



Brandschutz im Tunnel: Schutzziele u. Brandbemessung Phase 1: Stand der Technik

**Fire protection in tunnels:
Protection goals and fire design
Phase 1: State of the art**

Amberg Engineering AG

Flavio Modetta

Stefanie Wörndle

Natascha Näher

Basler & Hofmann AG

Jürg Matter

Simon Janele

Armin Feurer

BG Ingénieurs Conseils

Guido Roelfstra

**Forschungsauftrag FGU 2008/003_OBF auf Antrag des Bundesamtes
für Strassen (ASTRA)**

Der Inhalt dieses Berichtes verpflichtet nur den (die) vom Bundesamt für Strassen beauftragten Autor(en). Dies gilt nicht für das Formular 3 "Projektabschluss", welches die Meinung der Begleitkommission darstellt und deshalb nur diese verpflichtet.

Bezug: Schweizerischer Verband der Strassen- und Verkehrsfachleute (VSS)

Le contenu de ce rapport n'engage que l' (les) auteur(s) mandaté(s) par l'Office fédéral des routes. Cela ne s'applique pas au formulaire 3 "Clôture du projet", qui représente l'avis de la commission de suivi et qui n'engage que cette dernière.

Diffusion : Association suisse des professionnels de la route et des transports (VSS)

Il contenuto di questo rapporto impegna solamente l' (gli) autore(i) designato(i) dall'Ufficio federale delle strade. Ciò non vale per il modulo 3 «conclusione del progetto» che esprime l'opinione della commissione d'accompagnamento e pertanto impegna soltanto questa.

Ordinazione: Associazione svizzera dei professionisti della strada e dei trasporti (VSS)

The content of this report engages only the author(s) commissioned by the Federal Roads Office. This does not apply to Form 3 'Project Conclusion' which presents the view of the monitoring committee.

Distribution: Swiss Association of Road and Transportation Experts (VSS)

Impressum

Forschungsstelle und Projektteam

Projektleitung

Flavio Modetta

Mitglieder

Jürg Matter

Simon Janele

Armin Feurer

Guido Roelfstra

Begleitkommission

Präsident

Prof. Dr. Georg Anagnostou

Mitglieder

Prof. Dr. Georg Anagnostou

Alain Jeanneret

Mario Fontana

Walter Steiner

Antragsteller

Amberg Engineering AG, Trockenloostrasse 21, 8105 Regensdorf-Watt

Bezugsquelle

Das Dokument kann kostenlos von <http://partnershop.vss.ch> heruntergeladen werden.

Inhaltsverzeichnis

	Impressum	3
	Zusammenfassung	11
	Résumé	12
	Summary	13
1	Einleitung	14
1.1	Ausgangslage.....	14
1.2	Ziel des Berichts.....	14
1.3	Abgrenzung	15
2	Grundlagen	17
3	Schweiz / Tunnelbau	20
3.1	Normen und Richtlinien	20
3.1.1	SIA Normen	20
3.1.2	Richtlinie BAFU zur Störfallvorsorge	20
3.1.3	Richtlinie ASTRA zum Gefahrguttransport.....	20
3.1.4	Richtlinie ASTRA zu Tunnelbauten	20
3.2	Brandschutzziele	21
3.2.1	Risikoanalyse / Sicherheitsplanung	21
3.2.2	Schutz des Lebens	23
3.2.3	Schutz des Bauwerks	23
3.2.4	Schutz Dritter.....	23
3.2.5	Andere Brandschutzziele	23
3.2.6	Akzeptierte Risiken.....	24
3.3	Brandschutzkonzept.....	24
3.3.1	Vorgaben zu baulichen Brandschutzmassnahmen.....	24
3.3.2	Vorgaben zu technischen Brandschutzmassnahmen	24
3.3.3	Vorgaben zu organisatorischen Brandschutzmassnahmen.....	24
3.4	Bemessungskonzept	25
3.4.1	Vorgaben zur Brandschutzbemessung	25
3.4.2	Berechnungsmodell.....	27
3.4.3	Einwirkungsfaktoren	28
3.4.4	Bettung/Gebirgsumgebung	28
3.4.5	Einfluss des Brandes auf Materialien	28
3.5	Konstruktive Durchbildung	28
3.5.1	Vorgaben zu konstruktiven Durchbildungen	28
3.5.2	Materialanforderungen	28
3.5.3	Konstruktive Massnahmen	28
3.5.4	Nutzungsanforderung.....	28
4	Schweiz / Hochbau	29
4.1	Normen und Richtlinien	29
4.1.1	SIA Normen	29
4.1.2	Vorschriften der VKF	29
4.2	Brandschutzziele	30
4.2.1	Risikoanalyse / Sicherheitsplanung	30
4.2.2	Schutz des Lebens	32
4.2.3	Schutz des Bauwerks.....	32
4.2.4	Schutz Dritter.....	32
4.2.5	Andere Brandschutzziele	32
4.2.6	Akzeptierte Risiken.....	32
4.3	Brandschutzkonzept.....	32
4.3.1	Vorgaben zu baulichen Brandschutzmassnahmen.....	32
4.3.2	Vorgaben zu technischen Brandschutzmassnahmen	33
4.3.3	Vorgaben zu organisatorischen Brandschutzmassnahmen.....	33
4.4	Bemessungskonzept	33
4.4.1	Vorgaben zur Brandschutzbemessung	33
4.4.2	Berechnungsmodell.....	35
4.4.3	Einwirkungsfaktoren	36
4.4.4	Bettung/Gebirgsumgebung	36

4.4.5	Einfluss des Brandes auf Materialien.....	36
4.5	Konstruktive Durchbildung.....	36
4.5.1	Vorgaben zu konstruktiven Durchbildungen.....	36
4.5.2	Materialanforderungen.....	36
4.5.3	Konstruktive Massnahmen.....	36
4.5.4	Nutzungsanforderungen.....	36
5	Europäische Normung	37
5.1	Normen und Richtlinien.....	37
5.1.1	EN 1991-1-2.....	37
5.1.2	EN 1992-1-2.....	37
5.1.3	Richtlinie 2004/54/EG zur Sicherheit von Strassentunneln.....	37
5.2	Brandschutzziele.....	38
5.2.1	Risikoanalyse / Sicherheitsplanung.....	38
5.2.2	Schutz des Lebens.....	38
5.2.3	Schutz des Bauwerks.....	38
5.2.4	Schutz Dritter.....	38
5.2.5	Andere Brandschutzziele.....	38
5.2.6	Akzeptierte Risiken.....	38
5.3	Brandschutzkonzept.....	38
5.3.1	Vorgaben zu baulichen Brandschutzmassnahmen.....	38
5.3.2	Vorgaben zu technischen Brandschutzmassnahmen.....	39
5.3.3	Vorgaben zu organisatorischen Brandschutzmassnahmen.....	39
5.4	Bemessungskonzept.....	39
5.4.1	Vorgaben zur Brandschutzbemessung.....	39
5.4.2	Berechnungsmodell.....	41
5.4.3	Einwirkungsfaktoren.....	42
5.4.4	Bettung/Gebirgs Umgebung.....	42
5.4.5	Einfluss des Brandes auf Materialien.....	42
5.5	Konstruktive Durchbildung.....	42
6	Deutschland	45
6.1	Normen und Richtlinien.....	45
6.1.1	Musterbauordnung / Landesbauordnung.....	45
6.1.2	Richtlinie für Ausstattung und den Betrieb von Strassentunneln (RABT).....	45
6.1.3	Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen für Ingenieurbauwerke (ZTV-Ing, Teil 5)	45
6.1.4	Europäische Normung.....	45
6.1.5	DIN 4102.....	45
6.1.6	Leitfaden: Ingenieurmethoden des Brandschutzes.....	45
6.2	Brandschutzziele.....	45
6.2.1	Risikoanalyse / Sicherheitsplanung.....	45
6.2.2	Schutz des Lebens.....	46
6.2.3	Schutz des Bauwerks.....	46
6.2.4	Schutz Dritter.....	46
6.2.5	Andere Brandschutzziele.....	46
6.2.6	Akzeptierte Risiken.....	47
6.3	Brandschutzkonzept.....	47
6.3.1	Vorgaben zu baulichen Brandschutzmassnahmen.....	47
6.3.2	Vorgaben zu technischen Brandschutzmassnahmen.....	47
6.3.3	Vorgaben zu organisatorischen Brandschutzmassnahmen.....	47
6.4	Bemessungskonzept.....	47
6.4.1	Vorgaben zur Brandschutzbemessung.....	47
6.4.2	Berechnungsmodell.....	49
6.4.3	Einwirkungsfaktoren.....	49
6.4.4	Bettung/Gebirgs Umgebung.....	49
6.4.5	Einfluss des Brandes auf Materialien.....	50
6.5	Konstruktive Durchbildung.....	50
6.5.1	Vorgaben zu konstruktiven Durchbildungen.....	50
6.5.2	Materialanforderungen.....	50
6.5.3	Konstruktive Massnahmen.....	50
6.5.4	Nutzungsanforderungen.....	50
7	Österreich	51

7.1	Normen und Richtlinien	51
7.1.1	Strassentunnelsicherheitsgesetz	51
7.1.2	Richtlinien und Vorschriften für den Strassenbau RVS	51
7.1.3	Dokumente ASFINAG	51
7.2	Brandschutzziele	52
7.2.1	Risikoanalyse/Sicherheitsplanung	52
7.2.2	Schutz des Lebens	52
7.2.3	Schutz des Bauwerks	52
7.2.4	Schutz Dritter	53
7.2.5	Andere Brandschutzziele	53
7.2.6	Akzeptierte Risiken	53
7.3	Brandschutzkonzept	53
7.3.1	Vorgaben zu baulichen Brandschutzmassnahmen	53
7.3.2	Vorgaben zu technischen Brandschutzmassnahmen	55
7.3.3	Vorgaben zu organisatorischen Brandschutzmassnahmen	55
7.4	Bemessungskonzept	55
7.4.1	Vorgaben zur Brandschutzbemessung	55
7.4.2	Berechnungsmodell	55
7.4.3	Einwirkungsfaktoren	56
7.4.4	Bettung/Gebirgsumgebung	56
7.4.5	Einfluss des Brandes auf Materialien	56
7.5	Konstruktive Durchbildung	57
7.5.1	Vorgaben zu konstruktiven Durchbildungen	57
7.5.2	Materialanforderungen	57
7.5.3	Konstruktive Massnahmen	57
7.5.4	Nutzungsanforderungen	57
8	Frankreich	59
8.1	Normen und Richtlinien	59
8.1.1	Gesetzes- und Verordnungstexte	59
8.1.2	Methodologischer Führer des CETU	59
8.1.3	Dimensionierungsnormen	60
8.2	Brandschutzziele	60
8.2.1	Risikoanalyse / Sicherheitsplanung	60
8.2.2	Schutz des Lebens	61
8.2.3	Schutz des Bauwerks	61
8.2.4	Schutz Dritter	61
8.2.5	Andere Brandschutzziele	62
8.2.6	Akzeptierte Risiken	62
8.3	Brandschutzkonzept	62
8.3.1	Vorgaben zu baulichen Brandschutzmassnahmen	62
8.3.2	Vorgaben zu technischen Brandschutzmassnahmen	63
8.3.3	Vorgaben zu organisatorischen Brandschutzmassnahmen	63
8.4	Bemessungskonzept	64
8.4.1	Vorgaben zur Brandschutzbemessung	64
8.4.2	Berechnungsmodell	65
8.4.3	Einwirkungsfaktoren	66
8.4.4	Bettung/Gebirgsumgebung	66
8.4.5	Einfluss des Brands auf die Materialien	66
8.5	Konstruktive Durchbildung	66
8.5.1	Vorgaben zu konstruktiven Durchbildungen	66
8.5.2	Materialanforderungen	66
8.5.3	Konstruktive Massnahmen	67
8.5.4	Nutzungsanforderungen	67
9	Niederlande	69
9.1	Normen und Richtlinien	69
9.1.1	Störfallvorsorge in den Niederlanden	69
9.1.2	Bemessung und Nachweisverfahren	69
10	Italien	71
10.1	Normen und Richtlinien	71
10.1.1	"Decreto Legislativo 5 Ottobre 2006" zu Strassentunneln	71
10.1.2	Richtlinie der ANAS zu Strassentunneln	71

10.2	Brandschutzziele.....	71
10.2.1	Risikoanalyse/Sicherheitsplanung	71
10.2.2	Schutz des Lebens.....	72
10.2.3	Schutz des Bauwerks.....	72
10.2.4	Schutz Dritter	72
10.2.5	Andere Brandschutzziele	72
10.2.6	Akzeptierte Risiken	72
10.3	Brandschutzkonzept	73
10.3.1	Vorgaben zu baulichen Brandschutzmassnahmen	73
10.3.2	Vorgaben zu technischen Brandschutzmassnahmen.....	74
10.3.3	Vorgaben zu organisatorischen Brandschutzmassnahmen	74
10.4	Bemessungskonzept.....	74
10.4.1	Vorgaben zur Brandschutzbemessung.....	74
10.4.2	Berechnungsmodell	74
10.4.3	Einwirkungsfaktoren.....	74
10.4.4	Bettung/Gebirgs Umgebung	75
10.4.5	Einfluss des Brandes auf Materialien.....	75
10.5	Konstruktive Durchbildung	75
10.5.1	Vorgaben zu konstruktiven Durchbildungen	75
10.5.2	Materialanforderungen	75
10.5.3	Konstruktive Massnahmen.....	75
10.5.4	Nutzungsanforderungen.....	76
11	Grossbritannien	77
11.1	Normen und Richtlinien.....	77
11.1.1	Störfallvorsorge in Grossbritannien.....	77
11.1.2	Konstruktive Durchbildung	78
12	Slowakei.....	79
12.1	Normen und Richtlinien.....	79
12.1.1	Eurocode	79
12.1.2	Technische Bedingungen: Brandsicherheit der Strassentunnel.....	79
12.2	Brandschutzziele.....	79
12.2.1	Risikoanalyse	79
12.2.2	Schutz des Lebens.....	79
12.2.3	Schutz des Bauwerks.....	79
12.2.4	Schutz Dritter	79
12.2.5	Andere Brandschutzziele	79
12.2.6	Akzeptierte Risiken	79
12.3	Brandschutzkonzept	80
12.3.1	Vorgaben zu baulichen Brandschutzmassnahmen	80
12.3.2	Vorgaben zu technischen Brandschutzmassnahmen.....	80
12.3.3	Vorgaben zu organisatorischen Brandschutzmassnahmen	80
12.4	Bemessungskonzept.....	80
12.4.1	Vorgaben zur Brandschutzbemessung.....	80
12.4.2	Berechnungsmodell	81
12.4.3	Einwirkungsfaktoren.....	81
12.4.4	Bettung/Gebirgs Umgebung	81
12.4.5	Einfluss des Brandes auf Materialien.....	81
12.5	Konstruktive Durchbildung	81
12.5.1	Vorgaben zu konstruktiven Durchbildungen	81
12.5.2	Materialanforderungen	81
12.5.3	Konstruktive Massnahmen:.....	82
12.5.4	Nutzungsanforderungen.....	82
13	Singapur.....	83
13.1.1	Bemessung und Nachweisverfahren	83
13.1.2	Konstruktive Durchbildung	83
14	Australien	85
14.1	Normen und Richtlinien.....	85
14.2	Brandschutzziele.....	85
14.2.1	Risikoanalyse/Sicherheitsplanung	85
14.2.2	Schutz des Lebens.....	86
14.2.3	Schutz des Bauwerks.....	86

14.2.4	Schutz Dritter.....	86
14.2.5	Andere Brandschutzziele	86
14.2.6	Akzeptierte Risiken.....	86
14.3	Brandschutzkonzept.....	86
14.3.1	Vorgaben zu baulichen Brandschutzmassnahmen.....	86
14.3.2	Vorgaben zu technischen Brandschutzmassnahmen	87
14.3.3	Vorgaben zu organisatorischen Brandschutzmassnahmen.....	87
14.4	Bemessungskonzept.....	88
14.4.1	Vorgaben zur Brandschutzbemessung	88
14.4.2	Berechnungsmodell.....	88
14.4.3	Einwirkungsfaktoren	88
14.4.4	Bettung/Gebirgsumgebung	88
14.4.5	Einfluss des Brandes auf Materialien	88
14.5	Konstruktive Durchbildung	88
14.5.1	Vorgaben zu konstruktiven Durchbildungen	88
14.5.2	Materialanforderungen	88
14.5.3	Konstruktive Massnahmen	88
14.5.4	Nutzungsanforderungen.....	88
15	Forschungsprojekte zur Brandbemessung.....	89
15.1	ITA: Guidelines for Structural Fire Resistance for Road Tunnels	89
15.1.1	Brandschutzziele und -konzepte	89
15.1.2	Bemessung und Nachweisverfahren	89
15.1.3	Konstruktive Durchbildung	90
15.2	FIT – Fire In Tunnels.....	91
15.2.1	Brandschutzziele und -konzepte	91
15.2.2	Bemessung und Nachweisverfahren	91
15.2.3	Konstruktive Durchbildung	92
15.3	ASTRA: Empfehlung zum Vorgehen für die Bemessung von Autobahnüberdeckungen und Autobahntunnel gegen Brandeinwirkung	92
15.3.1	Brandschutzziele und -konzepte	92
15.3.2	Bemessung und Nachweisverfahren	92
15.3.3	Konstruktive Durchbildung	93
15.4	Eureka-Versuche	93
15.5	Large Scale Fire Tests in the Runehamar Tunnel, Norway (Teil von UPTUN)	93
15.5.1	Bemessung und Nachweisverfahren	93
15.6	Uptun (Cost-effective, sustainable and innovative Upgrading Methods for Fire Safety in existing Tunnels)	94
15.7	PIARC: An Assessment of Fixed Fire Fighting Systems	94
15.7.1	Löschsysteme	95
15.7.2	Erfahrungen aus anderen Ländern	95
16	Beispiele aus der Praxis.....	97
16.1	Nachweis der Tagbaustrecke Bodio, Gotthard-Basistunnel, 15.07.2002	97
16.1.1	Versuche Versuchsstollen Hagerbach und Ergebnisse	97
16.2	Nachweis des Tunnel Engstlige, Anschluss Frutigen, Lötschberg-Basistunnel	98
16.3	Nachweis der Einspurtunnel, Gotthard-Basistunnel	98
16.4	Beispiel Adlertunnel	99
16.5	BEISPIEL ZÜRCHER OBERLANDAUTOBAHN.....	99
16.6	BEISPIEL Durchmesserlinie Zürich	99
17	Fazit und Ausblick	101
17.1	Mögliche Präzisierungen der SIA-Normen bzgl. Vorgaben zur Bemessung gegen Brandeinwirkung	101
17.2	Mögliche weitere Abgrenzung des Forschungsvorhabens	102
17.3	Mögliche Ansätze für weitere Forschungsvorhaben ausserhalb des vorliegenden Projekts	103
18	Vorschlag zur Kapitelstruktur einer Bemessungsrichtlinie oder -norm	104
18.1	Organisation / Administration	104
18.2	Brandschutzziele.....	104
18.2.1	Risikoanalyse / Sicherheitsplanung	104
18.2.2	Schutz des Lebens, Bauwerks, Dritter und andere Brandschutzziele	104
18.2.3	Akzeptierte Risiken.....	105
18.3	Brandschutzkonzept / Vorgaben zu baulichen, technischen und organisatorischen	

	Brandschutzmassnahmen	105
18.4	Bemessungskonzept.....	106
18.4.1	Vorgaben zur Brandschutzbemessung.....	106
18.4.2	Berechnungsmodelle	107
18.4.3	Einwirkungsfaktoren.....	108
18.4.4	Bettung / Gebirgs Umgebung	108
18.4.5	Einfluss des Brandes auf Materialien.....	108
18.5	Konstruktive Durchbildung	109
18.5.1	Vorgaben zu konstruktiven Durchbildungen	109
18.5.2	Materialanforderungen	109
18.5.3	Konstruktive Massnahmen.....	109
S. Kap. 18.5.1	109
18.5.4	Nutzungsanforderungen.....	109
18.6	Erhaltung / Beurteilung bestehender Bauwerke	109
	Tabellenverzeichnis	113
	Abbildungsverzeichnis.....	114

Zusammenfassung

Mit Auftrag vom 08. August 2008 wurde die Ingenieurgesellschaft Amberg Engineering AG / Basler & Hofmann AG und Bonnard Gardel AG beauftragt, die Phase 1 des Forschungsvorhabens „Brandschutz im Tunnel: Schutzziele und Brandbemessung“ zu erarbeiten. Diese besteht im Wesentlichen aus einer Bestandsaufnahme und -analyse des Standes der Technik für die Bemessung von Strassentunnel-Bauteilen auf den Lastfall Brand.

Zahlreiche der analysierten Dokumente gehen auf die Thematik des Brandschutzes detailliert ein. Der Fokus konzentriert sich dabei aber weniger auf die Bemessungsverfahren sondern auf die baulichen Massnahmen (Anordnung von Rettungswegen, Lüftung, etc.) sowie auf technische und betriebliche Vorkehrungen gegen die Einwirkungen und Folgen eines Ereignisfalles „Brand“. Die verfügbaren konkreten Richtlinien zur Bemessung beinhalten tabellarische Bauteildimensionierung in Abhängigkeit von Brandlasten und Brandschutzanforderungen (Widerstandsklassen). Eine Normierung, welche eine statische Berechnung mit Berücksichtigung des Lastfalles „Brand“ ermöglicht, ist nicht oder nur ansatzweise vorhanden.

Die untersuchten Dokumente weisen zu einem grossen Teil ähnliche Ansätze und Vorgehens-Empfehlungen auf.

