



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Office fédéral des routes OFROU

DOCUMENTATION

TRANSPORT DE MARCHANDISES DANGEREUSES DANS LES TUNNELS ROUTIERS

*Analyse et évaluation des risques encourus par les
personnes*

Edition 2026 V2.02

ASTRA 84002

Impressum

Auteurs / groupe de travail

Gammeter Christian	OFROU N-SSI
Jeanneret Alain	OFROU N-SSI
Rust Susanne	OFROU N SSI
Galliker Rahel	OFROU
Gilabert D. Manuel	OFROU
Fragnoli David	OFROU
Gloor Adrian	OFROU I-O IP
Bischof Richard	OFEV
Cassini Philippe	Bureau d'études, mandataire
Defert Raphaël	Bureau d'études, mandataire
Imhof Dominique	Bureau d'études, mandataire
Pons Philippe	Bureau d'études, mandataire
Zulauf Christoph	Bureau d'études, mandataire
Zing Christophe	Bureau d'études, mandataire

Langues originales

Français (volet A) et allemand (Volet B)

Éditeur

Office fédéral des routes
Division Réseaux routiers N
Standards et sécurité de l'infrastructure SSI
3003 Berne

Source

Ce document peut être téléchargé gratuitement sur le site www.ofrou.admin.ch.

© OFROU 2026

Reproduction à usage non commercial autorisée sous réserve de mentionner la source.

Table des matières

	Impressum	2
	Avant-propos	6
1	Introduction	8
1.1	But du présent document	8
1.2	Champ d'application	8
1.3	Destinataires	8
1.4	Entrée en vigueur et modifications	8
2	Bases juridiques	9
2.1	Ordonnance sur la protection contre les accidents majeurs (OPAM)	9
2.1.1	Contexte	9
2.1.2	Mise en œuvre des prescriptions de l'OPAM dans la procédure actuelle	9
2.2	Ordonnance relative au transport des marchandises par route (SDR)	9
2.2.1	Contexte	9
2.2.2	Catégories de tunnel	9
2.2.3	Code de restriction en tunnel des marchandises dangereuses	10
2.2.4	Signalisation	10
2.2.5	Mise en œuvre des prescriptions de la SDR dans la procédure actuelle	10
3	Procédure d'analyse et d'évaluation des risques conformément à le modèle Suisse OECD/AIPCR (QRA-CH)	11
3.1	Synthèse de la procédure	11
3.2	Compétences requises	11
3.3	Étape n° 1 : Évaluation sommaire	11
3.3.1	Objectif de l'étape n°1	11
3.3.2	Estimation simplifiée du risque intrinsèque	12
3.4	Étape n°2 : analyse approfondie du risque intrinsèque	14
3.4.1	Objectif de l'étape n°2	14
3.4.2	Analyse du risque intrinsèque	14
3.4.3	Cas des tunnels fréquemment congestionnés	16
3.5	Mesures de sécurité supplémentaires	16
3.5.1	Principe de détermination des mesures de sécurité supplémentaires	16
3.5.2	Mesures constructives et techniques	16
3.5.3	Mesures organisationnelles et opérationnelles	16
3.5.4	Itinéraires de contournement	18
4	Consignes de mise en œuvre pratique	19
4.1	Autres facteurs d'influence pour la restriction du transport des marchandises dangereuses	19
4.2	Signalisation de restriction du transport des marchandises dangereuses	19
5	Application du modèle suisse OCDE/AIPCR	20
5.1	Introduction	20
5.2	Référence	20
5.3	Installation	21
5.4	Matériel et logiciel requis	22
5.5	Utilisation à l'étape n°1	22
5.6	Utilisation à l'étape n°2	24
5.7	Calcul pour un seul tube	24
6	Einleitung	26
6.1	Hintergrund	26
6.2	Rechtlicher Rahmen	26
6.2.1	Grundlagen	26
6.2.2	Umsetzung der rechtlichen Anforderungen	29
6.3	Zielsetzungen und Anforderungen an das Vorgehen	30
6.3.1	Grundsätze und Zielsetzungen	30
6.3.2	Übergeordnete Anforderungen an die Umsetzung	30
6.3.3	Inhaltliche Anforderungen an die Umsetzung Stufen 1	31

6.3.4	Inhaltliche Anforderungen an die Umsetzung Stufe 2.....	32
6.4	Abgrenzung	33
7	Risikobasierte Verfahren	34
7.1	Grundsätze risikobasierter Verfahren	34
7.2	Methoden für Gefahrgutrisikoanalysen in Strassentunneln	36
8	ASTRA-Methodik zur Analyse und Beurteilung der Risiken von Gefahrguttransporten in Tunneln	38
8.1	Einleitung.....	38
8.2	Übersicht zum methodischen Vorgehen	39
9	Das OECD/PIARC CH-Modell	40
9.1	Einleitung.....	40
9.2	Das OECD/PIARC Standardmodell	41
9.2.1	Entwicklung	41
9.2.2	Modell / Methodik	41
9.2.3	Programmstruktur.....	42
9.2.4	Anforderungen an Hardware und Software	42
9.2.5	Verbreitung und Erfahrungen	42
9.3	OECD/PIARC CH Modell (QRA-CH)	43
9.3.1	Weiterentwicklung des OECD/PIARC Standardmodells.....	43
9.3.2	Berücksichtigte Szenarien.....	43
9.3.3	Standardwerte der Gefahrgutverteilung	44
9.3.4	Raten der untersuchten Szenarien	44
9.3.5	Anpassung der Zeitspanne zwischen Unfall und Gefahrgutwirkung	46
9.3.6	Evakuierungsmodell	47
9.3.7	Sensitivitätsanalysen.....	50
10	Grobbeurteilung: Ausschlusskriterien	52
10.1	Einleitung.....	52
10.2	Diskutierter Ansatz	52
11	Grobbeurteilung: Vereinfachte Abschätzung des intrinsischen Risikos (Stufe 1) ...	54
11.1	Einleitung.....	54
11.2	Umsetzung	54
11.2.1	QRA-CH Modell vereinfacht.....	54
11.2.2	Entwicklung des Modells und Anwendung an Fallbeispielen	58
12	Vertiefte Analyse: Detaillierte Ermittlung des intrinsischen Risikos (Stufe 2)	59
12.1	Einleitung.....	59
12.2	Umsetzung	59
12.2.1	Detailliertere Modellierung der risikorelevanten Einflussgrössen	59
12.2.2	Anwendung QRA-CH Modell	59
12.2.3	Sicherheitsmassnahmen: Grundsatz	60
12.2.4	Betriebliche Sicherheitsmassnahmen	60
12.2.5	Beschränkung von Gefahrguttransporten gemäss ADR.....	63
12.2.6	Anwendung an Fallbeispielen: Tunnel A.....	67
12.2.7	Anwendung an Fallbeispielen: Tunnel B.....	70
13	Möglichkeiten und Grenzen des Modells	73
14	Schlussfolgerungen und Handlungsbedarf	74
	Anhänge	75
	Bibliographie	160
	Liste des modifications	162

Liste des annexes

- Annexe I Installation du QRA-CH (modèle OCDE/AIPCR suisse) : illustration
- Annexe II: Berechnungsparameter des vereinfachten QRA-CH (Stufe 1)
- Annexe III: Berechnungsparameter des QRA-CH (Stufe 2)
- Annexe IV Methodik Stufe 1: Fallbeispiele
- Annexe V Methodik Stufe 2: Fallbeispiele
- Annexe VI Méthodologie pour la prise en compte des périodes de congestion
- Annexe VII Prise en compte des nouvelles statistiques de trafic pour le calcul des valeurs standard actuelles des taux d'accidents dans le QRA-CH

Avant-propos

L'Accord relatif au transport international des marchandises dangereuses par route (ADR) régit, à l'échelle européenne, le transport de marchandises dangereuses par route et formule les prescriptions correspondantes. Sa mise en œuvre en Suisse s'effectue par le biais de l'ordonnance relative au transport des marchandises dangereuses par route (SDR), qui inclut l'ADR.

Dans la version 2007 de l'ADR, les instances ont, pour la première fois, réclamé des dispositions harmonisées concernant les restrictions au franchissement des tunnels routiers par les véhicules transportant des marchandises dangereuses. L'objectif de cette réglementation est d'établir une signalétique européenne harmonisée des éventuelles restrictions de transport de marchandises sur des tronçons de tunnels. Les critères de l'ADR 2007 ne portent toutefois pas sur les conditions de restriction de transit ou sur leur validité effective. La Suisse observe ici, entre autres législations, les prescriptions de l'ordonnance sur la protection contre les accidents majeurs (Ordonnance sur les accidents majeurs, OPAM).

Dans le cadre du projet "ADR Tunnel", l'OFROU a mis au point une procédure ainsi qu'une méthodologie associée afin de permettre une mise en œuvre cohérente de l'exigence conforme à l'ADR 2007 tout en respectant les critères de l'OPAM. Ce projet a été élaboré entre 2008 et 2011.

A partir de 2013, tous les tunnels des routes nationales en Suisse font l'objet d'une évaluation grâce au logiciel QRA-CH développé spécifiquement pour la Suisse sur la base du modèle OCDE/AIPCR (DG QRAM).

En 2022, l'OFROU adapte son outil d'évaluation des risques liés au transport de marchandises dangereuses dans les tunnels routiers aux dernières évolutions informatiques (Windows, Excel). Le présent document est donc une synthèse des résultats des études et de la procédure élaborée. Il est divisé en deux volets :

- Volet A – application : le premier volet du document est un guide d'application pratique de la procédure adoptée et des modèles nécessaires. Il s'adresse en particulier aux personnes appliquant cette procédure.
- Volet B – bases méthodiques : le second volet illustre les bases méthodiques et les motifs qui les sous-tendent, permettant ainsi d'approfondir l'évolution de la procédure.

Office fédéral des routes

Christian Gammeter
Responsable de secteur Tunnel et Géotechnique

VOLET A : APPLICATION

1 Introduction

1.1 But du présent document

En Suisse, le transport des marchandises dangereuses par route est réglementé par l'ordonnance relative au transport des marchandises dangereuses par route (SDR) [5]. Cette ordonnance permet la mise en œuvre des dispositions en vigueur à l'échelle européenne (Accord relatif au transport international des marchandises dangereuses par route ADR [2]) sur le territoire national.

L'Ordonnance sur la protection contre les accidents majeurs (OPAM [1]) est en vigueur en Suisse depuis 1991 ; conformément à l'art. 1, elle vise à préserver la population et l'environnement de préjudices graves dus à des accidents majeurs. Les observations de l'OPAM portent notamment sur le transport de marchandises dangereuses sur les tronçons ouverts et dans les tunnels.

Le présent document décrit la procédure utilisée pour l'analyse et l'évaluation, cohérentes et axées sur la pratique, des risques encourus par les personnes lors du transport de marchandises dangereuses dans les tunnels du réseau des routes nationales, en tenant compte des critères de régulation en vigueur de l'OPAM [1], de la SDR [5] ou de l'ADR [2].

Le volet A "Application" fournit une synthèse des bases nécessaires à la mise en œuvre de la procédure en utilisant le modèle QRA-CH développé pour la Suisse sur la base du modèle OCDE/AIPCR (DG QRAM). Pour des informations complémentaires et approfondies sur le contexte et l'origine de la procédure ainsi que des exemples d'application, il est possible de consulter le volet B "Bases méthodiques" du document.

1.2 Champ d'application

La procédure s'applique aux tunnels routiers (tranchées couvertes et tunnels creusés) du réseau des routes nationales. Toutefois, elle n'est pas directement transposable à d'autres ouvrages d'art tels que les galeries ou les protections contre les chutes de pierres.

Cette procédure peut également être appliquée par analogie aux tunnels routiers sur les réseaux routiers secondaires.

La procédure décrite analyse les risques encourus par les personnes. Lors d'événements survenant dans les tunnels, les risques environnementaux sont en règle générale d'ordre secondaire et doivent être envisagés dans le cadre de l'exécution générale de l'OPAM.

1.3 Destinataires

Le présent document s'adresse au propriétaire des tunnels des routes nationales et à l'autorité d'exécution compétente.

1.4 Entrée en vigueur et modifications

Ce document entre en vigueur le 29.07.2011. La « liste des modifications » se trouve à la page 162.

Seul le volet A (Application) est traduit. Le volet B n'a pas été traduit, car il porte sur les bases méthodiques et n'est pas indispensable pour l'application.

2 Bases juridiques

Pour l'analyse et l'évaluation des risques liés au passage de marchandises dangereuses dans les tunnels routiers, les dispositions de régulation suisses mentionnées ci-dessous édictent les conditions cadres juridiques à respecter :

- Ordonnance sur la protection contre les accidents majeurs (OPAM [1]),
- Ordonnance relative au transport des marchandises dangereuses par route (SDR) [5].

2.1 Ordonnance sur la protection contre les accidents majeurs (OPAM)

2.1.1 Contexte

Conformément à l'art. 1 de l'Ordonnance sur la protection contre les accidents majeurs (OPAM [1]) vise à préserver la population et l'environnement de préjudices graves dus à des accidents majeurs survenant durant l'exploitation d'installations. On comprend notamment par installations les voies de communication sur lesquelles transitent des marchandises dangereuses.

L'OPAM définit à cette fin une procédure de contrôle et d'évaluation permettant de faire face aux risques d'accidents majeurs.

2.1.2 Mise en œuvre des prescriptions de l'OPAM dans la procédure actuelle

Le présent document décrit une procédure d'estimation et d'évaluation des risques d'accidents majeurs qui tient compte des prescriptions de l'OPAM (chapitre 3). Cette procédure est structurée par étapes et permet d'identifier les actions à entreprendre concernant les mesures de sécurité supplémentaires, facteurs de réduction du risque, conformément à l'art. 8 OPAM (chapitre 3.4). L'étude se limite en l'occurrence aux risques résultant du transport de marchandises dangereuses. En outre, d'autres aspects supérieurs peuvent induire un besoin de mesures de sécurité supplémentaires. Toutefois, ceux-ci ne seront pas abordés dans le présent document.

2.2 Ordonnance relative au transport des marchandises par route (SDR)

2.2.1 Contexte

L'ADR [2] régit, à l'échelle européenne, les principes du transport de marchandises dangereuses par route et formule les prescriptions y relatives. Sa mise en œuvre en Suisse s'effectue par le biais de l'ordonnance relative au transport des marchandises dangereuses par route (SDR) [5] qui inclut l'ADR.

Pour la première fois, la version de l'ADR 2007 définit des dispositions concernant d'éventuelles mesures opérationnelles sous la forme de restrictions du transport des marchandises dangereuses dans les tunnels routiers. Si des restrictions de transport sont prévues pour un tunnel, celles-ci doivent être conformes aux dispositions de l'ADR. La mise en conformité passe par la définition de catégories de tunnel A à E et de codes de restriction en tunnel pour les marchandises dangereuses.

2.2.2 Catégories de tunnel

Les catégories de tunnel A à E sont définies conformément à la tab. 2.1 Dans le cas d'éventuelles restrictions, les autorités compétentes des États signataires de l'ADR doivent affecter les tunnels routiers à une catégorie de tunnel.

Tab. 2.1 Catégories de tunnel selon l'ADR

Catégorie de tunnel	Restrictions
A	Aucune restriction au transport des marchandises dangereuses
B	Restrictions concernant les marchandises dangereuses susceptibles de provoquer une explosion très importante
C	Restrictions concernant les marchandises dangereuses susceptibles de provoquer une explosion très importante, une explosion importante ou une fuite importante de matières toxiques
D	Restrictions concernant les marchandises dangereuses susceptibles de provoquer une explosion très importante, une explosion importante, une fuite importante de matières toxiques ou un incendie important.
E	Restrictions concernant toutes les marchandises dangereuses hormis les numéros ONU 2919, 3291, 3331, 3359 et 3373

Fondamentalement, il est possible d'affecter un tunnel à différentes catégories, en fonction p. ex. d'une heure de la journée ou d'un jour de la semaine. Par ailleurs, il est en principe également possible de prendre des mesures opérationnelles supplémentaires afin de réduire les risques (p. ex. formation de convoi). Nous renvoyons à l'ADR [2] pour davantage de précisions sur les règlements.

2.2.3 Code de restriction en tunnel des marchandises dangereuses

Les restrictions au transport de certaines marchandises dangereuses se basent sur le code de restriction en tunnel de ces dernières, mentionné dans l'ADR [2]. Ce code indique à partir de quelle(s) catégorie(s) le franchissement du tunnel par des véhicules transportant des marchandises dangereuses est soumis à des restrictions (voir tab. 2.1). Si une unité de transport contient des marchandises dangereuses auxquelles sont attribués différents codes de restriction en tunnel, le plus restrictif de ces codes est alors affecté à tout le chargement.

2.2.4 Signalisation

La catégorie attribuée à un tunnel doit être signalée et publiée. S'il est prévu une restriction pour un tunnel, cette dernière n'est exécutoire que si la restriction est citée dans la SDR et le tunnel signalé en conséquence. Si aucune restriction n'est prévue (catégorie de tunnel A), aucune signalisation n'est nécessaire.

2.2.5 Mise en œuvre des prescriptions de la SDR dans la procédure actuelle

Si des mesures de sécurité supplémentaires, prenant la forme de restrictions du transport de marchandises dangereuses, sont prévues pour un tunnel sur la base des réflexions établies dans le cadre de la procédure selon l'OPAM, le type de restrictions doit satisfaire aux prescriptions de l'ADR ou de la SDR, c'est-à-dire que le tunnel doit être affecté à une catégorie de tunnel selon l'ADR.

La procédure appliquée conformément au présent document permet également, dans le cadre de l'identification des actions à entreprendre concernant les mesures de sécurité supplémentaires minorant le risque, l'établissement d'éventuelles restrictions du transport de marchandises dangereuses en coordination avec les catégories de l'ADR (chapitre 3.5.3, alinéa *Restriction du transport des marchandises dangereuses conformément à l'ADR*).

3 Procédure d'analyse et d'évaluation des risques conformément à le modèle Suisse OECD/AIPCR (QRA-CH)

3.1 Synthèse de la procédure

La fig. 3.1 propose une synthèse de la procédure, en deux temps, d'analyse et d'évaluation des risques lors du transit de marchandises dangereuses dans les tunnels routiers. La procédure s'articule de la manière suivante :

- Étape n° 1 : évaluation sommaire et
- Étape n° 2 : analyse approfondie.

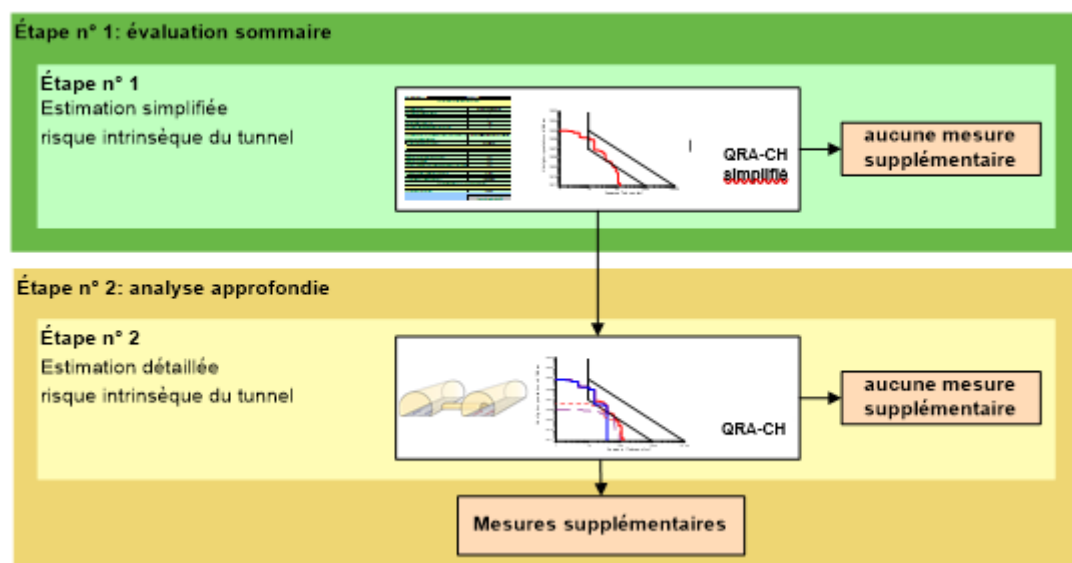


Fig. 3.1 Procédure d'analyse et d'évaluation des risques lors du transit de marchandises dangereuses dans les tunnels routiers

Les étapes de la procédure sont commentées en détail dans les chapitres qui suivent.

3.2 Compétences requises

Pour mettre en œuvre la procédure, des compétences spécifiques dans les domaines de la sécurité des tunnels et des marchandises dangereuses ainsi que des connaissances sur les méthodes d'analyse quantitative des risques sont requises.

3.3 Étape n° 1 : Évaluation sommaire

3.3.1 Objectif de l'étape n°1

La présente procédure s'applique aux tunnels routiers d'au moins 300 m de longueur. Pour l'analyse des risques, les tunnels de longueur réduite peuvent être considérés comme des tronçons ouverts dans un souci de simplification¹. L'étude spécifique des caractéristiques des tunnels est alors facultative ou indispensable uniquement dans des cas exceptionnels. L'exécution des prescriptions déterminantes du point de vue de l'état de la technique (art. 3

¹ Le tube le plus long détermine le calcul de la longueur des tunnels comportant plus d'un tube.

selon l'OPAM) est une condition requise.

Lors de l'estimation approximative du tunnel (étape n° 1), les risques du transport de marchandises sont établis grâce à une estimation simplifiée du risque intrinsèque du tunnel basée sur un nombre réduit de paramètres, et sont évalués à l'aide de valeurs limites conformément aux critères d'appréciation relatifs à l'OPAM [17]. Cette démarche permet d'identifier les tunnels qui requièrent une analyse approfondie (étape n° 2). Pour le reste des tunnels, aucune autre analyse ou mesure n'est requise du point de vue de la prévention des accidents majeurs. Ils peuvent être affectés à la catégorie de tunnel A selon l'ADR (aucune restriction du transport des marchandises dangereuses).

3.3.2 Estimation simplifiée du risque intrinsèque

Bases et données requises

15 paramètres relatifs à l'architecture du tunnel (infrastructure), à l'équipement et aux conditions de trafic sont nécessaires à l'estimation simplifiée du risque intrinsèque. Ces paramètres sont énumérés et détaillés au chapitre 11.2.1 et en annexe II.

L'analyse du risque doit prendre en compte les modifications déjà prévues sur l'ouvrage (constructives/techniques, p. ex. dans le cadre de l'UPlaNS², ou opérationnelles) ; en d'autres termes, le futur état opérationnel doit être examiné au terme d'éventuelles modifications.

Procédure

À l'étape n°1, le risque intrinsèque d'un tunnel est évalué sur la base de l'analyse simplifiée du risque. Un modèle de calcul conçu pour la Suisse est utilisé à cette fin. Il repose sur le modèle informatique des analyses quantitatives de risque de l'OCDE/AIPCR³, disponible dans le commerce. Pour plus d'informations sur le modèle OCDE/AIPCR et les adaptations spécifiques à l'application dans la présente procédure, il convient de consulter le chapitre 9.

La référence et les étapes concrètes d'application du modèle sont, quant à elles, énumérées au chapitre 5.

Fonctionnement du modèle

Le modèle de calcul repose sur le calcul de la fréquence et de l'ampleur des dommages par des scénarios déterminants impliquant des marchandises dangereuses, qui tiennent compte des caractéristiques du tunnel ainsi que des conditions environnementales et de circulation. Au total, onze scénarios sont étudiés. Ils reflètent les principaux risques dus à des incendies, des explosions et des émanations de produits toxiques sur la base des substances dites représentatives (substances représentatives de l'impact des marchandises dangereuses). Partant d'un processus d'émission, le déroulement possible des événements est analysé et l'ampleur des dommages en lien avec la vraisemblance des séquences d'événements est estimée. Les risques encourus par les personnes sont également évalués. Le nombre de victimes qui en résulte est considéré ici comme un indicateur de dommages. Le modèle tient compte simultanément des caractéristiques du tunnel et des incidences spécifiques du scénario. Pour plus de détails sur le fonctionnement du modèle, il convient de se reporter au volet B du présent document ainsi qu'au manuel du modèle standard OCDE/AIPCR [21].

Paramètres de saisie

Le calcul s'appuie sur 15 paramètres qui sont enregistrés par l'utilisateur via une interface de saisie. Ces paramètres de saisie comportent des informations sur les caractéristiques

² *Unterhaltsplanung Nationalstrassen* (Planification de l'entretien des routes nationales)

³ Le modèle OCDE/AIPCR est un logiciel spécifique qui a été développé pour l'analyse des risques de transport de marchandises dangereuses dans le cadre d'un projet de recherche de l'OCDE et de l'AIPCR (cf. ég. [21]).

constructives et opérationnelles du tunnel ainsi que des données sur les conditions de circulation et le type d'environnement.

- **Données** : type de tunnel, nombre de voies, longueur, système de drainage, pente longitudinale moyenne, nombre d'issues de secours, type et version standard du système de ventilation.
- **Exploitation** : type de surveillance, détection automatique d'incident, détection d'incendie, dispositifs d'arrêt.
- **Circulation et environnement** : trafic journalier moyen (TJM), part du trafic des poids lourds (facultatif), taux d'accidents (facultatif), type d'environnement.

L'annexe II décrit les paramètres de saisie et affiche les hypothèses et remarques essentielles pour le choix des valeurs. Le rapport méthodique (volet B) comprend, quant à lui, des informations approfondies sur les paramètres de saisie.

Un nombre réduit de valeurs de sélection est prédéfini pour certains paramètres de saisie. Si les valeurs de sélection prédéfinies ne présentent pas le cas qui nous intéresse, les paramètres de saisie doivent être choisis de manière à reproduire le tunnel avec le plus de réalisme possible. Sinon, il convient de procéder à des analyses de pertinence intégrant différentes valeurs de paramétrage. S'il s'avère impossible d'obtenir une illustration pertinente et suffisamment précise du tunnel du fait de ses caractéristiques spécifiques à l'aide des paramètres prédéfinis, l'étape n° 2 de la procédure doit être mise en œuvre (par exemple un tunnel constitué de plusieurs tubes, tunnel avec bifurcation, etc.). Il s'agit en outre, lors de l'interprétation des résultats, de prendre en considération le manque de précision des données de base et du modèle, un flou dû à la simplification des conditions réelles dans le modèle.

Lors de la sélection des paramètres de saisie, une attention particulière doit être accordée à la représentation du système de ventilation. Le modèle permet la représentation de trois types standard de ventilation mécanique. Des valeurs normatives sont notamment enregistrées pour la capacité et le régime opérationnel des types standard en cas d'incident. Pour la modélisation, il convient de choisir le type de ventilation correspondant le mieux à la ventilation existante du fait de son impact en cas d'incident. S'il est impossible de se rapprocher du type réel de ventilation, il est recommandé de procéder à des analyses de pertinence ou, si le paramètre de saisie est d'une grande pertinence, à une analyse approfondie conformément à l'étape n° 2.

Autres paramètres

Outre les valeurs spécifiées par l'utilisateur, ce modèle tient compte de nombreux autres paramètres propres aux tunnels. Soit ces paramètres sont dérivés des valeurs de saisie (p. ex. section de tunnel en raison du nombre de voies), soit il s'agit de valeurs standard enregistrées (p. ex. pente transversale). Ces valeurs et leur origine figurent dans le rapport de base (volet B).

Résultats

Les risques qui en découlent sont affichés conformément aux critères d'appréciation relatifs à l'OPAM [17] sous la forme d'une courbe cumulative dans le diagramme fréquence-ampleur. La courbe cumulative calculée est normalisée en conséquence sur une longueur de tronçon de 100 m.⁴ Dans le cas d'un tunnel bitube dont les deux tubes présentent des longueurs différentes, c'est la valeur moyenne de la longueur des deux tubes qui est utilisée pour normaliser la courbe cumulative. Il est également possible de réaliser un calcul pour chaque tube, cf. chapitre 5.7.

⁴ Les courbes cumulatives qui en résultent permettent également, au besoin, de déduire ladite fréquence d'un accident majeur doublé de préjudices importants conformément au rapport succinct de l'OPAM.

3.4 Étape n°2 : analyse approfondie du risque intrinsèque

3.4.1 Objectif de l'étape n°2

Si l'évaluation des résultats de l'étape n° 1, réalisée dans le cadre des analyses selon l'OPAM, révèle la nécessité d'un examen approfondi, le risque intrinsèque du tunnel est détaillé à l'étape n° 2 sur la base d'une analyse quantitative. Si les risques sont jugés acceptables, aucune mesure de sécurité n'est indispensable et le tunnel peut être classé en catégorie A selon la SDR (aucune restriction au transport de marchandises dangereuses).

Dans le cas contraire, des mesures constructives ou organisationnelles et opérationnelles, minorant le risque, sont prises suivant l'évaluation du niveau de risque admissible. Les mesures organisationnelles et opérationnelles peuvent notamment comprendre des restrictions de transport de certaines marchandises dangereuses au sens de l'ADR. Si des restrictions de ce genre s'avèrent nécessaires, il convient, pour les éventuels itinéraires de contournement, de vérifier si les prescriptions de l'OPAM sont respectées en tenant compte du surcroît de trafic de marchandises dangereuses.

La mise en œuvre de l'étape n° 2 peut également être requise pour traiter certaines spécificités d'un tunnel qui ne pourraient pas être prises en compte par la seule mise en œuvre de l'étape n° 1. C'est par exemple le cas si le tunnel est sujet à des congestions fréquentes (voir au §3.4.3 et annexe VI).

3.4.2 Analyse du risque intrinsèque

Bases, données nécessaires et prérequis

Des données détaillées concernant l'ouvrage et son équipement sont nécessaires à l'analyse approfondie des risques d'un tunnel. Des connaissances sont notamment requises concernant les paramètres ci-dessous :

- Type de tunnel (trafic bidirectionnel, nombre de voies) ;
- Géométrie du tunnel (longueur pour chaque tube, profil, profil longitudinal, pente transversale, etc.) ;
- Fonctionnement et capacité du système de ventilation ainsi que régime de fonctionnement prévu en cas d'incident ;
- Équipement du tunnel en matière de surveillance et de communication ;
- Équipement du tunnel en matière de dispositifs d'évacuation (nombre et emplacement des issues de secours, signalisation des dispositifs de sécurité) ;
- Mesures organisationnelles (services et concepts d'intervention, etc.) ;
- Données relatives au trafic : volume du trafic global et trafic poids lourds, variation horaire du volume (courbe de variation journalière), fréquence d'embouteillage par tunnel, vitesse maximale autorisée ;
- Transport de marchandises dangereuses : part du transport de marchandises dangereuses dans le trafic des poids lourds, parts des différentes marchandises dangereuses/groupes de marchandises dangereuses dans le volume des marchandises dangereuses ou mentions d'écart par rapport à la moyenne nationale (entreprises industrielles à proximité du tunnel, voies d'acheminement spécifiques, etc.) ;
- Accidents : si existantes, les évaluations de données spécifiques à un lieu, issues de relevés et/ou de références à des taux d'accidents élevés ou faibles par rapport à la moyenne nationale (du fait par exemple de caractéristiques particulières telles que la sinuosité élevée ou la mauvaise visibilité), doivent être prises en considération ;
- Conditions environnementales (exposition des personnes/densité de population dans le périmètre des entrées de tunnel).

Les modifications déjà prévues sur l'ouvrage (modifications et la technique, p. ex. dans le cadre de l'UPlaNS⁵, ou l'exploitation) doivent être prises en considération ; en d'autres termes, le futur état de l'exploitation doit être examiné au terme d'éventuelles modifications.

Procédure

Pour l'analyse approfondie des risques, on appliquera de nouveau le modèle des analyses quantitatives de risque de l'OCDE/AIPCR (cf. description au chapitre 3.3.2). Contrairement à l'étape n° 1, l'ouvrage, son équipement et les données de trafic sont simulés de manière plus détaillée à l'étape n° 2 dans le modèle, conformément à l'énumération ci-dessus.

Les onze scénarios du modèle standard OCDE/AIPCR illustrent les trois principales conséquences : incendies, explosions et toxicité selon les catégories de tunnel de l'ADR. En groupant les scénarios correspondants, il est possible de déterminer les risques pour certaines catégories de tunnels (cf. tab. 3.1).

Tab. 3.1 Scénarios représentant les risques des catégories de tunnel selon l'ADR⁶

Catégorie de tunnel	Scénarios des risques	
A (tous les scénarios)	3 (BLEVE bouteille de propane de 50 kg)	9 (feux de torche réservoir de propane de 18 t)
	4 (feux de nappe essence)	10 (dégagement d'ammoniac d'un réservoir de 18 t)
	5 (explosion vapeurs d'essence)	11 (dégagement d'acroléine d'un réservoir de 25 t)
	6 (dégagement de chlore d'un réservoir de 20 t)	12 (dégagement d'acroléine d'une bouteille de 100 l)
	7 (BLEVE réservoir de propane de 18 t)	13 (BLEVE CO ₂ liquéfié 20 t)
	8 (incendie avec nuage de gaz réservoir de propane de 18 t)	
B	3 (BLEVE bouteille de propane de 50 kg)	10 (dégagement d'ammoniac d'un réservoir de 18 t)
	4 (feux de nappe essence)	11 (dégagement d'acroléine d'un réservoir de 25 t)
	5 (explosion vapeurs d'essence)	12 (dégagement d'acroléine d'une bouteille de 100 l)
	6 (dégagement de chlore d'un réservoir de 20 t)	13 (BLEVE CO ₂ liquéfié 20 t)
C	3 (BLEVE bouteille de propane de 50 kg)	5 (explosion vapeurs d'essence)
	4 (feux de nappe essence)	12 (dégagement d'acroléine d'une bouteille de 100 l)
D / E	-	

Les résultats sont calculés et représentés sous forme de courbes cumulatives normalisées pour les catégories de tunnel A (courbe cumulative globale), B et C selon l'ADR. L'influence d'éventuelles restrictions sur les risques est ainsi bien visible. D'autres aspects sont également pris en compte pour distinguer les catégories de tunnel D ou E. La procédure adoptée pour déterminer les restrictions selon les catégories D ou E est commentée au chapitre 3.5.3, alinéa "Restriction du transport des marchandises dangereuses conformément à l'ADR".

Le modèle utilisé à l'étape n° 2 permet également de montrer l'influence des mesures construction/la technique et l'exploitation/l'organisation sur les risques liés.

Pour des instructions plus détaillées concernant le modèle OCDE/AIPCR adapté à une utilisation dans la présente procédure, il convient de se reporter au volet B du présent document ou au manuel du modèle standard OCDE/AIPCR DG QRAM [21].

⁵ Unterhaltsplanung Nationalstrassen (Planification de l'entretien des routes nationales)

⁶ Les scénarios 1 et 2 du modèle OCDE/AIPCR reproduisent des événements sans implication de marchandises dangereuses au sens de la SDR/ADR et ne sont d'aucune pertinence pour la présente étude.

Résultats

Les risques qui en découlent sont affichés conformément aux critères d'appréciation relatifs à l'OPAM [17] sous la forme d'une courbe cumulative dans le diagramme fréquence-ampleur. La courbe cumulative calculée est normalisée en conséquence sur une longueur de tronçon de 100 m.⁷ Dans le cas d'un tunnel bitube dont les deux tubes présentent des longueurs différentes, c'est la valeur moyenne de la longueur des deux tubes qui est utilisée pour normaliser la courbe cumulative. Il est également possible de réaliser un calcul pour chaque tube, cf. chapitre 5.7.

Mesures de sécurité

Pour l'analyse de mesures de sécurité supplémentaires, il faut procéder conformément aux indications fournies dans le chapitre 3.5 qui suit.

3.4.3 Cas des tunnels fréquemment congestionnés

L'interface étape 2 permet, moyennant quelques précautions d'utilisation, d'intégrer dans les calculs de la courbe cumulative de risques le fait qu'un tunnel est congestionné. La congestion concerne alors une période dont la durée peut être définie par l'utilisateur.

Par exemple, pour un tunnel congestionné 2h par jour dans un sens de circulation, il est possible de définir une période de 2h par jour (soit 1/12) durant laquelle le modèle QRA-CH considérera que le sens de circulation est saturé de véhicules et d'en tenir compte dans les calculs de gravité.

Pour traiter ce type de situations, il convient de se référer à l'annexe VI qui détaille la méthode à appliquer et les qui met en évidence les précautions d'usage.

3.5 Mesures de sécurité supplémentaires

3.5.1 Principe de détermination des mesures de sécurité supplémentaires

Afin de déterminer les mesures de sécurité supplémentaires pour les tunnels, le principe suivant s'applique :

- Si une situation de risque (selon l'art. 8 OPAM) requiert des mesures de sécurité supplémentaires, des mesures constructives et techniques doivent être étudiées en priorité ;
- Si les mesures constructives et techniques s'avèrent inapplicables, non rentables ou encore insuffisantes pour atteindre un niveau de sécurité acceptable, des mesures organisationnelles et opérationnelles doivent être examinées.

3.5.2 Mesures constructives et techniques

Les prescriptions régulatrices en vigueur doivent être prises en compte pour mettre en œuvre les mesures constructives et techniques requises.

3.5.3 Mesures organisationnelles et opérationnelles

Planification de l'intervention

Parmi les mesures organisationnelles et opérationnelles, il s'agit de respecter notamment la planification de l'intervention. Il est possible de se reporter au rapport du sous-groupe "Planification de l'intervention" du groupe de travail "Transport de marchandises dangereuses en Suisse" (GT TMD-CH) [22] en vue de mettre au point cette planification. D'autres mesures organisationnelles sont envisageables, p. ex. dans les domaines de la gestion du trafic, de la sensibilisation des usagers de la route au bon comportement ainsi

⁷ Les courbes cumulatives qui en résultent permettent également, au besoin, de déduire ladite fréquence d'un accident majeur doublé de préjudices importants conformément au rapport succinct de l'OPAM.

que des contrôles SDR.

Escorte et formation de convoi

Les mesures "escorte" et "formation de convoi" ont, en règle générale, des répercussions pratiques notables. Les critères ci-dessous indiquent dans quels cas la mise en œuvre de ces mesures est pertinente. Ils sont à vérifier au cas par cas.

- **Opportunité** : la mise en œuvre n'aboutit pas à un report pertinent du transport des marchandises dangereuses sur des itinéraires de substitution.
- **Faisabilité** : les ressources/capacités indispensables à la mise en œuvre peuvent être fournies à tout moment pour assurer un fonctionnement sans accroc.
- **Faisabilité** : des places de stationnement suffisantes pour des aires de repos appropriées se trouvent à distance convenable du tunnel.
- **Trafic** : la gestion du trafic depuis/vers les aires de repos ne comporte aucun risque exceptionnel (pas d'interdépendances complexes).
- **Trafic** : l'instauration de la mesure n'entrave pas de manière disproportionnée le reste du trafic.
- **Alternatives** : les mesures organisationnelles peuvent être envisagées comme une solution transitoire, si aucune autre mesure (constructive/technique) n'est possible dans un délai raisonnable.

La restriction dans le temps du transport des marchandises dangereuses n'a généralement qu'un effet d'atténuation minime et ne doit donc pas, en règle générale, être envisagée comme une mesure de sécurité supplémentaire.

Restriction du transport des marchandises dangereuses selon l'ADR

La mesure de restriction du transport des marchandises dangereuses au sens de la SDR peut être définie sur la base des résultats de l'analyse approfondie des risques conformément à l'étape n° 2. Les risques sont renseignés et évalués séparément pour chaque catégorie de tunnel. Pour ces catégories, l'on vérifie si les risques sont acceptables en vertu des principes énumérés au chapitre 2.4.4.

L'exemple de la fig. 3.2 met en lumière la procédure adoptée pour définir la catégorie de tunnel. Les courbes cumulatives résultantes sont affichées pour chaque catégorie de tunnel et évaluées à l'aide des critères d'appréciation II de l'OPAM. Dans l'exemple présenté, les risques de catégorie A (aucune restriction du transport des marchandises dangereuses) figurent clairement dans le domaine du non-acceptable. Cette catégorie n'est pas autorisée.

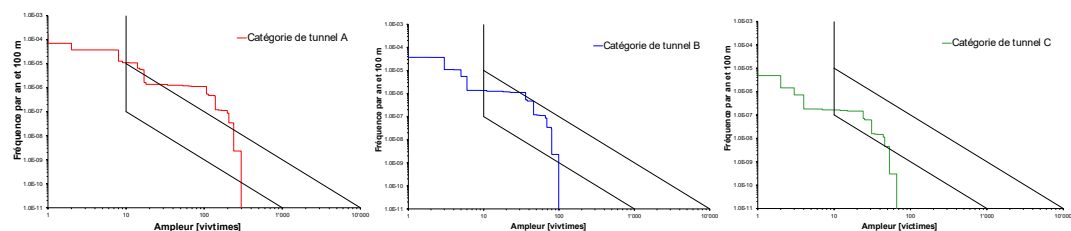


Fig. 3.2 Courbes cumulatives résultantes pour les catégories de tunnel A, B et C.

Les risques restent également dans le domaine de l'inacceptable pour la restriction des marchandises dangereuses susceptibles de provoquer une explosion très importante (catégorie de tunnel B). Les risques de catégorie C se situent dans une zone intermédiaire et en accord avec l'autorité d'exécution, le tunnel sera affecté à cette catégorie (en d'autres termes, l'accès au tunnel sera restreint pour les marchandises dangereuses susceptibles de provoquer une explosion très importante, une explosion importante ou une fuite importante de matières toxiques).

Si le classement en catégorie B comme en catégorie C ne s'avère pas suffisant pour réduire les risques à des proportions supportables, les catégories D ou E sont définies selon la procédure suivante :

1. Le tunnel est, de manière générale, affecté à la catégorie D.
2. Il s'agit de vérifier, sur la base du schéma ci-dessous, si une restriction plus grande (catégorie de tunnel E) est nécessaire :
3. Si, outre les critères mentionnés, il existe des indications supplémentaires fondées prouvant qu'une restriction plus grande est nécessaire, le tunnel peut être affecté à la catégorie E (cf. fig. 3.3).

Lors de la définition des restrictions du transport de matières dangereuses, les consignes d'application pratique (chapitre 4) doivent être respectées.

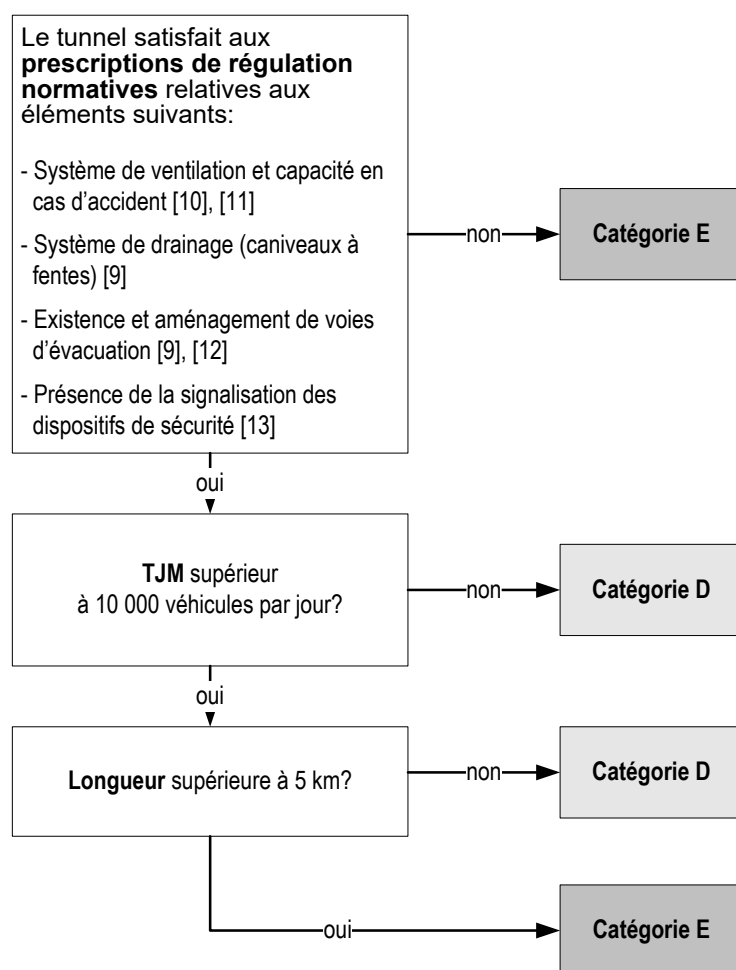


Fig. 3.3 Schéma décisionnel pour la différenciation entre les catégories D et E.

3.5.4 Itinéraires de contournement

Si des restrictions de transport des marchandises dangereuses sont prévues pour un tunnel, les autorités doivent vérifier si les prescriptions de l'OPAM sont respectées en présence d'un surcroît de trafic de marchandises sur l'itinéraire de contournement ou s'il existe une modification normative au sens de l'OPAM.

4 Consignes de mise en œuvre pratique

4.1 Autres facteurs d'influence pour la restriction du transport des marchandises dangereuses

La procédure décrite dans le présent document tient principalement compte des caractéristiques de sécurité relatives à l'aménagement technique et constructif, à l'équipement ainsi qu'aux conditions environnementales et de trafic du tunnel. Cependant, d'autres critères peuvent influencer la décision de restreindre le transport des marchandises dangereuses :

- Successions de tunnels : Si un tronçon comporte plusieurs tunnels sans accès ni sortie intermédiaires, une harmonisation des éventuelles restrictions de transit de marchandises dangereuses par un tunnel spécifique avec celles d'autres tunnels s'avère indispensable ;
- S'il existe déjà certaines restrictions pour des tronçons routiers bien précis – du fait p. ex. de mesures de protection des cours d'eau – ces dispositions doivent être respectées lorsque le tunnel à l'étude se trouve dans le tronçon concerné ;
- Autres facteurs : d'autres facteurs, qui ne relèvent pas directement de la sécurité, peuvent être intégrés lors de la définition des restrictions (tels que l'importance de la voie de circulation). Toute décision éventuelle doit être justifiée et argumentée de manière appropriée.

4.2 Signalisation de restriction du transport des marchandises dangereuses

Si, sur évaluation des risques et/ou d'éventuels autres critères, des restrictions de transport de marchandises sont fixées pour un tunnel, ce dernier doit être doté de panneaux de signalisation correspondant à sa catégorie selon l'ADR et l'itinéraire de contournement fléché. Les exigences spécifiques de mise en œuvre sont consignées dans les prescriptions de régulation [7].

5 Application du modèle suisse OCDE/AIPCR

5.1 Introduction

Le modèle standard OCDE/AIPCR

Le modèle standard OCDE/AIPCR est un modèle informatique d'analyses quantitatives du risque, disponible dans le commerce. Il a été développé à l'échelle européenne dans le cadre d'une mission de recherche de l'OCDE⁸ et de l'AIPCR⁹ et dans des projets de suivi [21]. Il s'est depuis bien implanté dans différents pays européens. Ce logiciel permet d'évaluer les risques inhérents aux tunnels routiers et aux tronçons ouverts, survenant en raison de la fuite de matières dangereuses après un accident ou un incendie.

Pour des remarques plus détaillées sur le modèle standard OCDE/AIPCR, il convient de se reporter au chapitre 9 du volet B du présent document ou au manuel de l'utilisateur [Transport of Dangerous Goods through road tunnels: Quantitative Risk Assessment Model \(v. 4.04\) User's Guide](#) [21]. Le modèle peut être commandé sur le site Internet de l'AIPCR à l'adresse <http://publications.piarc.org/en/part6/qra-model.htm>.

Le modèle suisse OCDE/AIPCR

Des adaptations spécifiques du modèle standard ont été aménagées pour sa mise en œuvre dans la procédure adoptée. D'une part, des paramètres du modèle spécifiques aux pays ont été adaptés aux conditions de la Suisse (p. ex. taux d'accidents, parts de marchandises dangereuses) et, d'autre part, le modèle a été élaboré sur la base d'expériences et de connaissances engrangées dans différents domaines (p. ex. modèle d'évacuation).

La version adaptée "**modèle suisse QRA-CH**" est appliquée aux étapes n° 1 et 2 de la procédure. Pour l'application à l'étape n° 1, le modèle d'estimation approximative des risques a été simplifié ("**QRA-CH simplifié**"). Une interface de saisie a été conçue pour l'enregistrement des données dans le QRA-CH à l'étape n° 2. La fig. 5.1 offre un aperçu des versions du modèle et de leur utilisation lors de la procédure.

Des informations complémentaires concernant l'évolution du QRA-CH figurent au volet B du présent document.

5.2 Référence

Il est possible d'acquérir le modèle de calcul "modèle suisse OCDE/AIPCR" (version CH 4.04) pour une utilisation dans le cadre de la présente procédure sur le site Internet de l'OFROU (<http://www.ofrou.admin.ch>), à la rubrique "Standards pour les routes nationales" → "Documentation" → "Tunnels et géotechnique" avec la [documentation OFROU 84002 Transport de Merchhandises danereuses dans les Tunnels routiers](#).

⁸ Organisation for Economic Cooperation and Development (Organisation de Coopération et de Développement Économiques)

⁹ Association mondiale de la route

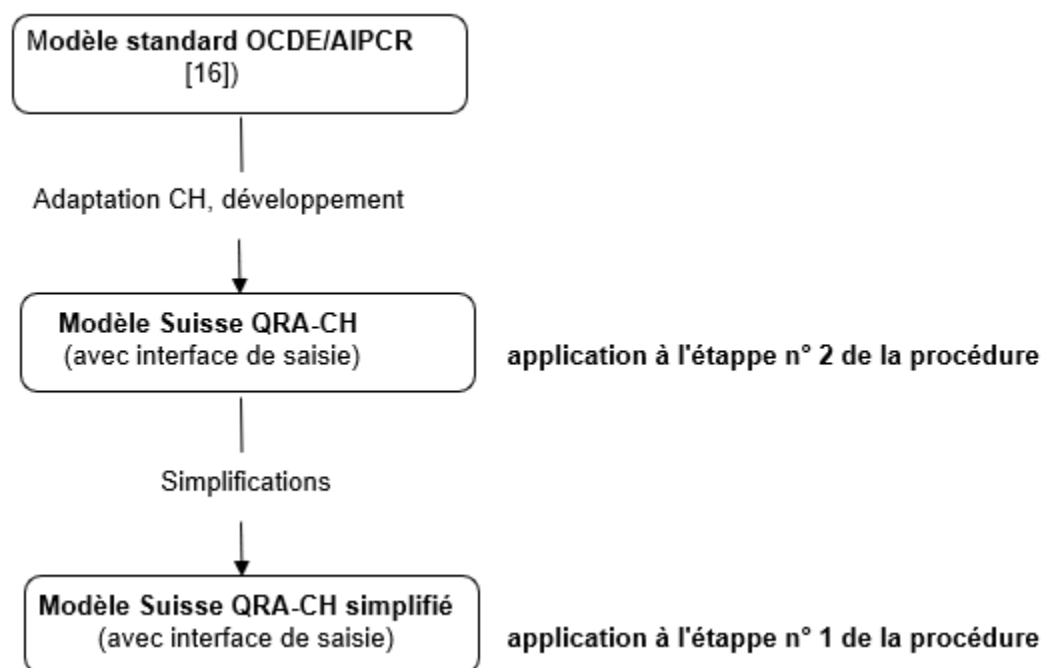


Fig. 5.1 Aperçu des versions du modèle et utilisation dans le procédé

5.3 Installation

L'installation du modèle suisse OCDE/AIPCR – le modèle QRA-CH - est réalisée à l'aide d'un fichier exécutable "qram_dg_addendum-404_vers_410CH" qui doit être lancé par l'utilisateur, lui pose des questions sous forme de boîte de dialogue et l'informe sur la progression de l'installation en cours.

Une notice d'installation au format .pdf est à la disposition de l'utilisateur pour l'assister et le guider au cours de chacune des étapes (cf. Annexe I).

Le modèle Suisse est un complément au modèle standard OCDE/AIPCR et ce dernier doit donc être impérativement disponible et fonctionnel au préalable (version AIPCR 4.04).

Il est possible (mais non obligatoire) de dupliquer l'ensemble du répertoire dans lequel est installé le modèle standard OCDE/AIPCR et réaliser l'installation dans la copie, afin de garder une version du modèle standard OCDE/AIPCR sans modification. Ceci est expliqué dans la notice d'installation.

A l'issue de l'installation de la version Suisse, l'exécutable réalise un test pour vérifier que l'installation est correcte. Il tente d'ouvrir un fichier qu'il n'a pas installé, mais qui, parce qu'il fait partie du modèle standard OCDE/AIPCR, doit cependant être disponible. Ce fichier fait appel à une bibliothèque de fonction indispensable au QRA-CH. Une ouverture correcte de ce fichier et l'accès à la bibliothèque de fonctions sont gages d'installation réussie. Tout cela est expliqué dans la notice d'installation et dans le fichier 'Readme' dont l'affichage à l'écran clôt l'installation.

Le modèle suisse QRA-CH se trouve in fine dans le répertoire du modèle standard OCDE/AIPCR retenu pour réaliser l'installation.

Pour de plus amples informations, se reporter à l'annexe I.

5.4 Matériel et logiciel requis

Le logiciel a été développé pour la version 2010 et ultérieure en 32 ou 64 bits du logiciel MS-Excel (idéalement 2016 64 bits).

Pour fonctionner, le modèle suisse (QRA-CH) a les mêmes exigences que le modèle standard OCDE/AIPCR. Ainsi, dès lors qu'une machine et un environnement système permettent au modèle standard OCDE/AIPCR de fonctionner, ils conviendront pour le modèle QRA-CH.

La version 4.04 du logiciel QRA CH a été développée pour être compatible avec les versions 32 et 64 bits de :

- Ms-Windows 7
- Ms-Windows 8
- Ms-Windows 8.1
- Ms-Windows 10

La version la plus récente de MS-Windows avec laquelle la compatibilité a été testée intégralement est W10 Professional Version 1709 / 16299.125. Des tests complémentaires de compatibilité ont également été réalisés sur Windows 11 et ceux-ci ont montré que le logiciel fonctionnait également sur cet environnement de travail.

La version 4.04 du logiciel QRA CH est compatible avec les versions 32 et 64 bits de :

- Ms-Office 2007
- Ms-Office 2010
- Ms-Office 2013
- Ms-Office 2016

La version la plus récente de MS-Office avec laquelle la compatibilité a été testée est Ms-Office 2016 Version 1705 build 8201.2193

La version la plus récente inclut :

- Excel 2016 MSO (16.0.8201.202) 64 bits
- VBA 7.1.1068 Form3: 16.0.8201.202

5.5 Utilisation à l'étape n°1

Pour utiliser le **modèle suisse OCDE/AIPCR simplifié** à l'étape 1, le calcul doit être effectué à l'aide de l'interface de saisie "CH Interface saisie données étape 1". Dans l'interface, saisir les données dans les champs correspondants ou les sélectionner au moyen des menus de sélection.

Le tableau suivant livre un aperçu des paramètres de saisie :

Paramètres	Valeurs	Remarques
Données générales		
Type de tunnel [-]	<ul style="list-style-type: none"> - Monotube bidirectionnel - Bitubes unidirectionnel - Monotube unidirectionnel 	<ul style="list-style-type: none"> un tube à trafic dans les deux sens deux tubes à trafic unidirectionnel dans chacun d'eux un tube à trafic unidirectionnel
Nombre de voies par sens [-]		Pour tunnel monotube : nombre de voies par sens de circulation Pour tunnel bitubes : nombre de voies par tube
Longueur par tube [m]		Pour un tunnel monotube :

Paramètres	Valeurs		Remarques
			indiquer la longueur du tube Pour un tunnel bitubes, indiquer la longueur moyenne
Système de drainage	[-]	- Caniveau à fente continue - Avaloirs	
Pente longitudinale moyenne	[%]		Pente longitudinale moyenne : - Déclivité entre les accès divisée par la longueur du tunnel ou - Moyenne pondérée (p. ex. +1 % sur 500 m et 0 % sur 500 m = 0,5 % pente moyenne)
Nombre d'issues de secours par tube	[-]		
Ventilation			
Type de ventilation utilisée en cas d'incendie pour la sauvegarde des usagers	[-]	- Naturelle - Longitudinale pure - Longitudinale avec extraction massive - Avec aspiration	Aucune ventilation mécanique Souffler toutes les fumées dans le sens de la circulation Souffler toutes les fumées dans le sens de la circulation et aspirer les fumées ponctuellement en aval de l'incendie Aspirer la fumée dans un canton de ventilation
Conception de la ventilation	[-]	- Ancienne - Récente	Tunnel ancien non rénové (ne satisfait pas aux critères des normes actuellement en vigueur) Tunnel neuf ou rénové (satisfait aux critères des normes actuellement en vigueur)
Exploitation			
Niveau de surveillance	[-]	- Pas de surveillance - Surveillance humaine de jour - Surveillance humaine 24h/ 24	Surveillance = intervention du personnel de surveillance possible
Détection automatique d'incident	[-]	Oui/non	Existe-t-il un système d'analyse vidéo pour le déclenchement automatique de l'alarme en cas d'incidents inhabituels dans le tunnel?
Détection d'incendie	[-]	Oui/non	Existe-il un système de détection incendie dans le tunnel (déectant une élévation de température)?
Barrière ou système de signal lumineux aux entrées	[-]	Oui/non	Existe-il des barrières ou un système de signalisation aux têtes de tunnel activées en cas d'incendie ?
Trafic			
Trafic journalier moyen	[véh./j]		Nombre moyen de véhicules par jour dans le tunnel : - Total (2 sens confondus) dans les tunnels bitubes ou monotubes bidirectionnels - Dans le tube concerné pour les tunnels monotube unidirectionnels
Si disponible : Part du trafic poids lourd dans le TJM	[%]		Si le champ n'est pas renseigné, valeur par défaut = 6%

Paramètres	Valeurs		Remarques
Taux d'accidents	[accidents / véh.-km]	Par défaut	Le taux par défaut est déterminé selon le caractère unidirectionnel ou bidirectionnel du tunnel
		- Spécifique	Le taux spécifique peut être choisie librement
Environnement			
Données sur l'environnement	[-]	- Rural	Densité de population aux environs du tunnel
		- Urbain	

L'annexe II comporte des indications détaillées concernant les paramètres de saisie de l'étape n° 1.

Le calcul s'effectue à partir de l'onglet '10_Effectuer_le_calcul_du_RI'

Il est lancé en cliquant sur le bouton "lancer le calcul de RI (Risque Intrinsèque)" situé en cellule D10.

Un fichier Excel avec les données de saisie est ensuite créé grâce au modèle dans le répertoire "Savings\". Ce fichier porte le nom du cas mentionné en cellule E4. Si, par exemple la cellule E4 contient "nomdutunnel", le fichier de données "nomdutunnel.xlsm" sera créé dans "Savings\".

Si, selon l'invitation qui s'affiche à l'écran, l'utilisateur décide de poursuivre les calculs après la création du fichier de données, le fichier de résultat "nomdutunnel_11.xlsm" sera créé dans le répertoire "Savings\nomdutunnel\". Lorsque l'utilisateur ouvre ce fichier, l'affichage initial se fait sur l'onglet "FnCurve_cat_ABCDE_100m".

5.6 Utilisation à l'étape n°2

Le QRA-CH est utilisé de la même manière que le modèle standard OCDE/AIPCR (DG QRAM) dans la version 4.04¹⁰. [Les manuels du modèle](#) [21] livrent des indications détaillées sur le fonctionnement et l'utilisation du modèle. L'interface de saisie "CH Interface saisie données étape 2" facilite la saisie des données. Enfin, l'annexe III fournit des indications détaillées sur les paramètres de l'interface de saisie de l'étape n° 2.

5.7 Calcul pour un seul tube

Dans le cas d'un tunnel bitube dont les caractéristiques de chaque tube sont significativement différentes (longueur, pente, trafic, part du trafic poids lourd, équipements, taux d'accident ...), il est recommandé de réaliser un calcul du risque pour chaque tube séparément afin de s'assurer que les niveaux de risques soient acceptables pour chacun. Pour ce faire, chaque tube est considéré comme un tunnel monotube unidirectionnel et le logiciel calculera, sur la base de ses caractéristiques propres, le risque pour celui-ci, indépendamment des caractéristiques de l'autre tube.

Les mesures à mettre en place pourront ainsi être particularisées pour chaque tube (par exemple, restreindre le trafic TMD dans un sens uniquement).

Cette recommandation s'applique aussi bien aux calculs de l'étape 1 qu'aux calculs de l'étape 2.

¹⁰ Les adaptations introduites pour le modèle suisse ne sont pas visibles par l'utilisateur. Par rapport au modèle standard, aucune modification en termes d'utilisation n'a été constatée.

VOLET B : BASES MÉTHODIQUES

Seulement en allemand

6 Einleitung

6.1 Hintergrund

Das Übereinkommen über die Beförderung gefährlicher Güter auf der Strasse (ADR) regelt auf europäischer Ebene die Grundsätze zum Transport gefährlicher Güter auf Strasse und bezeichnet die zugehörigen Vorschriften. Die Umsetzung erfolgt in der Schweiz mittels der Verordnung über die Beförderung gefährlicher Güter auf der Strasse (SDR), welche das ADR als integrierenden Bestandteil beinhaltet.

In der Fassung des ADR von 2007 wurden neu harmonisierte Vorschriften für die Durchfahrtsbeschränkungen von Gefahrguttransporten durch Tunnel verlangt. Ziel ist eine europaweit einheitliche Kennzeichnung etwaiger Beschränkung von Gefahrguttransporten auf Tunnelstrecken. Ob bzw. wann eine Transportbeschränkung erforderlich ist, ist jedoch nicht Gegenstand der Forderungen von ADR 2007. In der Schweiz gelten hierzu u.a. die Vorgaben der Verordnung über den Schutz vor Störfällen (Störfallverordnung, StFV).

Im Rahmen des Projektes hat das ASTRA ein Vorgehen und eine zugehörige Methodik entwickelt, um eine einheitliche Umsetzung der Forderung gemäss ADR 2007 zu ermöglichen und dabei auch die Anforderungen der StFV zu berücksichtigen. Der vorliegende Teil B der Dokumentation erläutert diese Methodik, vertieft Hintergründe des entwickelten Vorgehens und die spezifischen Grundlagen zur Analyse und Bewertung der Gefahrgutrisiken in Tunneln sowie die zugehörigen Modelle.

6.2 Rechtlicher Rahmen

6.2.1 Grundlagen

Übereinkommen über die Beförderung gefährlicher Güter auf der Strasse (ADR)

Das ADR unterteilt die Gefahrgüter in die Klassen 1 bis 9 (Tab. 6.1). Dabei wird jedem Gefahrgut eine UN-Nummer zugeordnet mit jeweiligen Vorschriften zu dessen Verpackung, Mengenbegrenzung, Regelung zur Beförderungsdurchführung, des zu verwendenden Fahrzeugs und gegebenenfalls anzuwendende Sondervorschriften.

Tab. 6.1 Gefahrgutklassen nach ADR

Klasse	Beschreibung
1	Explosive Stoffe und Gegenstände mit Explosivstoffen
2	Gase
3	Entzündbare flüssige Stoffe
4.1	Entzündbare feste Stoffe, selbstzersetzende Stoffe und desensibilisierte explosive Stoffe
4.2	Selbstentzündliche Stoffe
4.3	Stoffe, die in Berührung mit Wasser entzündbarer Gase entwickeln
5.1	Entzündend (oxidierend) wirkende Stoffe
5.2	Organische Peroxide
6.1	Giftige Stoffe
6.2	Ansteckungsgefährliche Stoffe
7	Radioaktive Stoffe
8	Ätzende Stoffe
9	Verschiedene gefährliche Stoffe und Gegenstände

In der Fassung des ADR von 2007 werden neu harmonisierte Vorschriften für Durchfahrtsbeschränkungen von Gefahrguttransporten durch Tunnel verlangt. Sind für einen Tunnel

Beschränkungen vorgesehen, so sind diese zwingend entsprechend den in Tab. 6.2 aufgeführten Tunnelkategorien umzusetzen.

Tab. 6.2 Tunnelkategorien nach ADR

Kategorie	Beschränkung
A	keine Beschränkung für gefährliche Güter (UN 2919 und 3331, siehe ADR, Abs. 8.6.3.1)
B	Beschränkungen für gefährliche Güter, die zu einer <ul style="list-style-type: none"> • sehr grossen Explosion führen können
C	Beschränkungen für gefährliche Güter, die zu einer/einem <ul style="list-style-type: none"> • sehr grossen Explosion ("B"-Güter) • grossen Explosion • umfangreichen Freiwerden giftiger Stoffe führen können
D	Beschränkungen für gefährliche Güter, die zu einer/einem <ul style="list-style-type: none"> • sehr grossen Explosion ("B"-Güter) • grossen Explosion ("C"-Güter) • umfangreichen Freiwerden giftiger Stoff ("C"-Güter) • grossen Brand führen können
E	Beschränkungen für alle gefährlichen Güter ausser UN-Nummern 2919, 3291, 3331, 3359 und 3373

Für die transportierten Güter gelten folgende Beschränkungscode (Tunnelbeschränkungscode für die gesamte Ladung):

Tab. 6.3 Tunnelbeschränkungscode nach ADR

Code	Beschränkung
B	Durchfahrt verboten durch Tunnel der Kategorien B, C, D und E
B1000C	Beförderungen, bei denen die Nettoexplosivstoffmasse je Beförderungseinheit 1000 kg überschreitet: Durchfahrt verboten durch Tunnel der Kategorien B, C, D und E; 1000 kg nicht überschreitet: Durchfahrt verboten durch Tunnel der Kategorien C, D und E.
B/D	Beförderungen in Tanks: Durchfahrt verboten durch Tunnel der Kategorien B, C, D und E. Sonstige Beförderungen: Durchfahrt verboten durch Tunnel der Kategorien D und E.
B/E	Beförderungen in Tanks: Durchfahrt verboten durch Tunnel der Kategorien B, C, D und E. Sonstige Beförderungen: Durchfahrt verboten durch Tunnel der Kategorie E.
C	Durchfahrt verboten durch Tunnel der Kategorien C, D und E.
C5000D	Beförderungen, bei denen die Nettoexplosivstoffmasse je Beförderungseinheit 5000 kg überschreitet: Durchfahrt verboten durch Tunnel der Kategorien C, D und E; 5000 kg nicht überschreitet: Durchfahrt verboten durch Tunnel der Kategorien D und E.
C/D	Beförderungen in Tanks: Durchfahrt verboten durch Tunnel der Kategorien C, D und E. Sonstige Beförderungen: Durchfahrt verboten durch Tunnel der Kategorien D und E.
C/E	Beförderungen in Tanks: Durchfahrt verboten durch Tunnel der Kategorien C, D und E. Sonstige Beförderungen: Durchfahrt verboten durch Tunnel der Kategorie E.
D	Durchfahrt verboten durch Tunnel der Kategorien D und E.
D/E	Beförderungen in loser Schüttung oder in Tanks: Durchfahrt verboten durch Tunnel der Kategorien D und E. Sonstige Beförderungen: Durchfahrt verboten durch Tunnel der Kategorie E.
E	Durchfahrt verboten durch Tunnel der Kategorie E.
–	Durchfahrt durch alle Tunnel gestattet (für die UN-Nummern 2919 und 3331 siehe auch Unterabschnitt 8.6.3.1)

Für die Durchfahrt durch einen Tunnel ist der jeweils restriktivste Code für einen Stoff der gesamten Ladung massgeblich. Die Tunnel können die Beschränkungscode B, B1000C, B/D, B/E, C, C5000D, C/D, C/E, D, D/E, E haben. Die zusammengesetzten Codes regeln die Beschränkung in Abhängigkeit von der Masse bestimmter Güter oder der Beförderungsart (vgl. auch Abschnitt 8.6.4 ADR).

Ist dem Gefahrgut kein Tunnelbeschränkungscode zugeordnet, ist die Durchfahrt durch alle Tunnel erlaubt. Sind umgekehrt keine Beschränkungen für einen Tunnel vorgesehen (Tunnelkategorie A), wird keine besondere Beschilderung angeordnet.

Verordnung über die Beförderung gefährlicher Güter auf der Strasse (SDR)

Die Umsetzung des ADR erfolgt in der Schweiz mittels der Verordnung über die Beförderung gefährlicher Güter auf der Strasse (SDR), welche das ADR als integrierenden Bestandteil beinhaltet.

SDR enthält in Anhang 2 eine Liste mit 15 National- und Kantonsstrassentunnels, für welche der Transport gefährlicher Güter eingeschränkt ist. Im Rahmen der Revision SDR 2010 wurden die 15 Tunnel der Kategorie E nach ADR 2007 zugeordnet. Bis dahin war im Anhang 2 eine umfangreiche Liste für die jeweilige maximale Beförderungsmenge mit bzw. ohne besondere Transportbewilligung für die 15 Tunnel aufgeführt. Mit dem Inkrafttreten der neuen ADR-Bestimmungen entfällt diese Regelung.

Verordnung über den Schutz vor Störfällen (Störfallverordnung StFV)

Die StFV [1] bezweckt gemäss Art. 1 den Schutz der Bevölkerung und der Umwelt vor schweren Schädigungen durch Störfälle, welche beim Betrieb von Anlagen entstehen. Unter Anlagen fallen u.a. Verkehrswege, auf denen gefährliche Güter transportiert werden.

Die StFV legt zu diesem Zweck ein Kontroll- und Beurteilungsverfahren zum Umgang mit Störfallrisiken fest (Abb. 6.1).

