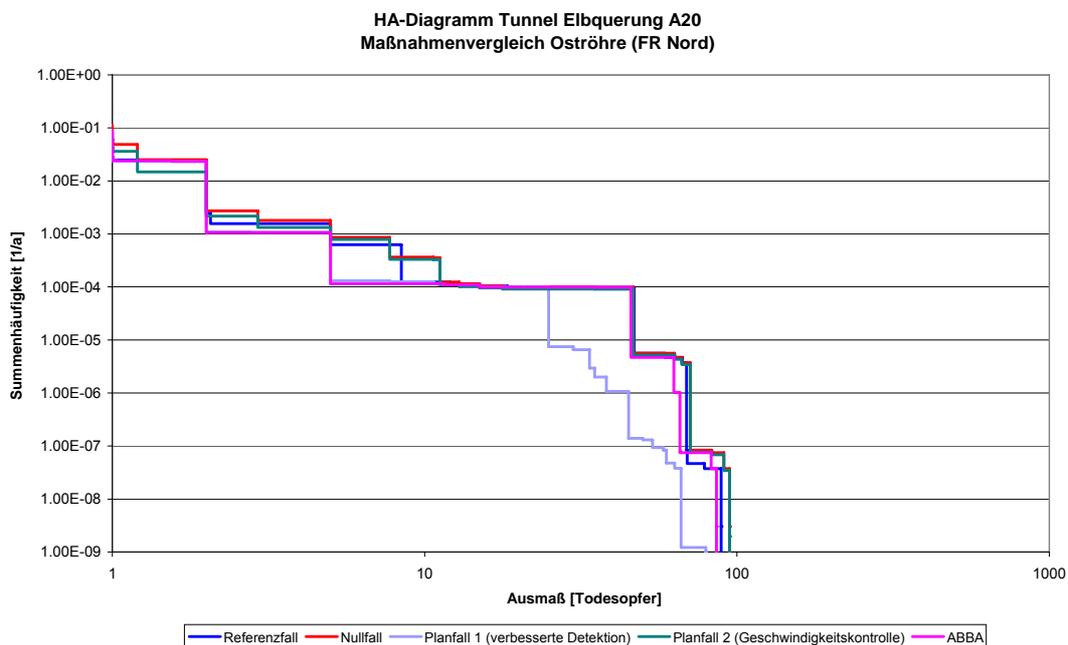


Abbildung 27: HA-Diagramm für Fahrtrichtung Nord (Oströhre)