- Konkreter Bezug zwischen gesetzlicher Regulierung und normativer Umsetzung (z.B. Verbindung zwischen Störfallverordnung und SIA-Norm, resp. Überführung der EU-Richtlinie 2004/54/EG in nationales Recht durch die RABT, Ausgabe 2006).
- Formulierung der Schutzziele. Dabei unterscheiden sich die verschiedenen Normenwerke und Richtlinien im Detaillierungsgrad erheblich voneinander.
- Empfehlung oder Vorschrift von Risikoanalysen oder Sicherheitsplänen zur Festlegung der Schutzziele/Schutzmassnahmen.
- Z.T. konkreter Bezug auf Brandlasten (z.B. in Form von Brandschutzklassen oder Brandkurven).

Die Erarbeitung der Grundlagen für eine Bemessung von Tunnel-Bauteilen hinsichtlich Lastfall „Brand“ ist in den untersuchten Dokumenten eingehend festgehalten. Zum Teil ist hier Ergänzungsbedarf festzustellen, eine systematische Vorgehensweise wurde in keinem der Dokumente festgehalten. Insbesondere bei der Erarbeitung der Schutzziele ist der Betreiber des Tunnels (Behörden, Konzessionsnehmer) stärker zu integrieren.

Die eingehendere Untersuchung der Tragsicherheit und Gebrauchstauglichkeit im Sinne einer Tragwerksanalyse mit Berücksichtigung der verschiedenen möglichen Lastfälle und Lastkombinationen (inkl. Lastfällen, welche nicht im Zusammenhang mit Brandeinwirkungen stehen kombiniert mit Brandlasten) tritt in den untersuchten Dokumenten nur vereinzelt zum Vorschein.

Die zusammengestellte Analyse der untersuchten Dokumente soll die Basis bilden für die weitergehende Erarbeitung einer Norm oder einer Richtlinie für die Bemessung von baulichen Bestandteilen eines Strassentunnels für den Lastfall „Brand“. Diese Arbeit stellt die zweite Phase des Forschungsvorhabens „Brandschutz im Tunnel; Schutzziele und Brandbemessung“ dar.

Résumé

Le groupement des bureaux d'ingénieurs Amberg Engineering AG, Basler & Hofmann AG et BG Ingénieurs Conseils SA a été mandaté le 8 août 2008 pour réaliser la phase 1 du projet de recherche "protection incendie en tunnel: objectifs de sécurité et dimensionnement incendie". Il s'agit principalement d'un inventaire et d'une analyse des règles de l'art existants pour la conception et le dimensionnement au feu des éléments de tunnels routiers.

La plupart des documents analysés traitent en détail le thème de la protection incendie. Dans ces documents, l'accent se porte moins sur les principes de dimensionnement, mais plutôt sur les mesures structurelles (agencement des voies d'évacuation, ventilation, etc.), sur les mesures techniques et sur les mesures opérationnelles contre les effets et les conséquences d'un incendie. Les directives spécifiques disponibles pour le dimensionnement contiennent principalement des valeurs tabulées en fonction de la charge d'incendie et des exigences de protection incendie (groupes de résistance). Il n'existe que pour certains éléments spécifiques une normalisation qui détermine précisément comment effectuer un calcul statique avec prise en compte du cas de charge incendie.

Les documents étudiés montrent des approches et des recommandations qui sont dans une large mesure tout à fait similaires.

- Relation concrète entre les règles juridiques et les textes normatifs (par exemple la relation entre l'ordonnance sur les accidents majeurs et la norme SIA, respectivement la transcription de la directive-UE 2004/54/CE en droit national par la RABT, édition 2006).
- Formulation des objectifs de sécurité. Les normes et directives se distinguent considérablement sur le niveau de détail.
- Recommandation ou exigence d'analyse de risque ou de plan de sécurité fixant les objectifs de protection et les mesures de protection.
- En partie une référence concrète aux charges d'incendie (par exemple sous forme de classes de protection incendie ou de courbes d'incendie).

L'élaboration des bases pour le dimensionnement des éléments de tunnel par rapport au cas de charge incendie est décrite en détail dans les documents examinés. Cependant, il apparaît nécessaire d'apporter ici un complément, car aucune approche systématique n'est établie. En particulier, les exploitants des tunnels (les autorités et les concessionnaires) devraient être mieux intégrés dans l'élaboration des objectifs de sécurité.

Les documents étudiés ne présentent que rarement une approche décrivant en détail l'analyse de la sécurité structurale et de l'aptitude au service en termes d'analyse de la structure porteuse, tenant compte des différents cas de charge (y compris ceux qui ne sont pas associés à l'incendie) et des différentes combinaisons de charge possibles.

L'analyse des documents effectuée dans cette première phase servira de base pour la seconde phase du travail de recherche : "protection incendie en tunnels: objectifs de sécurité et dimensionnement incendie". Ce travail permettra d'élaborer une norme ou une directive pour le dimensionnement incendie des éléments constructifs des tunnels routiers.

Summary

The engineering consortium comprising Amberg Engineering AG / Basler & Hofmann AG and Bonnard Gardel AG was commissioned on August 8, 2008 to carry out Phase 1 of the “Fire protection in tunnels: Protection goals and fire design” research project. This essentially includes an appraisal and analysis of the state-of-the-art for the design of road-tunnel components for the load case “fire”.

Many of the documents analysed go into the topic of fire protection in detail. The focus, however, is less on the design process and more on the construction measures (arrangement of escape routes, ventilation, etc.) and technical and operational precautions against the actions and consequences of a “fire” incident. The actual guidelines that are available for design purposes contain component dimensions in tabular form depending on the fire loads and fire protection requirements (resistance classes). A standardised form making possible a static calculation including the load case “fire” is not present, or only present in rudimentary form.

For the most part, the documents analysed contain similar approaches and recommended models.

- Concrete connection between statutory regulation and normative implementation (e.g. connection between the Hazardous Incident Ordinance and SIA standard, and translation of EU Directive 2004/54/EC into domestic law by the RABT, issued 2006).
- Formulation of the protection goals. The various standards and guidelines differ greatly with regard to level of detail in this regard.
- Recommendation or instruction to draw up risk analyses or safety plans to specify the protection goals/protection measures.
- Concrete reference to fire loads in places (e.g. in the form of fire protection classes or fire curves).

The documents analysed cover in detail the elaboration of principles for designing tunnel components with regard to the load case “fire”. There is a need for expansion in some areas: a systematic approach is not specified in any of the documents. The operator of the tunnel (public authority, franchisee) must be involved more closely when the protection goals are being elaborated in particular.

A more thorough analysis of the structural safety and serviceability in the sense of a structural analysis taking account of the various possible load cases and load combinations (including load cases not connected with fire actions combined with fire loads) only appears sporadically in the documents analysed.

The analysis that has been compiled of the documents studied is intended to form the basis for the more detailed elaboration of a standard or guideline for designing the constructional components of a road tunnel for the load case “fire”. This work represents the second phase of the “Fire protection in tunnels: Protection goals and fire design” project.

1 Einleitung

1.1 Ausgangslage

In den letzten Jahren haben einige tragische Tunnelbrandereignisse dazu geführt, dass bei der Bemessung von Tunnelbauwerken in Neubau und Bauwerkserhaltung der Einbezug der Einwirkung Brand immer häufiger gefordert wird.

Das zur Verfügung stehende nationale und internationale Normenwerk weist bezüglich dem Umgang mit der Einwirkung Brand in der Regel nur qualitative und stark vereinfachte Verfahren auf. In den meisten Fällen sind diese wenig konkret oder verweisen auf weiterführende Literatur.

Um das Tragverhalten der Tunnelkonstruktion im und nach einem Brandfall beurteilen zu können, muss zwischen den verschiedenen Ausführungsmöglichkeiten der Tragkonstruktion unterschieden werden. Die Verformungen und Schnittgrößen der Tunnelkonstruktion aufgrund des Lastfalles Brand hängen vor allem von den Faktoren Brandbelastung, Bettung, Bauteilabmessung und Betonsorte ab. Die Tragsicherheit und die Verformungen im Brandfall lassen sich anhand von vorgegebenen Temperatur-Zeit-Kurven mithilfe von nichtlinearen, temperaturabhängigen Materialgesetzen berechnen. Die zulässigen Grössen sind abhängig von definierten Brandschutzzielen und Brandschutzkonzepten, welche im Rahmen der Projektierung festzulegen sind. Hier fehlen im derzeit zur Verfügung stehenden Normenwerk ebenfalls Hilfestellungen und Randbedingungen.

Aus diesem Grund wurde durch das ASTRA im Auftrag der Forschungsgesellschaft für Untertagebau (FGU) der Forschungsauftrag „Brandschutz im Tunnel: Schutzziele und Brandbemessung“ formuliert, im Rahmen dessen evaluiert werden soll, auf welche Art die Forderung nach einer Integration der Einwirkung Brand in die Bemessung umzusetzen ist. Erkenntnisse aus Normen und Richtlinien anderer Länder sowie aktueller und vergangener Forschungsvorhaben werden einbezogen.

Die Resultate dieses Forschungsvorhabens sollen in einer Empfehlung, eventuell in einer Anwendungs-Richtlinie im Sinne einer Anleitung münden.

1.2 Ziel des Berichts

Ziel des Forschungsauftrages ist, in Abhängigkeit der Brandschutzziele und des Brandschutzkonzeptes Brandkurven bzw. deren Anwendung zu definieren und Bemessungskriterien in Abhängigkeit des Tragwerks vorzugeben. Es soll insbesondere die Vorgehensweise definiert werden, welche Modelle und Verfahren zur Bemessung des Tragwerks respektive der einzelnen Bauteile herangezogen werden sollen und wie der Nachweis im Detail geführt werden soll.

Der Forschungsauftrag wird in zwei Phasen erarbeitet.

In Phase 1 wird im Rahmen eines Literaturstudiums der Stand der Technik in der Schweiz und in verschiedenen ausgewählten Ländern (europäisches Ausland und Länder ausserhalb EU-Raum) dargestellt. Darauf folgt innerhalb der Phase 2 die genauere Betrachtung einzelner Bauten und Bauteile. Ziel ist die Erstellung von Bemessungsprinzipien für den Erhalt der Tragsicherheit und Standsicherheit. Abschluss der Phase 2 bildet die Erstellung einer Empfehlung oder einer Richtlinie.

Auf Basis der Phase 1 werden mit Hinblick auf die Arbeiten der Phase 2, Optimierungspotential der schweizerischen Normung aufgezeigt und neue Forschungsvorhaben identifiziert.

Der vorliegende Bericht bezieht sich ausschliesslich auf die Arbeiten der Phase 1.

Einbezogen werden sowohl Normen und Richtlinien der europäischen Nachbarländer sowie Erkenntnisse aus der diesbezüglichen Forschung. Die innerhalb der beauftragten Ingenieurgemeinschaft vorhandenen praktischen Erfahrungen werden ebenfalls mit einbezogen. Der Fokus wird auf bemessungsrelevante Themen gelegt, insbesondere:

- Brandschutzziele und -konzepte
- Bemessung und Nachweisverfahren
- Hinweise zur konstruktiven Durchbildung

Themengebiete wie z. B. Rettungskonzepte, Evakuierung und Personensicherheit sowie betriebliche Massnahmen zur Beschränkung von Brandgütern im Tunnel werden, wo im untersuchten Normenwerk explizit erwähnt, aufgeführt, aber nur im Detail behandelt, wenn diese Themen im Zusammenhang mit der Dimensionierung bezüglich Brandfall stehen.

Um das Optimierungspotential der Schweizerischen Normung im Ganzen betrachten zu können, wird auch die Brandbemessung im Hochbau (SIA) in den Vergleich integriert.

1.3 Abgrenzung

Im Rahmen der vorliegenden Forschungsarbeit wird ausschliesslich der Brandfall in der Betriebsphase eines Tunnelbauwerks, nicht derjenige während der Bauphasen betrachtet.

Es wird auf die bautechnische und statische Bemessung von Strassentunneln im Rahmen der Projektierung und Ausführungsplanung eingegangen.

2 Grundlagen

- [1] Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein: Norm SIA 197 „Projektierung Tunnel“ inkl. Normen SIA 191/1 „Projektierung Tunnel – Bahntunnel“ und SIA 191/2 „Projektierung Tunnel - Strassentunnel“, Zürich, 2004
- [2] Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein: Swisscodes Normen SIA 260 bis 262, Zürich, 2003
- [3] Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein: Swisscodes Normen SIA 183, 1996
- [4] SIA Dokumentation 81 „Brandrisikobewertung / Berechnungsverfahren“, 1984, Überarbeitung zur VKF (AEAI)-Erläuterung (Erläuterung der VKF zum Brandschutz)
- [5] Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft (BUWAL): Beurteilungskriterien I zur Störfallverordnung StFV, 1996
- [6] Europäisches Komitee für Normung CEN: Eurocode 1 - Actions on Structures, Part 1-2: General Actions – Actions on structures exposed to fire, Brüssel, Januar 2002
- [7] Europäisches Komitee für Normung CEN: Eurocode 2 - Design of concrete structures, Part 2-2: General Rules - Structural fire design, Brüssel, Juli 2004
- [8] Europäisches Parlament und Rat: Richtlinie des Europäischen Parlaments und des Rates der Europäischen Union über Mindestanforderungen an die Sicherheit von Tunneln im transeuropäischen Strassennetz, EG-Tunnelrichtlinie 2004/54/EG, 06.07.2004
- [9] Europäisches Komitee für Normung CEN: EN 13501-1 - Klassifizierung von Bauprodukten und Bauarten zu ihrem Brandverhalten - Teil 1: Klassifizierung mit den Ergebnissen aus den Prüfungen zum Brandverhalten von Bauprodukten
- [10] Europäisches Komitee für Normung CEN: EN 13501-2 - Klassifizierung von Bauprodukten und Bauarten zu ihrem Brandverhalten - Teil 2: Klassifizierung mit den Ergebnissen aus den Feuerwiderstandsprüfungen, mit Ausnahme von Lüftungsanlagen
- [11] Deutsches Institut für Normung DIN: DIN 4102 - Teil 4: Zusammenstellung und Anwendung klassifizierter Baustoffe, Bauteile und Sonderbauteile – Brandverhalten von Baustoffen und Bauteilen, 2002
- [12] Deutsches Institut für Normung DIN: DIN 1045 - Teil 1: Tragwerke aus Beton, Stahlbeton und Spannbeton – Bemessung und Konstruktion, 2001
- [13] Deutsches Institut für Normung DIN: Nationales Anwendungsdokument (NAD) - Richtlinie zur Anwendung der DN V ENV 1991-2-2 und 1992-1-2 (DIN-Fachberichte Nr. 91 und 92), 2000
- [14] Bundesanstalt für Strassenwesen: Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen und Richtlinien für Ingenieurbauten (ZTV-ING), Teil 5: Tunnelbau, Januar 2003
- [15] Forschungsgesellschaft für Strassen- und Verkehrswesen: Richtlinien für die Ausstattung und den Betrieb von Strassentunneln (RABT), 2006
- [16] Technisch-Wissenschaftlicher Beirat der Vereinigung zur Förderung des Deutschen Brandschutzes e.V.: Leitfaden Ingenieurmethoden des Brandschutzes, Mai 2006 über <http://www.ibmb.tu-braunschweig.de/>
- [17] Eisenbahn-Bundesamt: Erläuterungen zum Leitfaden für den Brandschutz in Personenverkehrsanlagen (Pva) der Eisenbahnen des Bundes (EdB), März 2005
- [18] Eisenbahn-Bundesamt: Richtlinie „Anforderungen des Brand- und Katastrophenschutzes an den Bau und Betrieb von Eisenbahntunneln“, November 2001
- [19] Deutsche Bahn AG: Konzernrichtlinie 123 „Notfallmanagement, Brandschutz“, Juni 2008
- [20] Deutsche Bahn AG: Konzernrichtlinie 853 „Eisenbahntunnel bauen, planen und instandstellen“, Januar 2007
- [21] Deutsche Bahn AG: Brand- und Katastrophenschutz in Eisenbahntunneln, 2002
- [22] Österreichisches Normeninstitut: ÖNORM 3800 1-4, 1990
- [23] Österreichische Vereinigung für Beton- und Bautechnik (ÖVBB): Richtlinie: Innenschalenbeton, 2003
- [24] Österreichische Vereinigung für Beton- und Bautechnik (ÖVBB): Richtlinie: Erhöht brandbeständiger Beton für unterirdische Verkehrsbauwerke, Dez. 2004

- [25] Forschungsgesellschaft Strasse Schiene Verkehr (FVS): Baulicher Brandschutz in Strassenverkehrsbauten, RVS 09.01.45, September 2006
- [26] A. Beard, R. Carvel: Handbook of Tunnel Fire Safety, 2005
- [27] Il Presidente della Repubblica Italia: Decreto Legislativo 5 Ottobre 2006 n°264, Okt. 2006
- [28] ANAS S.p.A.: Linee guida per la progettazione della sicurezza nelle gallerie stradali, Nov. 2006
- [29] Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti : Decreto ministeriale Infrastrutture e Trasporti, 28,10.2005
- [30] The Highways Agency: UK Design Manual for Roads and Bridges BD 78/99: Design of Road Tunnels, August 1999
- [31] Ministerium für Verkehrs-, Post- und Fernmeldewesen der Slowakischen Republik: TP 04/2006: "Brandsicherheit der Strassentunnel", 2006.
- [32] Center for Standardisation Singapore: SS CP 65 Code of Practice for Structural Use of Concrete – Part 2: Special circumstances, Singapore, 1999
- [33] The Australasian Fire Authorities Council AFAC: Fire safety Guidelines for road tunnels, 2001
- [34] PIARC, World Road Association: Fire and Smoke Control in Tunnels, 1999
- [35] International Tunneling Association ITA: Guidelines for structural fire resistance of road tunnels, Mai 2004 über http://publications.piarc.org/ressources/publications_files/4/1763,RR324-072.pdf
- [36] WTCB: Themativ Network FIT - Fire in Tunnels: Technical Report Part 1: Design Fire Scenarios, Brüssel, 2005
- [37] Bundesamt für Strassen ASTRA: Empfehlung zum Vorgehen für die Bemessung von Autobahnüberdeckungen und Autobahntunnel gegen Brandeinwirkung, ETH Zürich, April 2005
- [38] Firetun Project: Fires in Transport Tunnels, Report on Full-scale Tests, EUREKA EU 499, Mai 2005
- [39] Betonkalender 2005, Ernst & Sohn
- [40] Bauphysikkalender 2006, Ernst & Sohn
- [41] DGGT: Tunnelbau 2005, Glückauf
- [42] Wayss & Freytag am Donnerstag: Thema: Brandschutz im Massivbau, Vorbeugender Brandschutz, 29.06.06 über <http://wf-ingbau.de/de/micro/rueckblick.php?navid=3>
- [43] Fachartikel des VÖZ, über <http://www.zement.at/page.asp?c=142>
- [44] Musterliste der Technischen Baubestimmungen der Bauministerkonferenz über <http://www.bauministerkonferenz.de/?rid=991&n=3DAO3DFO>
- [45] LTA Civil Design Division "guidelines for tunnel lining design"
- [46] Unterlagen zur Fachveranstaltung "Brandschutzgerecht bauen im Hoch- und Industriebau - Anforderungen an Tragkonstruktionen", Bau und Wissen
- [47] Versuchsstollen Hagerbach: Bericht „Brandversuche an fasermodifizierten Betonplatten, Versuchsdurchführung und Resultate“, V157 0230, 23.04.2004
- [48] IG Gotthard-Basistunnel Süd: Grundlagen Brandschutz im Gotthard Basistunnel, 2001
- [49] IG Gotthard-Basistunnel Süd: Tragsicherheits- und Gebrauchstauglichkeitsnachweis Innengewölbe, Abluftsysteme Sedrun, Faido, Bericht Nr. R175 G054
- [50] BUWAL, Beurteilungskriterien I zur Störfallverordnung StFV, September 1996.
- [51] BUWAL, Beurteilungskriterien II zur Störfallverordnung StFV, Vorabdruck, August 2001.
- [52] ASTRA, ADR 2007 Tunnel Informationsveranstaltung, 29. Oktober 2008.
- [53] Richtlinie 89/106/EWG, Richtlinie des Rates vom 21. Dezember 1988 zur Angleichung der Rechts- und Verwaltungsvorschriften der Mitgliedstaaten über Bauprodukte
- [54] Slowakei, Ministerium für Verkehrs-, Post- und Fernmeldewesen: TP 04/2006: Brandsicherheit der Strassentunnel, November 2006
- [55] Dissertation "Tragverhalten von Stahlbetontragwerken unter Hochtemperatureinfluss"; Dipl.-Ing. Dr. techn. Johannes Wageneder

- [56] DI, Ulrich Puz; "Experimentelle Untersuchungen zum Verhalten verschiedener Spritzbetonzusammensetzungen unter Temperaturbeanspruchung"; Forschungskolloquium de DAfStb 2005
- [57] Vollzugsstellen der Störfallverordnung der Kantone AG, BS, FR, LU und ZH, "Störfallvorsorge im Rahmen der Raumplanung", erstellt durch Ernst Basler + Partner AG, 2006.
- [58] J. Zanting, "Introduction of an Easy-to-use Risk Assessment Tool for Natural Gas Transmission Pipelines, ESREL Conference, Maastricht (NL), 2003.
- [59] B.J.M. Ale, "Tolerable or Acceptable: A Comparison of Risk Regulation in the United Kingdom and in the Netherlands", Risk Analysis, Vol. 25, No. 2, p. 231-241, 2005.
- [60] V.M. Trbojevic, "Risk criteria in EU", Archives of Transport, Vol. 17, issue 3-4, 2005.
- [61] Health and Safety Executive (UK), "HSE's current Approach to Land Use Planning (LUP)", Homepage: www.hse.gov.uk, Stand vom 19.03.2009.
- [62] PIARC, "Road Tunnels: An Assessment of Fixed Fire Fighting Systems", 2008. Vgl. auch Federal Highway Administration (USA), International Technology Scanning Program, "Underground Transportation Systems in Europe, Safety, Operations, and Emergency Response", 2006.