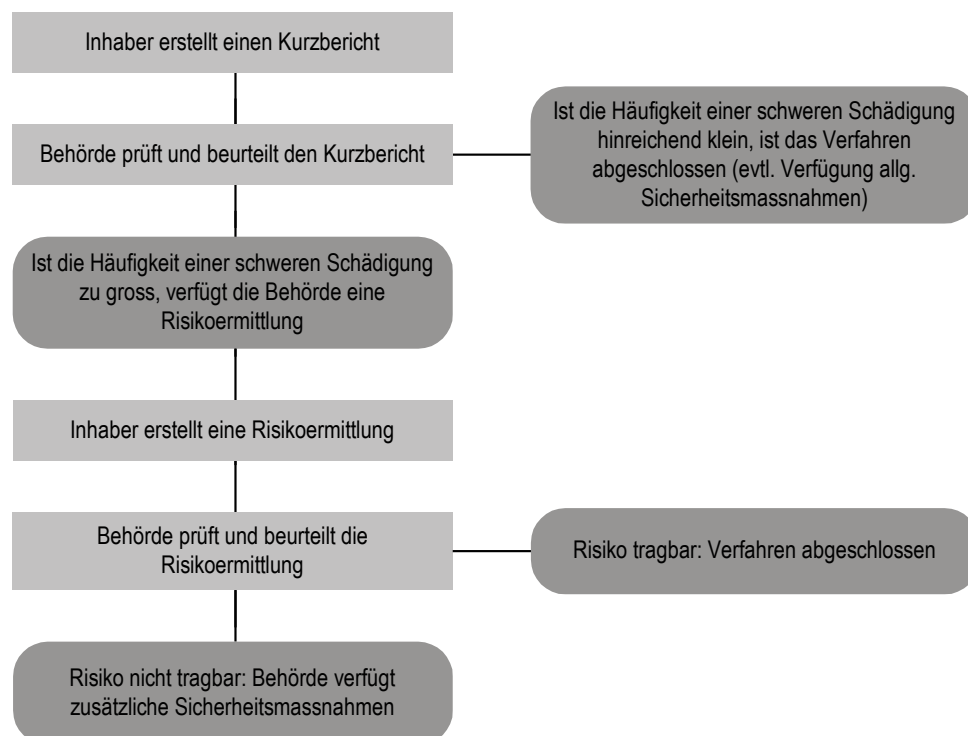


Abb. 6.1 Kontroll- und Beurteilungsverfahren StFV für Verkehrswege.

Für die beteiligten Stellen resultieren aus dem Verfahren die nachfolgenden Pflichten:

Der *Inhaber* eines Verkehrsweges hat im Rahmen der Störfallvorsorge die Pflicht, die vorsorglichen Sicherheitsmassnahmen gemäss Art. 3 StFV in Eigenverantwortung zu treffen. Des Weiteren hat er die Risiken aus dem Gefahrguttransport abzuschätzen.

Das Verfahren sieht dazu ein stufenweises Vorgehen in zwei Schritten vor:

- Erstellen eines Kurzberichts und gegebenenfalls
- Erstellen einer detaillierten Risikoermittlung

Die für einen Verkehrsweg zuständige *Vollzugsbehörde* hat die Aufgabe der Kontrolle der Eigenverantwortung des Inhabers. Sie prüft und beurteilt die durch den Inhaber vorgenommene Abschätzung der Risiken und verfügt allfällige weitere Untersuchungen (Risikoermittlung) oder zusätzliche Sicherheitsmassnahmen.

Richtlinie 2004/54/EG

In der Richtlinie 2004/54/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 29. April 2004 über die Mindestanforderungen an die Sicherheit von Tunneln im transeuropäischen Strassennetz wird gefordert, dass vor der Festlegung oder Änderung von Vorschriften und Anforderungen für den Gefahrguttransport durch einen Tunnel ist eine Risikoanalyse gemäss Artikel 13 der Richtlinie durchzuführen ist.

Im Rahmen der bilateralen Abkommen zwischen der Schweiz und der Europäischen Kommission müssen die Bestimmungen der Richtlinie 2004/54/EG entsprechend auch durch die Schweiz übernommen werden.

Signalisationsverordnung (SSV)

Die Signalisation für Gefahrguttransporte ist im umfassenden Sinn Sache der Vertragsstaaten des ADR und wird im Übereinkommen von 1968 über Strassenverkehrszeichen bzw. in der Signalisationsverordnung SSV geregelt.

6.2.2 Umsetzung der rechtlichen Anforderungen

Aus Blickwinkel der Umsetzung stellen die Anforderungen für Tunnel gemäss ADR 2007 keine grundsätzlich neue Situation dar. Die Anforderungen gemäss ADR legen nicht fest, dass eine Risikobetrachtung für spezifische Tunnel oder gar für alle Tunnel eines Strassennetzes vorzunehmen ist. Vielmehr verlangt ADR 2007, dass im Falle einer Beschränkung von Durchfahrten von Gefahrguttransporten durch einen Tunnel, die Art der Restriktion gemäss der vorgegebenen Kategorisierung zu erfolgen hat und der Entscheid (auch) auf risikobasierten Überlegungen erfolgen soll.

Mit der seit 1991 in Kraft gesetzten StFV ist die Pflicht zur Analyse und Beurteilung der Risiken aus dem Transport gefährlicher Güter auf Durchgangstrassen – zu denen auch die Nationalstrassen zählen – bereits seit längerem vorgegeben. Hierzu bestehen die spezifischen Verfahrensschritte, Verantwortlichkeiten und Grundlagen zur Beurteilung der Risiken. Zeigt die Beurteilung im Rahmen des Verfahrens, dass zusätzliche Sicherheitsmassnahmen (gemäss Art. 8 der StFV) erforderlich sind, so hat der Inhaber der Strasse bzw. im vorliegenden Fall des Tunnels die entsprechenden Massnahmen zur Risikominderung vorzusehen. Dies können sowohl baulich/technische als auch organisatorische Massnahmen sein. Als eine der möglichen organisatorischen Massnahmen besteht grundsätzlich auch die Möglichkeit Restriktionen für Tunneldurchfahrten vorzusehen. Aufgrund der Neuerungen gemäss SDR/ADR sind in diesem Fall seit 01.01.2010 nun jedoch zwingend die entsprechenden Kategorien zu berücksichtigen.

Wie diese Darlegungen zeigen, lassen sich die neuen Anforderungen nach SDR aber in das bereits bestehende und bekannte Verfahren der StFV integrieren. Eine schematische Darstellung dieses Sachverhalts ist in Abb. 6.2 ersichtlich.

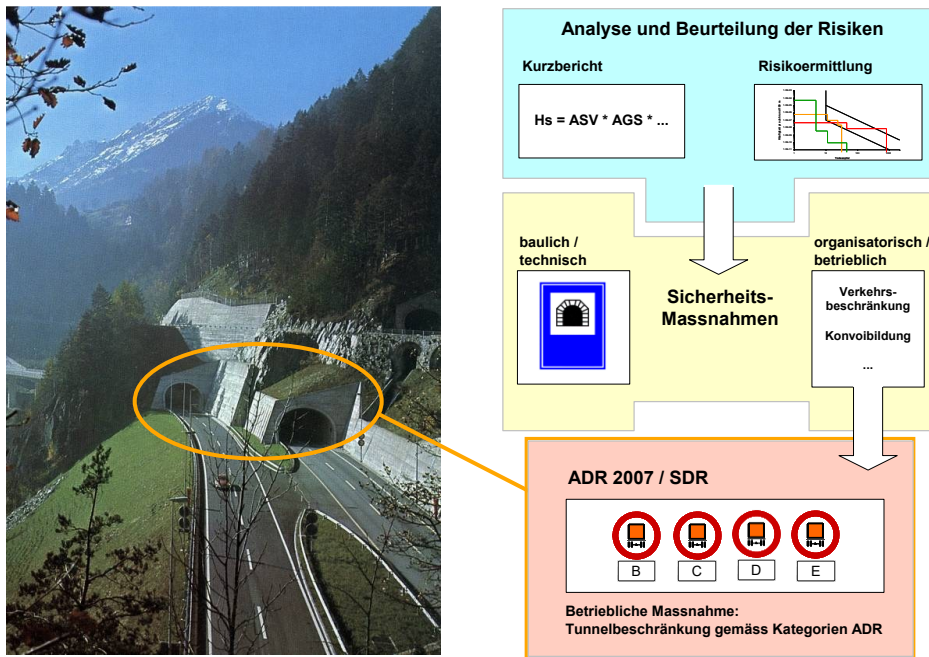


Abb. 6.2 Zusammenhang StFV und Anforderungen SDR (schematisch).

6.3 Zielsetzungen und Anforderungen an das Vorgehen

6.3.1 Grundsätze und Zielsetzungen

Ziel des Projekts "ADR 2007 Tunnel" des ASTRA war die Erarbeitung einer spezifischen, risikobasierten Methodik, um eine systematische Entscheidungsgrundlage für die Festlegung der Kategorisierung von Strassentunneln unter Einbezug der Belange der StFV zu schaffen.

Im Rahmen der Projektdefinition wurden folgende Anforderungen an die zu entwickelnde Methodik definiert:

- Das zu entwickelnde Vorgehen ermöglicht die Kategorisierung der Tunnel gemäss ADR 2007.
- Es ist für alle Strassentunnel anwendbar.
- Es ermöglicht eine einheitliche Umsetzung durch die für die Umsetzung zuständigen Stellen.
- Das zu entwickelnde Vorgehen ist transparent und nachvollziehbar. Die Methodik basiert auf definierten Parametern und Kriterien, um die Entscheide (Kategorisierungen) gegenüber Dritten darlegen und begründen zu können.
- Es ist konform mit den Anforderungen und Abläufen der StFV.
- Tiefgang bzw. Aufwand sollen der Fragestellung angemessen sein.
- Das zu entwickelnde Vorgehen basiert soweit möglich auf vorhandenen bzw. mit vertretbarem Aufwand und innerhalb nützlicher Frist zu beschaffenden oder hinreichend gut abschätzbaren Daten.
- Es orientiert sich an gängigen risikobasierten Verfahren in anderen Bereichen bzw. im Ausland.

6.3.2 Übergeordnete Anforderungen an die Umsetzung

Um die Anforderungen zu erfüllen, wurde festgelegt, dass die Methodik als stufenweises Verfahren aufgebaut sein soll: Grundsätzlich sollen in einer Grobbeurteilung (1. Stufe) anhand eines pragmatischen Verfahrens diejenigen Tunnel ermittelt werden, für welche eine vertiefende Analyse (2. Stufe) angezeigt ist. Nachfolgend sind die Anforderungen an die beiden grundlegenden Stufen festgehalten:

Anforderungen an 1. Stufe des Verfahrens (Grobbeurteilung)

- Die Grobbeurteilung erlaubt die Ermittlung derjenigen Tunnel, für welche eine vertiefende Analyse angezeigt ist. Für alle übrigen Tunnel ist die Durchfahrt mit gefährlichen Gütern erlaubt (Kategorie A).
- Das intrinsische Risiko des Tunnels wird aufgrund möglichst pragmatischer Ansätze abgeschätzt.
- Bereits bestehende methodische Ansätze und Verfahren sollen soweit sinnvoll möglich berücksichtigt werden.

Anforderungen an 2. Stufe des Verfahrens (vertiefende Analyse)

- Die 2. Stufe erlaubt die Einteilung eines Tunnels in eine Kategorie gemäss SDR.
- Das Vorgehen basiert auf einer quantitativen Risikoanalyse.
- Das intrinsische Risiko des Tunnels wird mit Hilfe spezifischer Modelle ermittelt.
- Bereits bestehende methodische Ansätze und Verfahren werden soweit sinnvoll möglich berücksichtigt.
- Die 2. Stufe ermöglicht bei Bedarf zusätzlich die Berücksichtigung von Stausituationen in Tunneln (siehe Anhang VI).

6.3.3 Inhaltliche Anforderungen an die Umsetzung Stufen 1

Nachfolgend sind die massgeblichen Anforderungen an die der 1. Stufe des Verfahrens aufgeführt. Grundsätzlich soll das Verfahren auf einem quantitativen Ansatz zur Ermittlung der Risiken basieren.

Gefahrenanalyse

Die Risikobeurteilung soll somit das Spektrum an relevanten Gefahren aus dem Transport gefährlicher Güter für Tunnelstrecken abdecken. Es sind dies die drei Hauptgefahren

- Brand,
- Explosion und
- Freiwerden giftiger Gase oder flüchtiger, giftiger flüssiger Stoffe.

Szenarien und Leitstoffe

Aus der Gefahrenanalyse sind die massgeblichen Freisetzungsszenarien abzuleiten und in geeigneter Weise abzubilden. Die in der Methodik abzubildenden Szenarien sollen die drei massgeblichen – oben aufgeführten – Wirkungsarten hinreichend berücksichtigen. Eine weitergehende gesonderte Differenzierung hinsichtlich der Risiken ausgehend aus dem Transport einzelner Stoffe bzw. Stoffgruppen (Gliederung nach UN-Nummern) ist für die Zwecke der ersten Stufe des Verfahrens nicht weiter erforderlich.

Risikorelevante Einflussgrössen

Die Risikobeurteilung berücksichtigt die massgeblichen risikorelevanten Einflussgrössen. Für die Betrachtung des intrinsischen Risikos des Tunnels sind dies Parameter bezüglich der baulichen Ausgestaltung und der technischen Ausrüstung des Tunnels sowie Angaben zu Verkehr und Betrieb.

Schadenindikatoren und Systemabgrenzung

Die Risikobeurteilung berücksichtigt Personenschäden. Die Erfahrung mit Risikoanalysen für den Transport gefährlicher Güter durch Strassentunnel zeigt, dass Sach- und Umweltschäden im Vergleich zu den Personenschäden in der Regel weniger im Vordergrund stehen. Zudem zeigt die bisherige Praxis im In- und Ausland, dass bei entsprechenden quantitativen Analysen nahezu ausschliesslich Personenschäden untersucht werden. Die Personenschäden werden anhand des Indikators Todesopfern quantifiziert.

Risikobemessungsgrösse

Für die Bemessung der Risiken ist eine geeignete Risikobemessungsgrösse zu wählen (kollektive Risiken, H-A-Diagramm, Risikokenngrösse etc.). Die Wahl der Risikobemessungsgrösse richtet sich nach dem erforderlichen Tiefgang der Analyse und nach den für die Bewertung der Risiken verwendeten Kriterien der StFV [17].

Risikobeurteilung

Die Bewertungskriterien sind kompatibel mit der gewählten Risikobemessungsgrösse und lehnen sich an die Kriterien der StFV [17] an. Bei Anwendung der gewählten Kriterien dürfen sich keine Widersprüche zu den Vorgaben gemäss StFV ergeben.

Weitere Kriterien, die über die zur Risikoermittlung berücksichtigen Parameter hinausgehen, sind soweit sinnvoll bei der Risikobewertung in geeigneter Weise mit einzubeziehen. Es können dies Fragestellungen zu nicht direkt risikorelevanten Parametern (z. B. Bedeutung des Verkehrsweges) oder zur praktischen Umsetzung (Umgang mit Tunnelketten, mögliche betriebliche Massnahmen) betreffen. Die Berücksichtigung allfälliger weiterer Kriterien kann qualitativ oder quantitativ erfolgen. In jedem Fall aber ist sicherzustellen, dass eine systematische und einheitliche Bewertung möglich ist.

6.3.4 Inhaltliche Anforderungen an die Umsetzung Stufe 2

Nachfolgend sind die massgeblichen Anforderungen an die Risikobeurteilung der 2. Stufe des Verfahrens aufgeführt.

Gefahrenanalyse

Die Risikobeurteilung deckt das Spektrum an relevanten Gefahren aus dem Transport gefährlicher Güter für Tunnelstrecken und offene Strecken ab. Es sind dies die drei Hauptgefahren Brand, Explosion und Freiwerden giftiger Gase oder flüchtiger, giftiger flüssiger Stoffe.

Szenarien und Leitstoffe

Für die Risikoermittlung sind aus der Gefahrenanalyse die massgeblichen Freisetzungsszenarien abzuleiten. Diese werden mittels repräsentativen Stoffen abgebildet. Die Szenarien, die Szenariengrössen und die entsprechenden Leitstoffe werden im Gegensatz zur ersten Stufe des Verfahrens soweit spezifiziert, dass sie eine Kategorisierung gemäss ADR 2007 ermöglichen.

Risikorelevante Einflussgrössen

Die Risikobeurteilung berücksichtigt die massgeblichen risikorelevanten Einflussgrössen. Es sind dies Parameter bezüglich der baulichen Ausgestaltung und der technischen Ausrüstung des Tunnels sowie bezüglich Verkehr (Art, Volumen, Stausituationen) und Betrieb.

Das Verfahren basiert auf mit vertretbarem Aufwand und innerhalb nützlicher Frist zu beschaffenden oder hinreichend gut abschätzbaren Daten.

Schadenindikatoren und Systemabgrenzung

Die Risikobeurteilung berücksichtigt analog zur ersten Stufe des Verfahrens Personenschäden. Diese werden anhand des Indikators Todesopfern quantifiziert.

Risikobemessungsgrösse

Die Bemessung der Risiken erfolgt mittels H-A-Diagrammen. Diese erlauben eine differenzierte Betrachtung der Risiken und einen direkten Vergleich mit den Beurteilungskriterien gemäss StFV [17].

Risikobeurteilung

Die Bewertung der Risiken erfolgt gemäss den Beurteilungskriterien zur StFV [17]. Ferner sollen die Kriterien eine graduelle Abstufung des Handlungsbedarfs hinsichtlich der Kategorisierung der Tunnel ermöglichen. Hierzu ist ein entsprechender systematischer Ansatz aufzuzeigen (z.B. Einstufung Tunnel Kategorie B oder C).

Weitere Kriterien, die über die zur Risikoermittlung berücksichtigen Parameter hinausgehen, sind soweit sinnvoll bei der Risikobewertung in geeigneter Weise mit einzubeziehen. Die Berücksichtigung kann qualitativ oder quantitativ erfolgen. Es ist sicherzustellen, dass eine systematische und einheitliche Bewertung möglich ist.

Unter die weiteren Kriterien fallen insbesondere die betrieblichen Massnahmen. Die verschiedenen Massnahmenarten und deren Einfluss auf die Kategorisierung sind aufzuzeigen. Unter anderem könnten die betrieblichen Massnahmen der Erteilung von Sonderbewilligungen dienen.

6.4 Abgrenzung

In Anbetracht der Distanz von Gefahrgutwirkungen kann davon ausgegangen werden, dass für Tunnel mit einer Länge unter 300 m die Unterschiede in den Ausmassen der Schadenwirkungen im Vergleich zu offenen Strecken klein sind. Es werden deshalb nur Tunnel ab einer Länge von 300 m berücksichtigt. Dies entspricht ebenfalls den Vorgaben der SIA-Norm [SIA 197/2], welche für Tunnel ab einer Länge von 300 m eine Sicherheitsausrüstung fordert.

Tunnel mit einer Länge von weniger als 300 m können im Sinne der vorliegenden Fragestellung vereinfachend als offene Strecken betrachtet werden. Voraussetzung ist die Erfüllung der massgeblichen Anforderungen aus Blickwinkel des Stands der Technik (Art. 3 gemäss StFV)

Galerien sind nicht Gegenstand des Vorgehens, da die verwendeten Modelle nur für die Untersuchung von Tunneln geeignet sind. I.d.R. kann davon ausgegangen werden, dass Gefahrgutwirkungen weniger ausgeprägt als in Strassentunneln und die Fluchtmöglichkeiten insgesamt tendenziell besser sind. Grundsätzliche methodische Überlegungen zur Abschätzung der Risiken können im Bedarfsfall (z.B. zur Ermittlung der Risiken im Rahmen des StFV Verfahrens) übernommen werden.

7 Risikobasierte Verfahren

7.1 Grundsätze risikobasierter Verfahren

Zur Risikoabschätzung ist grundsätzlich eine Vielzahl von Methoden möglich. Diese reichen von reinen Expertenrunden, bei denen ein Tunnel qualitativ bewertet wird, über andere qualitative und semiquantitative Verfahren bis hin zu rein quantitativen Verfahren. Diese werden alle in der Praxis je nach Mitgliedsstaat der EU und Verfahrensstufe angewandt.

Wegen der komplexen Zusammenhänge haben sich in der Praxis zur Ermittlung von zuverlässigen Ergebnissen quantitative Verfahren durchgesetzt. Sie erfordern eine Methodik, die eine Quantifizierung der Gefahren ermöglicht. Zur Quantifizierung der Risiken ist die Beantwortung folgender drei Basisfragen erforderlich:

- Was kann sich ereignen?
- Wie häufig kann ein relevantes Ereignis eintreten?
- Was sind die Auswirkungen?

Die Beantwortung dieser Fragen erfolgt mittels quantitativer Risikoanalysen, wodurch nachfolgend aufgeführte Arbeitsschritte notwendig werden:

- Ablaufmodellierung
- Häufigkeitsermittlung
- Schadensausmassermittlung
- Risikoermittlung
- Risikobewertung

Im Folgenden werden die einzelnen Arbeitsschritte kurz beschrieben.

Ablaufmodellierung

Ausgehend von einem auslösenden Ereignis (Initialereignis, Top Event) werden Ereignisabläufe mit Hilfe von so genannten Ereignisbäumen modelliert. Wesentliches Merkmal dieser Ereignisabläufe ist die transparente Darstellung über sämtliche mögliche Zwischenzustände bis hin zum jeweiligen Endzustand. Initialereignisse können beispielsweise die Freisetzung gefährlicher Güter oder das Abbrennen bzw. die Explosion von Gefahrgütern sein.

Häufigkeitsermittlung

Die zu erwartenden Häufigkeiten der Endzustände werden über folgenden Zusammenhang berechnet:

$$H_{e,i} = H_0 \cdot \prod P_i$$

$H_{e,i}$: Häufigkeit der Endzustände

H_0 : Eintrittshäufigkeit des Initialereignisses

P_i : Verzweigungswahrscheinlichkeiten P im Zweig i

Für diese Berechnung werden die Häufigkeiten des auslösenden Ereignisses und der Verzweigungswahrscheinlichkeiten der einzelnen Systemantworten benötigt. Diese werden z. B. für das Initialereignis aus empirischen Werten und für die Verzweigungswahrscheinlichkeiten mit Hilfe von statistischen Grundlagen, generischen Methoden (z. B. Fehlerbäumen) oder Annahmen bestimmt. Die Summe der Verzweigungswahrscheinlichkeiten in einem Verzweigungspunkt ist stets gleich eins.

Schadensausmassermittlung

Die Ermittlung von Schadensausmassen erfordert i. d. R. die Anwendung von Ausbreitungs- und Wirkungsmodellen. Je nach erforderlichem Detaillierungsgrad kommen dabei in der Praxis unterschiedliche Modelle zu Einsatz. Neben vergleichsweise einfachen Hilfsmitteln (z.B. Abschätzungen über Nomogramme, Abschätzungsformeln u. ä.) kommen auch komplexe Rechenmodelle mit hoher räumlicher und zeitlicher Auflösung zum Einsatz. So lassen sich beispielsweise mit Hilfe von CFD-Modellen die relevanten Grössen Druck, Temperatur, Geschwindigkeit und Konzentration raum- und zeitabhängig detailliert ermitteln. Durch eine Überlagerung mit Evakuierungs- und Fluchtmodellen sowie mit expositionsabhängigen Letalitäten kann so auf das jeweilige Schadensausmass geschlossen werden.

Risikoermittlung

Als Mass für das Gefährdungspotential dient das Risiko, welches sich aus der Verknüpfung der Eintrittshäufigkeiten der Endzustände mit dem jeweiligen Schadensausmass ergibt. Die quantitative Darstellung des Risikos kann als Punktwert (Schadenerwartungswert)

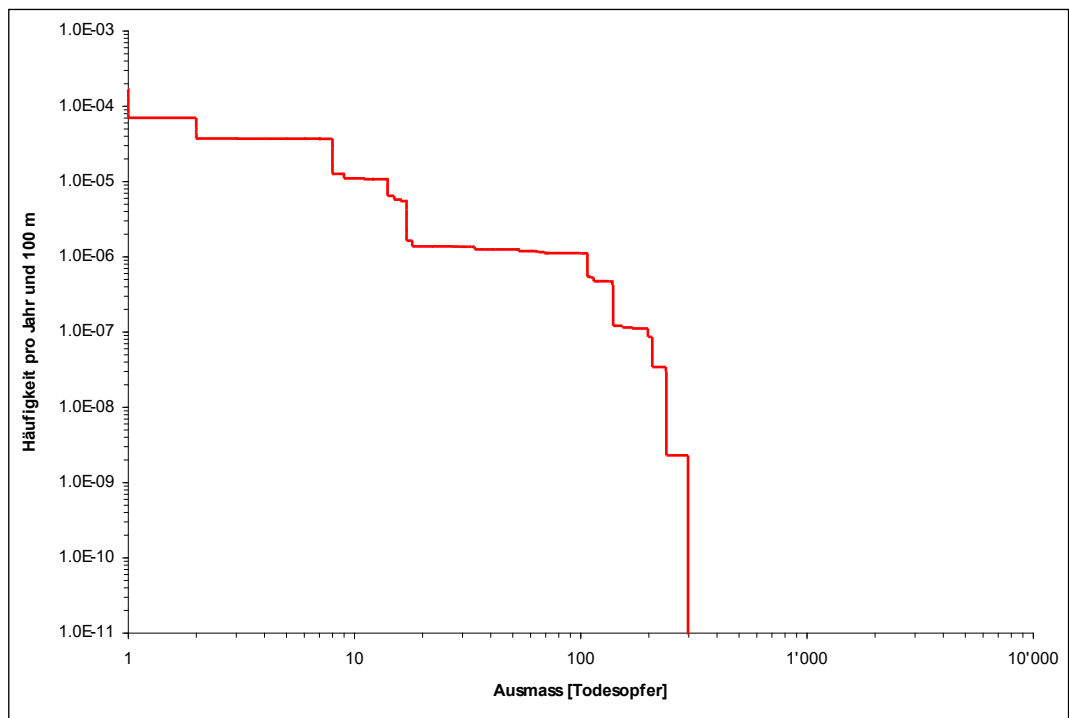
$$R = \sum_{i=1}^m (H_{ei} * A_{ei})$$

m: Anzahl der Endzustände im Ereignisbaum

$H_{e,i}$: Häufigkeit der Endzustände

$A_{e,i}$: Schadensausmass für jeweiligen Endzustand

oder über ein Summenhäufigkeitsdiagramm erfolgen (siehe Abb. 7.1).



Risikobeurteilung

Die Beurteilung von Risiken erfordert die Definition eines Vergleichsmassstabs¹¹. Ohne eine Festlegung der Akzeptabilität, lassen sich nur relative Vergleichsrechnungen durchführen. Beispielhaft sind nachfolgend die Akzeptabilitätskriterien der StFV [17] dargestellt.

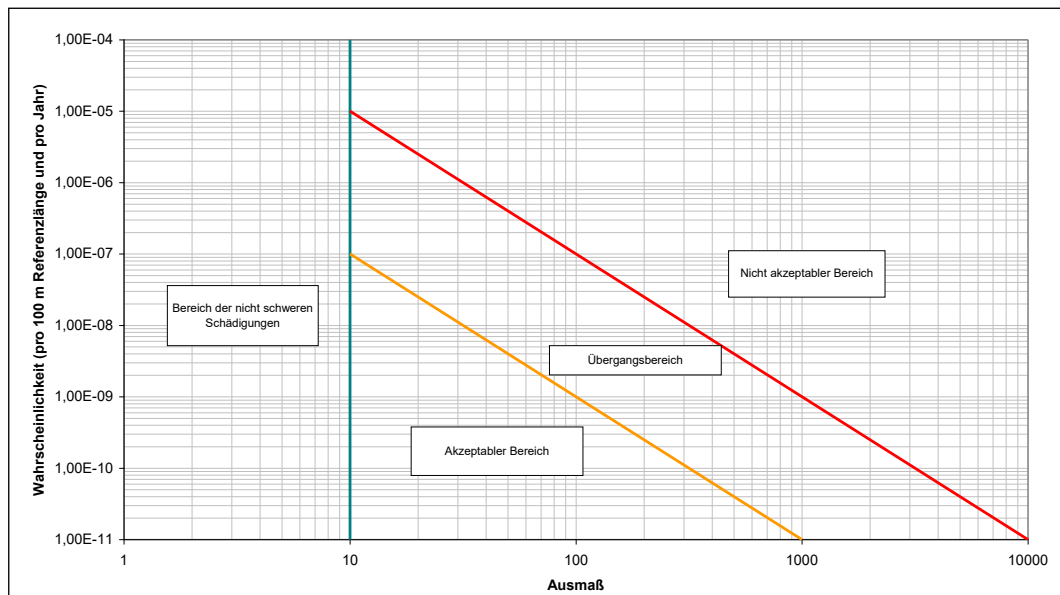


Abb. 7.2 Beurteilungskriterien nach StFV [1].

7.2 Methoden für Gefahrgutrisikoanalysen in Strassentunneln

Für die Untersuchung von Risiken beim Transport gefährlicher Güter durch Strassentunnel liegen heute bereits verschiedene Methoden und Anwendungserfahrungen im In- und Ausland vor. Das Spektrum der angewandten Methoden ist sehr breit und richtet sich nach dem jeweilig erforderlichen Tiefgang bzw. der jeweiligen spezifischen Fragestellung.

Vereinfachte Verfahren und Modelle können die komplexen Interaktionen zwischen Tunnel, Tunnelnutzern, Sicherheitsausstattung und Gefahrgutwirkungen nicht oder nur bedingt erfassen. Eine Anwendung ist jedoch möglich, wenn ausreichende Erfahrungen für Standardsituationen vorliegen oder die Anforderung an die differenzierte Betrachtung der unterschiedlichen Gefahrgutrisiken nur bedingt erforderlich ist.

Nachfolgend sind die wichtigsten spezifischen Aspekte zu den Erfahrungen mit Gefahrgutrisikoanalysen für Strassentunnel zusammengefasst, gegliedert nach den üblichen Schritten eines risikobasierten Vorgehens:

Systemabgrenzung und -definition

- **Untersuchtes System:** Ausgangspunkt für die Risikountersuchungen sind die Gefahren und die damit verbundenen Risiken aus dem Transport gefährlicher Güter durch einen bestimmten Strassentunnel. In vielen Fällen ist aber nicht nur der Tunnel selbst Gegenstand der Untersuchungen, sondern es werden die resultierenden Risiken zweier möglicher Transportrouten (Route mit Tunnelstrecke und mögliche Umfahrgsstrecke) miteinander verglichen.
- **Schadenindikatoren:** Hinsichtlich der untersuchten Schadenindikatoren werden mehrheitlich nur Personenrisiken untersucht. Andere Schadenindikatoren wie beispielsweise Umwelt-, Sachschäden oder betriebliche Auswirkungen und damit verbundene Kostenfolgen werden kaum bzw. nur in qualitativer Form untersucht.

¹¹ Die Vergleichswerte müssen auf das jeweilige Analyseverfahren abgestimmt sein

- **Gefahrgutspektrum:** Das Spektrum der Gefahrgüter wird i. d. R. über repräsentative Szenarien für Stoffe/Stoffgruppen¹² abgebildet.
- **Datengrundlagen:** Die Erfahrung zeigt, dass in den meisten Fällen die für die Zwecke der Risikoanalyse erforderlichen Datengrundlagen hinsichtlich Tunnel und zugehöriger Infrastruktur einfach zu beschaffen und in der erforderlichen Güte vorhanden sind. Schwieriger ist die Beschaffung abgestützter, ortsspezifischer Angaben zum Gefahrgutaufkommen, weshalb man sich häufig auf statistische Mittelwerte abstützen muss.

Risikoanalyse und Risikodarstellung

- Die Mehrzahl der heute angewandten Methoden basiert auf quantitativen Ansätzen zur Ermittlung der Risiken. Dazu werden die Eintretenshäufigkeiten sowie die jeweils resultierenden Schadenausmasse für die gewählten Szenarien mit zugehörigen spezifischen Modellen und teilweise auch komplexen Simulationen ermittelt.
- Die untersuchten Szenarien berücksichtigen die drei Hauptwirkungsarten Brand, Explosion sowie toxische Wirkungen.
- Als Risikomass wird meist das so genannte kollektive Risiko in Form von Summenkurven in Häufigkeits-Ausmass-Diagrammen verwendet. Daneben wird das kollektive Risiko teilweise auch als Schadenerwartungswert dargestellt.¹³

Risikobeurteilung

- Ein zentraler Aspekt stellt die Beurteilung der ermittelten Gefahrgutrisiken dar.
- Bei vergleichenden Untersuchungen, wie sie z.B. in Frankreich vorgenommen werden (Vergleich zwischen Tunnelroute und einer möglichen Alternativroute) werden meist die resultierenden Risiken miteinander verglichen.
- Neben den Vorgaben der StFV in der Schweiz gibt es auch in anderen Ländern (z. B. Niederlande) anerkannte (absolute) Bewertungskriterien, anhand derer die Akzeptabilität der Risiken bestimmt werden kann.

Massnahmenplanung

Im Rahmen der Massnahmenplanung sind entsprechend dem in der Risikobeurteilung identifizierten Handlungsbedarf zusätzliche Sicherheitsmassnahmen bzw. ihre risikomindernde Wirkung zu untersuchen.

¹² Häufig werden die verschiedenen Stoffe aufgrund ihrer jeweiligen massgeblichen Charakteristik (z. B. Aggregatzustand, Hauptwirkungsart, etc.) zu gleichartigen Gruppen oder so genannten Leitstoffen zusammengefasst.

¹³ Erfahrungsgemäss vermag diese Darstellungsform die spezifische Charakteristik von Gefahrgutrisiken nur bedingt abzubilden.

8 ASTRA-Methodik zur Analyse und Beurteilung der Risiken von Gefahrguttransporten in Tunneln

8.1 Einleitung

Wie in Kapitel 7 dargelegt, bestehen für die Untersuchung von Risiken beim Transport gefährlicher Güter durch Strassentunnel heute bereits verschiedene Methoden und Anwendungserfahrungen in der Schweiz und im Ausland. Je nach Fragestellung kommen dabei unterschiedlich komplexe Methoden und Modell zum Einsatz. In der Schweiz werden beispielsweise auch im Rahmen der StFV im Rahmen des Kurzberichtverfahrens spezifische Abschätzungen zu den Tunnelrisiken erstellt. Diese sind ausgesprochen pragmatisch, können dafür aber die Komplexität der Bauwerke mit Ihren Massnahmen nicht bzw. nur sehr grob berücksichtigen. Dementsprechend sind für allfällige Massnahmenentscheide vertiefte Betrachtungen (wie z.B. in einer Risikoermittlung nach StFV) erforderlich. Dieses Grundprinzip wurde auch in der Festlegung der Anforderungen an die zu entwickelnde Methodik zur Umsetzung der ADR-Tunnelregelungen verankert. Mit einem stufenweisen Vorgehen soll sichergestellt werden, dass je nach erwarteten Risiken bedarfsgerecht vertiefte – und damit i.d.R. auch komplexere und aufwändigere – Untersuchungen vorzunehmen sind.

Für die praktische Umsetzung im Rahmen des Projektes "ADR 2007 – Tunnel" sollten bestehende methodische Elemente berücksichtigt werden. Neben den genannten spezifischen, von verschiedenen Entwicklern erarbeiteten Methoden und Modellen wird seit einigen Jahren in verschiedenen Staaten verstärkt das so genannte OECD/PIARC QRAM [21] eingesetzt. Mit Hilfe dieses kommerziellen und weit verbreitet angewendeten Modells ist es möglich, Tunnel sowie offene Strecken hinsichtlich ihres Risikos, das durch die Freisetzung von Gefahrgütern besteht, zu analysieren und zu quantifizieren. Aufgrund der verhältnismässig weiten Verbreitung des Modells wurde im Projekt frühzeitig entschieden, eine Anwendung des Modells im Rahmen der Methodik zu integrieren, auch wenn aus den vorliegenden Erfahrungen mit dem Modell bekannt ist, dass es nicht unbesehen für die Anwendung für die vorliegende Fragestellung verwendet werden darf.

Nachfolgend sind die massgeblichen methodischen Elemente und die spezifischen Hintergründe zu deren Entwicklung pro Verfahrensstufe dargelegt.

8.2 Übersicht zum methodischen Vorgehen

Abb. 8.1 gibt einen Überblick über das entwickelte methodische Vorgehen zur Analyse und Beurteilung der Risiken beim Transport gefährlicher Güter durch Strassentunnel. Das Vorgehen gliedert sich in zwei Stufen:

- Stufe 1: Grobbeurteilung und
- Stufe 2: Vertiefte Analyse

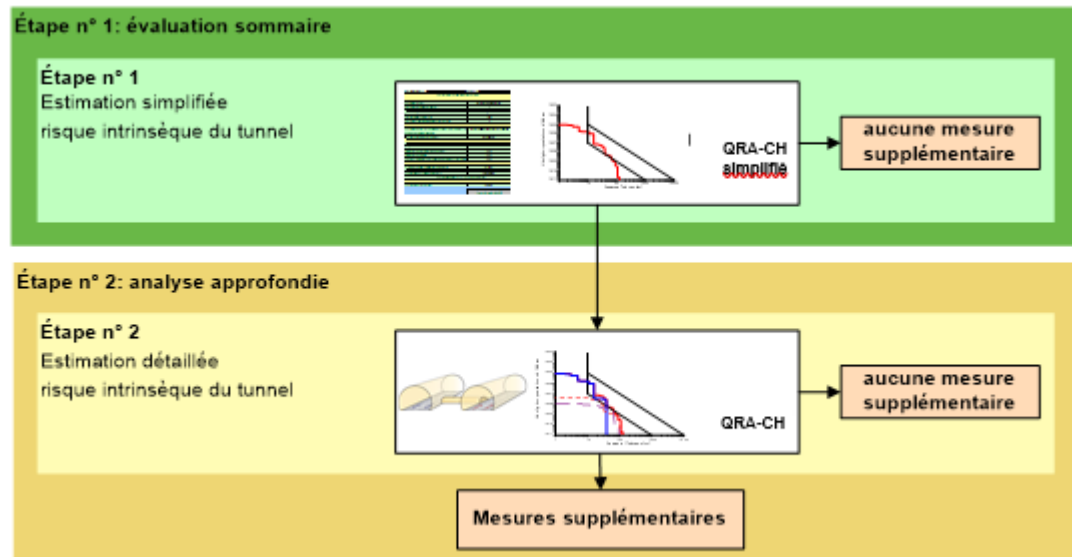


Abb. 8.1 Übersicht zum entwickelten methodischen Vorgehen.

In einer Grobbeurteilung (Stufe 1) wird ein Tunnel dahingehend überprüft, ob dieser für sämtliche Gefahrguttransporte freigegeben werden kann bzw. ob weitergehende Massnahmen angezeigt sind. Dies kann bedeuten, dass detailliertere Risikobetrachtungen vorzunehmen oder Massnahmen vorzusehen sind, wenn der Stand der Technik für einen Tunnel noch nicht umgesetzt ist.

Werden die Gefahrgutrisiken mit den Untersuchungen der Stufe 1 als zu hoch beurteilt, muss der Tunnel vertieft untersucht werden. Bei dieser vertieften Analyse (Stufe 2) wird zunächst das intrinsische Risiko¹⁴ des Tunnels genauer ermittelt und beurteilt. Je nach Ergebnis ergibt sich für den zu untersuchenden Tunnel der Bedarf hinsichtlich weiterer Sicherheitsmassnahmen. Das Spektrum der Massnahmen umfasst bauliche, technische und organisatorische Massnahmen. Sind keine verhältnismässigen baulichen und/oder technischen Massnahmen realisierbar, welche zu einer merklichen Risikominderung führen, so sind auch betriebliche Massnahmen zu betrachten. Eine der möglichen betrieblichen Massnahmen stellt die Beschränkung des Gefahrguttransportes (Kat. B, C, D oder E nach ADR) dar.

Im Falle einer Beschränkung sind die betroffenen zu transportierenden Güter über eine Umfahungsstrecke zu leiten. Für die Umfahungsstrecke gelten wiederum die bereits heute bestehenden Anforderungen und Kriterien der StFV.

In den nachfolgenden Kapiteln 9 bis 12 werden die Vorgehensweisen in den jeweiligen Schritten des Ablaufs sowie das für die Umsetzung zentrale OECD/PIARC-Modell genauer beschrieben.

¹⁴ Ausschliessliche Betrachtung des Tunnelrisikos.

9 Das OECD/PIARC CH-Modell

9.1 Einleitung

Im vorliegenden Kapitel wird das IT-basierte Berechnungsmodell beschrieben, welches in verschiedenen Stufen des Vorgehens angewendet wird.

Das verwendete Berechnungsmodell basiert auf dem Modell für quantitative Risikoanalysen der OECD/PIARC (nachfolgend "**OECD/PIARC Standardmodell**"). Das Standardmodell wird im nachfolgenden Kapitel 9.2 beschrieben.

Das OECD/PIARC Standardmodell wurde für die Verwendung im vorliegenden Vorgehen angepasst. Das entwickelte "**OECD/PIARC CH-Modell**" wird in Stufe 2 des Vorgehens angewendet. Die Hintergründe und die vorgenommenen Anpassungen für das OECD/PIARC CH-Modells werden in Kapitel 9.3 erläutert.

In Stufe 1 des Vorgehens wird für die grobe Abschätzung des intrinsischen Risikos eines Tunnels des Weiteren eine vereinfachte Version des OECD/PIARC CH-Modells angewendet (nachfolgend "**OECD/PIARC CH-Modell vereinfacht**"). Das vereinfachte Modell wird in Kapitel 11.2.1 beschrieben.

Die nachfolgende Abb. 9.1 gibt eine Übersicht über die Modellversionen und deren Verwendung im Vorgehen.

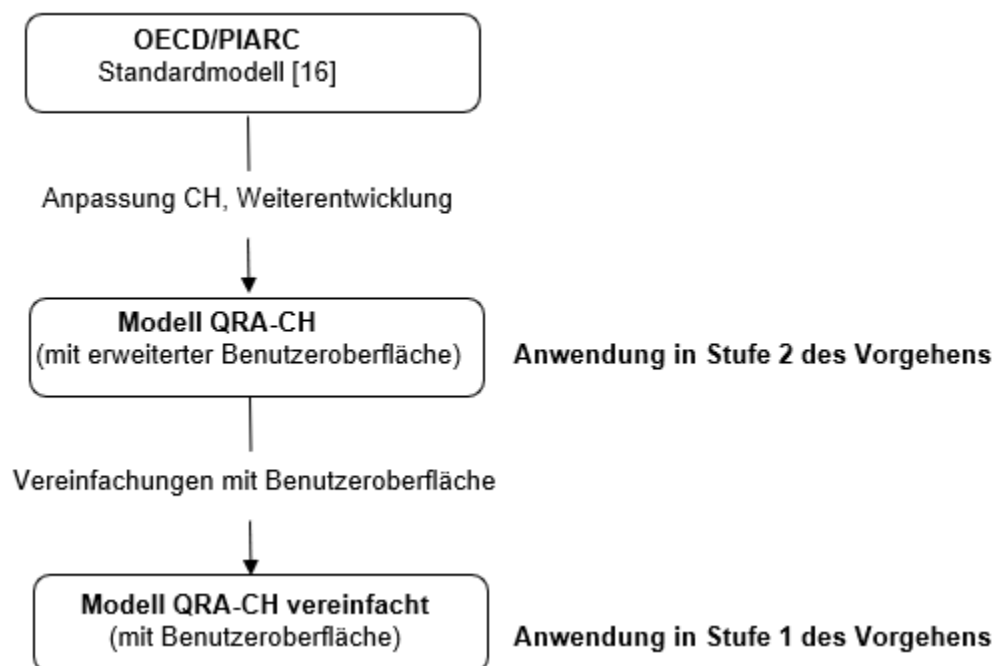


Abb. 9.1 Übersicht über Modellversionen und Verwendung im Vorgehen

9.2 Das OECD/PIARC Standardmodell

9.2.1 Entwicklung

Die Fragestellung, wie die Risiken von Gefahrguttransporten durch Tunnel analysiert und beurteilt werden können bzw. welche Gefahrgüter zum Risiko beitragen und wie ein u. U. eingeschränkter Transport dabei europaweit einheitlich gehandhabt werden kann, war in der Vergangenheit Anlass für verschiedene Forschungstätigkeiten auf europäischer Ebene. 1995 wurde von der OECD und der PIARC ein Forschungsprojekt zur Analyse und Beurteilung der Risiken von Gefahrguttransporten initiiert. Ziel war neben der Entwicklung einer Methode auch die Untersuchung von möglichen Sicherheitsmassnahmen. Auf dieser Grundlage wurde später u.a. auch die Entwicklung eines quantitativen Risikoanalysemodells (GRAM) durchgeführt.

9.2.2 Modell / Methodik

Das OECD/PIARC Standardmodell ermöglicht die quantitative Erfassung der Personenrisiken für den Transport gefährlicher Güter durch Tunnel und auf offenen Strecken. Zur Modellierung der Wirkung verschiedener Gefahrgüter fliessen sowohl deterministische als auch probabilistische Elemente ein.

Das Vorgehen zu Ermittlung der Risiken mit dem OECD/PIARC Standardmodell kann wie folgt zusammengefasst werden:

- Wahl einer beschränkten Anzahl repräsentativer Gefahrgüter, welche die massgeblichen Wirkungen von Gefahrgutfreisetzungen charakterisieren.
- Festlegung repräsentativer Freisetzungsszenarien. Das OECD/PIARC Standardmodell geht dabei von vergleichsweise konservativen Szenarien aus.
- Ermittlung der Häufigkeit des Eintretens der repräsentativen Freisetzungsszenarien.
- Ermittlung des Schadenausmasses für die Personengruppen "Verkehrsteilnehmer" und "Anwohner".
- Berechnung und Darstellung der berechneten individuellen und/oder kollektiven Risiken.

Das Berechnungsmodell basiert auf der Bestimmung von Häufigkeit und Schadenausmassen von massgebenden Gefahrgutszenarien unter Berücksichtigung der Charakteristik des Tunnels und der Verkehrs- und Umgebungsbedingungen. Es werden elf Szenarien betrachtet, welche die wesentlichen Risiken infolge Brand, Explosion und Toxizität anhand von sogenannten Leitstoffen (repräsentativer Stoffe für eine Gefahrgutwirkung) abbilden. Ausgehend von einem Freisetzungsvorgang werden mögliche Ereignisabläufe untersucht und das jeweilige Schadenausmass mit der zugehörigen bedingten Wahrscheinlichkeit abgeschätzt. Zusätzlich zu den elf Gefahrgutszenarien erlaubt das OECD/PIARC Standardmodell auch die Ermittlung der Risiken für zwei Brandszenarien mit 20 MW bzw. 100 MW Brandleistung. Bewertet werden jeweils die Risiken für Personen. Als Schadenindikator wird die resultierende Anzahl Todesopfer betrachtet. Das Modell berücksichtigt hierzu die Tunnelcharakteristika und die Szenario-spezifischen Wirkungen.

Für die freien Strecken dienen zweidimensionale Ausbreitungsmodelle, die auf anerkannten Modellen basieren. Für jeden Streckenabschnitt kann die zugehörige Gebietscharakteristik wie beispielsweise die ortsspezifische Einwohnerdichte, Struktur, Windverteilung etc. berücksichtigt werden.

Zur Berechnung der Gefahrgutwirkungen in Tunnelstrecken dient ein vereinfachtes eindimensionales Ausbreitungsmodell. Dabei werden die Eigenschaften der wesentlichen Tunnelcharakteristika wie Tunnelgeometrie, Sicherheitsausstattungen, Lüftungssystemen (natürliche, Längs- und Halbquerlüftung) etc. berücksichtigt.

Für sämtliche Streckenabschnitte ist die Verwendung von Verkehrsdaten wie etwa das durchschnittliche tägliche Gesamtverkehrsaufkommen, Verkehrszusammensetzung, Gefahrgutanteile, Unfalldaten etc. möglich. Für detaillierte Hinweise zur Funktionsweise des Modells, den theoretischen Grundlagen und zu den Hintergründen der Entwicklung auf die Benutzerhandbücher [21] verwiesen.

9.2.3 Programmstruktur

Das OECD/PIARC Modell ist im Kern ein Microsoft Excel Programm, das mit Hilfe von Tabellenblättern und VBA-Codes die einzelnen Rechenschritte ausführt. Die Dateneingabe erfolgt mit Hilfe von Eingabemasken in MS-Excel. Das Hauptprogramm (Abb. 9.2) greift bei Bedarf in der Berechnung auf gesonderte Berechnungstools zurück.

Dies sind zumeist ebenso Excel-Dateien, für die zweidimensionale Ausbreitungsberechnung im Freien dient dagegen ein Fortran-Programm. Als Ergebnis kann sowohl das kollektive als auch das individuelle Risiko berechnet werden. Das kollektive Risiko kann in Form von Häufigkeits-Ausmass-Diagrammen und einem Schadenerwartungswert dargestellt werden.

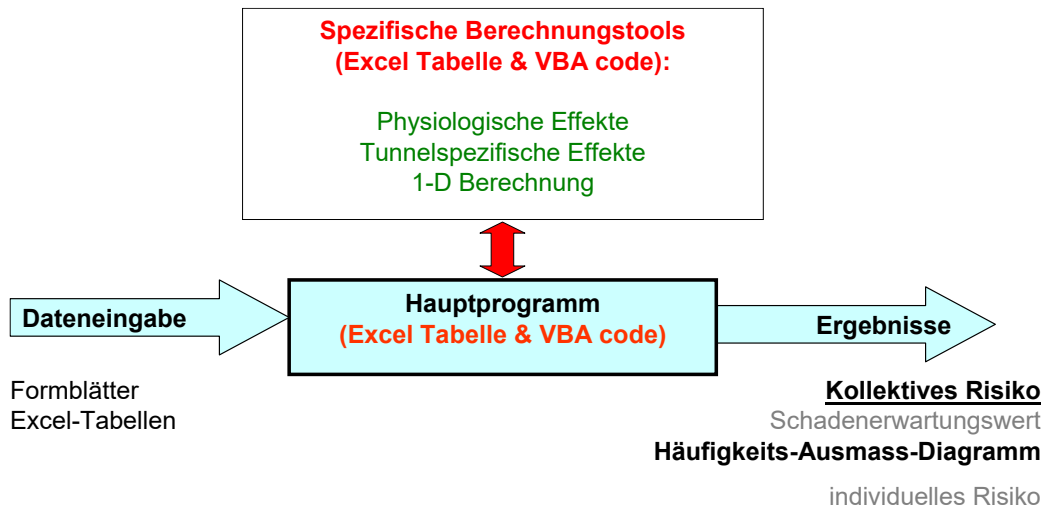


Abb. 9.2 Prinzipielles Funktionsschema OECD/PIARC Modell

Es gilt anzumerken, das Programm und dessen Anwendung verhältnismässig komplex ist und dass die Nutzung das notwendige fachliche Hintergrundwissen zu Strassentunneln und zu Risikoanalyseverfahren erfordert.

9.2.4 Anforderungen an Hardware und Software

Siehe Abschnitt 5.4.

9.2.5 Verbreitung und Erfahrungen

Das OECD/PIARC Modell wird in zahlreichen europäischen Staaten für die Risikoberechnung genutzt. Insbesondere in Frankreich, Grossbritannien, Griechenland und Österreich gehört es zum Standard. Das zum OECD/PIARC Standardmodell gehörende Software-Programm zeichnet sich durch folgende Eigenschaften aus:

- Kommerziell erwerbbare, relativ preiswerte Software
- Verbreitungsgrad relativ hoch; Anwendung in verschiedenen europäischen Staaten
- MS Office basiert
- Parameter können als "Default"-Werte verwendet oder mit projektspezifischen Werten hinterlegt werden → hohe Flexibilität
- lauffähig für Programmversionen ab MS-Excel 2010 in 32- oder 64-Bit (idealerweise 2016 64 Bit).
- Gefahrgutszenarien decken nur die Kategorien A, B, C gemäss ADR ab. Die Kategorien D und E sind nicht differenzierbar.
- Das Modell basiert in vielen Teilen auf "Worst-case-Betrachtungen" und führt somit zu teilweise sehr konservativen Ergebnissen. Die Kompatibilität mit StFV-Beurteilungskriterien [17] ist deshalb nicht gegeben.

9.3 OECD/PIARC CH Modell (QRA-CH)

9.3.1 Weiterentwicklung des OECD/PIARC Standardmodells

Verfahren zur Analyse von Risiken und deren Beurteilung erfordern stets, dass die jeweiligen methodischen Elemente aufeinander abgestimmt sind. Bei der Entwicklung der vorliegenden Methodik galt es wie in Kapitel 6.2 dargelegt u.a. auch die Anforderungen der StFV und insbesondere die zugehörigen geltenden Beurteilungskriterien für Verkehrswege [17] zu berücksichtigen. Wie die Analyse des OECD/PIARC Modells gezeigt hat, weist das Modell ausgesprochen konservative Risiken aus.¹⁵ In Anbetracht der Tatsache, dass das Modell ursprünglich in erster Linie für den relativen Vergleich der Risiken zwischen zwei Routen ausgegangen ist, ist dies zwar von untergeordneter Bedeutung. Für eine Beurteilung der Risiken mit absoluten Kriterien wie den Beurteilungskriterien II zur StFV, stellt dies jedoch ein Problem dar. Aus diesem Grund wurden methodische Anpassungen am OECD-Standard-Modell vorgenommen, um die Kompatibilität zu den Beurteilungskriterien StFV [17] sicherstellen zu können. Das angepasste OECD/PIARC CH Modell beinhaltet sowohl Anpassungen an den länderspezifischen Parametern (z.B. Gefahrgut-/Szenarioverteilung) als auch methodische Weiterentwicklungen des OECD/PIARC Standardmodells.

Für die Entwicklung des OECD/PIARC CH (QRA-CH) Modells wurden zusammenfassend folgende Anpassungen und Weiterentwicklungen im Rahmen des Projekts zur Erarbeitung des Vorgehens vorgenommen:

- Anpassung von Parameterwerten
- Anpassung und Weiterentwicklung des Evakuierungsmodells
- Kalibrierung des Modells und Anpassung an die Beurteilungskriterien zur StFV [17].

Nachfolgend sind die wichtigsten Anpassungen und Weiterentwicklungen zusammenfassend dokumentiert.

9.3.2 Berücksichtigte Szenarien

Die nachfolgende Tab. 9.1 gibt eine Übersicht über die im QRA-CH Modell verwendeten Szenarien.

Tab. 9.1 Übersicht über die Szenarien des QRA-CH Modells¹⁶

Szenario		Tankvolumen	Leckgrösse	Volumenstromrate
Nr.	Beschreibung		[mm]	[kg/s]
3	BLEVE 50 kg Propangas-Zylinder	50 kg	-	-
4	Lachenbrand Benzin	28 t	100	20.6
5	Explosion Benzindämpfe	28 t	100	20.6
7	BLEVE Propangastank (18 t)	18 t	-	-
8	Gaswolkenbrand Propangastank (18 t)	18 t	50	36
9	Fackelbrand Propangastank (18 t)	18 t	50	36
10	Ammoniakfreisetzung aus Tank (18 t)	20 t	50	36
11	Acroleinfreisetzung aus Tank (25 t)	25 t	100	24.8
12	Acroleinfreisetzung aus Zylinder (100 l)	100 ltr	4	0.02
13	BLEVE CO2 verflüssigt (20 t)	20 t	-	-

Im Gegensatz zum OECD/PIARC Standardmodell wird das Szenario Nr. 6 "Chloraustritt" im QRA-CH Modell nicht berücksichtigt, da die mit dem Szenario abgebildeten Tanktransporte und damit verbundenen Freisetzungsszenarien von Chlor in der Schweiz nicht vorkommen.

¹⁵ Die Auswertung von mit dem OECD/PIARC Standardmodell ermittelten Schadenerwartungswerten zeigt im Vergleich zu statistischen Grundlagen, dass die Risiken tendenziell zu konservativ bewertet werden.

¹⁶ Die berücksichtigten Szenarien entsprechen den im OECD/PIARC Standardmodell verwendeten Szenarien. Ein inhaltliche Änderung der Szenarien oder die Entwicklung von weiteren Szenarien wäre mit unverhältnismässigem Aufwand verbunden und war deshalb im Rahmen des Projektes nicht möglich.

Stattdessen werden die Wirkungen toxischer Gase stellvertretend über Freisetzungsszenarien von Ammoniak (Szenario 10) bzw. luftgängiger toxischer Flüssigkeiten abgebildet (Szenarien 11 und 12).

9.3.3 Standardwerte der Gefahrgutverteilung

Zur Abbildung der Gefahrgutrisiken sind die Mengenanteile der zu den in Kapitel 9.3.2 beschriebenen Szenarien gehörigen Gefahrgüter anzugeben. Es wird von der nachfolgend aufgeführten Verteilung ausgegangen:

• Brennbare Gase, Flaschen (Szenario 3):	0.4657%
• Brennbare Flüssigkeiten (Szenarien 4, 5):	34.9500%
→ davon flüchtige brennbare Flüssigkeiten (Szenario 5):	34.0%
• Brennbare Gase, Tanktransport (Szenarien 7,8,9):	1.3970%
• Giftige Gase, Tanktransport (Szenario 10):	0.8750%
• Giftige Flüssigkeiten, Tanktransport (Szenario 11):	1.7500%
• Giftige Flüssigkeiten, Flaschen (Szenario 12):	1.7500%
• Nicht brennbare Gase, Tanktransport (Szenario 13):	0.7623%
• Weitere (keinem Szenario zugeteilt):	58.05%

9.3.4 Raten der untersuchten Szenarien

Eine zentrale Grösse zur Bestimmung der Eintretenshäufigkeiten im Modell stellen die bedingten Wahrscheinlichkeiten einer Freisetzung bei einem Unfall eines Gefahrgutfahrzeuges dar. Das OECD/PIARC Standardmodell berücksichtigt dabei Szenario-spezifische Charakteristika (insbesondere die Eigenschaften der "typischen" Transportgebinde für die verschiedenen berücksichtigten Gefahrgüter) nicht systematisch. Für die Entwicklung des QRA-CH Modells wurden die Erkenntnisse hierzu für die Verhältnisse der Schweiz – insbesondere aus [25] – berücksichtigt.

Die bedingten Wahrscheinlichkeiten können wie folgt ermittelt werden:

$$P(\text{Szenario}) = F_R * c_v * c_T * f * \frac{1}{U_{R,S}}$$

F_R : Statistische Freisetzungsrates gemäss [25]: $0.9 * 10^{-8}$ [1/Fz-km] für dünnwandige Transportbehälter (z.B. brennbare Flüssigkeiten wie Mineralöle) bzw. $0.09 * 10^{-8}$ [1/Fz-km] für dickwandige Transportbehälter (z.B. Chlorgasflaschen)

c_v : Korrekturfaktor Geschwindigkeit = v [km/h] / 100 km/h

c_T : Korrekturfaktor für Unfallraten in Tunnelstrecken im Vergleich zur offenen Strecke (2/3)

f : Szenario-spezifischer Korrekturfaktor

$U_{R,S}$: Standardwert der Unfallrate für den Schwerverkehr (vgl. unten)

Es wird ferner aufgrund von Literatursauswertungen im Modell berücksichtigt, dass die Unfallrate in Gegenverkehrstunneln um rund einen Faktor 2 höher ist als in Richtungsverkehrstunneln.

Der Korrekturfaktor f wird jeweils Szenario-spezifisch ermittelt und gibt an, mit welcher Wahrscheinlichkeit die jeweilige für das Szenario relevante Wirkungsart auftritt. Für die Freisetzung toxischer Gase oder luftgängiger Flüssigkeiten ist der Faktor 1. Für die übrigen Szenarien können die entsprechenden Werte den nachfolgenden Abb. 9.3 und Abb. 9.4 entnommen werden. Grundlage für die Werte bilden die Überlegungen in [25].

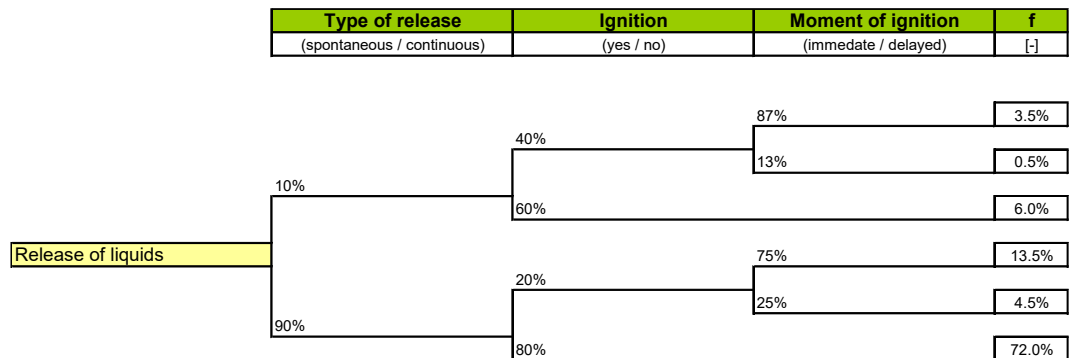


Abb. 9.3 Bestimmung des Faktors f für brennbare Flüssigkeiten

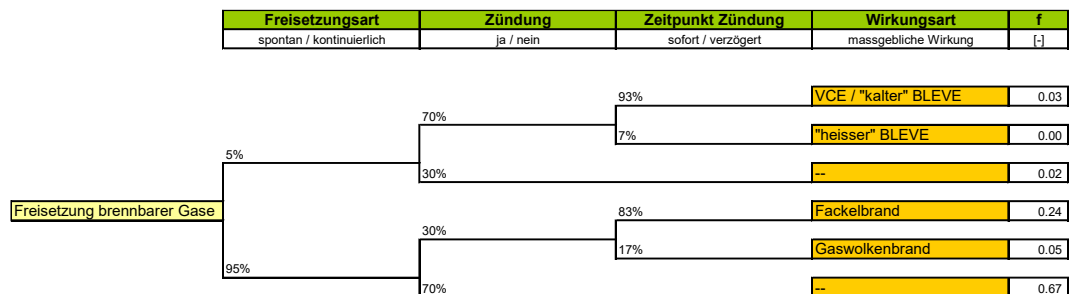


Abb. 9.4 Bestimmung des Faktors f für brennbare Gase

Auf Basis der aufgeführten Grundlagen können die folgenden Wahrscheinlichkeiten für die Szenarien für das QRA-CH Modell ermittelt werden (vgl. Tab. 9.2):

Tab. 9.2 Bedingte Wahrscheinlichkeiten der elf Gefahrgutszenarien für das OECD/PIARC Standardmodell bzw. QRA-CH Modell

Szenario		OECD/PIARC Standardmodell		OECD/PIARC CH Modell	
Nr.	Beschreibung	Tunnel städtisch	Ausserorts	Tunnel städtisch	Ausserorts
3	BLEVE 50 kg Propangas-Zylinder	1.5E-09	4.3E-09	6.7E-06	8.4E-06
4	Lachenbrand Benzin	2.4E-09	1.7E-08	4.7E-03	5.8E-03
5	Explosion Benzindämpfe	2.4E-10	1.7E-09	1.4E-03	1.7E-03
7	BLEVE Propangastank (18 t)	2.4E-10	1.7E-09	6.7E-06	8.4E-06
8	Gaswolkenbrand Propangastank (18 t)	2.4E-10	1.7E-09	2.2E-04	2.8E-04
9	Fackelbrand Propangastank (18 t)	2.4E-09	1.7E-08	6.5E-04	8.1E-04
10	Ammoniakfreisetzung aus Tank (18 t)	2.6E-08	4.6E-08	2.7E-03	3.4E-03
11	Acroleinfreisetzung aus Tank (25 t)	2.2E-08	4.1E-08	2.7E-02	3.4E-02
12	Acroleinfreisetzung aus Zylinder (100 l)	5.6E-09	1.1E-08	2.7E-02	3.4E-02
13	BLEVE CO2 verflüssigt (20 t)	2.3E-10	1.6E-09	6.7E-06	8.4E-06

Die Raten für die jeweiligen Szenarien ergeben sich wie folgt:

$$\text{Szenariorate} = P(\text{Szenario}) * U_R$$

$P(\text{Szenario})$: Bedingte Wahrscheinlichkeit (gemäss obiger Definition)

U_R : Unfallrate Schwerverkehr (Standardwert $U_{R,S}$ oder ortsspezifischer Wert $U_{R,o}$)

Der Standardwert $U_{R,S}$ der Unfallrate für den Schwerverkehr $U_{R,S}$ wurde basierend auf statistischen Daten ermittelt. Grundlage bildet die Rate für Unfälle auf Nationalstrassen gemäss bfu Report 51 [24] von $3.5 * 10^{-7}$ [1/Fz-km] (Daten der Jahre 1992-1999).

Zur Berücksichtigung der tieferen Unfallrate für den Gefahrgutverkehr gegenüber dem gesamten Schwerverkehr respektive unter Berücksichtigung von 50% Leerfahrten in diesem Segment (s.a. Handbuch III zur StFV [19] wird dieser Wert mit dem Faktor 0.5 multipliziert, womit sich ein Standardwert für die Unfallrate für den Schwerverkehr von $1.75 \cdot 10^{-7}$ [1/Fz-km] ergibt.

Dieser Wert ist im Interface des Modells QRA-CH Stufe 1 implementiert. Er kann aber auf Basis neuerer und/oder spezifischer Verkehrsdaten angepasst werden (s.a. II.7.1 und II.7.2). Bei spezifischen Anpassungen der Unfallraten sind in Stufe 1 zusätzlich die oben erwähnten Faktoren betr. Richtungs- oder Gegenverkehr anzuwenden.

Zur Berücksichtigung der unterschiedlichen Unfallraten in Gegenverkehrs- und Richtungsverkehrstunneln werden die folgenden Korrekturfaktoren verwendet:

- 2/3 für Richtungsverkehrstunnel,
- 4/3 für Gegenverkehrstunnel.

9.3.5 Anpassung der Zeitspanne zwischen Unfall und Gefahrgutwirkung

Eine wichtige Einflussgrösse im Modell ist die Zeitspanne zwischen einem Unfall eines Gefahrgutfahrzeuges und dem Eintreten der Gefahrgutwirkung. Bei einem Unfall eines Mineralöl-Transportfahrzeuges beispielsweise kann es nach dem Unfall und der Freisetzung je nach Art und Ablauf des Unfalls unterschiedlich lange Zeit dauern, bis es zu einer Zündung kommt und die sich ausbreitende Gefahrgutlache in Brand gerät. Je nach Art des Unfalls bzw. des beteiligten Gefahrguts kann diese Zeitspanne zwischen Unfall und Gefahrgutwirkung unterschiedlich sein. Diese Szenario-spezifischen Eigenschaften sind im OECD/PIARC Standardmodell berücksichtigt, jedoch sind für diese Zeitspannen generell eher konservative Annahmen zugrunde gelegt. Es gilt festzuhalten, dass hierzu i.d.R. keine Grundlagen in Form von statistischen Daten o.ä. vorliegen, so dass auf plausible Annahmen abgestützt werden muss.

Die nachfolgende Tab. 9.3 zeigt die Ursprungswerte für die Zeitspanne zwischen einem Unfall eines Gefahrgutfahrzeuges und dem Eintreten der Gefahrgutwirkung gemäss OECD/PIARC Standardmodell bzw. die angepassten Werte, welche für das QRA-CH Modell zugrunde gelegt wurden:

Tab. 9.3 Anpassung Zeitspanne zwischen Unfall und Gefahrgutwirkung

Szenario-Nr.	t _{Standardmodell} [s]	t _{CH Modell} [s]	Szenario
3	300	900	BLEVE 50 kg Propangas-Zylinder
4	90	300	Lachenbrand Benzin
5	120	180	Explosion Benzindämpfe
7	300	900	BLEVE Propangastank (18 t)
8	120	180	Gaswolkenbrand Propangastank (18 t)
9	300	900	Fackelbrand Propangastank (18 t)
10	60	60	Ammoniakfreisetzung aus Tank (18 t)
11	60	60	Acroleinfreisetzung aus Tank (25 t)
12	60	60	Acroleinfreisetzung aus Zylinder (100 l)
13	300	900	BLEVE CO ₂ verflüssigt (20 t)

Zu den Anpassungen sind folgende Anmerkungen festzuhalten:

- Die Zeitspannen für die Szenarien mit toxischen Wirkungen wurden nicht angepasst, da die im OECD/PIARC Standardmodell festgelegten Zeitverhältnisse als realistisch angesehen wurden. Im Normalfall kann davon ausgegangen werden, dass mit dem Unfall eine Freisetzung stattfindet und demnach nach bereits kurzer Zeit die Wirkung eintritt.
- Die Zeitspanne für die Propan-Szenarien wurde erhöht. Insbesondere diejenige für Szenario 7 (BLEVE) wurde deutlich höher als im OECD/PIARC Standardmodell angesetzt. Grund dafür ist der Umstand, dass das OECD/PIARC Standardmodell davon ausgeht,

dass nach einem Unfall ein grosser Fackelbrand entsteht, der das Unfallfahrzeug und den Gastank innerhalb kurzer Zeit aufheizt und es so zu einem BLEVE kommt. Die Frist von 5 Minuten entspricht – auch im Vergleich zu anderen Studien bzw. Modellen – einer ausgesprochen konservativen Annahme. Dementsprechend wurde die Zeitspanne auf 15 Minuten erhöht. Ebenfalls auf Basis eines Vergleichs zu anderen Studien wurden die Zeitspannen für die beiden anderen Propan-Szenarien etwas erhöht.

- Die Zeitspanne für den Lachenbrand von Mineralölprodukten (Szenario 4) wurde von 1.5 Minuten auf 5 Minuten erhöht. Im OECD/PIARC Standardmodell wird davon ausgegangen, dass nach dieser Zeitspanne die volle Brandwirkung auf die exponierten Personen einwirkt, was als eine relativ konservative Annahme angesehen wird. Dementsprechend wurde der Wert erhöht.