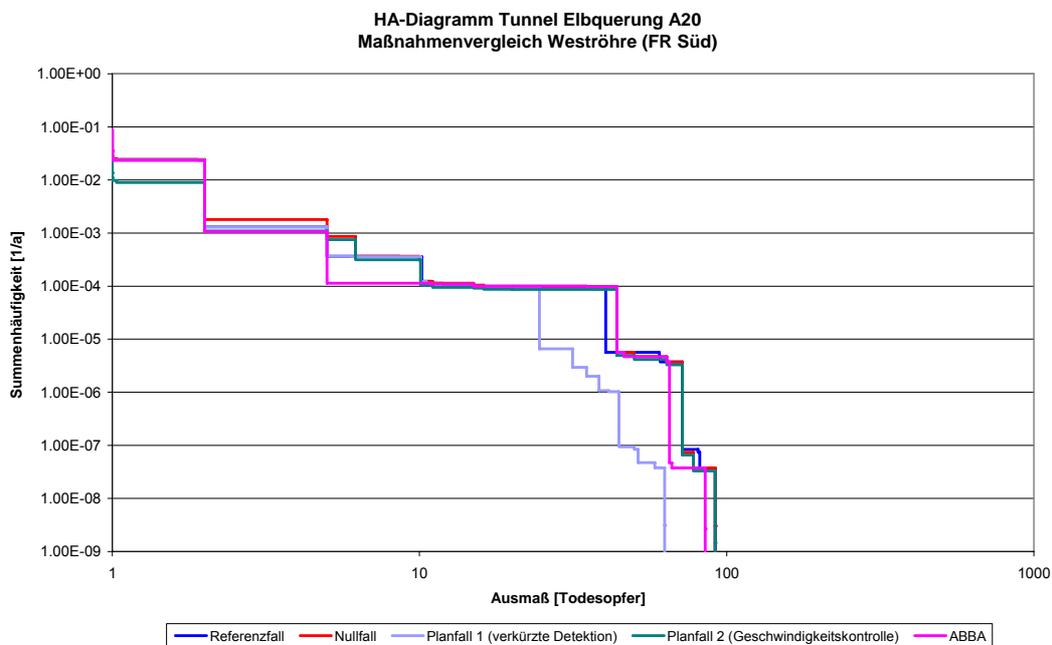


Abbildung 28: HA-Diagramm für Fahrtrichtung Süd (Weströhre)

Aus Abbildung 27 und Abbildung 28 geht hervor, dass für die Röhren des Untersuchungstunnels durch die nicht RABT 2006 - konforme Nordrampe im Vergleich zum Referenztunnel ein geringeres Sicherheitsniveau erzielt wird. Sämtliche Planfälle weisen demgegenüber ein höheres Sicherheitsniveau auf. Dies gilt auch für das zusätzliche Installieren einer ABBA.

## 10.5 Risikowerte

Als Entscheidungsgrundlage werden nachfolgend die Risiken bestimmt. Als Maß für das Risiko dient die Fläche unter den Summenhäufigkeitskurven  $h(x)$  der H-A-Diagramme und wird über nachfolgendes Integral berechnet.

$$R = \int h(x)dx$$

In Tabelle 7 und Tabelle 8 sind die sich ergebenden Risikowerte für die einzelnen Fälle getrennt für Ost- und Weströhre aufgeführt. Als Bezugspunkt ist der Referenzfall, also ein richtliniengerecht ausgestatteter Tunnel dargestellt. Negative bzw. rote Werte bedeuten, dass die jeweilige Untersuchungsvariante ein niedrigeres Sicherheitsniveau gegenüber diesem Bezugsfall aufweist. Positive bzw. grüne Werte bedeuten dagegen ein höheres Sicherheitsniveau.

Die ermittelten Risikowerte spiegeln die bereits in den HA-Diagrammen zum Ausdruck gekommene Reihung hinsichtlich des Sicherheitsniveaus wieder. Bei der Interpretation der Ergebnisse ist jedoch zu beachten, dass bei der Bildung des Risikowertes große Schadensausmaße mit geringer Eintrittshäufigkeit eher unterrepräsentiert werden, da kleine Schadensausmaße mit einer großen Eintrittshäufigkeit den Endwert stärker beeinflussen. Aus diesem Grund werden die Risikowerte zunächst getrennt für die Initialereignisse Brand und Kollision ausgewiesen bevor sie zu einem gemeinsamen Risikowert aggregiert werden.

Unter Einbezug des Aversionsfaktors (siehe Kapitel 9) wird daraus das bewertete kollektive Risiko gebildet. Durch die vergleichende Gegenüberstellung der ermittelten Risikowerte in Tabelle 7 und Tabelle 8 lassen sich die untersuchten Fälle hinsichtlich des erzielbaren Sicherheitsniveaus differenzieren.

Für beide Tunnelröhren gilt, dass durch die zusätzliche ABBA eine Verbesserung des Sicherheitsniveaus eintritt. Die Installation bewirkt eine Verbesserung über den nach den RABT 2006 geforderten Wert.

		infolge Kollision	infolge Brand durch Kollision	infolge Brand durch Selbstzündung	gesamt
Referenzunnel nach RABT	Risikowert [GT/a]	0,139	0,009	0,040	0,188
Untersuchungstunnel (Nullfall)	Risikowert [GT/a]	0,139	0,016	0,072	0,228
	Vergleich zum Referenzfall	0,0%	-81,8%	-81,8%	-21,3%
Untersuchungstunnel (Planfall 1) verkürzte Detektion	Risikowert [GT/a]	0,139	0,003	0,012	0,154
	Vergleich zum Referenzfall	0,0%	69,3%	69,3%	18,0%
Untersuchungstunnel (Planfall 2) Geschwindigkeitskontrolle	Risikowert [GT/a]	0,078	0,009	0,072	0,160
	Vergleich zum Referenzfall	43,7%	-2,4%	-81,8%	14,9%
Untersuchungstunnel (Planfall 3) ABBA	Risikowert [GT/a]	0,139	0,006	0,027	0,172
	Vergleich zum Referenzfall	0,0%	33,3%	33,3%	8,7%