3 Schweiz / Tunnelbau

3.1 Normen und Richtlinien

3.1.1 SIA Normen

Die SIA Norm 197 [1], Projektierung Tunnel geht ganz allgemein auf, 'aussergewöhnliche Einwirkungen' Brand ein und gibt Hinweise auf weitere Normen und deren Verwendung. Die SIA 197/2 [1], Projektierung Strassentunnel behandelt die Projektierung der Infrastruktur und gibt Hinweise für deren Nutzung und Betrieb.

Im Anhang B (Brandlast) der SIA 197/2 [1], werden Empfehlungen bezüglich der Bemessung im Brandfall formuliert. Diese haben jedoch keine Allgemeingültigkeit, sondern sind als rein informativ zu betrachten.

Angaben zum baulichen Brandschutz sind in der SIA 260-262 [2] zu finden. Während die SIA 260 auf Berechnungsmodelle für Brandeinwirkungen eingeht, behandelt die SIA 261 die Handhabung des Themas Brandschutz innerhalb eines Projekts. Brandbedingte Verformungen und Zwängungen sowie Veränderungen der mechanischen und thermischen Eigenschaften des Tragwerks werden in den Normen SIA 262-266 berücksichtigt.

Des Weiteren wurden für diese Arbeit die Empfehlung SIA 183 (Brandschutz im Hochbau) [3] und die SIA-Dokumentation 81 [4] beigezogen. Siehe hierzu auch Kapitel 4.

3.1.2 Richtlinie BAFU zur Störfallvorsorge

Indirekt lassen sich Schutzziele aus der schweizerischen Störfallvorsorge ableiten, welche für den Umgang mit chemischen und biologischen Gefahrstoffen konzipiert wurde. Dort wird aufgrund eines risikobasierten Ansatzes beurteilt, ob die von einem Betrieb ausgehenden Risiken für die Gesellschaft akzeptabel sind.

3.1.3 Richtlinie ASTRA zum Gefahrguttransport

Die Grundsätze zum Transport gefährlicher Güter auf der Strasse sind auf europäischer Ebene durch das "Übereinkommen über die Beförderung gefährlicher Güter auf der Strasse" (ADR) geregelt. Dieses bildet auch einen integrierenden Bestandteil der entsprechenden Schweizer "Verordnung über die Beförderung gefährlicher Güter auf der Strasse" (SDR). Die Fassung des ADR von 2007 sieht die Möglichkeit vor, den Transport von gefährlichen Gütern durch einzelne Tunnel einzuschränken, wozu den Tunneln verschiedene so genannte Tunnelbeschränkungs-codes zugewiesen werden. Derzeit erarbeitet das ASTRA ein Verfahren zur einheitlichen Umsetzung dieser Vorgabe des ADR, welches noch 2009 fertig gestellt werden soll. Das zukünftige Verfahren lehnt sich an das bekannte Verfahren zum Vollzug der Störfallverordnung an und wird demnach wiederum einen mehrstufigen, risikobasierten Ansatz verfolgen ([51]). Es soll eine einheitliche und transparente Festlegung des jeweiligen Tunnelbeschränkungs-codes sicherstellen. Die genauen Beurteilungskriterien wurden bisher aber noch nicht publiziert und können hier nicht wiedergegeben werden.

3.1.4 Richtlinie ASTRA zu Tunnelbauten

Bezüglich der Brandschutzthematik sind folgende ASTRA-Richtlinien verfügbar:

- "Branddetektion in Strassentunneln", V2.10, 2007
- "Lüftung der Strassentunnel (Systemwahl, Dimensionierung und Ausstattung), V1.2, 2004/2006
- "Signalisation der Sicherheitseinrichtungen in Tunneln", 2004 (Entwurf)

Bezüglich der Bemessung von tragenden Bauteilen eines Tunnels liegen keine ASTRA-Dokumente vor.

3.2 Brandschutzziele

Die SIA 261, Kap. 15 definiert den Umgang mit Brandschutzziele im Allgemeinen und das daraus resultierende Vorgehen bei der Projektierung. Brandschutzziele sind in der Nutzungsvereinbarung festzuhalten und in der Projektbasis durch ein Brandschutzkonzept umzusetzen.

3.2.1 Risikoanalyse / Sicherheitsplanung

In SIA 261, Kap. 16.3 werden die Begriffe „Bauwerksklassen“ und „Bedeutungsfaktor“ eingeführt, mit welchen Bauwerke, welche der Störfallverordnung unterliegen, in Klassen eingeteilt werden. Diese Klassen unterscheiden sich durch die Auswirkung eines Störfalls (also auch eines Brandes) auf die Benutzer und die Umwelt der Bauwerke.

Für eine Bewertung, oder einen Vergleich von Brandschutzkonzepten, kann die Risikobewertung gemäss SIA-Dokumentation 81 hinzugezogen werden (SIA 261, Kap. 15.2.3).

Die Richtlinie "Beurteilungskriterien I zur Störfallverordnung StFV" [50] des damaligen BUWAL (heute BAFU) gibt für verschiedene Schadensindikatoren wie beispielsweise Todesopfer oder Sachschäden an, bis zu welcher Auftretenswahrscheinlichkeit unterschiedlich schwere Ereignisse akzeptiert werden können.

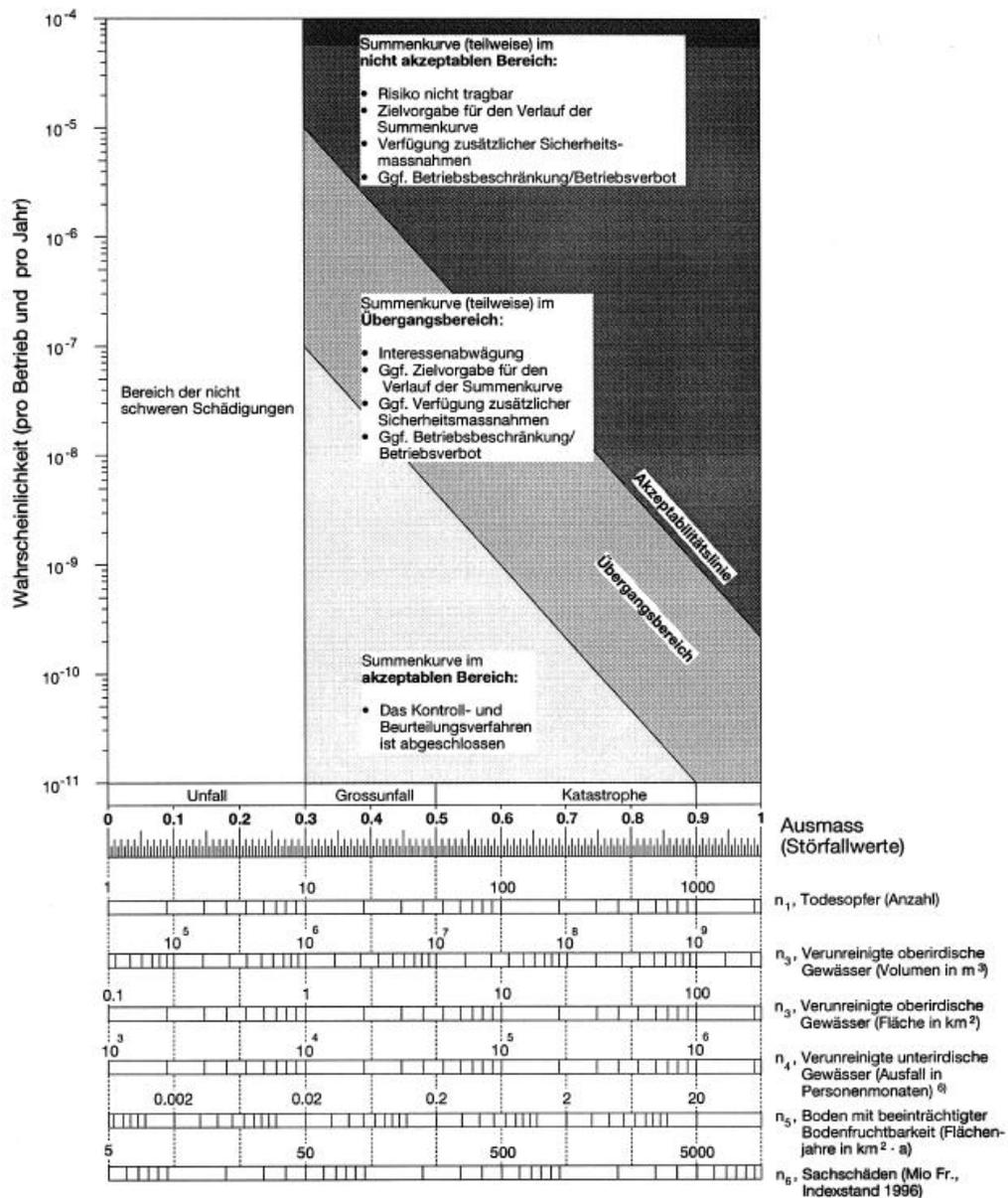


Abbildung 1: Wahrscheinlichkeits-/Ausmass-Diagramm zur Beurteilung der Akzeptabilität von Risiken gemäss Beurteilungskriterien I zu Störfallverordnung STFV

Zur Beurteilung des Schadensausmasses können sechs verschiedene Schadenindikatoren herangezogen werden:

n1: Todesopfer (Anzahl)

n2: Verletzte (Anzahl) --> Fehlt in der Aufzählung rechts neben Abbildung 1

n3: Verunreinigte oberirdische Gewässer (Volumen in m^3)

n3: Verunreinigte oberirdische Gewässer (Fläche in km^2)

n4: Verunreinigte unterirdische Gewässer (Ausfall in Personenmonaten)

n5: Boden mit beeinträchtiger Bodenfruchtbarkeit (Flächenjahre in $km^2 \cdot a$)

n6: Sachschaden (Mio. CHF, Indexstand 1996)

Die Risiken der einzelnen Indikatoren werden nicht kumuliert, sondern separat betrachtet. Ereignisse mit geringem Ausmass (sog. "nicht schwere Schädigungen") werden dabei generell akzeptiert. Grössere Ereignisse (sog. "schwere Schädigungen") werden nur akzeptiert, wenn die Wahrscheinlichkeit für deren Eintreten genügend klein ist. Zwischen dem Bereich dieser akzeptablen und der nicht-akzeptablen Risiken befindet sich ein Übergangsbereich, in welchem Risiken nach dem ALARP-Prinzip ("as low as reasonably practicable") behandelt werden. Im Übergangsbereich müssen Massnahmen zur Risikoreduktion ergriffen werden, wenn deren Kosten in einem wirtschaftlich tragbaren Verhältnis zu ihrem Nutzen stehen. Falls dies nicht möglich ist, können Restrisiken aber auch akzeptiert werden. Die für den Vollzug zuständige, kantonale Behörde führt hierzu eine Interessensabwägung durch. Gegen Risiken im nicht-akzeptablen Bereich müssen hingegen immer Massnahmen ergriffen werden, unabhängig von deren Wirtschaftlichkeit.

Für die Beurteilung von Verkehrswegen wurde 2001 wiederum durch das damalige BUWAL (heute BAFU) eine zusätzliche Richtlinie "Beurteilungskriterien II zur Störfallverordnung StfV" [51] herausgegeben. Darin werden allerdings nur noch die Schadenindikatoren n1 - n4 (vgl. oben) berücksichtigt, wobei die Indikatoren n3 und n4 nur provisorisch aufgenommen wurden, um deren Praxistauglichkeit weiter zu erproben. Um die Vergleichbarkeit zu gewährleisten, wird die Eintretenshäufigkeit von möglichen Schadenereignissen jeweils auf eine Referenzlänge von 100 m umgerechnet.

3.2.2 Schutz des Lebens

Bei Eintreten eines Ereignisses soll die Möglichkeit zur raschen Intervention unter sicheren Bedingungen möglich sein (Selbstrettung der Verkehrsteilnehmer und Einschreiten der Ereignisdienste, z.B. Sanitäts- und Rettungskräfte), SIA 197/2, Kap. 4.4.1.

Im Anhang B der SIA 197/2, Kap. B.2 wird diese Aussage in zwei Grundsätze aufgeteilt:

1. Personen, die sich bei Brandausbruch im Tunnel befinden, sollen sich selbst retten können
2. Die Intervention der Ereignisdienste soll unter sicheren Bedingungen stattfinden können

3.2.3 Schutz des Bauwerks

Das Tragwerk eines Bauwerks ist so zu gestalten, dass ein Brand weder versagen noch wesentliche Folgeschäden verursachen darf. Des Weiteren soll eine bleibende Einschränkung des Tragwerks vermieden werden (SIA 197, Kapitel 7.4).

Eine „uneingeschränkte Gebrauchstauglichkeit“ wird als Voraussetzung angegeben, um das Eintreten von Ereignissen zu verhindern (Unfall, Brand, Panne), bzw. deren Auswirkung zu begrenzen (SIA 197/2, Kap. 4.4.). Damit werden der betriebliche und organisatorische, aber auch der bauliche Brandschutz zu den Bestandteilen der Gebrauchstauglichkeit gezählt.

Im Anhang B der SIA 197/2 wird der Hinweis formuliert, dass darüber hinaus ein übermässiger Sachschaden durch geeignete Massnahmen verhindert werden soll.

3.2.4 Schutz Dritter

Der Schutz der Umwelt spielt bei der Umsetzung der Störfallverordnung des BAFU eine wesentliche Rolle. Diese spiegelt sich in der Tabelle 26 der SIA 261 wider. Bauwerke werden in der Tabelle in Bauwerksklassen I bis III eingeteilt, abhängig von der Bedeutung des Bauwerks und des möglichen Schadenausmasses auf die Umwelt bei einem Störfall.

3.2.5 Andere Brandschutzziele

Neben den oben aufgeführten Zielen sind in den untersuchten Normen keine weiteren Schutzziele formuliert.

3.2.6 Akzeptierte Risiken

In den untersuchten Normen wurde kein Hinweis bezüglich der Festlegung von akzeptierten Risiken gefunden. Für die Beurteilung der von Gefahrgütern (auch im Strassenverkehr) ausgehenden Risiken werden in der Schweiz die Beurteilungskriterien zur Störfallverordnung angewandt [51]. Die entsprechenden Vorgaben können auch als Anhaltwerte für die Akzeptanz von Risiken in anderen Gebieten dienen.

3.3 Brandschutzkonzept

Das Brandschutzkonzept ist durch aufeinander abgestimmte bauliche, betriebliche und organisatorische Massnahmen zu realisieren (SIA 261, Kap. 15.2.4; SIA 197/2, Kap. 4.4.1).

Besondere Beachtung gilt Bauteilen, die für die Personenrettung oder die Funktion der Brandlüftung bedeutend sind (SIA 197, Kap. 7.4.1.6). Brandabschnittsbildende Bauteile müssen so ausgebildet sein, dass sie während der massgebenden Brandeinwirkungsdauer die Ausbreitung von Feuer und Rauch verhindern und die Temperaturerhöhung auf der dem Feuer abgewandten Seite begrenzen (SIA 261, Kap. 15.2.6). Weiterhin ist die erforderliche Abschnittsbildung sowie der jeweilige Feuerwiderstand in der Projektbasis festzuhalten (SIA 262, Kap. 4.3.10.1.1).

Generell gelten zusätzlich die feuerpolizeilichen Vorschriften der Kantone (SIA 261, Kap.15.2.5).

3.3.1 Vorgaben zu baulichen Brandschutzmassnahmen

Bauliche Brandschutzmassnahmen umfassen (SIA 261, Kap. 15.2.4):

- Sicherung von Flucht- und Rettungswegen
- Unterteilung des Gebäudes in Brandabschnitte
- Verwendung geeigneter Baustoffe
- Bemessung der Bauteile für ausreichenden Feuerwiderstand
- Gewährleistung der Löschwasserversorgung ausser- und innerhalb des Gebäudes
- Anordnung von Zufahrten und Stellplätzen für die Rettungsfahrzeuge

3.3.2 Vorgaben zu technischen Brandschutzmassnahmen

Technische Brandschutzmassnahmen umfassen (SIA 261, Kap. 15.2.4):

- Automatische Brandmelde- und Löschanlagen
- Rauch und Wärmeabzüge
- Gasmeldeanlagen, Blitzschutzanlagen
- Fehlerstromsicherungen

Bezüglich ausrüstungstechnischer Schutzmassnahmen wurden die Normen nach Massnahmen untersucht, welche auf den Schutz der baulichen Struktur abzielen. Massnahmen, welche den Schutz von Personen beinhalten (z.B. Selbstrettungsmassnahmen, Lüftung) wurden dabei nicht einbezogen, siehe dazu auch Kap. 1.3 dieses Berichtes.

Aussagen über ausrüstungstechnische Schutzmassnahmen, welche explizit den Erhalt der Bausubstanz beinhalten, sind in den untersuchten Dokumenten nicht vorhanden.

3.3.3 Vorgaben zu organisatorischen Brandschutzmassnahmen

Organisatorische Brandschutzmassnahmen umfassen (SIA 261, Kap. 15.2.4):

- Feuerwehr
- Wächterdienst
- Personalinstruktion
- Brandfallplanung

- Periodische Überprüfung der im Brandschutzkonzept festgelegten Massnahmen

3.4 Bemessungskonzept

Der Nachweis der Tragfähigkeit kann wahlweise auf folgende Arten erfolgen (SIA 261, Kap.15.2.8):

- Im Zeitbereich anhand der Feuerwiderstandsdauer
- Im Festigkeitsbereich anhand des Tragwiderstands
- Im Temperaturbereich anhand der kritischen Temperatur

3.4.1 Vorgaben zur Brandschutzbemessung

Grenzwert Brandlast für geschützte Personen

Die Bauteile und die Befestigung von Ausrüstungen sind so auszubilden, dass sie in der ersten Phase des Brandes nicht versagen. Diese Phase wird durch eine Temperatur von 450 °C während einer halben Stunde festgelegt und entspricht dem Grenzwert für den Einsatz von geschützten Personen (Feuerwehreinsatz). Diese liegt bei einer Temperatur von zwischen 400° bis 450° C und einer Wärmestrahlung von 5 kW/m² (SIA 197/2, Anhang B, Kap. B.3).

Vorgaben zur Brandlast werden in der SIA 197/2, Anhang B, informativ erwähnt und lehnen sich an die AIPCR-Empfehlung an.

Brandlast von Fahrzeugen

Durch Versuche in Tunneln wurden die mögliche Brandlast und die erreichten Temperaturen bei verschiedenen Randbedingungen bestimmt. Eine Zusammenstellung von Brandenergie und zugehörige Brandtemperatur, bezogen auf die Art des Fahrzeugs sind in nachstehender Tabelle zu finden, SIA 197/2, Anhang B, B4.1, Tabelle 1:

Art des Fahrzeuges	Ungefähr vorhandene Brandenergie MJ	Erreichte maximale Brandtemperatur °C
Personenwagen	3 000–6 000	200
Fahrzeug aus Kunststoff	7 000	500
Kleinbus/Kleinlastwagen		700
Autobus	41 000	820
Gefahrgut-Transport (TIR)	65 000	1 000
Schwerlastwagen	88 000	1 200
Tanklastwagen mit 50 m ³ Petrol ohne Abfluss in Kanalisation	1 500 000	1 400

Tabelle 1: Zusammenstellung von Brandenergie und zugehöriger Brandtemperatur, bezogen auf die Art des Fahrzeugs gem. SIA 197/2, Anhang B, B4.1, Tabelle 3

Brandlast mittels Temperatur-Zeit-Kurven

Die Wärmefreisetzung bei Brand ist durch nominelle Temperatur-Zeit-Kurven (ISO-Normbrandkurve, externe Brandkurve und Hydrokarbon-Brandkurve) oder parameterabhängige Temperatur-Zeit-Kurven (Naturbrände) zu berücksichtigen. Ohne eine genauere Untersuchung sind die charakteristischen Werte der ISO-Normbrandkurve zu entnehmen.

Wenn Brandversuche oder numerische Brandsimulationen vorliegen, darf die thermische Einwirkung in Absprache mit der Brandschutzbehörde angepasst werden. Insbesondere kann damit der Einfluss von Feuerlöschmassnahmen berücksichtigt werden (SIA 261, Kap. 15.3).

Die Wahl der Bemessungskurve, resp. der Einwirkungsdauer kann (auf Grundlage der AIPCR-Empfehlung) nach SIA 197/2, Anhang B, Kap. B.6.2, Tabelle 1 getroffen werden:

	Tunnel (Tragwerk)				Sekundäre Bauteile
Tunnel	Einschwimmtunnel, Tunnel unter oder durch Gebäude	Tunnel in instabilem Gebirge	Tunnel in standfestem Gebirge	Tagbautunnel	Lüftungskanäle und Zwischendecke
Fahrzeug					
Personen- und Lieferwagen	ISO 60 min	ISO 60 min	ISO ²⁾ 60 min	ISO ²⁾ 60 min	ISO 30 min
Last- und Tankwagen	RWS/HC _{inc} ¹⁾ 120 min	RWS/HC _{inc} ¹⁾ 120 min	ISO ³⁾ 120 min	ISO ³⁾ 120 min	ISO 120 min

Bemerkungen zu Tabelle 4:

- ¹⁾ AIPCR empfiehlt bei einem hohen Anteil an Tanklastwagen mit brennbaren Flüssigkeiten eine Branddauer von 180 min.
- ²⁾ Der Tragwiderstand ist in der Regel nicht kritisch.
- ³⁾ Der Tragwiderstand ist in der Regel nicht kritisch. Bei besonderen Risiken, z.B. bei geringer Überdeckung unter einem Gebäude, ist gegebenenfalls eine grössere Brandlast zu berücksichtigen, die objektspezifisch festzulegen ist.

Tabelle 2: Wahl der Bemessungskurve und Einwirkungsdauer gem. SIA 197/2, Anhang B, Kap. B.6.2

Feuerwiderstand

Für den Nachweis des Feuerwiderstands bei nicht vorgespannten Bauteilen darf für Normbrandeinwirkung Tabelle 15 der SIA 262, Kap. 4.3.10.5.1, verwendet werden.