9.3.6 Evakuierungsmodell

Wie verschiedene Analysen und Sensitivitätsbetrachtungen des OECD/PIARC Standardmodells gezeigt haben, ist einer der Gründe für die insgesamt konservativen Ergebnisse auf das im Modell implementierte Evakuierungsmodell zurückzuführen. Im Zuge der Kalibrierung des Modells wurden verschiedene Anpassungsmöglichkeiten untersucht:

- In einem ersten Schritt untersucht, wie sensitiv sich eine Anpassung einzelner Parameterwerte im Evakuierungsmodell auf die Ergebnisse auswirkt. Wie die Analysen gezeigt haben, war eine Kalibrierung über die Parameterwerte alleine aber nicht möglich.
- Eine weitere durchgeführte Untersuchung betraf die Variation der im Modell abgebildeten Situation der Fahrzeuge im Stau hinter dem Unfall im Tunnel. Auch diese Anpassungen waren aber für eine Kalibrierung nicht tauglich.

Aus diesem Grund wurde das Evakuierungsmodell des OECD/PIARC Standardmodells neu entwickelt und dieses an der Stelle des bisherigen Modells implementiert. Das Vorgehen hierzu umfasste folgende Arbeitsschritte:

- Das bestehende Evakuierungsmodell wurde im OECD/PIARC Standardmodell inaktiviert. Dazu wurde im Standardmodell die Fluchtgeschwindigkeit der exponierten Personen auf 0 m/s zurückgesetzt.¹⁷
- Es wurde ein neues Evakuierungsmodell entwickelt, das folgende Elemente umfasst:
- Die Fluchtgeschwindigkeit der Tunnelbenutzer in Richtung der Portale wird im Modell mit 1 m/s festgelegt.
- Die Fluchtgeschwindigkeit der Tunnelbenutzer in Richtung der Notausgänge wird im Modell mit 0.5 m/s festgelegt, da davon ausgegangen wird, dass diese Fluchtgeschwindigkeit kleiner ist als in der Nähe der Portale (Sichtbedingungen schlechter, Fluchtweg zu Notausgängen ist weniger bekannt).
- Es wird davon ausgegangen, dass flüchtende Tunnelbenutzer die Notausgänge benützen, wenn sie diese auf der Flucht erreichen.
- Für die Evakuierung spielt der Zeitpunkt der Alarmierung (mittels Alarmierungseinrichtungen im Tunnel) eine wichtige Rolle. Dieser ist u.a. abhängig von den entsprechenden Detektionseinrichtungen im Tunnel. Hierbei wurden im Modell folgende Annahmen getroffen: Die berücksichtigten Zeitspannen variieren zwischen 90 Sekunden für richtlinienkonforme Tunnel mit permanenter Video-Überwachung durch eine besetzte Überwachungszentrale und keiner Alarmierung für den Fall, dass keine Überwachungseinrichtungen vorhanden sind (im Modell wurde der Wert mit 9'000 Sekunden angesetzt). Dazwischen wurden abgestuft Werte von 180 Sekunden bzw. 600 Sekunden ab dem Unfallereignis angesetzt.
- Das neu entwickelte Evakuierungsmodell geht davon aus, dass die Wahrscheinlichkeit einer erfolgreichen Selbstrettung der Tunnelbenutzer vom Ort der Exposition und von der Art des Szenarios bzw. der Gefahrgutwirkung abhängig ist.

¹⁷Über das Expert User Interface im OECD/PIARC Standardmodell.

Folgende Einflussgrössen sind dabei berücksichtigt:

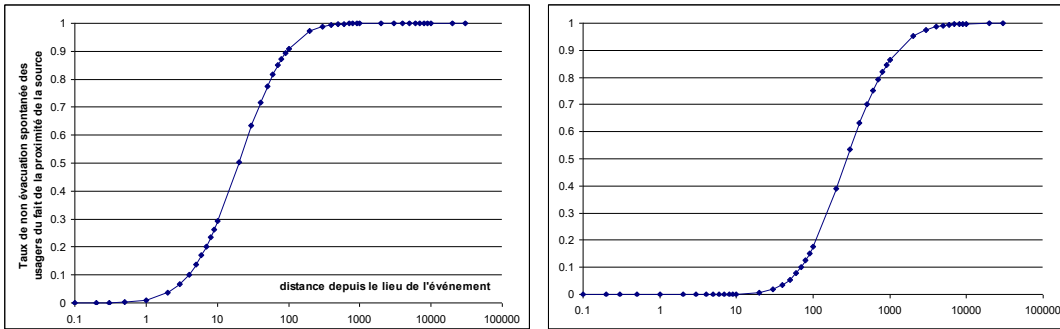
- Für die massgeblichen Wirkungsarbeiten wurde eine so genannte "Überlebensfunktion" im Modell eingeführt. Diese Funktion berücksichtigt die spezifische Charakteristik der massgeblichen Gefahrgutwirkungen über die so genannten die Probit-Funktionen.
- Zeitspanne zwischen Unfall und Gefahrgutwirkung.
- Selbstrettung bzw. Reaktionszeit der Tunnelnutzer. Grundsätzlich kann der Entscheid zur Flucht durch zwei Faktoren ausgelöst werden: durch die Alarmierung mittels der Alarmierungseinrichtungen im Tunnel (Einsprechanlagen, Wechselverkehrszeichen, etc.) und/oder durch das Erkennen der Gefahr durch den Tunnelnutzer selbst (z. B. sichtbarer Brand). Die im Modell berücksichtigte Reaktionszeit wird daher wie folgt abgebildet:
- Zeitspanne bis zur Alarmierung (mittels der Alarmierungseinrichtungen im Tunnel). Diese setzt sich aus zwei Teilen zusammen:
 - Die Zeitspanne zwischen dem Unfall und der Alarmierung (durch die Alarmierungseinrichtungen im Tunnel), abhängig vom im Tunnel vorhandenen Ausrüstungsstandard (u.a. bezüglich der Möglichkeiten zur Alarmierung).
 - Die Zeitspanne, die der Tunnelbenutzer nach der Alarmierung benötigt, um sich des Alarms bewusst zu werden, das Fahrzeug zu verlassen und die Flucht einzuleiten. Dieser Wert nimmt mit höherem Ausrüstungsstandard (Überwachungsniveau) der Alarmierungseinrichtungen ab. Des Weiteren wird für Tunnelbenutzer, die sich zum Zeitpunkt des Unfalls im Bereich der Portale befinden, eine kürzere Zeitspanne berücksichtigt als für Tunnelbenutzer, die sich in der Mitte eines langen Tunnels befinden (s.a. Tab. 9.4).

Tab. 9.4 Zeitspannen, welche ein Tunnelbenutzer benötigt, um nach einem Unfall das Fahrzeug zu verlassen und eine Flucht einzuleiten

Überwachungsniveau (gemäss OEDC/PIARC Standardmodell)	Zeitspanne zwischen Unfall und Alarmierung (mittels Alarmierungseinrichtungen) [Sekunden]	Nach der Alarmierung: Zeitspanne zum Verlassen des Fahrzeuges und Einleiten der Flucht [Sekunden]
3	90	60 (Flucht zum Portal) / 90 (Flucht zum Notausgang)
2	180	80 (Flucht zum Portal) / 120 (Flucht zum Notausgang)
1	600	100 (Flucht zum Portal) / 150 (Flucht zum Notausgang)
0	9000	120 (Flucht zum Portal) / 180 (Flucht zum Notausgang)

- Berücksichtigung der Wahrscheinlichkeit, dass ein Tunnelnutzer die Gefahr erkennt. Es wird dabei angenommen, dass Tunnelbenutzer, die sich im Nahbereich des Unfalls befinden, die Gefahr rascher erkennen als solche, die sich weiter weg befinden (Einsehbarkeit/Erkennbarkeit der Situation), unabhängig von der Art bzw. Möglichkeit der Alarmierung.
- Es wird des Weiteren berücksichtigt, dass die Wahrscheinlichkeit, das Ereignis zu erkennen, bei einigen Szenarien höher ist als bei anderen. Besser erkennbar sind beispielsweise Brandszenarien, schlechter erkennbar sind toxische Wirkungen.

Die nachfolgenden Darstellungen in Abb. 9.5 zeigen exemplarisch die Anteile der geflüchteten bzw. noch nicht geflüchteten Tunnelbenutzer für zwei Szenariotypen.



Anteil der Tunnelbenutzer die nicht fliehen in Funktion in der Distanz zum Ereignisort für toxische Wirkungen und Explosionen

Anteil der Tunnelbenutzer die nicht fliehen in Funktion in der Distanz zum Ereignisort für Brände

Abb. 9.5 Angepasste Modellierung der Selbstrettung.

Das resultierende Evakuierungsmodell bzw. die "Überlebensfunktion" ist nachfolgend in Abb. 9.6 für das Szenario 10 (Freisetzung von 18 t Ammoniak- aus einem Tank) exemplarisch dargestellt:

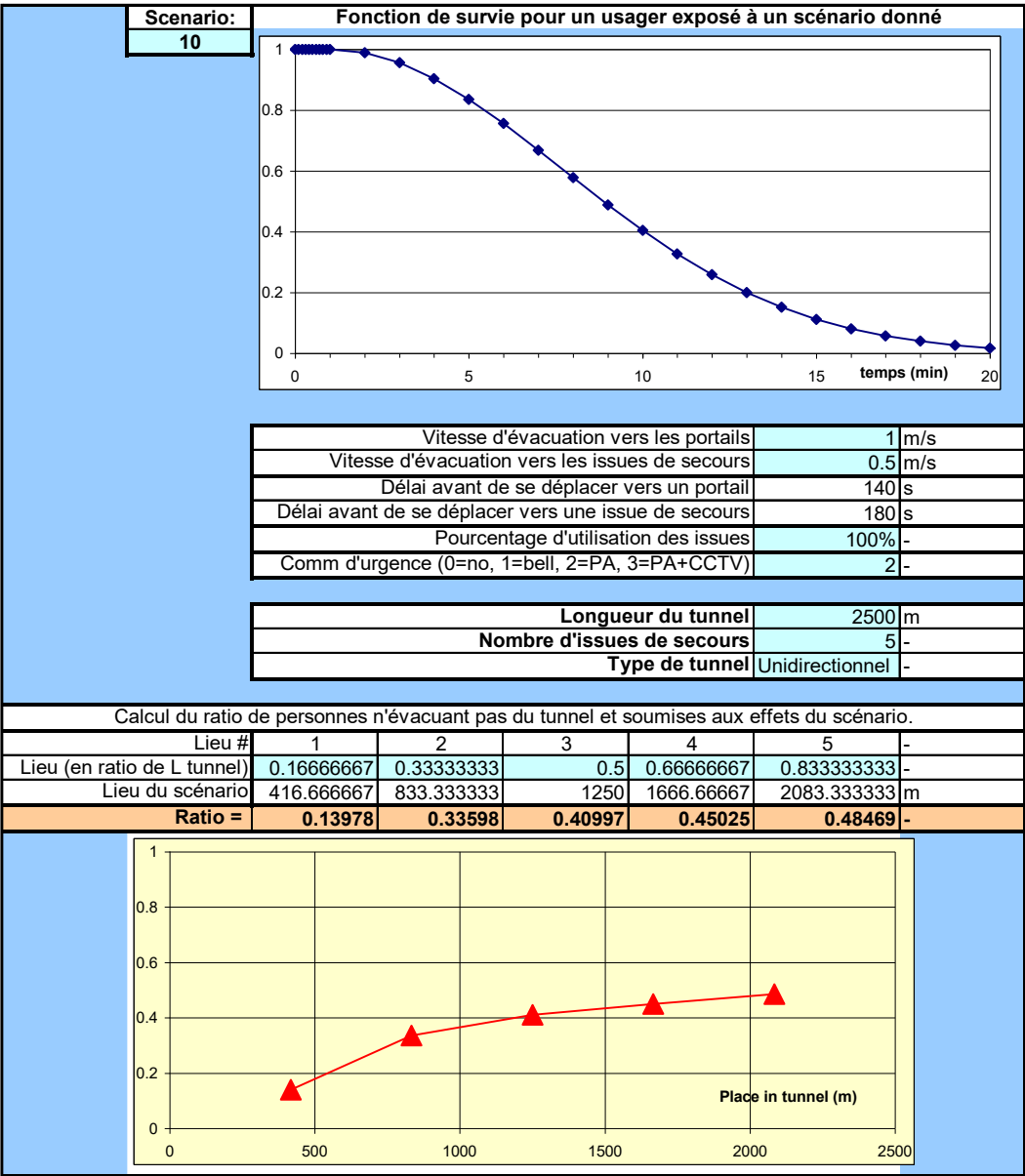


Abb. 9.6 Angepasstes Evakuierungsmodell (hier exemplarisch für Szenario 10)

9.3.7 Sensitivitätsanalysen

Im Rahmen der Modellentwicklung wurde zahlreiche Sensitivitäts- und Plausibilitätsanalysen durchgeführt, um die Anpassungen am Modell zu überprüfen. Untersucht wurden dabei anhand eines fiktiven Beispieltunnels (u.a. auch vergleichend mit dem ursprünglichen OECD/PIARC Standard Modell) verschiedene Parameter hinsichtlich des Einflusses auf die resultierenden Risiken bzw. deren Charakteristik (Verlauf der Summenkurve) analysiert. Dabei wurden sowohl Analysen für die Gesamtrisiken wie auch für einzelne spezifische Szenarien durchgeführt. Untersucht wurden dabei alle Parameter, welche bei der Umsetzung von Stufe 1 des Vorgehens berücksichtigt werden.¹⁸

Nachfolgend sind zwei Sensitivitätsbetrachtungen in Abb. 9.7 und Abb. 9.8 exemplarisch dargestellt:

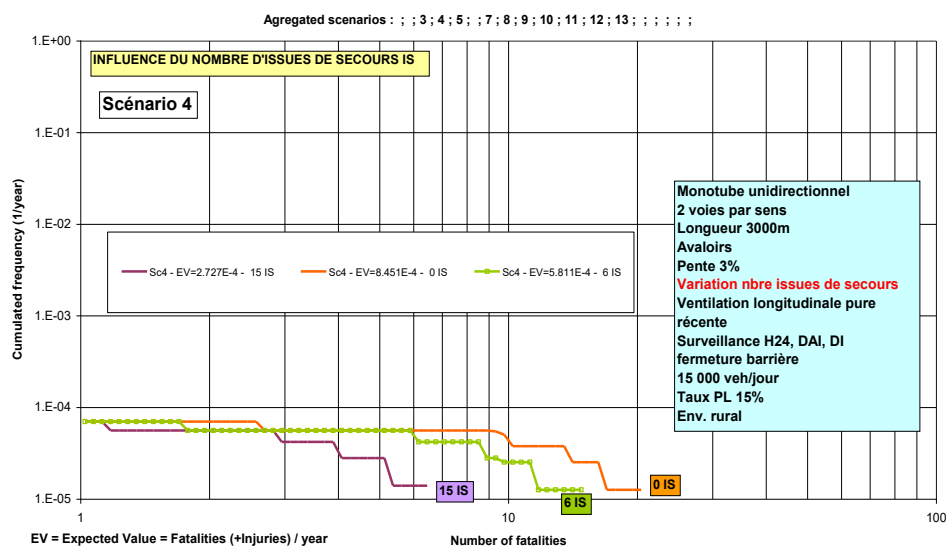


Abb. 9.7 Beispiel Sensitivitätsbetrachtung Einfluss Notausgänge

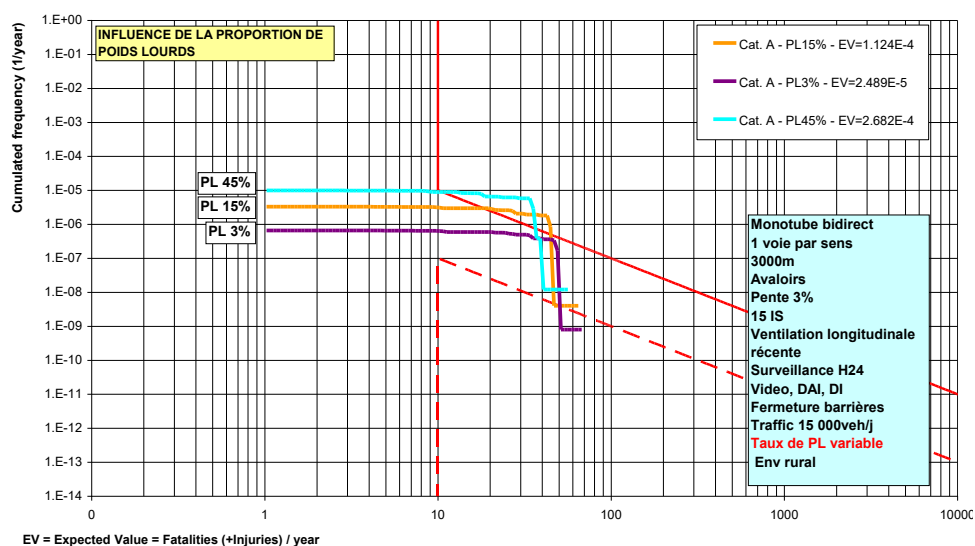


Abb. 9.8 Beispiel Sensitivitätsbetrachtung Einfluss Schwerverkehrsanteil¹⁹

¹⁸ Die Modellanpassungen wirken sich analog auch Stufe 2 des Vorgehens aus (detaillierte Risikountersuchung).

¹⁹ Die Ergebnisse sind nicht auf eine Längeneinheit von 100 m normiert, wie das ansonsten gemäß StfV üblich ist. Für die vorliegende (relative) Analyse ist dies jedoch nicht von Belang.

Darüber hinaus wurden im Rahmen eines technisch notwendigen Updates des Tools zusätzliche Sensitivitätsstudien zur Durchschnittsgeschwindigkeit durchgeführt, um die Fähigkeit des Modells zur Simulation von Stausituationen zu testen. Diese sind in Anhang VI in Absatz VI.5 dargestellt.

10 Grobbeurteilung: Ausschlusskriterien

10.1 Einleitung

Im Rahmen des Projektes wurden u.a. als Teil der Stufe 1 des Vorgehens auch verschiedene Ansätze zur Verwendung pragmatischer Ausschlusskriterien diskutiert, um den Analyseaufwand gering zu halten. Ziel war es, anhand einfacher, pragmatischer Kriterien diejenigen Tunnel zu identifizieren, für welche mit wenig Aufwand ausgeschlossen werden kann, dass Handlungsbedarf hinsichtlich weitergehender Massnahmen besteht.

Der nachfolgend beschriebene Ansatz wurde letztlich in der Umsetzung nicht berücksichtigt, soll aber der Vollständigkeit halber hier dokumentiert sein.

10.2 Diskutierter Ansatz

Im Rahmen der Projektbearbeitung wurden verschiedene Varianten geprüft, wie die Umsetzung dieser ersten Substufe erfolgen könnte. U.a. wurde dabei auch eine Überprüfung anhand massgeblicher Tunnelcharakteristika geprüft, wie dies beispielsweise in ähnlicher Form in Deutschland im Zuge der Umsetzung der Umsetzung der ADR-Forderungen durchgeführt wird.

Abb. 10.1 zeigt einen entsprechenden Entwurf eines Entscheidungsbaumes mit den zugehörigen Tunneleigenschaften, der für eine mögliche erste Grobbeurteilung diskutiert wurde.

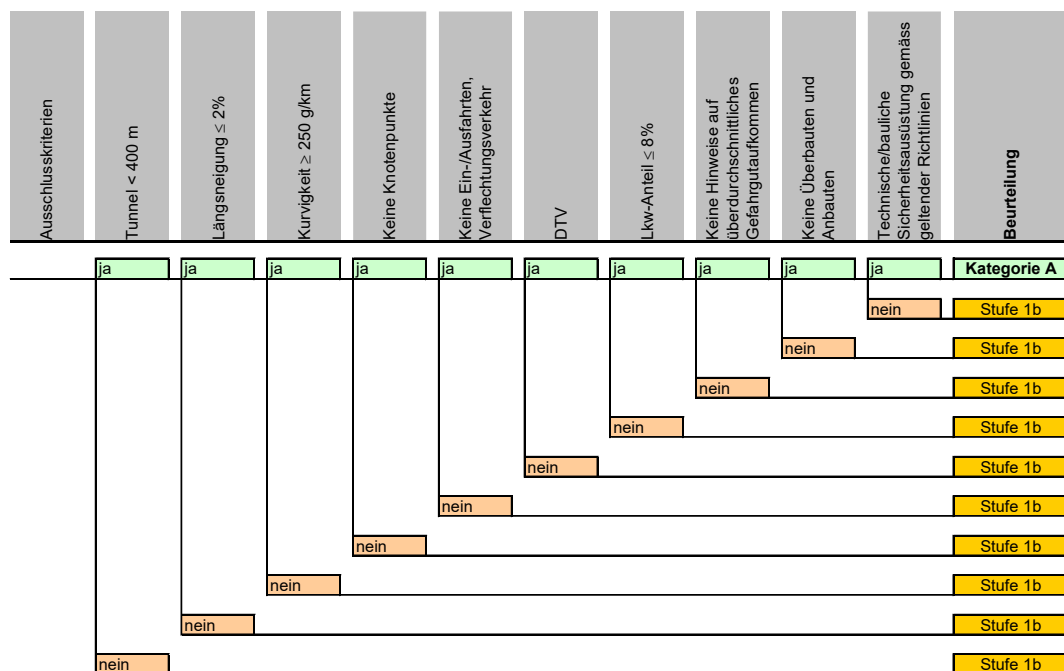


Abb. 10.1 Entscheidungsbaum als möglich methodische Grundlage (Entwurf)

Aufgrund von Anwendungen anhand von Fallbeispielen zeigte sich, dass aus dem Vorgehen mittels Entscheidungsbaum mutmasslich nur wenige Tunnel resultieren dürften, welche nicht in der Stufe 1 zu untersuchen wären. Zudem bestand aufgrund der oben dargelegten Einbettung der ADR-Anforderungen in das Verfahren der StfV der Bedarf, dass entsprechende Grundlagen wie beispielsweise die Erkenntnisse aus bestehenden Kurzberichten, Risikoermittlungen oder anderen vergleichbaren Grundlagen in das Vorgehen einbezogen werden können. Dennoch zeigten die Analyse und die Diskussionen in der Projektgruppe, dass einzelne Kriterien – insbesondere ein Längenkriterium – als Ausschlusskriterium geeignet sind.

Für die Umsetzung wurden schliesslich folgendes Kriterien herangezogen bzw. abgeleitet: Für Tunnel mit einer Gesamtlänge von weniger als 300 m können im Sinne der vorliegenden Fragestellung vereinfachend als offene Strecken angenähert werden. Voraussetzung ist die Erfüllung der massgeblichen Anforderungen aus Blickwinkel des Stands der Technik (Art. 3 gemäss StFV). Zur Bestimmung der Tunnellänge ist bei Tunneln mit mehr als einer Röhre die jeweils längste Röhre massgebend.

Für die Festlegung des Längenkriteriums von 300 m wurden zum einen Betrachtungen zu den massgeblichen Gefahrgutwirkungen angestellt und zum anderen wurde eine Analyse der geltenden regulatorischen Vorgaben für Tunnel vorgenommen. Die Untersuchungen zu den massgeblichen Gefahrgutwirkungen haben gezeigt, dass aufgrund der resultierenden Wirkdistanzen sowie der maximalen Fluchtwegdistanzen für kurze Tunnel der Unterschied der Risiken im Vergleich zu offenen Strecken insgesamt vergleichsweise klein ist. Dies gilt natürlich nicht für alle Gefahrgutwirkungen (Brand, Druckwirkungen, Toxizität etc.) in gleichem Masse. Im Sinne einer pragmatischen Betrachtung kann jedoch von dieser Vereinfachung ausgegangen werden. Je nach Art des Szenarios bzw. der resultierenden massgeblichen Gefahrgutwirkung gilt diese Vereinfachung für Tunnellängen bis zu wenigen hundert Metern.

Für die Festlegung der Grenze von 300 m wurde auch auf die SIA-Norm 197/2 [8] abgestützt, welche für Tunnel ab einer Länge von 300 m die Vorkehrung der Sicherheitseinrichtungen verlangt. Zudem wurden anhand pragmatischer Abschätzungen auch die "typischen" Wirkdistanzen für Gefahrgutszenarien in die Überlegungen einbezogen.

Im Kontext mit dem hier erörterten Ansatz wurde auch die Frage diskutiert, wie mit etwaigen bereits vorliegenden Ergebnissen aus bestehenden Untersuchungen (z.B. Kurzberichte nach StFV) umzugehen ist: Es hat sich jedoch gezeigt, dass hierzu keine allgemeingültigen Kriterien festgelegt werden können. Vielmehr ist eine individuelle Beurteilung der vorliegenden Grundlagen vorzunehmen. Dabei sind beispielsweise Fragen zur Aktualität, zur Aussagekraft etc. der Grundlagen zu beantworten. Im Rahmen der Umsetzung des StFV-Verfahrens ist beispielsweise durch die zuständige Vollzugsbehörde zu prüfen, ob die Angaben im Kurzbericht ausreichend sind um den Bedarf hinsichtlich weitergehender Untersuchungen erforderlich sind. Diese Vorgehensweise entspricht bereits der heutigen Praxis im Rahmen des Vollzugs der StFV und stellt im Vergleich zur heutigen Situation keine Veränderung dar. Bereits heute müssen die zuständigen Vollzugsstellen der StFV beim Bund bzw. bei den Kantonen aufgrund der Ergebnisse aus Kurzberichten und etwaigen zusätzlichen Untersuchungen entscheiden, ob weitergehende Massnahmen im Sinne von Art. 3 StFV und/oder eine weitergehende Untersuchung der Risiken (Art. 6 StFV Absatz 4 Risikoermittlung) erforderlich sind. Eine Grundlage für die Beurteilung des Erfordernisses nach einer weitergehenden Untersuchung der Risiken bildet die so genannte Häufigkeit einer schweren Schädigung, die Kurzberichten zu ermitteln ist:

- Ist die Häufigkeit grösser oder gleich $5 \cdot 10^{-6}$ pro 100 m und Jahr, verfügt die Vollzugsbehörde für das untersuchte Streckensegment und den entsprechenden Schadenindikator eine Risikoermittlung nach Artikel 6 Absatz 4 StFV. Diese Streckensegmente sollen im Rahmen des Vollzugs der StFV prioritär behandelt werden, bevor dann auch die Streckensegmente mit kleineren Häufigkeiten untersucht und beurteilt werden.
- Ist die Häufigkeit kleiner als $5 \cdot 10^{-6}$ pro 100 m und Jahr, entscheidet die Vollzugsbehörde, ob für das untersuchte Streckensegment und den entsprechenden Schadenindikator eine Risikoermittlung nach Artikel 6 Absatz 4 StFV zu verfügen ist. Bei ihrem Entscheid berücksichtigt die Vollzugsbehörde insbesondere den zu erwartenden Verlauf der Risikosummenkurve im Ausmassbereich über der schweren Schädigung. Zur Abschätzung dieses Verlaufs kann die Vollzugsbehörde die Erfahrungen aus der Einschätzung der Häufigkeiten in den Kurzberichten, aus Pilot-Risikoanalysen, aus generischen Risikostudien über den ganzen Verkehrsweg und aus den oben verfügbaren Risikoermittlungen benützen.
- Zeigt die Abschätzung, dass die zu erwartende Risikosummenkurve nicht in den nicht akzeptablen Bereich reicht und ist die Häufigkeit kleiner als kleiner als $5 \cdot 10^{-8}$ pro 100 m und Jahr, so soll auf eine Risikoermittlung nach Artikel 6 Absatz 4 StFV – ausser in gut begründeten Fällen – verzichtet werden.

11 Grobbeurteilung: Vereinfachte Abschätzung des intrinsischen Risikos (Stufe 1)

11.1 Einleitung

In der Stufe 1 werden anhand eines spezifisch auf die Bedürfnisse für die Anwendung in der Schweiz angepassten QRA-CH Modells die Risiken für die massgeblichen Gefahrgutwirkungen quantifiziert und in Form von Summenkurven in einem Häufigkeits-Ausmass-Diagramm dargestellt. Ziel der Stufe 1 ist die Klärung der Frage, ob eine weitergehende, detaillierte Analyse der Risiken erforderlich ist. Die Beurteilung erfolgt anhand der Beurteilungskriterien zur StFV [17].

11.2 Umsetzung

11.2.1 QRA-CH Modell vereinfacht

Basis für die Umsetzung von Stufe 1 bildet das QRA-CH Modell, das wie in Kapitel 9 beschrieben, für die Anwendung im Kontext mit den in der Schweiz geltenden Beurteilungskriterien zur StFV [17] angepasst wurden.

Im Rahmen der Projektentwicklung hat sich gezeigt, dass für die Umsetzung der Stufe 1 für eine effiziente Umsetzung weitere Vereinfachungen im QRA-CH Modell zweckmässig sind, um den erforderlichen Aufwand für die Ermittlung der Risiken zu vermindern. Aus diesem Grund wurde ausgehend vom QRA-CHModell das "QRA-CHModell vereinfacht" entwickelt. Die Berechnung des Risikos stützt sich dabei auf 17 einzugebende Parameter, welche mittels einer einfachen Eingabeoberfläche durch den Anwender eingegeben werden. Die einzugebenden Parameter umfassen die bauliche und betriebliche Ausgestaltung sowie Angaben zu den Verkehrsverhältnissen und der Art der Umgebung:

- **Bauliche Angaben:** Tunneltyp, Anzahl Fahrspuren, Länge, Entwässerungssystem, mittlere Längsneigung, Anzahl Notausgänge, Typ des Lüftungssystems und Ausführungsstandard des Lüftungssystems
- **Betrieb:** Überwachungstyp, Automatische Ereignisdetektion, Branddetektion, Absperrmöglichkeit
- **Verkehr und Umgebung:** Durchschnittlicher täglicher Verkehr (DTV), Anteil Schwerverkehr, Art der Umgebung

Die nachfolgende Tab. 11.1 gibt eine zusammenfassende Übersicht über die einzugebenden Parameter des QRA-CHModells vereinfacht:

Tab. 11.1 Parameter QRA-CH Modell vereinfacht.

Parameter	Wert	Bemerkungen
Allgemeine Angaben		
Tunneltyp [-]	- Einröhrig mit Gegenverkehr	1 Röhre mit 2 Fahrtrichtungen
	- Zweiröhrig mit Richtungsverkehr	2 Röhren (1 Fahrtrichtung pro Röhre)
	- Einröhrig mit Richtungsverkehr	1 Röhre mit 1 Fahrtrichtung
Anzahl Spuren pro Fahrtrichtung [-]		Für einröhrigen Tunnel: Spuren pro Fahrtrichtung Für zweiröhrigen Tunnel: Anzahl Spuren pro Röhre
Länge pro Röhre [m]		Für einröhrigen Tunnel: Röhrenlänge eingeben Für zweiröhrigen Tunnel:

Tab. 11.1 Parameter QRA-CH Modell vereinfacht.

Parameter	Wert	Bemerkungen
		mittlere Länge eingeben
Entwässerungssystem	[-] - Durchgehende Schlitzrinne - Einlaufschächte	
Mittlere Längsneigung	[%]	Mittlere Längsneigung: - Höhendifferenz zwischen Portalen geteilt durch Tunnellänge oder - Gewichtetes Mittel (z. B. +1 % auf 500 m und 0 % auf 500 m = 0,5 % mittlere Neigung)
Anzahl Notausgänge pro Röhre	[-]	
Lüftung		
Lüftungsart, die im Brandfall zum Schutz der Benutzerinnen und Benutzer zum Einsatz kommt	[-] - Natürliche Lüftung - Reine Längslüftung - Längslüftung mit konzentrierter Absaugung - Mit Absaugung	Keine mechanische Lüftung Rauch in Fahrtrichtung wegtreiben Rauch in Fahrtrichtung wegtreiben und punktuell hinter dem Brandherd absaugen Rauch absaugen in Abluftkanal
Lüftungssystemdesign	[-] Alt Neu	Unrenovierter alter Tunnel (erfüllt die Anforderungen der aktuell gültigen Normen nicht) Neuer oder renovierter Tunnel (erfüllt die Anforderungen der aktuell gültigen Normen)
Betrieb		
Überwachungsniveau	[-] - Keine Überwachung - Tagsüber durch Personal - 24 h durch Personal	Überwachung = Eingriff durch Überwachungspersonal möglich
Automatische Ereignisdetektion	[-] Ja/Nein	Ist ein Videoanalysesystem für die automatische Alarmauslösung bei ungewöhnlichen Ereignissen im Tunnel vorhanden?
Branddetektion	[-] Ja/Nein	Gibt es im Tunnel ein Brandmeldesystem (welches einen Temperaturanstieg erkennt)?
Barriere oder Lichtsignalanlage bei Portalen	[-] Ja/Nein	Gibt es an den Tunnelportalen Schranken oder eine Signalanlage, die im Brandfall aktiviert werden?
Verkehr		
Durchschnittlicher Tagesverkehr	[Fz/d]	Durchschnittliche tägliche Anzahl Fahrzeuge im Tunnel: - Gesamthaft (für beide Fahrtrichtungen) bei zweiröhren Tunneln und bei einröhren Tunneln mit Gegenverkehr - In der betrachteten Röhre (bei einröhren Tunnel mit Richtungsverkehr)
Wenn verfügbar: Anteil Schwerverkehr am DTV	[%]	Wenn das Feld nicht ausgefüllt ist, Standardwert = 6 %
Unfallrate	[Unfälle / Fz-km] - Vorgabewert	Der Standardwert ist abhängig von der Verkehrsführung im Tunnel (Richtungsverkehr oder Gegenverkehr). Der spezifische Wert ist frei wählbar.

Tab. 11.1 Parameter QRA-CH Modell vereinfacht.

Parameter	Wert	Bemerkungen
	- Spezifisch	
Umgebung		
Angaben zur Umgebung	[-]	- Ländlich
		- Städtisch
		Besiedlungsdichte in der Umgebung des Tunnels

Das Modell berücksichtigt neben den Werten, die durch den Anwender spezifiziert werden, zahlreiche weitere tunnelspezifische Parameter. Diese werden entweder aufgrund der Eingabewerte abgeleitet (z. B. Ermittlung Tunnelquerschnitt aufgrund Anzahl Fahrspuren) oder es sind Standardwerte hinterlegt (z. B. Querneigung). Im Gegensatz zum QRA-CH Modell werden aber einzelne Tunnelcharakteristika vereinfachend bzw. zusammenfassend abgebildet. Beispiele hierfür sind:

- Tunneltyp: Es werden 1- und 2-röhrige Tunnel mit Richtungs- bzw. Gegenverkehr unterschieden. Mehrröhrige Tunnel können mit dem QRA-CH Modell vereinfacht grundsätzlich auch abgebildet werden, dies bedarf jedoch vertiefter Modellkenntnisse.²⁰
- Tunnellüftung: Das QRA-CH Modell ermöglicht eine detaillierte Modellierung der Lüftungssituation im Tunnel für verschiedene Tunnelabschnitte. So lassen auch komplexe Lüftungssysteme im Modell abbilden. Die Umsetzung ist jedoch aufwändig und bedarf Kenntnisse im Bereich der Lüftungssysteme. Zudem ist in den meisten Fällen auch die Implementierung aus detaillierten Lüftungsuntersuchungen erforderlich. Für das QRA-CH Modell vereinfacht werden vier verschiedene Grundtypen von Tunnellüftungssystemen berücksichtigt:
 - Natürliche Lüftung
 - Reine Längslüftung
 - Längslüftung mit konzentrierter Absaugung
 - Querlüftung
- Zusätzlich wird im QRA-CH Modell vereinfacht berücksichtigt, ob das Lüftungssystem die geltenden normativen Anforderungen erfüllt oder nicht. Über diesen Parameter werden im Modell vereinfachend die Angaben zur Dimensionierung der Lüftung abgeleitet. Für die Standardtypen sind u. a. für die Kapazität und das Betriebsregime im Ereignisfall Normwerte hinterlegt. Zur Abbildung im Modell ist derjenige Lüftungstyp zu wählen, welcher bezüglich der Wirkung im Ereignisfall am ehesten der vorhandenen Lüftung entspricht. Kann der tatsächliche Lüftungstyp in diesem Sinne nicht genügend genau angenähert werden, ist insbesondere angesichts der grossen Relevanz dieses Parameters sind Sensitivitätsbetrachtungen bzw. eine vertiefte Analyse gemäss Stufe 2 des Vorgehens vorzunehmen.
- Längsneigung: Der Tunnel wird über eine mittlere Längsneigung abgebildet. Im QRA-CH Modell können im Gegensatz dazu unterschiedliche, abschnittsspezifische Längsneigungen eines Tunnels abgebildet werden.

Für die Umsetzung wurde eine spezifische Eingabemaske für das QRA-CH Modell vereinfacht entwickelt (vgl. Abb. 11.1)

²⁰ Dazu müssen die Ergebnisse mehrerer Berechnungen verknüpft werden.

NOM DU CAS : (utilisé pour les noms des fichiers de données et de résultat)	Exemple	Entrer le nom du cas en cellule C2 Les caractères acceptés sont: A-Z a-z 0-9 - Le 1er caractère est obligatoirement une lettre Un bug d'Excel interdit les noms débutant par C ou c immédiatement suivi d'un chiffre autre que 0	
Caractéristiques géométriques		Indications pour le remplissage des données	
Type de tunnel	Bitube unidirectionnel	Choix possibles (liste) = Monotube bidirectionnel : 1 seul tube avec 2 sens de circulation Bitubes unidirectionnel : 2 tubes avec 1 sens de circulation par tube Monotube unidirectionnel : 1 seul tube avec 1 seul sens de circulation Si le tunnel ne correspond à aucun de ces cas, le préciser en commentaire (par exemple 3 tubes)	Voir schéma explicatif
Nombre de voies par sens	2	Pour un tunnel monotube : indiquer le nombre de voies par sens de circulation Pour un tunnel bitubes : indiquer le nombre de voies par tube Si le nombre de voies est différent par sens, ou s'il varie dans l'ouvrage, l'indiquer en commentaire	
Longueur par tube (en m)	1 200	Indiquer la longueur d'un tube Pour un tunnel bitubes, si les longueurs respectives des 2 tubes sont différentes de plus de 10% environ, l'indiquer en commentaire. Sinon calculer une moyenne des 2 longueurs	
Système d'assainissement	caniveau à fente continue	Choix possibles (liste) = Caniveau à fente continu Avaloirs Si aucun système d'assainissement n'existe dans le tunnel, le préciser en commentaire	
Pente moyenne (en %)	2.0%	Indiquer la pente moyenne = - Différence de hauteurs entre têtes divisée par la longueur du tunnel ou - Moyenne pondérée des pentes (ex. +1% sur 500 m et 0% sur 500 m = 0.5% en moyenne)	
Nombre d'issue(s) de secours par tube	3	Indiquer le nombre d'issues de secours par tube Pour un tunnel bitubes, si le nombre d'issues est différent entre les 2 tubes, le préciser en commentaire et indiquer le nombre d'issues pour chaque tube	
Ventilation			
Type de ventilation utilisée en cas d'incendie pour la sauvegarde des usagers	Longitudinale avec extraction massive	Choix possibles (liste) de ventilation en cas d'incendie = Naturelle (pas de système mécanique) Longitudinale pure : souffler toutes les fumées dans le sens de la circulation Longitudinale avec extraction massive : pousser toutes les fumées dans le sens de la circulation et aspirer les fumées ponctuellement en aval de l'incendie Avec aspiration : aspirer les fumées dans un canton de ventilation Si la ventilation du tunnel ne correspond à aucun de ces cas, le préciser dans en commentaire en expliquant le principe de désenfumage en cas d'incendie	
Conception de la ventilation	Ancienne	Indiquer si le dimensionnement des accélérateurs régulant l'écoulement longitudinal est de conception récente ou ancienne. Choix possible (liste) = Ancienne : Tunnel ancien non rénové ou tunnel dépourvu d'accélérateurs de jet Récente : Tunnel neuf ou rénové équipé d'accélérateurs de jet	
Exploitation			
Niveau de surveillance	Surveillance humaine 24h/24	Choix possibles (liste) de types de surveillance (c'est-à-dire qu'en cas d'événement, une action est possible par un opérateur) = Pas de surveillance Surveillance le jour uniquement Surveillance 24 h / 24 Si le type de surveillance ne correspond à aucun de ces cas, le préciser en commentaire	
Détection Automatique d'Incident	oui	Existe-il un système analysant les images vidéos et déclenchant une alarme en cas d'événement anormal dans le tunnel ? (oui ou non)	
Détection Incendie	oui	Existe-il un système de détection incendie dans le tunnel (déclenchant une élévation de température) (oui ou non) Si seule une partie du tunnel est équipée, le préciser en commentaire	
Fermeture télécommandée par barrière ou feu rouge	oui	Existe-il des barrières aux têtes de tunnel activées en cas d'incendie ? (oui ou non)	
Trafic			
Trafic journalier moyen (en véh/jour)	47 000	Nombre moyen de véhicules par jour dans le tunnel : - Total (2 sens confondus) dans les tunnels bitubes ou monotubes bidirectionnels - Dans le tube concerné pour les tunnels monotube unidirectionnels	
Si disponible : % de PL	10.0%	Pourcentage de poids lourds moyen dans le trafic tous véhicules - Si non renseigné, la valeur prise par défaut sera 6%	
Choix des données d'accident	par défaut	Précise si le calcul doit être fait avec le taux d'accident proposé par défaut ou bien avec une valeur spécifique au tunnel	
Taux d'accident PL = 1.17E-7 acc / véh.km	1.00E-07 acc/véhic.km	Valeur par défaut du taux d'accident poids lourds pour un tunnel suisse unidirectionnel.	
Environnement			
Type d'environnement	urbain	Environnement plutôt rural ou plutôt urbain ?	

Abb. 11.1 Eingabemaske QRA-CH Modell vereinfacht

Für einige der einzugebenden Parameter (z.B. Lüftungssystem) ist eine begrenzte Zahl an Auswahlwerten vorgegeben. Kann der betrachtete Fall nicht durch die Auswahlwerte abgebildet werden, so sind die Parameter so zu wählen, dass der Tunnel möglichst realitätsnah abgebildet wird. Bei der Wahl der einzugebenden Parameter ist insbesondere der Abbildung der Lüftungssystems Beachtung zu schenken. Ist eine sinnvolle und hinreichend genaue Abbildung des Tunnels aufgrund besonderer Charakteristiken mit den vorgegebenen Parametern nicht möglich, sind Sensitivitätsbetrachtungen vorzunehmen oder die Stufe 2 des Vorgehens anzuwenden (beispielsweise Tunnel mit mehreren Röhren, Tunnel mit Verzweigung etc.). Ferner sind bei der Interpretation der Ergebnisse die Eingabe-Unschärfen zu berücksichtigen, welche sich aus einer vereinfachten Abbildung der realen Verhältnisse im Modell ergeben haben.

Die resultierenden Risiken werden gemäss den Beurteilungskriterien zur StfV [17] als Summenkurve im Häufigkeits-Ausmass-Diagramm ausgewiesen. Die ermittelte Summenkurve wird auf eine Streckenlänge von 100 m normiert.²¹ Die Abschätzung der Risiken anhand des vereinfachten Modells der Stufe 1 ermöglicht es auch, den Einfluss verschiedener Parameter auf die resultierenden Risiken zu untersuchen. Mögliche Ansätze zur Reduzierung der Risiken (technische, infrastrukturelle oder betriebliche Massnahmen wie z. B. die Kategorisierung nach ADR) können ermittelt werden. bei der Interpretation der Ergebnisse sind jedoch stets auch die Unschärfen und Vereinfachungen des Modells zu berücksichtigen. Es eignet sich dementsprechend auch nicht für die Massnahmenplanung im eigentlichen Sinn

Weitergehende Informationen zu den einzugebenden Parametern des QRA-CH Modell vereinfacht finden sich in Anhang II.

11.2.2 Entwicklung des Modells und Anwendung an Fallbeispielen

Für die Entwicklung und Kalibrierung des QRA-CH Modells bzw. des QRA-CH Modells vereinfacht wurden verschiedene Tunnel als exemplarische Fallbeispiele herangezogen, für welche die Risiken aus dem Gefahrguttransport ermittelt wurden. Insgesamt wurden 33 Tunnel im Rahmen der Entwicklung des Vorgehens untersucht:

Es wurden insgesamt 20 Gegenverkehrstunnel analysiert:

- 2 Tunnel mit einer Länge von weniger als 300 m
- 5 Tunnel mit einer Länge von zwischen 300 m und 1'000 m
- 6 Tunnel mit einer Länge von zwischen 1'000 m und 2'000 m
- 2 Tunnel mit einer Länge von zwischen 2'000 m und 5'000 m
- 5 Tunnel mit einer Länge von mehr als 5'000 m

Es wurden insgesamt 13 Richtungsverkehrstunnel analysiert:

- 3 Tunnel mit einer Länge von weniger als 300 m
- 4 Tunnel mit einer Länge von zwischen 300 m und 1'000 m
- 2 Tunnel mit einer Länge von zwischen 1'000 m und 2'000 m
- 2 Tunnel mit einer Länge von zwischen 2'000 m und 5'000 m
- 2 Tunnel mit einer Länge von mehr als 5'000 m

Bei der Auswahl der Tunnel wurde darauf geachtet, dass ein möglichst repräsentatives Spektrum an Tunnelcharakteristika in den Untersuchungen vertreten war. Grundlage für die Auswertung war insbesondere die Studie "Verkehrssicherheit in Autobahn- und Autostrassentunneln des Nationalstrassennetzes" [24].

Die Ergebnisse der Anwendung des fertig gestellten Modells für die Stufe 1 zeigen, dass davon auszugehen ist, dass für ca. 10% bis 20% der Tunnel zu erwarten ist, dass eine vertiefte Untersuchung (Stufe 2) angezeigt ist. Es gilt hierbei wie für die vorangehenden Stufen festzuhalten, dass ein Ermessensspielraum im Umgang mit den Ergebnissen besteht, wenn die resultierenden Summenkurven im Übergangsbereich des Häufigkeits-Ausmass-Diagramms liegen.

Die Ergebnisse der Anwendung des QRA-CH Modells vereinfacht für die Fallbeispieltunnel sind aus Anhang IV ersichtlich.

²¹ Aufgrund der resultierenden Summenkurven kann bei Bedarf auch die Häufigkeit eines Störfalles mit schweren Schädigungen gemäss Kurzbericht nach StfV abgeleitet werden.

12 Vertiefte Analyse: Detaillierte Ermittlung des intrinsischen Risikos (Stufe 2)

12.1 Einleitung

Ziel der Stufe 2 des Verfahrens ist es, auf Basis einer detaillierten Risikoanalyse für den zu untersuchenden Tunnel den allfälligen Bedarf hinsichtlich weitergehender, risikomindernder Massnahmen zu ermitteln. Stehen mögliche Transportbeschränkungen für Gefahrguttransporte im Sinne von ADR zur Diskussion (Kategorisierung B bis E), so können diese anhand der Stufe 2 des Vorgehens bestimmt werden.

Für die Ermittlung der Risiken wird das QRA-CH Modell angewendet. Dies ermöglicht ein detailliertes Abbilden der ortsspezifischen Tunnel- und Verkehrscharakteristika.

12.2 Umsetzung

12.2.1 Detailliertere Modellierung der risikorelevanten Einflussgrössen

Für die vertiefte Ermittlung der Risiken eines Tunnels sind detaillierte Angaben zum zu untersuchenden Tunnel und dessen Ausstattung erforderlich. Es sind u. a. Kenntnisse erforderlich betreffend folgende Parameter:

- Tunneltyp (Gegenverkehr/Richtungsverkehr, Anzahl Fahrstreifen)
- Geometrie des Tunnels (Länge pro Röhre, Querschnitt, Längenprofil, Querneigung etc.)
- Funktionsweise und Kapazität des Lüftungssystems sowie vorgesehene Betriebsregime im Ereignisfall
- Ausstattung des Tunnels bezüglich Überwachung und Kommunikation
- Ausstattung des Tunnels bezüglich Selbstrettungseinrichtungen (Anzahl und Lage von Notausgängen, Signalisation der Sicherheitseinrichtungen)
- Organisatorische Massnahmen (Ereignisdienste und -konzepte etc.)
- Verkehrsdaten: Verkehrsaufkommen Gesamtverkehr und Schwerverkehr, zeitliche Variation des Verkehrsaufkommens (Tagesganglinie), Stauhäufigkeit pro Tunnelröhre, zulässige Höchstgeschwindigkeit
- Gefahrguttransport: Anteil Gefahrguttransport am Schwerverkehr, Zusammensetzung des Gefahrguttransports bzw. Hinweise auf Abweichung vom schweizerischen Mittel (Industriebetriebe in der Nähe des Tunnels, spezifische Versorgungsrouten etc.)
- Unfallgeschehen: falls vorhanden Auswertung von Daten aus Erhebungen und/oder Berücksichtigung von Hinweisen auf erhöhte oder verminderte Unfallrate gegenüber dem schweizerischen Mittel (beispielsweise aufgrund besonderer Charakteristiken wie hohe Kurvigkeit oder schlechte Sichtverhältnisse)
- Umgebungsbedingungen (Personenexposition/Bevölkerungsdichte im Bereich der Tunnelportale).

Wie auch für Stufe 1 sind bei der Ermittlung der Risiken geplante Veränderungen am Tunnel (bauliche/technische oder betriebliche Massnahmen) zu berücksichtigen, d.h. es ist der zukünftige Betriebszustand nach Abschluss der Veränderungen zu untersuchen.

12.2.2 Anwendung QRA-CH Modell

Die Umsetzung mittels QRA-CH Modell ist für den Benutzer analog zur Anwendung des OECD/PIARC Standardmodells. Für die Anwendung wird auf das Handbuch zur Software verwiesen. Die Eingabeoberfläche „CH Interface saisie données étape 2“ unterstützt den Anwender bei der Eingabe der Daten. Detaillierte Hinweise zur Dateneingabe sind in Anhang IV aufgeführt.

Die Anpassungen für die Verwendung des Modells in der Schweiz sind in Kapitel 9.3 dargestellt.

12.2.3 Sicherheitsmassnahmen: Grundsatz

Werden aufgrund der Beurteilung der Risiken zusätzliche Sicherheitsmassnahmen als zweckmässig beurteilt, so ist von folgendem Grundsatz auszugehen:

- Sind zusätzliche Sicherheitsmassnahmen erforderlich, so sind vorrangig baulich/technische Massnahmen zu prüfen. Hierfür sind die geltenden regulativen Vorgaben zu berücksichtigen.
- Erweisen sich baulich/technische Massnahmen als nicht umsetzbar bzw. wirtschaftlich nicht tragbar oder nicht hinreichend, um ein akzeptables Sicherheitsniveau zu erreichen, so sind organisatorisch/betriebliche Massnahmen zu prüfen.

12.2.4 Betriebliche Sicherheitsmassnahmen

Sind betriebliche organisatorische Massnahmen treffen, so stehen insbesondere die Aspekte der Einsatz-/Interventionsplanung im Vordergrund. Für die Erarbeitung der Einsatzplanung wird auf den Bericht der Untergruppe "Einsatzplanung" der "Arbeitsgruppe Transport gefährlicher Güter Schweiz" (AGr TgG-CH) [22]hingewiesen. Weitere organisatorische Massnahmen bieten sich z. B. in den Bereichen Verkehrssteuerung und -lenkung, Förderung des richtigen Verhaltens der Strassenbenützer sowie SDR-Kontrollen an.

Im Rahmen des Projektes wurden folgende zusätzlichen organisatorischen Sicherheitsmassnahmen hinsichtlich Wirksamkeit, Umsetzbarkeit und den Erfahrungen im Ausland untersucht:

- Zeitliche Beschränkung von Gefahrguttransporten
- Eskortierung von Gefahrgutfahrzeugen
- Konvoibildung von Gefahrgutfahrzeugen

Generell lässt sich festhalten, dass im Rahmen einer Umfrage im Ausland nur wenig gehaltvolle Informationen ermittelt werden konnten. Für einige Tunnel (z.B. in Österreich) werden Eskortierungen von Gefahrguttransporten durchgeführt.

Zeitliche Beschränkung von Gefahrguttransporten

Diese Massnahme findet heute für drei Tunnel in der Schweiz Anwendung. Untersucht wurde im Rahmen des Projektes eine Sperrung während der Nacht bzw. während des Tages. Die Analyse der Massnahmen hat gezeigt, dass die zu erwartende Risikominderung insgesamt nur gering ist.

- Eine Sperrung des Tunnels während der Nacht – wie sie für die drei erwähnten Tunnel umgesetzt wird – bringt faktisch nur eine geringe Risikominderung, da der Gefahrgutverkehr zu den Hauptverkehrszeiten mit entsprechend höherem Verkehrsaufkommen und zugehöriger Personenexposition verkehrt. Die praktischen Konsequenzen für den Gefahrgutverkehr sind entsprechend gering.
- Bei einer Sperrung des Tunnels während der Nacht bestehen aufgrund des Nachtfahrverbots für den Schwerverkehr bereits heute Restriktionen. Es kann aber davon ausgegangen werden, dass die Unfallhäufigkeit aufgrund des vergleichsweise geringeren Verkehrsaufkommens etwas abnimmt und die Personenexposition im Ereignisfall im Mittel geringer ist als bei einem Ereignis während des Tages. Es ist aber zu erwarten, dass eine Sperrung während des Tages faktisch einer vollständigen Sperrung gleichkommen würde.

Eskortierung

Bei einer Eskortierung werden die Gefahrgutfahrzeuge bei der Durchfahrt durch den Tunnel von einem oder mehreren Begleitfahrzeugen eskortiert. Durch die Massnahme kann davon ausgegangen werden, dass die Wahrscheinlichkeit eines Unfalls bei der Tunneldurchfahrt vermindert werden kann. Risikoe erhöhend kann sich demgegenüber aber auswirken, dass die Gefahrgutfahrzeuge zusätzliche Manöver (Verlassen der Strasse zu einem Ausstellplatz, Abstellen des Fahrzeuges, etc.) durchführen müssen. Kommt es zu einem Unfall, so ist davon auszugehen, dass das resultierende Schadenausmass etwa gleich ist wie für den Fall ohne Eskortierung, da die Zahl der im Tunnel exponierten Personen durch die Massnahme nicht verändert wird.

In der nachfolgenden Abb. 12.1 wurde die risikomindernde Wirkung der Massnahme für einen exemplarischen Tunnel grob abgeschätzt.

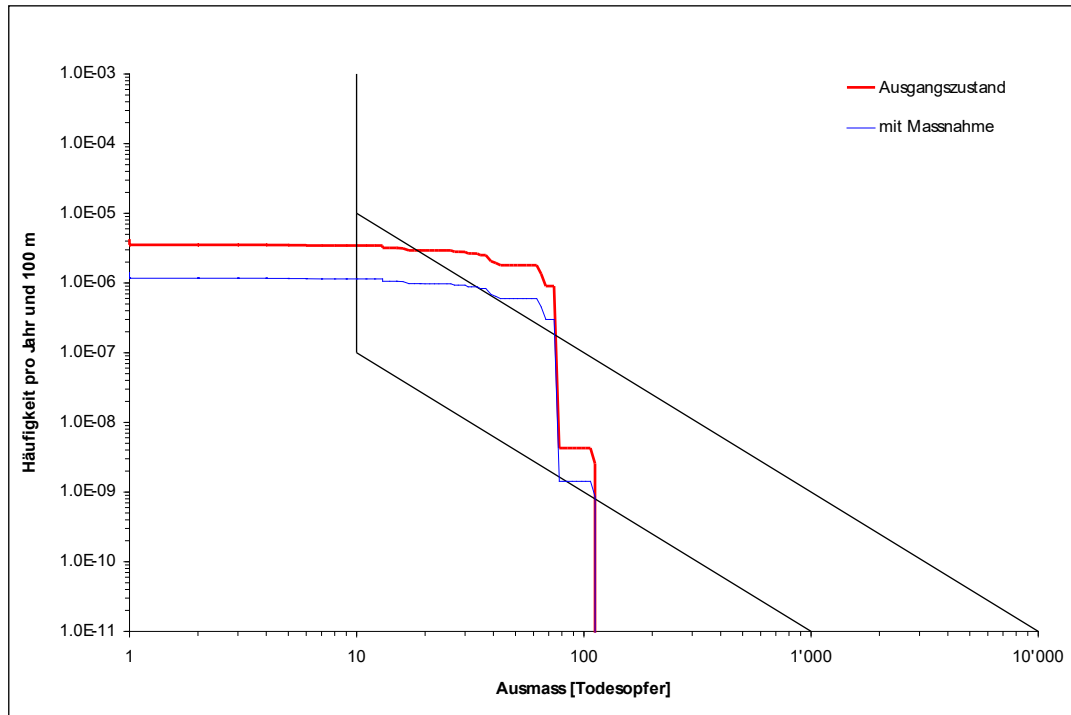


Abb. 12.1 Abschätzung der risikomindernden Wirkung der Eskortierung

Hinsichtlich der praktischen Konsequenzen gilt es festzuhalten, dass die Umsetzung der Massnahme erheblichen Aufwand erfordert. Zu berücksichtigen sind

- Ausstellflächen mit ausreichenden Platzverhältnissen (inkl. Bewirtschaftung etc.)
- Personal / Begleitfahrzeuge
- Zeitverlust für Transportteure

Faktisch ist davon auszugehen, dass eine Umsetzung der Massnahme in vielen Fällen dazu führen würde, dass der entsprechende Tunnel von den Gefahrgutfahrzeugen umfahren wird, sofern eine Alternativstrecke vorliegt, die mit verhältnismässigem Mehraufwand genützt werden kann.

Konvoibildung

Bei der Eskortierung wird der Tunnel temporär gesperrt und mehrere Gefahrgutfahrzeuge in einem Konvoi durch den Tunnel geführt. Die Massnahme führt sowohl zu einer Minderung der Häufigkeit eines Unfalls und aufgrund der während der Sperrung für den Normalverkehr geringeren Personenexposition auch zu einem geringeren Schadenausmass im Ereignisfall. Risikoerhöhende Auswirkungen sind aber wie für die Massnahme Eskortierung ebenfalls möglich. Exemplarisch wurde auf Basis einer groben Abschätzung eine Quantifizierung der Risikominderung der Massnahme für einen exemplarischen Tunnel abgeschätzt (Abb. 12.2).

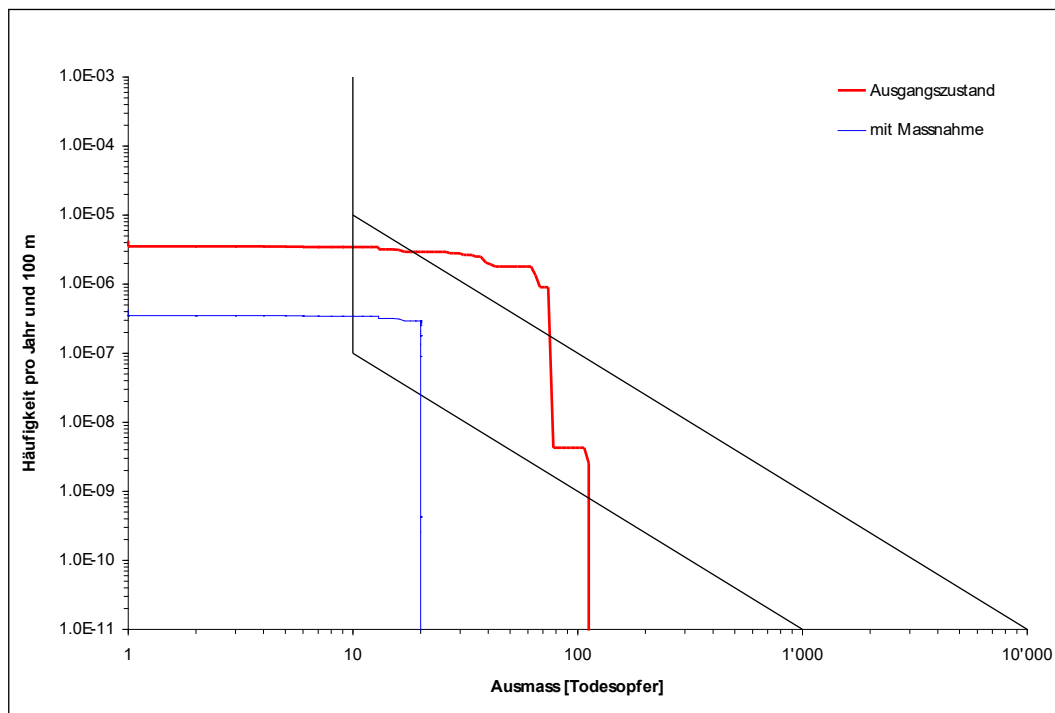


Abb. 12.2 Abschätzung der risikomindernden Wirkung der Konvoibildung

Die Umsetzung der Massnahme bringt wie die Eskortierung erhebliche praktische Konsequenzen mit sich. Die praktischen Auswirkungen dürften sogar noch grösser sein. Neben dem erhöhten Platzbedarf für das Ausstellen der Gefahrgutfahrzeuge zur Bildung der Konvois stellt insbesondere die erforderliche temporäre Sperrung des Tunnels für den Gesamtverkehr eine erhebliche Einschränkung dar, die insbesondere auf Strecken mit hohem Verkehrsaufkommen dazu führen dürfte, dass eine Umsetzung der Massnahme wenig praktikabel ist.

Abgeleitete Empfehlungen zur Umsetzung

Aufgrund der Untersuchungen wurde die Empfehlung abgeleitet, dass zeitliche Beschränkungen nur in Ausnahmefällen prüfenswert sind. Hinsichtlich der Massnahmen Eskortierung und Konvoi wurden die nachfolgenden Kriterien abgeleitet, in welchen Fällen die Umsetzung dieser Massnahmen sinnvoll sein kann. Die Kriterien sind jedoch im Einzelfall zu prüfen:

- Zweckmässigkeit: Die Umsetzung führt nicht zu einer relevanten Umlagerung des Gefahrgutverkehrs auf Alternativstrecken.
- Umsetzbarkeit: Die erforderlichen Ressourcen/Kapazitäten zur Umsetzung können jederzeit bereitgestellt werden, so dass ein reibungsloser Betrieb gewährleistet werden kann.
- Umsetzbarkeit: Es sind in geeigneter Distanz zum Tunnel hinreichende Platzkapazitäten für geeignete Ausstellflächen vorhanden.
- Verkehr: Die Verkehrsführung von/zu den Ausstellflächen birgt keine aussergewöhnlichen Risiken (keine komplexen Verflechtungen).
- Verkehr: Die Einführung der Massnahme führt zu keiner unverhältnismässigen Behinderung des übrigen Verkehrs.
- Alternativen: Organisatorische Massnahmen können als Übergangslösung vorgesehen werden, falls innerhalb angemessener Frist keine anderen (baulich/technischen) Massnahmen verfügbar sind.
- Wie die Untersuchungen gezeigt haben, hat die zeitliche Beschränkung von Gefahrguttransporten hat i.d.R. nur geringe risikomindernde Wirkung. Dementsprechend wird empfohlen, diese Massnahme nur in Einzelfällen nach vorangehender Prüfung der ortspezifischen Wirkung umzusetzen.

12.2.5 Beschränkung von Gefahrguttransporten gemäss ADR

Kategorisierung A, B oder C gemäss ADR

Die Massnahme der Beschränkung für Gefahrguttransporte im Sinne des ADR kann anhand der Ergebnisse der vertieften Ermittlung der Risiken gemäss Stufe 2 festgelegt werden. Die Risiken werden für jede Tunnelkategorie einzeln ausgewiesen und beurteilt. Die Festlegung der Tunnelkategorie A, B oder C und D basiert auf der Untersuchung des Einflusses der zugehörigen Szenarien im OECD/PIARC Standardmodell bzw. QRA-CH Modell. Für die Unterscheidung der Tunnelkategorien D bzw. E werden zusätzliche Aspekte berücksichtigt.

Die elf Szenarien des OECD/PIARC Standardmodells bilden die drei Hauptwirkungen Brand, Explosion und Toxizität gemäss den Tunnelkategorien des ADR ab. Durch Gruppierung der entsprechenden Szenarien lassen sich die Risiken für bestimmte Tunnelkategorien bestimmen (Tab. 12.1).

Tab. 12.1 Szenarien zur Abbildung der Risiken der Tunnelkategorien gemäss ADR²².

Tunnel-kategorie	Szenarien zur Abbildung der Risiken			
A (alle Szenarien)	3	(BLEVE 50 kg Propangas-Zylinder)	9	(Fackelbrand Propangastank 18 t)
	4	(Lachenbrand Benzin)	10	(Ammoniakfreisetzung aus Tank 18 t)
	5	(Explosion Benzindämpfe)	11	(Acroleinfreisetzung aus Tank 25 t)
	6	(Chlorfreisetzung aus Tank 20 t)	12	(Acroleinfreisetzung aus Zylinder 100 l)
	7	(BLEVE Propangastank 18 t)	13	(BLEVE CO ₂ verflüssigt 20 t)
	8	(Gaswolkenbrand Propangastank 18 t)		
B	3	(BLEVE 50 kg Propangas-Zylinder)	10	(Ammoniakfreisetzung aus Tank 18 t)
	4	(Lachenbrand Benzin)	11	(Acroleinfreisetzung aus Tank 25 t)
	5	(Explosion Benzindämpfe)	12	(Acroleinfreisetzung aus Zylinder 100 l)
	6	(Chlorfreisetzung aus Tank 20 t)	13	(BLEVE CO ₂ verflüssigt 20 t)
C	3	(BLEVE 50 kg Propangas-Zylinder)	5	(Explosion Benzindämpfe)
	4	(Lachenbrand Benzin)	12	(Acroleinfreisetzung aus Zylinder 100 l)
D / E	-			

Die Ergebnisse werden in Form von normierten Summenkurven für die Tunnelkategorien A (Gesamtsummenkurve), B und C gemäss ADR berechnet und dargestellt. Der Einfluss von allfälligen Beschränkungen auf die Risiken wird damit ersichtlich.

Das Beispiel in Abb. 12.3 illustriert das Vorgehen zur Bestimmung der Tunnelkategorie. Die resultierenden Summenkurven sind pro Tunnelkategorie ausgewiesen und werden anhand der Beurteilungskriterien II der StFV beurteilt. Im gezeigten Beispiel liegen die Risiken der Tunnelkategorien A (keine Beschränkung für Gefahrguttransport) deutlich im nicht akzeptablen Bereich; diese Kategorie ist nicht zulässig. Bei Beschränkung für gefährliche Güter, welche zu sehr grossen Explosionen führen können (Tunnelkategorie B), liegen die Risiken ebenfalls noch im nicht akzeptablen Bereich.

Die Risiken der Kategorie C liegen im Übergangsbereich und der Tunnel kann, in Absprache mit der Vollzugsbehörde, dieser Kategorie zugeteilt werden (d.h. der Tunnel wird für gefährliche Güter beschränkt, die zu einer sehr grossen Explosion, einer grossen Explosion oder zu einer Freisetzung giftiger Stoffe führen können).

²² Die Szenarien 1 und 2 des OECD/PIARC Standardmodells bilden Ereignisse ohne Beteiligung von gefährlichen Gütern im Sinne des ADR ab und sind daher für die vorliegende Betrachtung nicht relevant.

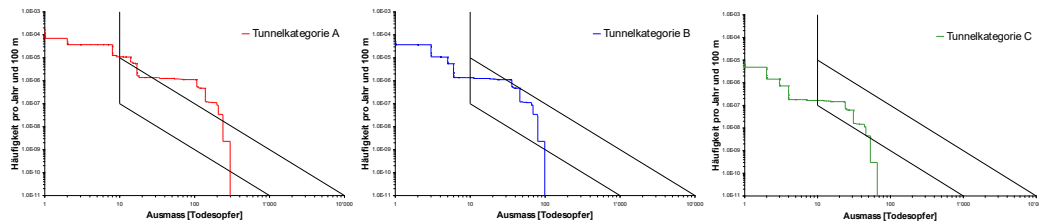


Abb. 12.3 Resultierende Summenkurven für die Tunnelkategorien A, B und C.

Das für die Stufe 2 verwendete Modell ermöglicht es auch, den Einfluss von baulich/technischen und betrieblich/organisatorischen Massnahmen auf die resultierenden Risiken aufzuzeigen.

Kategorisierung B, C oder D gemäss ADR

Für die Unterscheidung, welche Kategorie aus Blickwinkel der Risiken geeignet ist, können grundsätzlich die im QRA-CH Modell berücksichtigten elf Gefahrgut-Szenarien herangezogen werden, welche den verschiedenen Kategorien zugeordnet werden können. Dieses Vorgehen ist jedoch nicht möglich, um die Festlegung zu den Tunnelkategorien D bzw. E zu unterscheiden, da hierzu entsprechend geeignete Szenarien im OECD/PIARC Modell fehlen.

