

Quantitative Risikobewertung gemäß RABT

Dr. sc. techn. (EPFL) Matthias Wehner, HBI Haerter Beratende Ingenieure www.hbi.eu
Dipl.-Ing. Thomas Gerlach, AIXtraffic GbR www.aixtraffic.de
Dipl.-Ing. (FH) Thomas Kratz, Gackstatter Beratende Ingenieure GmbH www.gackstatter.de

Dieser Vortrag gibt einen kurzen Überblick über Richtlinien und Verfahrensanweisungen für Quantitative Risikobewertung bzw. -analyse (QRA) von Straßentunneln in Deutschland. Es wird die Methodik zur Durchführung von Risikoanalysen nach der deutschen „Richtlinie für die Ausstattung und den Betrieb von Straßentunneln“, RABT 2006 und weiteren Anweisungen beschrieben. Der Ansatz, die Prinzipien und die Methode der QRA sind ausführlich im Abschlussbericht des Forschungsprojektes „Bewertung der Sicherheit von Straßentunneln“ beschrieben.

Um zu entscheiden, ob für einen bestimmten Tunnel mit besonderen Eigenschaften eine quantitative oder qualitative Bewertung der Sicherheit notwendig ist, oder keine weiteren Untersuchungen erforderlich sind, muss der „Leitfaden für Sicherheitsbewertungen von Straßentunneln“ verwendet werden. Im standardisierten Bewertungsverfahren werden die wichtigsten Einflussfaktoren auf die Sicherheit eines Straßentunnels berücksichtigt.

Die wichtigsten methodischen Grundlagen wie Ereignishäufigkeit, Ereignisbaum, Initialereignis, Systemreaktionen, Ausbreitung von Rauch und Hitze und Fluchtverhalten werden beschrieben. Ein Anwendungsbeispiel für den komplexen Tunnel „Kö-Bogen“ in Düsseldorf wird vorgestellt.

Die Anwendung der QRA ist heute gut definiert. Die Methoden sind klar, aber sie lassen dennoch einigen Spielraum bei der Festlegung der Eingangsdaten, Wahrscheinlichkeiten und Ereignis-Szenarien zu. Quantitative Risikobewertungen können durch Ergreifen von zusätzlichen Maßnahmen bei Vorliegen eines erhöhten Risikos zu einer höheren Sicherheit führen und dienen dem Nachweis eines gleichwertigen oder höheren Sicherheitsniveaus. Zur Bewertung der Sicherheit wird derzeit ein vergleichender Ansatz gewählt. Ein Planfall mit besonderen Charakteristika wird verglichen mit dem Referenzfall eines durchschnittlichen entsprechend den Richtlinien ausgerüsteten Tunnels.

1 Einleitung

Der Ausbau von neuen Verkehrswegen erfolgt zunehmend in Form von unterirdischen Verkehrsanlagen. Insbesondere in Städten sind hierbei oft sehr komplexe Randbedingungen und Anforderungen zu berücksichtigen. Bauliche Einschränkungen durch bereits bestehende Bauwerke müssen berücksichtigt werden. Oft werden vielfältige Nutzungsmöglichkeiten angestrebt. Hierdurch können sich z.B. unterirdische Zu- und Abfahrten, Anschlüsse an öffentliche Tiefgaragen usw. ergeben, die entsprechende Verflechtungen und Risiken beinhalten.

Diese Risiken sind zu analysieren (Risikoanalyse), zu bewerten (Sicherheitsbewertung) und resultieren, falls notwendig, in Maßnahmen, die eine ausreichende Sicherheit entsprechend dem geforderten Schutzniveau des gültigen Regelwerks gewährleisten (Maßnahmenplanung).

2 Überblick über Richtlinien und Verordnungen in Deutschland

2.1 EU-Richtlinie 2004/54/EG

In europäischen Straßentunneln soll ein möglichst einheitliches Sicherheitsniveau gewährleistet werden. Die EU-Richtlinie 2004/54/EG (1) gibt Mindestanforderungen an die Sicherheit von Straßentunneln vor. Die Umsetzung von nationalen Regelwerken orientiert sich an dieser Richtlinie. Die folgenden sicherheitsrelevanten Parameter sind zu berücksichtigen: Tunnellänge, Anzahl der Tunnelröhren, Anzahl der Fahrstreifen, Querschnittsgeometrie, Trassierung, Bauart, Richtungsverkehr oder Gegenverkehr, Verkehrsaufkommen je Tunnelröhre (einschließlich der zeitlichen Verteilung), Gefahr täglicher oder saisonaler Staubildung, Zugriffszeit der Einsatzdienste, Vorkommen und Anteil des Lkw-Verkehrs, Vorkommen, Anteil und Art des Gefahrgutverkehrs, Merkmale der Zufahrtsstraßen, Fahrstreifenbreite, geschwindigkeitsbezogene Aspekte, geografische und meteorologische Verhältnisse.