Feuerwiderstandsklasse	Minimale Bewehrungsüberdeckung [mm]	Minimale Bauteilabmessungen [mm]					
		Stützen	Wände	Decken	Pilzdecken	Flachdecken	Unterzüge Stegbreite
R 30	20	150	120	60	150	150	100
R 60	20	200	140	80	150	200	150
R 90	30	240	170	100	150	200	200
R 120	30	280	220	120	150	200	300
R 180	40	360	300	150	200	200	400

Tabelle 3: Feuerwiderstand bei nicht vorgespannten Bauteilen gem. SIA 262, Kap. 4.3.10.5.1

3.4.2 Berechnungsmodell

Berechnungsmodelle werden in der SIA 260, Kap. 3.3.6 angesprochen.

Eine Tragwerksanalyse ist am Gesamttragwerk sowie an einzelnen Tragwerksabschnitten oder Bauteilen nachzuweisen.

Für die Tragwerksanalyse sind thermische und mechanische Einwirkung (nach Bestimmungen der SIA 261) sowie das Tragverhalten bei erhöhten Temperaturen (gemäss Angaben SIA 262-266) zu betrachten. Die Tragwerksanalyse kann mit Versuchen belegt, resp. ergänzt werden.

Es wird zwischen dem allgemeinen Berechnungsverfahren und dem Nachweis des Feuerwiderstands mit Tabellen unterschieden.

Allgemeines Berechnungsverfahren

Das allgemeine Berechnungsverfahren nach SIA 262, Kap. 4.3.10.4, soll eine verlässliche Annäherung an das erwartete Verhalten der Bauteile liefern.

Für die Ermittlung der thermischen Einwirkung, Temperaturverteilung im Bauteil und des Tragverhalten des Bauteils dürfen gesonderte Berechnungsverfahren angewandt werden.

Die Temperaturverteilung im Bauteil ist unter Beachtung der Temperaturabhängigkeit der Baustoffeigenschaften zu ermitteln. Die Grundlage für diese Untersuchung bildet die Theorie der Wärmeübertragung durch Wärmestrahlung, Wärmeleitung, und Konvektion.

Der Einfluss des Feuchtgehalts und der Feuchtigkeitswanderung darf vernachlässigt werden.

Wird der geforderte Feuerwiderstand durch wärmedämmende Schutzschichten erreicht, dürfen für den Nachweis nur Kennwerte (der Eigenschaften des Materials) verwendet werden, welche mit geeigneten Prüfverfahren ermittelt wurden. Ein geeignetes Prüfverfahren beinhaltet eine Untersuchung der Schutzschicht für alle zu erwartenden Temperaturen, auch unter dem Einfluss von Rissen, oder Ablösungen.

Folgende Nachweise werden geführt:

Nachweis der Querkraft, Schubkräfte, Torsion und kombinierte Beanspruchung, Durchstanzen und Druckglieder. Für die Ermittlung des Querkraft- und Durchstanzwiderstands von Platten sowie der Exzentrizität bei schlanken Druckgliedern sind mögliche Eigenspannungen infolge ungleichmässiger Temperaturverteilung im Bauteil besonders zu beachten.

Nachweis des Feuerwiderstands mit Tabellen

Für nicht vorgespannte Bauteile mit vorwiegender Biege- und Normalkraftbeanspruchung darf für Normbrandeinwirkung mithilfe der Tabelle 15 der SIA 262, Kap. 4.3.10.5.1, der Nachweis des Feuerwiderstands geführt werden.

Versagensarten wie Abplatzen des Überdeckungsbetons, des Verbunds oder Ausknicken der Druckbewehrung werden durch diesen Nachweis nicht abgedeckt und sind zusätzlich mit konstruktiven Massnahmen zu verhindern.

Für Spannbetonbauteile sind die Werte der Tabelle 15 (SIA 262 Kap. 4.3.10.5.1) um 25% bis 50% zu erhöhen. Ausserdem ist zu beachten, dass die Vorspannung durch die thermische Einwirkung abgebaut werden kann.

3.4.3 Einwirkungsfaktoren

Thermische und mechanische Einwirkungen

Für den Nachweis der Tragsicherheit in der Bemessungssituation Brand gilt (Verweis über SIA 262, Betonbau zu SIA 262/1, Betonbau - ergänzende Festlegungen) die Vornorm SN ENV 1992-1-2: 2004, Tragwerksbemessung im Brandfall.

Die Norm EN 1992 – 1 – 2: 2004 hat als SN EN 1992 - 1- 2:2004 den Status einer Schweizer Norm unter der Bezeichnung SIA 262.002.

Die Wärmefreisetzung bei Brand ist durch Temperatur-Zeit-Kurven zu berücksichtigen.

3.4.4 Bettung/Gebirgsumgebung

Auf Grundlage der AIPCR Empfehlung, wird im Anhang B der SIA 197/2, Tabelle 4 der Bezug zwischen Gebirgsumgebung, Fahrzeug und Temperaturbrandkurve hergestellt.

3.4.5 Einfluss des Brandes auf Materialien

Brandschutzeigenschaften der Materialien bei Brandeinwirkung können entweder aus geeigneter Fachliteratur entnommen werden (Verweis in SIA 262/1) oder nach Europäischer Norm SN ENV 1992-1-2 angenommen werden.

3.5 Konstruktive Durchbildung

3.5.1 Vorgaben zu konstruktiven Durchbildungen

Bei einem Nachweis des Feuerwiderstands darf nach [Tabelle 15 der SIA 262] die Mindestdicke sowie Mindestbetondeckung festgelegt werden.

3.5.2 Materialanforderungen

Der Feuerwiderstand kann durch widerstandsfähigeren Beton, und/oder durch eine Schutzschicht (passive Brandschutzmassnahme) erhöht werden (SIA 197, Kap. 7.4).

Für den Brandschutz geeignete Baustoffe und Bauteile sind im Schweizerischen Brandschutzregister der VKF (Vereinigung Kantonalen Feuerversicherungen) aufgeführt. Die Baustoffe werden nach ihrer Brennbarkeit und ihrem Qualmverhalten, die Bauteile nach ihrem Feuerwiderstand beurteilt und klassiert.

Die Zugabe von Polypropylenfasern reduziert die Gefahr des explosionsartigen Abplatzens. (SIA 262, Kap. 4.3.10.6.1)

Ist der Tragwiderstand von Klebebewehrung für Brandbemessung von Bedeutung, sind die Klebebewehrungen thermisch so zu isolieren, dass ein Versagen der Verklebung ausgeschlossen ist (SIA 262, Kap. 4.3.10.6.2).

3.5.3 Konstruktive Massnahmen

Die Tragwerke sind so zu konzipieren und durchzubilden, dass Temperaturbildung und Zwängung infolge Brandeinwirkung nicht zu einem vorzeitigen Versagen führen (SIA 262, Kap. 4.3.10.1.2).

Die konstruktive Durchbildung der Bauteile ist so zu wählen, dass eine progressive Schadensentwicklung verhindert wird (SIA 197, Kap.7.4.1.5).

Der Feuerwiderstand kann durch die Wahl einer grösseren Bewehrungsüberdeckung erhöht werden (SIA 197, Kap. 7.4).

3.5.4 Nutzungsanforderung

Die Art der Nutzung entscheidet über die der Brandlast zugrunde liegenden Bemessungskurve.

4 Schweiz / Hochbau

4.1 Normen und Richtlinien

4.1.1 SIA Normen

Die in der Schweiz geltenden Normgrundlagen bezüglich Tunnelbau sind in Kapitel 3 beschrieben. In Kapitel 1 wird auf Hochbau-spezifische Aspekte eingegangen.

Die Norm 261 stellt die Bestimmungen bezüglich des Brandschutzes vor. Die Wärmeeinwirkung wird gemäss den Prinzipien in den schweizerischen Normen und der Euronormen als vorwiegende Unfalleinwirkung eingestuft.

Die SIA Normen 262 - 266 geben an, wie die von einem Brand herrührenden Verformungen und Belastungen zu berücksichtigen sind. Diese Normen enthalten auch spezifische Baubestimmungen für jeden Materialtyp. Diese Normen wurden in Kapitel 3 erörtert.

Die Normen EN199x-1-2:200x unter der Nr. SN EN 199x-1-2:200x haben den Status einer schweizerischen Norm unter der Nr. 26x.002. Diese Normen sind in der Schweiz in den Jahren 2002 - 2006 in Kraft getreten und stehen im gleichen Rang, wie die SIA Normen SIA 261 - 266. Die Beschreibung dieser Euronormen folgt in Kapitel 1.

Die SIA Dokumentation 81 wurde in Form einer VKF (AEAI)-Erläuterung überarbeitet und herausgegeben ([4], Erläuterung der VKF zum Brandschutz, "Bewertung mit Blick auf die Grösse der Brandabschnitte", 115-03d, 2007). Dieses Dokument stellt eine Berechnungsmethode vor, mittels derer eine konkrete Situation mit einer entsprechenden Referenzsituation verglichen wird. Sie erlaubt die Erstellung der Sicherheitsnachweise für Brandschutzkonzepte im Bereich Industrie- und Gewerbegebäude.

Die SIA-Empfehlung 183 ist nicht auf dem neuesten Stand der Normenentwicklung, besonders was die Referenzen anbelangt. Es handelt sich jedoch hierbei um das SIA Dokument mit der klarsten Darstellung der Terminologie, der Prinzipien zur Erstellung von Projekten und der Brandsicherheitsprüfung.

4.1.2 Vorschriften der VKF

Gemäss der SIA Norm 261, Kap. 15.2.5 sind die kantonalen Vorschriften der Feuerpolizei zwingend. Die kantonalen Gesetze wurden teilweise in den Dokumenten übernommen, welche von der Vereinigung Kantonalen Feuerversicherungen (VKF/AEAI) herausgegeben wurden.

Die VKF Vorschriften zeigen folgende Zusammensetzung (VKF Brandschutznorm 1-03d):

- Eine Brandschutznorm, welche den Schutzzumfang auf der Ebene allgemeiner Aufgaben, des Baus, der Brandschutzausstattungen und der Brandabwehr, der technischen Anlagen, der Gefahrstoffe und des Betriebs festlegt. Diese Norm ist seit 2004 zwingend und gilt für alle Kantone, vorbehaltlich der Ausnahmen für Sonderfälle, bei denen die kantonsübergreifende Behörde ihre Zustimmung erteilt hat (VKF Norm Art. 5)
- Brandschutzrichtlinien zur Ergänzung der Norm und Festlegung von Anforderungen und detaillierten Massnahmen (VKF Norm Art. 6)
- Anforderungen und Testmethoden zur Festlegung der Testverfahren und Bedingungen, die zwecks Zertifizierung und Zulassung von Brandschutzprodukten erforderlich sind (VKF Norm Art. 7)

Im weiteren Verlauf dieses Kapitels werden die in den VKF-Vorschriften vorhandenen Elemente vorgestellt, mit eventueller Ergänzung durch eine besondere Gesetzesanwendung für Bauwerke aus den SIA 261-266, die auf Tunnel vergleichbar/anwendbar sind.

4.2 Brandschutzziele

Die Norm der VKF legt die Brandschutzziele fest. Beim Bau, Betrieb und Unterhalt von Gebäuden, Bauwerken und Anlagen ist folgenden Anforderungen zu entsprechen (VKF Norm Art. 9):

- Gewährleistung der Sicherheit von Personen und Tieren
- Vorbeugung im Bereich Brände und Explosionen; Begrenzung der Ausbreitung der Flammen, der Wärme und des Rauches
- Begrenzung der Risiken der Brandausbreitung auf benachbarte Gebäuden, Bauwerken und Anlagen
- Erhalt der Strukturstabilität für eine bestimmte Zeit
- Ermöglichung einer wirksamen Brandbekämpfung und Gewährleistung der Sicherheit der Rettungskräfte

4.2.1 Risikoanalyse / Sicherheitsplanung

Die Norm und Richtlinien der VKF beruhen auf einem Ansatz der Risikoanalyse. Das Brandschutzziel gilt als erreicht, wenn den allgemeinen Vorschriften entsprochen wird. Es ist jedoch möglich, gleichwertige Ersatzmassnahmen vorzusehen, die von der Brandschutzbehörde zu genehmigen sind, oder in einem bestimmten Fall die Massnahmen zu ergänzen oder zu verringern.

Die Brandschutzanforderungen sind im Wesentlichen von folgenden Faktoren abhängig (VKF Norm Art. 10):

- Bautyp, Lage, Umgebungsrisiken, Umfang und Zuweisung
- Anzahl Stockwerke
- Anzahl Bewohner
- Wärmebelastung und Brandverhalten der Materialien, sowie die Gefahr der Rauchbildung
- Aktivierungsgefahr
- Einsatzmöglichkeiten der Feuerwehr
- Zusätzliche Sicherheitsnormen für behindertengerechte Gebäude

Bei Industrie-, Gewerbe- und Verwaltungsgebäuden erlaubt die Erläuterung 115-03d der VKF die Erbringung von Sicherheitsnachweisen auf der Basis eines Vergleichs einer konkreten Situation mit einer entsprechenden Vergleichssituation. Es handelt sich um eine Berechnungsmethode, welche das tatsächliche Brandrisiko ermittelt, welches dann seinerseits mit dem akzeptierten Risiko verglichen wird. Die Berechnung berücksichtigt, unter anderem, folgende Parameter:

- Dem Gebäudeinhalt innewohnende Gefahren: Wärmebelastung des Mobiliars, Brennbarkeit und Rauchgefahr
- Dem Gebäude innewohnende Gefahren: Wärmebelastung des Gebäudes und Fläche des Brandabschnitts
- Standardmassnahmen: Feuerwehr, Überflurhydranten und Feuerlöschanlagen, Zuverlässigkeit der Löschwasserversorgung, Länge der Zufuhrleitung ab dem Hydranten, Zugänglichkeit des Gebäudes und des Brandabschnitts
- Technische Massnahmen: Brandmeldeanlage, Sprinkleranlage, doppelter Schutz (Brandmelder + Sprinkler)
- Aktivierungsgefahr

Die Erläuterung der VKF, Richtlinie 115- VKF "Bewertung mit Blick auf die Grösse der Brandabschnitte", 115-03d, 2007 stellt eine Berechnungsmethode vor, mittels welcher eine konkrete Situation mit einer entsprechenden Referenzsituation verglichen wird. Sie erlaubt die Erstellung der Sicherheitsnachweise für Brandschutzkonzepte im Bereich Industrie- und Gewerbegebäude.

Bemerkung zum Bereich Erdbebenschutz von Gebäuden

Im Bereich Erdbebensicherheit hat die SIA das Pflichtenheft 2018 (SIA Pflichtenheft 2018, "Prüfung der Erdbebensicherheit bestehender Gebäude", Zürich, 2004) herausgegeben, welches sich mit der Erdbebensicherheit befasst, die ein bestehendes Bauwerk unter Berücksichtigung der Verhältnismässigkeit der Erdbebenschutzmassnahmen und der individuellen Sicherheitsmassnahmen aufweisen muss:

- Das individuelle Risiko wird als akzeptabel eingeschätzt, wenn die Wahrscheinlichkeit von Todesfällen den Wert von 5 - 10 pro Jahr nicht übersteigt
- Das kollektive Personenrisiko entspricht der Summe aller Erdbebenszenarien
- Eine Erdbebenschutzmassnahme gilt als
 - verhältnismässig, wenn die Rettungskosten weniger als CHF 10 Mio. pro gerettetem Leben betragen
 - aus Gründen der Vernunft erforderlich, wenn die Rettungskosten weniger als CHF 100 Mio. pro gerettetem Leben betragen

Die Erdbebenschutzkontrolle gemäss dem Pflichtenheft läuft in folgenden 3 Stufen ab:

- Zustandserhebung mit folgenden Elementen:
 - Einsichtnahme in die Unterlagen und Erhebungen über das Gebäude
 - Die Klassierung des Gebäudes gemäss den Bauwerksklassen der SIA Norm 261, Ziffer 16.3
 - Studie des Konzepts und der Baueinheiten
 - Feststellung der mechanischen Werte der Materialien
 - Studie zur Erdbebensicherheit
- Einschätzung der Erdbebensicherheit mittels Vergleich zwischen dem Entsprechungsfaktor des Gebäudes, den zulässigen Minderungsfaktoren und den minimalen Minderungsfaktoren
- Einsatzempfehlungen auf der Basis des Prinzips der Verhältnismässigkeit der Massnahmen unter Berücksichtigung der Anforderungen an die individuelle Sicherheit

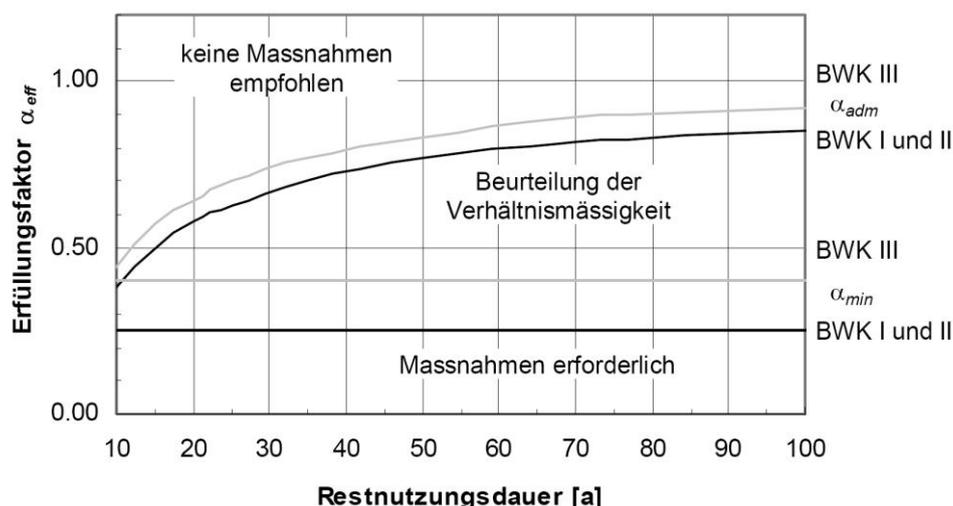


Abbildung 2: Einsatzempfehlungen auf der Basis des Prinzips der Verhältnismässigkeit der Massnahmen unter Berücksichtigung der Anforderungen an die individuelle Sicherheit

4.2.2 Schutz des Lebens

Siehe Kap. 4.2 und 4.2.1 dieses Berichtes.

Im Allgemeinen wird das Schutzziel durch die Anwendung der in den Richtlinien der VKF definierten Vorschriften erreicht. Es ist jedoch möglich, gleichwertige Ersatzmassnahmen vorzusehen, die von der Brandschutzbehörde zu genehmigen sind, oder in einem bestimmten Fall die Massnahmen zu ergänzen oder zu verringern (VKF Norm Art. 11).

4.2.3 Schutz des Bauwerks

Der Schutz des Bauwerks an sich bildet gemäss der VKF Norm kein eigenes Brandschutzziel mit Ausnahme der Tatsache, dass das Verhalten des Bauwerks erlauben muss, den in Kap. 4.2.1 definierten Zielen zu entsprechen.

Die tragenden Systeme des Gebäudes müssen so ausgelegt und dimensioniert sein, dass

- ihre Stabilität im Brandfall erhalten bleibt.
- der Ausfall eines Bauelements und die thermische Ausdehnung nicht zum Einsturz führen.
- die anstossenden Brandabschnitte keine übermässigen Schäden erleiden.

4.2.4 Schutz Dritter

Wie in Kap. 3.2.4 dieses Berichtes ausgeführt, sind die Bauwerke in den SIA Normen unter Berücksichtigung des Risikos für die Umwelt in drei Bauwerksklassen eingeteilt. Hieraus ergibt sich jedoch kein besonderer Einfluss bezüglich des Brandschutzes.

Die Gefahrstoffrichtlinie der VKF definiert Materialien und Produkte, die im Falles eines Brandes oder einer Explosion eine besondere Gefahr für Personen, Tiere und die Umwelt darstellen (VKF Norm Art. 63ff / VKF Richtlinie 27-03d Kap. 2.1.1). Dieses Dokument behandelt Lagerung, Handhabung und Klassierung und definiert die Anforderungen (Trennung von Materialien, Behälter, Gefahreneinschätzung, Bau und Standort, Belüftung, Entzündungsquelle, elektrische Anlagen, statische Aufladung, Blitzschutz, Warnung, Bedienungseinrichtung, Alarmanlagen und deren Standort) und legt die Anforderungen fest.

Gemäss der VKF-Norm gilt der Schutz von Dritten bei Einhaltung der Sicherheitsabstände zwischen Gebäuden, Bauwerken und Anlagen als gewährleistet.

4.2.5 Andere Brandschutzziele

Neben den oben aufgeführten wurden keine weiteren Schutzziele in den untersuchten Dokumenten gefunden.

4.2.6 Akzeptierte Risiken

Unter dem akzeptierten Risikostand ist der Stand zu verstehen, welcher der Referenzsituation entspricht, die in der Erläuterung 115-03d, Kap. 4.2.1 der Erläuterung der VKF definiert ist.

4.3 Brandschutzkonzept

4.3.1 Vorgaben zu baulichen Brandschutzmassnahmen

Die Ziele der Baumassnahmen der SIA Normen und der Richtlinien der VKF wurden in den Kapiteln 3.3.1 und 4.2 dieses Berichtes beschrieben.