Im Rahmen des Projektes wurden deshalb verschiedene Varianten geprüft, wie die Unterscheidung der Kategorien D und E erfolgen kann. Grundsätzlich ist das Spektrum möglicher Szenarien und Gefahrgüter, das für die Unterscheidung einer Zuordnung zur Tunnelkategorie D oder E in Frage kommt, sehr breit. Es sind dies potenziell alle UN-Nummern, welche eine der folgenden Tunnelbeschränkungscode aufweisen:

- Tunnelbeschränkungscode B/E
- Tunnelbeschränkungscode C/E
- Tunnelbeschränkungscode D/E
- Tunnelbeschränkungscode E

Eine Auswertung der Tabelle A des Kapitels 3.2 des ADR zeigt, dass insgesamt 2'200 Gefahrgüter einem dieser Tunnelbeschränkungscode zugeordnet sind. Gegliedert nach Tunnelbeschränkungscode ergibt sich folgendes Bild:

- | | |
|--------------------------------|------------------------------|
| • Tunnelbeschränkungscode B/E: | 108 Gefahrgüter / UN-Nummern |
| • Tunnelbeschränkungscode C/E: | 234 Gefahrgüter / UN-Nummern |
| • Tunnelbeschränkungscode D/E: | 972 Gefahrgüter / UN-Nummern |
| • Tunnelbeschränkungscode E: | 961 Gefahrgüter / UN-Nummern |

Die Auswertung macht ersichtlich, dass eine sehr grosse Anzahl an Gefahrgütern / UN-Nummern potenziell als Grundlage für entsprechende Szenarien in Frage kämen. Dementsprechend ist auch das Spektrum der physikalisch-chemischen Eigenschaften und der Wirkungen der Gefahrgüter / UN-Nummern ausgesprochen vielfältig. Wertet man die über 2'200 Gefahrgüter / UN-Nummern hinsichtlich ihrer Zugehörigkeit zu den Gefahrgutklassen aus, so zeigt sich folgende Verteilung:

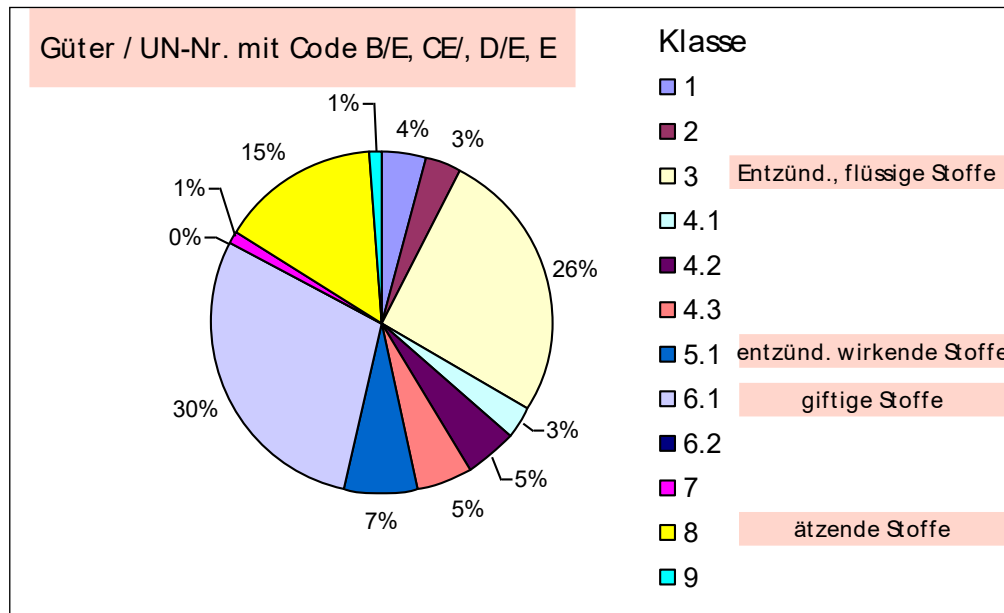


Abb. 12.4 Auswertung Gefahrgüter Tunnelbeschränkungscode B/E, C/E, D/E und E

Die Verteilung zeigt, dass der grösste Anteil der Stoffe auf die Klassen 3, 5.1, 6.1 und 8 entfällt (Abb. 12.4).

Hinsichtlich der Wirkungsarten, welche für die Unterscheidung der Tunnelkategorien nach ADR unterschieden werden, entfällt also der grösste Teil der Gefahrgüter / UN-Nummern auf

- Brandwirkungen und
- toxische Wirkungen.

Um die beiden massgeblichen Wirkungen zusätzlich für die Analyse und Beurteilung der Risiken im Vorgehen berücksichtigen zu können wurden die beiden im OECD/PAIRC Standardmodell berücksichtigten Szenarien 1 und 2 (20 MW Brand und 100 MW Brand) sowie Anpassungen bei den Szenarien 11 und 12 untersucht (toxische Wirkung):

- Brandwirkungen: Die Wirkungen von Bränden können theoretisch durch die zusätzliche Berücksichtigung der Szenarien 1 und/oder 2 des OECD/PIAC Modells abgebildet werden. Unabhängig davon welches Szenario gewählt wird, ist es von zentraler Bedeutung, dass das Szenario als *Repräsentant* für die massgebliche Wirkung (in diesem Fall Brandwirkung) steht und damit die mögliche Wirkung der Vielzahl der Gefahrgüter / UN-Nummern abbildet, welche entsprechende Eigenschaften aufweisen. Die Wirkungen der Szenarien 1 und 2 wurden untersucht. Die Ergebnisse zeigen, dass die resultierenden Schadenausmasse in den weitaus meisten Fällen kleiner als 10 Todesopfer sind und damit aus Blickwinkel der Beurteilungskriterien nach Störfallverordnung keine schwere Schädigung erreicht wird.
- Toxische Wirkungen: Die im OECD/PIAC Modell bereits berücksichtigten Szenarien, welche primär eine toxische Wirkung aufweisen (toxische Flüssigkeiten und Gase; Szenarien 6, 10, 11 und 12) sind für eine Unterscheidung der Tunnelkategorien D/E nicht geeignet.²³ Da die Definition zusätzlicher Szenarien im OECD/PIAC Modell aus Aufwand- und Komplexitätsgründen verworfen werden musste, wurde die Idee entwickelt, ein geeignetes, bereits bestehendes Szenario anzupassen. Die Vorgehensweise kann vereinfachend wie folgt zusammengefasst werden:

²³ Die Szenarien können für die Unterscheidung der Kategorien A, B oder C herangezogen werden.

1. Wahl eines möglichen geeigneten Szenarios
2. Wahl eines Gefahrgutes, welches sich aus Blickwinkel der Hauptwirkung Toxizität für die Unterscheidung der Tunnelkategorien D/E eignet
3. Anpassen des bestehenden Szenarios mit den Wirkungseigenschaften des ausgewählten Gefahrgutes (Skalierung der bereits vorliegenden Wirkdistanzen [Letalitätszonen] aufgrund der Stoffeigenschaften)

Auch hier gilt es wiederum festzuhalten, dass unabhängig von der Wahl des Gefahrgutes das Szenario als *Repräsentant* für die massgebliche Wirkung (in diesem Fall Toxizität) steht und damit die mögliche Wirkung der Vielzahl der Gefahrgüter / UN-Nummern abbildet, welche entsprechende Eigenschaften aufweisen.

Die Szenarien 11 und 12 des OECD/PIARC Modells wurden angepasst und für zwei Stoffe, welche sich aufgrund der Tunnelbeschränkungscode für eine Unterscheidung der Tunnelkategorien D/E eignen würden und für welche Probitfunktionen vorliegen, wurden Abschätzungen zum resultierenden Schadenausmass angestellt.

- Anpassung Szenario 11 (Transport toxischer Stoffe in Tank): Verwendung der Stoffeigenschaften von Hydrazin (Tunnelbeschränkungscode E) anstelle von Acrolein
- Anpassung Szenario 12 (Transport toxischer Stoffe in Kleingebinde): Verwendung der Stoffeigenschaften von Acrylonitril (Tunnelbeschränkungscode C/E) anstelle von Acrolein

Für die Auswertungen wurden die Wirkdistanzen für die beiden Szenarien unter Verwendung der beiden Stoffe untersucht. Wie sich deutlich gezeigt hat, resultieren für die beiden Stoffe erheblich geringere Wirkdistanzen (Letalitätsbereiche). Dies hat zur Folge, dass unabhängig von der Freisetzungsmenge (Tank bzw. Kleingebinde) und unabhängig von der Substanz (Hydrazin bzw. Acrylonitril) nur sehr geringe Schadenausmasse, teilweise auch keine Schäden zu verzeichnen sind. Es ist deshalb nicht zu erwarten (oder höchstens in ausgesprochenen seltenen Fällen), dass Schadenausmasse im Bereich einer schweren Schädigung nach Störfallverordnung resultieren.

Wie aufgrund der Untersuchungen festgestellt werden konnte, ist eine risikobasierte Unterscheidung der Kategorien D und E nach ADR – unter Berücksichtigung der Beurteilungskriterien zur StFV [17] – nicht zweckmässig, auch wenn natürlich für die beiden Kategorien D und E unterschiedliche Risiken resultieren. Grund dafür ist die Tatsache, dass die StFV primär den Fokus auf Ereignisse mit grossem und sehr grossem Schadenpotenzial hat und weniger Ereignisse mit geringerem bis mittleren Schadenausmass.

Es wurden deshalb weitere Kriterien neben den Ergebnissen aus der Anwendung des QRA-CH Modells definiert: Erweisen sich sowohl die Tunnelkategorie B wie auch die Kategorie C als nicht ausreichende Massnahme, um die Risiken auf ein tragbares Mass zu reduzieren, so wird die Tunnelkategorie D bzw. E gemäss folgendem Vorgehen festgelegt:

1. Der Tunnel wird grundsätzlich der Kategorie D zugeordnet.
2. Es ist gemäss dem nachfolgenden Schema zu prüfen, ob eine restriktivere Beschränkung (Tunnelkategorie E) erforderlich ist:
3. Gibt es neben den genannten Kriterien zusätzliche, begründbare und belegbare Hinweise, dass eine restriktivere Beschränkung erforderlich ist, so kann der Tunnel der Kategorie E zugeordnet werden

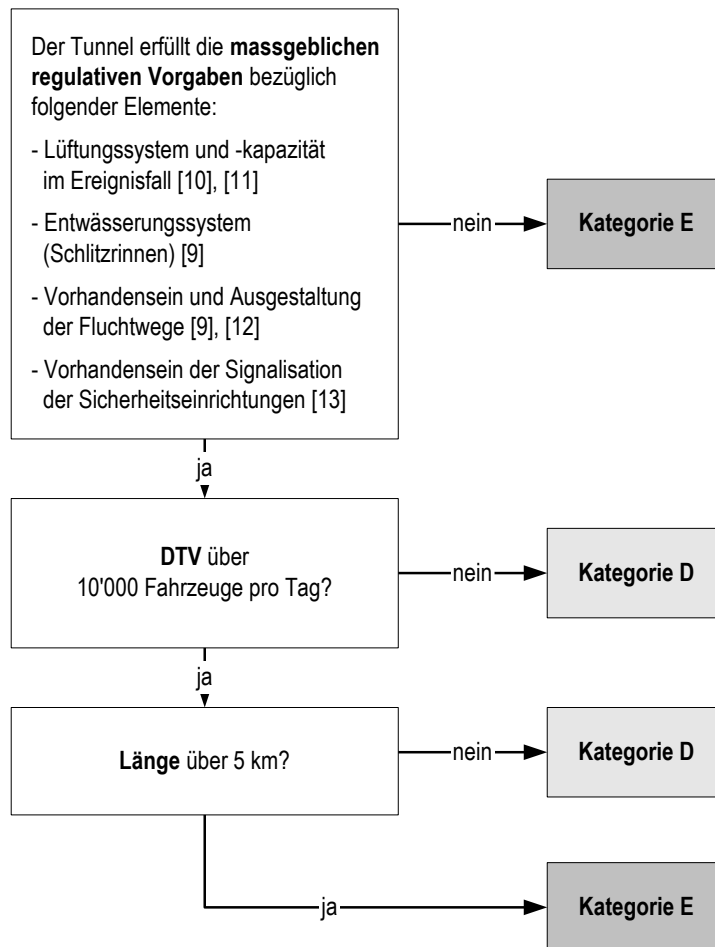


Abb. 12.5 Entscheidungsschema zur Differenzierung zwischen den Kategorien D und E

Die aufgeführten Kriterien orientieren sich zum einen an normativen Vorgaben auf dem Gebiet der Tunnelsicherheit, zum anderen sind sie das Ergebnis der intensiven Diskussionen des Projektteams.

Im Fall einer Beschränkung des Tunnels für bestimmte Gefahrgüter ist für letztere eine geeignete Umfahrstrecke zu bestimmen, wobei die geltenden Vorgaben und Anforderungen der StFV einzuhalten sind. Dies bedeutet, dass bei einer allfälligen Beschränkung von Gefahrguttransporten durch einen Tunnel zu prüfen ist, ob sich infolge der Umlagerung auf den Ausweichstrecken eine wesentliche Änderung im Sinne der StFV ergibt. Ist dies der Fall, so ist entsprechend den Vorgaben der StFV die jeweilige Risikountersuchung (z.B. Kurzbericht nach StFV) zu aktualisieren.

12.2.6 Anwendung an Fallbeispielen: Tunnel A

Im Rahmen des Projekts wurde die Stufe 2 des Vorgehens für zwei fiktive Tunnel exemplarisch umgesetzt. Anhand einer detaillierten Risikoanalyse werden dabei die Risiken des Tunnels ermittelt und den Ergebnissen der groben Risikoabschätzung der Stufe 1 gegenübergestellt.

Vorgehen

Die Ermittlung der Risiken erfolgte wie im Vorgehen vorgesehen unter Anwendung des QRA-CH Modells. Damit können die ortsspezifischen Tunnel- und Verkehrscharakteristika detailliert abgebildet werden. Nach der Erhebung und Aufbereitung der Daten (vgl. nachfolgendes Kapitel) werden diese gemäss der Anwendungsanleitung in der Eingabedatei des Modells eingegeben und die Berechnung durchgeführt. Die Ergebnisse werden in der Output-Datei ausgegeben.

Datenerhebung

Gegenüber den in der Stufe 1 verwendeten Daten wurden folgende Angaben zu Tunnel und zum Verkehr zusätzlich erhoben:

- Geometrie des Bauwerks (Längsneigungen segmentweise, Breite und Höhe des Querschnitts, Quergefälle)
- Daten zur Lüftung:
- Lüftungseinrichtungen und Kapazität (Abzugs-, Zuluftleistung)
 - Betriebsregimes im Normalfall und im Brandfall, Abzugs- und Zuluftmengen
 - Strömungsverhältnisse im Tunnel für Normalfall und Brandfall, pro simuliertem Brandort
- Weitergehende Angaben zu Überwachungseinrichtungen (Verkehrslenkungseinrichtungen wie LSA im Tunnel oder Einsprechanlage)
- Entwässerung (Einlaufschächte): Abstand, Einlauffläche
- Verkehrsdaten: Auswertung der Zählstellendaten und ableiten
 - des jährlichen Verkehrsaufkommens
 - der zeitlichen Verteilung (Ermittlung und Auswertung der Tagesganglinien, Definition von drei Zeitperioden mit schwacher / mittlerer / starker Belastung)
- Personendichten in Portalbereichen, differenziert nach den betrachteten drei Zeitperioden

Durch die detailliertere Berücksichtigung der Tunnel- und Verkehrscharakteristika ergeben sich Abweichungen (Änderung oder Präzisierung) zur vereinfachten Abbildung des Tunnels in der Stufe 1. Die wichtigsten Unterschiede sind nachfolgend zusammengefasst:

- Längsneigung: Abbildung der von 2 Segmenten mit 1.4% bzw. -0.3%, im Vergleich zu der mittleren Längsneigung von 1% in Stufe 1
- Lüftungsverhältnisse:
 - Berücksichtigung der effektiv vorhandenen Abzugsmenge im Brandfall, differenziert nach Rauchabzugsabschnitten bzw. Brandorten
 - Ermittlung und Berücksichtigung der effektiv vorhandenen Längsströmungsverhältnisse im Brandfall
- Verkehrsdaten: Berücksichtigung der zeitlichen Variation der Verkehrsmenge (Differenzierung von drei Perioden stark / mittel / stark)
- Detaillierte Berücksichtigung der weiteren Überwachungseinrichtungen

Insbesondere waren für die korrekte Abbildung des Lüftungssystems im Modell detaillierte Kenntnisse des Systems erforderlich. Im Anhang finden sich weitergehende Informationen zum Lüftungssystem, zur Abbildung im Modell und zur Herleitung der entsprechenden Modellparameter.

Ergebnisse

Die Risiken werden in der Output-Datei in Form von Gesamtsummenkurven für die drei Tunnelkategorien A, B und C im Häufigkeits-Ausmass-Diagramm dargestellt und den Beurteilungskriterien der StFV gegenübergestellt. Die nachfolgende Abb. 12.6 zeigt die Output-Kurven der Kategorisierung nach Anwendung der Vorgehensweise gemäss Stufe 2 des QRA-CH Modells.

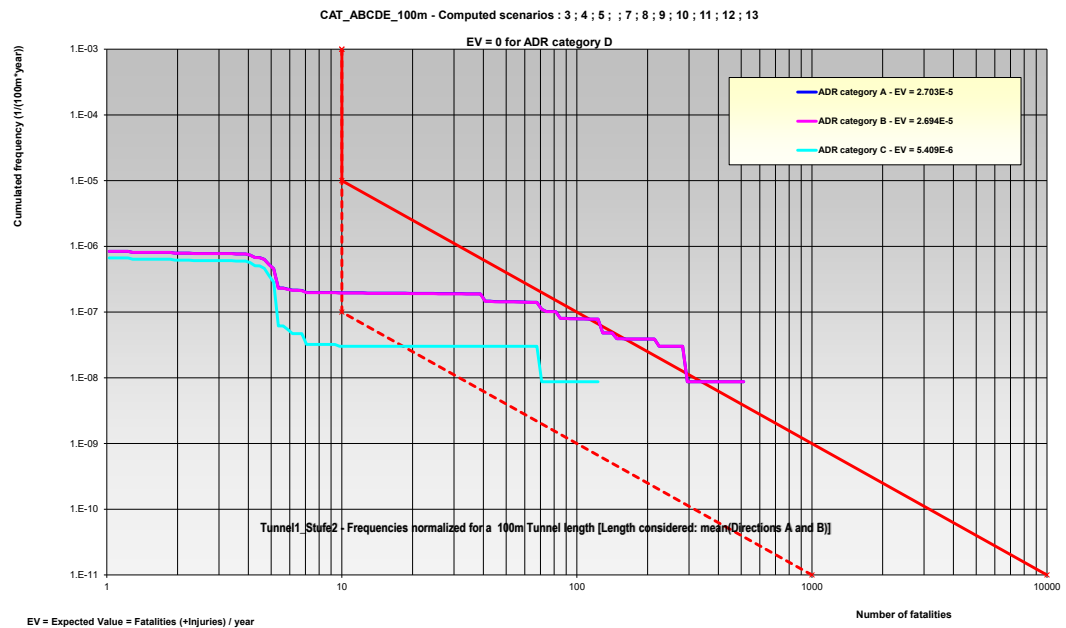


Abb. 12.6 Gesamtsummenkurve für das Fallbeispiel "Tunnel A", Ergebnis der vertieften Ermittlung des intrinsischen Risikos gemäss dem Vorgehen der Stufe 2

Zum Vergleich zeigt Abb. 12.7 die Ergebnisse der vereinfachten Abschätzung der Risiken des gleichen Tunnels gemäss dem Vorgehen der Stufe 1 (Anwendung des QRA-CH Modells vereinfacht).

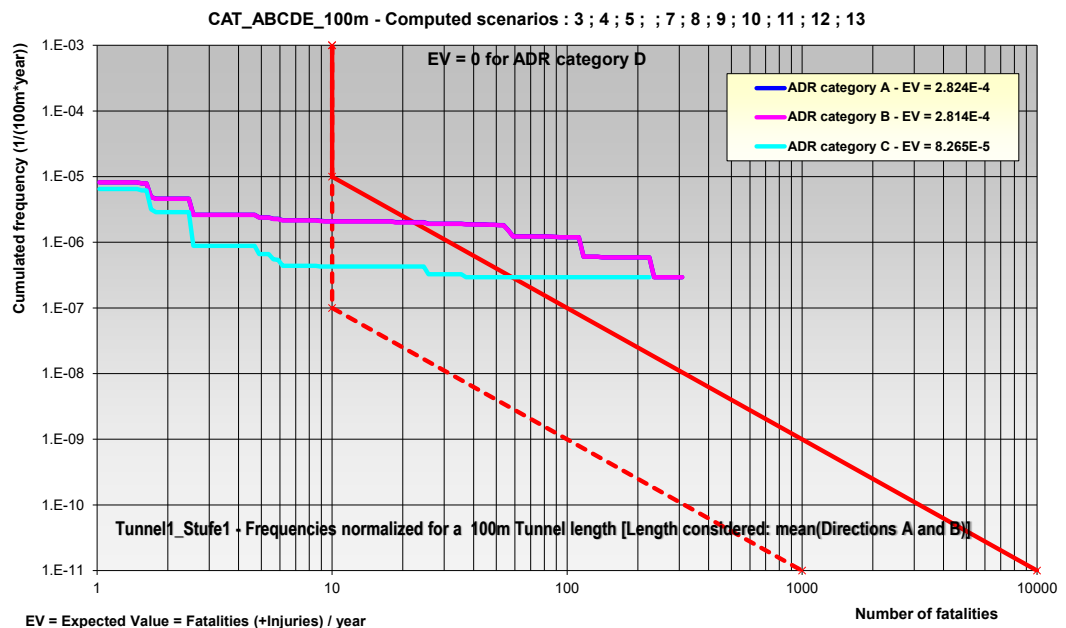


Abb. 12.7 Gesamtsummenkurve für das Fallbeispiel "Tunnel A", Ergebnis der vereinfachten Abschätzung des intrinsischen Risikos gemäss dem Vorgehen der Stufe 1

Aus der Anwendung des Vorgehens der Stufe 2 für den Tunnel A und aus dem Vergleich der Ergebnisse der Stufen 1 und 2 ergeben sich folgende Erkenntnisse:

- Durch die präzisere Abbildung des Tunnels in Stufe 2 können mehr Ereignisabläufe unterschieden werden und es resultiert eine insgesamt differenziertere Summenkurve.
- Bei Unsicherheit zu den Daten oder der Art der Abbildung im Modell sollten Sensitivitätsbetrachtungen durchgeführt werden (sowohl in Stufe 1 wie in Stufe 2).

Der Aufwand für die Änderung eines Parameters im Eingabefile und für den Rechengang selbst ist gering.

- Die Charakteristik der Summenkurven bleibt in Stufe 2 ähnlich, Unterschiede sind jedoch erkennbar. Hinsichtlich der Charakteristik der Gesamtsummenkurve bleiben die gleichen Szenarien massgebend.
- Die Summenkurven liegen in beiden Berechnungsfällen (Stufe 1 bzw. Stufe 2) im nicht akzeptablen Bereich nach StFV. Das kollektive Risiko – repräsentiert durch den Schadenerwartungswert – ist in Stufe 2 leicht geringer als nach Stufe 1. Die Abschätzung der Risiken in Stufe 1 ergibt im Fall "Tunnel A" somit konservativere Ergebnisse.

12.2.7 Anwendung an Fallbeispielen: Tunnel B

Gegenüber der Stufe 1 wurden auf Basis von verschiedenen Grundlagen weitergehende Daten zu einem weiteren 'fiktiven' Tunnel - analog einem bestehenden Beispieltunnel - erhoben und die Risiken anhand der detaillierten Risikoanalyse der Stufe 2 berechnet.

Datenerhebung

Gegenüber den in der Stufe 1 verwendeten Daten wurden folgende Angaben zu Tunnel und zum Verkehr zusätzlich erhoben:

- Geometrie des Bauwerks (Längen der einzelnen Röhren, Breite und Höhe des Querschnitts, Quergefälle, Anzahl Notausgänge der einzelnen Röhren)
- Daten zur Lüftung:
 - Lüftungseinrichtungen und Kapazität (System, Abzugsleistung)
 - Betriebsregimes im Normalfall und im Brandfall, Abzugsmengen
 - Strömungsverhältnisse im Tunnel für Normalfall und Brandfall, pro simuliertem Brandort (Berechnung anhand einer 1D-Simulation)
- Weitergehende Angaben zu Überwachungseinrichtungen (z.B. Einsprechanlage)
- Verkehrsdaten: Auswertung der Zählstellendaten und ableiten
 - des jährlichen Verkehrsaufkommens und des SV-Anteils
 - der zeitlichen Verteilung (Ermittlung und Auswertung der Tagesganglinien, Definition von drei Zeitperioden mit schwacher / mittlerer / starker Belastung)
- Gefahrguttransport: Berücksichtigung der ortsspezifischen Zusammensetzung der transportierten Güter
- Unfallgeschehen: Berücksichtigung der ortsspezifischen Unfallrate
- Personendichten in Portalbereichen, differenziert nach den betrachteten drei Zeitperioden

Durch die detailliertere Berücksichtigung der Tunnel-, Verkehrs- und Umgebungscharakteristika ergeben sich Abweichungen (Änderung oder Präzisierung) zur vereinfachten Abbildung des Tunnels in der Stufe 1. Die wichtigsten Unterschiede sind nachfolgend zusammengefasst:

- Bezüglich des Bauwerks wurden in der Stufe 2 die unterschiedlichen Längen sowie die unterschiedliche Anzahl Notausgänge der Röhren sowie der genaue Wert von Querneigung, Höhe und Breite des Querschnitts berücksichtigt.
- Lüftungsverhältnisse:
 - Berücksichtigung des effektiv vorhandenen Lüftungssystems für den Brandfall sowie der vorhandenen Abzugsmenge, differenziert nach Rauchabzugsabschnitten bzw. Brandorten
 - Ermittlung und Berücksichtigung der effektive vorhandenen Längsströmungsverhältnisse im Brandfall
- In Stufe 2 wurde die ortsspezifische Unfallrate verwendet, welche deutlich über dem Standardwert für Richtungsverkehrstunnels der Stufe 1 liegt (ortsspezifischer Wert: $4.7 \cdot 10^{-7}$ Unfälle pro Fz-km, Standardwert Stufe 1 für Richtungsverkehrstunnel: $1.2 \cdot 10^{-7}$ Unfälle pro Fz-km).
- Die Gefahrgutverteilung wurde an die lokalen Verhältnisse angepasst.

- Das Verkehrsaufkommen wurde genauer abgebildet (höherer DTV, höherer SV-Anteil, Unterscheidung von drei Zeitperioden bezüglich Verkehrsstärke).
- Detailliertere Abbildung der Kommunikations- und Überwachungseinrichtungen.

Ergebnisse

Die Risiken werden in Form von Gesamtsummenkurven im Häufigkeits-Ausmass-Diagramm dargestellt und den Beurteilungskriterien der StFV gegenübergestellt. Die nachfolgende Abb. 12.8 zeigt die resultierenden Summenkurven für das Fallbeispiel "Tunnel 2".

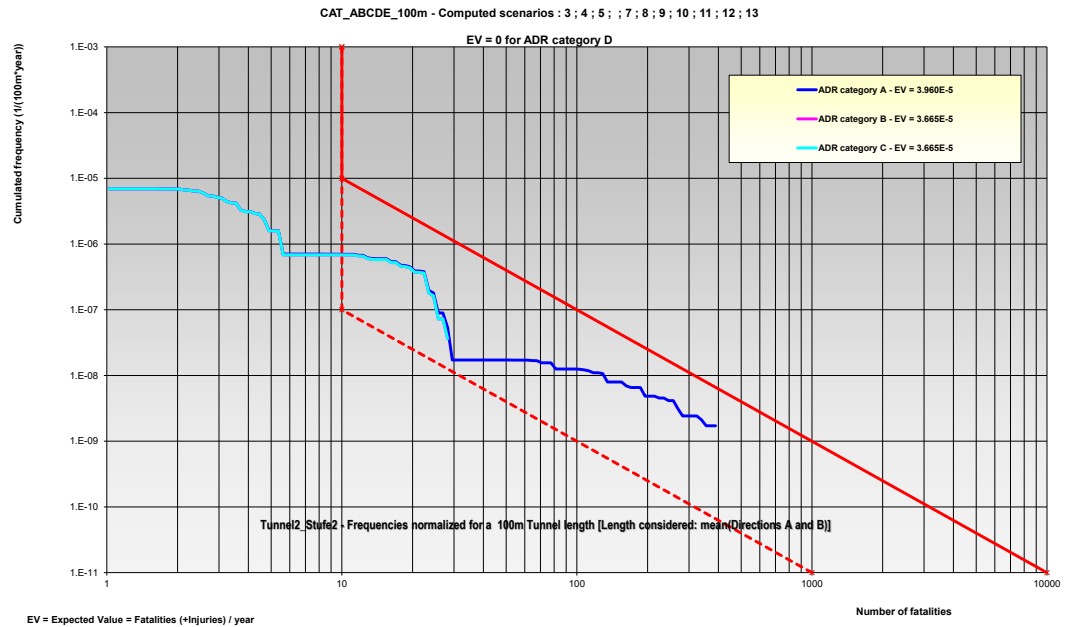


Abb. 12.8 Gesamtsummenkurve für das Fallbeispiel "Tunnel B", Ergebnis der vertieften Ermittlung des intrinsischen Risikos gemäss dem Vorgehen der Stufe 2

Zum Vergleich zeigt Abb. 12.9 die Ergebnisse der vereinfachten Abschätzung der Risiken des gleichen Tunnel gemäss dem Vorgehen der Stufe 1 (Anwendung des QRA-CH Modells vereinfacht).

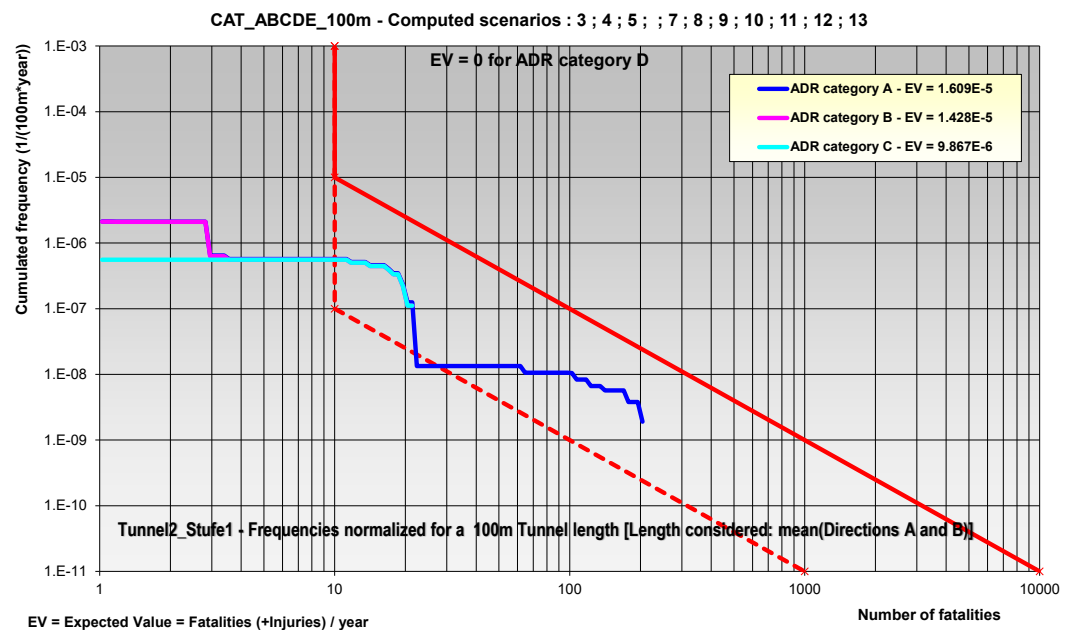


Abb. 12.9 Gesamtsummenkurve für das Fallbeispiel "Tunnel B", Ergebnis der vereinfachten Abschätzung des intrinsischen Risikos gemäss dem Vorgehen der Stufe 1

Aus der Anwendung des Vorgehens der Stufe 2 für den Tunnel und dem Vergleich der Ergebnisse der Stufen 1 und 2 ergeben sich folgende Erkenntnisse:

- Durch die detailliertere Abbildung des Tunnels können die Ereignisabläufe in Stufe 2 differenzierter abgebildet werden.
- Auf Ebene der Gesamtrisiken resultiert in Stufe 2 ein höheres Risiko, vor allem aufgrund der insgesamt höher angenommenen Ereignishäufigkeit (höhere Unfallrate und ungünstiger Gefahrgutverteilung).
- Die Charakteristik der Summenkurven bleibt in Stufe 2 ähnlich, Unterschiede sind jedoch erkennbar.
- Die Risiken liegen in beiden Berechnungsfällen im oberen Übergangsbereich. Die Berechnung der Stufe 2 ergibt ein leicht höheres kollektives Risiko.
- Die Ermittlung der Risiken in der Stufe 2 ergibt im Fall "Tunnel 2" somit höhere Risiken. Dies ist insbesondere darauf zurückzuführen, dass in der Stufe 2 die ortsspezifische Unfallrate berücksichtigt wurde, die deutlich über dem Standardwert der Stufe 1 liegt.

13 Möglichkeiten und Grenzen des Modells

Mit dem OECD/PIARC Standardmodell existiert heute ein akzeptiertes Modell zur Analyse der Risiken aus dem Gefahrguttransport. Obwohl das Modell auch Untersuchungen für offene Strecken ermöglichen würde, wird es in den weitaus meisten Fällen für Untersuchungen von Tunnelstrecken verwendet. Obwohl spezifische Kenntnisse zum Umgang bzw. zur Anwendung erforderlich sind und aus inhaltlicher Sicht gewisse Verbesserungspotenziale bestehen, ist das Modell heute weit verbreitet und gelangt in verschiedenen europäischen Staaten zur Anwendung. Auf internationaler Ebene (Weltstrassenverband PIARC) bestehen Bestrebungen das Modell sowohl inhaltlich als auch technisch weiterzuentwickeln.

Für die Anwendung der vorliegenden Methodik waren Anpassungen am Modell unumgänglich. Zum einen zeigte sich im Rahmen der Erprobungsphase, dass die mittels OECD/PIARC Standardmodell berechneten Ergebnisse nicht kompatibel zu den geltenden Beurteilungskriterien der StFV sind, zum anderen konnte auch anhand von Plausibilitätsüberprüfungen dargelegt werden, dass i.d.R. zu konservative Risiken ausgewiesen werden. Mit den vorgenommenen Anpassungen im QRA-CH Modell bzw. QRA-CH Modell vereinfacht konnten entsprechende Verbesserungen erzielt werden.

Dennoch sind folgende Grenzen in der Anwendung des Modells zu beachten:

- Die Szenarien im QRA-CH Modell können nicht angepasst werden. Für die Anwendung in der Schweiz nicht plausible Szenarien (Szenario 6: Freisetzung 20 t Chlor) werden gemäss vorliegender Methodik nicht berücksichtigt. Anpassungen von Freisetzungsmengen oder die Berücksichtigung bis dato nicht untersuchter Gefahrgüter/Stoffe für andere Szenarien können jedoch nicht vorgenommen werden.²⁴
- In Anbetracht der Komplexität realer Tunnelverhältnisse einerseits und den berücksichtigten Einflussfaktoren andererseits erlaubt das QRA-CH Modell die Berücksichtigung der hinsichtlich der Personenrisiken zentralen Aspekte. Dennoch können nicht in allen Fällen sämtliche spezifischen Charakteristika abgebildet werden. Die Anwendung des QRA-CH Modells erfordert deshalb zwingend einerseits Fachkenntnisse zur baulichen und technischen Ausstattung von Strassentunneln, andererseits müssen die Anwender über Kenntnisse im Bereich von Risikoanalyseverfahren und -modellen verfügen.
- Wenn die spezifischen Eigenschaften der risikorelevanten Einflussgrössen im Zuge einer Untersuchung nicht genau abbildbar sind, so sind Sensitivitätsbetrachtungen vorzunehmen und der Einfluss einzelner oder mehrerer Charakteristika gesondert zu überprüfen.
- Bei der Interpretation der Ergebnisse sind stets die Möglichkeiten und Grenzen des Modells zu mitberücksichtigen.

²⁴ Theoretisch ist die Berücksichtigung neuer Szenarien im bestehenden Modell zwar möglich, aus praktischer Sicht wäre aber die Umsetzung nur mit unverhältnismässig hohem Aufwand zu bewältigen.

14 Schlussfolgerungen und Handlungsbedarf

Mit der vorliegenden Methodik wurde die Grundlage für eine systematische Analyse und Beurteilung der Risiken infolge des Transports gefährlicher Güter durch Strassentunnel sowie für eine Kategorisierung gemäss ADR geschaffen. Zentraler Aspekt ist die Einbettung des Verfahrens zur Kategorisierung nach ADR als – neben baulichen, technischen und anderen betrieblichen Massnahmen – eine der Möglichkeiten, um allfällig als nicht tragbar beurteilte Risiken zu mindern. Mit der vorliegenden Methodik wurde somit auch eine Grundlage geschaffen, um Anforderungen der StFV betreffend Analyse der Risiken und deren Beurteilung bzw. Ermittlung des Handlungsbedarfs hinsichtlich Massnahmen für Strassentunnel zu erfüllen.

Wie sich im Projektverlauf gezeigt hat, ist es wichtig, die dargelegte Einbettung des Vorgehens zur Kategorisierung von Strassentunneln nach ADR in die Verfahren der StFV aufzuzeigen und die Zusammenhänge klar darzustellen. Dem Aspekt der Kommunikation dieser Zusammenhänge sollte deshalb entsprechend Gewicht beigemessen werden.

Die Methodik mit ihren einzelnen Vorgehensschritten wurde anhand von möglichst repräsentativen Fallbeispielen überprüft. Dennoch wird es wichtig sein, die Ergebnisse der weiteren Anwendungen der Methodik zu sammeln und auszuwerten. Die Erfahrungen in der praktischen Anwendung sowie mögliche Potenziale für Verbesserungen und Weiterentwicklungen sollten deshalb möglichst systematisch erfasst und anschliessend analysiert werden.

Kern der Methodik ist die Anwendung des für die Anwendung in der Schweiz angepassten OECD/PIARC Modell. Auf internationaler Ebene (PIARC) laufen Anstrengungen zur Weiterentwicklung dieses Modells und der zugehörigen EDV-technischen Umsetzung. Die vorgenommenen Anpassungen für die Anwendung in der Schweiz wurden in PIARC-Arbeitsgruppen bereits vorgestellt und diskutiert. Es ist davon auszugehen, dass diese Arbeiten eine mögliche Grundlage für weitere Aktivitäten zur Weiterentwicklung des Modells darstellen. Es wird deshalb empfohlen, die laufenden Entwicklungen in PIARC aber auch in den Staaten, in welchen das OECD/PIARC Standardmodell zur Anwendung gelangt, weiterhin aktiv zu verfolgen.

Anhänge

I	Installation du modèle OCDE/PIARC CH	78
I.1	Pré-requis: installation de la version 4.04 (ou ultérieure) du modèle QRAM	78
I.2	Installation de la version 4.10 du modèle QRA-CH	83
II	Berechnungsparameter des QRA-CH-Modells vereinfacht (Stufe 1)	94
II.1	Tunnelname	94
II.2	Tunnelgeometrie	94
II.2.1	Tunneltyp (einzugebende Parameter)	94
II.2.2	Anzahl Fahrspuren pro Fahrtrichtung (einzugebende Parameter)	94
II.2.3	Länge (in m) (einzugebende Parameter)	94
II.2.4	Höhe (in m), Breite (in m)	94
II.2.5	Entwässerungssystem (einzugebende Parameter)	95
II.2.6	Mittlere Querneigung der Fahrbahn (in %)	95
II.2.7	Mittleres Längsgefälle (in %) (einzugebende Parameter)	95
II.2.8	Anzahl der Notausgänge je Röhre (einzugebende Parameter)	95
II.3	Lüftung	95
II.3.1	Lüftungssysteme für den Brandfall (einzugebende Parameter)	95
II.3.2	Ausführungsstandard des Lüftungssystems (einzugebende Parameter)	100
II.4	Betrieb	100
II.4.1	Tunnelüberwachung (einzugebende Parameter)	100
II.4.2	Videoüberwachung	101
II.4.3	Automatische Ereignisdetektion (einzugebende Parameter)	101
II.4.4	Branddetektion (einzugebende Parameter)	101
II.4.5	Lichtsignalanlagen im Tunnel und/oder Fahrstreifensignalisation	101
II.4.6	Ferngesteuerte Barrieren oder Lichtsignale an den Tunneleingängen (einzugebende Parameter)	102
II.4.7	Einsprechanlage FM	102
II.4.8	Wechselverkehrszeichen	102
II.5	Verkehr (keine Unterscheidung der Richtungen A und B)	102
II.5.1	Anzahl Zeitperioden	102
II.5.2	Anteile der Zeitperioden	102
II.5.3	Durchschnittliches tägliches Verkehrsaufkommen (Fz/Tag) (einzugebende Parameter)	102
II.5.4	Anteil Schwerverkehr (einzugebende Parameter)	102
II.5.5	Anteil Busverkehr	102
II.5.6	Anteil Gefahrguttransporte	103
II.5.7	Gefahrgutverteilung	103
II.5.8	Durchschnittsgeschwindigkeiten PKW	103
II.5.9	Durchschnittsgeschwindigkeiten von Bus und Schwerverkehr	103
II.6	Umgebung	103
II.6.1	Umgebungsbedingungen (städtisch / ländlich) (einzugebende Parameter)	103
II.6.2	Bevölkerungsdichte im Bereich der Tunnelportale	103
II.7	Unfallgeschehen	104
II.7.1	Unfallrate (einzugebende Parameter)	104
II.7.2	Aktualisierung von Standardwerten für die Unfallraten	104
II.8	Berechnung durchführen	105
III	Berechnungsparameter QRA-CH (Stufe 2)	106
III.1	Einleitungsseite	106
III.2	Allgemeine Angaben	106
III.2.1	Tunneltyp	106
III.2.2	Anzahl Fahrspuren	106
III.3	Umgebung	106
III.3.1	Anzahl Zeitperioden	106
III.3.2	Verteilung der Zeitperioden	106
III.3.3	Umgebungsbedingungen (städtisch oder vorstädtisch / halbländlich oder ländlich)	106
III.3.4	Bevölkerungsdichte im Bereich der Tunnelportale	107

III.3.5	Durchschnittliches stündliches Verkehrsaufkommen je Zeitperiode und Fahrtrichtung (Fz/h)	107
III.3.6	Anteil Schwerverkehr je Zeitperiode	107
III.3.7	Anteil Busverkehr je Zeitperiode	107
III.3.8	Durchschnittsgeschwindigkeiten PKW	107
III.3.9	Durchschnittsgeschwindigkeiten von Bussen und Schwerverkehr	107
III.4	Gefahrgutverkehr	107
III.4.1	Anteil Gefahrgutverkehr je Fahrtrichtung	107
III.4.2	Gefahrgutverteilung	107
III.5	Betrieb	108
III.5.1	Tunnelüberwachung und Reaktionszeit des Betreibers	108
III.5.2	Videoüberwachung	109
III.5.3	Automatische Ereignisdetektion	109
III.5.4	Lichtsignalanlagen im Tunnel und/oder Fahrstreifensignalisation	109
III.5.5	Ferngesteuerte Barrieren oder Lichtsignale an den Tunneleingängen	109
III.5.6	Einsprechanlage FM	109
III.5.7	Wechselverkehrszeichen	109
III.5.8	Branddetektion	109
III.6	Merkmale des Tunnels	110
III.6.1	Länge der Röhren	110
III.6.2	Höhe	110
III.6.3	Breite	110
III.6.4	Mittleres Quergefälle der Fahrbahn	110
III.6.5	Entwässerungssystem	110
III.6.6	Anzahl Notausgänge pro Röhre	110
III.6.7	Längsprofil	110
III.7	Lüftung	110
III.7.1	Lüftungssystem für den Brandfall	110
III.8	Unfallgeschehen	112
III.8.1	Unfallrate	112
III.8.2	Ortsspezifisch erhobene Unfalldaten	112
III.9	Durchführen der Berechnungen	112
IV	Methodik Stufe 1: Fallbeispiele	113
IV.1	Tunneldaten Fallbeispiele	113
IV.2	Ergebnisse Fallbeispiele	115
V	Methodik Stufe 2: Fallbeispiele	133
V.1	Einleitung	133
V.2	Fallbeispiel Tunnel A	133
V.2.1	Lüftungssystem des Tunnels "A" und Abbildung im Modell	133
V.2.2	Ergebnisse Stufe 2 / 1: Summenkurven der einzelnen Szenarien	134
V.3	Fallbeispiel Tunnel B	135
V.3.1	Datenerhebung	135
V.3.2	Ergebnisse Stufe 2 / 1: Summenkurven der einzelnen Szenarien	137
VI	Méthodologie pour la prise en compte des périodes de congestion	138
VI.1	Introduction	138
VI.2	Rappels préliminaires concernant le modèle QRA-CH	138
VI.3	Modélisation du trafic	139
VI.4	Influence de la vitesse sur les probabilités conditionnelles	141
VI.5	Études de cas tests	144
VI.6	Cas particuliers	151
VI.6.1	Scénarios de désenfumage spécifiques en cas de congestion	151
VI.6.2	Tunnel partiellement congestionné	151
VI.6.3	Tunnel congestionné avec bretelle d'accès	151
VI.7	Conclusion	152
VII	Berücksichtigung neuer Verkehrsstatistiken zur Herleitung aktueller Standardwerte für die Unfallraten im QRA-CH	154
VII.1	Vorbemerkung	154
VII.1.1	Verkehrsstatistiken und spezifische Unfallraten	154

VII.1.2	Ausgangslage	154
VII.1.3	Hintergrund und Ziel	155
VII.2	Analyse aktueller und/oder spezifischer Unfallraten	156
VII.2.1	Straßenverkehrssicherheit in den letzten Jahrzehnten	156
VII.2.2	Verhältnis zwischen Unfallraten des Gesamtverkehrs und den Unfallraten des Schwerverkehrs im Allgemeinen sowie des Gefahrgutverkehrs im Besonderen	157
VII.2.3	Verhältnis der Unfallrate LKW _(allgemein) zur Unfallrate Gefahrgut-LKW	158
VII.3	Fazit	159

I Installation du modèle OCDE/PIARC CH

Remarque : Les instructions suivantes décrivent l'installation nécessaire du modèle de base de l'AIPCR - correspondant à la version originale de l'AIPCR à installer dans un premier temps - en langue anglaise. Ensuite, l'installation du modèle QRA-CH sur le modèle de base est décrite en français.

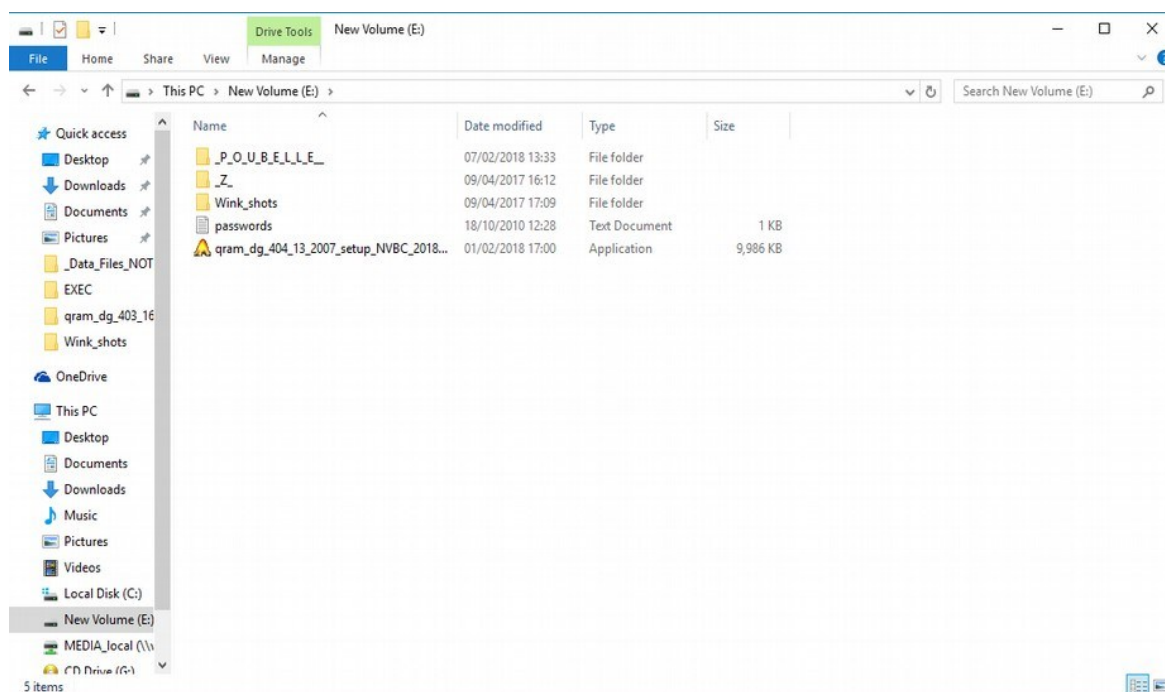
I.1 Pré-requis: installation de la version 4.04 (ou ultérieure) du modèle QRAM

Depuis sa version 4.04 d'avril 2018, l'installation du modèle d'évaluation quantitative des risques (**Quantitative Risk Assessment Model - QRAM**) doit toujours être réalisée par un fichier exécutable dont les questions et messages émis tout au long du processus sont les mêmes. Il convient d'y répondre de manière similaire.

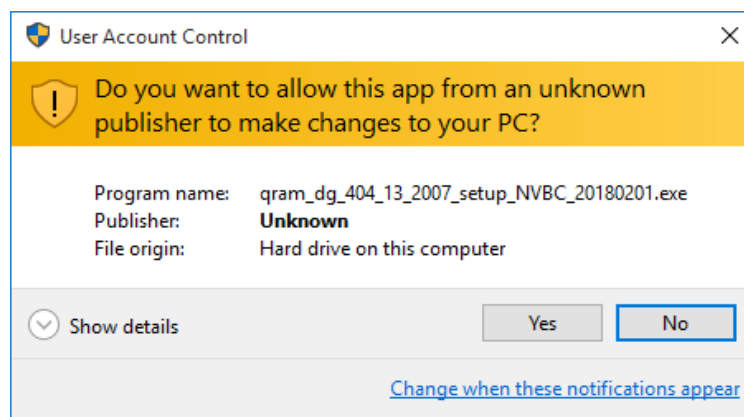
Les seules différences liées aux nouvelles versions du modèle QRAM sont l'évolution du nom du fichier d'installation, le numéro de version dans les boîtes de messages et éventuellement, le contenu du fichier ReadMe affiché à la fin. D'autres différences pourraient provenir du système d'exploitation (Windows 10 Pro dans les figures suivantes).

Ainsi, cette annexe, rédigée initialement pour l'installation de la version 4.04 du QRAM, est également valable pour les versions ultérieures 4.xx.

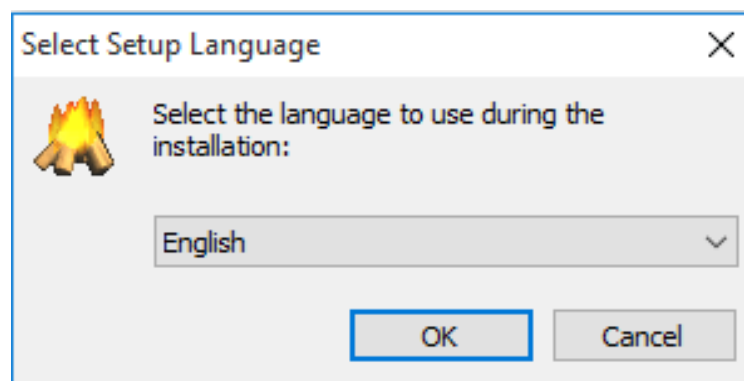
- 1) Dans l'explorateur de fichiers, cliquez sur le fichier exécutable d'installation du modèle QRAM dans la figure ci-dessus :
qram_dg_404_13_2007_setup_NVBC_20180201.exe (pour la version 4.04)



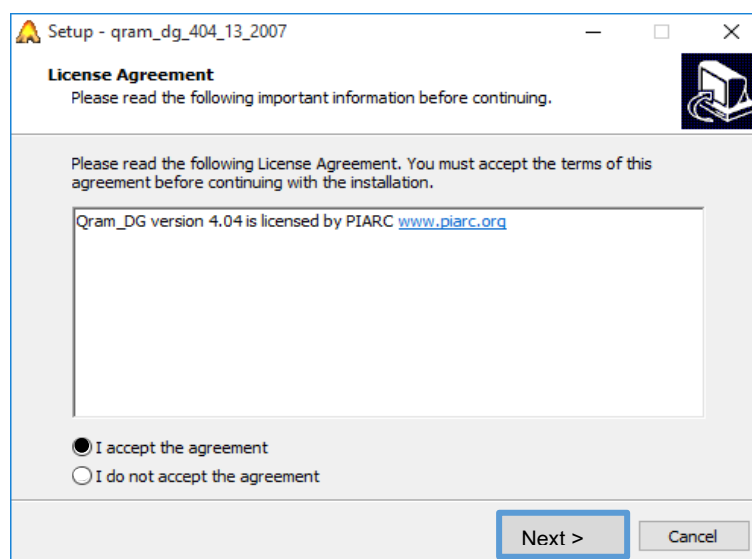
2) Cliquez sur "YES"



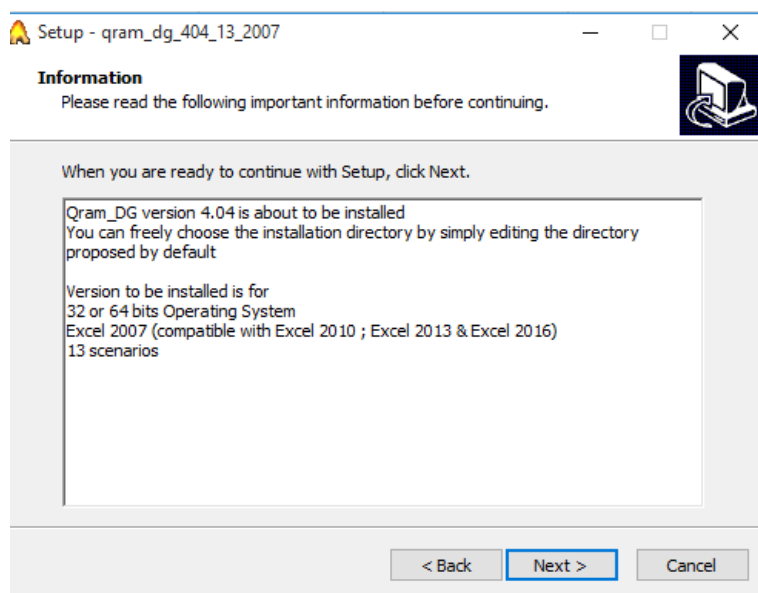
3) Sélectionner la langue d'installation " English " ou " French "



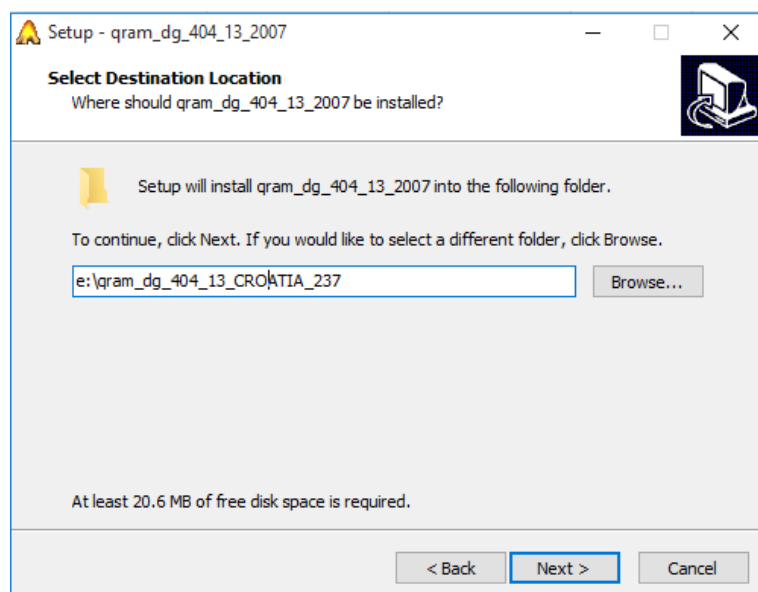
4) Sélectionner "I accept" et cliquez ensuite sur "NEXT"



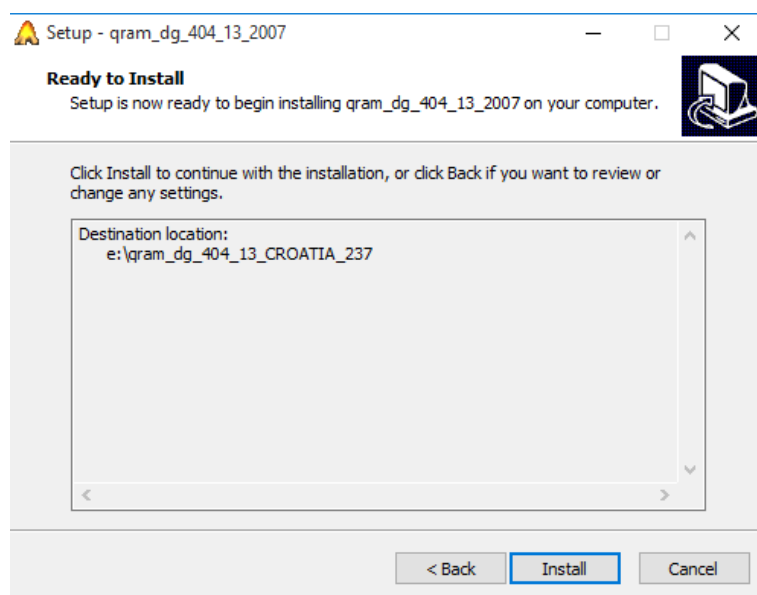
5) Informations affichées à ce stade - cliquez sur " NEXT "



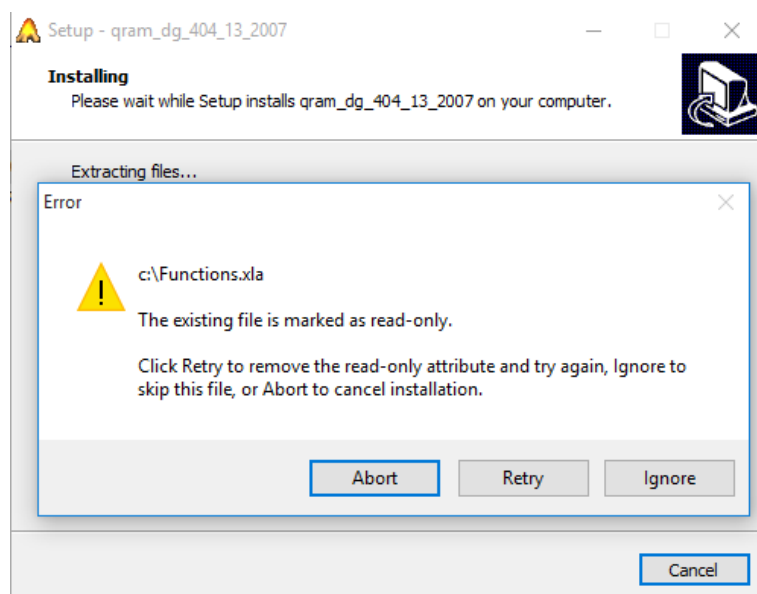
6) Editez la proposition que vous trouverez dans la boîte de dialogue et choisissez librement l'emplacement et le nom du répertoire d'installation, mais n'utilisez pas un répertoire déjà existant.



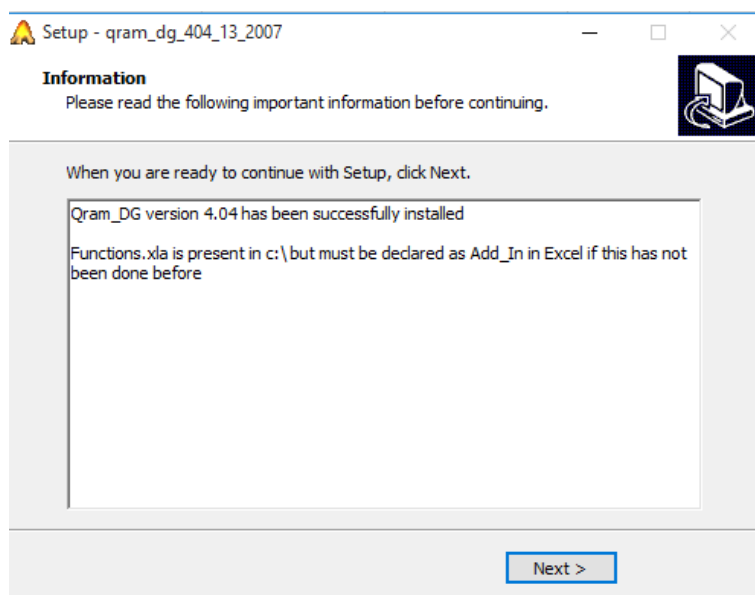
7) Informations affichées à ce stade - cliquez sur " Install "



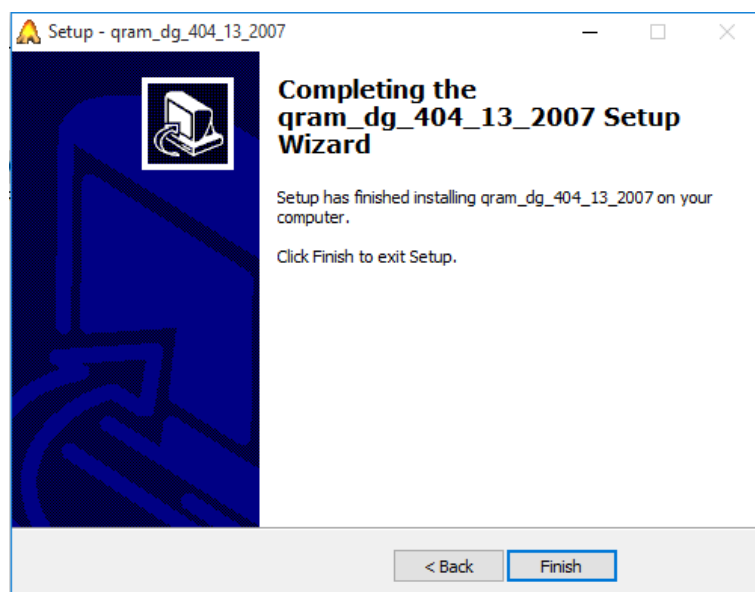
8) Vous obtenez le message d'avertissement suivant uniquement si le fichier **c:\functions.xla** existe déjà. Si c'est le cas, cliquez sur "Retry" autant de fois que nécessaire.



9) Informations affichées à ce stade - cliquez sur " NEXT "



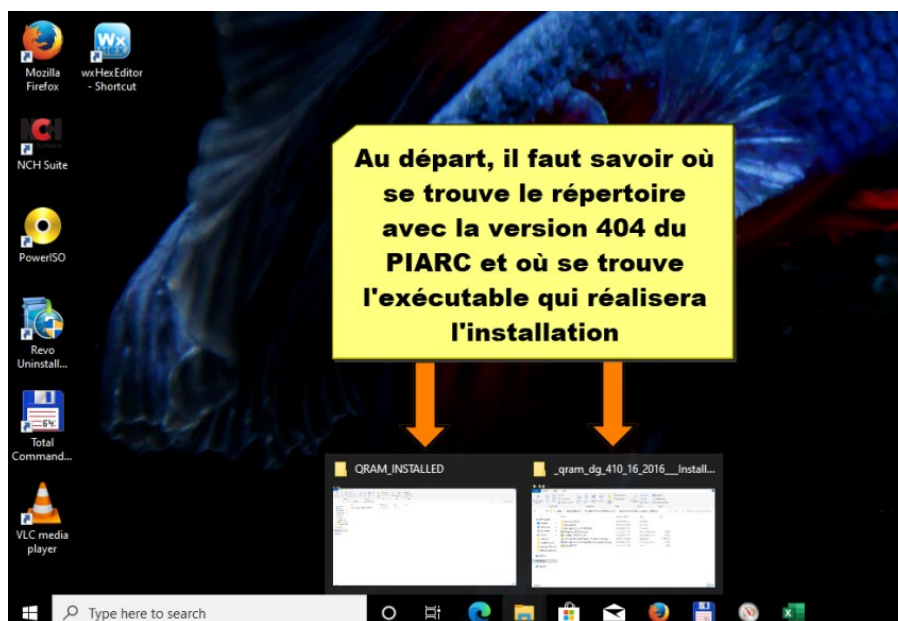
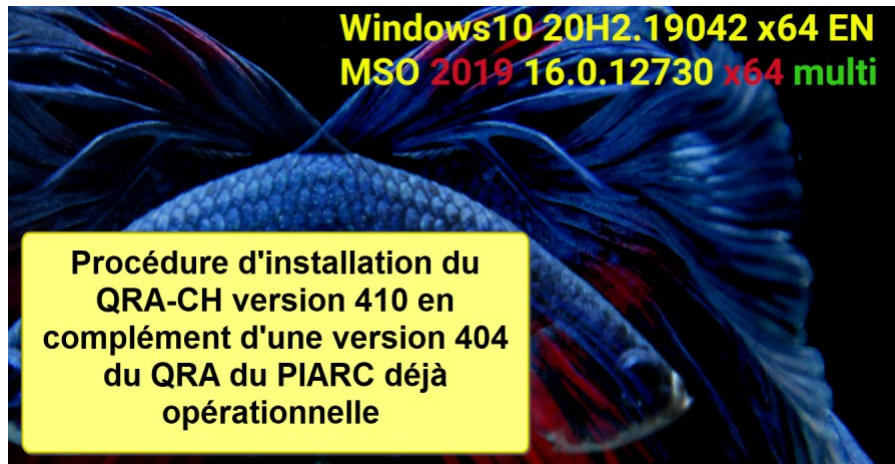
10) Cliquez sur "Finish"

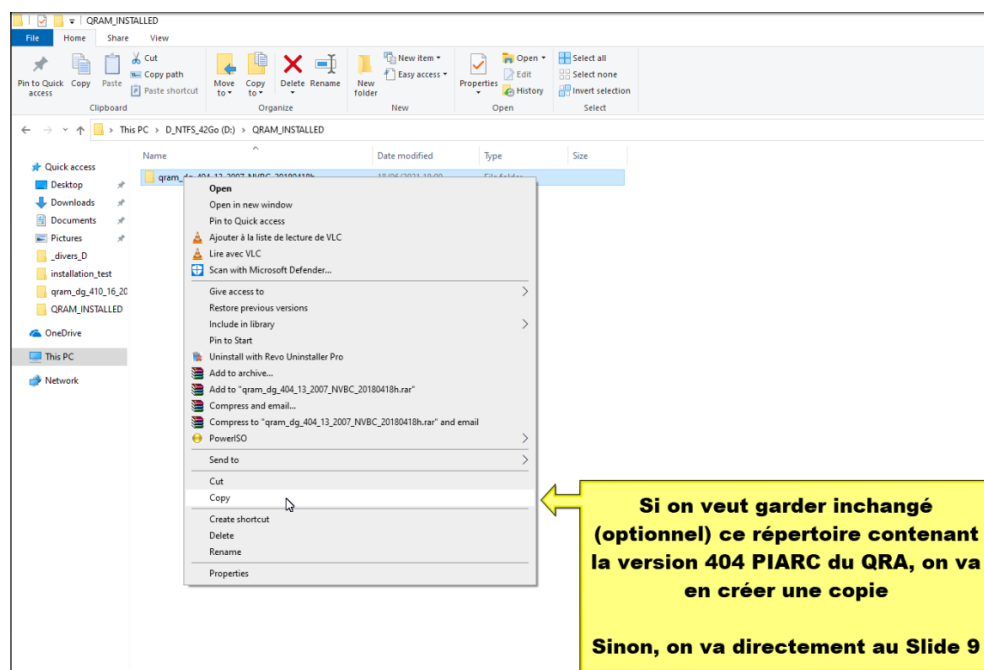
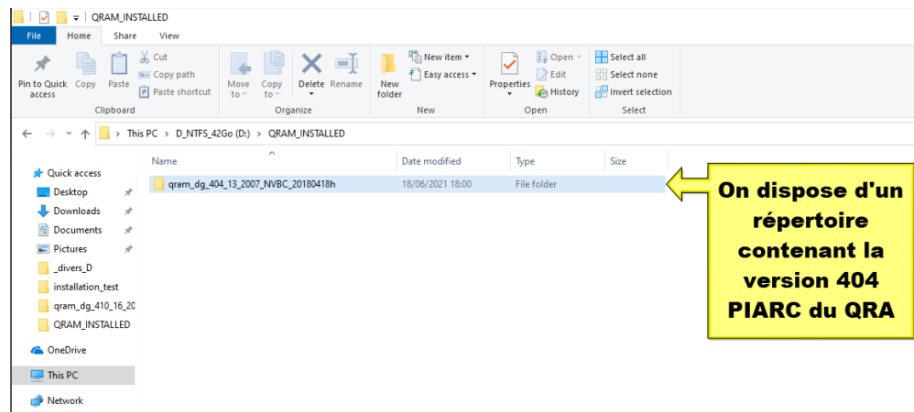


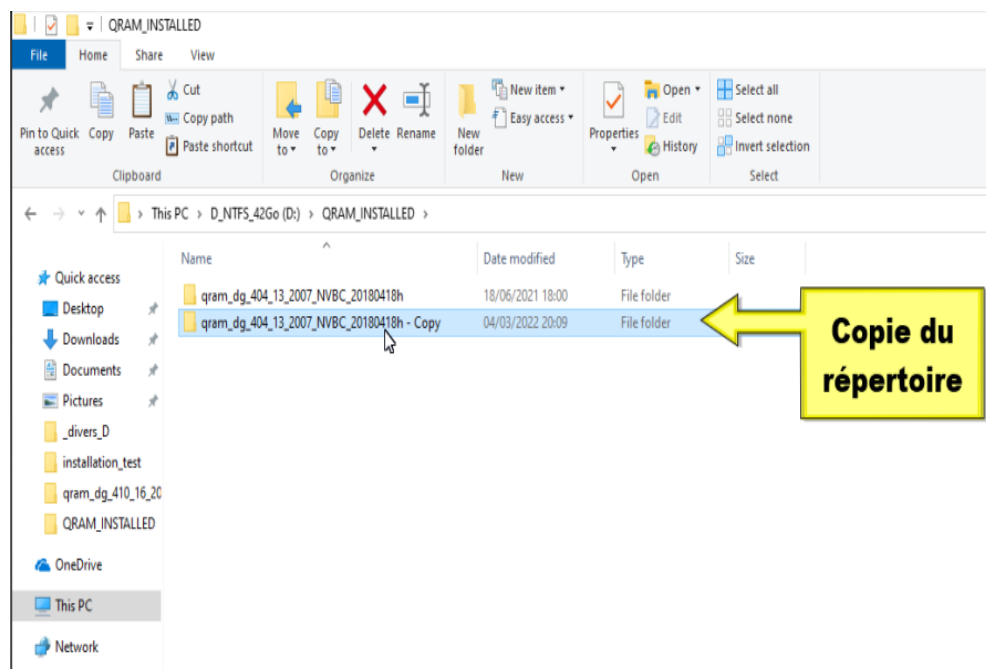
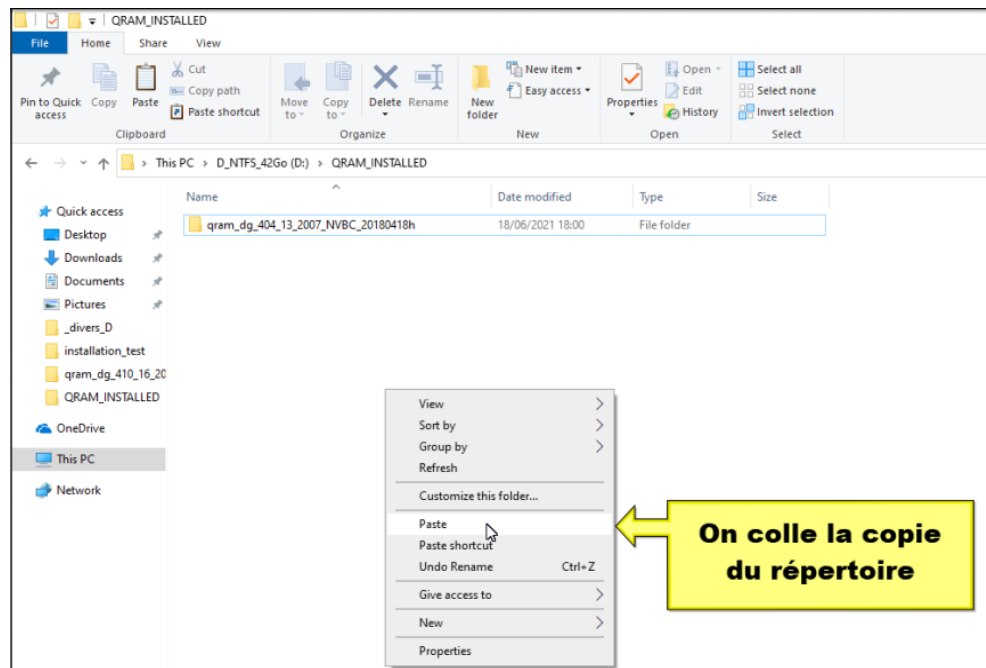
Un fichier "Readme" s'affiche et donne quelques premières informations de base sur l'utilisation du modèle QRAM.