**Tabelle 7: Risikowerte der Oströhre**

		infolge Kollision	infolge Brand durch Kollision	infolge Brand durch Selbstzündung	gesamt
Referenzunnel nach RABT	Risikowert [GT/a]	0,139	0,007	0,032	0,178
Untersuchungstunnel (Nullfall)	Risikowert [GT/a]	0,139	0,009	0,039	0,187
	Vergleich zum Referenzfall	0,0%	-22,0%	-22,0%	-4,8%
Untersuchungstunnel (Planfall 1) verkürzte Detektion	Risikowert [GT/a]	0,139	0,004	0,018	0,161
	Vergleich zum Referenzfall	0,0%	43,7%	43,7%	9,6%
Untersuchungstunnel (Planfall 2) Geschwindigkeitskontrolle	Risikowert [GT/a]	0,049	0,003	0,039	0,091
	Vergleich zum Referenzfall	64,8%	57,0%	-22,0%	49,0%
Untersuchungstunnel (Planfall 3) ABBA	Risikowert [GT/a]	0,139	0,006	0,025	0,169
	Vergleich zum Referenzfall	0,0%	22,4%	22,4%	4,9%

**Tabelle 8: Risikowerte der Weströhre**

## 10.6 Kostenwirksamkeit

Die Bestimmung der Kostenwirksamkeit erfolgt mit Hilfe eines Kosten-Wirksamkeits-Verhältnisses. Nutzenkomponenten ergeben sich hierbei aus der Veränderung der monetarisierten Risiken sowie der eingesparten Kosten gegenüber dem Referenzfall. Der Monetarisierung der Risiken liegen folgende Grenzkosten pro gerettetes Menschenleben nach [BAL 2007a] zugrunde:

- ▶ 5 Mio. € infolge von Kollisionen
- ▶ 10 Mio. € infolge von Tunnelbränden

Die Kostenkomponenten setzen sich zusammen aus den jährlich zu erwartenden Investitions- und Betriebskosten. Herangezogen werden dabei ausschließlich die Kosten, die direkt für die Maßnahmen eingesetzt werden müssen. Für die Installation einer ABBA werden Kosten von 1.000.000,- € je Röhrenkilometer veranschlagt. Wird der Tunnel über seine gesamte Länge von 5.671 m mit einem automatischen Hochdrucknebelsystem ausgestattet, so ergibt sich ein Investitionsbedarf von 5.671.000 € je Röhre.

Grundlage hierzu bilden die planfallspezifisch ermittelten Investitionskosten (siehe Anhang), die unter Berücksichtigung einer Abschreibungsdauer von 10 Jahren für die technische Ausstattung und einer Diskontrate von  $p=3\%$  in jährliche Investitionskosten überführt werden. Die zu erwartenden jährlichen Betriebskosten werden mit 10% der jährlichen Investitionskosten abgeschätzt. Die zu erwartenden Jahreskosten berechnen sich über nachfolgenden Zusammenhang:

$$\begin{aligned}
 K_{\text{Jahr}} &= K_{\text{Invest}} \cdot \frac{(1+p)^{dq} \cdot p}{(1+p)^{dq} - 1} + K_{\text{Betrieb}} \\
 &= 1,1 \cdot K_{\text{Invest}} \cdot \frac{(1+p)^{dq} \cdot p}{(1+p)^{dq} - 1}
 \end{aligned}$$

Mit:

$K_{\text{Jahr}}$ :	Jahreskosten [€/a]
$K_{\text{Invest}}$ :	Investitionskosten [€]
$K_{\text{Betrieb}}$ :	Betriebskosten [€/a]
$dq$ :	Abschreibungszeitraum [a]
$p$ :	Diskontrate [%]