Was im Besonderen die Brandschutzkonzeption im Vergleich zu derjenigen von Tunneln anbelangt ist unter anderem zu erwähnen, dass:

- Die Evakuierungs- und Rettungswege in der Richtlinie VKF 16-03d definiert werden. Diese Richtlinie zeigt die allgemeinen Anforderungen, die Anforderungen an spezielle

Bautypen und die Anforderungen bei speziellen Zuweisungen. Im Falle von Gebäuden erfahren Treppen und Flure eine Sonderbehandlung. Die Breite und Länge der Wege in einem Brandabschnitt (20 m oder 35 m bei zwei Ausgängen) und deren Gesamtlänge (weniger als 35 m oder 50 m bei zwei Treppenhäusern) werden reglementiert. Das Dokument enthält einen Anhang mit einer Reihe von Beispielen

- Die Richtlinie 15-03d der VKF einen Sicherheitsabstand zwischen den Gebäuden vorschreibt
- Die Unterteilung der Gebäude in Brandabschnitte erlaubt, das Brandrisiko zu verringern und einen akzeptablen Risikostand zu erreichen

4.3.2 Vorgaben zu technischen Brandschutzmassnahmen

Die Ziele der technischen Massnahmen der SIA Normen und der Richtlinien der VKF wurden in den Kapiteln 3.3.2 und 4.2 dieses Berichtes beschrieben.

Was im Besonderen die Brandschutzkonzeption im Vergleich zu derjenigen von Tunneln anbelangt ist unter anderem zu erwähnen, dass:

- Die Anbringung von Löschvorrichtungen (Sprinkler) in der Richtlinie 19-03d der VKF definiert wird. Diese Anlage kann bei der Festlegung des Feuerwiderstands der tragenden Strukturen, Wände und Böden berücksichtigt werden, die Brandabschnitte bilden. Die Minderung des Feuerwiderstands beträgt max. 30 Minuten

4.3.3 Vorgaben zu organisatorischen Brandschutzmassnahmen

Die Ziele der Organisationsmassnahmen der SIA Normen und der Richtlinien der VKF wurden in den Kapiteln 3.3.3 und 4.2 dieses Berichtes beschrieben.

4.4 Bemessungskonzept

Die Elemente der schweizerischen Normen wurden bereits im Kapitel 3.4 dieses Berichtes angesprochen. Im weiteren Verlauf dieses Kapitels werden die besonderen Elemente von Gebäuden behandelt.

4.4.1 Vorgaben zur Brandschutzbemessung

Die Ziele der Brandschutzdimensionierung werden in den SIA Normen und den Vorschriften der VKF (Richtlinie 14-03d) festgelegt. Die Dimensionierung der tragenden Systeme wird hauptsächlich anhand der Anzahl der Stockwerke, aller Wärmebelastungen, Bautyp und Zuweisung des Gebäudes festgestellt und festgelegt. Die folgenden Tabellen aus der Richtlinie 14-03d der VKF zeigen die Anforderungen an die Dimensionierung der tragenden Strukturen mit und ohne Sprinklerschutz.

ZZZ | Brandschutz im Tunnel:
 Schutzziele u. Brandbemessung
 Phase 1: Stand der Technik

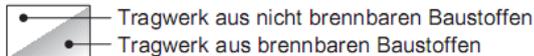
Anzahl Geschosse über Terrain	2 bis 600 m ² bb bis 1200 m ² nbb [1]	2 über 600 m ² bb über 1200 m ² nbb [1]	3	4	5 – 6	7 – 8 ohne Hochhäuser
• Wohnbauten • Bürobauten • Schulbauten	nicht brennbar [2] brennbar [2]	R 30 (nbb) R 30	R 30 (nbb) R 30	R 60 (nbb) R 60	R 60 (nbb) R 60/ EI 30 (nbb) verkleidet [4]	R 60 (nbb)
• Industrie-/Gewerbebauten q bis 1000 MJ/m ²	nicht brennbar [2] brennbar [2]	R 30 (nbb) R 30	R 30 (nbb) R 30	R 60 (nbb) R 60	R 60 (nbb)	R 60 (nbb)
• Industrie-/Gewerbebauten q über 1000 MJ/m ² • Bauten unbekannter Nutzung	R 30 (nbb) R 30	R 60 (nbb)	R 60 (nbb)	R 90 (nbb)	R 90 (nbb)	R 90 (nbb)
• Beherbergungs- betriebe [a] z.B. Krankenhäuser	R 60 (nbb)	R 60 (nbb)	R 60 (nbb)	R 60 (nbb)	R 60 (nbb)	R 60 (nbb)
• Beherbergungs- betriebe [b] z.B. Hotels	R 60 (nbb)	R 60 (nbb)	R 60 (nbb)	R 60 (nbb)	R 60 (nbb)	R 60 (nbb)
• Bauten mit Räumen mit grosser Personenbelegung • Verkaufsgeschäfte [c]	R 30 (nbb) R 30	R 30 (nbb) R 30	R 60 (nbb)	R 60 (nbb)	R 60 (nbb)	R 60 (nbb)
• Parkhäuser • Einstellräume für Motorfahrzeuge	nicht brennbar [2] brennbar [2]	R 30 (nbb) od. nicht brennbar [2] [3] R 30	R 30 (nbb) od. nicht brennbar [2] [3] R 30	R 60 (nbb) od. nicht brennbar [2] [3] R 60	R 60 (nbb) od. nicht brennbar [2] [3]	R 60 (nbb) od. nicht brennbar [2] [3]


 — Tragwerk aus nicht brennbaren Baustoffen

 — Tragwerk aus brennbaren Baustoffen

Tabelle 4: Auszug aus der Richtlinie 14-03d der VKF, Anforderungen an den Feuerwiderstand

Anzahl Geschosse über Terrain	2 bis 600 m ² bb bis 1200 m ² nbb [1]	2 über 600 m ² bb über 1200 m ² nbb [1]	3	4	5 – 6	7 – 8 ohne Hochhäuser
• Wohnbauten • Bürobauten • Schulbauten	nicht brennbar [2] brennbar [2]	nicht brennbar [2] brennbar [2]	nicht brennbar [2] brennbar [2]	R 30 (nbb) R 30	R 60 (nbb) R 60 [4]	R 60 (nbb)
• Industrie-/Gewerbebauten q bis 1000 MJ/m ²	nicht brennbar [2] brennbar [2]	nicht brennbar [2] brennbar [2]	nicht brennbar [2] brennbar [2]	R 30 (nbb) R 30	R 60 (nbb) R 60 [4]	R 60 (nbb)
• Industrie-/Gewerbebauten q über 1000 MJ/m ² • Bauten unbekannter Nutzung	nicht brennbar [2] brennbar [2]	R 30 (nbb) R 30	R 30 (nbb) R 30	R 60 (nbb)	R 60 (nbb)	R 60 (nbb)
• Beherbergungsbetriebe [a] z.B. Krankenhäuser	R 60 (nbb)	R 60 (nbb)	R 60 (nbb)	R 60 (nbb)	R 60 (nbb)	R 60 (nbb)
• Beherbergungsbetriebe [b] z.B. Hotels	R 30 (nbb) [5] R 30 [5]	R 30 (nbb) [5] R 30 [5]	R 30 (nbb) [5] R 30 [5]	R 60 (nbb)	R 60 (nbb)	R 60 (nbb)
• Bauten mit Räumen mit grosser Personenbelegung • Verkaufsgeschäfte [c]	nicht brennbar [2] brennbar [2]	R 30 (nbb) R 30	R 60 (nbb)	R 60 (nbb)	R 60 (nbb)	R 60 (nbb)
• Parkhäuser • Einstellräume für Motorfahrzeuge	nicht brennbar [2] brennbar [2]	nicht brennbar [2] brennbar [2]	nicht brennbar [2] brennbar [2]	R 30 (nbb) od. nicht brennbar [2] [3] R 30	R 60 (nbb) od. nicht brennbar [2] [3] R 60 [4]	R 60 (nbb) oder nicht brennbar [2] [3]



Fett: Reduzierte Anforderungen bei Vorhandensein von Sprinkleranlagen

Tabelle 5: Auszug aus der Richtlinie 14-03d der VKF, Anforderungen an den Feuerwiderstand mit Sprinkleranlage

Die Dimensionierung kann gemäss den schweizerischen Baunormen SIA 262 - 66, bzw. der Euronormen EN199x-1-2:200x unter der Bezeichnung SN EN 199s-1-2:200x erfolgen, die den Status einer schweizerischen Norm unter der Nummer 26x.002 innehaben. Diese Normen sind 2002 - 2006 in Kraft getreten.

Im Bereich Gebäude wird sehr häufig die Normbrandkurve nach ISO berücksichtigt. Die Verwendung einer externen Brandkurve oder Realkurve eines Feuers ist relativ selten und gelangt nur in besonderen Fällen zur Anwendung.

Wie in Kap. 3.4.1 dieses Berichtes ausgeführt, schlagen die Normen zwei Ansatzklassen vor: Den allgemeinen Ansatz mittels vereinfachter Berechnungen für bestimmte Elementarten oder mittels komplexer Berechnungen und dem Ansatz mit tabellarischen Werten.

Die SIA Normen 26x zeigen einen einfachen tabellarischen Ansatz der im Falle von Gebäuden oft erlaubt, die Brandschutzdimensionierung unter Einhaltung der Abmessungen der Strukturen, Verkleidungen und der Baubestimmungen zu gewährleisten. Die Euronormen enthalten einen tabellarischen Ansatz mit mehr Tabellen, bei denen mehr typische Fälle berücksichtigt werden.

4.4.2 Berechnungsmodell

Berechnungsmodelle werden in der SIA 260, Kap. 3.3.6 angesprochen. S. Kap. 3.4.2

4.4.3 Einwirkungsfaktoren

Siehe Kapitel 3.4.3 und 5.4.3 dieses Berichtes.

4.4.4 Bettung/Gebirgsumgebung

-

4.4.5 Einfluss des Brandes auf Materialien

Wie in Kapitel 3.4.5 dieses Berichtes ausgeführt, werden die Materialeigenschaften je nach Temperatur in den Euronormen EN199,-1-2:200s beschrieben, die den Status einer schweizerischen Norm unter der Nr. 26x.002 innehaben.

4.5 Konstruktive Durchbildung

4.5.1 Vorgaben zu konstruktiven Durchbildungen

Die Ziele der Baubestimmungen konzentrieren sich darauf, den Widerstand der tragenden Struktur und das ordnungsgemässe Verhalten der Brandabschnitte gemäss der Definition in Kapitel 4.2.3 sicherzustellen.

4.5.2 Materialanforderungen

Bezüglich der Verwendung sind Baumaterialien und Bauteile folgendermassen klassiert:

- Ehemals gemäss der Richtlinie 12-03d der VKF gemäss ihres Brennbarkeitsgrads (in absteigender Reihenfolge von 1 - 6), der Dichte des produzierten Rauchs (in absteigender Reihenfolgen von 1 - 3) und dem Brandindex
- Derzeit gemäss der Norm EN (auch in der Richtlinie der VKF beschrieben) gemäss ihrem Brandverhalten (Brennbarkeit in aufsteigender Reihenfolge von A1, A2, B, C, D bis F. Hierbei gilt gem. VKF 12-03d: Materialien, die die Anforderungen der Klasse E nicht erreichen, werden in die Klasse F eingeteilt und sind als Baustoffe nicht zugelassen. Eine weitere Klassierung erfolgt über die Rauchentwicklung (in aufsteigender Reihenfolge von s1 bis s3) und der Tropfenbildung beim Schmelzen oder Herabfallen weiss glühender Elemente (in aufsteigender Reihenfolge von d0 bis d2).

Die Verwendung brennbarer Materialien richtet sich nach ihrem Brandindex und nach der Verwendung der daraus gebildeten Elemente (Aussen-, Innenwand, Decke, Fussboden, Bodenbelag, Rohrleitungen, Isolation, Dach).

4.5.3 Konstruktive Massnahmen

Die SIA Baunormen 262-266 sowie die Euronormen 199x-1-2:200x zeigen verschiedene bauliche Massnahmen für die verschiedenen Baumaterialien auf, die in den Kapiteln 3.5.3 und 5.5.3 **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.** dieses Berichtes verzeichnet sind.

Vor allem im Bereich Gebäude decken die Richtlinien der VKF die Gesamtheit der Baumassnahmen im Besonderen bezüglich der Evakuierungs- und Rettungswege, des Sicherheitsabstands und der Brandabschnitte ab (siehe Kapitel 4.3.1).

4.5.4 Nutzungsanforderungen

Die Nutzung der Gebäude spielt eine wichtige Rolle bei der Festlegung der verschiedenen Kriterien zur Dimensionierung und Konzeption bezüglich der Brandsicherheit und wird in den Richtlinien und Vorschriften der VKF berücksichtigt.

5 Europäische Normung

5.1 Normen und Richtlinien

Die Regelung zur Brandschutzbemessung nach Eurocode wird in der folgenden Tabelle aufgelistet. Diese gelten jeweils mit einem Nationalen Anhang.

CEN-Norm	Titel
EN 1991-1-2 (Nov 2002)	Eurocode 1: Einwirkungen auf Tragwerk Teil 1-2: Allgemeine Einwirkungen - Brandeinwirkungen auf Tragwerk
EN 1992-1-2 (Okt 2006)	Eurocode 2: Planung von Stahlbeton und Spannbetontragwerken Teil 1-2: Allgemeine Regeln - Tragwerksbemessung für den Brandfall

Tabelle 6: Massgebende Eurocode Normen

Auf die nationalen Anhänge wird gesondert im jeweiligen Kapitel eingegangen.

5.1.1 EN 1991-1-2

Die EN 1991-1-2, [6] beschreibt bauartübergreifend die Brandeinwirkungen und definiert die Rechengrundlagen für die zugehörigen Lastannahmen.

5.1.2 EN 1992-1-2

Die Teile 1-2 des Eurocode 2 (EN 1992-1-2), [7] gelten in Verbindung mit den betreffenden EN 1992-1-1 und EN 1991-1-2 für die Bemessung bei Normaltemperatur. Sie regeln den vorbeugenden baulichen Brandschutz.

5.1.3 Richtlinie 2004/54/EG zur Sicherheit von Strassentunneln

Schwere Brandunfälle in einigen Strassentunneln der Alpenländer in den Jahren 1999 und 2001 waren ein Auslöser für eine weitere Verbesserung der Sicherheit in Strassentunneln. Normative Ergebnisse diesbezüglich geführter Diskussionen mündeten europaweit in der "Richtlinie des Europäischen Parlamentes und des Rates über Mindestanforderungen an die Sicherheit von Tunneln im transeuropäischen Strassennetz" (2004/54/EG) (EG-Tunnelrichtlinie).

Die "Richtlinie 2004/54/EG über die Mindestanforderungen an die Sicherheit von Tunneln im transeuropäischen Strassennetz" stellt Anforderungen an den Aufbau der Sicherheitsorganisation von Strassentunneln und die Verantwortlichkeiten der zuständigen Verwaltungsbehörde und macht zudem Vorgaben über die mindestens zu treffenden Sicherheitsmassnahmen. Bei besonders grossen oder komplexen Anlagen oder bei Abweichungen von den Mindestanforderungen verlangt sie die Durchführung einer Risikoanalyse (Richtlinie 2004/54/EG Art. 3, § (2)).

Es handelt sich um eine harmonisierte Richtlinie der EU, welche somit von den Mitgliedstaaten in nationales Recht überführt werden muss. Die Anforderungen gelten allerdings nur für Tunnel mit einer Länge von mehr als 500 m im transeuropäischen Strassennetz (Richtlinie 2004/54/EG § 3 und Art. 1 § (2)).

Analog zur Störfallverordnung in der Schweiz wurden in der EU mit der Richtlinie 96/82/EG (sog. Seveso II-Richtlinie) gesetzliche Vorgaben erarbeitet, wie das Auftreten von schweren Unfällen in der Industrie verhindert, bzw. deren Auswirkungen begrenzt werden sollen. Aufgrund deren Status als harmonisierte Richtlinie sind die EU-Mitgliedstaaten verpflichtet, ihren Inhalt in nationales Recht zu überführen. Die EU gibt ihren Mitgliedstaaten allerdings nicht vor, ob dazu ein risikobasierter oder ein deterministischer Ansatz zu verfolgen ist. Entsprechend werden beide Varianten in verschiedenen Staaten angewandt und die einzelnen Mitgliedstaaten haben jeweils verschiedene Herangehensweisen entwickelt, wie mit industriellen Risiken umgegangen werden soll. Einen risikobasierten Ansatz mit klar definierten Akzeptanz-Kriterien verfolgen nur wenige Staaten wie z.B. England, Holland und Luxemburg. Teilweise werden diese Akzeptanz-Kriterien in angepasster Form auch für

linienförmige Anlagen angewandt, wie z.B. für Erdgas-Hochdruckleitungen. In wie fern sie auch für Risiken des Strassenverkehrs oder von Tunnelbauwerken herangezogen werden, konnte im Rahmen des vorliegenden Projektes nicht abgeklärt werden.

5.2 Brandschutzziele

In der EN 1991-1-2 (im Vorwort) und in der EN 1992-1-2 (im Vorwort) werden auf Grundlage der Bauproduktenrichtlinie 89/106/EWG [53] verschiedene Brandschutzziele formuliert. Diese werden hier aufgelistet.

5.2.1 Risikoanalyse / Sicherheitsplanung

In der EN 1991-1-2 wird eine Risikoanalyse zu den möglichen Brandursachen erwähnt. Diese soll Grundlage für die Wahl eines Brandszenarios, bzw. eines Bemessungsbrand darstellen (EN 1991-1-2 Kap. 2.2). An dieser Stelle wird jedoch nicht weiter auf die genaue Handhabung und Ausführung einer Risikoanalyse eingegangen.

In der Richtlinie 2004/54/EG [8] werden Entscheidungsgrundlagen für Sicherheitsmassnahmen formuliert (Richtlinie 2004/54/EG Anhang 1, Kap. 1).

5.2.2 Schutz des Lebens

- Die Tragfähigkeit muss während eines bestimmten Zeitraums erhalten bleiben
- Die Entstehung und Ausbreitung von Feuer und Rauch innerhalb des Bauwerks muss begrenzt bleiben
- Die Selbstrettung muss möglich sein
- Die Sicherheit der Rettungskräfte muss gewährleistet sein

5.2.3 Schutz des Bauwerks

- Die Tragfähigkeit muss während eines bestimmten Zeitraums erhalten bleiben
- Die Entstehung und Ausbreitung von Feuer und Rauch innerhalb des Bauwerks muss begrenzt bleiben

5.2.4 Schutz Dritter

- Die Ausbreitung von Feuer auf benachbarte Bauwerke soll begrenzt werden

5.2.5 Andere Brandschutzziele

Weitere Brandschutzziele sind nicht erwähnt.

5.2.6 Akzeptierte Risiken

Es wurden keine Angaben zu akzeptierten Risiken in den untersuchten Dokumenten gefunden.

5.3 Brandschutzkonzept

Die EN 1991-1-2 und 1992-1-2 definieren die Einwirkungen im Brandfall und regeln die Berechnung und Bemessung von brandbeanspruchten Bauteilen und Tragwerken. Dabei darf als Brandbeanspruchung entweder die nominelle Temperatur-Zeit-Kurve, oder Naturbrandmodelle (berechnete Temperatur-Zeit-Kurven) zugrunde gelegt werden.

5.3.1 Vorgaben zu baulichen Brandschutzmassnahmen

Ausserhalb der Vorgaben zum Bemessungskonzept werden in EN 1991 und EN 1992 keine weiteren Vorgaben zum baulichen Brandschutz gemacht.

In der Richtlinie 2004/54/EG [8] Anhang 1 (Kap. 2) werden für Sicherheitsmassnahmen entsprechende bauliche Schutzmassnahmen formuliert.

5.3.2 Vorgaben zu technischen Brandschutzmassnahmen

Ausserhalb der Vorgaben zum Bemessungskonzept werden in EN 1991 und EN 1992 keine weiteren Vorgaben zum baulichen Brandschutz gemacht.

In der Richtlinie 2004/54/EG [8] Anhang 1 (Kap. 2) werden für Sicherheitsmassnahmen entsprechende technische Schutzmassnahmen formuliert.

5.3.3 Vorgaben zu organisatorischen Brandschutzmassnahmen

Ausserhalb der Vorgaben zum Bemessungskonzept werden in im EN 1991 und EN 1992 keine weiteren Vorgaben zum organisatorischen Brandschutz gemacht.

In der Richtlinie 2004/54/EG [8], Anhang 1 (Kap. 3) werden für Sicherheitsmassnahmen entsprechende organisatorische Schutzmassnahmen formuliert.

5.4 Bemessungskonzept

Die Eurocodes sehen brandschutztechnische Nachweise in drei Stufen vor (EN 1992-1-2, Kap. 4.1).

Stufe 1: Nachweis mittels tabellarischer Daten

Stufe 2: Nachweis mittels vereinfachter Rechnungsverfahren

Stufe 3: Nachweis mittels allgemeiner Rechnungsverfahren

5.4.1 Vorgaben zur Brandschutzbemessung

Brandlast

Die Brandlast beinhaltet den gesamten brennbaren Inhalt eines Gebäudes und die relevanten brennbaren Teile des Tragwerks einschliesslich Bekleidung und Ausrüstung und können nach EN 1991-1-2, Anhang E ermittelt werden.

Feuerwiderstandsklasse

Die Feuerwiderstandsklasse wird nach einzelnen Kriterien spezifiziert. Hierbei können Anforderungen an die Tragfähigkeit (R), den Raumabschluss (E) und die Wärmedämmung (I) gestellt werden. Die geforderte Widerstandsdauer wird in Minuten angegeben.

Die geforderte Feuerwiderstandsfähigkeit kann auch durch Verwendung einer Schutzschicht gewährleistet werden. Das verwendete Material sollte durch geeignete Prüfverfahren beurteilt werden (EN 1992-1-2, Kap. 4.7). Mit dem Prüfverfahren sollte das Material für alle zu erwartenden Temperaturen und Verformungen auf Geschlossenheit und Zusammenhang untersucht werden.