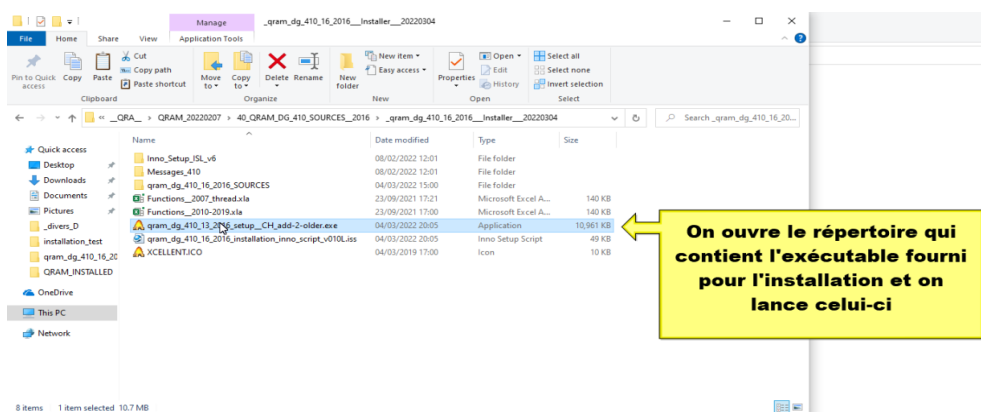
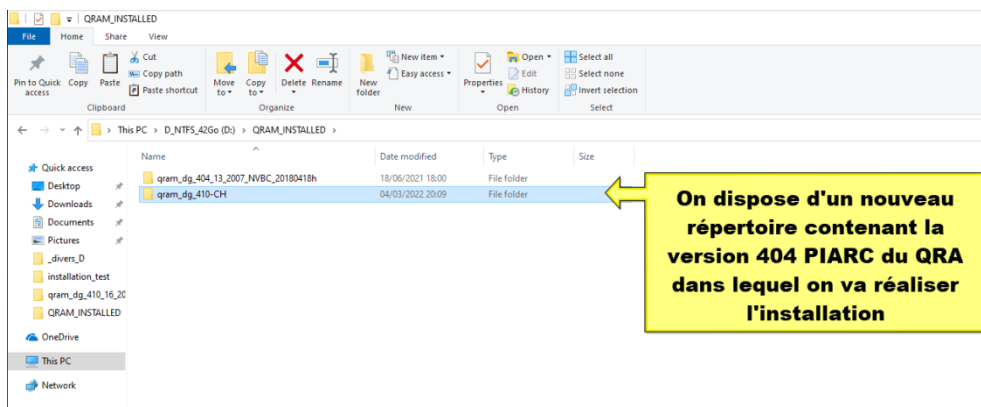
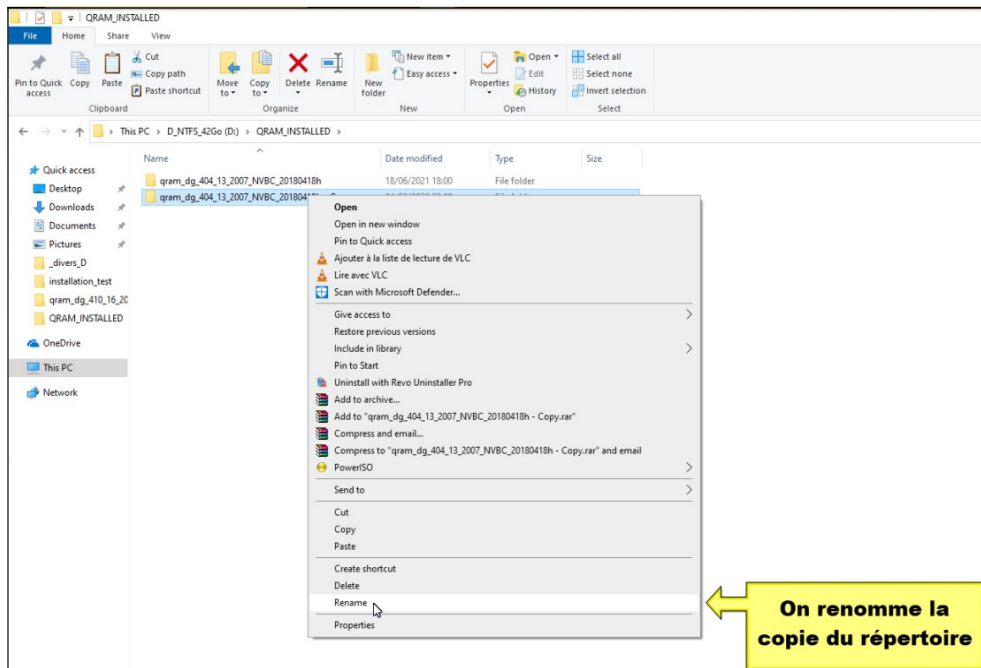
I.2 Installation de la version 4.10 du modèle QRA-CH

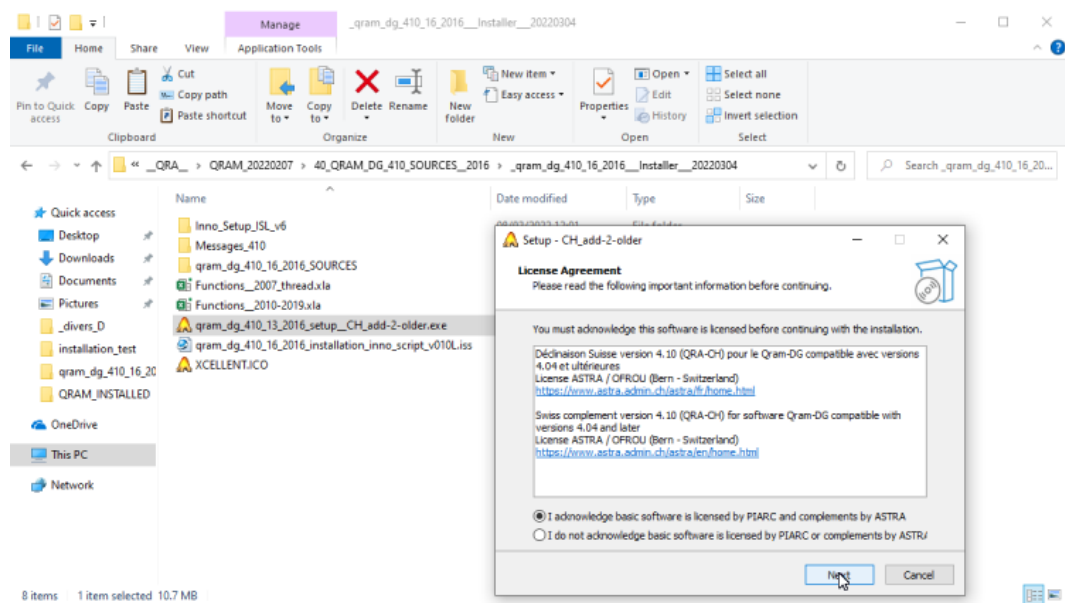
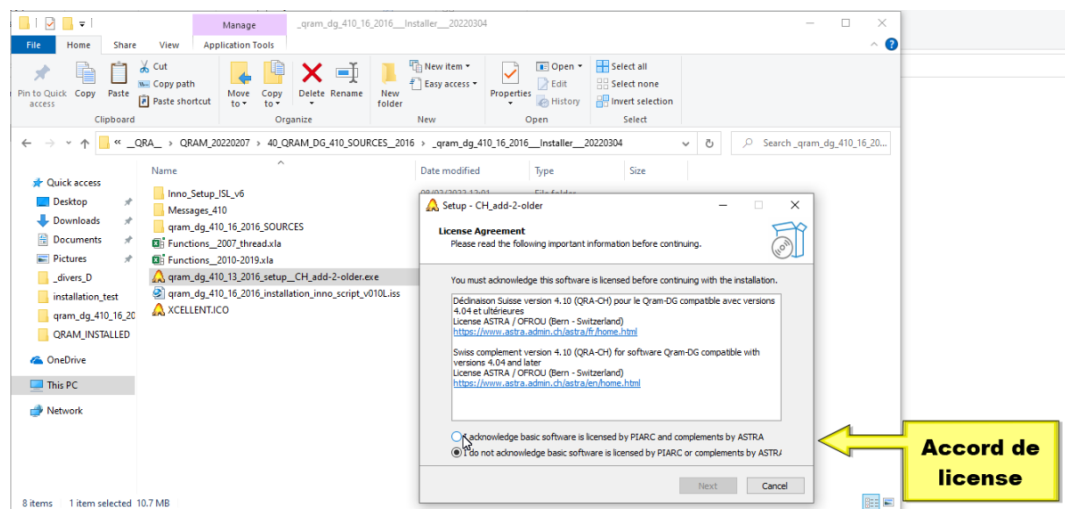
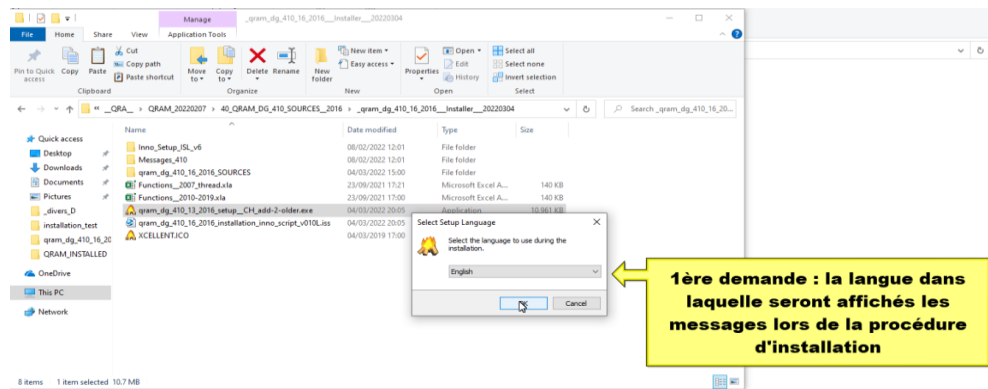
Les étapes à suivre, une fois le modèles QRAM installé, sont les suivantes :

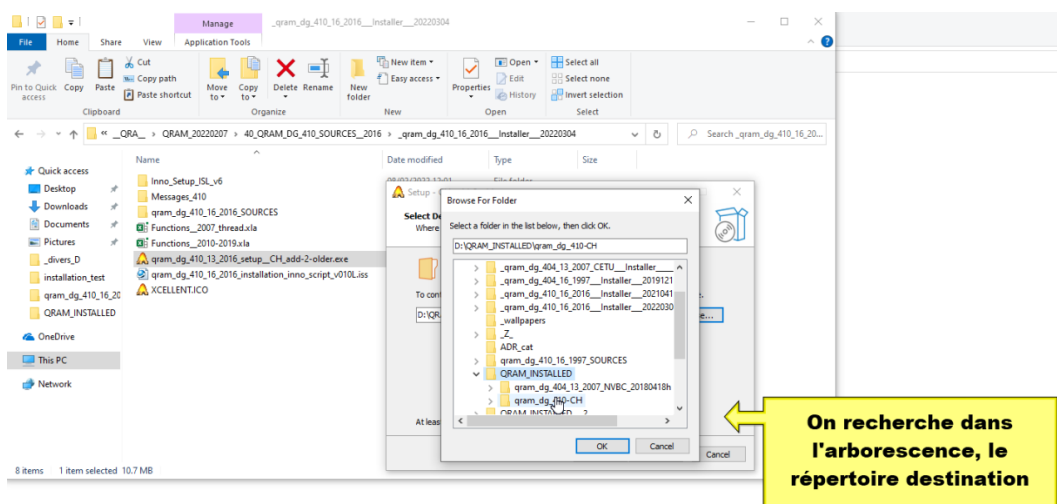
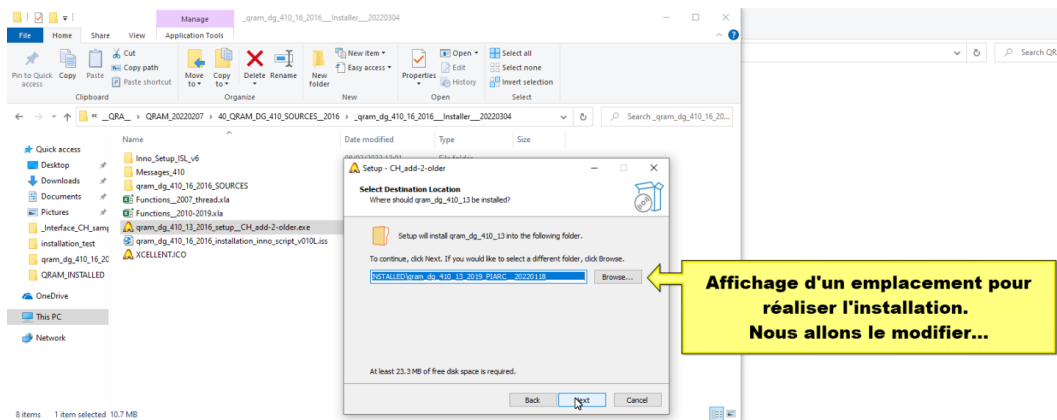
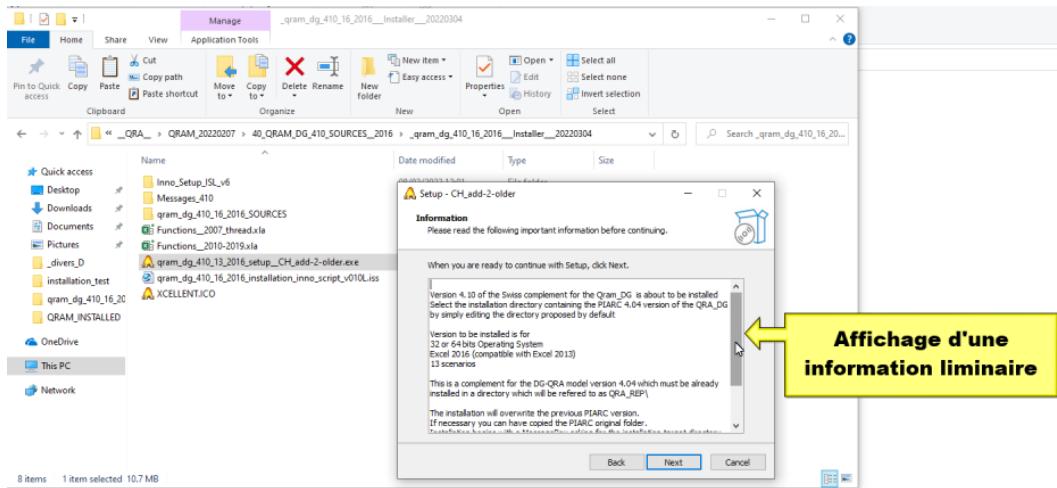


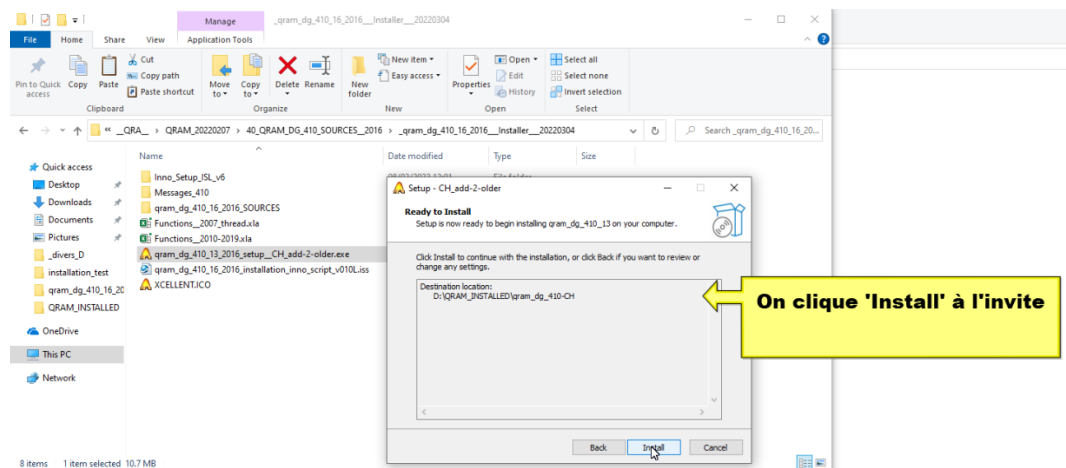
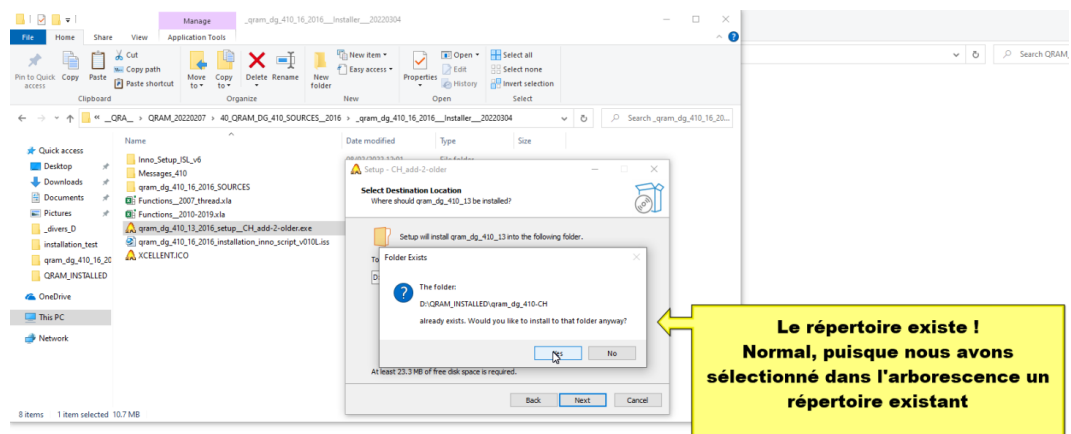
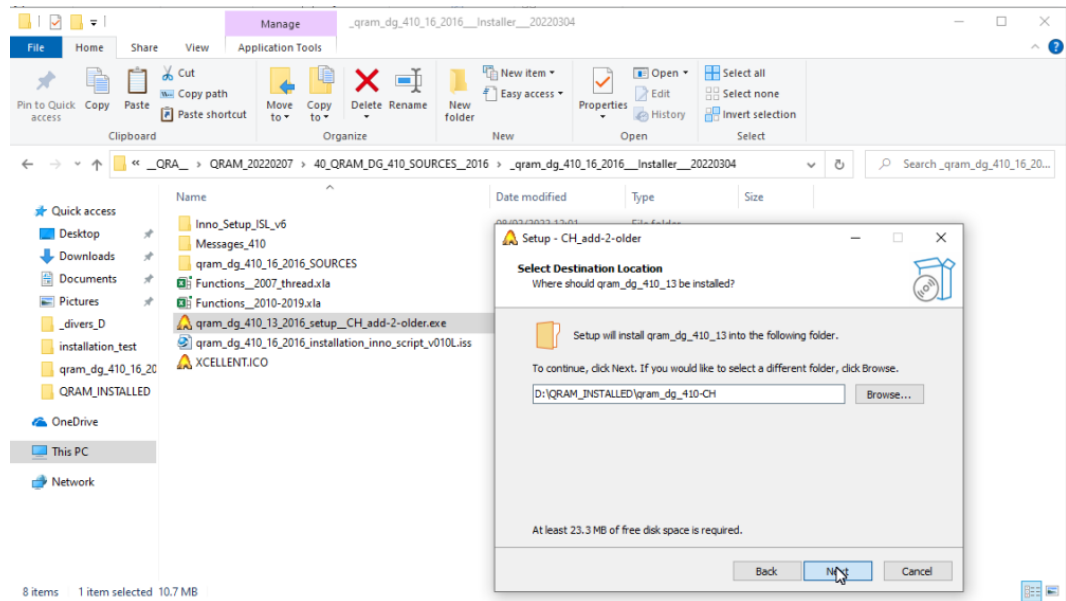


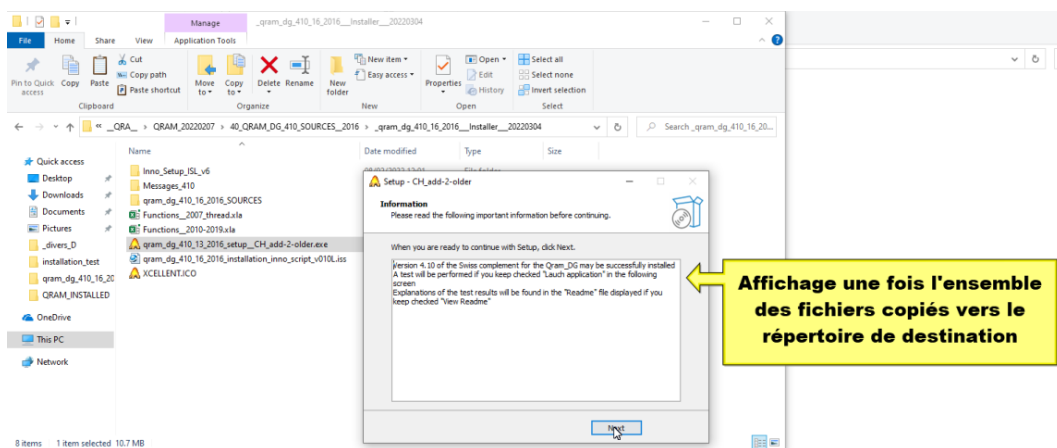
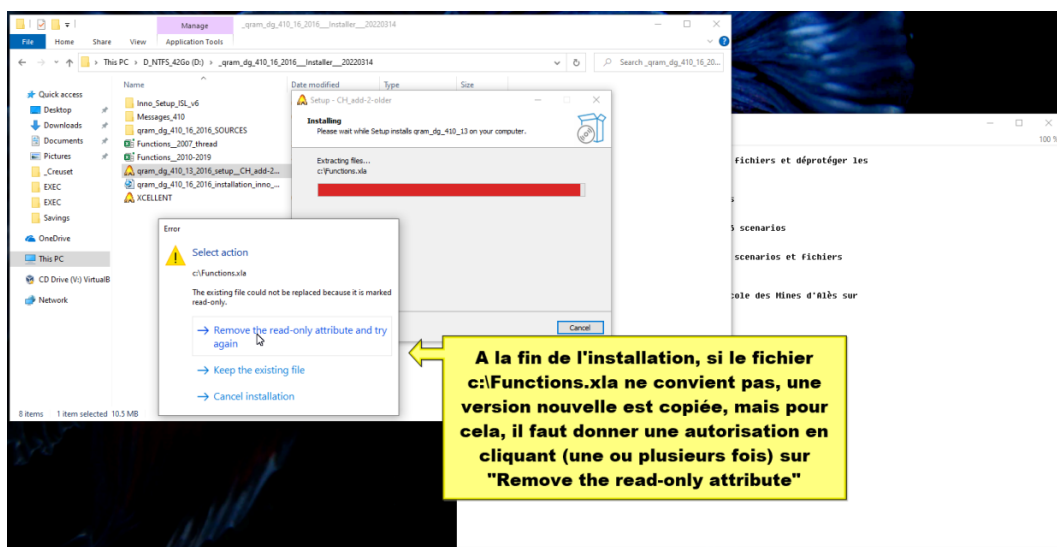
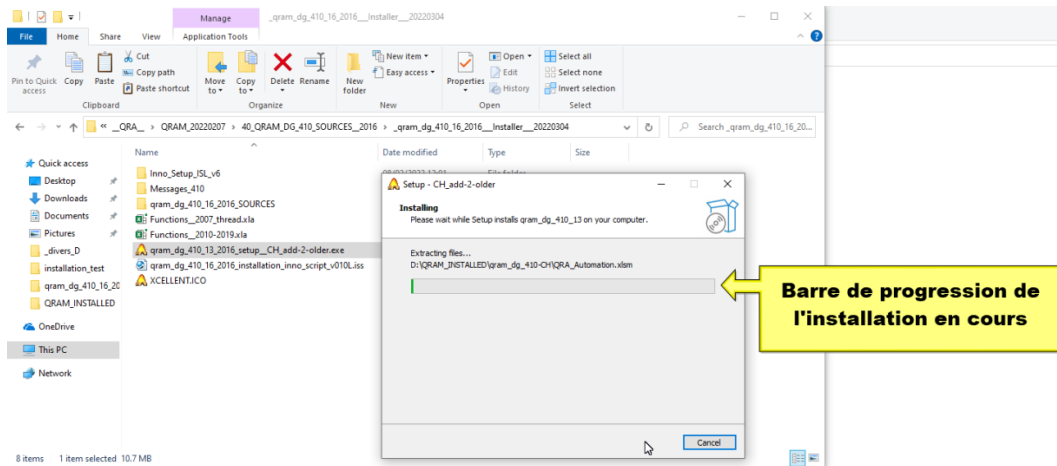


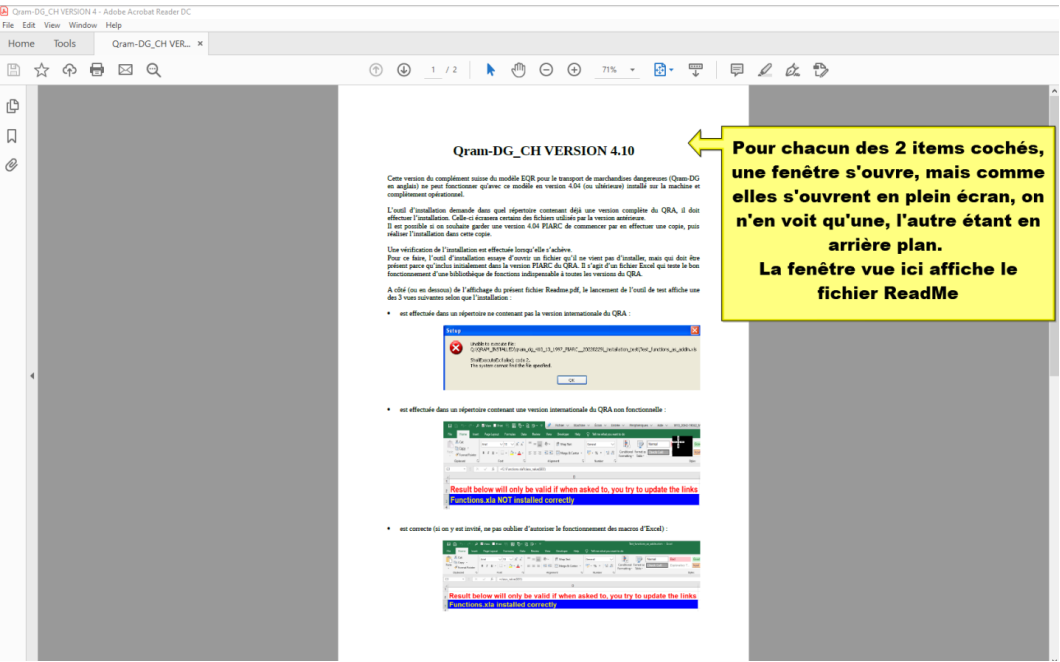
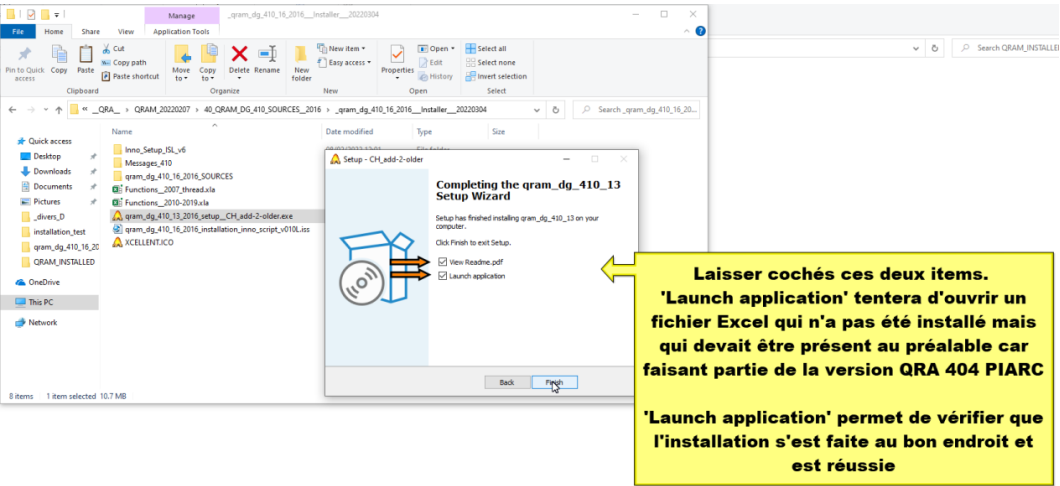


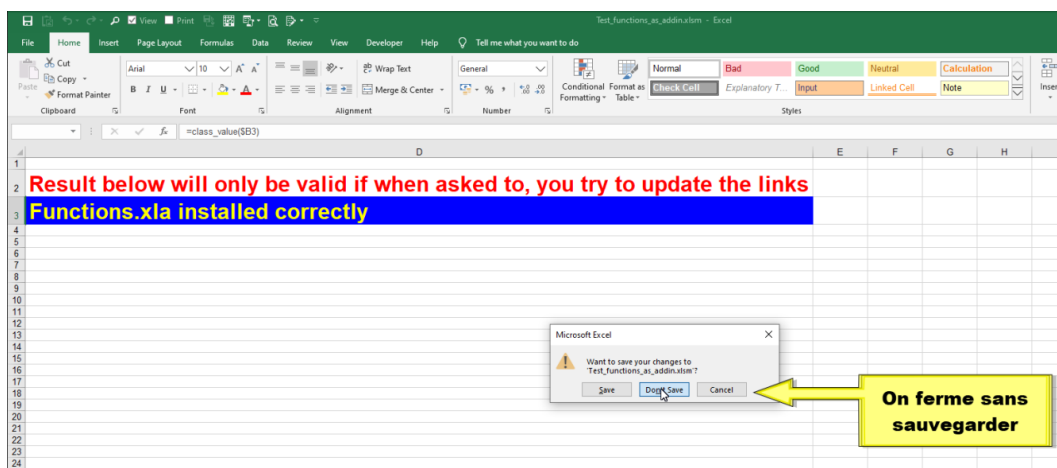
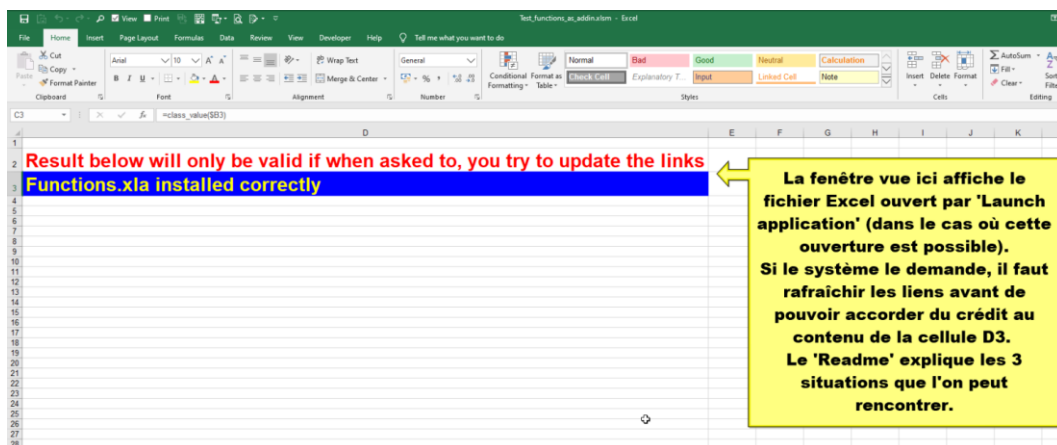












- est effectuée dans un répertoire contenant une version internationale du QRA non fonctionnelle :

Explications
dans le ReadMe

- est correcte (si on y est invité, ne pas oublier d'autoriser le fonctionnement des macros d'Excel) :

Search "Redact"

Export PDF

Adobe Export PDF

Convert PDF Files to Word or Excel Online

Select PDF File

Readme.pdf

Convert

Create PDF

Edit PDF

Comment

Combine Files

Organize Pages

Redact

Protect

Store and share files in Document Cloud

Learn More

II Berechnungsparameter des QRA-CH-Modells vereinfacht (Stufe 1)

Nachfolgend werden die wichtigsten Berechnungsparameter des Berechnungsmodells der Stufe 1 (QRA-CH-Modell vereinfacht) erläutert. Zum einen werden 15 Einzugebende Parameter (nachfolgend als solche bezeichnet) und zum anderen die wichtigsten daraus abgeleiteten weiteren Modellparameter beschrieben.

II.1 Tunnelname

Der Name des Tunnels ist anzugeben, wobei keine Leerzeichen verwendet werden dürfen.

II.2 Tunnelgeometrie

II.2.1 Tunneltyp (einzugebende Parameter)

Für diesen Parameter stehen die folgenden drei Möglichkeiten zur Auswahl:

- Zweiröhrig, Richtungsverkehr
- Einröhrig, Gegenverkehr
- Einröhrig, Richtungsverkehr

Bei einem zweiröhrigen Tunnel, bei dem sich die Eigenschaften der einzelnen Röhren erheblich unterscheiden (Länge, Längsgefälle, Verkehr, Anteil des Lkw-Verkehrs, Ausrüstung, Unfallrate usw.), wird empfohlen, für jede Röhre eine Risikoberechnung separat durchzuführen.

II.2.2 Anzahl Fahrspuren pro Fahrtrichtung (einzugebende Parameter)

Es ist die Anzahl der Fahrspuren pro Fahrtrichtung anzugeben.

II.2.3 Länge (in m) (einzugebende Parameter)

Bei einem zweiröhrigen Tunneltyp und unterschiedlichen Röhrenlängen ist der Mittelwert anzugeben.

II.2.4 Höhe (in m), Breite (in m)

Die Höhe und die Breite werden in Abhängigkeit der Verkehrsführung (Richtungsverkehr/Gegenverkehr), der Anzahl Fahrspuren und des Typs des Lüftungssystems automatisch bestimmt.

Im Fall einer Querlüftung wird aufgrund des Platzbedarfs für die Lüftungsrohre ein rechteckiger Profiltyp angenommen. Dabei wird die Höhe in einem Tunnel mit Richtungsverkehr (Typ Autobahn) auf 4,80 m festgesetzt, bei einem Tunnel mit Gegenverkehr auf 4,50 m.

Für die anderen Lüftungssysteme (natürliche Lüftung, reine Längslüftung oder Längslüftung mit konzentrierter Absaugung) wird ein kreisrunder Querschnitt angenommen, wobei der Radius die Hälfte der Breite beträgt und sich der Kreismittelpunkt zwei Meter über der Fahrbahn befindet. Die auf diese Weise definierte Höhe entspricht der maximalen Höhe unter der Wölbung. Um die resultierende Überschätzung der Querschnittsfläche des Kreisprofils zu kompensieren, (im OECD/PIARC Modell können nur rechteckige Querschnitte abgebildet werden), wird eine Standardbreite festgelegt.

Die Breite wird wie folgt definiert:

- Für einen Tunnel mit Gegenverkehr: Zwei Trottoirs mit je 1 m, die vorhandenen Fahrspuren mit je 3 m

- Für einen Tunnel mit Richtungsverkehr: Ein Trottoir mit 1 m, die vorhandenen Fahrspuren mit je 3,50 m
- Weder Pannestreifen noch eine Überbreite wird hinzugefügt, ausser im (hypothetischen) Fall einer Röhre mit Richtungsverkehr und einer einzigen Fahrspur. In diesem Fall wird ein Pannestreifen von 2,50 m mit eingerechnet.

II.2.5 Entwässerungssystem (einzugebende Parameter)

Hierbei hat der Benutzer zwei Auswahlmöglichkeiten:

- Schlitzrinne (mit einer fixierten Breite von 6 cm)
- Einlaufschächte, mit fixem Abstand zwischen den jeweiligen Schächten (Querschnittsfläche 0,08 m², alle 50 m)

II.2.6 Mittlere Querneigung der Fahrbahn (in %)

Die mittlere Querneigung der Fahrbahn wird als Standardwert auf 2% festgelegt.

II.2.7 Mittleres Längsgefälle (in %) (einzugebende Parameter)

Es wird für das ganze Bauwerk dasselbe Gefälle angenommen. Bei einem zweiröhrigen Tunnel ist die eine Röhre steigend, die andere fallend (in Fahrtrichtung gesehen).

II.2.8 Anzahl der Notausgänge je Röhre (einzugebende Parameter)

Bemerkung: Bei einem zweiröhrigen Tunnel wird pro Röhre die vom Benutzer angegebene Anzahl Notausgänge berücksichtigt.

Mit Hilfe dieser Angabe errechnet das QRA-CH Modell den mittleren Abstand zwischen den Notausgängen (Länge der Röhre / (Anzahl Notausgänge + 1))

II.3 Lüftung

II.3.1 Lüftungssysteme für den Brandfall (einzugebende Parameter)

Zur Auswahl stehen vier Typen von Lüftungssystemen:

- Natürliche Lüftung (keine mechanische Lüftung vorhanden; die Lüftung hängt ausschliesslich von meteorologischen Bedingungen ab)
- Reine Längslüftung
- Längslüftung mit konzentrierter Absaugung
- Querlüftung

Das OECD/PIARC Modell unterscheidet zwischen den Bedingungen im Tunnel, wie sie in den ersten Augenblicken nach Eintritt eines Ereignisses herrschen und denjenigen Bedingungen, wie sie im Tunnel nach einer allfälligen Inbetriebnahme einer Rauchabsaugung herrschen. Die Anfangsbedingungen gelten während den ersten 90 Sekunden nach Ereigniseintritt, danach gelten die Bedingungen mit laufender Rauchabsaugung.

Die zu Beginn herrschende Luftströmung (Anfangsbedingungen) wird längs einer Röhre als einheitlich angenommen (es gibt weder eine Luftzufuhr noch eine Absaugung) und resultiert im Wesentlichen aus den von den Fahrzeugen verursachten Luftmassenbewegungen. Diese Strömungsgeschwindigkeit beträgt bei einem Tunnel mit Gegenverkehr 0,5 m/s und bei einem Tunnel mit Richtungsverkehr in 4,0 m/s.

Die Bedingungen bei Betrieb Rauchabsaugung (stationärer Zustand) unterscheiden sich wesentlich von den Anfangsbedingungen und sind wie folgt definiert:

Tunnel mit natürlicher Lüftung: Die Strömungsgeschwindigkeiten werden für jeden der fünf im Modell berücksichtigten Unfallorte ermittelt, indem die auf die Luftströmung wirkenden treibenden und bremsenden Kräfte gegenübergestellt werden, wobei die folgenden Parameter und Bedingungen berücksichtigt werden:

- Der punktuelle Druckverlust an den Tunnelportalen ($\zeta_e = 0,5$ et $\zeta_s = 1,0$),
- Die Reibungskräfte ($\lambda = 0,025$),
- Der Widerstand aus den sich stauenden Fahrzeugen, wobei für die Bestimmung der Länge des Staus die Position des Unfalls sowie die Zeitspanne bis zur Schliessung des Tunnels berücksichtigt werden,
- Der auftretende Kamineffekt aufgrund des Gefälles und des Temperaturunterschieds,
- Die Differenz des Luftdruckes zwischen den Portalen wird als null angenommen.

Für sämtliche oben beschriebenen Parameter wird das Längsprofil der Temperatur nach der isothermen Methode ermittelt (unter Vernachlässigung der Erwärmung der Tunnelwände), unter Berücksichtigung einer festgelegten Brandleistung von 200 MW (wovon 1/3 von den Tunnelwänden durch Strahlung absorbiert und somit vernachlässigt wird und 2/3 durch Konvektion in die Luft abgegeben wird) und einer festgelegten Umgebungstemperatur von 15°C.

Im Fall von kleinen Strömungsgeschwindigkeiten wird die Temperatur über dem Brandherd auf 1'800 K begrenzt.

Die Abnahme der Temperaturen im Bereich vor dem Brandherd (in Fahrtrichtung gesehen) wird unter Berücksichtigung des Wärmetausches zwischen der Luft und den Tunnelwänden wie folgt ermittelt:

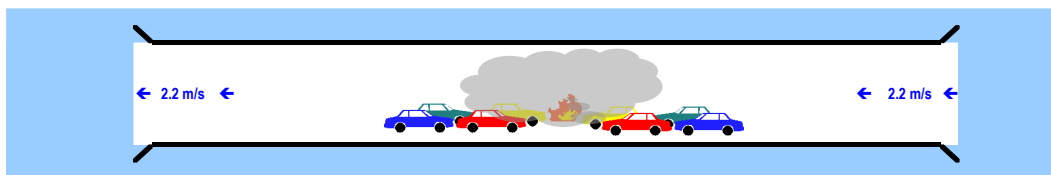
- Die Konvektion wird gemäss der Petukhov-Formel berechnet
- Die Wärmestrahlung wird gemäss der Stefan-Boltzmann-Formel berechnet, wobei der Rauch als schwarzer Körper betrachtet wird, der den ganzen Bereich des Tunnels ausfüllt.

Diese oben aufgeführten Berechnungen werden für jede der 5 Unfallstellen durchgeführt.

Die physikalischen Umgebungsparameter werden entsprechend den Bedingungen eines Tunnels auf einer Höhe von 700 m ü. M. festgelegt:

- Umgebungstemperatur: 15°C
- Luftdichte: 1,15 kg/m³
- Wärmekapazität der Luft: 1010 J/(kg*K)

Sind alle diese Berechnungen durchgeführt, bietet das Interface dem Benutzer eine schematische Darstellung, die für jede der 5 Unfallstellen das resultierende Lüftungsschema sowie die mittleren Strömungsgeschwindigkeiten veranschaulicht.



Reine Längslüftung: Die Strömungsgeschwindigkeiten nach Inbetriebnahme des Brandregimes der Lüftung werden in zwei Schritten bestimmt: Zuerst werden die auf die Luftströmung wirkenden treibenden und bremsenden Kräfte bestimmt, unter Einhaltung der in der ASTR-Richtlinie "Lüftung der Strassentunnel" [10] geforderten Zielgrösse für die Strömungsgeschwindigkeit im Brandfall. Diese betragen:

- Tunnel mit Richtungsverkehr: 3 m/s in Fahrtrichtung
- Tunnel mit Gegenverkehr: 1,5 m/s nach unten (in Richtung der fallenden Längsneigung)

Bei der Ermittlung der Kräftebilanz werden folgende Elemente berücksichtigt:

- Der punktuelle Druckverlust an den Tunnelportalen ($\zeta_e = 0,5$ et $\zeta_s = 1,0$)
- Die Reibungskräfte ($\lambda = 0,025$)
- Der Widerstand aus den sich stauenden Fahrzeugen, wobei für die Bestimmung der Länge des Staus die Position des Unfalls sowie die Zeitspanne bis zur Schliessung des Tunnels berücksichtigt werden
- Der Kamineffekt aufgrund des Gefälles und die durch einen Brand (30 MW) induzierten Temperaturdifferenz,
- Die Differenz des Luftdruckes zwischen den Portalen wird als null angenommen.
- Die Schubkraft der Ventilatoren, um die treibenden und bremsenden Kräfte auszugleichen.

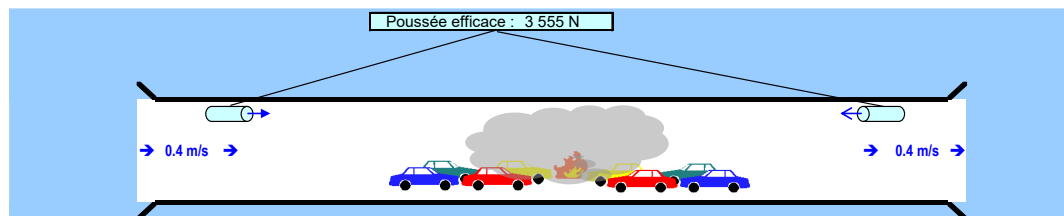
Die effektiv angenommene Leistung der Strahlventilatoren wird schlussendlich wie folgt ermittelt: Maximalwert der für die fünf Brandorte gemäss oben beschriebenen Vorgehen ermittelten Leistung zuzüglich 30% oder 50%, in Abhängigkeit des Ausführungsstandards des Lüftungssystems (siehe untenstehende Erläuterung).

In einem zweiten Schritt werden die Strömungsgeschwindigkeiten bei Betrieb der Brandregimes für jede der 5 Unfallstellen für bei einer Brandleistung von 200 MW ermittelt, unter Berücksichtigung der oben aufgeführten Kräftebilanz und der vorgängig beschriebenen effektiven Leistung der Strahlventilatoren (erhöht um 30% bzw. 50%). Um die Probleme der numerischen Divergenz im Falle von sehr kleinen Strömungsgeschwindigkeiten zu umgehen, beträgt die vom Modell ausgewiesene Luftgeschwindigkeit stets mindestens 0,3 m/s (absoluter Wert), wobei jeweils diejenige Strömungsrichtung berücksichtigt wird, mit der die Kräftebilanz minimiert wird.

Die definitiv berücksichtigte Strömungsgeschwindigkeit hängt von der Verkehrsart ab:

- In einem Tunnel mit Richtungsverkehr werden die Ventilatoren mit voller Leistung betrieben, um eine maximale Strömungsgeschwindigkeit in Fahrtrichtung zu erreichen.
- In einem Tunnel mit Gegenverkehr wird die Leistung der Ventilatoren prinzipiell so eingesetzt, dass Strömungsgeschwindigkeiten im Tunnel möglichst klein gehalten werden. Die Strömungsgeschwindigkeit sollte idealerweise 1,5 m/s nicht überschreiten. Es wird überprüft, ob mit dem Lüftungssystem eine Strömung von 1,5 m/s in Richtung der fallenden Längsneigung (nach unten) erreicht werden kann. Sollte die installierte Leistung der Ventilatoren genügen, um dieses Ziel zu erreichen, so entspricht die Strömungsgeschwindigkeit 1,5 m/s. Genügt die installierte Leistung dieser Anforderung nicht (d. h. sie ist nicht in der Lage, dem Kamineffekt entsprechend entgegenzuwirken), dann wird die resultierende Strömung unter Berücksichtigung der vollen Leistung der Ventilatoren in die der natürlichen Strömung entgegengesetzten Richtung berücksichtigt.

Sind alle diese Berechnungen durchgeführt, bietet das Interface dem Benutzer eine schematische Darstellung, die für jede der 5 Unfallstellen das resultierende Lüftungsschema sowie die mittleren Strömungsgeschwindigkeiten veranschaulicht.



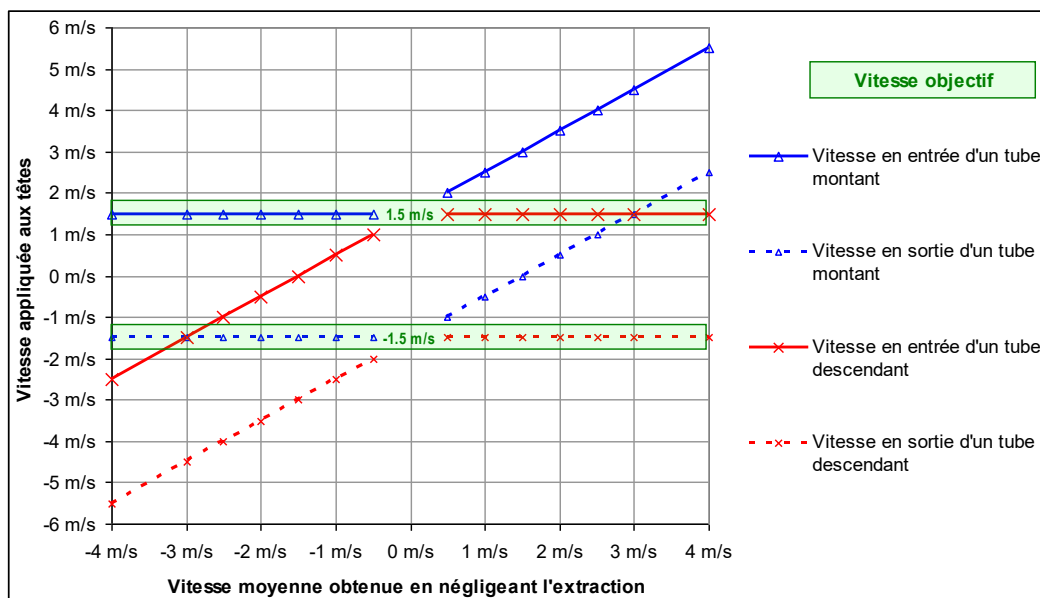
Bemerkung: Die angezeigte Ventilatorenleistung sollte theoretisch leicht unter der auf freiem Feld erreichten Leistung liegen je nach Standortbedingen der Ventilatoren im Tunnel und Austrittsgeschwindigkeit um einen Faktor in der Grössenordnung von 20% bis 30%.

Längslüftung mit konzentrierter Absaugung: Die Strömungsgeschwindigkeit bei Betrieb des Brandregimes wird auf die gleiche Art und Weise bestimmt wie im Falle der reinen Längslüftung, unter Vernachlässigung des Einflusses der Absaugung auf die punktuellen Druckverluste (einheitliches Geschwindigkeitsprofil entlang des Tunnels) und auf das Längsprofil der Temperatur.

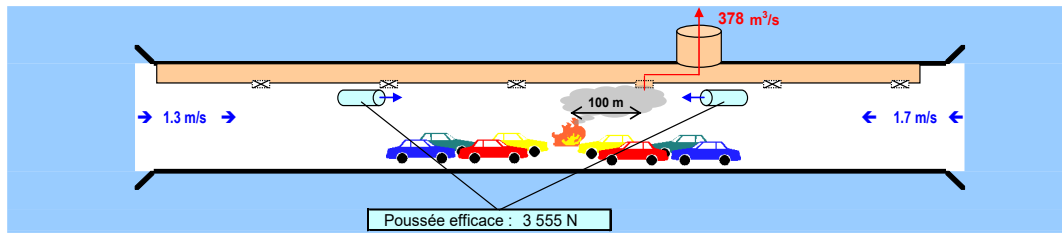
Die Absaugmenge wird definiert als 3-mal der Tunnelquerschnitt. Die Absaugung erfolgt 100 m vor der Unfallstelle (in Fahrtrichtung gesehen), wie dies beispielsweise mit ferngesteuerten Brandklappen möglich ist.

Die letztendlich berücksichtigte Strömungsgeschwindigkeit hängt von der Verkehrsart ab:

- In einem Tunnel mit Richtungsverkehr werden die Ventilatoren mit voller Leistung betrieben, um eine maximale Strömungsgeschwindigkeit in Fahrtrichtung zu erreichen. Die Strömungsgeschwindigkeit am Eingangsportal entspricht jener, die resultiert, wenn der Effekt der Absaugung ausser Acht gelassen wird, ergänzt mit der Luftzufuhr, die der Hälfte der Extraktionsmenge entspricht (also 1,5 m/s, weil die Absaugmenge 3 mal der Tunnelquerschnitt beträgt). Was die Strömungsgeschwindigkeit vor dem Punkt der Absaugung (in Fahrtrichtung gesehen) betrifft, so ist diese um 3 m/s geringer als die Strömungsgeschwindigkeit am Eingangsportal (Bewahrung der Luftmenge).
- In einem Tunnel mit Gegenverkehr wird die Leistung der Ventilatoren prinzipiell dafür eingesetzt, die Strömungsgeschwindigkeit auf beiden Seiten der Absaugung bei 1,5 m/s zu halten. Sollte die installierte Leistung genügen, um dieses Ziel zu erreichen, so entspricht die Strömungsgeschwindigkeit an den Tunnelportalen je 1,5 m/s in Richtung des Tunnelinnern (da die Absaugmenge 3-mal den Tunnelquerschnitt beträgt). Genügt die installierte Leistung dieser Anforderung nicht (d. h. sie ist nicht in der Lage, dem Kamineffekt entsprechend entgegenzuwirken), so beträgt die Strömungsgeschwindigkeit am höher gelegenen Tunnelportal der minimalen Geschwindigkeit, die mit dem System erreicht werden kann, unter Vernachlässigung der Absaugung und ergänzt mit der Luftzufuhr, die der Hälfte der Extraktionsmenge entspricht. Der maximale Wert beträgt 1.5 m/s (vgl. nachfolgende Abbildung).



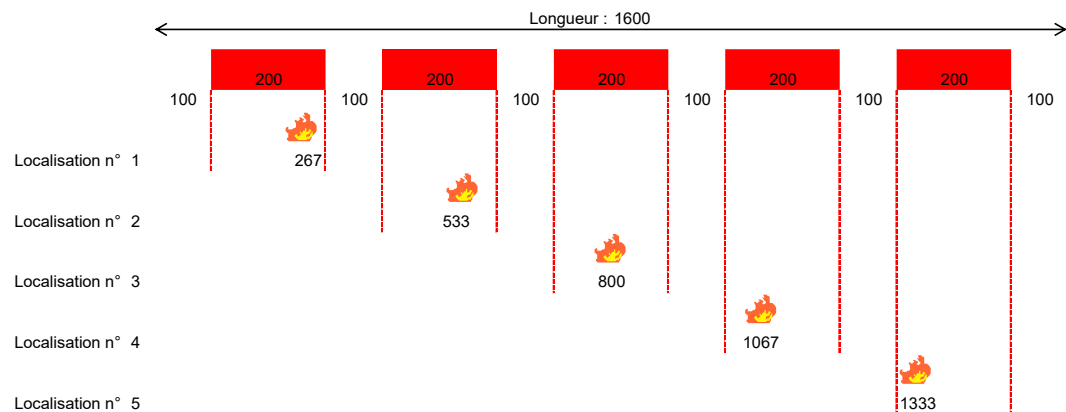
Sind diese Berechnungen durchgeführt, bietet das Interface dem Benutzer eine schematische Darstellung, die für jede der 5 Unfallstellen das resultierende Lüftungsschema sowie die mittleren Strömungsgeschwindigkeiten veranschaulicht.



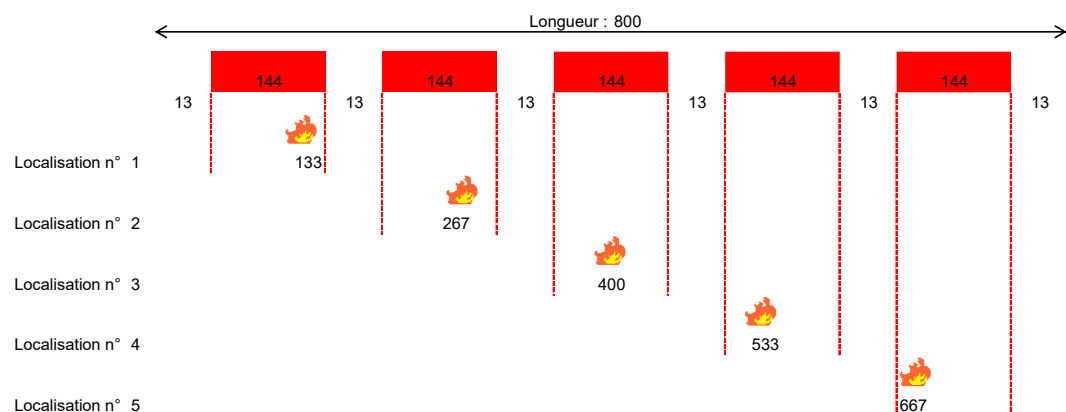
Querlüftung: Die Strömungsgeschwindigkeit (bei Betrieb des Brandregimes) wird auf die gleiche Art und Weise bestimmt wie im Falle der Längslüftung mit konzentrierter Absaugung.

Der einzige Unterschied besteht darin, als dass sich die Rauchabzugszone auf eine maximale Länge von 200 m um den Brandort erstreckt.

Die den fünf Brandorten zugeteilten Rauchabzugszonen sind regelmässig im Tunnel verteilt. Ist die Länge des Tunnels kleiner als 1080 m, werden die Längen der jeweiligen Rauchabzugszonen automatisch so reduziert, als dass die Distanz zwischen den jeweiligen Rauchabzugszonen immer 13,3 m ($80 / 6$) beträgt, wie die nachfolgenden Abbildungen zeigen:

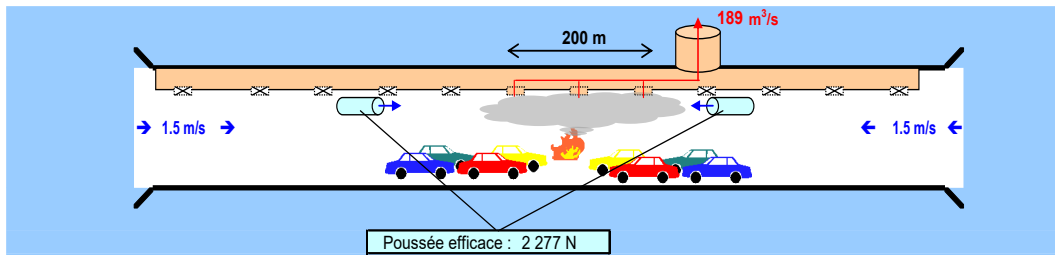


Schematische Darstellung der Brandorte und der Rauchabzugszonen für einen Tunnel mit einer Länge von 1600 m



Schematische Darstellung der Brandorte und der Rauchabzugszonen für einen Tunnel mit einer Länge von 800 m

Sind diese Berechnungen durchgeführt, bietet das Interface dem Benutzer eine schematische Darstellung, die für jede der 5 Unfallstellen das resultierende Lüftungsschema sowie die mittleren Strömungsgeschwindigkeiten veranschaulicht.



II.3.2 Ausführungsstandard des Lüftungssystems (einzugebende Parameter)

Die errechnete Leistung der Ventilatoren, die dafür notwendig ist, um die Luftströmung bei einem Brand von 30 MW kontrollieren zu können, wird um 30% erhöht, wenn es sich um ein Lüftungssystem handelt, das die Anforderungen der aktuell gültigen Normen nicht erfüllt. Handelt es sich um eine Anlage, die die Anforderungen der aktuell gültigen Normen erfüllt, so wird die errechnete Leistung um 50% erhöht.

Diese rechnerische Erhöhung dient dazu, die folgenden Effekte zu kompensieren, die in der Methode vernachlässigt werden:

- Verlust von Leistungskapazitäten der Ventilatoren angesichts der Hitzeeinwirkung (ggf. sogar Zerstörung einzelner Ventilatoren)
- Gegendruck an den Tunnelportalen

II.4 Betrieb

II.4.1 Tunnelüberwachung (einzugebende Parameter)

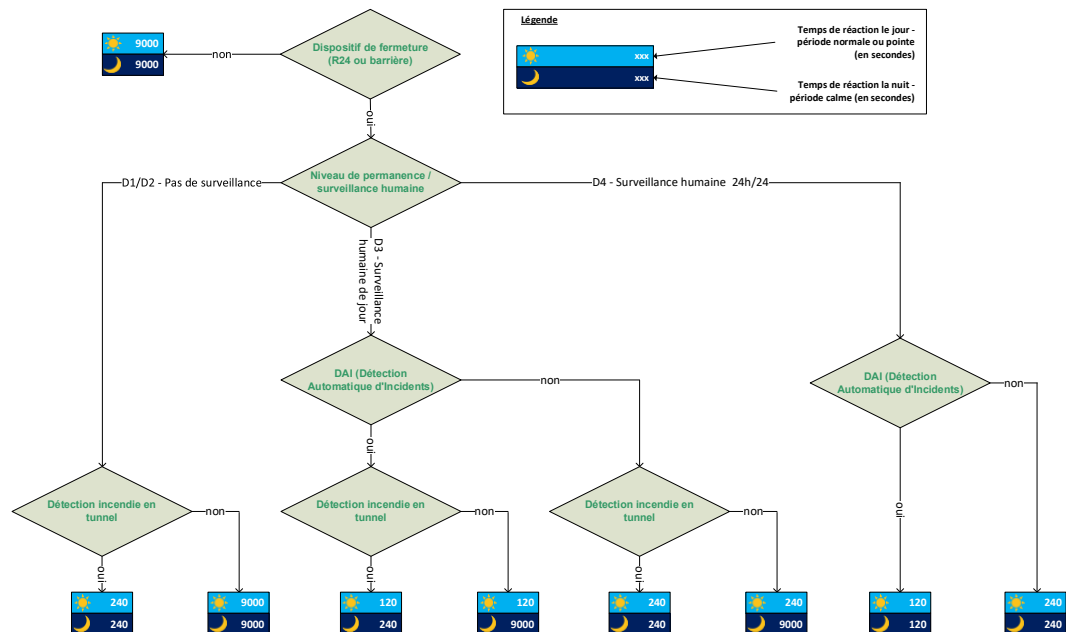
Zur Auswahl stehen 3 Arten der Tunnelüberwachung:

- Keine Überwachung (D1/D2)
- Tagsüber überwacht (D3)
- 24 Stunden überwacht (D4)

Diese drei Überwachungsarten werden mit D1/D2, D3 und D4 bezeichnet (analog der französischen Reglementierung). Die Erfassung der Überwachungsart dient dazu, in Abhängigkeit des Vorhandenseins anderer Betriebsanlagen (nachstehend aufgelistet) die Zeitspanne zwischen dem Anhalten des Verkehrs am Tunneleingang und dem allfälligen Einsatz des Lüftungssystems im Brandfall zu ermitteln (Reaktionszeit des Betreibers).

Der Typ des Lüftungssystems, der vom Benutzer im Interface angegeben wird, wird vom Modell ignoriert, wenn der Tunnel nicht überwacht ist (D1) und auch keine Brandmeldeanlage installiert ist (in einem solchen Fall kann das Brandregime der Lüftung nicht rechtzeitig eingeschaltet werden, um wirksam eingreifen zu können; die Bedingungen entsprechen einer natürlichen Lüftung).

Die berücksichtigten Werte für Reaktionszeit des Betreibers (in Sekunden) werden gemäss dem nachstehenden Diagramm ermittelt:



II.4.2 Videoüberwachung

Im Interface wird angenommen, dass mit dem Vorhandensein einer permanenten (menschlichen) Überwachung auch eine Videoüberwachung mit einhergeht. Umgekehrt wird angenommen, dass bei Eintritt des oben beschriebenen Falles "keine Überwachung" auch keine Videoüberwachung vorhanden ist.

Die Reaktivität der Tunnelnutzer im Ereignisfall wird im Modell auf einer Skala von 0 bis 3 erfasst. Da die Reaktivität der Tunnelnutzer von der Ausrüstung des Tunnels zur Alarmierung abhängig ist, wird dieser Parameter (von 0 bis 3) wie folgt ermittelt: Der berücksichtigte Wert ist die Hälfte der Summe der Reaktionspunkte, die in Abhängigkeit der betriebstechnischen Anlagen des Tunnels (Videoüberwachung, Lichtsignalanlage, Wechselverkehrszeichen etc.) gezählt werden. Die Summe wird jeweils auf die ganze Zahl aufgerundet.

Ist eine Videoüberwachung vorhanden, resp. geschieht die Überwachung des Tunnels mit Hilfe einer Videoanlage, wird ein Reaktionspunkt dazugezählt.

II.4.3 Automatische Ereignisdetektion (einzugebende Parameter)

Ist eine automatische Ereignisdetektion vorhanden, wird ein Reaktionspunkt dazugezählt. Dies erlaubt u.a. eine Reduktion der Zeitspanne vom Ereigniseintritt bis zur Schliessung des Tunnels von 240 s auf 120 s, sofern der Tunnel überwacht ist und eine Einrichtung zur Schliessung des Tunnels existiert (siehe oben).

II.4.4 Branddetektion (einzugebende Parameter)

Das Vorhandensein einer Branddetektion ermöglicht die automatische Schliessung des Tunnels in 240 s und die Inbetriebnahme der Rauchabsaugungsanlage, auch wenn der Tunnel nicht überwacht ist (siehe oben).

II.4.5 Lichtsignalanlagen im Tunnel und/oder Fahrstreifensignalisation

Es wird angenommen, dass keine Lichtsignalanlagen oder Fahrstreifensignalisation im Tunnel vorhanden sind.

II.4.6 Ferngesteuerte Barrieren oder Lichtsignale an den Tunneleingängen (einzugebende Parameter)

Existiert eine Einrichtung zur Unterbrechung des Verkehrs am Tunnelportal (mittels Lichtsignal oder Barriere), so wird die Schliessung in 120 s veranlasst, sofern der Tunnel überwacht ist und wenn diese Überwachung von einer automatischen Ereignisdetektion unterstützt wird. Wenn der Tunnel überwacht aber keine automatische Ereignisdetektion vorhanden ist oder wenn der Tunnel nicht überwacht ist aber über eine automatische Ereignisdetektion verfügt, wird die Schliessung in 240 s veranlasst (vgl. Diagramm in Kapitel II.4.1).

Existiert eine Einrichtung zur Unterbrechung des Verkehrs am Tunnelportal (mittels Lichtsignal oder Barriere), so wird ein Reaktionspunkt dazugezählt.

II.4.7 Einsprechanlage FM

Es wird angenommen, dass eine FM-Einsprechanlage im Tunnel vorhanden ist. Es wird ein Reaktionspunkt dazugezählt.

II.4.8 Wechselverkehrszeichen

Es wird angenommen, dass keine Wechselverkehrszeichen im Tunnel vorhanden sind.

Die Reaktionszeit der Benutzer wird im QRA-CH Modell auf einer Skala von 0 bis 3 erfasst. Der berücksichtigte Wert entspricht der Hälfte der Summe der Reaktionspunkte gemäss dem Überwachungsniveau, die entsprechend des Vorhandenseins der oben genannten Anlagen zusammengezählt werden. Die Summe wird jeweils auf die ganze Zahl aufgerundet.

II.5 Verkehr (keine Unterscheidung der Richtungen A und B)

II.5.1 Anzahl Zeitperioden

Es werden standardmässig zwei Zeitperioden definiert.

II.5.2 Anteile der Zeitperioden

Die Anteile der Zeitperioden sind wie folgt festgelegt: normale Periode tagsüber mit einer Dauer von 14 h, Periode mit schwächerem Verkehr nachts mit einer Dauer von 10 h. Dies ergibt folgende Anteile:

- Normale Periode tagsüber: $0,583 \left(\frac{24-10}{24} \right)$
- Schwache Periode nachts: $0,417 \left(\frac{10}{24} \right)$

II.5.3 Durchschnittliches tägliches Verkehrsaufkommen (Fz/Tag) (einzugebende Parameter)

Es ist der DTV des Tunnels anzugeben. Daraus wird das durchschnittliche stündliche Verkehrsaufkommen je Zeitperiode und Fahrtrichtung ermittelt.

Es wird angenommen, dass sich das Verkehrsaufkommen gleich auf die beiden Fahrtrichtungen verteilt (ausser bei einem einröhrigen Tunnel mit Richtungsverkehr, bei dem der gesamte DTV der einen Röhre zugeteilt wird).

Der Anteil des DTV während der Nacht wird auf 10% festgelegt.

II.5.4 Anteil Schwerverkehr (einzugebende Parameter)

Es ist der Anteil Schwerverkehr am Gesamtverkehr anzugeben. Ist der Wert nicht bekannt, so kann der Standardwert von 6% verwendet werden.

II.5.5 Anteil Busverkehr

Der Anteil Busverkehr am gesamten Verkehrsaufkommen ist auf einen Wert von 0.5% festgelegt.

II.5.6 Anteil Gefahrguttransporte

Der Anteil Gefahrguttransporte am gesamten Verkehrsaufkommen ist auf einen Wert von 8% festgelegt.