Für Tunnel, die hinsichtlich dieser Parameter eine besondere Charakteristik aufweisen, ist eine Risikoanalyse durchzuführen. Die Einhaltung eines hohen Sicherheitsniveaus im Tunnel ist gegebenenfalls durch zusätzliche Sicherheitsmaßnahmen und/oder weitere Ausrüstungen sicherzustellen und durch eine Risikoanalyse zu belegen.

2.2 Richtlinien für die Ausstattung und den Betrieb von Straßentunneln (RABT 2006)

Gemäß den Richtlinien für die Ausstattung und den Betrieb von Straßentunneln (RABT 2006, (2)) müssen ab 400 m Tunnellänge die erhöhten Risiken aufgrund besonderer Charakteristika mittels einer Risikoanalyse untersucht werden. Weiterhin ist bei Abweichung von baulichen Vorgaben mittels einer Risikoanalyse zu betrachten welche kompensierenden Maßnahmen getroffen werden müssen. Zur Gewährleistung der Sicherheit im Tunnel sind gegebenenfalls Maßnahmen und/oder Ausrüstungen erforderlich, die über dem Standard der RABT hinausgehen.

Die Sicherheitsbewertung aufgrund der Risikoanalyse muss alle wesentlichen Risiken und sicherheitsrelevanten Faktoren berücksichtigen. Hierunter fallen insbesondere technische Sicherheitseinrichtungen, verkehrliche, betriebliche und organisatorische Randbedingungen.

2.3 Leitfaden für Sicherheitsbewertungen von Straßentunneln gemäß RABT 2006

Der Leitfaden für Sicherheitsbewertungen von Straßentunneln (3) dient einer Voranalyse. Insbesondere weniger kritische Fälle mit geringfügigen Abweichungen vom Regelwerk oder geringen Risiken sollen identifiziert werden.

Für jede Röhre werden Risikokenngrößen für die beiden Szenariotypen „Kollision“ und „Brand“ ermittelt. Es gehen die folgenden für die Tunnelsicherheit wesentlichen Faktoren ein:

- Betriebsart (Gegenverkehr / Richtungsverkehr)
- Länge der Tunnelröhre
- Verkehrsaufkommen pro Tunnelröhre (DTV_R)
- Schwerverkehrsanteil
- Jahresbezogener zeitlicher Anteil der Stautunden in der Tunnelröhre
- Einfluss von Zu-/Abfahrten
- Längsneigung
- Brandlüftungssystem (Natürliche Lüftung / mechanische Längslüftung (Entrauchung über Tunnelportale) / Rauchabsaugung)

- Notausgangsabstand.

Basierend auf den ermittelten Risikokenngrößen und einer zusätzlichen Experteneinschätzung wird der jeweilige Analysetiefgang festgelegt. Mögliche Ergebnisse sind:

- Quantitative Sicherheitsbewertung erforderlich
- Qualitative Sicherheitsbewertung erforderlich
- Keine weitere Abklärung erforderlich.

2.4 Forschungsprojekt „Bewertung der Sicherheit von Straßentunneln“

Die Methodik zur Bewertung der Sicherheit von Straßentunneln wurde im Rahmen des gleichlautenden Forschungsprojekts (4) detailliert ausgearbeitet und beschrieben.

Die Methodik basiert auf einem risikoorientierten Ansatz. Es werden Ereignisszenarien in Form eines Ereignisbaumes definiert und hinsichtlich ihrer Eintrittshäufigkeit sowie des zu erwartenden Schadensausmaßes quantifiziert. „Risiko“ ist definiert als das Produkt aus Eintrittshäufigkeit und Schadensausmaß und wird im Risikosummendiagramm grafisch dargestellt. Als Schadensausmaß für Personenschäden wird die Schadensgröße „Todesopfer“ herangezogen. Sachschäden können zudem in Euro quantifiziert werden. Die Folgekosten für Verletzte werden über die Unfallfolgekosten den Sachschäden zugeschlagen.

Die Risikobewertung dient der Feststellung, ob das ermittelte Risiko tragbar ist. Es existiert für Deutschland derzeit kein absoluter Standard im Sinne einer Akzeptanzlinie im Risikosummendiagramm. Daher erfolgt die Bewertung, nicht anhand eines absoluten Kriteriums, sondern durch den Vergleich der geplanten Tunnelröhre (Planfall) mit einem Referenzunnel (Referenzfall). Es wird davon ausgegangen, dass der Referenzunnel keine besonderen Charakteristika oder Abweichungen von baulichen Vorgaben nach dem Regelwerk aufweist und in allen Punkten konform nach RABT 2006 ausgerüstet ist. Dieser Festlegung liegt die Annahme zugrunde, dass ein den Anforderungen der RABT 2006 entsprechender Tunnel als sicher erachtet werden kann.