Bauaufsichtliche Benennung	Tragende Bauteile		Nichttragende Innenwände	Nichttragende Außenwände
	ohne Raumab.	mit Raumab.		
feuerhemmend	R 30	REI 30	EI 30	E 30 (i → o) und EI 30 (i ← o)
	[F 30]	[F 30]	[F 30]	[W 30]
	R 60	REI 60	EI 60	E 60 (i → o) und EI 60 (i ← o)
	[F 60]	[F 60]	[F 60]	[W 60]
feuerbeständig ¹⁾	R 90	REI 90	EI 90	E 90 (i → o) und EI 90 (i ← o)
	[F 90]	[F 90]	[F 90]	[W 90]
Feuerwiderstandsdauer 120 Min.	R 120	REI 120		
	[F 120]	[F 120]		
Brandwand	–	REI-M 90	EI-M 90	
¹⁾ zurzeit nach § 17 Abs. 2 MBO (in den wesentlichen Teilen aus nicht brennbaren Baustoffen)				

**Feuerwiderstandsklassen von Bauteilen nach DIN EN 13501-2 und DIN EN 13501-2
und ihre Zuordnung zu den bauaufsichtlichen Benennungen [Klassifizierung nach DIN 4102]**
(Auszug aus Anlage 0.1.2. zur Bauregelliste A Teil 1, Ausgabe 2002/1)

Tabelle 7: Zuordnung der Feuerwiderstandsklassen nach DIN EN 13501-2

Bauaufsichtliche Benennung	Zusatzanforderungen		Europäische Klasse nach DIN EN 13501-1	Klasse nach DIN 4102-1
	kein Rauch	kein brennb. Abfällen/Abtropfen		
Nicht brennbar	•	•	A1	A1
	•	•	A2 – s1 d0	A2
Schwer entflammbar	•	•	B, C – s1 d0	B1 ¹⁾
		•	B, C – s3 d0	
	•		B, C – s1 d2	
			B, C – s3 d2	
Normal entflammbar		•	D – s3 d0	B2 ¹⁾
			D – s3 d2	
			E – d2	
Leicht entflammbar			F	B3
¹⁾ Angaben über hohe Rauchentwicklung und brennendes Abtropfen/Abfällen im Verwendbarkeitsnachweis und in der Kennzeichnung				

Klassifizierung des Brandverhaltens (ohne Bodenbeläge) nach DIN EN 13501-1

Tabelle 8: Zuordnung der europäischen Baustoffklassen nach DIN EN 13501-1

Temperatur-Zeit-Kurven

Es wird zwischen nominelle (konventionelle) Temperatur-Zeit-Kurven und parametrische Temperatur-Zeit-Kurven unterschieden. (Definition, EN 1991-1-2 Kap. 1.5.3.16).

Nominelle Temperatur-Zeit-Kurven sind für die Klassifizierung oder den Nachweis der Feuerwiderstandsfähigkeit anerkannt (EN 1991-1-2. Kap. 3.2). Dazu gehören:

- Einheits-Temperatur-Zeit-Kurve
- Aussenbrandkurve
- Hydrokarbon-Brandkurve

Parametrische Temperatur-Zeit-Kurven werden auf der Grundlage von Brandmodellen und den spezifischen physikalischen Parametern, die die Bedingungen im Brandabschnitt beschreiben, ermittelt (Naturbrandmodelle, EN 1991-1-2, Kap. 3.3).

- Vereinfachte Brandmodelle
 - Vollbrand
 - Lokaler Brand
- Allgemeine Brandmodelle (EN 1991-1-2, Kap. 3.3.2 (2))
 - Ein-Zonen-Modell: Geht von einer gleichmässigen zeitabhängigen Temperaturverteilung im Brandabschnitt aus
 - Zwei-Zonen-Modell: Geht von zwei aufeinander folgenden Schichten aus. Eine obere Schicht mit zeitabhängiger Schichtdicke und gleichmässiger zeitabhängiger Temperatur und einer unteren Schicht mit gleichmässiger zeitabhängigen, geringeren Temperatur
 - Feldmodell: Mit dem Verfahren der Fluid-Dynamik wird die Temperaturentwicklung in einem Brandabschnitt in Abhängigkeit von der Zeit und des Raumes berechnet.

5.4.2 Berechnungsmodell

Nachweisverfahren mittels tabellarischer Daten (Stufe 1)

Das Nachweisverfahren beschränkt sich darauf, die Querschnittsabmessungen oder Bekleidungsicken eines Bauteils mit Werten zu vergleichen, die nach Brandversuchsergebnissen zum Erreichen der Feuerwiderstandsdauer erforderlich sind (Eurocode 1992-1-2, Kap. 5).

Vereinfachtes Rechnungsverfahren (Stufe 2)

Mit diesem Rechnungsverfahren wird für eine geforderte Feuerwiderstandsdauer t nachgewiesen, dass die massgebende Lasteinwirkung $E_{fi,d}$ kleiner als der Bauteilwiderstand $R_{fi,d,t}$ ist.

Diese Berechnung basiert auf der Annahme, dass die dem Brand ausgesetzten Betonbereiche nicht mehr mit vollem Querschnitt tragfähig sind. Diese Beeinflussung wird durch die Verkleinerung der Betonquerschnittsfläche und der temperaturbedingten Reduzierung der Materialfestigkeit berücksichtigt.

Der Tragsicherheitsnachweis des Restquerschnitts wird analog zum Nachweis für Normaltemperatur mit reduzierter Beton- und Stahlfestigkeit (EN 1992-1-2, Anhang A, B) geführt.

Allgemeines Berechnungsverfahren (Stufe 3) (EN 1991-1-2, Kap. 4.3)

Mittels des allgemeinen Berechnungsverfahrens können Einzelbauteile, Teil- und Gesamttragwerke mit beliebiger Querschnittsart und -form und bei voller oder lokal begrenzter Temperatur bemessen werden.

Der Nachweis wird in zwei Analysen aufgeteilt:

1. Thermische Analyse (EN 1992-1-1, Kap. 4.3.2)

Grundlage bildet die Theorie der Wärmeübertragung.

Berücksichtigt werden muss:

- Die thermische Einwirkung (nach EN 1991-2-2)
- Die temperaturabhängigen Materialeigenschaften
- Gegebenenfalls die Einwirkung von Schutzschichten

Der Einfluss des Feuchtgehaltes und der Feuchtigkeitswanderung im Beton, bzw. in der Schutzschicht darf auf der sicheren Seite liegend vernachlässigt werden.

Die Temperaturprofile in einem Stahlbetonbauteil dürfen ohne Berücksichtigung der Bewehrung ermittelt werden.

Die Auswirkung einer ungleichförmigen Temperaturbeanspruchung und Wärmeübertragung auf anschließende Bauteile dürfen berücksichtigt werden.

2. Mechanische Analyse (EN 1991-1-2, Kap. 4.3.3)

Bei der mechanischen Analyse werden das Trag- sowie auch das Verformungsverhalten der brandbeanspruchten Bauteile oder Tragwerke untersucht.

Dabei werden auf der Seite der Einwirkungen

- Einflüsse aus der Belastung,
- Einflüsse aus behinderten thermischen Verformungen (Zwangskräfte und -momente) und
- aus nichtlinearen geometrischen Einflüssen

berücksichtigt.

Auf der Seite des Bauteilwiderstands werden

- temperaturabhängige thermo-mechanische Eigenschaften der Baustoffe und
- thermische Dehnung

berücksichtigt.

Die Gültigkeit des allgemeinen Rechenverfahrens ist wie folgt nachzuweisen:

- Die Entwurfsannahmen sind auf der Grundlage massgebender Versuchsergebnisse zu rechtfertigen
- Die Auswirkung der kritischen Parameter ist mit einer Verträglichkeitsanalyse zu prüfen

Weitere Nachweise

Der Schub- und Torsionsnachweis wird grundsätzlich nach EN 1992-1-1 ermittelt, wobei für jeden Teil des Querschnitts reduzierte Materialeigenschaften und Vorspannung zu verwenden sind.

Wird der Schubnachweis mit dem vereinfachten Rechenverfahren nachgewiesen, ist der Nachweis am reduzierten Querschnitt zu führen.

Ist eine Verankerung aus Brandschutzgründen erforderlich, so darf die Verankerung unter Verwendung der temperaturabhängig reduzierten Materialeigenschaften nach EN 1992-1-1 berechnet werden.

5.4.3 Einwirkungsfaktoren

Thermische und mechanische Einwirkungen

Siehe Kap. 5.4.2 dieses Berichtes.

5.4.4 Bettung/Gebirgs Umgebung

Die untersuchten Dokumente beinhalten keine Angaben zum Thema „Bettung und Gebirgs Umgebung“.

5.4.5 Einfluss des Brandes auf Materialien

Beim vereinfachten Nachweisverfahren sowie beim allgemeinen Nachweisverfahren wird die Beeinflussung durch die ansteigende Temperatur auf die Materialeigenschaften berücksichtigt.

5.5 Konstruktive Durchbildung

5.5.1 Vorgaben zu konstruktiven Durchbildungen

Vorgaben zur konstruktiven Durchbildung ergeben sich durch alle Verfahren (Stufe 1 bis 3). In den Stufen 2 und 3 ergeben sich die Bauteilabmessungen aus den geführten Nachweisen. Für das Verfahren mittels tabellarischer Daten (Stufe 1) werden

bauteilbezogenen Querschnittsabmessungen und Mindestrandabstände der Bewehrung der entsprechenden Feuerwiderstandsklasse zugewiesen (EN 1992-1-2, Kap. 5).

5.5.2 Materialanforderungen

Materialanforderungen werden durch die definierte Feuerwiderstandsklasse festgelegt.

Die geforderte Feuerwiderstandsfähigkeit kann auch durch Verwendung einer Schutzschicht gewährleistet werden. Das verwendete Material sollte durch geeignete Prüfverfahren beurteilt werden (EN 1992-1-2, Kap. 4.7). Mit dem Prüfverfahren sollte das Material für alle zu erwartenden Temperaturen und Verformungen auf Geschlossenheit und Zusammenhang untersucht werden (gemäss EN 1992-1-2).

5.5.3 Konstruktive Massnahmen

In der Richtlinie 2004/54/EG [8] Anhang 1 (Kap. 1.2 ff) werden Mindestanforderungen an die konstruktive Durchbildung der Tunnel formuliert.

5.5.4 Nutzungsanforderungen

In der Richtlinie 2004/54/EG [8], Anhang 1 werden Mindestanforderungen an die konstruktive Durchbildung der Tunnel formuliert.

6 Deutschland

6.1 Normen und Richtlinien

6.1.1 Musterbauordnung / Landesbauordnung

In Deutschland werden die allgemeinen Brandschutzanforderungen im Grundgesetz den einzelnen Ländern zugewiesen und in der Musterbauordnung (MBO) definiert. Die Bundesländer setzen diese in die jeweilige Landesbauordnung (LBO) um. Diese allgemeine Sicherheitsphilosophie der LBO in Bezug auf die erforderliche Brandsicherheit bei speziellen Risikoverhältnissen von Sonderbauten ist komplex und vielfach eine Ermessungsentscheidung.

6.1.2 Richtlinie für Ausstattung und den Betrieb von Strassentunneln (RABT)

Die "Richtlinie für die Ausstattung und den Betrieb von Strassentunneln" (RABT, Ausgabe von 2006, [15]) der Forschungsgesellschaft für Strassen- und Verkehrswesen führt die EU-Richtlinie „2004/54/EG“ des Europäischen Parlamentes und des Rates vom 29. April 2004 über Mindestanforderungen an die Sicherheit von Tunneln im transeuropäischen Strassennetz in nationales Recht über und konkretisiert diese in vielen Punkten. Zusammen mit den „Zusätzlichen Technische Vertragsbedingungen und Richtlinien für Ingenieurbauten, Teil 5 Tunnelbau“ (ZTV-Ing) [14], bietet die RABT eine Planungsgrundlage für die Erstellung eines Strassentunnels, die getroffenen Festlegungen können jedoch die fachtechnische Untersuchung und Planung in jedem Einzelfall nicht ersetzen.

6.1.3 Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen für Ingenieurbauwerke (ZTV-Ing, Teil 5)

Die ZTV-Ing gilt für die bautechnische Ausführung neuer sowie für die Erhaltung bestehender Strassentunnel. Es werden Regelungen für Tunnel in geschlossener Bauweise (bergmännischer Tunnelbau), in offener Bauweise (Tagbau) sowie maschinelle Schildvortriebsverfahren aufgeführt. Ein separates Kapitel ist der betriebstechnischen Ausrüstung gewidmet (ZTV-Ing, Teil 5, Abschnitt 4).

6.1.4 Europäische Normung

Für den rechnerischen Nachweis des konstruktiven Brandschutzes stehen DIN EN 1991-1-2 [6] und DIN EN 1992-1-2 [7] zur Verfügung.

6.1.5 DIN 4102

Eine zweite Möglichkeit für den rechnerischen Nachweis ist mithilfe der Anwendungsnorm DIN 4102-22 [11] in Verbindung mit der DIN 4102-4 möglich (s. Kap. 6.4 dieses Berichtes).

6.1.6 Leitfaden: Ingenieurmethoden des Brandschutzes

Als Hilfestellung für Sicherheitsbetrachtungen oder Risikoanalysen wurde von der Vereinigung zur Förderung des Deutschen Brandschutzes e. V. (vfdb) der Leitfaden „Ingenieurmethoden des Brandschutzes“ herausgegeben [16]. Der Leitfaden soll zum einen ermöglichen, ein Gebäude besonderer Art und Nutzung risikogerecht und wirtschaftlich auszulegen. Zum anderen soll der Aufwand für eine brandschutztechnische Prüfung möglichst gering gehalten werden (vfdb Leitfaden, Kap. 1.1). Der Planer muss die Anwendbarkeit auf seinen Fall in eigener Verantwortung prüfen.

6.2 Brandschutzziele

6.2.1 Risikoanalyse / Sicherheitsplanung

Die RABT formuliert Anforderungen an das Gesamtsicherheitskonzept und benennt

Parameter, welche bei der Erstellung einer Risikoanalyse berücksichtigt werden müssen.

Die Risikoanalyse sowie die Sicherheitsbetrachtung werden im Leitfaden [16] detailliert behandelt. Für den Leitfaden wird jedoch kein rechtlicher Hintergrund ausgewiesen.

6.2.2 Schutz des Lebens

Die Rettung von Mensch und Tier sowie wirksame Löscharbeiten sollen möglich bleiben (MBO/ LBO).

6.2.3 Schutz des Bauwerks

Der Entstehung eines Brandes und der Ausbreitung von Feuer und Rauch soll vorgebeugt werden (MBO / LBO).

Die ZTV-Ing, Teil 5, Abschnitt 1 (Kap. 10) definiert weitere Ziele:

- Es dürfen keine Schäden auftreten, welche die Standsicherheit des Tunnels gefährden
- Es darf keine bleibende Verformung der Konstruktion entstehen, die die Gebrauchstauglichkeit des Tunnels einschränkt
- Die Dichtigkeit muss weitgehend gewährleistet bleiben

6.2.4 Schutz Dritter

Öffentliche Sicherheit und Ordnung dürfen nicht gefährdet werden (MBO/LBO).

6.2.5 Andere Brandschutzziele

Im Leitfaden „Ingenieurmethoden des Brandschutzes“ [16] werden Schutzinteressen und Schutzziele unterschieden. Schutzinteressen beschreiben, warum etwas erreicht werden soll, während Schutzziele angeben, was erreicht werden soll. Schutzinteressen sind (Leitfaden, Kap. 3.3.1):

- Leben und Gesundheit von Menschen und Tieren
- Schutz von Sachwerten
- Schutz der Umwelt (Luft, Wasser, Erdreich, Vermeidung von Brandschutt)
- Einsatzmöglichkeiten und Sicherheit der Feuerwehren
- Versicherbarkeit
- Schutz von Waren und Produktionsmitteln
- Begrenzung von Betriebsunterbrechungen
- Vermeidung von Straf- und zivilrechtlicher Haftung/Umweltproblemen, die ein negatives Image in der Öffentlichkeit bewirken/Probleme beim Wiederaufbau / Optimierung der Kosten für die Versicherungsdeckung
- Bewahrung von Kreditwürdigkeit und Versicherbarkeit

Um die Schutzinteressen zu realisieren, werden in [16] mögliche Schutzziele formuliert (Leitfaden, Kap. 3.3.2):

- Unversehrtheit von Personen
- Verhinderung der Brandentstehung
- Begrenzung der Brand- und Rauchausbreitung
- Schaffung von Voraussetzungen für eine (erfolgreiche) Intervention durch die Feuerwehr, nachweisbar durch personelle und technische Ausstattung zur Sicherstellung einer vereinbarten Hilfsfrist
- Tragfähigkeit der Baukonstruktion bei bestimmter Brandeinwirkung über eine definierte Zeitdauer
- Sicherstellung der Mindestdicke einer raucharmen Schicht im Brandfall über einen bestimmten Zeitraum

Die Konkretisierung der allgemein gehaltenen Formulierungen stellt einen wesentlichen

Bestandteil des Leitfadens „Ingenieurmethoden des Brandschutzes“ [16] dar.

6.2.6 Akzeptierte Risiken

Im Leitfaden [16] werden keine expliziten akzeptierten Risiken aufgeführt. Hingegen wird darauf verwiesen, dass akzeptierte Schadenereignisse im Rahmen der Konkretisierung von Schutzziele zu vereinbaren sind.

6.3 Brandschutzkonzept

6.3.1 Vorgaben zu baulichen Brandschutzmassnahmen

Die Unterteilung in Brandabschnitte sowie Vorgaben zu Sicherheitseinrichtungen für Verkehr wie Notausgänge, Flucht- und Rettungswege sowie Brandnotleuchten und Fluchtwegkennzeichnung sind in der RABT [15] geregelt.

Vorgaben bezüglich Tragsicherheit und Gebrauchstauglichkeit der tragenden Bauteile im Brandfall werden über die Feuerwiderstandsklassen gemacht (s. Kap. 6.4.1 dieses Berichtes).

6.3.2 Vorgaben zu technischen Brandschutzmassnahmen

Das Lüftungskonzept hängt im Wesentlichen von der Länge des Tunnels und von der Tunnelluftströmung ab (RABT, [15]) Kap. 4, Lüftung, S. 20 ff.

Vorgaben für Brandmelde- und Löschanlagen werden in Kap. 6 Sicherheitseinrichtungen für den Verkehr, S. 34 ff behandelt.

6.3.3 Vorgaben zu organisatorischen Brandschutzmassnahmen

Vorgaben zu Organisation und Betrieb werden in [15], Kap. 1, S. 8 ff beschrieben. Diese beziehen sich allerdings nicht explizit auf organisatorische Massnahmen, sondern auf Sicherheitsmassnahmen im Allgemeinen.

6.4 Bemessungskonzept

6.4.1 Vorgaben zur Brandschutzbemessung

Brandschutz nach ZTV-Ing

Der Nachweis betreffend Lastfall Brandeinwirkung kann durch die Einhaltung der konstruktiven Anforderungen der ZTV-Ing eingehalten werden oder muss durch rechnerische Nachweisverfahren sichergestellt werden.

Es ist sicher zu stellen, dass die tragende Bewehrung im Brandfall nicht über 300°C erwärmt wird. Dies kann durch eine ausreichende Betondeckung gewährleistet werden, ZTV-Ing., Teil 5, Abschnitt 1, Kap. 10.

Brandlast

Nach EC 1 und EC 2 kann die Brandlast auf der sicheren Seite liegend angenommen werden. Der Leitfaden „Ingenieurmethoden des Brandschutzes“ [16] geht auf diverse Möglichkeiten ein, Bemessungsbrände festzulegen (Leitfaden, Kap. 4). Dabei wird v.a. auf die DIN 18232-2 sowie DIN EN 1991-1-2 [6] Bezug genommen.

Feuerwiderstand

Die baulichen Anforderungen werden in der DIN 4102 mittels sogenannten Feuerwiderstandsklassen spezifiziert. Die Klassen unterscheiden sich hinsichtlich der statischen Funktion der Bauteile („tragend“/„nichttragend“) sowie ihrer Funktion hinsichtlich Raumabschluss.

In der DIN 4102 wird die Feuerwiderstandsklasse „F“ von tragenden Bauteilen und nichttragenden Wänden nach der erforderlichen Widerstandsdauer bei Normbrandbedingungen in Minuten benannt.