II.5.7 Gefahrgutverteilung

Die Gefahrgutverteilung ist wie folgt definiert:

- Brennbare Gase, Flaschen (Szenario 3): 0.4657%
- Brennbare Flüssigkeiten (Szenarien 4, 5): 34.9500%
→ davon flüchtige brennbare Flüssigkeiten (Szenario 5): 34%
- Brennbare Gase, Tanktransport (Szenarien 7,8,9): 1.3970%
- Giftige Gase, Tanktransport (Szenario 10): 0.8750%
- Giftige Flüssigkeiten, Tanktransport (Szenario 11): 1.7500%
- Giftige Flüssigkeiten, Flaschen (Szenario 12): 1.7500%
- Nicht brennbare Gase, Tanktransport (Szenario 13): 0.7623%
- Weitere (keinem Szenario zugeteilt): 58.05%

II.5.8 Durchschnittsgeschwindigkeiten PKW

Die Durchschnittsgeschwindigkeit der PKW ist abhängig von der Verkehrsart im Tunnel und davon, ob sich der Tunnel in einer städtischen oder ländlichen Umgebung befindet (Umgebungsbedingung). Die Durchschnittsgeschwindigkeiten sind wie folgt festgelegt:

	Richtungsverkehr	Gegenverkehr
ländliche Umgebung	100 km/h	80 km/h
städtische Umgebung	80 km/h	50 km/h

II.5.9 Durchschnittsgeschwindigkeiten von Bus und Schwerverkehr

Die Durchschnittsgeschwindigkeiten von Bus und Schwerverkehr entsprechen 20 km/h weniger als den Durchschnittsgeschwindigkeiten der PKW.

II.6 Umgebung

II.6.1 Umgebungsbedingungen (städtisch / ländlich) (einzugebende Parameter)

Die Umgebungsbedingung (städtisch / ländlich) wird vom Benutzer angegeben. Von dieser Auswahl hängen die folgenden Parameter ab:

- Eintrittswahrscheinlichkeit des Szenarios (Freisetzung Gefahrgut)
- Exposition der ansässigen Bevölkerung und der Verkehrsteilnehmer durch Dispersion der giftigen Gase in der Atmosphäre

Zudem legt die Auswahl der Umgebungsbedingungen auch die folgenden Elemente fest:

- Die Bevölkerungsdichte im Bereich der Tunnelportale (vgl. folgenden Abschnitt),
- Die Durchschnittsgeschwindigkeiten der Fahrzeuge (vgl. obenstehende Abschnitte).

II.6.2 Bevölkerungsdichte im Bereich der Tunnelportale

Die Bevölkerungsdichte im Bereich der Tunnelportale wird in Abhängigkeit der angegebenen Umgebungsbedingungen wie folgt festgelegt:

- ländlich: 100 Einwohner/km²
- städtisch 5000 Einwohner/km².

II.7 Unfallgeschehen

II.7.1 Unfallrate (einzugebende Parameter)

Der Anwender kann entweder eine ortsspezifische Unfallrate eingeben oder den Standardwert wählen.

Die Unfallraten ergeben sich wie unter 9.3.4 beschrieben aus der Anzahl der Unfälle im Verhältnis zu den jeweils gefahrenen Fahrzeug-Kilometern. Der Standardwert der Unfallrate für den Gesamtverkehr beträgt auf Autobahnen nach [19] $3.5 \cdot 10^{-7}$ Unfälle pro Fahrzeug-Kilometer. Für die Unfallwahrscheinlichkeiten des Gefahrgutverkehrs wird diese Zahl auf Basis des Verkehrsscreenings [24] mit einem Faktor 0.5 beaufschlagt.

Der Standardwert der Unfallrate für Gefahrgutverkehr beträgt:
 $1.75 \cdot 10^{-7}$ Unfälle (mit materiellen Schäden) / Fz-km

Zur Berücksichtigung der unterschiedlichen Unfallraten in Gegenverkehrs- und Richtungsverkehrstunneln werden die folgenden Korrekturfaktoren verwendet (definiert im Blatt "valeurs par défaut"):

- 2/3 für Richtungsverkehrstunnel,
- 4/3 für Gegenverkehrstunnel.

Daraus ergeben sich die im QRA-CH Stufe 1 als Standard implementierten Unfallraten:

für Richtungsverkehrstunnel: $3,5 \times 10^{-7} \cdot 0.5 \cdot 2/3 = 1,17 \cdot 10^{-7}$ [1/Fahrzeug-km].

für Gegenverkehrstunnel: $3,5 \times 10^{-7} \cdot 0.5 \cdot 4/3 = 2,33 \cdot 10^{-7}$ [1/Fahrzeug-km].

II.7.2 Aktualisierung von Standardwerten für die Unfallraten

Die im QRA-CH als Standardwert verwendete Unfallrate wurde seinerzeit auf der Grundlage von Daten aus den Jahren 1992 bis 1999 und eines Verkehrsscreenings über das gesamte Strassennetz der Schweiz ermittelt. Bei mittelfristig deutlich veränderten Unfallstatistiken auf einzelnen Netzabschnitten sollten die implementierten Standardwerte der Unfallraten für den Gefahrguttransport jeweils geprüft und allenfalls neu ermittelt werden. Dabei sollten weiterhin auch die Unfallzahlen aus mehreren Jahren zugrunde gelegt werden.

Von den regelmässig erhobenen Statistikdaten des ASTRA können dafür vor allem folgende Grundlagendaten genutzt werden:

- Fahrzeug-Kilometer des Gesamtverkehrs wie auch des Schwerverkehrs auf dem gesamten Netz oder auch einer definierten Strecke
- Anzahl der Unfälle im Gesamtverkehr wie auch auf einer spezifischen Strecke – differenziert auch für den Schwerverkehr sowie auch Gefahrguttransporte.

Wenn diese Parameter für den Schwerverkehr differenziert erfasst werden, ist es grundsätzlich möglich, die Unfallraten auf einem definierten Streckenabschnitt spezifisch für den Schwerverkehr zu bestimmen. Bei einer Übernahme sehr diskreter Unfallraten allein für den Schwer- oder sogar nur Gefahrgutverkehr auf einem allenfalls kurzen Streckenabschnitt ist aber auch zu bedenken, dass im Zweifelsfall zu wenige Daten für eine statistische Evidenz speziell der Gefahrguttransporte vorliegen könnten. Dann sollte eher wieder auf – auch zu aktualisierende - Standard-Unfallraten zurückgegriffen werden.

Um die aktuelleren Verkehrs- und Unfallstatistiken mit dem Modell QRA-CH abbilden zu können, müssen die Standardwerte zunächst auf Basis der aktuellen Unfallstatistiken geprüft und die Unfallraten neu ermittelt werden. Zusätzlich können auch die Anteile der Gefahrguttransporte und deren spezifische Unfallraten einbezogen werden.

Im ersten Fall ergibt sich die im QRA einzusetzende Unfallrate des Gefahrgutverkehrs nach wie vor mit den o.g. Formeln, wobei lediglich die Unfallrate des Gesamtverkehrs pro Fahrzeug-Kilometer angepasst, die Formel ansonsten aber nicht geändert würde:

Angepasste Standardwerte für die Unfallraten können sich in Erweiterung zu [19] in einem zusätzlichen Schritt auch durch eine Neuermittlung des Faktors 0.5 ergeben, indem die Verhältnisse der Gefahrgut-spezifischen Unfallrate zu derjenigen des Gesamt- und allgemeinen Schwerverkehrs in Beziehung gesetzt wird. Bedingt durch möglicherweise erhöhte Sicherheitsanforderungen sind Gefahrguttransporte deutlich seltener in Unfälle verwickelt als normale Schwerverkehrstransporte. Wenn dies statistisch nachweisbar ist, kann im Zweifelsfall auch eine Anpassung des Faktors 0.5 in Betracht kommen. Das Vorgehen zur Ermittlung angepasster Parameter ist beispielhaft auch in [34] mit Berücksichtigung einer Sensitivitätsanalyse erläutert.

II.8 Berechnung durchführen

Die Berechnung wird mit dem Button « Lancer le calcul de RI » gestartet.

III Berechnungsparameter QRA-CH (Stufe 2)

Nachfolgend werden die wichtigsten Berechnungsparameter des Berechnungsmodells der Stufe 2 (QRA-CH-Modell) erläutert.

Die nachfolgenden Hauptkapitel richten sich nach den Excel-Blättern der Eingabeoberfläche für die Stufe 2.

III.1 Einleitungsseite

Auf der Einleitungsseite ist keine Eingabe seitens des Anwenders erforderlich.

III.2 Allgemeine Angaben

III.2.1 Tunneltyp

Für diesen Parameter stehen die folgenden drei Möglichkeiten zur Auswahl:

- Zweiröhrig, Richtungsverkehr
- Einröhrig, Gegenverkehr
- Einröhrig, Richtungsverkehr

Bei einem zweiröhrigen Tunnel, bei dem sich die Eigenschaften der einzelnen Röhren erheblich unterscheiden (Länge, Längsgefälle, Verkehr, Anteil des Lkw-Verkehrs, Ausrüstung, Unfallrate usw.), wird empfohlen, für jede Röhre eine Risikoberechnung separat durchzuführen.

III.2.2 Anzahl Fahrspuren

Es ist die Anzahl der Fahrspuren anzugeben.

III.3 Umgebung

III.3.1 Anzahl Zeitperioden

Es ist die Anzahl Zeitperioden anzugeben, die nötig ist, um die verkehrlichen Verhältnisse abzubilden. Im Allgemeinen wird zwischen Tag und Nacht unterschieden (d. h. zwei Zeitperioden). Im Fall von ausgeprägten Spitzenstunden sollten 3 Zeitperioden betrachtet werden.

III.3.2 Verteilung der Zeitperioden

Anzugeben sind die prozentualen Anteile der Zeitperioden 2 und 3, falls solche vorhanden sind. Der Anteil der Zeitperiode 1 wird abgeleitet.

III.3.3 Umgebungsbedingungen (städtisch oder vorstädtisch / halbländlich oder ländlich)

Die Umgebungsbedingung (städtisch oder vorstädtisch / halbländlich oder ländlich) wird vom Benutzer angegeben. Von dieser Auswahl hängen die folgenden Parameter ab:

- Eintrittswahrscheinlichkeit des Szenarios (Freisetzung Gefahrgut)
- Zeitspanne zwischen Unfall und Eintritt Szenario
- Exposition der ansässigen Bevölkerung und der Verkehrsteilnehmer durch Dispersion der giftigen Gase in der Atmosphäre

Zudem legt die Auswahl der Umgebungsbedingungen auch die folgenden Elemente fest:

- Die Bevölkerungsdichte im Bereich der Tunnelportale (vgl. Abschnitt III.3.4),
- Die Durchschnittsgeschwindigkeiten der Fahrzeuge (vgl. Abschnitt II.5.8).

III.3.4 Bevölkerungsdichte im Bereich der Tunnelportale

Die Bevölkerungsdichte im Bereich der Tunnelportale wird in Abhängigkeit der angegebenen Umgebungsbedingungen wie folgt festgelegt. Es sollte die Tunnelklassifizierung gewählt werden, die den tatsächlichen Daten am nächsten kommt:

- ländlich : 100 Einwohner/km²
- halbländlich : 500 Einwohner/km²
- vorstädtisch : 1000 Einwohner/km²
- städtisch 5000 : Einwohner/km².

Falls relevant und um Zwischenwerte zu verarbeiten, ist es möglich, zwei Berechnungen mit den beiden Framing-Werten (z. B. 1000 und 5000) durchzuführen und eine Rahmung des Ergebnisses zu erhalten.

III.3.5 Durchschnittliches stündliches Verkehrsaufkommen je Zeitperiode und Fahrtrichtung (Fz/h)

Die entsprechenden Werte sind anzugeben.

III.3.6 Anteil Schwerverkehr je Zeitperiode

Der Anteil Schwerverkehr je Zeitperiode ist anzugeben.

III.3.7 Anteil Busverkehr je Zeitperiode

Der Anteil Busverkehr am gesamten Verkehrsaufkommen ist anzugeben.

III.3.8 Durchschnittsgeschwindigkeiten PKW

Die Durchschnittsgeschwindigkeit der PKW ist anzugeben.

III.3.9 Durchschnittsgeschwindigkeiten von Bussen und Schwerverkehr

Die Durchschnittsgeschwindigkeiten von Bussen und Schwerverkehr ist anzugeben.

III.4 Gefahrgutverkehr

Betreffend Gefahrgutverkehr hat der Anwendender jeweils die Auswahl, die in der Eingabeoberfläche vorgeschlagenen Standardwerte oder ortsspezifische Werte zu verwenden.

III.4.1 Anteil Gefahrgutverkehr je Fahrtrichtung

Der Standardwert für den Anteil Gefahrgutverkehr am Schwerverkehr beträgt 8% (siehe Tabellenblatt "Standardwerte").

III.4.2 Gefahrgutverteilung

Die Zusammensetzung des Gefahrgutverkehrs kann angegeben werden, indem die Anzahl Fahrzeuge entsprechend ihrem Gefahrgutcode oder Gefahrensymbol, welche das zugehörige Szenario definieren, angegeben werden. Die Anzahl Fahrzeuge ist anhand einer örtlichen Erhebung zu ermitteln. Falls erforderlich, kann zwischen den Fahrtrichtungen unterschieden werden.

Werden keine ortsspezifischen Werte angegeben, wird die nachfolgend aufgeführte Standardverteilung angenommen:

• Brennbare Gase, Flaschen (Szenario 3):	0.4657%
• Brennbare Flüssigkeiten (Szenarien 4, 5):	34.9500%
→ davon flüchtige brennbare Flüssigkeiten (Szenario 5):	34%
• Brennbare Gase, Tanktransport (Szenarien 7,8,9):	1.3970%
• Giftige Gase, Tanktransport (Szenario 10):	0.8750%
• Giftige Flüssigkeiten, Tanktransport (Szenario 11):	1.7500%
• Giftige Flüssigkeiten, Flaschen (Szenario 12):	1.7500%
• Nicht brennbare Gase, Tanktransport (Szenario 13)	0.7623%
• Weitere (keinem Szenario zugeteilt):	58.05%

III.5 Betrieb

III.5.1 Tunnelüberwachung und Reaktionszeit des Betreibers

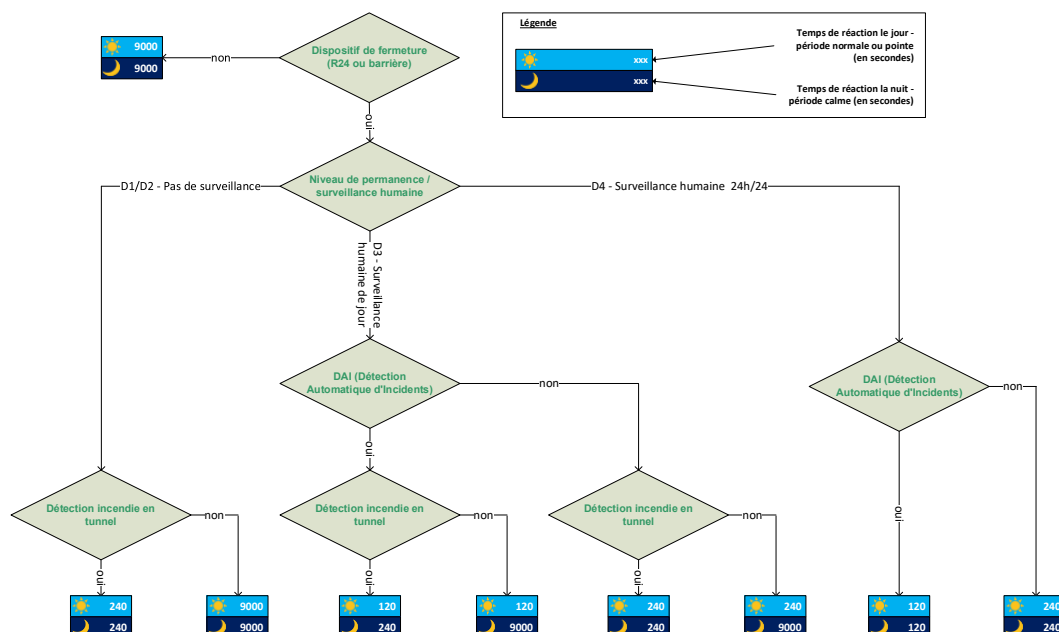
Zur Auswahl stehen 3 Arten der Tunnelüberwachung:

- Keine Überwachung (D1/D2)
- Tagsüber überwacht (D3)
- 24 Stunden überwacht (D4)

Diese drei Überwachungsarten werden mit D1/D2, D3 und D4 bezeichnet (analog der französischen Reglementierung). Die Erfassung der Überwachungsart dient dazu, in Abhängigkeit des Vorhandenseins anderer Betriebsanlagen (nachstehend aufgelistet) die Zeitspanne zwischen dem Anhalten des Verkehrs am Tunneleingang und dem allfälligen Einsatz des Lüftungssystems im Brandfall zu ermitteln (Reaktionszeit des Betreibers).

Der Typ des Lüftungssystems, der vom Benutzer im Interface angegeben wird, wird vom Modell ignoriert, wenn der Tunnel nicht überwacht ist (D1/D2) und auch keine Brandmeldeanlage installiert ist (in einem solchen Fall kann das Brandregime der Lüftung nicht rechtzeitig eingeschaltet werden, um wirksam eingreifen zu können; die Bedingungen entsprechen einer natürlichen Lüftung).

Die berücksichtigten Werte für Reaktionszeit des Betreibers (in Sekunden) werden gemäss dem nachstehenden Diagramm ermittelt:



III.5.2 Videoüberwachung

Es ist anzugeben, ob eine Videoüberwachung vorhanden ist.

Die Reaktivität der Tunnelnutzer im Ereignisfall wird im Modell auf einer Skala von 0 bis 3 erfasst. Da die Reaktivität der Tunnelnutzer von der Ausrüstung des Tunnels zur Alarmierung abhängig ist, wird dieser Parameter (von 0 bis 3) wie folgt ermittelt: Der berücksichtigte Wert ist die Hälfte der Summe der Reaktionspunkte, die in Abhängigkeit der betriebstechnischen Anlagen des Tunnels (Videoüberwachung, Lichtsignalanlage, Wechselverkehrszeichen etc.) gezählt werden. Die Summe wird jeweils auf die ganze Zahl aufgerundet.

Ist eine Videoüberwachung vorhanden, resp. geschieht die Überwachung des Tunnels mit Hilfe einer Videoanlage, wird ein Reaktionspunkt dazugezählt.

III.5.3 Automatische Ereignisdetektion

Es ist anzugeben, ob eine automatische Ereignisdetektion vorhanden ist.

Ist eine automatische Ereignisdetektion vorhanden, wird ein Reaktionspunkt dazugezählt. Dies erlaubt unter u.a. eine Reduktion der Zeitspanne vom Ereigniseintritt bis zur Schliessung des Tunnels von 240 s auf 120 s, sofern der Tunnel überwacht ist und eine Einrichtung zur Schliessung des Tunnels existiert (siehe oben).

III.5.4 Lichtsignalanlagen im Tunnel und/oder Fahrstreifensignalisation

Es ist anzugeben, ob Lichtsignalanlagen und/oder eine Fahrstreifensignalisation im Tunnel vorhanden sind.

Sind Lichtsignalanlagen oder eine Fahrstreifensignalisation im Tunnel vorhanden, wird ein Reaktionspunkt dazugezählt.

III.5.5 Ferngesteuerte Barrieren oder Lichtsignale an den Tunneleingängen

Es ist anzugeben, ob Ferngesteuerte Barrieren oder Lichtsignale an den Tunneleingängen vorhanden sind.

Existiert eine Einrichtung zur Unterbrechung des Verkehrs am Tunnelportal (mittels Lichtsignal oder Barriere), so wird die Schliessung in 120 s veranlasst, sofern der Tunnel überwacht ist und wenn diese Überwachung von einer automatischen Ereignisdetektion unterstützt wird. Wenn der Tunnel überwacht aber keine automatische Ereignisdetektion vorhanden ist oder wenn der Tunnel nicht überwacht ist aber über eine automatische Ereignisdetektion verfügt, wird die Schliessung in 240 s veranlasst (vgl. Diagramm in III.5.1).

III.5.6 Einsprechanlage FM

Es ist anzugeben, ob eine FM-Einsprechanlage im Tunnel vorhanden ist.

Ist eine FM-Einsprechanlage vorhanden, wird ein Reaktionspunkt dazugezählt.

III.5.7 Wechselverkehrszeichen

Es ist anzugeben, ob Wechselverkehrszeichen im Tunnel vorhanden sind.

Sind Wechselverkehrszeichen vorhanden, wird ein Reaktionspunkt dazugezählt.

III.5.8 Branddetektion

Es ist anzugeben, ob eine Branddetektion vorhanden ist.

Das Vorhandensein einer Branddetektion ermöglicht die automatische Schliessung des Tunnels in 240 s und die Inbetriebnahme der Rauchabsaugungsanlage, auch wenn der Tunnel nicht überwacht ist (siehe oben).

III.6 Merkmale des Tunnels

Bemerkung: Im Fall eines zweiröhrigen Tunnels sind die Eingaben nacheinander für jede Röhre einzeln vorzunehmen.

III.6.1 Länge der Röhren

Der Anwender gibt die Länge der einzelnen Segmente an, die das Längsprofil des Tunnels beschreiben.

Die Summe der Längen der Segmente ergibt die Gesamtlänge der Röhren.

III.6.2 Höhe

Die Höhe des Tunnelquerschnittes ist anzugeben.

III.6.3 Breite

Die Breite des Tunnelquerschnittes ist anzugeben.

Es ist insbesondere im Fall von nicht rechteckigen Querschnitten darauf zu achten, dass die aus der angegebenen Höhe und Breite resultierende Querschnittsfläche der effektiven mittleren Querschnittsfläche des Tunnels entspricht.

III.6.4 Mittleres Quergefälle der Fahrbahn

Das mittlere Quergefälle der Fahrbahn ist anzugeben.

III.6.5 Entwässerungssystem

Hierbei hat der Benutzer zwei Auswahlmöglichkeiten:

- Schlitzrinne, wobei die Breite und Höhe der Schlitzrinne anzugeben sind.
- Einlaufschächte, wobei der Abstand zwischen den jeweiligen Schächten und die Einlauffläche anzugeben sind.

III.6.6 Anzahl Notausgänge pro Röhre

Die Anzahl Notausgänge pro Röhre ist anzugeben.

Ausgehend von der Anzahl Notausgänge wird der mittlere Abstand zwischen den Notausgängen, der vom Modell für die Berechnung verwendet wird, ermittelt (Gesamtlänge Röhre / (Anzahl Notausgänge + 1)).

III.6.7 Längsprofil

Zur Beschreibung des Längsprofils wird der Tunnel in Segmente mit konstanter Längsneigung unterteilt. Es können 1 bis 7 Segmente definiert werden.

III.7 Lüftung

III.7.1 Lüftungssystem für den Brandfall

Das Lüftungssystem im Brandfall ist anzugeben.

Zur Auswahl stehen vier Typen von Lüftungssystemen:

- Natürliche Lüftung (keine mechanische Lüftung vorhanden; die Lüftung hängt ausschliesslich von meteorologischen Bedingungen ab)
- Reine Längslüftung
- Längslüftung mit konzentrierter Absaugung
- Querlüftung

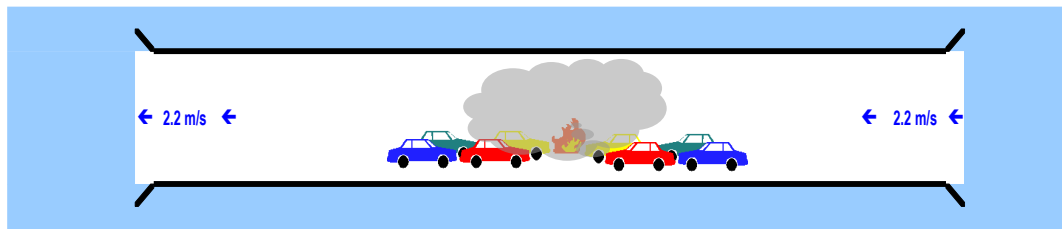
Das OECD/PIARC Modell unterscheidet zwischen den Bedingungen im Tunnel, wie sie in den ersten Augenblicken nach Eintritt eines Ereignisses herrschen und denjenigen Bedingungen, wie sie im Tunnel nach einer allfälligen Inbetriebnahme einer Rauchabsaugung herrschen (stationärer Zustand). Die Anfangsbedingungen gelten während der vom Anwender angegebenen Dauer nach Ereigniseintritt, danach gelten die stationären Bedingungen.

Die zu Beginn herrschende Luftströmung (Anfangsbedingungen) wird längs einer Röhre als einheitlich angenommen (es gibt weder eine Luftzufuhr noch eine Absaugung) und resultiert im Wesentlichen aus den von den Fahrzeugen verursachten Luftmassenbewegungen. Die Strömungsgeschwindigkeit ist vom Anwender zu bestimmen und im Modell anzugeben.

Die stationären Bedingungen bei Betrieb sind vom Anwender wie folgt zu ermitteln:

Tunnel mit natürlicher Lüftung: Für jeden der fünf im Modell berücksichtigten Unfallorte ist die Strömungsgeschwindigkeit an den Tunnelportalen anzugeben.

Nach Eingabe der Daten bietet das Modell dem Benutzer eine schematische Darstellung, die für jede der 5 Unfallstellen das resultierende Lüftungsschema sowie die mittleren Strömungsgeschwindigkeiten veranschaulicht.



Reine Längslüftung: Für jeden der fünf im Modell berücksichtigten Unfallorte ist die mit dem Lüftungssystem erreichte Strömungsgeschwindigkeit an den Tunnelportalen anzugeben, unter Berücksichtigung der Merkmale der Strahlventilatoren und der Summe der vorhandenen treibenden und bremsenden Kräfte.

Längslüftung mit konzentrierter Absaugung: Die Anzahl der Absaugeinheiten, deren Standort und Absaugkapazität sind anzugeben. Ebenfalls sind die Art der Absaugung für die Anfangsbedingungen und die stationären Bedingungen (Betrieb der Brandlüftung) für jeden der fünf betrachteten Brandorte anzugeben. Für jeden der fünf im Modell berücksichtigten Unfallorte ist die mit dem Lüftungssystem erreichte Strömungsgeschwindigkeit an den Tunnelportalen anzugeben, unter Berücksichtigung der Merkmale der Lüftungseinrichtungen und der Summe der vorhandenen treibenden und bremsenden Kräfte.

Querlüftung: Die Anzahl der Entrauchungsabschnitte, deren Länge und deren Kapazität der Luftabsaugung bzw. Lufteintrag sind anzugeben. Ebenfalls sind die Art der Absaugung bzw. Eintrag für die Anfangsbedingungen und die stationären Bedingungen (Betrieb der Brandlüftung) für jeden der fünf betrachteten Brandorte anzugeben. Für jeden der fünf im Modell berücksichtigten Unfallorte ist die mit dem Lüftungssystem erreichte Strömungsgeschwindigkeit an den Tunnelportalen anzugeben, unter Berücksichtigung der Merkmale der Lüftungseinrichtungen und der Summe der vorhandenen treibenden und bremsenden Kräfte.

III.8 Unfallgeschehen

III.8.1 Unfallrate

Der Anwender wählt per Auswahlmeneu aus, ob er den Standardwert der Unfallrate verwenden will oder ob er Unfalldaten eingeben will, aus denen durch das Modell anschliessend die Unfallrate abgeleitet wird.

Der Standardwert der Unfallrate für den Gesamtverkehr beträgt auf Autobahnen nach [19] 3.5×10^{-7} Unfälle pro Fahrzeug-Kilometer. Für die Unfallwahrscheinlichkeiten des Gefahrgutverkehrs wird diese Zahl auf Basis des Verkehrsscreenings [24] mit einem Faktor 0.5 beaufschlagt.

Der im QRA-CH implementierte Standardwert für die Unfallraten des Gefahrgutverkehrs beträgt: $1.75 \cdot 10^{-7}$ Unfälle (mit materiellen Schäden) / Fz-km.

Zur Berücksichtigung der unterschiedlichen Unfallraten in Gegenverkehrs- und Richtungsverkehrstunneln werden die folgenden Korrekturfaktoren verwendet (definiert im Blatt "valeurs par défaut"):

- $2/3$ für Richtungsverkehrstunnel,
- $4/3$ für Gegenverkehrstunnel.

Daraus ergeben sich die im QRA-CH Stufe 1 als Standard implementierten Unfallraten:

- für Richtungsverkehrstunnel: $3,5 \times 10^{-7} \cdot 0.5 \cdot 2/3 = 1,17 \cdot 10^{-7}$ [1/Fahrzeug-km].
- für Gegenverkehrstunnel: $3,5 \times 10^{-7} \cdot 0.5 \cdot 4/3 = 2,33 \cdot 10^{-7}$ [1/Fahrzeug-km].

Schliesslich hat der Anwender die Möglichkeit, einen aktualisierten Standardwert zu berücksichtigen (s.a. II.7.2) oder einen spezifischen Wert für die lokalen Unfallraten einzugeben.

III.8.2 Ortsspezifisch erhobene Unfalldaten

Die Angaben werden vom Anwender im Interface angegeben.

Der Anwender gibt die Unfalldaten pro Richtung (für einen zweiröhrigen Tunnel) oder als Gesamtwert (für einen einröhrigen Tunnel) an.

Die durch das Interface ermittelte Unfallrate umfasst sowohl körperliche wie materielle Schäden (d.h. es werden alle Unfälle berücksichtigt, die zu einer Freisetzung eines Gefahrguts gemäss den berücksichtigten Szenarien führen können). Wenn die durch den Anwender angegebenen Unfalldaten sowohl die Unfälle mit körperlichen und materiellen Schäden umfassen, so wird die Unfallrate direkt aus den angegebenen Daten abgeleitet. Wenn die durch den Anwender angegebenen Unfalldaten nur Unfälle mit körperlichen Schäden umfassen, wird die Unfallrate ermittelt, indem angenommen wird, dass Unfälle mit materiellen Schäden 6.6-mal häufiger auftreten als Unfälle mit körperlichen Schäden.

III.9 Durchführen der Berechnungen

Es ist der Speicherort des OECD/PIARC Modell CH sowie der Name des Tunnels anzugeben, wobei der Tunnelname keine Leerschläge enthalten darf.

Die Berechnung wird mit dem Button „Lancer le calcul de RI“ gestartet.

IV Methodik Stufe 1: Fallbeispiele

IV.1 Tunneldaten Fallbeispiele

Parameter	Tunnel 1	Tunnel 2	Tunnel 3	Tunnel 4
Tunneltyp	Richtungsverkehr	Richtungsverkehr	Richtungsverkehr	Richtungsverkehr
Anz_Fahstreifen_Tunnel	4	4	4	2
Länge	2230	490	233	480
Entwässerungssystem	Schlitzrinnen	Schlitzrinnen	Einlaufschächte	Schlitzrinnen
Längsneigung_mittel	0.75	3	3	4
Anzahl Notausgänge	7	1	0	0
Lüftungstyp	Längslüftung	Längslüftung	natürliche Lüftung	natürliche Lüftung
Tunnelüberwachung_24h	ja	ja	ja	nein
Automat_Detektion	ja	ja	nein	nein
Detektion_Unfall	ja	ja	ja	ja
Barriere oder LSA	ja	ja	ja	ja
DTV	23000	40000	60000	7500
Anteil_SV	0.093	0.06	0.0316	0.039
Umgebung	ländlich	städtisch	ländlich	ländlich

Parameter	Tunnel 5	Tunnel 6	Tunnel 7	Tunnel 8
Tunneltyp	Gegenverkehr	Richtungsverkehr	Richtungsverkehr	Gegenverkehr
Anz_Fahstreifen_Tunnel	2	7	6	2
Länge	2483	1080	1030	5213
Entwässerungssystem	Einlaufschächte	Schlitzrinnen	Schlitzrinnen	Schlitzrinnen
Längsneigung_mittel	3	1.5	1.5	1
Anzahl Notausgänge	1	4	6	1
Lüftungstyp	Querlüftung mit Absaugung	Längslüftung	Längslüftung	Querlüftung mit Absaugung
Tunnelüberwachung_24h	ja	ja	ja	ja
Automat_Detektion	ja	ja	ja	nein
Detektion_Unfall	ja	ja	ja	ja
Barriere oder LSA	ja	ja	ja	ja
DTV	14000	112800	108500	8400
Anteil_SV	0.047	0.067	0.077	0.066
Umgebung	ländlich	städtisch	städtisch	ländlich

Parameter	Tunnel 9	Tunnel 10	Tunnel 11	Tunnel 12
Tunneltyp	Richtungsverkehr	Gegenverkehr	Richtungsverkehr	Gegenverkehr
Anz_Fahstreifen_Tunnel	4	2	4	2
Länge	9280	16918	260	766
Entwässerungssystem	Schlitzrinnen	Einlaufschächte	Schlitzrinnen	Einlaufschächte
Längsneigung_mittel	0.5	1	-0.5	-5.5
Anzahl Notausgänge	29	64	0	0
Lüftungstyp	Querlüftung mit Absaugung	Querlüftung mit Absaugung	natürliche Lüftung	Längslüftung
Tunnelüberwachung_24h	ja	ja	ja	ja
Automat_Detektion	ja	ja	nein	ja
Detektion_Unfall	ja	ja	ja	ja
Barriere oder LSA	ja	ja	ja	ja
DTV	20600	16600	19400	3700
Anteil_SV	0.135	0.169	0.126	0.015
Umgebung	ländlich	ländlich	ländlich	ländlich

Parameter	Tunnel 13	Tunnel 14	Tunnel 15	Tunnel 16
Tunneltyp	Richtungsverkehr	Richtungsverkehr	Richtungsverkehr	Gegenverkehr
Anz_Fahrstreifen_Tunnel	2	2	4	2
Länge	144	5760	700	1250
Entwässerungssystem	Einlaufschächte	Schlitzrinnen	Einlaufschächte	Schlitzrinnen
Längsneigung_mittel	1.5	2	4.4	5
Anzahl Notausgänge	0	1	5	0
Lüftungstyp	natürliche Lüftung	Querlüftung mit Absaugung	Längslüftung	Längslüftung
Tunnelüberwachung_24h	nein	nein	ja	ja
Automat_Detektion	nein	nein	ja	ja
Detektion_Unfall	ja	ja	ja	ja
Barriere oder LSA	ja	ja	ja	ja
DTV	15000	15000	110000	23900
Anteil_SV	0.054	0.054	0.08	0.075
Umgebung	ländlich	ländlich	städtisch	ländlich

Parameter	Tunnel 17	Tunnel 18	Tunnel 19	Tunnel 20
Tunneltyp	Richtungsverkehr	Gegenverkehr	Gegenverkehr	Richtungsverkehr
Anz_Fahrstreifen_Tunnel	4	2	3	4
Länge	3230	1460	1910	632
Entwässerungssystem	Schlitzrinnen	Schlitzrinnen	Schlitzrinnen	Schlitzrinnen
Längsneigung_mittel	1.25	1	2.7	2
Anzahl Notausgänge	11	2	2	2
Lüftungstyp	natürliche Lüftung	Längslüftung mit Absaugung	natürliche Lüftung	natürliche Lüftung
Tunnelüberwachung_24h	ja	ja	ja	ja
Automat_Detektion	ja	ja	ja	nein
Detektion_Unfall	ja	ja	ja	ja
Barriere oder LSA	ja	ja	ja	ja
DTV	95000	23900	45000	63000
Anteil_SV	0.067	0.075	0.08	0.064
Umgebung	städtisch	städtisch	städtisch	städtisch

Parameter	Tunnel 21	Tunnel 22	Tunnel 23	Tunnel 24
Tunneltyp	Gegenverkehr	Gegenverkehr	Gegenverkehr	Gegenverkehr
Anz_Fahrstreifen_Tunnel	2	2	2	2
Länge	177	761	1028	1017
Entwässerungssystem	Einlaufschächte	Einlaufschächte	Einlaufschächte	Schlitzrinnen
Längsneigung_mittel	0.6	5.3	6.6	5.6
Anzahl Notausgänge	0	0	0	0
Lüftungstyp	natürliche Lüftung	natürliche Lüftung	natürliche Lüftung	Längslüftung
Tunnelüberwachung_24h	ja	ja	ja	ja
Automat_Detektion	nein	nein	nein	nein
Detektion_Unfall	ja	ja	ja	ja
Barriere oder LSA	ja	ja	ja	ja
DTV	15000	8800	8000	8000
Anteil_SV	0.058	0.085	0.085	0.086
Umgebung	ländlich	ländlich	ländlich	ländlich

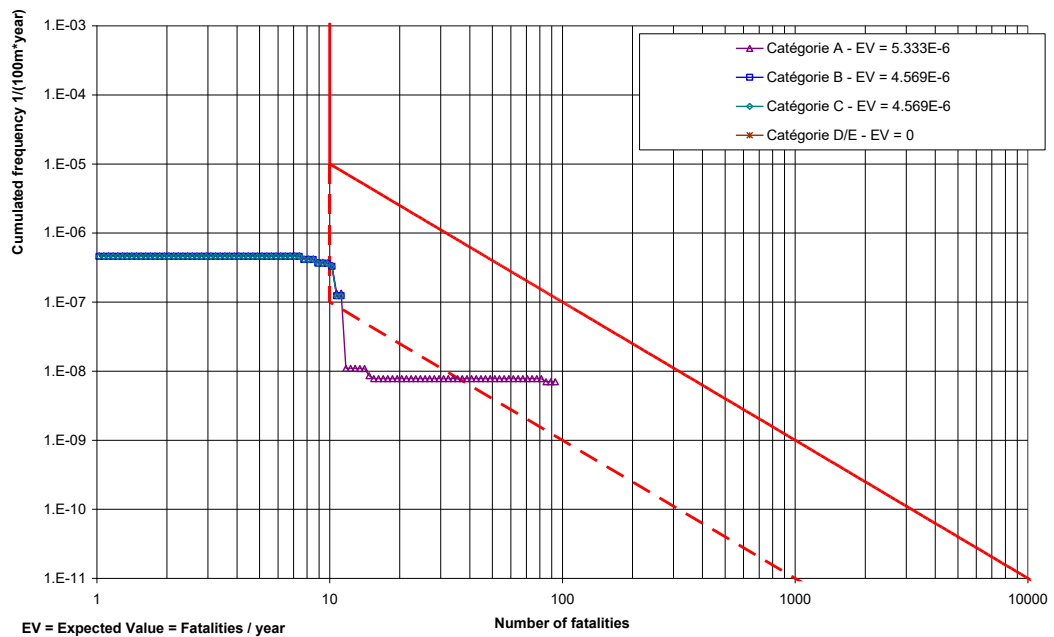
Parameter	Tunnel 25	Tunnel 26	Tunnel 27	Tunnel 28
Tunneltyp	Gegenverkehr	Gegenverkehr	Gegenverkehr	Gegenverkehr
Anz_Fahrstreifen_Tunnel	2	2	2	2
Länge	6596	5798	616	5530
Entwässerungssystem	Einlaufschächte	Einlaufschächte	Einlaufschächte	Schlitzrinnen
Längsneigung_mittel	0.7	0.8	2.5	0.71
Anzahl Notausgänge	17	0	1	9
Lüftungstyp	Längslüftung mit Absaugung	Längslüftung mit Absaugung	Längslüftung mit Absaugung	Längslüftung mit Absaugung
Tunnelüberwachung_24h	ja	ja	ja	ja
Automat_Detektion	nein	ja	nein	nein
Detektion_Unfall	ja	ja	ja	ja
Barriere oder LSA	ja	ja	ja	ja
DTV	6100	1700	18500	22300
Anteil_SV	0.087	0.1	0.06	0.05
Umgebung	ländlich	ländlich	städtisch	städtisch

Parameter	Tunnel 29	Tunnel 30	Tunnel 31	Tunnel 32
Tunneltyp	Gegenverkehr	Gegenverkehr	Gegenverkehr	Gegenverkehr
Anz_Fahrstreifen_Tunnel	2	2	2	2
Länge	623.5	1142	947	2740
Entwässerungssystem	Einlaufschächte	Einlaufschächte	Einlaufschächte	Einlaufschächte
Längsneigung_mittel	5.9	1.9	4.9	2.1
Anzahl Notausgänge	0	1	0	3
Lüftungstyp	Längslüftung	Längslüftung	Längslüftung	Längslüftung mit Absaugung
Tunnelüberwachung_24h	ja	ja	ja	ja
Automat_Detektion	nein	nein	nein	nein
Detektion_Unfall	ja	ja	ja	ja
Barriere oder LSA	ja	ja	ja	ja
DTV	200	5000	5200	1400
Anteil_SV	0.05	0.07	0.05	0.05
Umgebung	ländlich	ländlich	ländlich	ländlich

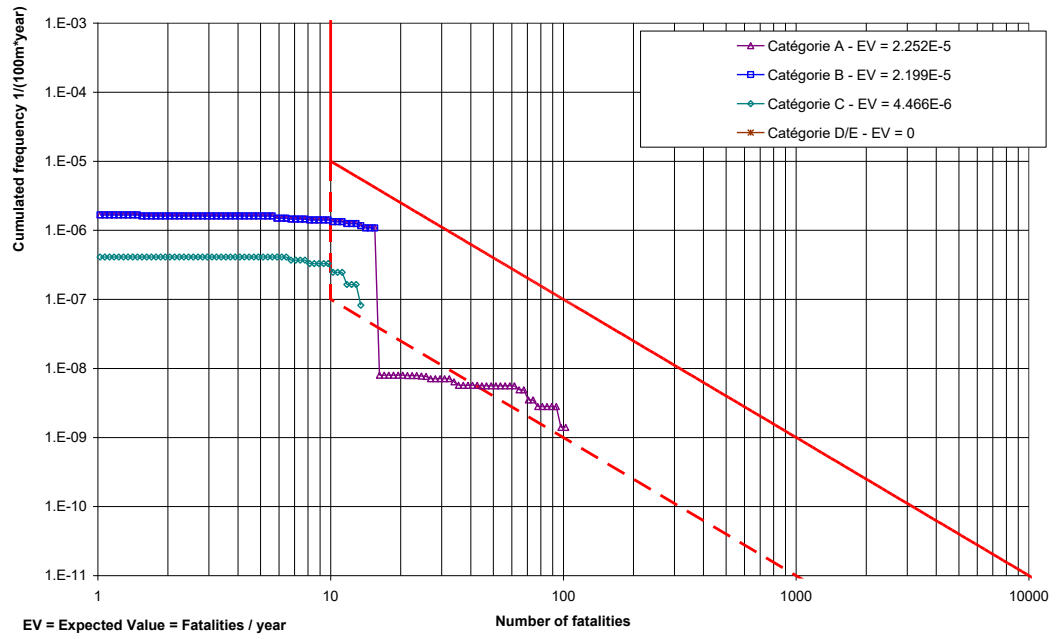
IV.2 Ergebnisse Fallbeispiele

Es gilt festzuhalten, dass die Fallbeispiele im Rahmen der Methodenentwicklung erarbeitet wurden. Dabei stand die Analyse methodischer Fragen im Fokus der Untersuchungen. Dementsprechend erheben die nachfolgenden Ergebnisse der Risikountersuchungen nicht den Anspruch darauf, die realen Verhältnisse abzubilden. Es wird des Weiteren darauf hingewiesen, dass die Berechnungen mit einer sich noch in Entwicklung befindlichen Version des Berechnungsmodells durchgeführt wurden, so dass sich bei Berechnung mit der jeweils aktuellen Modellversion Unterschiede in den Berechnungsergebnissen ergeben können.

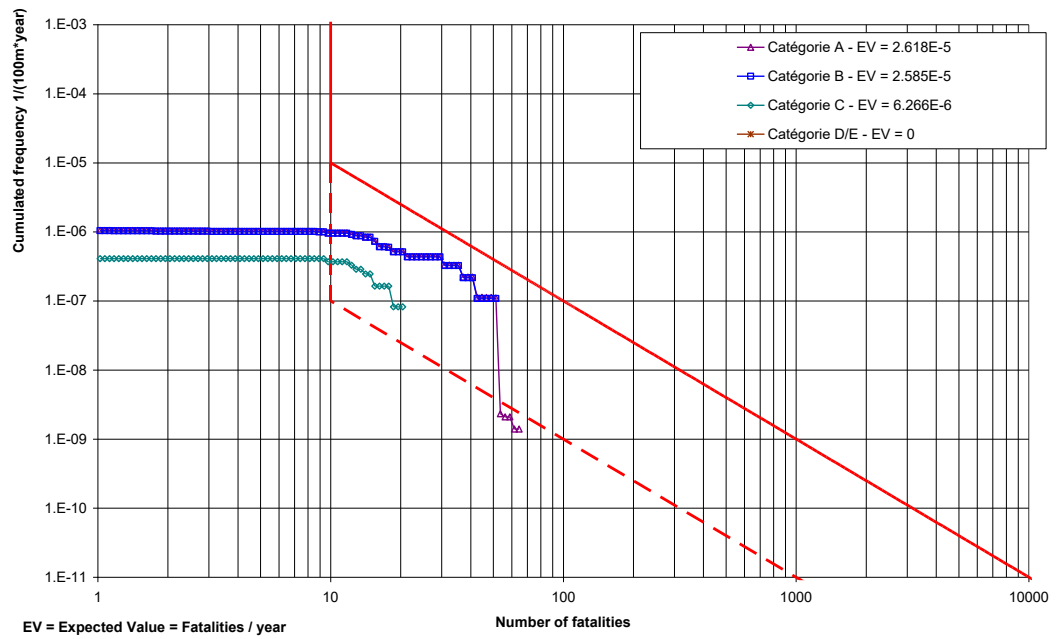
Tunnel 1



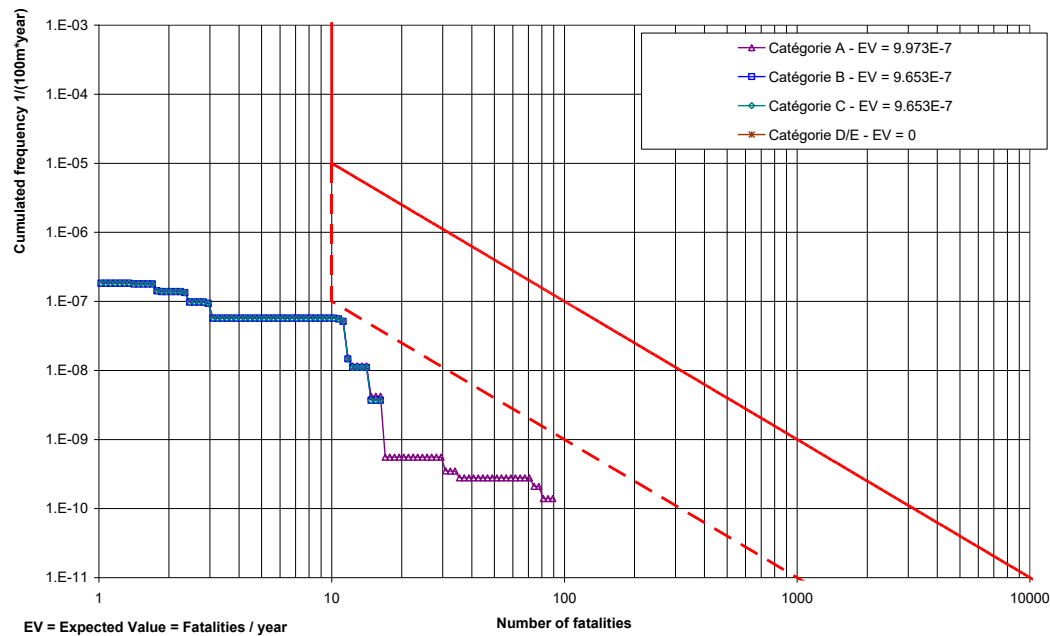
Tunnel 2



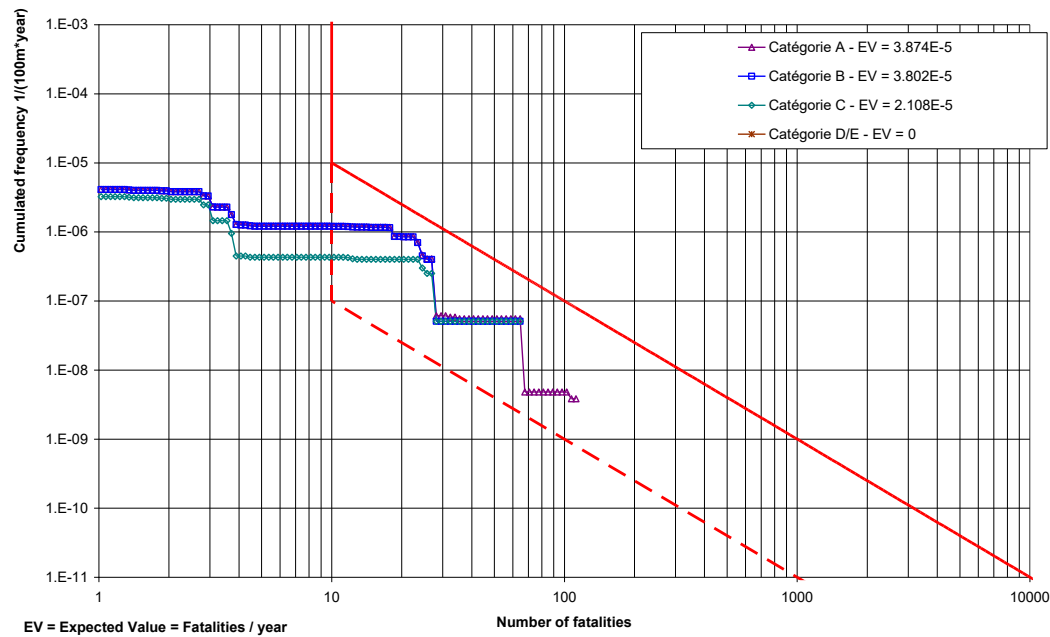
Tunnel 3



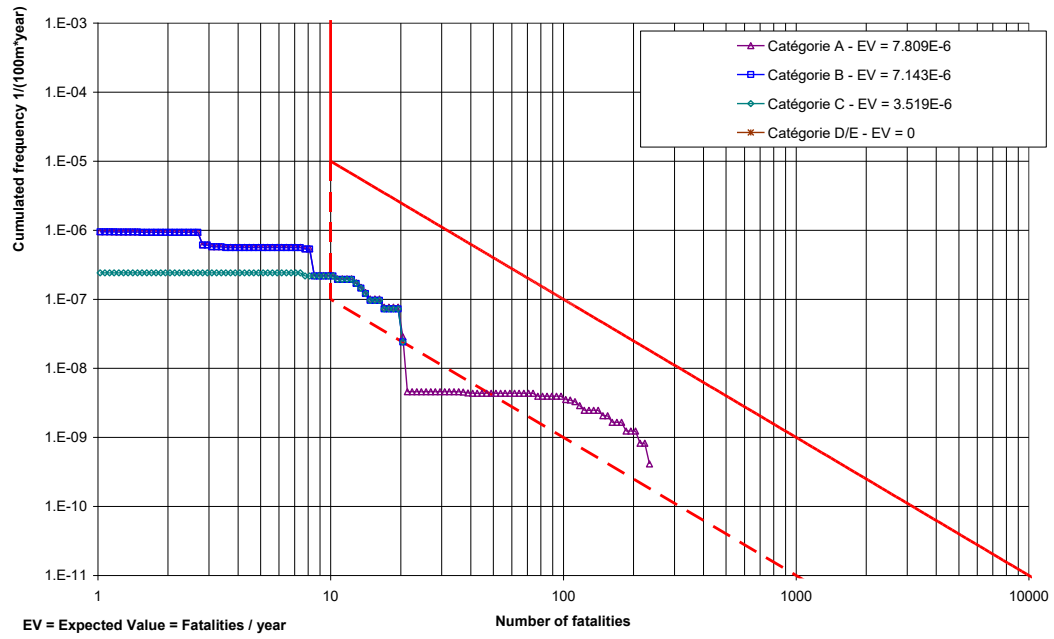
Tunnel 4



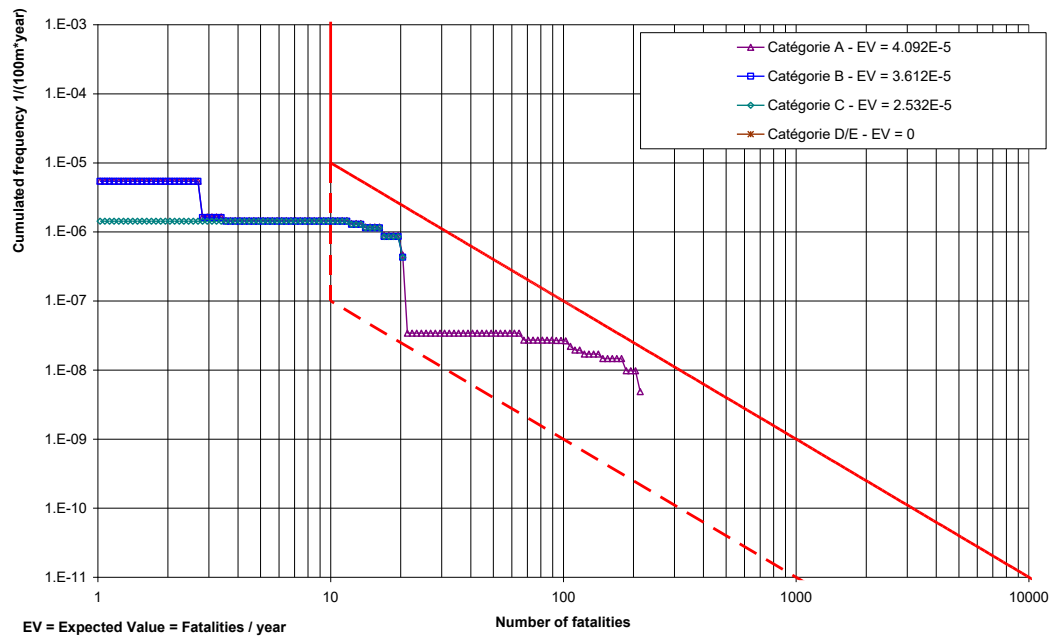
Tunnel 5



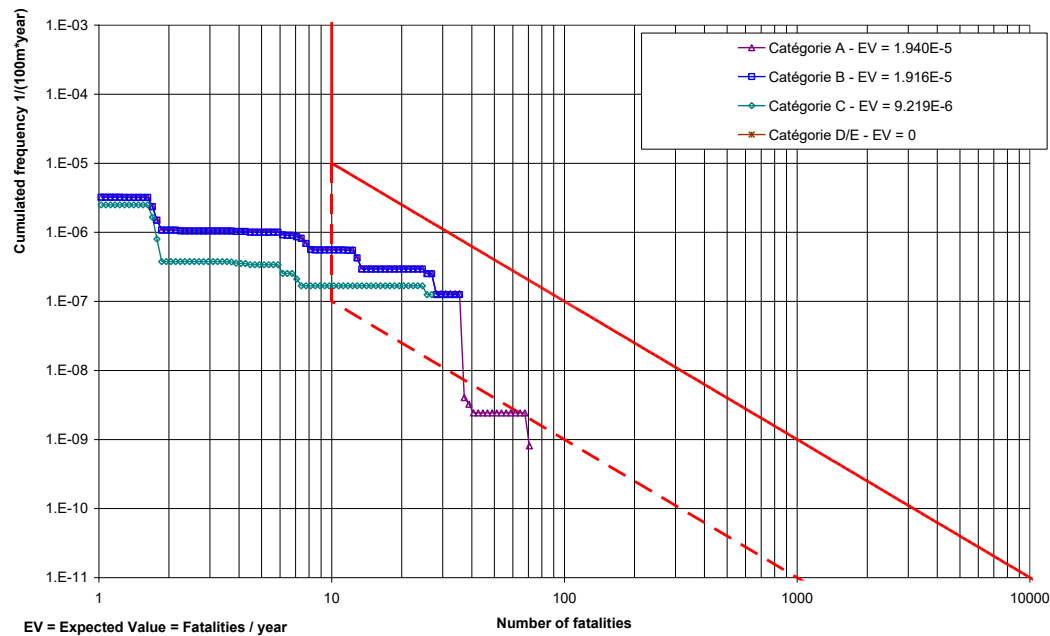
Tunnel 6



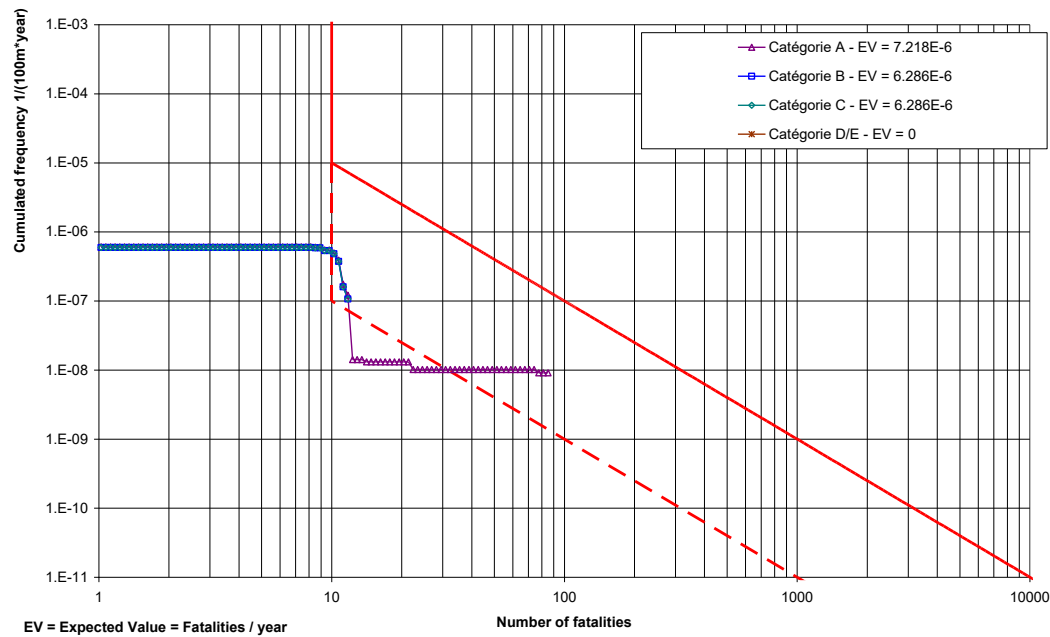
Tunnel 7



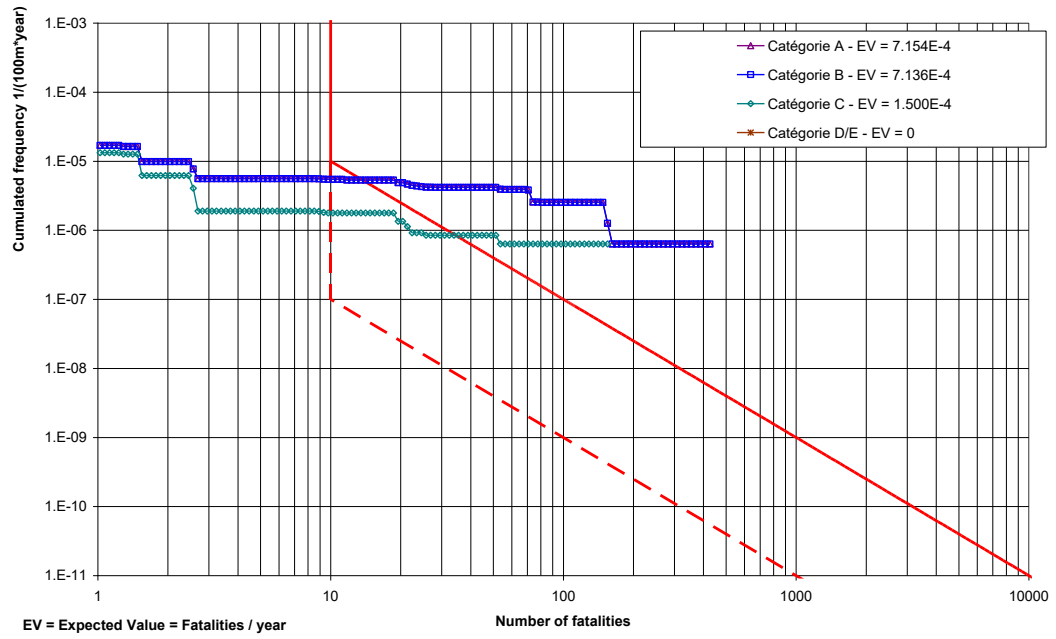
Tunnel 8



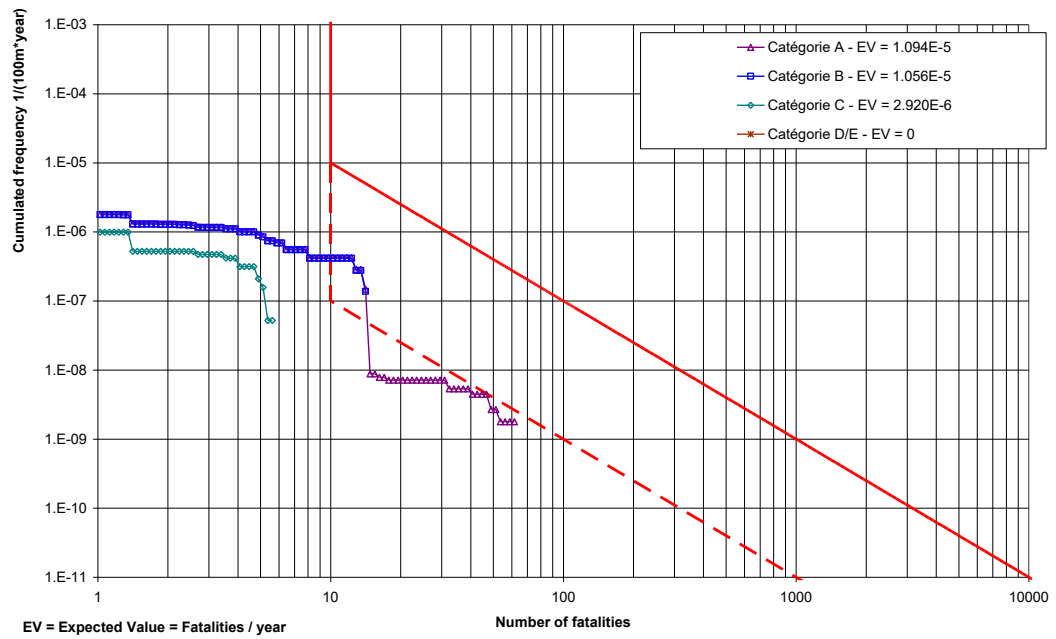
Tunnel 9



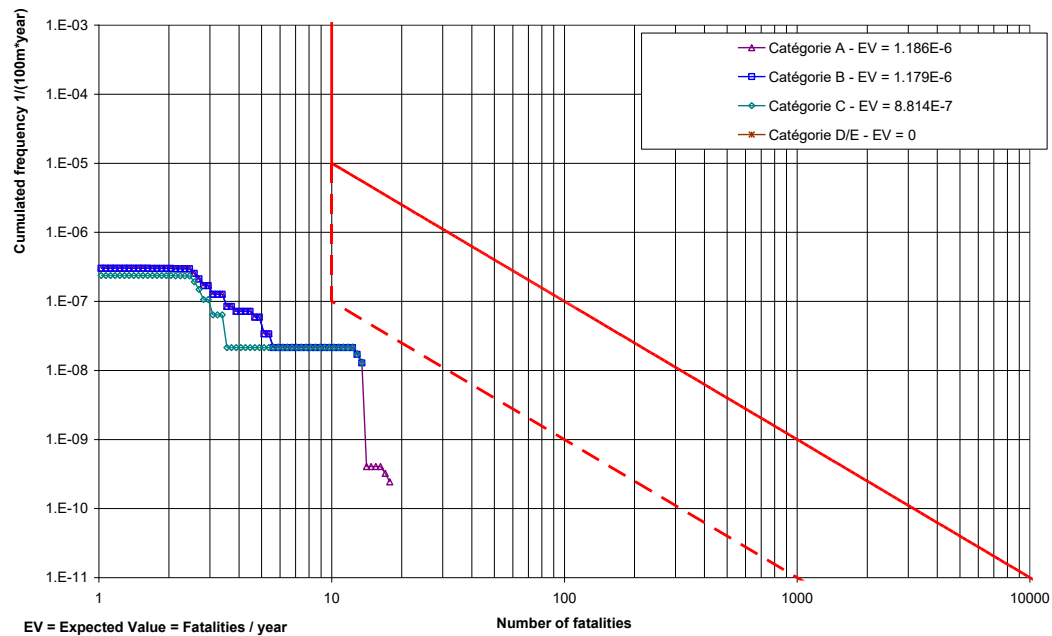
Tunnel 10



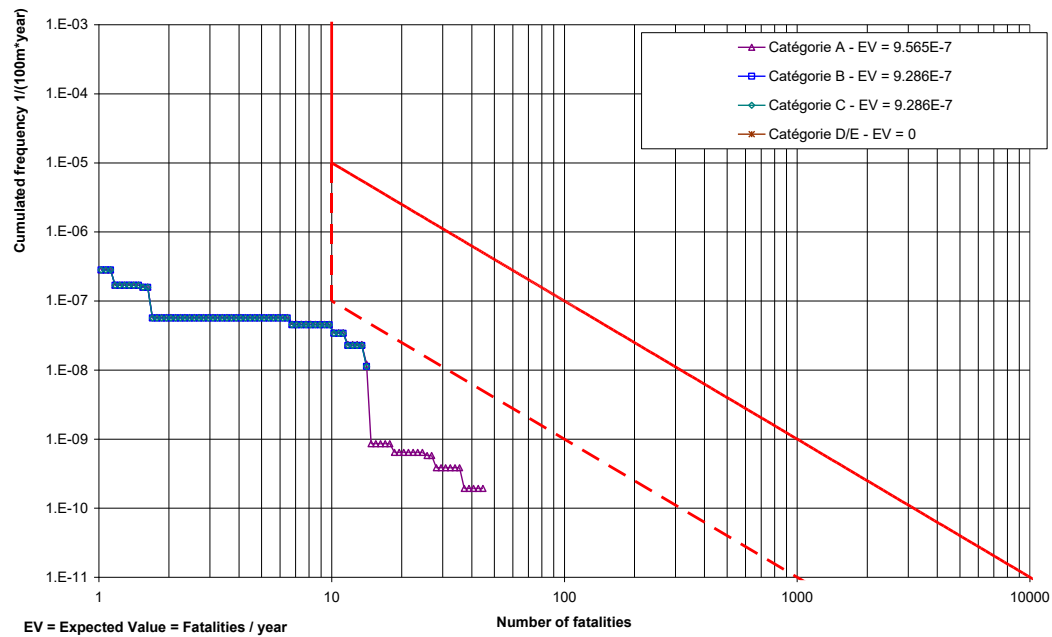
Tunnel 11



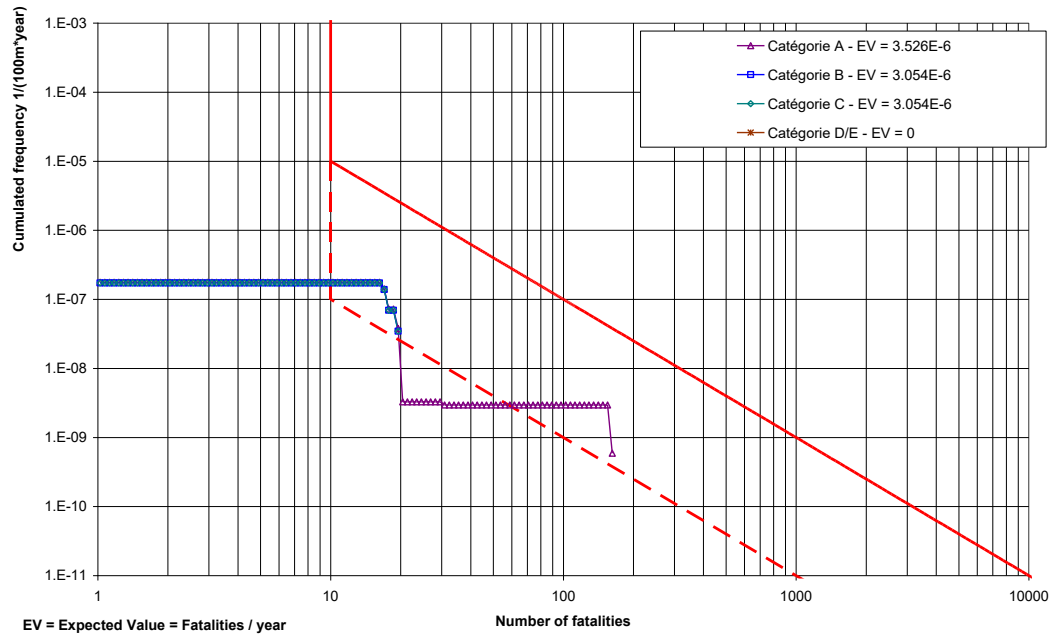
Tunnel 12



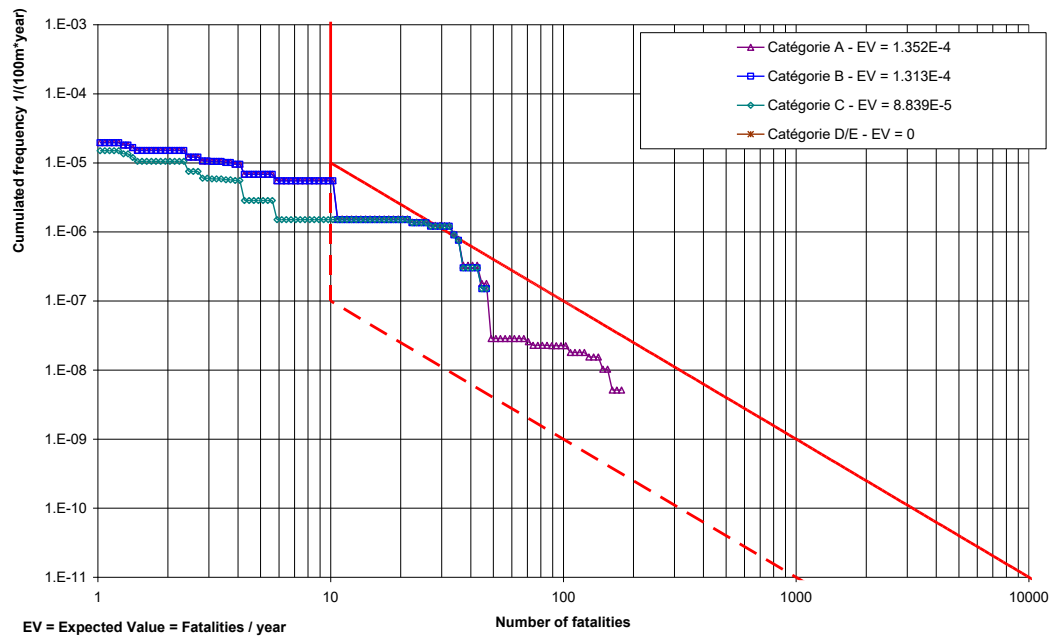
Tunnel 13



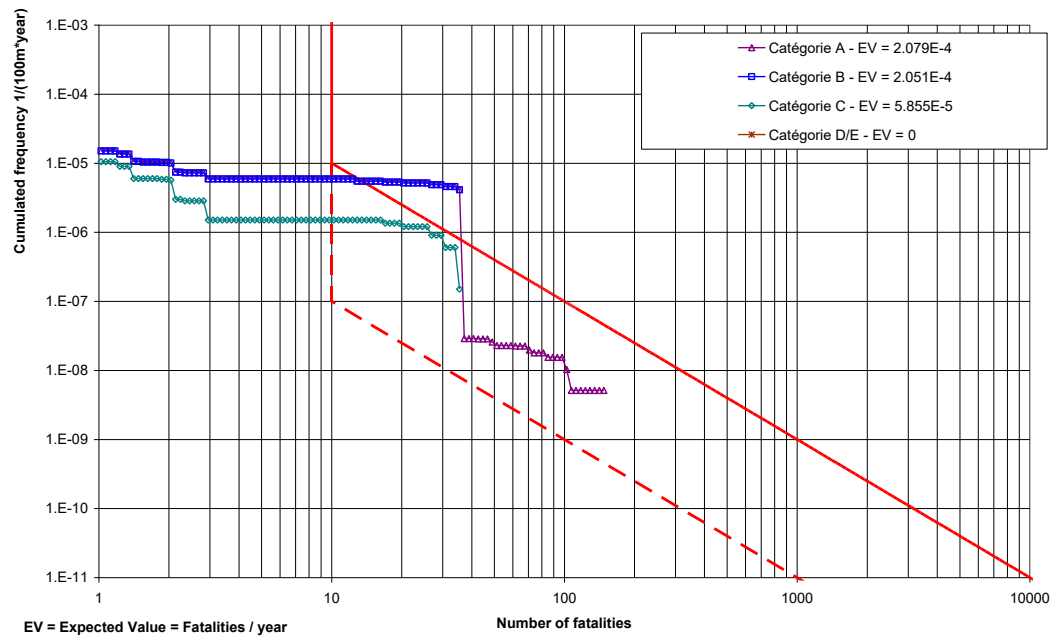
Tunnel 14



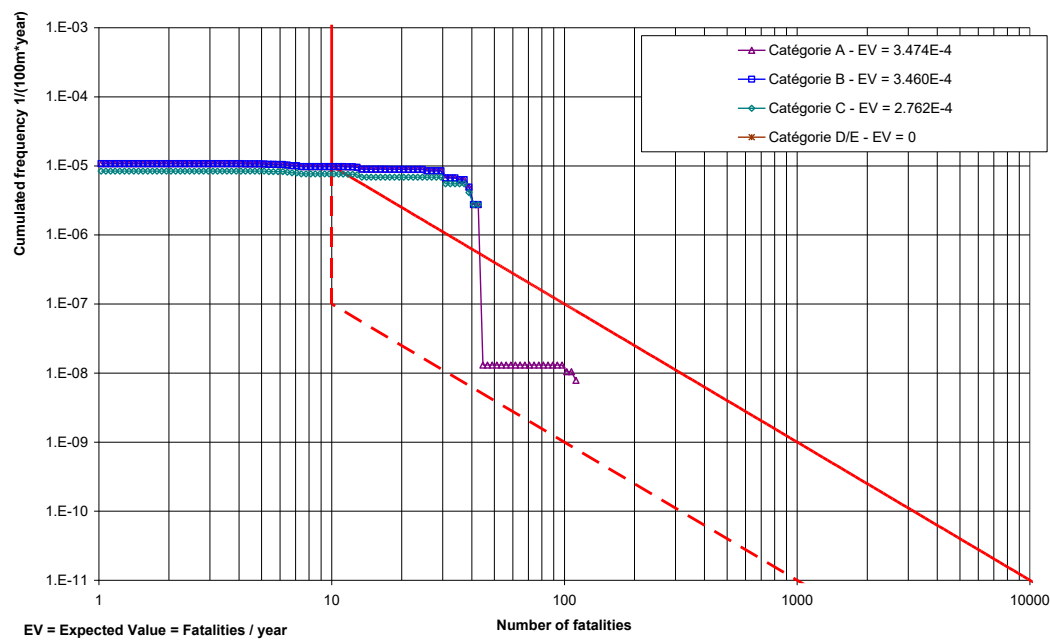
Tunnel 15 (3 Spuren pro Richtung)