Mit Bezug auf den Referenzfall ergibt sich die Kostenwirksamkeit infolge Brand zu

$$KW_{\text{Kollision}} = \frac{\Delta R_{m,\text{Kollision}}}{K_{\text{Jahr,Planfall}}}$$

$$KW_{\text{Brand}} = \frac{\Delta R_{m,\text{Brand}}}{K_{\text{Jahr,Planfall}}},$$

bzw. infolge Brand und Kollision zu

$$KW_{\text{Brand+Kollision}} = \frac{\Delta R_{m,\text{Kollision}} + \Delta R_{m,\text{Brand}}}{K_{\text{Jahr,Planfall}}}.$$

Mit:

$$\Delta R_{m,\text{Kollision}} = R_{m,\text{Kollision,Nullfall}} - R_{m,\text{Kollision,Planfall}}$$

$$\Delta R_{m,\text{Brand}} = R_{m,\text{Brand,Nullfall}} - R_{m,\text{Brand,Planfall}}$$

$K_{\text{Jahr, Planfall}}$ : Jährliche Investitionskosten für eine Maßnahme

$R_m$ : Monetarisiertes Risiko

Die nachfolgende Tabelle 9 listet die jährlichen Kosten für die Installation einer automatischen Brandbekämpfungsanlage (Planfall 3) auf:

Kostenberechnung	Investitionskosten	Jährliche Investitionskosten	Jährliche Betriebskosten	Jährliche Gesamtkosten
ABBA (Planfall 3)	5.671.000 €	664.814 €	66.481 €	731.296 €

**Tabelle 9: Jährliche Gesamtkosten der Maßnahmen pro Tunnelröhre**

Tabelle 10 und Tabelle 11 geben abschließend das Kostenwirksamkeits-Verhältnis wieder. Dabei gilt:

$$\text{Kosten – Wirksamkeits – Verhältnis} = \frac{K_{\text{Jahr}}}{\Delta R_m}$$

Je geringer der hierbei ermittelte Wert, desto wirksamer ist die Maßnahme.

	Risikowert [GT/a]	jährliche Mehrkosten	monetarisierte Risiken			Kosten-Wirksamkeits-Verhältnis		
			infolge Kollision	infolge Brand	gesamt	infolge Kollision	infolge Brand	gesamt
Referenzunnel nach RABT	Risikowert [GT/a]	0 €	694.500 €	489.000 €	1.183.500 €	--	--	--
Untersuchungstunnel (Nullfall)	Risikowert [GT/a]	0 €	694.500 €	889.000 €	1.583.500 €	--	--	--
Untersuchungstunnel (Planfall 1) verkürzte Detektion	Risikowert [GT/a]	32.238 €	694.500 €	150.000 €	844.500 €	ohne Wirkung	0,044	0,044
Untersuchungstunnel (Planfall 2) stationäre Geschwindigkeitskontrolle	Risikowert [GT/a]	25.791 €	391.000 €	817.000 €	1.208.000 €	0,085	0,358	0,069
Untersuchungstunnel (Planfall 3) ABBA	Risikowert [GT/a]	731.296 €	694.500 €	326.000 €	1.020.500 €	ohne Wirkung	1,300	1,300

**Tabelle 10: Kostenwirksamkeit der Planfälle für die Oströhre**

	Risikowert [GT/a]	jährliche Mehrkosten	monetarisierte Risiken			Kosten-Wirksamkeits-Verhältnis		
			infolge Kollision	infolge Brand	gesamt	infolge Kollision	infolge Brand	gesamt
Referenzunnel nach RABT	Risikowert [GT/a]	0 €	694.500 €	391.000 €	1.085.500 €	--	--	--
Untersuchungstunnel (Nullfall)	Risikowert [GT/a]	0 €	694.500 €	477.000 €	1.171.500 €	--	--	--
Untersuchungstunnel (Planfall 1) verkürzte Detektion	Risikowert [GT/a]	32.238 €	694.500 €	220.000 €	914.500 €	ohne Wirkung	0,125	0,125
Untersuchungstunnel (Planfall 2) stationäre Geschwindigkeitskontrolle	Risikowert [GT/a]	25.791 €	244.400 €	420.000 €	664.400 €	0,057	0,449	0,051
Untersuchungstunnel (Planfall 3) ABBA	Risikowert [GT/a]	731.296 €	694.500 €	303.000 €	997.500 €	ohne Wirkung	4,210	4,210

**Tabelle 11: Kostenwirksamkeit der Planfälle für die Weströhre**

Durch die vergleichende Gegenüberstellung der ermittelten Risikowerte in Verbindung mit der Betrachtung der zugehörigen Kostenwirksamkeit lassen sich die untersuchten Fälle hinsichtlich des erzielbaren Sicherheitsniveaus sowie der Kosteneffizienz differenzieren und eine Priorisierung vornehmen.