Tabelle 2. Zuordnung der Feuerwiderstandsklassen nach DIN EN 13501-2 und DIN 4102-2 zu den bauaufsichtlichen Anforderungen (nach Anlage 3.1/9 der Muster-Liste der Techn. Baubestimmungen [8])

Bauaufsichtliche Anforderung	Tragende Bauteile ohne Raumabschluss	Tragende Bauteile mit Raumabschluss	Nichttragende Innenwände
feuerhemmend	R 30 F 30	REI 30 F 30	EI 30 F 30
hochfeuerhemmend	R 60 F 60	REI 60 F 60	EI 60 F 60
feuerbeständig	R 90 F 90	REI 90 F 90	EI 90 F 90
Brandwand	–	REI-M 90	EI-M 90

Tabelle 9: Zuordnung der Feuerwiderstandsklassen nach DIN EN 13501-2

Tabelle 1. Zuordnung der europäischen Baustoffklassen nach DIN EN 13501-1 und der nationalen Baustoffklassen nach DIN 4102-1 zu den bauaufsichtlichen Anforderungen (in Anlehnung an Anlage 0.2.2 der Bauregelliste A Teil 1 [4])

Bauaufsichtliche Anforderung	National DIN 4102-1	Zusatzanforderung		Europäisch DIN EN 13501-1
		kein Rauch	kein brennendes Abfallen oder Abtropfen	
nichtbrennbar	A1	X	X	A1
	A2	X	X	A2 –s1, d0
schwerentflammbar	B1	X	X	B –s1, d0 C –1, d0
			X	A2 –s2, d0 A2 –s3, d0 B –s2, d0 B –s3, d0 C –s2, d0 C –s3, d0
		X		A2 –s1, d1 A2 –s1, d2 B –s1, d1 B –s1, d2 C –s1, d1 C –s1, d2
				A2 –s3, d2 A2 –s3, d2 B –s3, d2
normalentflammbar	B2		X	D –s1, d1 D –s2, d1 D –s3, d1 D –s1, d2 D –s2, d2 D –s3, d2
				E –d2
leichtentflammbar	B3			F

Tabelle 10: Zuordnung der europäischen Baustoffklassen nach DIN EN 13501-1

Temperatur-Zeit-Kurven

Die ZTV-Ing. legt für die brandschutztechnische Bemessung von Strassentunneln die folgende Temperatur-Zeit-Kurve fest:

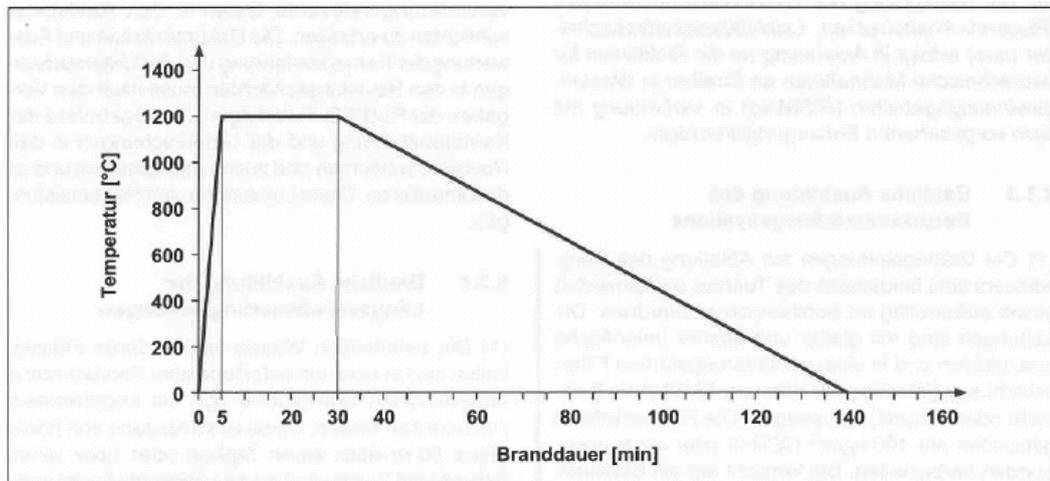


Abbildung 3: Temperatur-Zeit-Verlauf der Brandbelastung nach ZTV-Ing

Grundlage für die Tabellen nach DIN 4102 ist die Einheitstemperaturkurve (ETK). Für die Bemessung nach europäischer Norm gelten die Aussagen in Kapitel 5.4.1 dieses Berichtes.

Verfahren nach Tabelle der DIN 4102-4

Mit diesem Verfahren können Einzelbauteile und Bauwerksausschnitte (z.B. durchlaufende Stahlbetonbalken, Rippendecken) brandschutztechnisch bemessen werden. Die Anwendung dieser Tabelle setzt voraus, dass die Bauteile an denen die klassifizierten Bauteile angeschlossen werden, mindestens derselben Feuerwiderstandsklasse gem. DIN 4102 angehören.

Die Tabellen enthalten, in Abhängigkeit von der Feuerwiderstandsklasse, Mindestwerte für die Querschnittsabmessungen und für Achsabstände der Bewehrung u, wobei für Stützen und belastete Wände als zusätzlicher Parameter der Lastausnutzungsfaktor angegeben ist. Die Tabellen gelten für Stahlbetonbewehrung mit der kritischen Temperatur $\text{crit } T = 500^\circ\text{C}$.

6.4.2 Berechnungsmodell

Verfahren nach europäischer Normung

Das in der europäischen Normung aufgeführte Verfahren beruht auf einem dreistufigen Vorgehen (s. Kap. 5.4 dieses Berichtes).

Das Verfahren mittels tabellarischer Daten (Stufe 1) ist der DIN 4102-4 gleichwertig und ist zur Anwendung in Deutschland uneingeschränkt frei gegeben.

Für das vereinfachte (Stufe 2) und das allgemeine (Stufe 3) Rechenverfahren muss sichergestellt werden, dass das in Deutschland brandschutztechnische Sicherheitsniveau eingehalten wird. Der Nachweis nach Stufe 2 und 3 darf nur von Personen mit einer entsprechenden Ausbildung, bzw. Erfahrung durchgeführt werden. Darüber hinaus sind Nachweise mittels dem allgemeinen Verfahren als statische Berechnungen schwieriger Tragwerke einzustufen und grundsätzlich nach dem Vier-Augen-Prinzip zu prüfen.

6.4.3 Einwirkungsfaktoren

Die RABT gibt als thermische Einwirkung die Temperatur-Zeit-Kurve, Kapitel 6.4.1, Abbildung 3: Temperatur-Zeit-Verlauf der Brandbelastung nach ZTV-Ing vor.

6.4.4 Bettung/Gebirgs Umgebung

Der Einfluss der Bettung und der anstehenden Geologie auf die Brandschutzbemessung

wird weder in der DIN noch in der RABT speziell erwähnt.

6.4.5 Einfluss des Brandes auf Materialien

Der Einfluss Brand auf die Materialien fließt ins Nachweisverfahren nach Stufe 2 und Stufe 3 der europäischen Normung ein.

Nach ZTV-Ing. dürfen keine Materialien verwandt werden, welche bei Brandeinwirkung für das Bauwerk oder Personen schädigende Stoffe freisetzt (ZTV-Ing Teil 5, Kap. 10.4.1).

6.5 Konstruktive Durchbildung

6.5.1 Vorgaben zu konstruktiven Durchbildungen

Werden die konstruktiven Massnahmen nach ZTV-Ing eingehalten, sind keine weiteren Brandschutztechnischen Massnahmen erforderlich.

6.5.2 Materialanforderungen

Für den konstruktiven Innenausbau sind Baustoffe der Baustoffklasse A nach DIN 4102 zu verwenden. Bei von der DIN 4102 nicht erfassten Baustoffen ist die Gleichwertigkeit mit der Baustoffklasse A nachzuweisen, oder diese nicht erfassten Baustoffe sind durch zusätzliche Brandschutzmassnahmen gegen Brandeinwirkung zu schützen (ZTV-Ing Teil 5, Kap. 10.4.1).

6.5.3 Konstruktive Massnahmen

Die „Zusätzlichen Technischen Vertragsbedingungen und Richtlinien für Ingenieurbauten, Teil 5 Tunnelbau“ (ZTV-Ing) [14] führen unter dem Kapitel 10, „Baulicher Brandschutz“ Empfehlungen für die konstruktive Durchbildung von Tunnelinnenschalen und Zwischendecken sowie für den Innenausbau auf.

6.5.4 Nutzungsanforderungen

Die Nutzung des Tunnels hat keinen direkten Einfluss auf Brandschutzmassnahmen im Sinne dieses Forschungsvorhabens. Hingegen sind indirekte Einflüsse feststellbar. In RABT [15] werden diverse Parameter aufgeführt, welche die Sicherheit eines Tunnels (und damit auch dessen Konstruktion) beeinflussen. Unter anderem spielt dabei die Nutzung eine wesentliche Rolle (Richtungsverkehr/Gegenverkehr, Anteil des LKW-Verkehrs, Vorkommen, Anteil und Art des Gefahrgutverkehrs, etc.).

Der Leitfaden „Ingenieurmethoden des Brandschutzes“ [16] nimmt bei der Festlegung des Bemessungsbrandes explizit Bezug auf die Nutzung des Bauwerks, ist dabei aber eher auf Hochbauten ausgelegt als auf Tunnels.

7 Österreich

7.1 Normen und Richtlinien

Die in Österreich geltende ÖNORM basiert auf der Grundlage des Eurocode.

Weiterhin existieren die ÖVBB-Richtlinien:

- "Innenschalenbeton" [23] sowie
- "Erhöht brandbeständiger Beton für unterirdische Verkehrsbauwerke"[24], welche Angaben zum baulichen Brandschutz enthalten.

Für die Bewertung des Brandrisikos gelten in Österreich die Normen ÖNORM B 3800 [22] und DIN 4101 sowie die betreffenden Eurocodes. In der Richtlinie RVS 09.01.45 "Baulicher Brandschutz in Strassenverkehrsbauten" sind Vorgaben für Strassentunnel und Einhausungen ab einer Länge von 200 m enthalten (RVS 09.01.45 Kap. 2).

Auf nationaler Ebene stehen dabei im Wesentlichen zur Verfügung [22]:

- ÖNORM B 3800 - Teil 1 (Baustoffe: Anforderungen und Prüfungen)
- ÖNORM B 3800 - Teil 2 (Bauteile: Begriffsbestimmungen, Anforderungen, Prüfungen)
- ÖNORM B 3800 - Teil 3 (Sonderbauteile: Begriffsbestimmungen, Anforderungen, Prüfungen)
- ÖNORM B 3800 - Teil 4 (Bauteile: Einreihung in die Brandwiderstandsklassen)

Ferner kommen für Strassentunnel folgende Richtlinien zur Anwendung:

- "Erhöhter Brandschutz mit Beton für unterirdische Verkehrsbauwerke"; Ausgabe Juni 2005; österreichische Vereinigung für Beton- und Bautechnik

7.1.1 Strassentunnelsicherheitsgesetz

Das "Bundesgesetz über die Sicherheit von Strassentunneln" (Strassentunnelsicherheitsgesetz STSG, aktuelle Ausgabe von 2006) führt die EU-Richtlinie 2004/54/EG in nationales Recht über.

7.1.2 Richtlinien und Vorschriften für den Strassenbau RVS

Die RVS sind das wichtigste Handwerkszeug der österreichischen Strassenbauer. In 15 Kapiteln werden Themenkreise von Verkehrs- und Strassenplanung, über Brücken und Tunnels bis zu Umweltschutz und Qualitätssicherung behandelt. Durch die Aufnahme in Verträge für Planungen und Bauausführungen werden die RVS regelmässig für die Beteiligten für verbindlich erklärt. Bei Bundes- und Landesstrassen sind die RVS in Österreich grundsätzlich rechtsverbindlich. Entsprechend regelmässigen Fachdiskussion und anhand neuesten Erkenntnissen, werden die RVS regelmässig erweitert und an den Stand der Technik angepasst (Quelle: Wikipedia, <http://de.wikipedia.org>, Stand 21.07.2009).

Herausgeber der RVS ist das "Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie, ZI. 300.041/0049-II/ST-ALG/2006" sowie die "Österreichische Forschungsgesellschaft Strasse - Schiene - Verkehr".

Im Hinblick auf Strassentunnel ist insbesondere die RVS 09.01.45, "Baulicher Brandschutz in Strassenverkehrsbauten" (2006) zu nennen. Diese RVS stellt den Stand der Technik in dem oben angeführten Fachbereich dar. Eine Anwendung auch ausserhalb des Bundesstrassenbereiches wird angeregt.

7.1.3 Dokumente ASFiNAG

Die ASFiNAG ("Autobahn- und Schnellstrassen-Finanzierungs-Aktiengesellschaft") ist eine Infrastrukturgesellschaft und zu 100% im Besitz der Republik Österreich. Sie plant,

finanziert, baut, erhält und betreibt das gesamte österreichische Autobahnen- und Schnellstrassennetz. Zudem erhebt sie die Mautgebühren für die Nutzung des Autobahn- und Schnellstrassennetzes (Quelle: Wikipedia, <http://de.wikipedia.org>, Stand 31.03.2009).

Die Planungshandbücher der ASFINAG verstehen sich als umfassende Regelwerke für die Planung und Ausführung von Bauprojekten. Deren Anwendung wird den Auftragnehmern durch die ASFINAG vertraglich vorgeschrieben (Quelle: ASFINAG, Auskunft per E-Mail vom 01.04.2009).

- "Planungshandbuch Tunnelsicherheit, Gestaltung von Tunneln, Allgemeine Richtlinie", 2003
- "Planungshandbuch Tunnelsicherheit, Gestaltung von Tunnel-Vorportalbereichen, Allgemeine Richtlinie", 2004
- "Lüftung, Technische Spezifikation", 2008 (Entwurf)

7.2 Brandschutzziele

In der RVS-Richtlinie 09.01.45 wird das Brandschutzkonzept durch die folgenden Ziele definiert (RVS 09.01.45 Kap. 5). Die Personensicherheit und die Tunnelausrüstung (Kommunikation, Stromversorgung, Sicherheitseinrichtungen, Lüftungsanlagen, usw.) inklusive allfälliger Umweltauswirkungen sind nicht Gegenstand dieser Richtlinie (RVS 09.01.45 Kap. 2).

1. Unter Brandeinwirkung bleibt bei einer definierten Temperatur-Zeit-Kurve die Resttragfähigkeit mit einer definierten Sicherheit erhalten
2. Schäden werden begrenzt und auf technisch-wirtschaftlich tolerierbare Ausmasse reduziert
3. Die Dichtigkeit gegenüber massivem Wassereintritt muss gewährleistet sein
4. Die Möglichkeit einer Sanierung muss gegeben sein und Nutzungseinschränkungen bei der Durchführung von Instandsetzungsmassnahmen sollen minimiert werden
5. Die Standsicherheit einer Oberflächenbebauung muss erhalten bleiben und der Schutz Dritter an der Oberfläche muss gegeben sein

In der ÖVBB-Richtlinie "Erhöht brandbeständiger Beton für unterirdische Verkehrsbauwerke" [24] werden sowohl Anwendungsbereiche als auch Schutzziele definiert.

7.2.1 Risikoanalyse/Sicherheitsplanung

In der EN 1991-1-2 wird darauf hingewiesen, dass als erster Schritt zur Wahl eines Brandszenarios eine Risikoanalyse zu den möglichen Brandursachen durchgeführt werden soll, auf Basis welcher das Brandszenario und der Bemessungsbrand gewählt werden kann (EN 1991-1-2 Kap. 2.2).

7.2.2 Schutz des Lebens

Zu diesem Thema konnte in den unter 7.1 aufgeführten Dokumenten keine Angaben gefunden werden.

7.2.3 Schutz des Bauwerks

Die RVS-Richtlinie 09.01.45 definiert das Ziel in Tunnelbauwerken als die Tunnelstandsicherheit in Abhängigkeit vom Schutzniveau (gemäss Tabelle 13, Kap. 7.4 dieses Berichtes), indem bis zu einem definierten Zeitpunkt die in 7.2 erläuterten Schutzziele angestrebt werden.

(Vgl. 7.3 Brandschutzkonzept.)

7.2.4 Schutz Dritter

Die RVS-Richtlinie 09.01.45 verlangt den Schutz Dritter an der Oberfläche und setzt weiterhin eine Gewährleistung der Standsicherheit der Oberflächenbebauung voraus.

7.2.5 Andere Brandschutzziele

Laut der RVS-Richtlinie 09.01.45 muss die Sanierbarkeit gewährleistet sein. Nutzungseinschränkungen bei der Durchführung von Instandsetzungsmassnahmen sollen minimiert werden.

7.2.6 Akzeptierte Risiken

Auf Grundlage von gesamtheitlichen Sicherheitskonzepten und Störfallanalysen werden realistische Brandfälle betrachtet und daraus Temperatur-Zeit-Kurven abgeleitet. Mit der Angabe einer Zeitdauer (Dauer der Temperaturbelastung) wird das akzeptierte Risiko definiert. Mit dieser Vorgehensweise sollen auch ungünstige Brandfälle erfasst, aber nicht alle möglichen Brandfälle abgedeckt werden (RVS 09.01.45 Kap. 4).

7.3 Brandschutzkonzept

7.3.1 Vorgaben zu baulichen Brandschutzmassnahmen

Die RVS-Richtlinie 09.01.45 kategorisiert die Tunnel (A bis E) und ordnet den verschiedenen Gefährdungsklassen (I bis IV) verschiedene Schutzniveaus (SN 0 bis SN 3) zu. Ferner definiert die Richtlinie Mindestanforderungen und geht bei den Berechnungsgrundlagen auf die verschiedenen Materialeigenschaften ein. Die Eingangsparameter für die Gefährdungsklasse (I bis IV) bestimmen sich aus der RVS 09.02.31 (RVS 09.01.45 Kap. 7 bis 9).

Die Schutzniveaus geben u. a. wieder, welche Tragfähigkeit und Gebrauchstauglichkeit zu einem bestimmten Zeitpunkt während und nach einem Brand gefordert wird.

Tunnelkategorie				
A	B	C	D	E
-Nicht überbaut -Ohne Auswirkungen auf Nachbarobjekte und Objekte an der Oberfläche Grund- und Oberflächenwasser Nicht massgebend	-Nicht überbaut -Mit geringfügigen Auswirkungen auf Nachbarobjekte unter untergeordneten Verkehrswegen Grund- und Oberflächenwasser nicht massgebend	-Überbaut -Mit wesentlicher Auswirkung auf Nachbarobjekte -Unter wichtigen Verkehrsstrecken -Grundwasser ohne Flutungsgefahr -Unter Gewässern, wenn keine oder Flutgefahr besteht, oder diese durch einfache bauliche Massnahmen verhindert werden kann	- Überbaut mit wichtigen Objekten - Mit Auswirkung auf wichtige Nachbarobjekte -Unter sehr wichtigen Verkehrsstrecken -Im Grundwasser und unter Gewässern, wenn keine Flutungsgefahr besteht	-Unter Objekten mit Räum- und Absperzeiten über 180 Minuten -Unter Objekten von hohem kulturellem Wert -Tunnel, die nicht den Tunnelkategorien A bis D zuordenbar sind -Tunnel, die nur mit sehr hohem wirtschaftlichen Aufwand und langen Sperrzeiten wiederherstellbar

Tabelle 11: Mindestanforderungen an die Tragsicherheit der Konstruktion

Risikoäquivalentwert		Gefährdungsklasse
untere Grenze	obere Grenze	
–	$2 \cdot 10^{-2}$	I
$> 2 \cdot 10^{-2}$	$1 \cdot 10^{-1}$	II
$> 1 \cdot 10^{-1}$	$5 \cdot 10^{-1}$	III
$> 5 \cdot 10^{-1}$	–	IV

Tabelle 12: Einteilung der Gefährdungsklassen gemäss RVS 09.02.31

Der Risikoäquivalentwert entspricht dem Risikoerwartungswert (statistisch erwartbare Tote/Jahr) des untersuchten Tunnels bezogen auf ein Jahr und errechnet durch Multiplikation des Häufigkeitsäquivalents mit dem Schadensausmassäquivalents (vgl. RVS 09.02.31).

Tunnelkategorie	Gefährdungsklassen I und II	Gefährdungsklassen III	Gefährdungsklassen IV
A	0	0	0 (wenn rasche Sanierbarkeit nachgewiesen wird und nur kurzzeitige Sperren zu erwarten sind) 1
B	1	2	2
C	2	2	2
D	3	3	3
E	3*	3*	3*

*) Die Anforderungen des Schutzniveaus 3 sind Mindestanforderungen, die objektspezifisch zu ergänzen sind.

Tabelle 13: Mindestanforderungen an die Tragsicherheit der Konstruktion

SN	Mindestanforderungen an die Tragsicherheit
0	Brandwiderstand 30 Minuten (R 30) auf Basis ETK
1	30 Minuten Brandeinwirkungsdauer Nachweis gemäß ÖNORM EN Reihe 1991 auf Basis der gewählten Temperatur-Zeitkurven.
2	90 Minuten Brandeinwirkungsdauer Nachweis gemäß ÖNORM EN Reihe 1991 auf Basis der gewählten Temperatur-Zeitkurven.
3	120 Minuten Brandeinwirkungsdauer Nachweis gemäß ÖNORM EN Reihe 1991 auf Basis der gewählten Temperatur-Zeitkurven. Nach 120 Minuten Brandeinwirkungsdauer einschließlich Abkühlphase Sicherheit normgemäß.

Tabelle 14: Mindestanforderungen an die Tragsicherheit der Konstruktion

Gem. RVS 09.01.45 dienen bauliche Brandschutzmassnahmen dem Erreichen einer definierten Sicherheit von Tunnelbauwerken bei Brandereignissen und sollen zu einer dem akzeptierten Risiko entsprechenden Planung und Ausführung unter Berücksichtigung der verkehrstechnischen und örtlichen Verhältnisse führen.

In der RVS-Richtlinie 09.01.45 werden durch die massgebenden Schutzniveaus (SN0-SN3) die Mindestanforderungen bestimmt. Für tragende Bauteile ist die Mindestanforderung die Brandwiderstandsklasse R 30 gemäss ÖNORM EN 13501-2 anzusetzen.

Brandschutztechnische Anforderungen an Zwischendecken laut RVS 09.01.45:

Zwischendecken müssen mindestens der Brandwiderstandsklasse R 90 gemäss ÖNORM EN 13501-2 und RVS 09.01.23 entsprechen.

Alle dem Brand zugewandten freien Oberflächen der Konstruktion sind den festgelegten Temperatur-Zeit-Kurven auszusetzen.

Bei der Dimensionierung des Tragwerkes dürfen Verkehrslasten während des Brandereignisses nach Räum- und Sperrzeiten unberücksichtigt bleiben.

Für die Dimensionierung der tragenden Bauteile sind unabhängig vom Schutzniveau entsprechende Grundlagen wie z.B. die RVS 09.01.43 heranzuziehen.

7.3.2 Vorgaben zu technischen Brandschutzmassnahmen

Die Höhe der Temperatureinwirkungen durch heisse Brandgase (z.B. in Entlüftungskanälen) ist projektspezifisch mit dem Auftraggeber festzulegen.

Technische Brandschutzeinrichtungen (z.B. automatische Löscheinrichtungen) können zum Erreichen der Schutzziele vorgesehen werden. In solchen Fällen sind diese technischen Brandschutzeinrichtungen im Brandschutzkonzept zu berücksichtigen, um insbesondere die wechselseitigen Einflüsse aller Massnahmen zu erfassen.

7.3.3 Vorgaben zu organisatorischen Brandschutzmassnahmen

Zu diesem Thema konnte in den unter 7.1 aufgeführten Dokumenten keine Angaben gefunden werden.

7.4 Bemessungskonzept

7.4.1 Vorgaben zur Brandschutzbemessung

Bemessung und Nachweise erfolgen nach Eurocode (vgl. Kap. 1).