3 Methodik der quantitativen Sicherheitsbewertung

Die grundlegende Vorgehensweise einer quantitativen Sicherheitsbewertung ist in Abbildung 1 dargestellt. Sie besteht aus den folgenden drei Teilschritten:

- Risikoanalyse
- Bewertung
- Maßnahmenplanung.

3.1 Risikoanalyse

Grundlage der Sicherheitsbewertung ist die Analyse der Risiken. Die Modellierung der verschiedenen Ereignisabläufe wird in Form von Ereignisbäumen hinterlegt. Von einem auslösenden Ereignis (Initialereignis) aus werden weitere Verzweigungen definiert. Diese stellen Teilereignisse oder unterschiedliche Systemantworten dar. Teilereignisse können z.B. unterschiedliche Brandorte oder unterschiedliche Verkehrszustände vor dem Brand sein. Diese

sind mit relativen Häufigkeiten verbunden. Unterschiedliche Systemantworten stellen verschiedene mögliche Reaktionen auf Initial- und Teilereignisse dar. Zum Beispiel wird über den Eingang einer Brandmeldung eine automatische Aktivierung der Tunnellüftung angefordert. Mögliche Ereignisse sind das korrekte Funktionieren von Brandmeldeanlage und Tunnellüftung mit angenommenen Reaktionszeiten der Systeme oder aber ein Ausfall der Tunnellüftung z.B. aufgrund einer Störung der Brandmeldeanlage oder beim Anlauf der Lüftungsmaschinen.

Alle Ereignisse bis zum Erreichen eines Endzustandes stellen die unterschiedlichen Zweige des Ereignisbaumes dar (vgl. Tabelle 1). Die zu erwartenden Häufigkeiten der Endzustände werden durch Multiplikation der Initialhäufigkeit mit den einzelnen Verzweigungswahrscheinlichkeiten berechnet. Zur Ermittlung der Häufigkeiten und der Schadensausmaße werden soweit möglich statistische Daten zugrundegelegt.

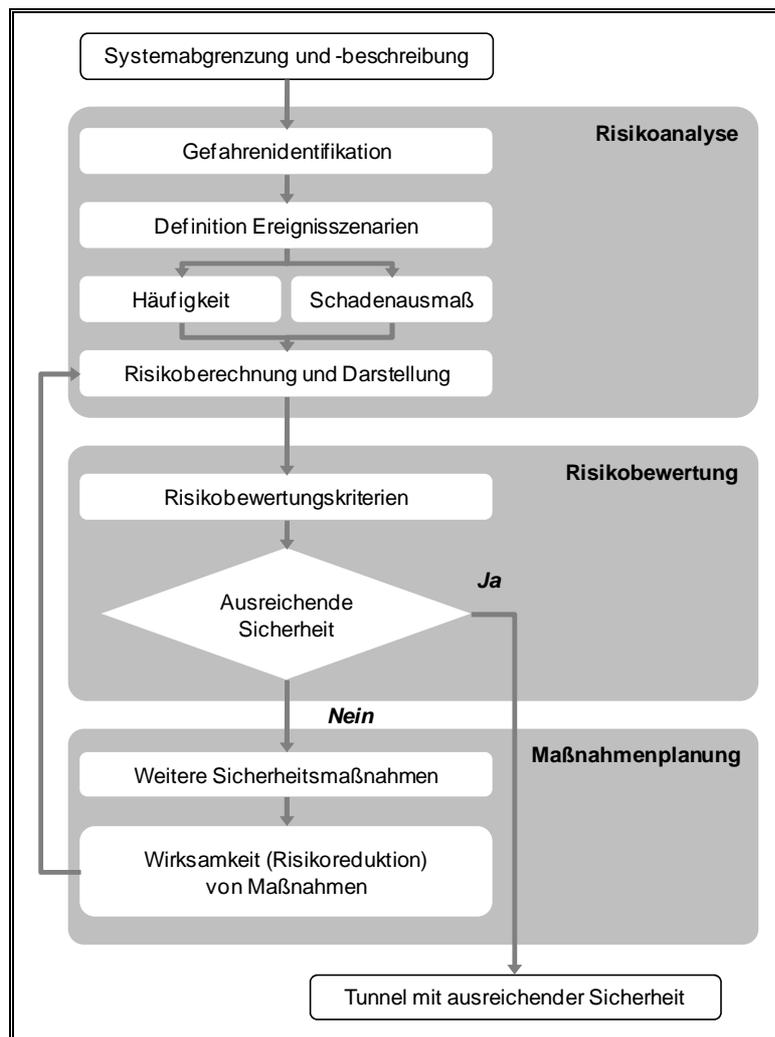


Abbildung 1: Vorgehen zur quantitativen Sicherheitsbewertung in Straßentunneln aus (4)