Hinsichtlich der ermittelten Kosten-Wirksamkeiten ist festzustellen, dass die Installation einer zusätzlichen automatischen Brandbekämpfungsanlage in beiden Röhren zu ungünstigen Kosten-Nutzen-Verhältnissen führt und diese Maßnahme daher unter dem Aspekt der Wirtschaftlichkeit als nicht sinnvoll erachtet werden kann.

## **11 Zusammenfassung und Fazit**

Im Rahmen der Untersuchung konnte gezeigt werden, dass die Ausrüstung des Tunnels Elbquerung A 20 mit einer automatischen Brandbekämpfungsanlage (ABBA) zusätzlich zur Rauchabsaugung das Sicherheitsniveau beider Röhren über die Mindestanforderungen der RABT 2006 hebt. Grundlage für die hier zusammengefassten Ergebnisse sind die für eine Sicherheitsbewertung maßgeblichen Personenrisiken. Der Objektschutz wird nicht näher betrachtet. Während die Weströhre das Sicherheitsniveau des Referenzfalls nur geringfügig unterschreitet sind im Fall der Oströhre signifikante Unterschreitungen zu verzeichnen. Die ABBA stellt somit eine weitere Möglichkeit dar, um ein Sicherheitsniveau entsprechend den Vorgaben nach RABT zu erreichen.

Die durchgeführten numerischen Berechnungen haben ferner ergeben, dass durch das gleichzeitige Aktivieren der Rauchabsaugung die Wirkungen einer ABBA nicht behindert wird und eine sinnvolle Ergänzung darstellen kann. Die ABBA weist allerdings von allen untersuchten Maßnahmen (Planfälle) nach der reinen Längslüftung mit Rauchabsaugung das geringste Sicherheitsniveau auf.

Besonders anhand der Darstellungen der Selbstrettungsbereiche wird ersichtlich, dass hinsichtlich der Selbstrettungsmöglichkeiten durch das zusätzliche Aktivieren einer ABBA im Vergleich zur reinen Rauchabsaugung nur eine geringfügige Verbesserung zu erwarten ist. Daher ist bei den schadensminimierenden Varianten der verkürzten Detektionszeit der Vorzug zu geben.

Inklusive der im Hauptbericht untersuchten Planfälle weist die Installation einer ABBA die höchsten Zusatzkosten auf. Dadurch ergeben sich deutlich ungünstige Kosten-Nutzen-Verhältnisse, so dass die Realisierung dieser Maßnahme unter Wirtschaftlichkeitsaspekten zu verwerfen ist.