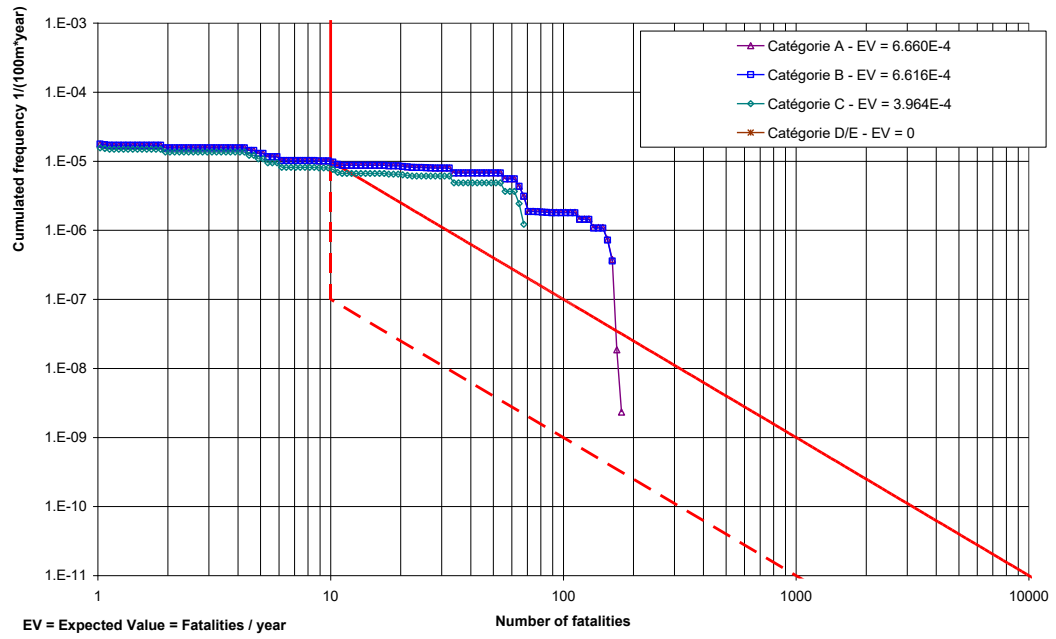
Tunnel 15 (2 Spuren pro Richtung)



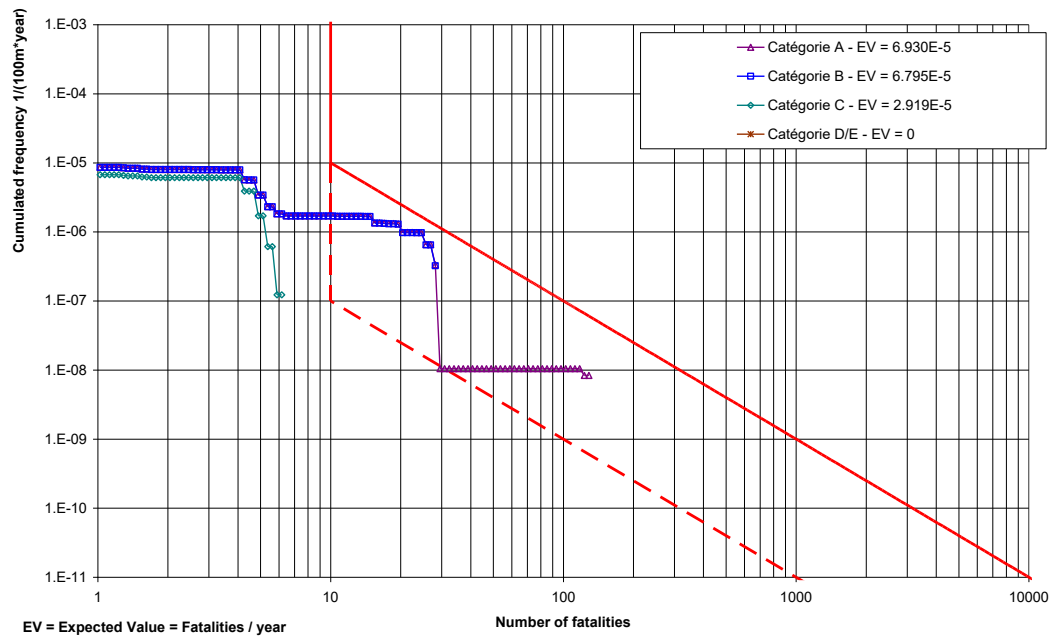
Tunnel 16



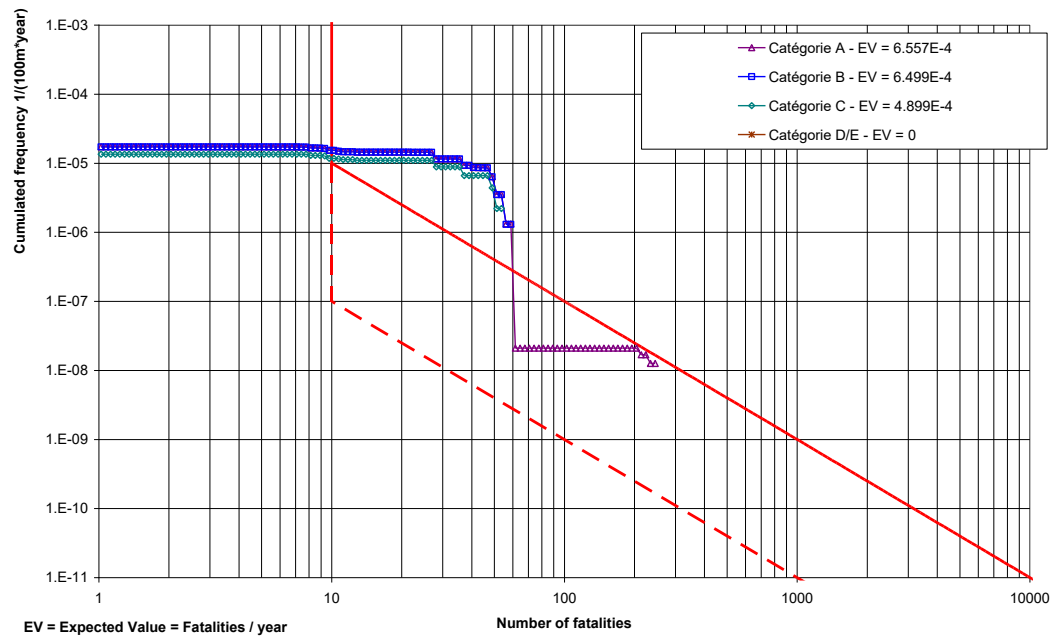
Tunnel 17



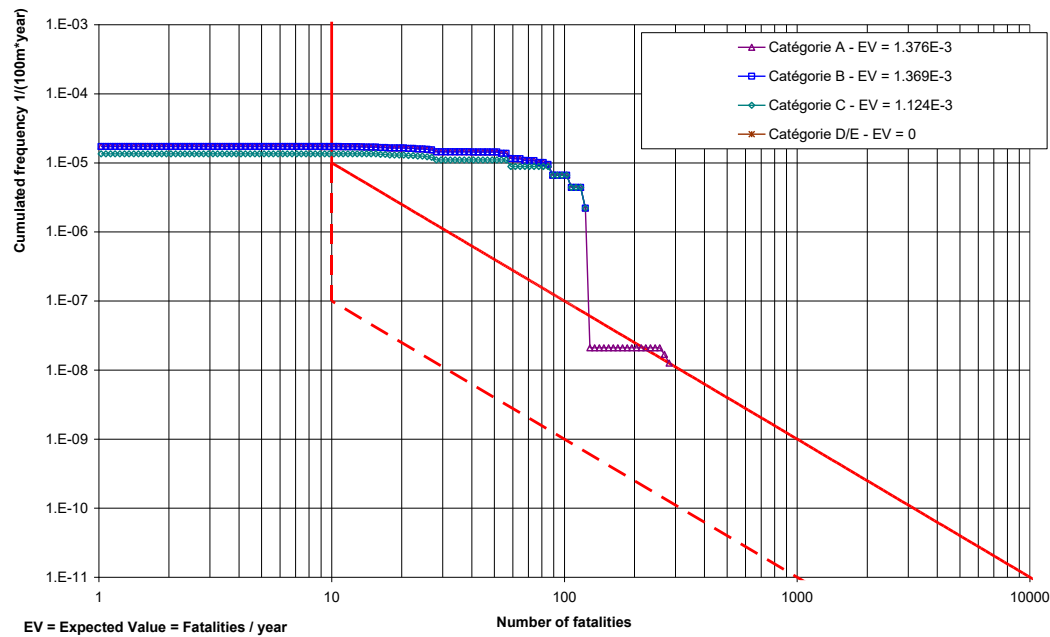
Tunnel 18



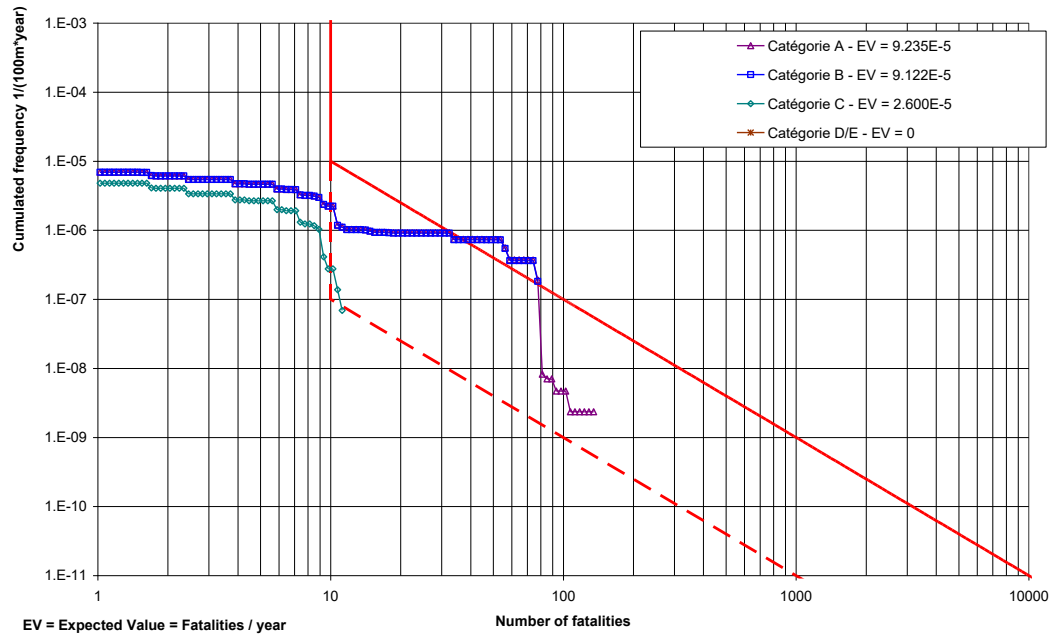
Tunnel 19 (1 Fahrspur pro Richtung)



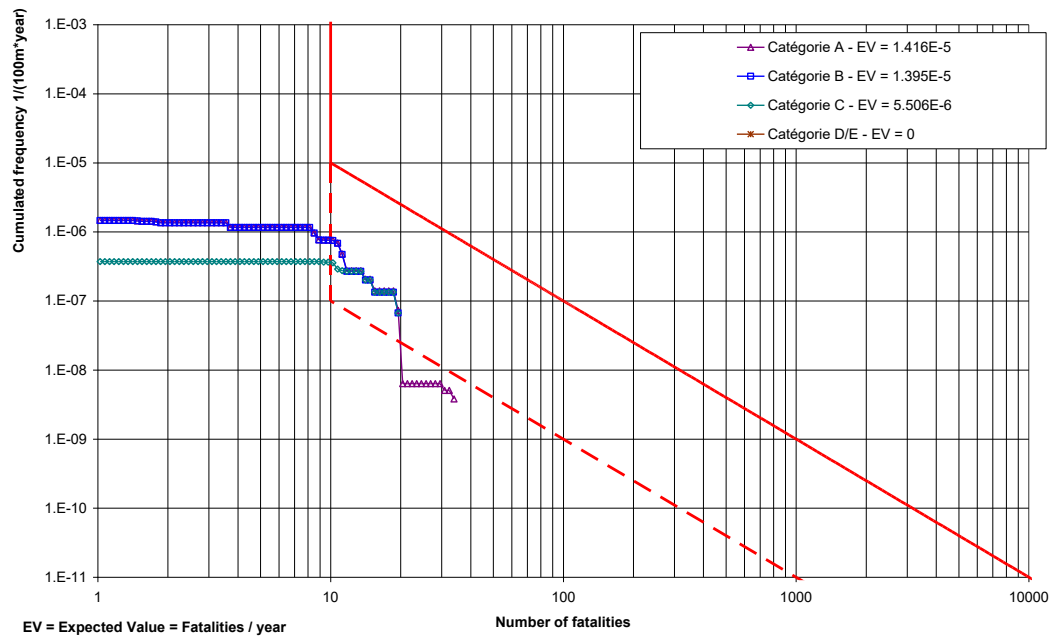
Tunnel 19 (2 Fahrspuren pro Richtung)



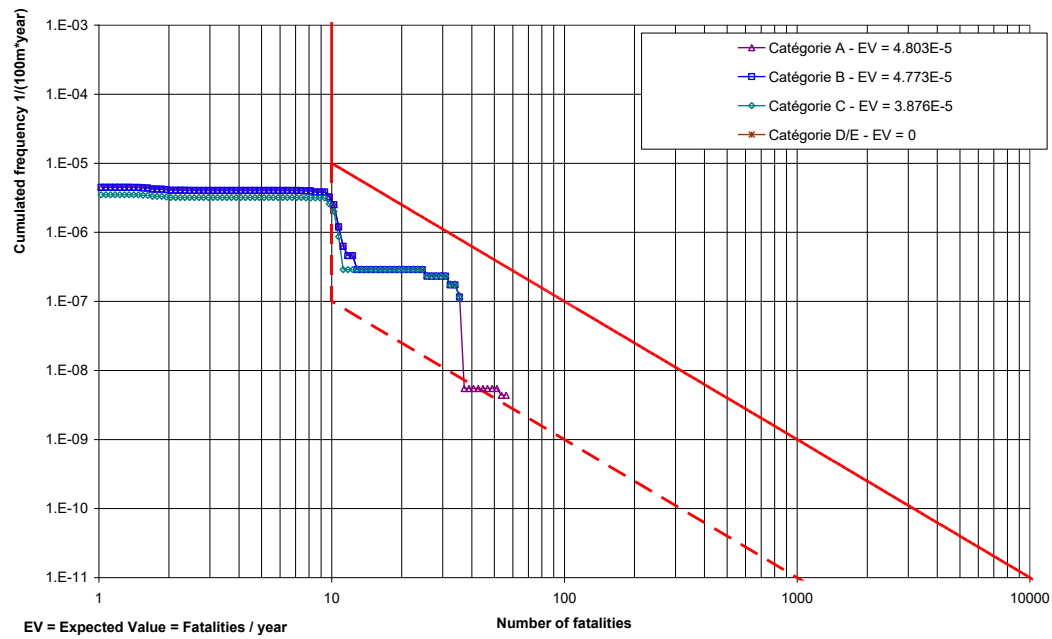
Tunnel 20



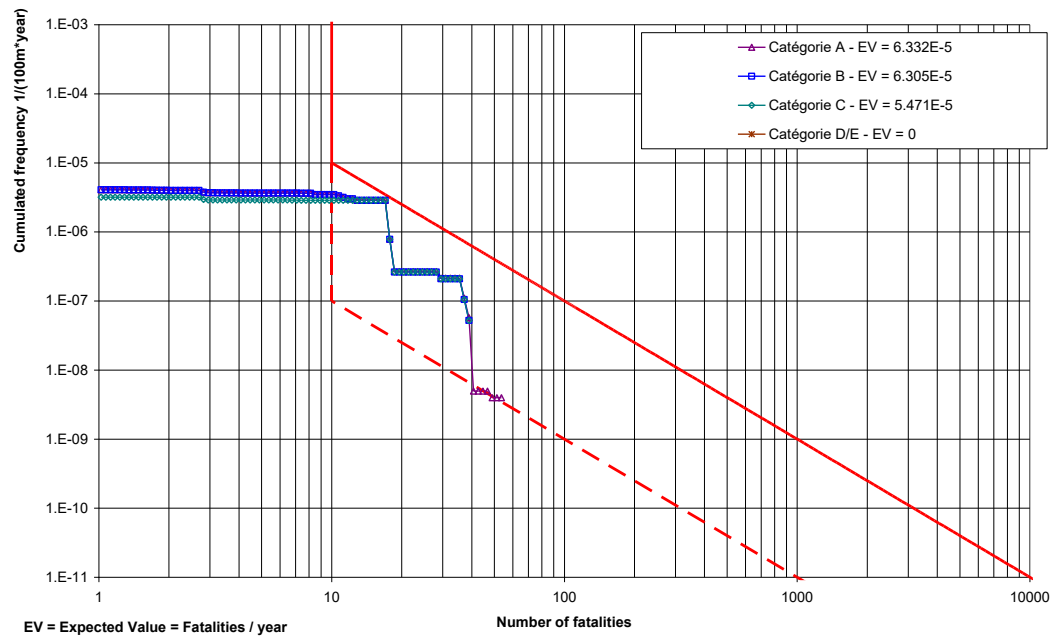
Tunnel 21



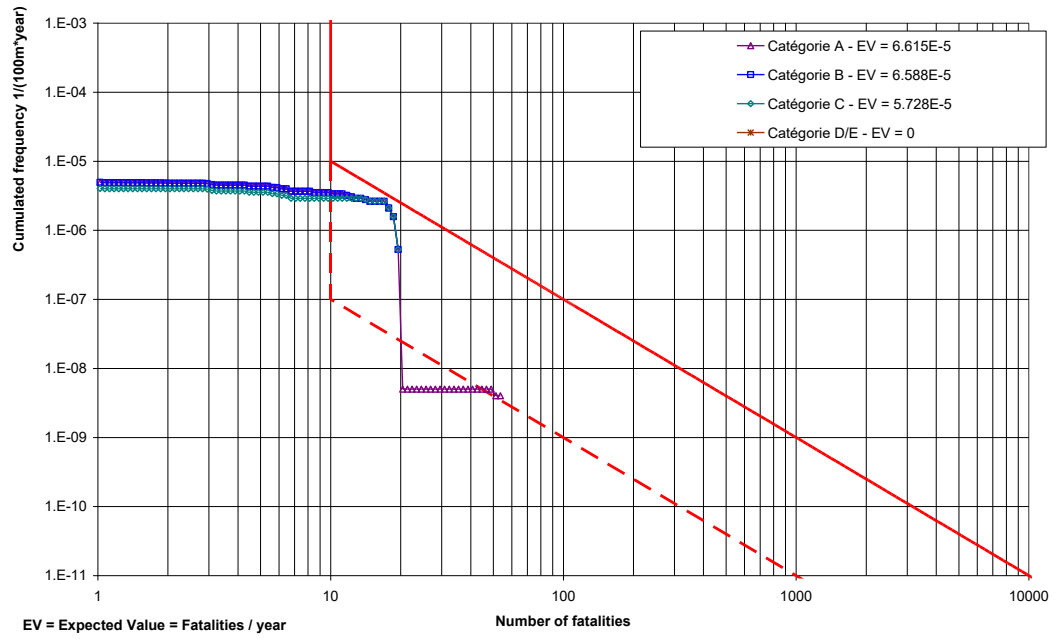
Tunnel 22



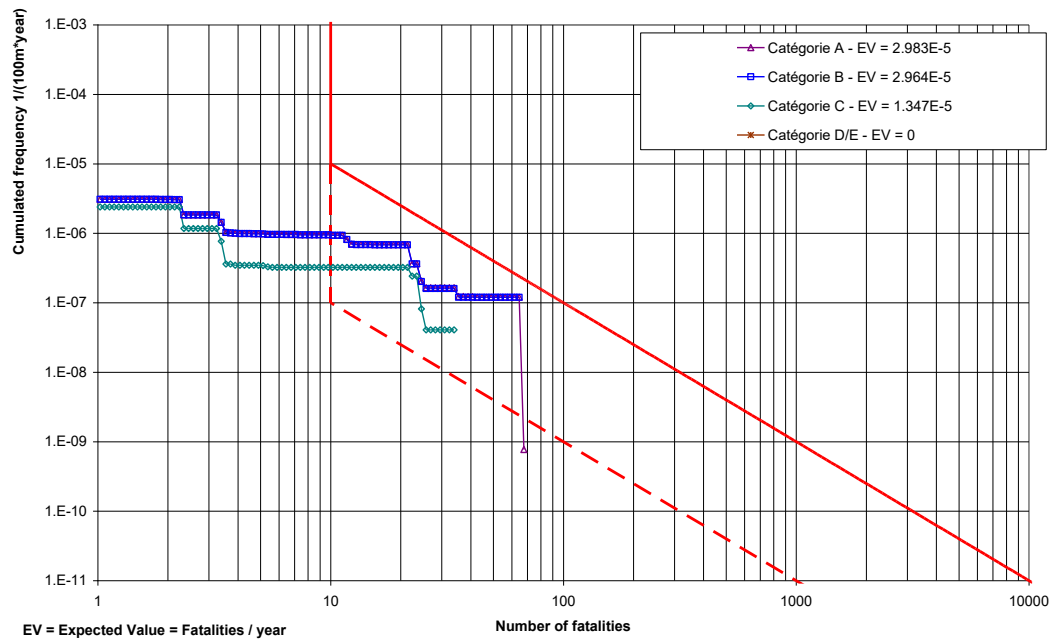
Tunnel 23



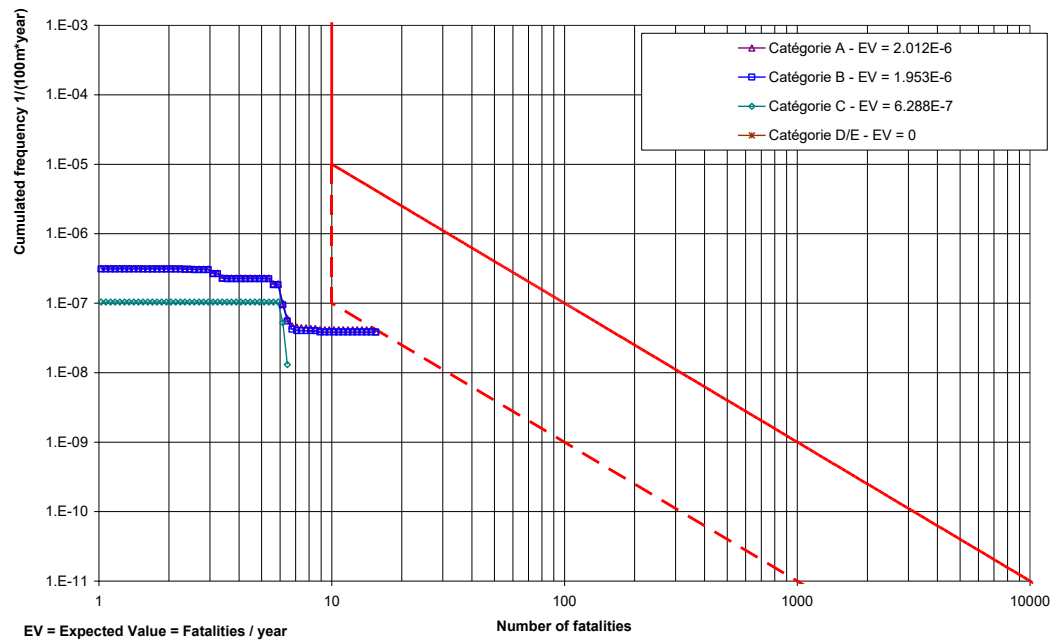
Tunnel 24



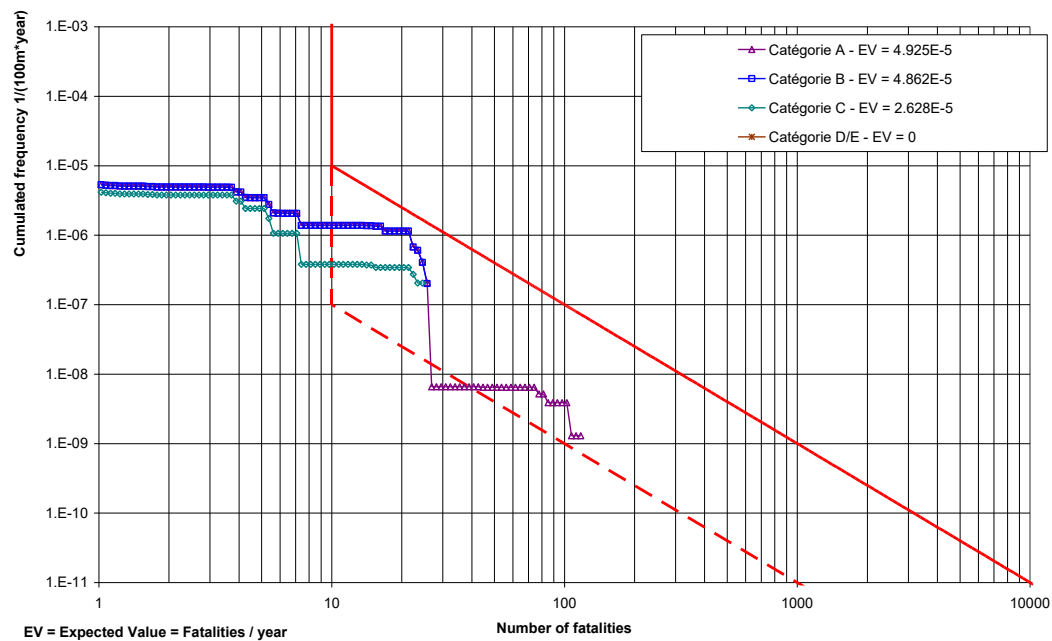
Tunnel 25



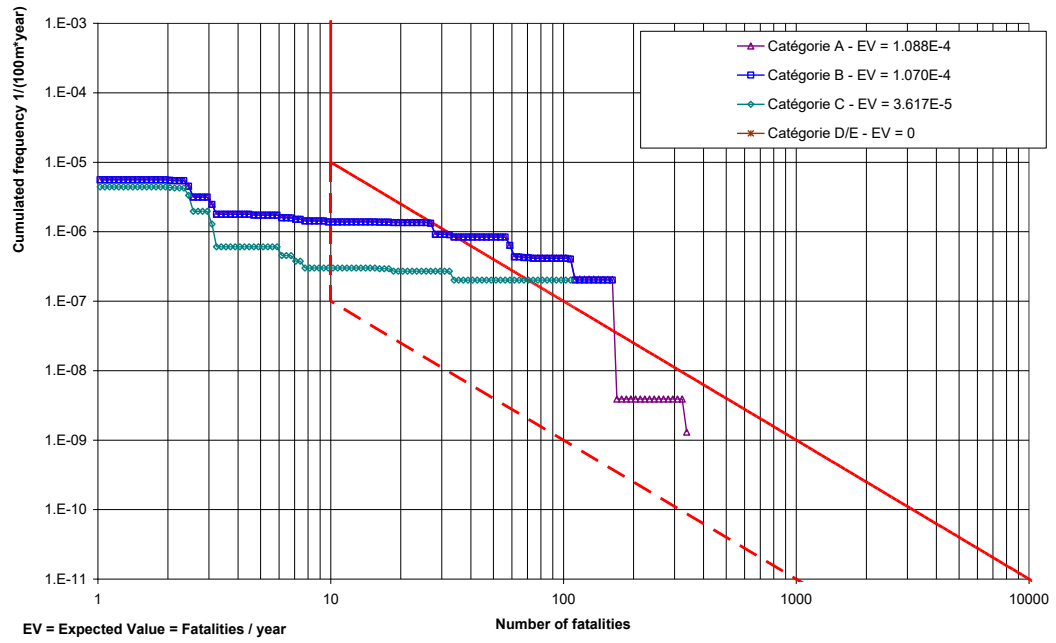
Tunnel 26



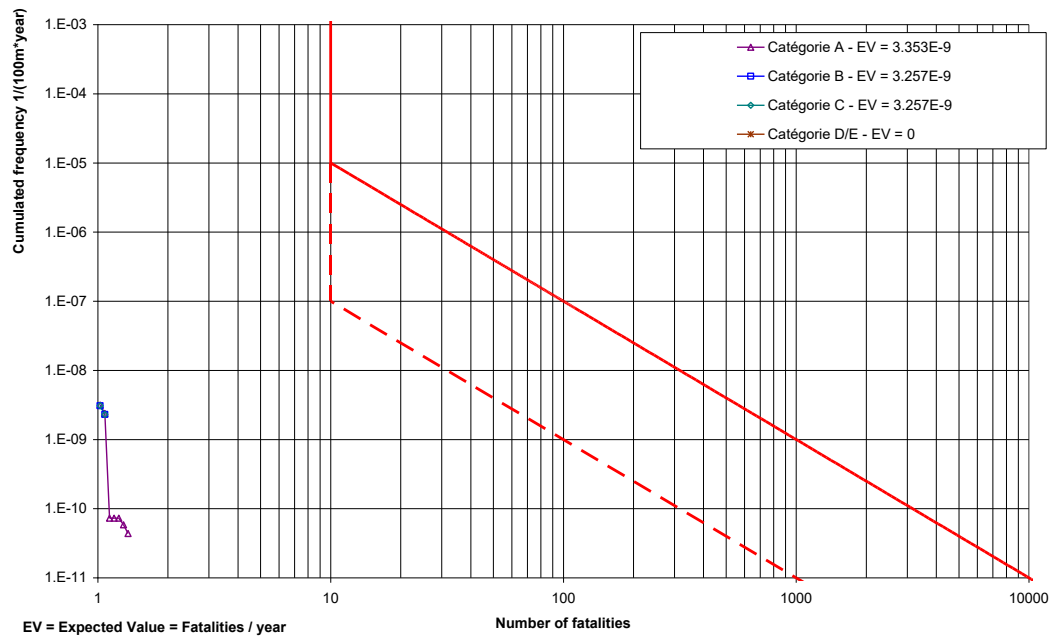
Tunnel 27



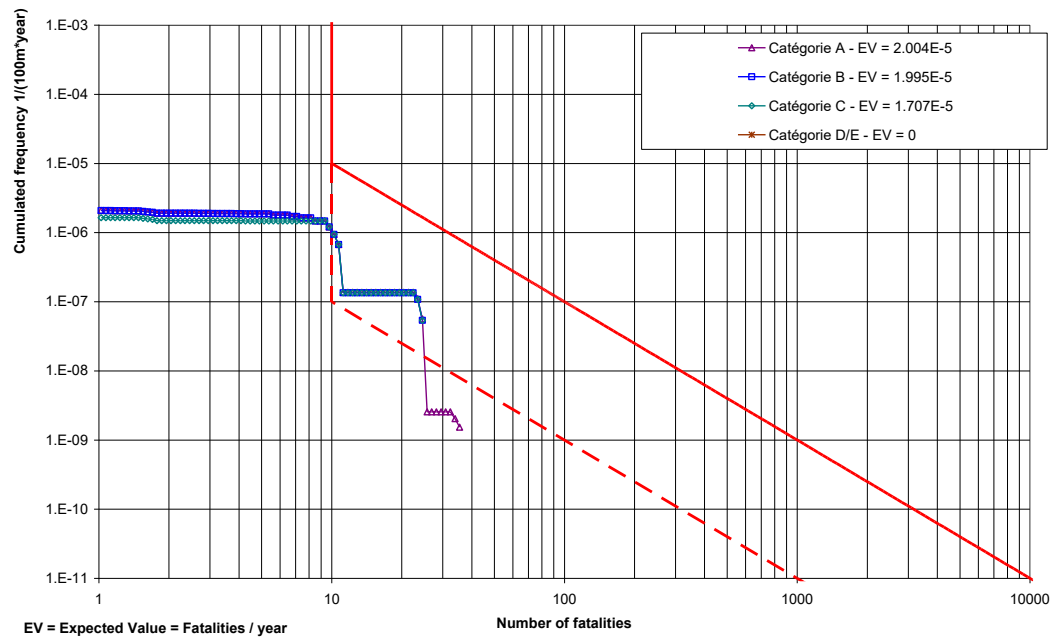
Tunnel 28



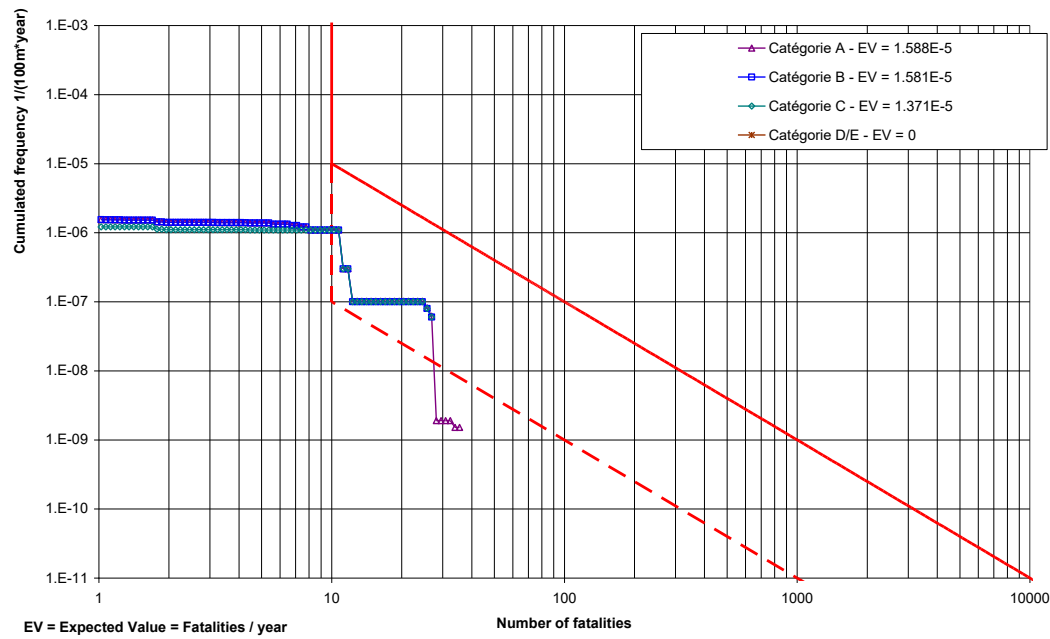
Tunnel 29



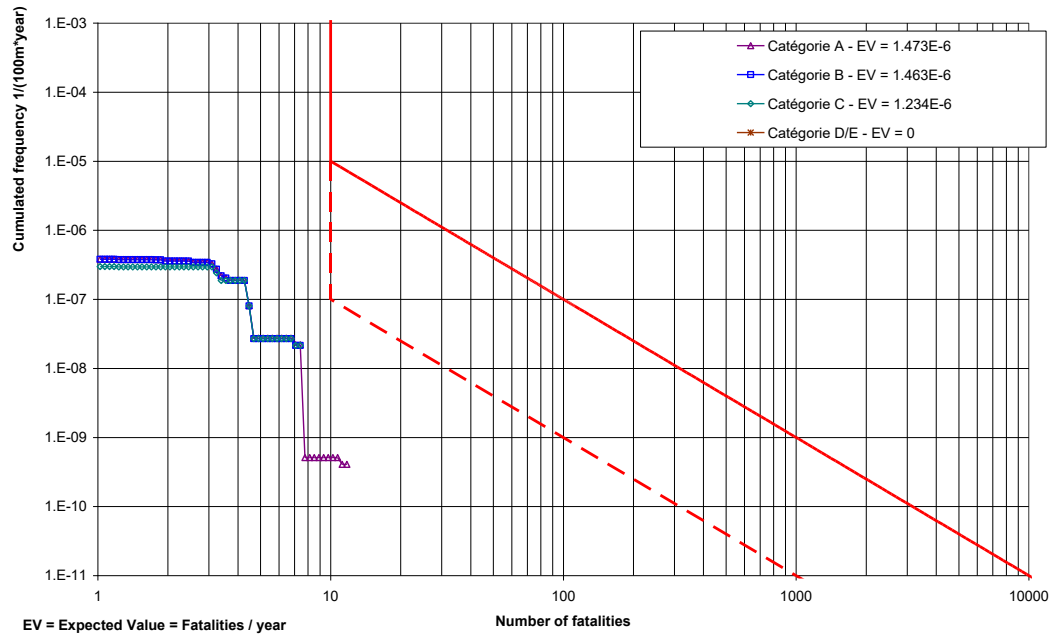
Tunnel 30



Tunnel 31



Tunnel 32



V Methodik Stufe 2: Fallbeispiele

V.1 Einleitung

Die nachfolgenden Fallbeispiele wurden im Rahmen der Erarbeitung der vorliegenden Methodik analysiert. Ziel dabei war es, methodische Aspekte des Vorgehens zu untersuchen und deren Umsetzbarkeit zu überprüfen. Auch wenn für die beiden Fallbeispiele soweit möglich bzw. verfügbar aktuelle, ortsspezifische Daten verwendet wurden, erheben die resultierenden Ergebnisse dementsprechend nicht primär den Anspruch darauf, die realen Verhältnisse abzubilden.

V.2 Fallbeispiel Tunnel A

V.2.1 Lüftungssystem des Tunnels "A" und Abbildung im Modell

Grundlage für die Datenerhebung und -aufbereitung des Lüftungssystems im Tunnel A bildete [15] (Bundesamt für Strassen ASTRA; Globales Erhaltungskonzept, Situationsanalyse, Teilprojekt Tunnel A, Dokumentation Situationsanalyse GST BSA, INGE G25; 20.11.2009). Das Lüftungssystem des Tunnels besteht aus 6 Lüftungszentralen mit 23 Zu-/Abluftventilatoren (vgl. Abb. V.1). In den Jahren 2001/2002 wurden in einem Abstand von 96 m motorisch angetriebene Lüftungsklappen zur konzentrierten Absaugung im Brandfall installiert. Im Brandfall erfolgt die Absaugung über 3 Lüftungsklappen. Daraus ergeben sich für die einzelnen Brandabschnitte die in Abb. V.1 dargestellten Absaugmengen.

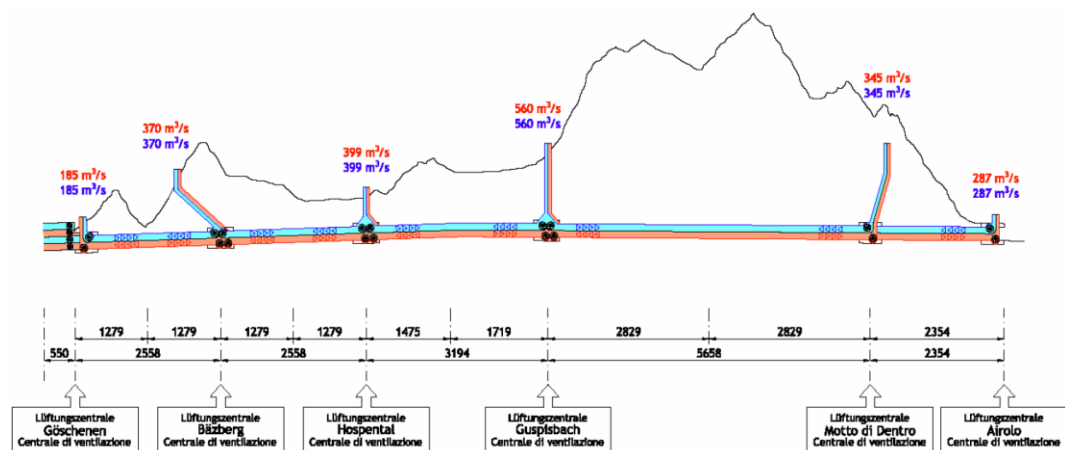


Abb. V.1 Lüftungsschema des Tunnels A (Quelle: [15])

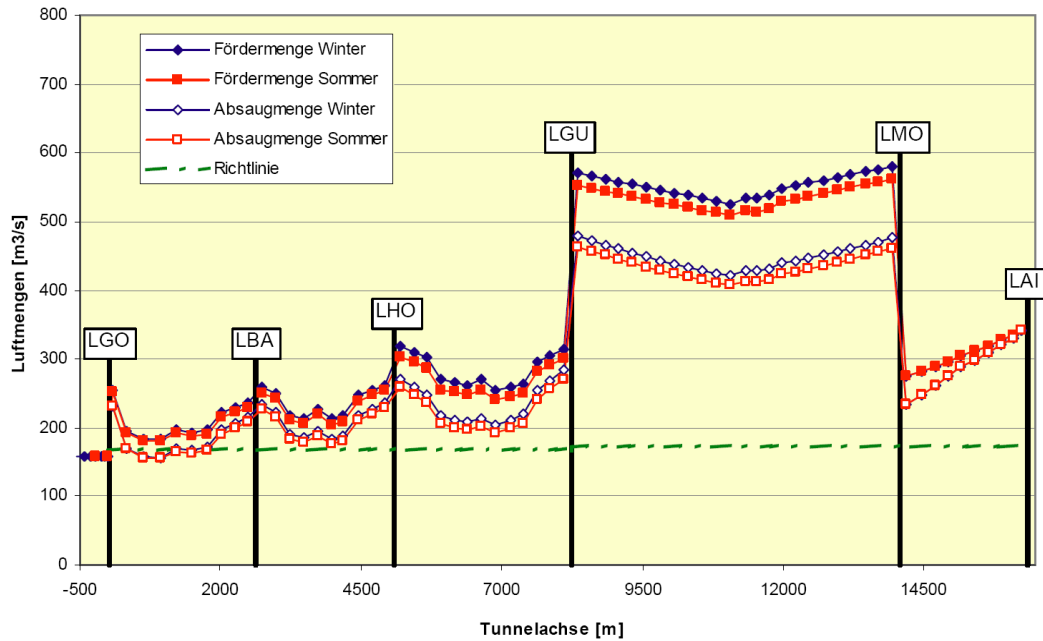


Abb. V.2 Förder- und Absaugmengen im normalen Betrieb (Quelle: [15])

Im QRA-CH Modell erfolgt die Ausmassberechnung für fünf Brandorte im Tunnel. Für jeden der fünf Brandorte bzw. Brandfälle ist die jeweilige gesamte Abzugsmenge des betroffenen Brandabschnittes zu ermitteln (aus Abb. V.2) und anzugeben. Dabei ist der "steady state" im Brandfall zu berücksichtigen, d.h. der stabile Zustand nach Aufbau der maximalen Brandleistung und der entsprechenden Strömungsverhältnisse im Tunnel. Für die fünf Brandfälle sind des Weiteren die sich ergebende Strömungsverhältnisse in den übrigen Tunnelbereichen zu ermitteln.

V.2.2 Ergebnisse Stufe 2 / 1: Summenkurven der einzelnen Szenarien

Abb. V.3 zeigt die resultierenden Summenkurven der einzelnen Szenarien aus der Berechnung der Stufe 2. Abb. V.4 zeigt zum Vergleich die Ergebnisse der vereinfachten Abschätzung der Risiken gemäss dem Vorgehen der Stufe 1. Es ergeben sich folgende Erkenntnisse aus dem Vergleich der einzelnen Szenarien:

- Ereignisse mit grossen Schadensausmassen sind gemäss den Ergebnissen der Stufe 2 weniger häufig.
- Die Charakteristik der Summenkurven (Gesamtrisiken sowie einzelne Szenarien) bleibt in Stufe 2 ähnlich. Massgebend für die Gesamtrisiken sind in beiden Fällen die Szenarien 4 (Lachenbrand Benzin) und 11 (Acroleinfreisetzung aus Tank).
- Innerhalb der Szenarien sind Unterschiede erkennbar: Die Szenarien 4, 7, 9 und 10 weisen ein geringeres maximales Ausmass, Szenario 5 ein grösseres maximales Ausmass auf. Des Weiteren ergibt sich bei fast alle Szenarien eine geringere Häufigkeit im Bereich der grossen Ereignisse.

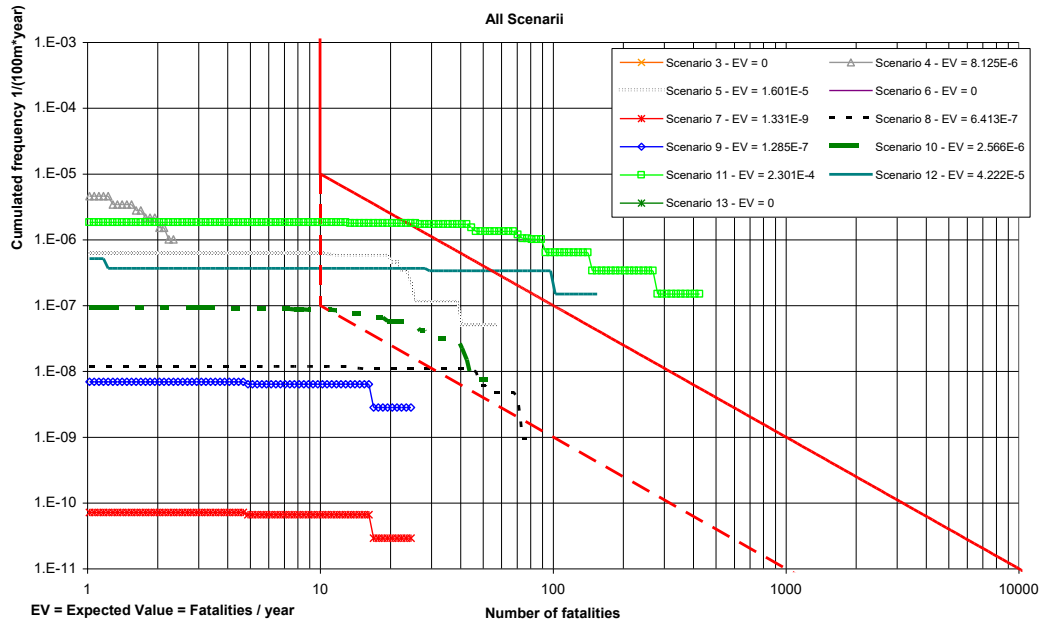


Abb. V.3 Summenkurven der einzelnen Szenarien für das Fallbeispiel Tunnel A, Ergebnis der vertieften Ermittlung des intrinsischen Risikos gemäss dem Vorgehen der Stufe 2

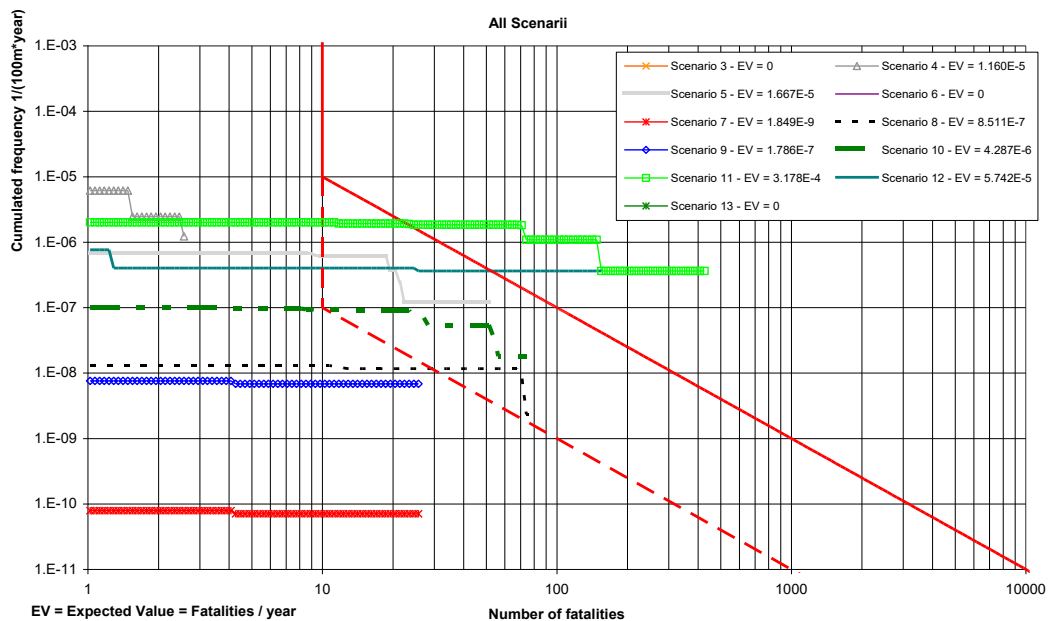


Abb. V.4 Summenkurven der einzelnen Szenarien für das Fallbeispiel Tunnel A, Ergebnis der vereinfachten Abschätzung des intrinsischen Risikos gemäss dem Vorgehen der Stufe 1

V.3 Fallbeispiel Tunnel B

V.3.1 Datenerhebung

Die Datenerhebung für die Berechnung des Fallbeispiels nach der Stufe 2 des Vorgehens basiert auf den folgenden Grundlagen:

- Tiefbauamt Kanton Basel-Landschaft: Erhöhung der Tunnelsicherheit – Gesamtbeurteilung Tunnel Kanton Basel-Landschaft, Gruner AG (2003), [26]

- Bundesamt für Strassen ASTRA: Risikoermittlung für den Erhaltungsabschnitt der A2 zwischen Basel – Augst (RE EABA), Ernst Basler + Partner (2010), [27]
- Informationen zum Lüftungssystem Tunnel B [HBI, Korrespondenz vom Mai 2011]

Bauwerk

Betreffend Geometrie des Bauwerks wurden gegenüber den für die Stufe 1 verwendeten Daten unter anderem die folgenden Parameter zusätzlich erhoben:

- Breite und Höhe des Querschnittes
- Länge der einzelnen Röhren
- Anzahl der Notausgänge in den einzelnen Röhren
- Quergefälle

Überwachung und Kommunikation

Es wurden weitergehenden Angaben zur den Überwachungs- und Kommunikationseinrichtungen des Tunnels erhoben und in den Berechnungen berücksichtigt (z. B. Berücksichtigung der vorhandenen Einsprechanlage).

Lüftungssystem

Für die Berechnungen der Stufe 2 wurden zusätzliche Angaben zu Art und Dimensionierung des Systems erhoben [HBI, Korrespondenz vom Mai 2011]. Beim installierten System handelt sich um eine durchgehende Längslüftung mit Strahlventilatoren und Mittenabsaugung. Je Röhre befindet sich eine Dreiergruppe Strahlventilatoren jeweils 10 m vom Einfahrtsportal entfernt. Die Absaugklappen sind in beiden Röhren etwa in Tunnelmitte angebracht. Die Absaugung erfolgt mittels zwei Abluftventilatoren. Auf Basis dieser Grundlagen wurden die für die Berechnungen der Stufe 2 nötigen Strömungsverhältnisse im Brandfall anhand einer 1D-Simulation ermittelt.

Für die Berechnung der Stufe 1 waren nur wenige Angaben zum Lüftungssystem im Brandfall vorhanden. Es wurde von einer nach Norm dimensionierten Längslüftung ausgegangen.

Verkehrsaufkommen und Gefahrguttransport

Betreffend Verkehrsaufkommen wurden für die Stufe 2 die im Rahmen der Risikoermittlung EABA [27] erhaltenen Zählstellendaten ausgewertet. Daraus wurden zum einen der genaue DTV und der SV-Anteil ermittelt. Diese Werte liegen über den Werten der Stufe 1. Zum anderen konnten die tageszeitliche Schwankung des Verkehrsaufkommens berücksichtigt werden, indem drei Zeitperioden unterschieden wurden. Für die Periode "unterdurchschnittliche Verkehrsstärke", "durchschnittliche Verkehrsstärke" und "überdurchschnittliche Verkehrsstärke" wurde jeweils deren zeitlicher Anteil sowie die mittlere Verkehrsstärke ermittelt.

Die Zusammensetzung des Gefahrguttransportes wurde aufgrund der Erkenntnisse in der Risikoermittlung EABA [27] abgeleitet bzw. die Standardverteilung gemäss der Stufe 1 wurde entsprechend den dort gewonnenen Erkenntnissen angepasst.

Unfallgeschehen

Zur Berücksichtigung des lokalen Unfallgeschehens wurde aus den Daten der Risikoermittlung EABA [27] die ortsspezifische Unfallrate abgeleitet.

Umgebungsbedingungen

Die Standardwerte der Bevölkerungsdichten der Stufe 1 wurden die ortsspezifischen Werte ersetzt (Risikoermittlung EABA, [27]). Dabei wurde zwischen den für das Verkehrsaufkommen definierten Zeitperioden unterschieden.

V.3.2 Ergebnisse Stufe 2 / 1: Summenkurven der einzelnen Szenarien

Abb. V.5 zeigt die resultierenden Summenkurven der einzelnen Szenarien aus der Berechnung der Stufe 2. Abb. V.6 zeigt zum Vergleich die Ergebnisse der vereinfachten Abschätzung der Risiken gemäss dem Vorgehen der Stufe 1. Es ergeben sich folgende Erkenntnisse aus dem Vergleich der einzelnen Szenarien:

- Die grundsätzliche Charakteristik der einzelnen Summenkurven bleibt ähnlich, Unterschiede sind jedoch erkennbar. Die maximalen Ausmasse nehmen bei fast allen Szenarien ab (Ausnahme bei Szenario 9).
- Die massgebenden Szenarien sind in beiden Fällen die Szenarien 11 (Acroleinfreisetzung aus Tank), 5 (Explosion Benzindämpfe), 8 (Gaswolkenbrand Propangastank) sowie in Stufe 2 aufgrund der veränderten Gefahrgutverteilung zusätzlich das Szenario 10 (Ammoniakfreisetzung aus Tank).

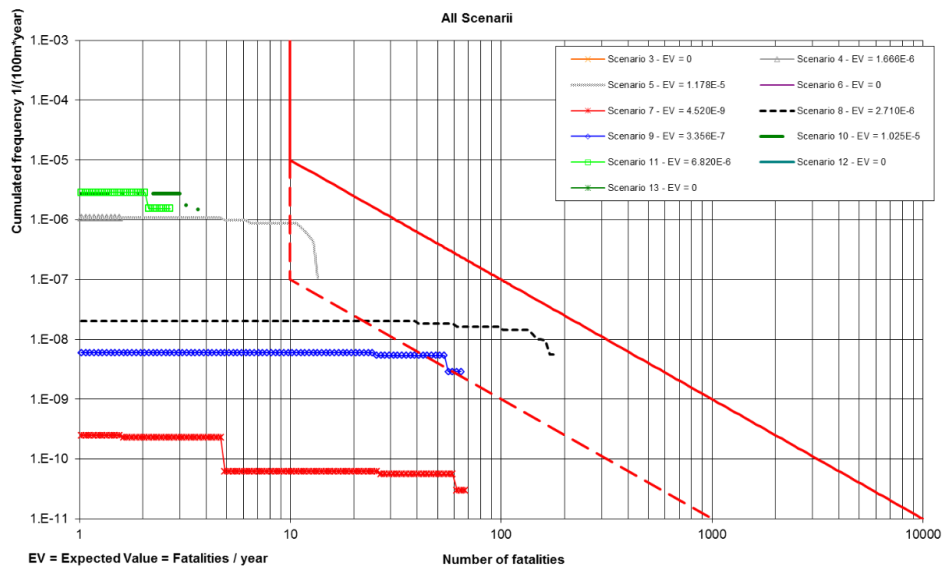


Abb. V.5 Summenkurven der einzelnen Szenarien für das Fallbeispiel Tunnel B, Ergebnis der vertieften Ermittlung des intrinsischen Risikos gemäss dem Vorgehen der Stufe 2

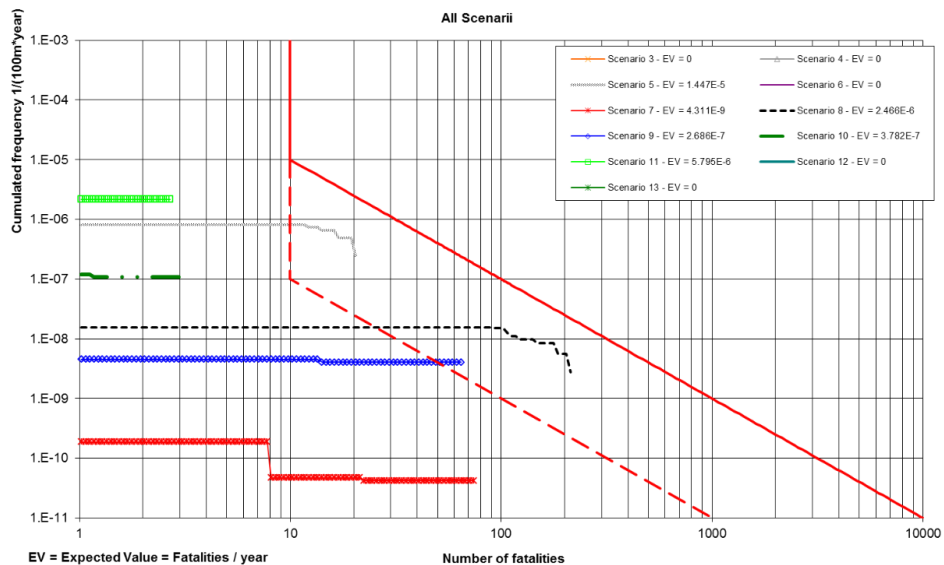


Abb. V.6 Summenkurven der einzelnen Szenarien für das Fallbeispiel Tunnel B, Ergebnis der vereinfachten Abschätzung des intrinsischen Risikos gemäss dem Vorgehen der Stufe 1

VI Méthodologie pour la prise en compte des périodes de congestion

VI.1 Introduction

Selon l'OFROU, un embouteillage est défini de la façon suivante :

- Lorsque la vitesse des véhicules sur les routes à haut débit ou les routes principales hors des localités est de moins de 10 km/h pendant au moins une minute et que le trafic est souvent immobilisé; et
- Lorsque le temps perdu aux carrefours ou aux goulots d'étranglement sur les routes principales à l'intérieur des localités dépasse les 5 minutes au total.

Nous nous attacherons dans la présente annexe à identifier de quelle façon ce type de situation peut être pris en compte dans les calculs réalisés par le modèle QRA.

VI.2 Rappels préliminaires concernant le modèle QRA-CH

Le modèle QRA-CH permet in fine la construction de courbes cumulative de risques TMD dans un diagramme fréquence-gravité, concluant quant à l'acceptabilité ou non du risque encouru par les usagers d'un tronçon routier. Pour ce faire, le modèle utilise une méthode quantitative pour 13 scénarios lié au trafic de matière dangereuse. Le calcul du nombre de décès s'effectue grâce à des modélisations des effets des scénarios en tunnel (milieu confiné), du trafic et de l'évacuation des usagers.

L'outil QRA-CH se présente en deux étapes. Chaque étape dispose d'une interface spécifique. L'étape 1 consiste à renseigner 15 paramètres modifiables par l'utilisateur et l'étape 2, beaucoup plus complète, reprend ces paramètres et les développant grâce à des onglets propres à chacun. Le cas de la prise en compte des embouteillages est un cas complexe nécessitant l'accès à un nombre important de paramètres modifiables. Ceci ne pourra être réalisé que par l'intermédiaire de l'interface étape 2. Ainsi, il est indispensable, dans le cas de la prise en compte des embouteillages dans un tunnel, d'utiliser l'interface de saisie des données de l'étape 2.

Dans la présente annexe, la dénomination "interface " se réfèrera uniquement à l'interface détaillée de l'étape 2.

En ce qui concerne la modélisation du trafic, un certain nombre de paramètres sont pris en compte par l'intermédiaire de l'interface utilisateur et d'autres sont désignés par défaut. Ces paramètres conditionnent la modélisation qui consiste à évaluer le nombre de véhicules et leur distance à l'accident. Ainsi, une représentation du trafic modélisé par le QRA-CH pourrait être la suivante :

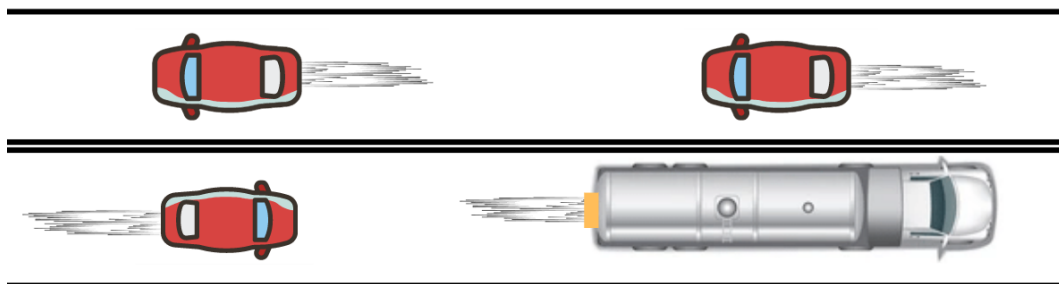


Fig. VI.1 Trafic fluide tant que l'évènement ne s'est pas produit

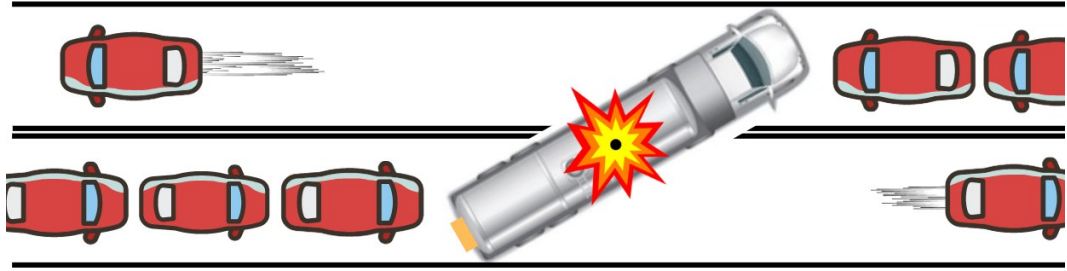


Fig. VI.2 État du trafic après l'évènement (en cas de trafic fluide).

Une fois le résultat de la modélisation de trafic déterminé, on lui "superpose" les zones d'effets déduites des modélisations des scénarios. Les personnes présentes dans les véhicules des différentes zones (densités de personnes) influent logiquement sur le nombre de décès en cas d'évènement et ainsi sur le niveau de risque.

La figure ci-dessous représente le cas d'un événement se produisant dans une situation embouteillée. On peut alors s'interroger sur les conséquences qu'engendrerait un tel état initial du trafic. En effet, les véhicules en aval de l'évènement ne sont plus dans un trafic fluide et ainsi ne pourront pas sortir du tunnel rapidement. Plus de véhicules seront ainsi concernés par le scénario, comme présenté dans le schéma ci-dessous.

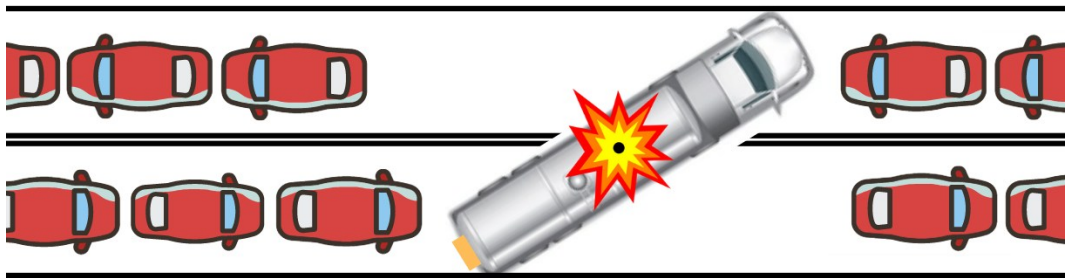


Fig. VI.3 État du trafic après l'évènement (en cas de trafic embouteillé)

Le cas de l'embouteillage n'est pas traité de manière automatique par le modèle QRA-CH. Néanmoins, dans le cadre d'un tunnel fréquemment embouteillé, ne pas en tenir compte pourrait conduire à sous-estimer le risque.

La présente annexe vise donc à proposer des éléments complémentaires dans la démarche d'analyse du risque permettant de tenir compte de l'état congestionné du trafic initial.

Ainsi les chapitres qui suivent visent à traiter les 2 particularités majeures de la congestion :

- Le nombre plus important de véhicules bloqués en aval de la circulation
- Le fait que les probabilités d'obtenir un scénario accidentel en cas d'accident sont moindres, en raison de vitesses des véhicules plus faibles et donc de chocs moins violents

VI.3 Modélisation du trafic

Dans ses modélisations de trafic, le QRA-CH ne tient pas directement compte de la formation d'un embouteillage préliminaire à un accident.

En revanche, le modèle calcule une interdistance moyenne entre véhicules I , en fonction du trafic horaire T et de la vitesse limite v renseignés pour la période et pour un sens donné, selon la formule suivante :

$$I = \frac{v}{T}$$

Il apparait ainsi que plus la vitesse est faible, plus l'interdistance entre véhicules calculée par le modèle est petite. Une façon de modéliser un trafic dense en situation initiale est donc d'indiquer une vitesse faible dans le sens souhaité. Cela conduit à considérer un "rapprochement" des véhicules en aval et à les maintenir présents plus longtemps à proximité immédiate du scénario (en aval). Cette méthode permet ainsi de tenir compte des véhicules bloqués par la congestion en aval.