Verzweigung	Bezeichnung	Anzahl	Verzweigung	Bezeichnung	Anzahl
1	Initialereignis Kollision (ohne Brand)	1	1	Initialereignis Brand (ohne Gefahrgüter nach ADR)	1
2	Involvierte Fahrzeuge / Objekte: Pkw, Lkw, Reisebus, Massenkollision	4	2	Ereignisort	5
3	Schweregrade: Fahrnfall (Unfalltyp 1), Einbiegen/Kreuzen (Unfalltyp 3), Unfall im Längsverkehr (Unfalltyp 6), Sonstiger Unfall (Unfalltyp 7)	4	3	Fließender Verkehr / Stau	2
			4	Wirkung Branddetektion / Brandlüftung: Ja, Nein	2
			5	Schweregrade / Brandleistung: 5, 30, 50, 100 MW	4
Anzahl Szenarien		16	Anzahl Szenarien		80

Tabelle 1: Verzweigungen der Ereignisbäume „Kollision“ und „Brand“

Es sind zwei voneinander unabhängige Ereignisbäume für Kollision (ohne Brand) und Brand (ohne Gefahrgüter) zu untersuchen. Die Risiken werden für jede Tunnelröhre separat ermittelt und für die Gesamtbewertung zusammengeführt, um spezifische Analysen der Risiko-Unterschiede einzelner Tunnelröhren eines Tunnels zu erlauben.

Die Schadensausmaßermittlung für seltene Ereignisse, wie zum Beispiel Brandereignisse, muss unter Nutzung von Berechnungen mittels Ausbreitungs-, Wirkungs- bzw. Fluchtsimulationsmodellen erfolgen. Der Risikowert, der sich aus dem Produkt der Eintrittshäufigkeit des Endzustandes und dem zugehörigen Schadensausmaß ergibt stellt ein Maß für die Sicherheit des Systems dar.

3.2 Risikobewertung

Die Risikobewertung dient der Beantwortung der Frage, ob das vorliegende Risiko akzeptiert werden kann. Dies ist eine gesellschaftliche Fragestellung, die nicht alleine von Planern und Bauherren beantwortet werden kann.

Derzeit kann mangels Grundlagen nicht von einem absoluten Kriterium ausgegangen werden. Daher wird der real vorliegende oder geplante Tunnel (Planfall) mit einem Tunnel verglichen, der allen Anforderungen der RABT 2006 entspricht (Referenzfall).

3.3 Maßnahmenplanung

Die Maßnahmenplanung erfolgt in mehreren Schritten. Zunächst werden auf der Basis der vorangehenden Analysen risikomindernde Maßnahmen bestimmt. Anschließend erfolgt die Beurteilung dieser Maßnahmen aufgrund ihrer Wirksamkeit im Sinne der Risikoreduktion und ihrer Kosten.

Die geplanten Maßnahmen werden einer erneuten Risikoanalyse und -bewertung unterzogen, um die Wirksamkeit nachzuweisen. Das Ergebnis der Maßnahmenplanung soll ein Tunnel mit ausreichender Sicherheit sein.

4 Quantitative Sicherheitsbewertung für den „Kö-Bogen“ in Düsseldorf

4.1 Tunnelbauwerk

Mit der Errichtung des „Kö-Bogens“ sollen heute oberirdische Straßenverbindungen künftig unterirdisch verlaufen. Die zu errichtenden miteinander verbundenen Tunnelröhren stellen ein komplexes Tunnelbauwerk dar (vgl. Abbildung 2). Insgesamt werden drei unterirdische Anschlüsse an neue bzw. bestehende Tiefgaragen erstellt.

Die Tunnel werden ausschließlich im Richtungsverkehr abschnittsweise auf einer bis maximal drei Fahrspuren befahren. Die zulässige Höchstgeschwindigkeit beträgt 50 km/h. Die Fahrraumquerschnitte stellen Rechteckquerschnitte dar. Es existieren starke Längsneigungswechsel mit bis zu 8 % Gefälle bzw. Steigung. Exemplarisch ist in Abbildung 3 der Verlauf der Längsneigung des Nord-Süd-Tunnels dargestellt.

Als Tunnellüftungssystem für den Brandfall wurde in allen Röhren trotz deren relativ kurzen Längen eine mechanische Längslüftung mit Strahlventilatoren empfohlen. Gründe sind die sehr hohen und stark wechselnden Längsneigungen und die Vernetzung der Tunnelröhren, die eine Rauchausbreitung über stehende Fahrzeuge in benachbarte Röhren verursachen kann. Die Anordnung der Strahlventilatoren erfolgt in Decken- und Wandnischen.

Die Parkhäuser werden gegenüber den Tunnelröhren mit Brandschutzstoren ausgerüstet und im Ereignisfall von diesen getrennt. Zur schnellen Erkennung von Brandereignissen wird neben der Rauchererkennung durch die Sichttrübe messgeräte zusätzlich eine Videobilderkennung mit Erkennung von liegengebliebenen Fahrzeugen als Initialereignis und zur Brandfrüherkennung durch digitale Bildauswertung eingesetzt.