## 12 Literaturverzeichnis

- [BAL 2004] Baltzer, W.; M. Barleon, Th. Becher, G. Mayer, W. Riepe, B. Steinauer und U. Zimmermann (2004) Ausgestaltung von Brand-Notbeleuchtung und Leitsystemen zur Fluchtwegkennzeichnung in Straßentunneln – Systematik der Leitsysteme, Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik, Heft 892, BMVBW
- [BAL 2006a] Baltzer, W., Mayer, G., Mühlberger, A., Pauli, P., Riepe, W. Steinauer, B., Zimmermann, U., FE 03.390/2005/FGB Gestaltung von Notausgängen in Straßentunneln, Bundesminister für Verkehr, Bau- und Wohnungswesen (2006)
- [BAL 2007a] Baltzer, Kündig, Locher, Mayer, Riepe, Steinauer, Zimmermann, Zulauf; Forschungsbericht zu FE 03.0378/2004/FRB Bewertung der Sicherheit von Straßentunneln; Veröffentlichung in Vorbereitung BAST 2007
- [BAL 2007b] Baltzer, Mayer, Zimmermann, Zulauf; Leitfaden für Sicherheitsbewertungen von Straßentunneln gemäß RABT 2006 (Abschnitt 0.5); Veröffentlichung in Vorbereitung BAST 2007
- [BAL 2010] Baltzer, Brennberger, Imhof, Mayer, Zimmermann, Zulauf; Risikoanalyse zur Elbquerung im Zuge der BAB A20 bei Glückstadt im Auftrag des Landesbetriebs Straßenbau und Verkehr Schleswig-Holstein, Januar 2010
- [BWE 2008] Neubau der A 20, Nord-West-Umfahrung Hamburg, Abschnitt K 28 (Niedersachsen) bis zur B 431 (Schleswig-Holstein), Bauwerksentwurf Elbquerung, Erläuterungsbericht und Plananlagen, 02/2008
- [KOS 2009] Kossmann; Neubau der A 26/A 20 Nord-West-Umfahrung Hamburg, Abschnitt K 28 bis zur B 431 - Verkehrsuntersuchung; SSP Consult 02/2009
- [MAY 2003a] Mayer, G., Haastert J.: Quantifizierung und Bewertung von Risiken in Straßentunneln, Aachener Mitteilungen Straßenwesen, Erd- und Tunnelbau, Heft 43.
- [MAY 2003b] Mayer, G., Baltzer W.: Quantitative Sicherheitsbewertung und optimierte Fluchtwegkennzeichnung für Brandunfälle in Straßentunneln, Forschung + Praxis, Bd. 40, Bauverlag BV.

- 
- [MAY 2005] Steinauer, B.; G. Mayer, M. Brake, A. Haack, J. Schreyer und M. Grünwald Brand- und Störfalldetektion in Straßentunneln – Vergleichende Untersuchungen, Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik, 925, Bundesminister für Verkehr, Bau- und Wohnungswesen, Bonn
- [MAY 2006a] Mayer, G.: "Brände in Straßentunneln: Abschätzung der Selbstrettungsmöglichkeiten der Tunnelnutzer mittels numerischer Rauchausbreitungssimulation", Aachener Mitteilungen Straßenwesen, Erd- und Tunnelbau, Heft 47, 2006
- [MAY 2006b] Mayer, G., Kündig, P., Steinauer, B., FE 03.375/2004/FGB Brandversuche in Tunneln – Vereinheitlichung der Durchführung und Auswertung; Bundesminister für Verkehr, Bau- und Wohnungswesen (2006)
- [MAY 2007] Tunnel fires: Assessment of the tunnel users' escape possibilities using numerical simulations of the smoke propagation, Transportation Research Board Meeting, 21.-25.1.2007, Washington, D.C
- [MAY 2008] Bestimmung der Verkehrssicherheit von Straßentunneln mittels quantitativer Risikoanalysen, VDI Berichte 2019: Tunnel und andere unterirdische Verkehrsanlagen, Technische Ausstattung, Betrieb und Sicherheit, ISBN 978-3-18-092019-1
- [MTF 1995] Memorial Tunnel Fire Ventilation Test Program, im Auftrag des Massachusetts Highway Department und der Federal Highway Administration, Bechtel / Parsons Brinckerhoff.
- [PUR 1995] Purser, D.A. (1995) Toxicity Assessment of Combustion Products, in: The SFPE Handbook of Fire Protection Engineering, 2nd Ed., Society of Fire Protection Engineers, Quincy, MA, Section 2, Chapter 8
- [RAA 2008] Rohloff et. al.; Richtlinien für die Anlage von Autobahnen (RAA); FGSV-Verlag 2008
- [RABT 2006] Baltzer et. al.; Richtlinie für die Ausstattung und den Betrieb von Straßentunneln RABT; FGSV Verlag 2006
- [SCH 2008] Schulz, Sulk; Brandschutz- und Gefahrenabwehr - Analyse für den geplanten Tunnel Elbquerung der A 20 Drochtersen - Kollmar; DMT GmbH 09/2008

[WEH 2008] Wehner; A 20 Nord-West-Umfahrung Hamburg, Neubau einer Elbquerung - Vorplanung der Tunnellüftung; HBI 08/2008