Afin de fixer l'interdistance entre véhicules à 10 m pour chaque voie de circulation, il convient de renseigner la vitesse selon la formule suivante :

$$v = T * 0.01$$

Avec 0.01 km = 10 m d'interdistance entre véhicules.

L'application de cette formule conduit au tableau de valeurs suivantes, pour un trafic horaire compris entre 500 et 1000 véhicules par heure et par voie :

Interdistance l entre véhicules (m)	Trafic horaire par voie T (veh/h)	Vitesse v à renseigner (km/h)
10	500	5
10	600	6
10	700	7
10	800	8
10	900	9
10	1000	10

V = l/1000 * T

Si le trafic est supérieur à 1000 véhicules par heure et par voie, il est considéré que la vitesse de circulation est fixée à 10 km/h. En effet, à partir d'un certain volume de trafic horaire par voie, la vitesse de circulation ne peut plus être choisie librement (le trafic élevé entraine inévitablement une limitation de la vitesse de circulation).

Ainsi, la courbe suivante représente, pour toutes les plages de trafic horaire comprises entre 500 et 2000 véhicules par voie, la vitesse à appliquer pour tenir compte du phénomène de congestion :

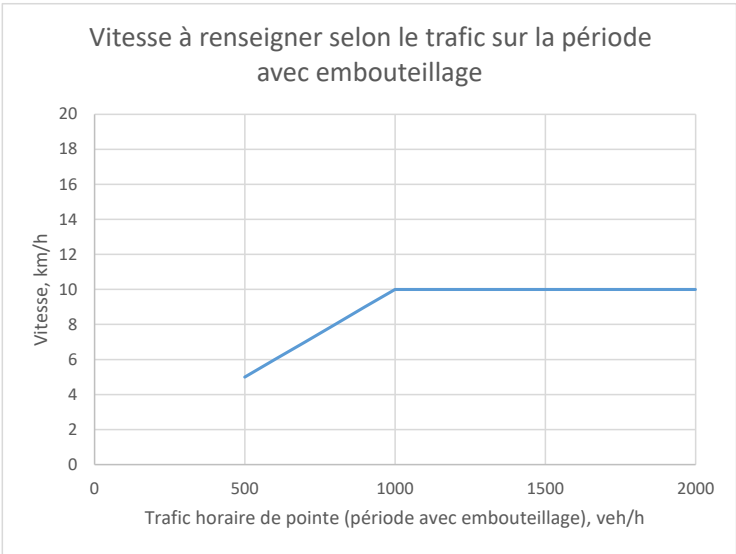


Fig. VI.4 Vitesse à déterminer selon le trafic horaire par voie pour simuler une congestion

Au-delà de ces plages de trafic :

- Si le trafic est inférieur à 500 véhicules/heure et par voie, un phénomène de congestion semble peu probable, c'est pourquoi le cas n'a pas été représenté sur la courbe ci-dessus. Néanmoins, il est toujours possible d'appliquer la même formule pour gérer des cas très spécifiques (feu rouge en sortie d'un tunnel, rond-point congestionné, travaux...);
- Un trafic supérieur à 2000 véhicules/heure et par voie n'est pas envisagé car il est supposé qu'un tel trafic serait supérieur à la capacité d'une voie de circulation, indépendamment de la valeur de vitesse considérée.

Pour la mise en œuvre de la modification de la vitesse de circulation aux heures de pointe inférieur à 10, l'utilisateur peut simplement définir la vitesse souhaitée dans l'interface de saisie, onglet « 4_Trafic_global», Pour la période de congestion (par convention, il s'agit de la « Période de pointe »), comme dans l'exemple ci-dessous :

		Période normale	Période calme	Période de pointe	Trafic moyen journalier
sens A	Trafic total projeté à l'horizon d'étude (véh/h)	600	100	600	10896 véh/j
	Part de poids lourds	3.0%	0.5%	3.0%	309 véh/j soit 2.8%
	Part de bus	0.10%	0.10%	0.10%	11 véh/j soit 0.10%
	Vitesse moyenne des véhicules légers (km/h)	50	50	6	
	Vitesse moyenne des poids lourds et des bus (km/h)	50	50	6	

Fig. VI.5 Exemple de définition d'une vitesse caractérisant une congestion pour la période de pointe

A noter que dans l'exemple présenté dans la figure ci-dessus, le trafic en période congestionné est identique au trafic en période normale. En effet, la congestion n'est pas nécessairement causée par un trafic élevé mais peut aussi être la conséquence d'éléments de contexte externes (travaux, feux de circulation, rond-point...).

VI.4 Influence de la vitesse sur les probabilités conditionnelles

Les scénarios accidentels modélisés par le QRA font suite à un accident matériel (choc) conduisant à la perte de confinement d'un produit. Étant donné que l'énergie cinétique produite en cas de choc est proportionnelle au carré de la vitesse, la probabilité de survenance d'une perte de confinement faisant suite à un accident routier peut être modélisée comme proportionnelle au carré de la vitesse de circulation du véhicule TMD concerné.

Ainsi, dans le cas d'une circulation avec embouteillage, les probabilités conditionnelles associées aux différents scénarios seront réduites par rapport à une situation de trafic fluide.

Dans le modèle QRA-CH, deux jeux de probabilités conditionnelles sont définis, permettant de caractériser les vitesses de déplacement représentatives du milieu urbain (45km/h) et rural (85 km/h). Ces probabilités conditionnelles sont présentées dans le tableau suivant :

Tab. VI.6 Probabilités conditionnelles représentatives d'un environnement urbain ou rural

Scénario #	Description	Probabilité conditionnelle en tunnel avec vitesse moyenne de 45 km/h [P(45)]	Probabilité conditionnelle en tunnel avec vitesse moyenne de 85 km/h [P(85)]	Ratio [p(85)]/[p(45)]
3	BLEVE bouteille de propane de 50 kg	6.720E-06	8.400E-06	1.25
4	Feux de nappe essence	4.657E-03	5.822E-03	1.25
5	Explosion vapeurs d'essence	1.377E-03	1.721E-03	1.25
6	Dégagement de chlore d'un réservoir de 20 t	2.743E-03	3.429E-03	1.25
7	BLEVE réservoir de propane de 18 t	6.720E-06	8.400E-06	1.25
8	Incendie avec nuage de gaz réservoir de propane de 18 t	2.222E-04	2.777E-04	1.25
9	Feux de torche réservoir de propane de 18 t	6.488E-04	8.110E-04	1.25
10	Dégagement d'ammoniac d'un réservoir de 18 t	2.743E-03	3.429E-03	1.25
11	Dégagement d'acroléine d'un réservoir de 25 t	2.743E-02	3.429E-02	1.25
12	Dégagement d'acroléine d'une bouteille de 100 l	2.743E-02	3.429E-02	1.25
13	BLEVE CO2 liquéfié 20 t	6.720E-06	8.400E-06	1.25

Afin de quantifier l'effet sur le risque de la réduction de vitesse particulièrement important en situation de congestion, la même formule que celle qui a été définie dans la dernière version du QRAM AIPCR (410) est utilisée, pour laquelle une formule permet d'ajuster les probabilités conditionnelles à la vitesse de circulation définie. Cela permettra de définir un jeu de probabilités conditionnelles pour les vitesses réduites (30km/h, qui est la vitesse minimale à considérer pour l'application de la formule d'ajustement des probabilités conditionnelles, selon la méthode utilisée pour le QRAM-AIPCR). A noter que les ratios entre la probabilité conditionnelle à 85 km/h et à 45 km/h étant identiques pour chaque scénario, ces derniers suivent la même loi de variation selon la vitesse. Un seul facteur correcteur est donc à appliquer sur l'ensemble des scénarios.

A partir des deux points ($v=45$ et $v=85$), la courbe suivante permet d'établir la relation entre vitesse et probabilité conditionnelle d'occurrence des scénarios accidentels :

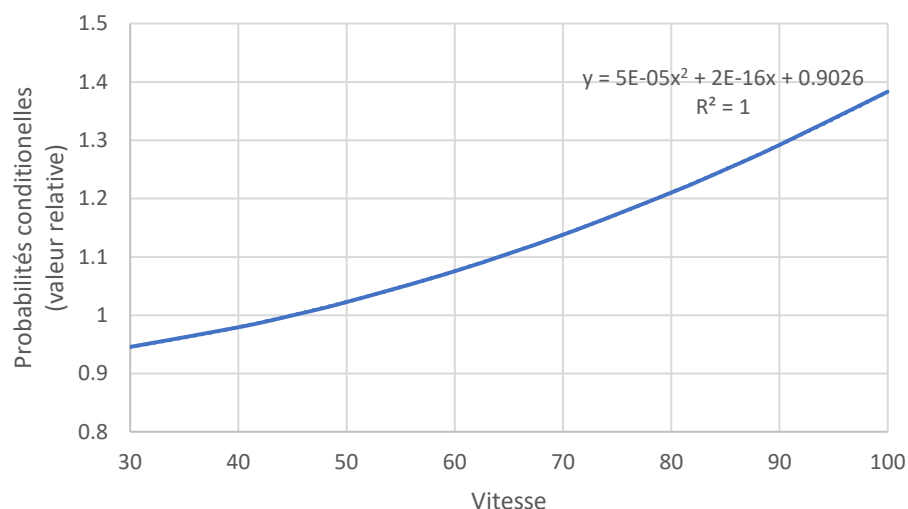


Fig. VI.7 Relation entre la vitesse et les probabilités conditionnelles des scénarios accidentels

Ainsi, les valeurs de probabilités conditionnelles à utiliser pour tenir compte d'un trafic réduit ($\leq 30\text{km/h}$) sont les suivantes ($0.9459 \cdot p(45)$, ou $0.7567 \cdot p(85)$) :

Tab. VI.8 Probabilités conditionnelles ajustées en fonction de la vitesse réelle en cas de congestion

Scénario #	Description	Probabilité conditionnelle en tunnel avec vitesse moyenne $\leq 30\text{ km/h}$ [P(≤ 30)]	Ratio [p(≤ 30)]/[p(45)]	Ratio [p(≤ 30)]/[p(85)]
3	BLEVE bouteille de propane de 50 kg	6.357E-06	0.9459	0.7567
4	Feux de nappe essence	4.405E-03	0.9459	0.7567
5	Explosion vapeurs d'essence	1.302E-03	0.9459	0.7567
6	Dégagement de chlore d'un réservoir de 20 t	2.595E-03	0.9459	0.7567
7	BLEVE réservoir de propane de 18 t	6.357E-06	0.9459	0.7567
8	Incendie avec nuage de gaz réservoir de propane de 18 t	2.102E-04	0.9459	0.7567
9	Feux de torche réservoir de propane de 18 t	6.137E-04	0.9459	0.7567
10	Dégagement d'ammoniac d'un réservoir de 18 t	2.595E-03	0.9459	0.7567
11	Dégagement d'acroléine d'un réservoir de 25 t	2.595E-02	0.9459	0.7567
12	Dégagement d'acroléine d'une bouteille de 100 l	2.595E-02	0.9459	0.7567
13	BLEVE CO2 liquéfié 20 t	6.357E-06	0.9459	0.7567

Ainsi, il ressort de ce tableau que :

- dans le cas d'un tunnel urbain, les fréquences d'occurrence des scénarios survenant à l'heure de pointe (embouteillage) seront diminuées de 5% environ par rapport à une situation non congestionnée;
- dans le cas d'un tunnel rural, les fréquences d'occurrence des scénarios survenant à l'heure de pointe seront diminuées de 25% environ.

Dans la mesure où les heures de pointe (embouteillage) ne représentent que quelques heures par jour, l'effet sur la courbe et donc sur le niveau de risque sera tout à fait négligeable.

En supposant que les heures de pointe représentent 4 h par jour (hypothèse plutôt majorante), soit 1/6 du temps, la diminution représente un peu moins de 1% du risque total dans le cas d'un tunnel urbain, et de 4% du risque total dans le cas d'un tunnel rural.

Ces valeurs sont négligeables au vu de l'échelle d'acceptabilité du risque OPAM (une telle différence serait imperceptible à l'œil nu).

En adaptant la manière d'utiliser le modèle QRA-CH sur le plan des probabilités conditionnelles, il apparaît ainsi que l'évolution (à la baisse) du risque ne sera jamais significative et ne peut pas remettre en cause les catégories d'autorisation TMD qui ont été déterminés par le passé. Il est ainsi convenu qu'il n'est pas nécessaire d'adapter la méthodologie d'utilisation du modèle sur ce point en situation congestionnée.

Il convient néanmoins de rappeler que le calcul du risque selon la méthode QRA-CH (hypothèses liées aux screenings routiers) est majorant en cas de vitesse faible des véhicules, ce qui est typiquement le cas en situation congestionné.

VI.5 Études de cas tests

Plusieurs études de cas ont été menées afin de vérifier par le calcul la méthode proposée.

Les cas suivants ont été retenus et sont présentés dans les paragraphes suivants :

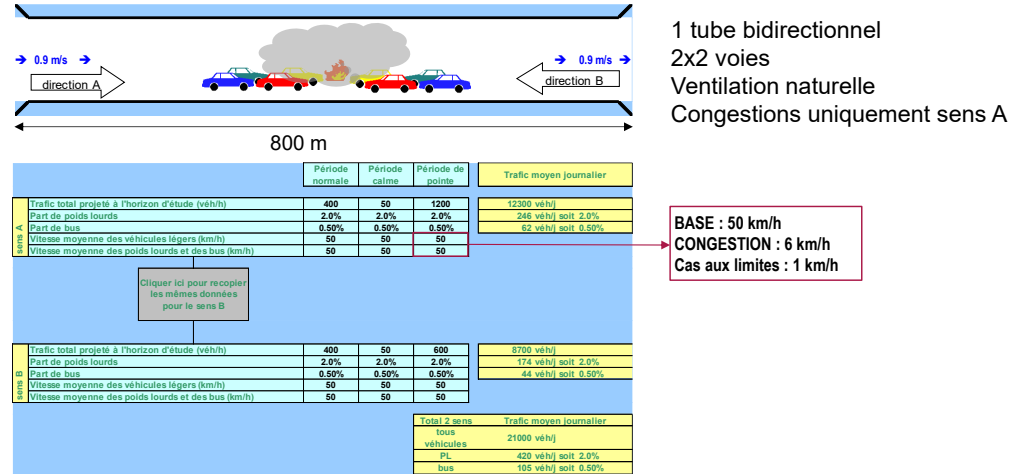
- Test 1 : Un tunnel bidirectionnel en milieu urbain de 800 m à 2x2 voies avec ventilation naturelle;
- Test 2 : Un tunnel monotube unidirectionnel en milieu rural de 2000 m à 2 voies avec ventilation longitudinale;
- Test 3 : Le même tunnel unidirectionnel que précédemment, mais avec un trafic aux heures de pointe beaucoup plus marqué (calcul avec 1000 et avec 2000 véh/heure et par voie), afin de tester le modèle à la limite de plausibilité du trafic horaire par voie.

L'ensemble des tests menés donne des résultats satisfaisants et confortent dans la solution proposée pour tenir compte d'une situation avec embouteillages. Il en ressort ainsi que la modification de la vitesse de circulation à l'heure de pointe dans le ou les sens concernés par la situation congestionnée, est suffisante et permet de bien tenir compte des usagers présents en aval des scénarios accidentels.

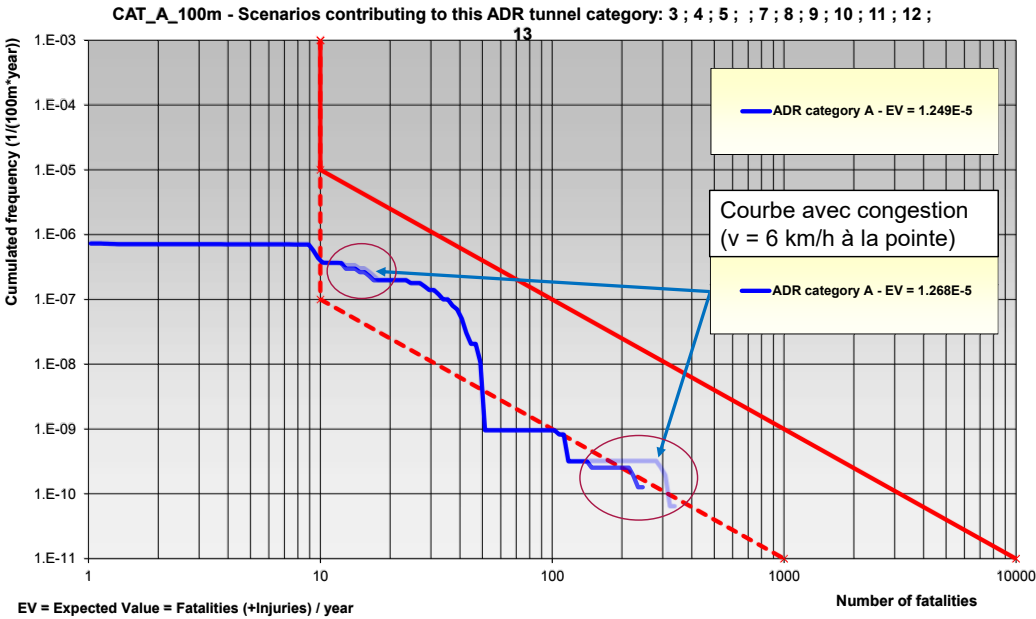
Cas 1

TEST 1 – TUNNEL BIDIRECTIONNEL C

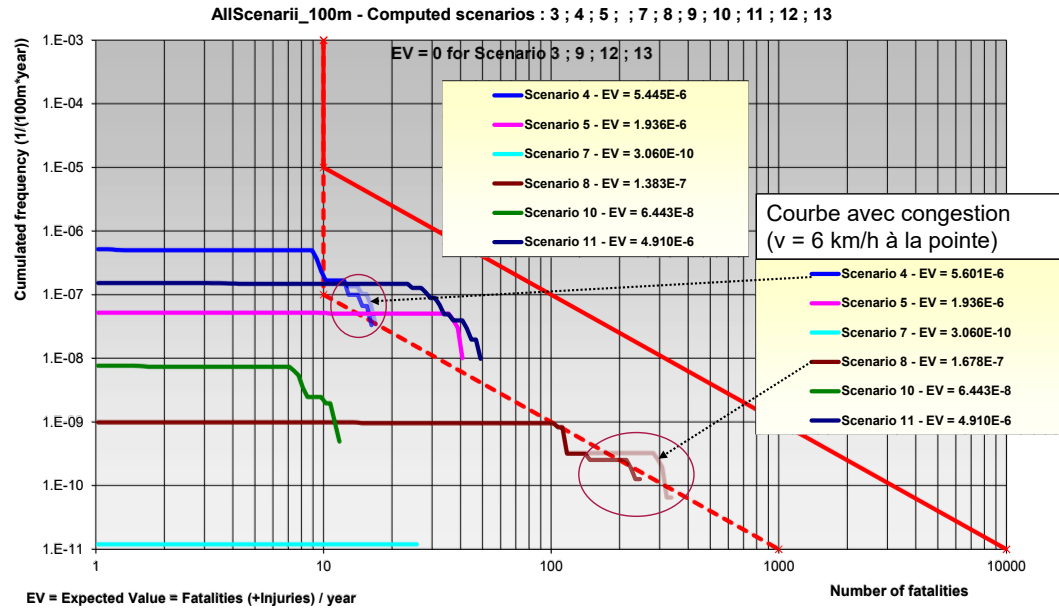
Test	Caractéristiques générales	Trafic pointe	Vitesse en HP
BASE	Bidi2x2v_800m_ventNat_urbain	1200 / 6h	50
CONGESTION	Bidi2x2v_800m_ventNat_urbain	1200 / 6h	6
Cas aux limites	Bidi2x2v_800m_ventNat_urbain	1200 / 6h	1



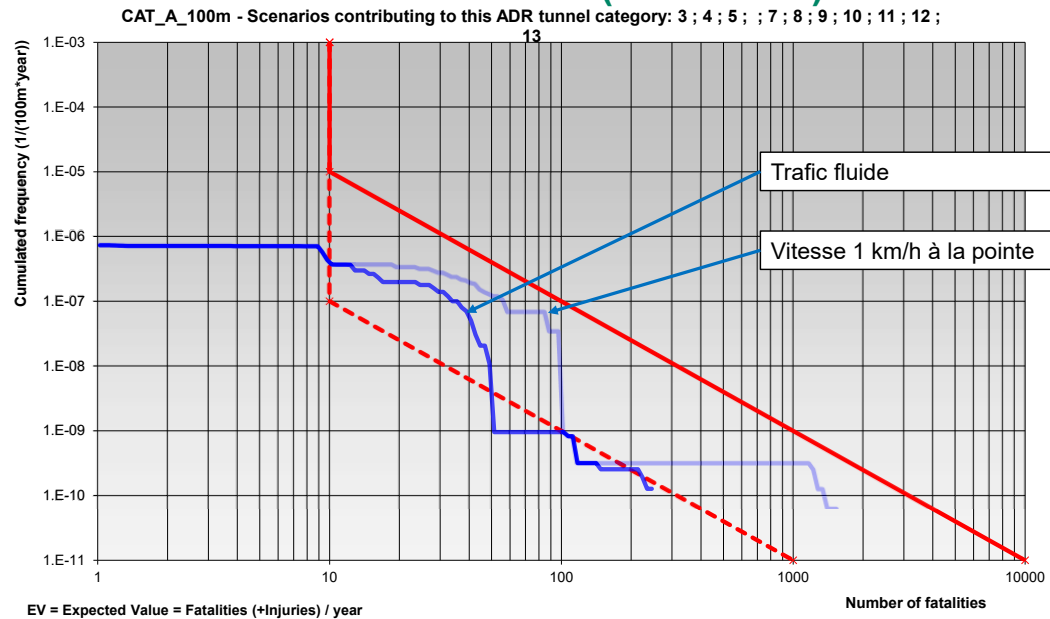
TEST 1 – INFLUENCE DU CHOIX DE LA VITESSE



TEST 1 – INFLUENCE PAR SCENARIO



TEST 1 – CAS AUX LIMITES (V = 1KM/H)

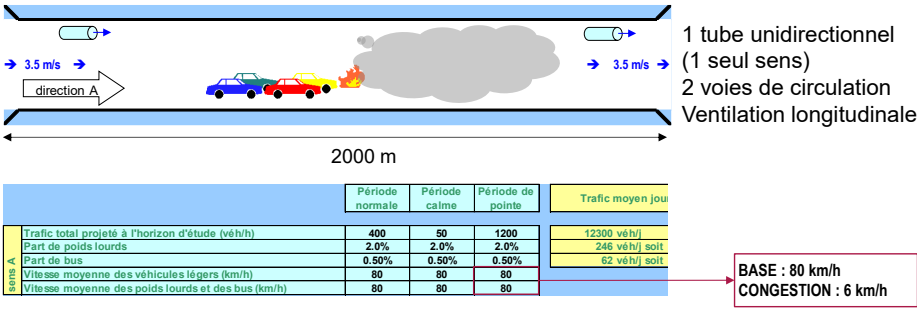


Comparaisons	Commentaires	Conclusion
BASE / CONGESTION	Impact sur la droite de la courbe assez sensiblement marqué, mais seulement pour 2 scénarios (4 et 8).	La prise en compte des embouteillages est conforme à ce qui était attendu, ce qui confirme la pertinence de la méthode proposée. Impact peu marqué car seul 1 sens de circulation concerné par embouteillages.
Cas aux limites	1km/h : la courbe monte de façon très marquée pour la plupart des scénarios.	Possibilité d'accentuer l'effet de densification du trafic en réduisant l'interdistance entre véhicules à moins de 10 m. Attention à vérifier la crédibilité des valeurs renseignées ($v = l \cdot T \Rightarrow l = v/T$).

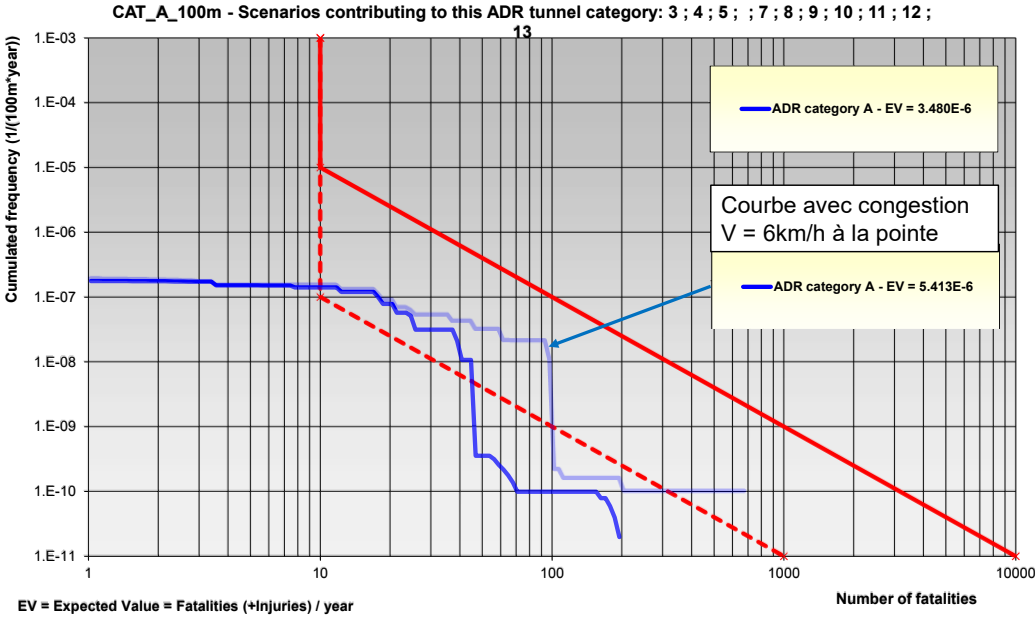
Cas 2

TEST 2 – TUNNEL MONOTUBE UNIDIRECTIONNEL

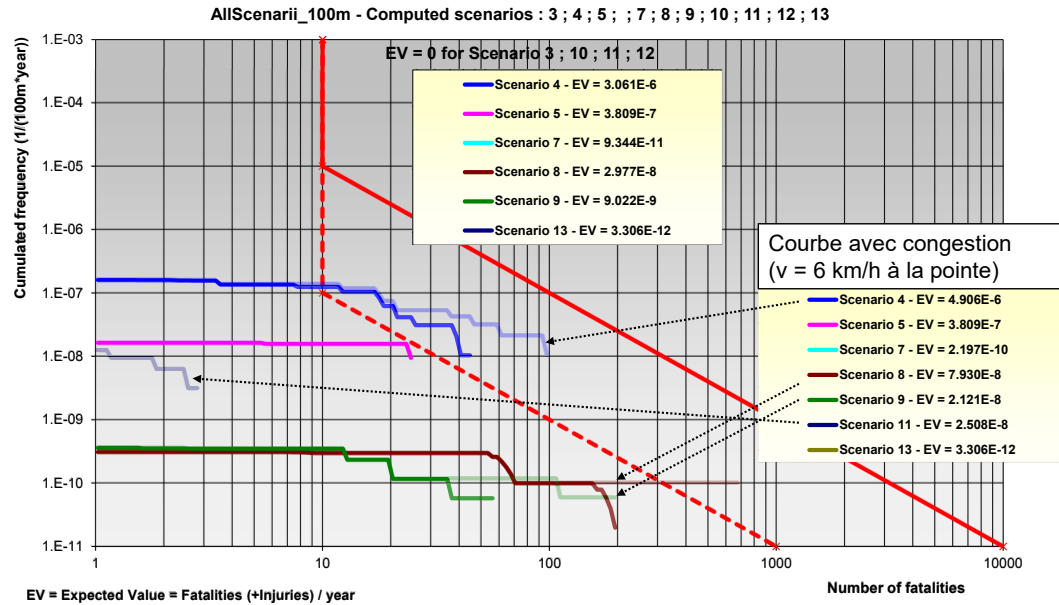
Test	Caractéristiques générales	Trafic pointe	Vitesse en HP
BASE	Uni2v_2000m_venLon_rural	1200 / 6h	80
CONGESTION	Uni2v_2000m_venLon_rural	1200 / 6h	6



TEST 2 – INFLUENCE DU CHOIX DE LA VITESSE



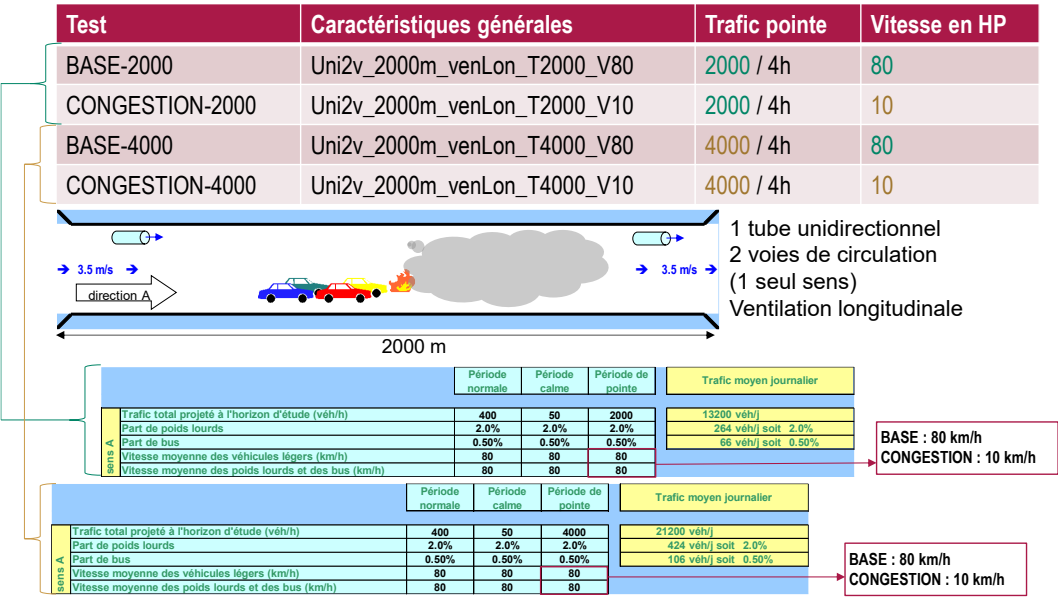
TEST 2 – INFLUENCE PAR SCENARIO



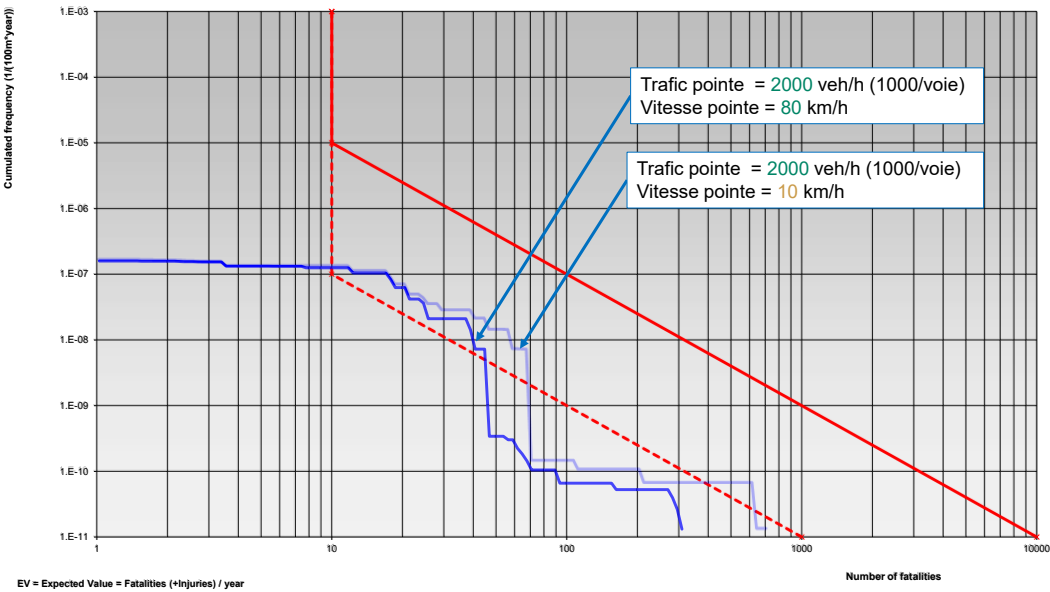
Comparaisons	Commentaires	Conclusion
BASE / CONGESTION	Impact beaucoup plus marqué que dans le cas de l'exemple bidirectionnel précédent (ventilation avec enfumage des véhicules en aval). Aucun scénario de désenfumage spécifique au cas de l'embouteillage n'est appliqué.	La prise en compte des embouteillages est conforme à ce qui était attendu, ce qui confirme la pertinence de la méthode proposée. La différence est beaucoup plus marquée que dans le test 1 car il n'y a qu'un sens de circulation (effet de l'embouteillage moins "dilué").

Cas 3

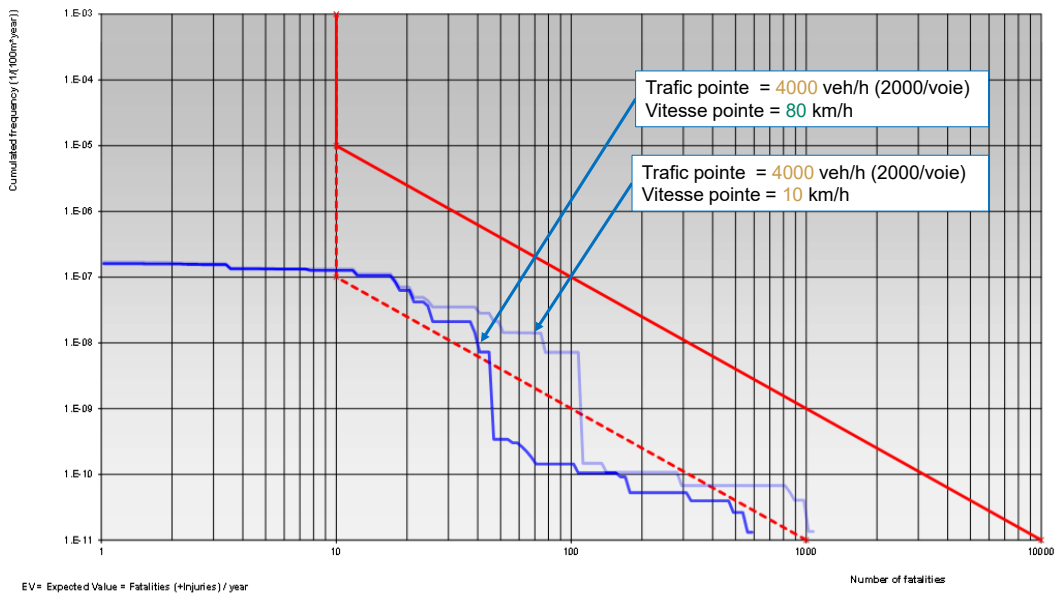
TEST 3 – MONOTUBE AVEC TRAFIC POINTE ÉLEVÉ



TEST 3 – INFLUENCE VITESSE POUR 1000V/H/VOIE



TEST 3 – INFLUENCE VITESSE POUR 2000V/H/VOIE



Comparaisons	Commentaires	Conclusion
BASE-200 / CONGESTION-2000	L'influence de la congestion modélisée par une vitesse réduite est toujours assez marquée. La méthode est donc également applicable pour des trafics élevés.	Application de la méthode confirmé par ce dernier cas test en cas de trafic par voie important.
BASE-4000 / CONGESTION-4000		
	Attention à la vérification de la plausibilité des valeurs de trafic (il y a un seuil limite à partir duquel le trafic est saturé).	

VI.6 Cas particuliers

Les cas présentés ci-après constituent des cas particuliers au sein des cas particulier des tunnels congestionnés. L'objectif de ces chapitres est de fournir une aide pour tenir compte au mieux de ces spécificités. Elles nécessitent un très bon niveau de maîtrise du logiciel. Il est toujours possible de ne pas mettre en œuvre ces propositions, avec le risque d'une surestimation ou sous-estimation du niveau de risques.

VI.6.1 Scénarios de désenfumage spécifiques en cas de congestion

S'il existe un scénario spécifique de ventilation pour la congestion, le problème devient particulièrement complexe puisque qu'il n'est pas possible, depuis l'interface, d'associer à une période de trafic un scénario différent des autres périodes.

Une solution possible reste de réaliser plusieurs calculs avec différents scénarios de ventilation, et d'agrèger les résultats entre un scénario hors congestion et un autre congestionné.

Néanmoins, cette manipulation complexe doit être réservée aux approfondissements et doit être réalisée par un expert. Il s'agit d'un cas à traiter spécifiquement pour un tunnel donné.

La solution alternative consiste à considérer un scénario de désenfumage identique au mode nominal pendant la période congestionnée, dans ce cas les résultats obtenus seront majorants.

VI.6.2 Tunnel partiellement congestionné

Si un tunnel n'est congestionné que sur une partie de sa longueur (par exemple pour cause de réduction du nombre de voies, prise en compte des perturbations sur le trafic causées par un chantier...), il se peut que le bouchon ne concerne pas tout le linéaire du tunnel.

Ce cas de figure ne peut pas être modélisé simplement à l'aide du logiciel QRA-CH, puisqu'un tunnel est considéré par le logiciel comme un tronçon homogène (vitesse, trafic...). Deux solutions sont possibles :

- Dans une approche majorante, il est possible de considérer que l'ensemble du tunnel est congestionné ;
- Dans une approche plus fine (encadrement du niveau de risques), il est possible de réaliser 2 calculs : l'un sans considérer de congestion, et l'autre en supposant une congestion sur tout le linéaire du tunnel. Le niveau de risques "effectif" est alors compris entre les 2 courbes obtenues.

VI.6.3 Tunnel congestionné avec bretelle d'accès

Il s'agit ici d'un cas rencontré peu fréquemment à l'échelle de la Suisse. Dans le cas d'une bretelle d'accès en tunnel, en plus du risque de congestion, il convient de considérer une éventuelle hausse de la fréquence des accidents localisée en raison d'un point d'intersection entre un trafic "rapide" (bretelle d'accès) et un autre plus lent dans le tunnel initialement embouteillé.

Pour la prise en compte de cette configuration très spécifique, un calcul spécifique serait possible, mais sa réalisation est complexe puisqu'elle nécessite :

- La modification des vitesses de circulation tel que décrit au VI.4 ;
- Le changement de la position des accidents comme décrit à la suite, afin de tenir compte de la prépondérance des accidents au droit de la bretelle (paramètre hors interface).

Afin de tenir compte d'une prépondérance des accidents au droit de la bretelle, une piste serait de modifier les localisations d'événements considérées par le modèle (par défaut équiréparti) afin de concentrer les positions d'accident autour de ce point.

Par défaut, le logiciel QRA-CH découpe le tunnel en 5 tronçons de longueurs égales, et les positions des accidents se trouvent à la jonction entre deux tronçons (équiréparti, autant de probabilité en 1 point qu'en 1 autre) :

GRAM_DG Version 4.10 13 scenarios - Swiss adjustment (20220621)							
5 accident locations are considered in tunnel: they are defined below							
			Location 1	Location 2	Location 3	Location 4	Location 5
location (expressed as fraction of tunnel length)	Acp	-	0.17	0.33	0.50	0.67	0.83
Those location are counted from portal upstream regarding traffic (or portal A in case of a tunnel considered once for all for directions A and B)							

Fig. VI.9 Localisations d'accidents (extrait de l'ExpertUserInterface)

Il est possible de modifier ces emplacements dans le fichier des paramètres experts pour concentrer ces derniers au niveau de la bretelle (que l'on supposera présente au premier tiers du tunnel, soit la position 0.33).

Schématiquement, cela se représente comme suit :



Fig. VI.10 Répartition des points d'accident avec concentration au niveau de la bretelle d'accès

Néanmoins, cette manipulation complexe doit être réservée aux approfondissements et doit être réalisée par un expert en cas de besoin. Il s'agit d'un cas à traiter spécifiquement pour un tunnel donné. Une alternative pourrait consister à conserver les positions d'accident par défaut du modèle, sans tenir compte d'une zone plus accidentogène, sous réserve que cette approche ne soit pas minorante.

VI.7 Conclusion

Le QRA-CH est un modèle d'analyse de risque non conçu initialement pour prendre en compte les embouteillages en tunnel. Néanmoins, par l'intermédiaire de différents paramètres, il est possible de tenir compte du phénomène de manière satisfaisante dans les résultats des calculs :

- Dans la plupart des cas, la modification de la vitesse de circulation sur une période donnée et dans le ou les sens concernés par la situation embouteillée est suffisante (possible directement depuis l'interface de l'étape 2) ;
- Les cas les plus complexes nécessitent la réalisation d'une étude spécifique approfondie qui ne peut pas se faire simplement par l'intermédiaire de l'interface étape 2 (le recours à un utilisateur expert est alors fortement recommandé), notamment pour modéliser les situations suivantes :
 - Scénario de désenfumage spécifique en cas de congestion,
 - Tunnel partiellement congestionné,
 - Tunnel congestionné avec bretelle d'accès.

La liste des situation spécifiques n'est pas exhaustive, les caractéristiques particulières du tunnel sujet à la congestion doivent être précisément étudiées avant de déterminer si la méthode basée uniquement sur la modification des vitesses est applicable sans risque de minoration ou de majoration excessive du risque.

A noter également que la réduction de la fréquence d'occurrence des scénarios du fait de la réduction de vitesse en bouchon (par rapport à une situation fluide) n'est pas significative dans le cadre de la méthodologie développée en Suisse (cf. hypothèses du screening routier OPAM), et qu'elle peut donc être négligée. Les résultats obtenus sont ainsi majorants.

VII Berücksichtigung neuer Verkehrsstatistiken zur Herleitung aktueller Standardwerte für die Unfallraten im QRA-CH

VII.1 Vorbemerkung

Mit dem Programm QRA-CH gibt es die Möglichkeit, die Personenrisiken durch Gefahrguttransporte in Tunneln des Schweizer Nationalstrassennetzes auf Basis der vorgegebenen Standardwerte für die Verkehrssituation auf einfache Weise zu berechnen.

Das Tool QRA-CH wurde 2011-2015 entwickelt und dabei auf die damalige Verkehrs- und Unfallsituation ausgerichtet. In der Dokumentation 84002 (siehe dort in Kap 9.3) ist beschrieben, wie die Ermittlung der Eintretenswahrscheinlichkeiten basierend auf den damals bekannten Verkehrsdaten von vor 2010 erfolgte.

VII.1.1 Verkehrsstatistiken und spezifische Unfallraten

Mit der Übernahme der NEB-Strecken wurden seit 2015 mehr als 50 Tunnel neu in das Nationalstrassennetz integriert. Seit Erstellung des zu benutzenden user-Interfaces mit implementierten Standard-Werten für die Unfallraten und die Gefahrguttransport-Anteile am Gesamtverkehr hat sich die Verkehrssituation zum Teil allerdings deutlich geändert. Einerseits hat der Verkehr insgesamt in den letzten 20 Jahren zugenommen, andererseits führen die zunehmend im Einsatz stehenden Assistenzsysteme auch zu einer generellen Verbesserung in der Unfallstatistik und damit sind die Unfallraten bezogen auf die Fahrzeug-km eher rückläufig. Unabhängig davon sind die Anteile des Schwer- und Gefahrgutverkehrs – und damit allenfalls auch Unfallwahrscheinlichkeiten dieser Fahrzeuge – mindestens örtlich variabel. Gegenstand dieses Anhangs ist ein Beispiel für die Ermittlung eines aktualisierbaren Wertes für die Unfallrate von Gefahrguttransporten. Dieser Wert kann entweder ein Standardwert sein oder ein Wert, den ein Benutzer / eine Benutzerin frei eingeben kann, um die Berechnungsgrundlage so weit wie möglich an die tatsächliche Unfallrate der im untersuchten Tunnel verkehrenden Gefahrguttransporte anzunähern.

VII.1.2 Ausgangslage

Um die Szenariorate (Häufigkeit des Eintretens eines Szenarios n (pro Jahr und 100m Tunnel) zu berechnen, führt das QRA-CH-Modell folgende Berechnung durch:

$$\text{Szenariorate} = P(\text{Szenario}) * U_R$$

Für die Eintretenswahrscheinlichkeit eines Gefahrgutereignisses im Tunnel lässt sich das wie folgt genauer spezifizieren:

$$\text{Szenariorate} = GGLKW * P(\text{Szenario } n) * U_R * 365 * 1/L_{\text{tunnel}} * 1/10$$

$GGLKW$ = Anzahl der Gefahrgut-LKW pro Jahr

U_R = Unfallrate

(falls verfügbar: Gefahrgut-LKW; ansonsten: LKW), pro Fahrzeug und gefahrenen Kilometern

$P(\text{Szenario } n)$ = Bedingte Wahrscheinlichkeiten der berücksichtigten Gefahrgutszenarien

L_{tunnel} = Tunnellänge (km)

Falls keine lokalen Statistiken vorliegen, wird die Anzahl der Gefahrgut-LKW wie folgt berechnet:

$$GG\text{-}LKW = DTV * \%LKW * \%GG\text{-}LKW$$

DTV = Durchschnittlicher Tagesverkehr

$\%LKW$ = Anteil der Lkw am Gesamtverkehr (Standardwert = 6%)

$\%GG\text{-}LKW$ = Anteil der Lkw, die gefährliche Güter transportieren, an allen Lkw (8%, nicht konfigurierbar).

Die folgende Abbildung II.1 zeigt die Parameter, die in den Userinterfaces des QRA-CH in Stufe 1 oder 2 einzugeben sind, um die Häufigkeit des Auftretens eines Gefahrgut-Szenarios zu berechnen:

	Gefahrgut-LKW	Unfallrate U_R	P (Scenario n)
Stufe 1	$DTV * \%LKW * \%GG^*)$	Standard-Unfallrate oder lokal ermittelte Unfallraten der Gefahrgut-LKW	Nicht konfigurierbar
Stufe 2	Angabe der Anzahl der Gefahrgut-LKW / Tag		Standardwerte oder benutzerdefinierte Werte je nach Verteilung der GG-Kategorie

Abb. VII.1 In den Userinterfaces der Stufe 1 und 2 einzugebende Parameter für die Berechnung der Eintretenswahrscheinlichkeiten von Gefahrgutszenarien

*) Grundlagen für die Dateneingabe:

DTV : lokale Daten $\%LKW$: lokale Daten oder Standardwerte $\%GG\text{-}LKW$: nicht konfigurierbar

VII.1.3 Hintergrund und Ziel

Wie in Kapitel 9.3.4 und II.7 angegeben, wird der vom QRA-CH-Modell verwendete Standardwert für die Unfallrate auf der Grundlage der in [32] definierten Unfallrate auf Nationalstrassen ermittelt. Der Wert U_R beträgt danach für den Gesamtverkehr auf dem Nationalstrassennetz:

$$U_R = 3,5 \times 10^{-7} [1/\text{Fahrzeug-km}]$$

Diese als Standardwert verwendete Unfallrate wurde auf der Grundlage von Daten aus den Jahren 1992 bis 1999 und eines Verkehrsscreenings ermittelt.

Um der im Vergleich zum Gesamtverkehr nicht zuletzt aufgrund von Leerfahrten geringeren Eintretensrate von Gefahrgut-LKW-Unfällen Rechnung zu tragen, wurde diesem Wert in [19] seinerzeit ein abmildernder Faktor 0,5 zugewiesen, was schliesslich einen Standardwert für die Unfallrate im Schwerverkehr (einschliesslich Gefahrguttransporten) von $1,75 \times 10^{-7}$ pro Fahrzeug-km ergab. Diese Annahme entspricht auch der Unfallrate, die heute noch im Screening-Modell für Fernverkehrsstrassen [32] für die Berechnung von Szenarien mit Gefahrgütern im Freien auf Autobahnen verwendet wird.

Um die Unterschiede der Unfallraten in Tunneln mit Richtungsverkehr und solchen mit Gegenverkehr zu berücksichtigen, werden im QRA-CH ausserdem folgende Korrekturfaktoren angewendet:

$2/3$ für Richtungsverkehrstunnel,

$4/3$ für Gegenverkehrstunnel.

Dies führt zur Verwendung der folgenden Standardwerte der Unfallraten für die Berechnung der Häufigkeit des Auftretens von Gefahrgut-LKW-Szenarien:

$$\text{Richtungsverkehrstunnel: } 3,5 \times 10^{-7} * \frac{1}{2} * \frac{2}{3} = 1,17 \times 10^{-7} [1/\text{Fahrzeug-km}].$$

$$\text{Gegenverkehrstunnel: } 3,5 \times 10^{-7} * \frac{1}{2} * \frac{4}{3} = 2,33 \times 10^{-7} [1/\text{Fahrzeug-km}].$$

Die damaligen Standardwerte und in Stufe 1 des QRA-CH hinterlegten könnten heute aus verschiedenen Gründen hinterfragt werden:

- Die statistischen Daten, die als Grundlage für die Ermittlung dieser Quoten dienten, sind alt (Jahre 1992 bis 1999) und berücksichtigen daher mögliche allgemeine Verbesserungen der Verkehrssicherheit in den letzten Jahrzehnten noch nicht.
- Es kann hinterfragt werden, ob der Korrekturfaktor 0.5 betreffend Unfallrate aller Fahrzeuge und der spezifischen Unfallrate von Schwerverkehrs- und Gefahrgutfahrzeugen weiterhin aktuell ist.
- Ebenso ist zu überprüfen, ob ein Korrekturfaktor fehlt, mit dem die unterschiedliche Unfallrate zwischen schweren Nutzfahrzeugen und schweren Nutzfahrzeugen, die gefährliche Güter befördern, berücksichtigt werden sollte.

Im folgenden Abschnitt dieses Anhangs soll die Gültigkeit der als Standards für die Unfallraten verwendeten Werte überprüft werden. Es soll ein Weg aufgezeigt werden, wie alternativ aktuellere Werte ermittelt werden können, die auf neuesten Informationen zum Verkehr auf den Nationalstraßen basieren und speziell auf Gefahrgut-LKW zugeschnitten sind.

VII.2 Analyse aktueller und/oder spezifischer Unfallraten

VII.2.1 Straßenverkehrssicherheit in den letzten Jahrzehnten

Mit der Statistik Verkehrsentwicklung und Verkehrsfluss 2024 vom Juni 2025 [34] sowie der Unfallstatistik des ASTRA [35] stehen neuere Verkehrs- und Unfallstatistiken für die letzten 5 Jahre 2020 – 2024 zur Verfügung.

Diesen neueren Grundlagen sind die folgenden aktuellen Verkehrs- und Unfalldaten zu entnehmen:

Tab. VII.1 Verkehrsdatenstatistik der Jahre 2021-2024 auf dem Nationalstrassennetz

	2021	2022	2023	2024	2021–2024 *) (Gesamt)
Unfälle Gesamtverkehr	7 403	7 931	7.528	7 295	30 157
Fahrzeugkilometer	2,74E+10	2,92E+10	2,96E+10	2,98E+10	1,16E+11

*) Werte von 2020 wurden nicht einbezogen, da der Verkehr auf dem gesamten Nationalstrassennetz in diesem Zeitraum aufgrund von COVID ungewöhnlich gering war

Ermittelt man auf der Grundlage dieser Daten die Unfallrate für den gesamten Verkehr auf dem Schweizer Nationalstrassennetz für den Zeitraum 2021–2024, ergibt sich eine Unfallrate von $2,60 \times 10^{-7}$ Unfällen pro Fahrzeugkilometer. Dieser Wert ist analog dem Basiswert (nämlich $3,5 \times 10^{-7}$ Unfälle pro Fahrzeugkilometer für den Gesamtverkehr) zu verstehen, wie er in der Dokumentation 84002 für die Berechnung der Unfallrate verwendet wird.

Die folgende Tabelle stellt die beiden Werte für Unfallraten des Gesamtverkehrs auf den Nationalstrassen im Zeitraum 1991–1999 und 2021–2024 einander zum Vergleich gegenüber:

Tab. VII.2 Unfallraten des Gesamtverkehrs (Unfälle *1/Fahrzeug-km) auf dem Nationalstrassennetz

	1991–1999	2021–2024	Differenz
Unfallrate CH für den gesamten Verkehr auf dem Nationalstrassennetz	$3,50 \cdot 10^{-7}$	$2,60 \cdot 10^{-7}$	-25 %

Es zeigt sich, dass die Unfallrate für den gesamten Verkehr zwischen den Zeiträumen 1991–1999 und 2021–2024 um ca. 25 % zurückgegangen ist – ein Befund, der im Einklang mit der Annahme einer allgemeinen Verbesserung der Verkehrssicherheit steht.

Es fragt sich somit, inwieweit auch die von der Software QRA-CH verwendeten Standardwerte für die Unfallraten des Schwerverkehrs heute möglicherweise auch generell tiefer

angesetzt werden könnten, indem man die verwendeten grundlegenden Unfalldaten - mit- hin den allgemeinen Rückgang der Unfallraten in den letzten zwei Jahrzehnten neu berücksichtigt.

Wendet man dieselben Reduktionsfaktoren an, um von der Gesamtunfallrate zu einer Unfallrate für LKW (einschließlich Gefahrguttransporten) in Tunneln zu gelangen, erhält man die folgenden Unfallraten für den Schwerverkehr (Lkw, die gefährliche Güter trans- portieren, werden hier nicht separat betrachtet, sondern später im QRA-CH Stufe 1 mit einem Anteil von 8% des Schwerverkehrs in der Berechnung im Programm berücksichtigt):

Richtungsverkehrs-Tunnel: $2,6 \times 10^{-7} \cdot \frac{1}{2} \cdot \frac{2}{3} = 8,67 \cdot 10^{-8} \text{ [1/Fahrzeug-km]}$.

Gegenverkehrs-Tunnel: $2,6 \times 10^{-7} \cdot \frac{1}{2} \cdot \frac{4}{3} = 1,73 \cdot 10^{-7} \text{ [1/Fahrzeug-km]}$.

Mit Verwendung aktueller Werte würde es also theoretisch möglich, den zwischen 1991- 1999 und 2021-2024 insgesamt beobachteten Rückgang der Unfallzahlen im Straßenver- kehr zu berücksichtigen.

Es soll daher in diesem Zusammenhang auch geprüft werden, ob die weiteren Faktoren noch entsprechend gelten - mithin

- ob der Faktor 0.5 zwischen der Unfallrate aller Fahrzeuge und der von Schwerverkehrs- fahrzeugen (respektive den analog referenzierten Gefahrguttransporten) weiterhin repräsentativ ist und
- ob die Anwendung einer neuen Unfallrate für Schwerverkehrsfahrzeuge weiterhin - auch ohne spezifische Annahmen für den Anteil der betroffenen Gefahrguttransporte - relevant ist.

VII.2.2 Verhältnis zwischen Unfallraten des Gesamtverkehrs und den Unfall- raten des Schwerverkehrs im Allgemeinen sowie des Gefahrgut- verkehrs im Besonderen

Die Verkehrs- und Unfallstatistiken des ASTRA weisen für den Schwerverkehr der letzten Jahre die folgenden Zahlen aus:

Tab. VII.3 Unfallraten des Schwerverkehrs (Unfälle *1/Fahrzeug-km) auf dem Nationalstrassennetz					
	2021	2022	2023	2024	2021–2024 (Gesamt)
Anzahl der Unfälle mit LKW auf Nationalstrassen	1083	1085	971	1009	4148
Anzahl der Schwerverkehrs-km auf Nationalstraßen	1,61E+09	1,63E+09	1,59E+09	1,60E+09	6,43E+09

Im Vergleich zum Gesamtverkehr ergibt sich aus diesen Zahlen eine deutlich höhere Unfallrate für den Schwerverkehr als für den Gesamtverkehr. Die folgende Tabelle zeigt dies im Vergleich zwischen der Unfallrate des gesamten Verkehrs und derjenigen des Schwerverkehrs im Zeitraum 2021-2024:

Tab. VII.4 Unfallraten des Gefahrgutverkehrs auf dem Nationalstrassennetz (Unfälle *1/Fahrzeug-km)			
	Gesamtverkehr	LKW	Verhältnis Schwerverkehr- / Gesamtverkehr
Anzahl der Unfälle auf Nationalstrassen (2021–2024)	30'157	4'148	0,14
Fahrzeugkilometer auf Nationalstrassen (2021–2024)	116*10 ⁹	6,43*10 ⁹	0,055
Unfallraten für den Schwerverkehr (2021–2024)	2,60*10 ⁻⁷	6,45*10 ⁻⁷	2,48

VII.2.3 Verhältnis der Unfallrate LKW_(allgemein) zur Unfallrate Gefahrgut-LKW

Zur genaueren Einordnung ist aber auch zu berücksichtigen, dass es in der Statistik einen signifikanten Unterschied zwischen der Unfallrate von Schwerverkehrsfahrzeugen allgemein und dem Anteil der Gefahrgut-LKW gibt:

Die Unfalldaten zu Gefahrguttransporten zeigen einen signifikanten Unterschied zwischen der Häufigkeit von Unfällen mit Schwerverkehrsfahrzeugen allgemein und der Häufigkeit von Unfällen mit Gefahrguttransporten. Die folgende Übersicht über LKW- und Unfälle mit Gefahrguttransporten- im Zeitraum 2021-2024 zeigt:

Tab. VII.5 Unfallzahlen des allgemeinen Schwerverkehrs und des Gefahrgutverkehrs auf dem Schweizer Nationalstrassennetz

	2021	2022	2023	2024	2021–2024
Anzahl Unfälle mit LKW auf den Nationalstrassen	1083	1085	971	1009	4148
Anzahl Unfälle mit Gefahrgut-LKW auf den Nationalstrassen	7	10	9	8	34

Um den Gefahrguttransport beim Vergleich der Unfallraten zu berücksichtigen, muss das jährliche Verkehrsaufkommen von Gefahrguttransporten auf Nationalstraßen bekannt sein. Da diese Daten nicht vorliegen, wird der Einfluss dieses Parameters im Folgenden mit einer Sensibilisierungsstudie betrachtet, die auf den möglichen Extremwerten der Gefahrguttransportquote unter den LKW basiert:

Es wird davon ausgegangen, dass der Anteil der Gefahrguttransporte zwischen 5 % und 12 % der LKW liegen kann, um die minimal und maximal mögliche Unfallraten der Gefahrgut-Lkw zu berechnen. Der höhere Wert kann dann zur Charakterisierung des Verhältnisses zwischen der Unfallrate von LKW und Gefahrgut-LKW herangezogen.

Tab. VII.6 Hypothese A: 5 % Gefahrgut-LKW unter den Lkw:

	2021	2022	2023	2024	2021-2024
Anzahl Unfälle mit Gefahrgut-LKW auf Nationalstrassen	7	10	9	8	34
Anzahl der Gefahrgut-LKW-km auf den Nationalstrassen	8,04E+07	8,17E+07	7,95E+07	7,99E+07	3,19E+08
Unfallrate für Gefahrgut-LKW	8,71E-08	1,22E-07	1,13E-07	1,00E-07	1,06E-07

Tab. VII.7 Hypothese B: 12 % Gefahrgut-LKW unter den Lkw:

	2021	2022	2023	2024	2021-2024
Anzahl Unfälle mit Gefahrgut-LKW auf Nationalstrassen	7	10	9	8	34
Anzahl der Gefahrgut-LKW-km auf den Nationalstrassen	1,93E+08	1,99E+08	1,91E+08	1,92E+08	7,72E+08
Unfallrate für Gefahrgut-LKW	3,63E-08	5,10E-08	4,72E-08	4,17E-08	4,41E-08

Im Fall der Hypothese A resultiert als Unfallrate des Schwerverkehrs mit Gefahrgütern bereits ein deutlich niedrigerer Wert als die Unfallrate der normalen Schwerverkehrsfahrzeuge – sie liegt mit $U_R = 1.06 \cdot 10^{-7}$ bei nur 16% aller Unfälle mit Schwerverkehrsfahrzeugen.

Im Fall der Hypothese B resultiert die Unfallrate des Schwerverkehrs mit Gefahrgütern nochmals deutlich niedriger als die Unfallrate der normalen Schwerverkehrsfahrzeuge – sie liegt mit $U_R = 4.41 \cdot 10^{-8}$ bei nur noch 7% aller Schwerverkehrsunfälle.

Als Obergrenze eines Standardwerts für die Unfallrate U_R könnte als Anteil der Gefahrguttransport-Unfälle an der Unfallrate aller LKW mit maximal 16% als immer noch konservativ angenommen werden.

Um die Unfallrate von Gefahrguttransporten aus der Unfallrate des gesamten Verkehrs zu ermitteln, kann die auf der Grundlage der Daten von 2021-2024 berechnete Unfallrate des Gesamtverkehrs für das Schweizer Nationalstrassennetz aktuell daher mit einem neueren Faktor multipliziert werden, der sich aus der folgenden Berechnung ergibt

$$2,48 * 0,16 = 0,41$$

(d.h.: Faktor 0.41 statt des Faktors 0.5 bisher).

VII.3 Fazit

Bezogen auf die unterschiedliche Verkehrsführung im Richtungs- und Gegenverkehrstunnel ergeben sich demnach für einen Gefahrgutanteil am Gesamtverkehr von mindestens 5% die alternativ zu den Standardwerten anzuwendenden Unfallraten neu zu:

Richtungsverkehrs-Tunnel: $2,6 \times 10^{-7} * 0.41 * 2/3 = 7.11 * 10^{-8}$ [1/Fahrzeug-km].

Gegenverkehrs-Tunnel: $2,6 \times 10^{-7} * 0.41 * 4/3 = 1.42 * 10^{-7}$ [1/Fahrzeug-km].

Sofern keine relevanteren lokalen Daten verfügbar sind, können diese auf Grundlage der Daten aus dem Zeitraum 2021-2024 ermittelten Standardunfallraten somit in Berechnungen der Stufe 1 wie auch der Stufe 2 des QRA-CH herangezogen werden.

Aus diesen Überlegungen ergeben sich aktuell niedrigere Unfallraten und damit auch geringere Personenrisiken als in den für den Zustand 2015 erstellten Berechnungen für die damaligen Bestandstunnel. Da zudem auch so gut wie alle Tunnel, welche bereits 2015 bezüglich Gefahrgutrisiken analysiert wurden, zwischenzeitlich im Rahmen des Tunnelsicherheitsprogramms (TUSI) sicherheitstechnisch nachgerüstet wurden, kann auf eine Neuberechnung bei diesen Tunneln verzichtet werden.

Bibliographie

Lois et ordonnances

- | | |
|-----|--|
| [1] | "Verordnung vom 27. Februar 1991 über den Schutz vor Störfällen" (Störfallverordnung, StFV), SR 814.012, www.admin.ch |
| [2] | "Europäisches Übereinkommen vom 30. September 1957 über die internationale Beförderung gefährlicher Güter auf der Strasse" (ADR), www.admin.ch |
| [3] | "Durchgangsstrassenverordnung vom 18. Dezember 1991", SR 741.272, www.admin.ch |
| [4] | "Bundesgesetz vom 8. März 1960 über die Nationalstrassen" (Nationalstrassengesetz, NSG), SR 725.11, www.admin.ch |
| [5] | "Verordnung vom 29. November 2002 über die Beförderung gefährlicher Güter auf der Strasse" (SDR), SR 741.621, www.admin.ch |
| [6] | "Nationalstrassenverordnung vom 7. November 2007" (NSV), SR 725.111, www.admin.ch |
| [7] | "Signalisationsverordnung vom 5. September 1979 (Stand am 1. Januar 2008)" (SSV), SR 741.21, www.admin.ch |

Directives et normes

- | | |
|------|--|
| [8] | Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein (SIA), "Norm SIA 197/2 Projektierung Tunnel – Strassentunnel (2004) " |
| [9] | Bundesamt für Strassen ASTRA (2008) "Sicherheitsmassnahmen gemäss Störfallverordnung bei Nationalstrassen", Richtlinie ASTRA 19001, www.astra.admin.ch |
| [10] | Bundesamt für Strassen ASTRA (2021), "Lüftung der Strassentunnel", Richtlinie ASTRA 13001, www.astra.admin.ch |
| [11] | Bundesamt für Strassen ASTRA (2008), "Lüftung der Sicherheitsstollen von Strassentunneln", Richtlinie ASTRA 13002, www.astra.admin.ch |
| [12] | Bundesamt für Strassen ASTRA (2009), Türen und Tore in Strassentunneln, Richtlinie ASTRA 13011, www.astra.admin.ch |
| [13] | Bundesamt für Strassen ASTRA (2011), "Signalisation der Sicherheitseinrichtungen in Strassentunneln", Richtlinie ASTRA 13010, www.astra.admin.ch |
| [14] | Europäische Union (EU), "Richtlinie 2004/54/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 29. April 2004 über Mindestanforderungen an die Sicherheit von Tunneln im transeuropäischen Strassennetz" |
| [15] | Bundesamt für Strassen ASTRA; "Globales Erhaltungskonzept, Situationsanalyse, Teilprojekt Gotthard-Strassentunnel, Dokumentation Situationsanalyse GST BSA", INGE G25; 20.11.2009. |

Autres bases

- | | |
|------|--|
| [16] | Bundesamt für Umwelt BAFU (2018), "Handbuch zur Störfallverordnung (StFV)", Allgemeiner Teil |
| [17] | Bundesamt für Umwelt BAFU (2018), "Beurteilungskriterien zur Störfallverordnung (StFV), Ein Modul des Handbuchs zur Störfallverordnung (StFV)" |
| [18] | Bundesamt für Umwelt BAFU (2018), "Durchgangsstrassen, Ein Modul des Handbuchs zur Störfallverordnung (StFV)" |
| [19] | Bundesamt für Umwelt BAFU (1992), Handbuch III zur Störfallverordnung StFV, Richtlinien für Verkehrswege |
| [20] | Eidgenössisches Departement für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK, "Weisungen betreffend Sicherheitsanforderungen an Tunnel im Nationalstrassennetz" (2010) |
| [21] | INERIS (2005), Research Report No 20504, "Transport of Dangerous goods through road tunnels Quantitative Risk Assessment Model" (v. 3.60 and v. 3.61); User's Guide, Reference Manual avec update v.4.04 (2019) |
| [22] | Arbeitsgruppe Transport gefährlicher Güter Schweiz (Agr TgG-CH), Untergruppe "Einsatzplanung", "Einsatzplanung auf Nationalstrassen, Hilfsmittel zur Erstellung von Einsatzplänen und zur Durchführung von Übungen", Version 2.0, 15. April 2000 |
| [23] | ARE/ BAFU / BAV/BFE / ASTRA (2013), "Koordination Raumplanung und Störfallvorsorge, Planungshilfe" |

-
- [24] Beratungsstelle für Unfallverhütung (bfu), Report 51, **"Verkehrssicherheit in Autobahn- und Autostrassentunneln des Nationalstrassennetzes"** (2004)
-
- [25] Unterarbeitsgruppe **"Beurteilungskriterien Verkehrswege"** (1999), **"Pilotrisikoanalyse für den Transport gefährlicher Güter, Fallbeispiel Autobahn"**
-
- [26] Tiefbauamt Kanton Basel-Landschaft, **"Erhöhung der Tunnelsicherheit – Gesamtbeurteilung Tunnel Kanton Basel-Landschaft, Gruner AG"** (2003)
-
- [27] Bundesamt für Strassen ASTRA, **"Risikoermittlung für den Erhaltungsabschnitt der A2 zwischen Basel – Augst (RE EABA) "**, Ernst Basler + Partner (2010)
-

Documents spécifiques

-
- [28] Ernst Basler + Partner AG, BG Bonnard et Gardel SA; **"ADR 2007 – Tunnel, Anforderungen an die Methodik"**, 21.07.2008
-
- [29] Ernst Basler + Partner AG, BG Bonnard et Gardel SA; **"ADR 2007 – Tunnel, Übergangsregelung SDR-Tunnel: Empfehlungen für die Kategorisierung gemäss ADR 2007 / ADR 2009"**, 20.11.2008
-
- [30] Ernst Basler + Partner AG, BG Bonnard et Gardel SA; **"ADR 2007 – Tunnel, Übergangsregelung SDR-Tunnel: Grundlagen zur Kategorisierung ab 1. Januar 2010"**, 20.11.2008
-
- [31] Ernst Basler + Partner AG, BG Bonnard et Gardel SA; **"ADR 2007 – Tunnel, Methodisches Vorgehen zur Unterscheidung der Tunnelkategorien D und E"**, 08.09.2009
-
- [32] Bundesamt für Strassen, Bundesamt für Umwelt, Kantonale Konsumentenschutzbehörde, Aargau Ernst Basler + Partner AG - Risiken schwerer Unfälle auf Transitstrassen, Bericht zur Screening-Methode, 01.04.2010
-
- [33] Bundesamt für Strassen ASTRA, 84003 " Analyse der Gefahrgutrisiken Standbericht 2025"
-
- [34] Statistik Verkehrsentwicklung und Verkehrsfluss 2024 vom Juni 2025
-
- [35] Unfallstatistik des ASTRA - Fachapplikation VU (2025)
-

Liste des modifications

Edition	Version	Date	Modification
2026	2.02	25.02.2026	Correction du texte du chapitre 9.3.4 nouvelle annexe VII relative au calcul du taux d'accidents et petites corrections rédactionnelles.
2023	2.01	25.04.2023	Ajout annexe VI (méthodologie congestion).
2022	2.00	18.08.2022	Mise à jour suite à la version du logiciel QRA CH 404 et à ses évolutions.
2011	1.02	10.06.2021	Petites corrections et modifications du formatage (volets A/B et annexe). Traduction en français (volet A).
2011	1.01	25.08.2011	Adaptation de la documentation découlant de l'amélioration de la présentation des résultats.
2011	1.00	29.07.2011	Entrée en vigueur de l'édition 2011. Élaboration de la documentation complète.
2011	0.2	04.05.2011	Remaniement de la première ébauche.
2011	0.1	29.04.2011	Première ébauche