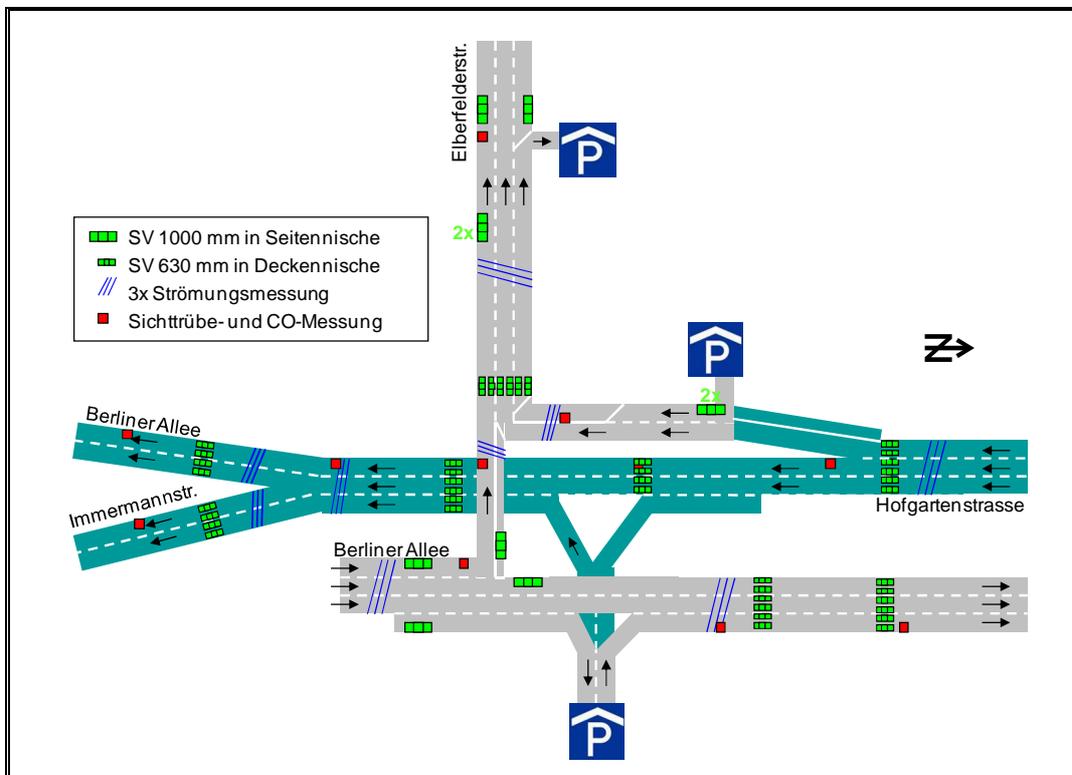


Abbildung 2: Schematische Darstellung der Tunnelröhren des „Kö-Bogens“ mit Lüftungs- und Messtechnik

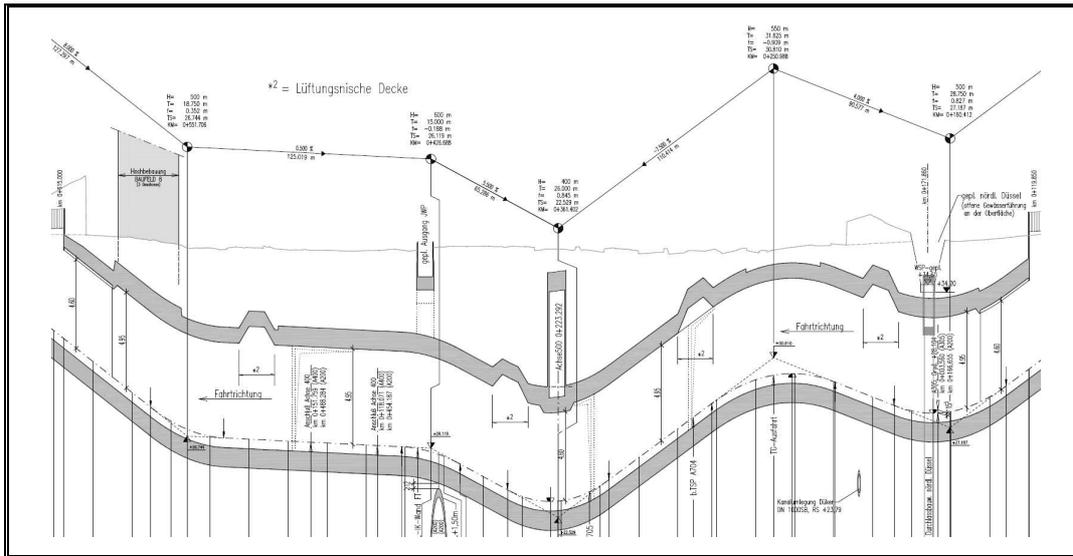


Abbildung 3: Längsneigung Nord-Süd-Tunnel (Fahrtrichtung von rechts nach links)

4.2 Festlegung von Planfall und Referenzfall

Der Planfall stellt den derzeit geplanten Tunnel dar. Der Referenzfall besitzt keine besonderen Charakteristika und ist in allen Punkten entsprechend der RABT 2006 ausgerüstet.

Die wesentlichen Unterschiede zwischen Plan- und Referenzfall sind wie folgt:

- Planfall: kürzere Einschaltzeit der Tunnelspernung und Brandfalllüftung aufgrund Videobilddetektion mit Brandfrüherkennung durch digitale Bildauswertung: 100 s bestehend aus: 20 s bis zur Erkennbarkeit von Rauch, 60 s Detektion Video und 20 s Reaktionszeit und Reserve
- Referenzfall: 180 s bestehend aus: 100 s Zeit bis Erreichen von 5 MW, 60 s Detektion durch das Brandmeldekabel (Anforderung RABT) und 20 s Reaktionszeit und Reserve
- Keine Zu- und Abfahrten im Referenzfall
- Referenzfall: Zulässige Höchstgeschwindigkeit 80 km/h gegenüber 50 km/h im Planfall
- Referenzfall: Tunnellüftungssystem Natürliche Längslüftung gegenüber mechanischer Längslüftung mit Strahlventilatoren im Planfall
- Planfall: Ein zusätzlicher Notausgang in der Tunnelröhre Süd-Nord

4.3 Ereignisbaum und Schadensausmaß „Kollision“

Die Eintretenswahrscheinlichkeit des Initialrisikos Kollision beträgt laut Forschungsbericht (4) $2,28 \times 10^{-7}$ [Unfälle / Fzg x km] für die Bereiche ohne Zu- oder Abfahrten bzw. $5,28 \times 10^{-7}$ [Unfälle / Fzg x km] für die Bereiche mit Zu- oder Abfahrten. Beim Planfall wirkt sich die max. zulässige Höchstgeschwindigkeit mit 50 km/h anstelle von 80 km/h nach RABT 2006 positiv aus. Einen weiteren Beitrag leistet die vorgesehene, restriktive Geschwindigkeitsüberwachung, die so angeordnet wird, dass in den Bereichen mit Verflechtungsvorgängen die Einhaltung des Tempolimits durchgesetzt wird. Dies wird mit einer Reduktion des wie vorstehend beschrieben ermittelten Kollisionsrisikos auf 50 % d.h. risikomindernd berücksichtigt.

Dem Szenario "Kollision" liegen für die jeweils betroffenen Fahrzeugtypen (Pkw, Lkw, Reisebus und Massenkollision) die Teilereignisse Fahr Unfall, Einbiegen/Kreuzen-Unfall, Unfall im Längsverkehr und Sonstiger Unfall (Unfalltypen 1, 3, 6 bzw. 7 gemäß (5)) zugrunde.

4.4 Ereignisbaum und Schadensausmaß „Brand“

Die Brandhäufigkeiten setzen sich zusammen aus der Brandrate von 0,3 % als Folgeereignis von Kollisionen und infolge von technischen Defekten, die mit 3×10^{-9} [1/Fzg km] angenommen werden. Die statistischen Werte gemäß Forschungsvorhaben (4) werden auf die Bedingungen eines jeden Tunnelabschnitts des Kö-Bogens übertragen.

Brandereignisse insbesondere mit sehr großen Schadensausmaßen sind sehr seltene Ereignisse. Die Schadensausmaßermittlung kann somit nicht allein als statistische Aussage erfolgen, da die notwendige Grundgesamtheit fehlt. Die Schadensausmaßermittlung erfolgt daher über Berechnungen mittels Ausbreitungs-, Wirkungs- und Fluchtsimulationsmodellen. Hierbei wurden die Bauwerksgeometrie, die Wirkungen des Verkehrs, der Kamineffekt und die Rauchausbreitung berücksichtigt. Für die Berechnung der Schadstoffkonzentration wurde als konservativer Ansatz angenommen, dass keine Luft-/Rauchschichtung vorliegt.

Für die Personenflussanalyse und die Ermittlung des Schadensausmaßes werden weiterhin Annahmen zur Fahrzeugdichte und Fahrzeugbelegungen und durchschnittlichem Verhalten der Verkehrsteilnehmer, wie Reaktionszeit und Fluchtgeschwindigkeiten im Rauch bzw. ohne Rauch getroffen. Es wird eine mittlere Reaktionszeit auf den Brand und um das Fahrzeug zu verlassen von 1 min angesetzt. Die Fluchtgeschwindigkeiten werden mit 1,2 m/s bei Rauchfreiheit und 0,2 m/s im Rauch angenommen.

Die Personen bleiben während einer vorgegebenen Phase vor Beginn der Selbstrettung in ihrem Fahrzeug und bewegen sich anschließend mit der Fluchtgeschwindigkeit in Richtung des nächsten Notausgangs. Kommt eine Person auf der Flucht mit der Rauchfront in Berührung, so ändert sie ggf. die Fluchtrichtung und flieht vom Rauch weg. Erreicht die Person einen Fluchtweg oder ein Tunnelportal, so ist sie in Sicherheit. Für alle Personen im Tunnel wird die Rauchgas-Exposition unter Einbezug der lokalen Brandgaskonzentration und der Expositionsdauer errechnet. Überschreitet die Exposition einer Person den Todesfall-Grenzwert wird diese als Todesopfer erfasst.

Die Strömungsrandbedingungen aufgrund der miteinander vernetzten Tunnelröhren wurden unter Nutzung des validierten kommerziellen Programmes IDA RTV (6) vorab für alle Szenarien ermittelt. Der zeitliche Verlauf der Rauchausbreitung, die Berechnung der Schadstoffkonzentration, die Personenfluss- und Entfluchtungsmodellierung und die Ermittlung des Schadensausmaßes für die Brandfallszenarien wurde unter Berücksichtigung der Strömungsrandbedingungen mit Hilfe des Programms ODEM berechnet (7).

4.5 Ergebnisse der Risikoberechnungen

Für die Bewertung der Risiken wird sowohl die grafische Darstellung der „Farmer“-Kurve (auch „Risikosummenkurve“ oder „Wahrscheinlichkeits-Ausmaß-Diagramm“ genannt) als auch das Gesamtrisiko als Zahlenwert verwendet. Das Gesamtrisiko ist als Summe aller Eintrittswahrscheinlichkeiten mal Schadensausmaß definiert:

$$\text{Gesamtrisiko} = \sum \text{Eintrittswahrscheinlichkeit} \times \text{Schadensausmaß}$$

In Abbildung 4 sind die Risikosummenkurven getrennt für Kollision und Brand summiert über alle Röhren dargestellt. Der Planfall mit den definierten Zusatzmaßnahmen bietet gegenüber dem Vergleichstunnel (Referenzfall) eine höhere Sicherheit, sowohl hinsichtlich der Kollisio-

nen, als auch im Brandfall. Das Risiko von Personenschäden aufgrund von Kollisionen liegt um ca. eine bis drei Größenordnungen über dem Risiko, das von einem Brand ausgeht.

So sind in allen Tunnelröhren des Kö-Bogens rechnerisch durchschnittlich alle 34 Jahre ein Todesopfer aufgrund von Kollisionsereignissen zu beklagen, während aufgrund eines Tunnelbrandes mit statisch einem Toten alle 13.880 Jahre zu rechnen ist.

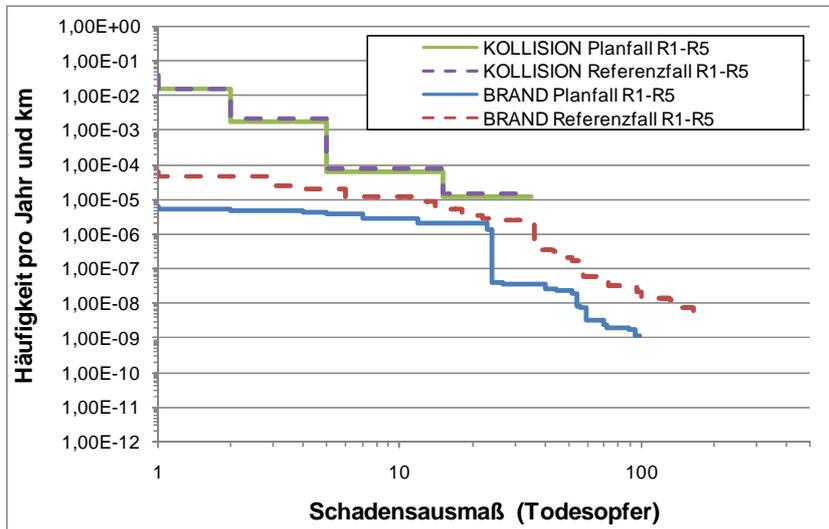


Abbildung 4: Risikosummendiagramm für die Ereignisse Kollision und Brand über alle Röhren, Plan- und Referenzfall

In Abbildung 5 sind die Risikosummenkurven für die Gesamt-Ereignisse der Summe aus Kollision und Brand über alle Röhren für den Plan- und Referenzfall dargestellt. Auch hier wird in der logarithmischen Darstellung sichtbar, dass die Kollisionsereignisse gegenüber den Brandereignissen dominierend sind.

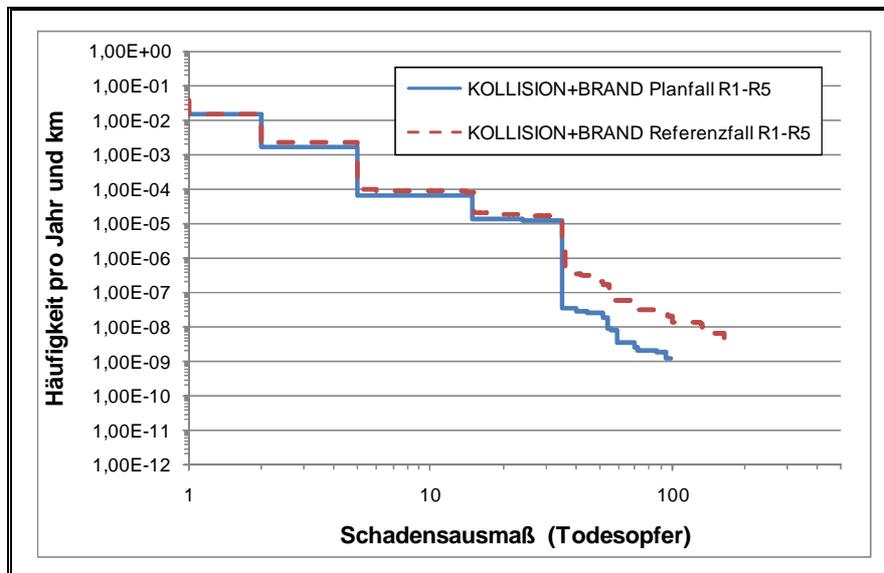


Abbildung 5: Gesamt-Risikosummendiagramm Kollision und Brand über alle Röhren, Plan- und Referenzfall

5 Schlussfolgerungen

Die Methodik der quantitativen Risiko- und Sicherheitsbewertung (QRA) in Tunnelbauwerken ist heute klar definiert. Bei der Anwendung von zum Teil komplexen Simulationsmodellen

und bei der Festlegung von Eingangsparametern, statistischen Wahrscheinlichkeiten und den Ereignis-Szenarien besteht ein gewisser Entscheidungsspielraum, der Fachverstand, fundierte Erfahrung und grundlegende Ingenieurkenntnisse voraussetzt, damit die Ergebnisse sinnvoll und verantwortbar sind.

Der notwendige Umfang und Analysetiefgang einer quantitativen Sicherheitsbewertung kann über eine Voranalyse mit Risikokenngrößen und einer Experteneinschätzung festgelegt werden.

Am Beispiel des geplanten, komplexen Tunnelbauwerkes "Kö-Bogen" in Düsseldorf wurde die Anwendung der Methodik aufgezeigt. Die vorab festgelegten Zusatzmaßnahmen zur Erhöhung der Sicherheit in den Tunnelröhren sind ausreichend, um das Sicherheitsniveau eines RABT 2006 konformen Tunnels zu erfüllen. Es sind keine weiteren Maßnahmen erforderlich. Es zeigte sich, dass das Risiko aufgrund von Kollisionen deutlich über dem Brandfallrisiko liegt.

Die quantitative Sicherheitsbewertung stellt eine nachvollziehbare Methode zum Nachweis einer ausreichenden Tunnelsicherheit dar. Sie dient weiterhin der begründeten Auswahl von Zusatzmaßnahmen, die im Falle eines erhöhten Risikos getroffen werden.

Das derzeitige Verfahren nutzt für die Bewertung der Sicherheit den relativen Vergleich zwischen einem geplanten Zustand und einem Referenzzustand. Für die Festlegung eines absoluten Sicherheitskriteriums fehlen derzeit noch die Grundlagen.

Literatur

(1) (2004): *Richtlinie 2004/54/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 29. April 2004 über Mindestanforderungen an die Sicherheit von Tunneln im transeuropäischen Straßennetz*, Amtsblatt der Europäischen Union vom 7.6.2004, Seiten L 167 / 39 – L 167 / 91

(2) (2006): *Richtlinien für die Ausstattung und den Betrieb von Straßentunneln, RABT, Ausgabe 2006*; Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen; Köln

(3) (2009): *Leitfaden für Sicherheitsbewertungen von Straßentunneln gemäß RABT 2006 (Abschnitt 0.5)*; Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung (BMVBS), Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt); Bonn

(4) (2009): *Bewertung der Sicherheit von Straßentunneln, Schlussbericht und Anhänge, FE 03.378/2004/FRB*; Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen - Brücken- und Ingenieurbau, Heft B 66, Hrsg.: Bundesanstalt für Straßenwesen -BASt; Bergisch Gladbach

(5) (1998): *Merkblatt für die Auswertung von Straßenverkehrsunfällen – Teil 1: Führen und Auswerten von Unfalltypen-Steckkarten*; Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, FGSV-Verlag; Köln

(6) (2005): *IDA Road Tunnel Ventilation (IDA RTV), Theoretical Reference*; EQUA Simulation AB; Stockholm, Sweden

(7) I. RIESS, R. BRANDT (2010): „ODEM“: *A one-dimensional egress model for risk assessment*; 5th International Conference 'Tunnel Safety and Ventilation'; Graz