Die ÖVBB-Richtlinie "Erhöht brandbeständiger Beton für unterirdische Verkehrsbauwerke" auf Grundlage vorgenannter Forschungserkenntnisse behandelt zudem folgende Themen:

1. Festlegung von Temperatur-Zeit-Kurven für Eisenbahn- und Strassentunnel
2. Temperatureindringkurven für PP-Faserbetone, Vorgaben für Konstruktion und Bemessung
3. Beschreibung der Grundsätze und Anforderungen an den Beton, dessen Herstellung, Einbau und Prüfung

7.4.2 Berechnungsmodell

In der RVS-Richtlinie 09.01.45 werden aus einem Brandereignis (vgl. Einwirkungsfaktoren) Temperatur-Zeit-Kurven herangezogen und untersucht. Massgebliche Einflussfaktoren für die Brandschutzberechnung sind die folgenden Parameter:

1. Tunnellänge
2. Längslüftungsgeschwindigkeit

3. Stellt der Tunnel eine Wetterscheide dar
4. Restsauerstoffkonzentration am Brandort (mindestens 8 V-%)
5. Maximale Luftdruckdifferenz der Tunnelportale (max. 10Pa)
6. Querschnitt
7. Öffnungen der Tunnelluft zur Umgebung

7.4.3 Einwirkungsfaktoren

Massgeblich auf der Lastseite ist die Vorgabe der auf das Bauteil einwirkenden Temperatur-Zeit-Kurve, welche in den entsprechenden nationalen oder internationalen Regelwerken angegeben ist. Diese sind in Österreich unterschiedlich für [55]:

- Strasse (RVS)
- Bahn (HLAG/ÖBB – Richtlinie Anlage 4)
- U-Bahn

Zur Berechnung der im Bauteil herrschenden Temperaturen sind dies im Wesentlichen:

- Lambda
- Annahmen für den Wärmeübergang (Konvektion) und den Strahlungsanteil

Aus der RVS 09.01.45 geht als Einwirkung ein Flüssigkeitsbrand aufgrund eines leckgeschlagenen Tankwagens (Auslaufmenge 7 l/s) mit 40 m³ (50 m³ Füllvolumen zu 80% gefüllt) hervor.

Mit dem angeführten Brandereignis ist auch ein Feststoffbrand eines LKW mit einer Ladung von gestapelten Autoreifen abgedeckt. Für das Ereignis eines Feuerübersprungs auf einen benachbarten LKW wird zugrunde gelegt, dass die Brandlast des benachbarten LKWs keinen wesentlichen zusätzlichen Beitrag zur definierten Brandlast am Ort des ersten Brandherdes liefert.

7.4.4 Bettung/Gebirgsumgebung

In der RVS 09.01.45 wird die Gebirgsumgebung berücksichtigt und in Tunnelkategorien (A-E) eingeteilt (RVS 09.01.45 Kap. 7.1). Dabei werden Nachbarobjekte, Wasserverhältnisse, und Überbauungen berücksichtigt.

7.4.5 Einfluss des Brandes auf Materialien

Der Einfluss des Brandes auf die Materialien wird in den ÖVBB-Richtlinien:

"Innenschalenbeton" [23] sowie "Erhöht brandbeständiger Beton für unterirdische Verkehrsbauwerke" [24], behandelt.

[55] Grundsätzlich werden im Brandlastfall vier Versagensarten für die im Tunnelbau üblichen Konstruktionen unterschieden:

- Versagen der Zugzone
- Versagen der Druckzone
- Schub- oder Torsionsbruch
- Abplatzungen

[55] Für die Modellierung des Brandverhaltens sind auch die Zuschläge (quarz- oder kalkhaltig) näher zu spezifizieren.

In der ÖVBB-Richtlinie „Innenschalenbeton“ ist eine Forderung nach dem Nachweis der Begrenzung von Abplatztiefen an Grossversuchskörpern mit Dehnungsbehinderung, Faserbetonklasse BB1 < 7.5 cm, BB2 < 1 cm enthalten.

7.5 Konstruktive Durchbildung

7.5.1 Vorgaben zu konstruktiven Durchbildungen

Aus der ÖVBB-Richtlinie „Erhöht brandbeständiger Beton für unterirdische Verkehrsbauwerke“ gehen Hinweise für die Ausführung und Dokumentation und Empfehlungen für die Ausschreibung hervor.

7.5.2 Materialanforderungen

Um Abplatzungen zu verhindern, ist z.B. Beton der Faserbetonklasse BBG gemäss der ÖVBB-Richtlinie Faserbeton zu verwenden.

[55] Für eine dem Stand der Technik entsprechende Tragwerksbemessung werden in der Regel folgende Normalbetoneigenschaften berücksichtigt:

- Betondruckfestigkeit
- Spannungs- Dehnungslinie (Arbeitslinie)
- Thermische Dehnung
- E-Modul

Auch für den Stahl sind temperaturabhängige Materialkennwerte in der EN 1992-1-2 bzw. prEN 192-1-2 normiert - wobei hier warmgewalzte und kaltverformte Bewehrungsstähle und abgeschreckt und angelassene sowie kaltverformte Spannstähle unterschieden werden.

7.5.3 Konstruktive Massnahmen

Die konstruktiven Massnahmen ergeben sich aus der Ausführung von Vorsatzschalen aus Faserbeton oder Faserspritzbeton, der Erhöhung der Betondeckung der dem Brand zugewandten Bewehrungslage und/oder Beimengung von Fasern, der Verwendung von plattenförmigen Bekleidungen oder Schutzschichten aus Mörtel und der Einsatz von gering wärmeleitfähigen Materialien (z.B. Leichtbeton).

7.5.4 Nutzungsanforderungen

In der RVS 09.01.45 wird die Tunnelnutzung berücksichtigt und in Tunnelkategorien (A-E) eingeteilt.

8 Frankreich

8.1 Normen und Richtlinien

8.1.1 Gesetzes- und Verordnungstexte

Die Situation in Frankreich präsentiert sich unterschiedlich zu derjenigen in der Schweiz, da zahlreiche Bauwerke der Leitung privater Bauherren unterstehen (Autobahn-Konzessionen). Im Anschluss an den Unfall im Mont-Blanc-Tunnel und einer Reihe Unfälle der neuesten Zeit, hat sich der französische Staat mit einem gewichtigen Gesetzes- und Verordnungswerkzeug im Bereich Sicherheit von Strassentunneln versehen, um dafür zu sorgen, dass diese von privaten Bauherren umgesetzt werden.

Ein nationaler Ausschuss zu Bewertung der Sicherheit von Werken im Strassenbau (CNESOR) und Zulassung von Sachverständigen wurde beim Ministère de l'Équipement geschaffen. Dieser Ausschuss besteht aus sechs Vertretern des Staates, vier Vertretern von Gebietskörperschaften und zwölf qualifizierten Personen.

Geltende Gesetzes- und Verordnungstexte für die Sicherheit von Strassentunneln:

Gesetze und Verordnungen:

- Gesetz Nr. 2002-3 vom 3. Januar 2002 unter anderem mit Bezug auf die Sicherheit von Verkehrsinfrastrukturen und Systemen (§§ 2 und 11)
- Verordnung Nr. 2005-701 vom 24. Juni 2005 bezüglich der Sicherheit von Bauwerken des Strassennetzes
- Gesetz Nr. 2006-10 vom 5. Januar 2006 über die Sicherheit und Entwicklung des Verkehrs (§ 10)
- Verordnung Nr. 2006-1354 vom 8. November 2006 über die Sicherheit von Bauwerken des Strassennetzes und zur Änderung des Gesetzbuches über öffentliche Verkehrswege
- Das Gesetzbuch über öffentliche Verkehrswege: Gesetzes- und Verordnungsteil - Überschrift 1 - Gemeinsame Bestimmungen für Wege des öffentlichen Strassennetzes - Kapitel VIII - Sicherheit von Bauwerken der Strassennetzes, deren Betrieb mit Risiken behaftet ist

Erlasse:

- Erlass vom 8. November 2006 zur Festlegung von Mindestsicherheitsanforderungen für Tunnel von mehr als 500 m Länge
- Erlass vom 18. April 2007 über die Umsetzung des Gesetzbuches für öffentliche Verkehrswege bezüglich der Sicherheitsunterlagen und Berichte über Zwischenfälle
- Erlass vom 9. November 2007 zur Änderung des Erlasses vom 8. November 2006

Interministerielle Rundschreiben:

- Interministerielles Rundschreiben Nr. 2006-20 vom 29. März 2006 bezüglich der Sicherheit von Strassentunneln mit einer Länge von mehr als 300 m. Dieses Rundschreiben annulliert und ersetzt das Rundschreiben Nr. 2000-63 vom 25. August 2000 mit Ausnahme von Anhang 2, der in Kraft bleibt
- Anhang Nr. 2 zum interministeriellen Rundschreiben Nr. 2000-63 vom 25. August 2000, "Technische Anweisung bezüglich der Sicherheitsbestimmungen in neuen Strassentunneln (Konzept und Betrieb)"

8.1.2 Methodologischer Führer des CETU

Der Führer "Das Brandverhalten von Strassentunneln - Methodologischer Führer" vom März 2005 des CETU zeigt die technische Anweisung Nr. 2 des Anhangs zum interministeriellen Rundschreiben 2000-63 vom 25. August 2000.

8.1.3 Dimensionierungsnormen

In Frankreich kann der Brandwiderstand anhand folgender Mittel berechnet werden:

- DTU P92-701 (Vorhersagemethoden mittels Berechnung des Brandverhaltens von Betonstrukturen)
- Anwendungsnormen NF EN 1992-1-2 und NF EN 1992-1-2, welche genau den europäischen Normen entsprechen, die in Kapitel 1 vorgestellt wurden

8.2 Brandschutzziele

Folgende Ziele wurden in den Gesetzes- und Verordnungstexten festgelegt:

- Die Benutzersicherheit für im Tunnel in den Phasen der selbstständigen und unterstützten Evakuierung anwesende Benutzer
- Die Sicherheit der im Tunnel in den Phasen der selbstständigen und unterstützten Evakuierung und Brandbekämpfung anwesenden Rettungskräfte
- Die Sicherheit von Benutzern und Rettungskräften, die sich an Orten aufhalten, die von der Struktur getragen werden, jedoch nicht rasch evakuiert werden können, oder an Orten, welche für Rettungseinsätze verwendet werden (im Falle eines an ein Gebäude angrenzenden Tunnels z. B.)
- Begrenzung der Schäden, der Reparaturkosten und der Dauer der Schliessung des Bauwerks

8.2.1 Risikoanalyse / Sicherheitsplanung

Durch CETU wurde eine Ergänzung zum Methodologischen Führer in Vernehmlassung gegeben, welcher 2010 veröffentlicht wird. Diese Ergänzung beinhaltet unter Anderem:

- Massnahmen für die Erreichung der Brandbeständigkeit, Betonrezepturen für Neubauwerke, Dimensionierungsrichtlinien, den Einbezug der Abplatzung im Brandfall und Angaben für die Kostenermittlung.
- Die Anwendung der Massnahmen auf bestehende Bauwerke mit Berücksichtigung der thermischen Einwirkungen, der mechanischen Analysen (Kategorie G3) und den Einbezug der Abplatzungen
- Anwendungsbeispiele

Das in Frankreich vorgesehene Verfahren bezüglich der Brandsicherheit von Strassentunneln ist in drei Hauptphasen gegliedert, welche hier vorgestellt werden.

1) Vorab-Sicherheitsakte

Zur Ausführung substantieller Bau- oder Umbauarbeiten an einem Bauwerk, dessen Betrieb besondere Risiken für die Personensicherheit aufweist (mehr als 300 m Länge) muss der Staat zuerst eine Stellungnahme zu einer Vorab-Akte abgeben, die zusammen mit einem von einem zugelassenen Sachverständigen erstellten Sicherheitsbericht an den Staatsvertreter zu richten ist.

Eine Vorab-Akte besteht aus:

- Beschreibung mit Plänen einschliesslich der Zugänge
- Vorstudie des Verkehrs mit Unterscheidung zwischen Personenwagen und Lastwagen
- Beschreibung der besonderen Vorrichtungen, die für den Transport von Gefahrgütern vorgesehen sind
- Spezifische Gefahrenstudie mit Beschreibung aller während des Betriebs möglicherweise auftretenden Unfällen, sowie Art und Gewicht der eventuellen Auswirkungen
- Beschreibung der vorgesehenen Organisation menschlicher Mittel, materieller Mittel und der Massnahmen, die zur Gewährleistung der Betriebssicherheit und der Wartung des Bauwerks vorgesehen sind

Im Falle eines substantiellen Umbaus eines bestehenden Bauwerks sind der Vorab-Akte folgende Unterlagen anzulegen:

- Verzeichnis und Analyse bedeutender Zwischenfälle und Unfälle aus den letzten fünf Jahren
- Verzeichnis der in den letzten fünf Jahren durchgeführten Sicherheitsübungen
- Beschreibung der vorgesehenen Organisation menschlicher Mittel, materieller Mittel und der Massnahmen, die zur Gewährleistung der Betriebssicherheit und der Wartung des Bauwerks vorgesehen sind

2) Sicherheitsakte

Die Genehmigung zur Inbetriebnahme eines Bauwerkes des Strassennetzes wird vom Staatsvertreter (Präfekt) aufgrund einer Sicherheitsakte, mit einem Sachverständigenbericht versehen, erteilt. Der Staatsvertreter kann eine Stellungnahme des nationalen Ausschusses zur Bewertung der Sicherheit von Bauwerken verlangen. Diese Genehmigung wird für eine Dauer von sechs Jahren erteilt und kann mit Einschränkungen bezüglich der Nutzung des Bauwerks oder besonderen Betriebsvorschriften belegt werden.

3) Erneuerung der Genehmigung

Vor Ablauf der Gültigkeitsdauer der Genehmigung zur Inbetriebnahme überstellt der Bauherr dem Staatsvertreter folgende Unterlagen:

- Eine aktualisierte Sicherheitsakte zusammen mit einem Verzeichnis und einer Analyse der Zwischenfälle und Unfälle, sowie einem Verzeichnis und Analyse der Sicherheitsübungen
- Einen Sicherheitsbericht des Sachverständigen oder der qualifizierten zugelassenen Institution mit deren Bewertung der Betriebsbedingungen und des Zustands des Bauwerks, dessen Ausstattung sowie über die Stichhaltigkeit der Sicherheitsmassnahmen

Diese Genehmigung wird für eine Dauer von sechs Jahren erneuert und kann mit Einschränkungen bezüglich der Nutzung des Bauwerks oder besonderen Betriebsvorschriften belegt werden

8.2.2 Schutz des Lebens

Der Schutz von Leib und Leben ist das vorrangige Ziel der Brandsicherheit. Es stehen folgende drei Ziele an oberster Stelle:

- Die Benutzersicherheit für im Tunnel in den Phasen der selbstständigen und begleiteten Evakuierung anwesende Benutzer
- Die Sicherheit der im Tunnel in den Phasen der selbstständigen und begleiteten Evakuierung und Brandbekämpfung anwesenden Rettungskräfte
- Die Sicherheit von Benutzern und Rettungskräften, die sich an Orten aufhalten, die von der Struktur getragen werden, jedoch nicht rasch evakuiert werden können, oder an Orten, welche für Rettungseinsätze verwendet werden (im Falle eines an ein Gebäude angrenzenden Tunnels z.B.)

8.2.3 Schutz des Bauwerks

Das Ziel der Begrenzung von Schäden, Reparaturkosten und Dauer der Schliessung des Bauwerks steht an vierter Stelle hinter den drei Zielen des Schutzes für Leib und Leben.

8.2.4 Schutz Dritter

Der Schutz von Dritten wird im dritten Ziel beschrieben (Kap. 8.2).

Der Schutz von Dritten und der Umwelt wird unter Festlegung einer höheren erforderlichen Schutzklasse behandelt (Typ N3, siehe Kap. 8.4.1).

8.2.5 Andere Brandschutzziele

--

8.2.6 Akzeptierte Risiken

Es existiert keine explizite Definition des akzeptierten Risikos. Dieses ergibt sich aus der Anwendung der Vorschriften und der spezifischen Gefahrenstudie.

8.3 Brandschutzkonzept

Die in den nachfolgenden Kapiteln beschreiben die Ziele der Massnahmen des Brandschutzkonzepts für Tunnel mit einer Länge von mehr als 300 m.

Zwei besondere Fälle werden mit unterschiedlichen Anforderungen behandelt (Bestimmungen von Hoch-und-Tiefbau, Sicherheitsausrüstung, Brandwiderstand und Betrieb), d. h.:

- Städtische Tunnel mit einer genehmigten Grösse von weniger oder gleich 3.50 m mit einer Minderung der Anforderungen
- Tunnel, die für den Gefahrguttransport (TMD) vorgesehen sind, mit einer Reihe zusätzlicher Ziele

8.3.1 Vorgaben zu baulichen Brandschutzmassnahmen

Die Ziele der Baumassnahmen stammen alle aus den Bestimmungen des Hoch-und-Tiefbaus, welche die Entsprechung mit den Zielen aus Kap. 8.2 erlauben. Die technische Anweisung Nr. 2 im Anhang des interministeriellen Rundschreibens 2000-63 vom 25. August 2000 enthält folgende Bestimmungen:

- Breite für die Zufahrt von Rettungsfahrzeugen, um Rettungsfahrzeugen die Zufahrt zu ermöglichen (Notfallspur, überquerbarer Gehsteig) gemäss der Situation des Tunnels (in einer Richtung befahrbar, Verbindungen zur Aussenwelt oder Verbindungen zur zweiten Tunnelröhre)
- Ausstattung mit Gehsteigen in beiden Richtungen, um Benutzern in Not zu erlauben, seitlich ausserhalb der Verkehrszone ihre Sicherheitsausrüstung zu erreichen oder den Tunnel zu verlassen. Der Anhang zeigt die maximal zulässigen Abmessungen (maximale Höhe und minimale Breite)
- Einrichtungen zur Evakuierung und zum Schutz der Benutzer sind alle 200 m in städtischen Tunneln und alle 400 m in nicht städtischen Tunneln vorzusehen. Art der Ausstattung nach Möglichkeit in absteigender Reihenfolge:
 - Direkte Verbindungen zur Aussenwelt
 - Verbindungen zwischen den Röhren durch eine Schleuse
 - Parallel verlaufender Sicherheitsstollen
 - Unterstände mit brandgeschütztem Zugangsweg
- Einrichtungen für die Rettungsfahrzeuge im Tunnel
 - Bei Tunneln von mehr als 1.000 m Länge ist alle 800 m eine Durchfahrt für die Rettungsfahrzeuge von einer Röhre zur anderen vorzusehen oder aber eine Wendeplatte im Falle einer einzigen Röhre
 - Parkplatz an den Ausgängen des Tunnels
- Sicherheitsnischen
- Brandnischen
- Helikopterlandefläche
- Vorrichtung zur Verhinderung der Rauchausbreitung von einer Tunnelröhre zur anderen.
- Garagen
- Zugänglichkeit für Behinderte

8.3.2 Vorgaben zu technischen Brandschutzmassnahmen

Die Ziele der technischen Massnahmen stammen alle aus den Sicherheitsbestimmungen und Ausstattungen, welche die Entsprechung mit den Zielen aus Kap. 8.2 sichern. Die technische Anweisung Nr. 2 im Anhang des interministeriellen Rundschreibens 2000-63 vom 25. August 2000 enthält folgende Bestimmungen:

- Stromversorgung
 - Unterstützte Stromversorgung ohne Unterbrechung
 - Unterstützte Starkstromversorgung
- Belüftung
 - Belüftung zur Erhaltung der Luftqualität
 - Belüftung zur Rauchabsaugung im Brandfall (Vorschriften für Längsbelüftung und halb schräg verlaufende Belüftung)
 - Belüftung der Evakuierungs- und Schutzeinrichtungen für Benutzer und der Zufahrtswege für die Rettungskräfte
- Beleuchtung
- Notrufsäulen
- Brandbekämpfungsmittel
 - Feuerlöscher
 - Wasserversorgung
- Brandmeldeanlage
- Signalisierung, Signaletik und Vorrichtungen zur Schliessung des Tunnels
 - Signalisierung und Signaletik der Sicherheitsvorrichtungen
 - Signalisierung und Signaletik der Vorrichtungen zur Stilllegung des Verkehrs
 - Signalisierung der Spurzuweisung
- Übertragung der Funkmeldungen
- Andere
 - Alarm bei Öffnung der Nischentüren, der Notausgänge, der Unterstände und beim Auslösen der Feuerlöscher
 - Videoüberwachungsnetz
 - Automatische Zwischenfallmeldung
 - Alarmtaster mit Anzeige mit Notrufbestätigung
 - Übertragung der Mobiltelefonverbindungen

8.3.3 Vorgaben zu organisatorischen Brandschutzmassnahmen

Die Ziele der Organisationsmassnahmen bezeichnen die Gesamtheit der zur Sicherstellung der Kontinuität und der Funktionssicherheit des Tunnels erforderlichen Aufgaben. Die technische Anweisung Nr. 2 im Anhang des interministeriellen Rundschreibens 2000-63 vom 25. August 2000 enthält folgende Bestimmungen:

- Betriebsmittel

Gemäss den Merkmalen des Tunnels und des Verkehrs werden 4 Bereitschafts- und Überwachungskategorien definiert:

- Kategorie D1 - einfache Bereitschaft
- Kategorie D2 - Bereitschaft mit Einsatzmitteln
- Kategorie D3 - intermittierende Überwachung durch Personen
- Kategorie D4 - durchgehende Überwachung durch Personen

Unabhängig von der Bereitschafts- und Überwachungskategorie dürfen die Ausstattungen zum fraglichen Zeitpunkt nur von einer einzigen Kontroll- und Einsatzzentrale angefordert werden. Es können mehrere Zentralen existieren. Diese dürfen jedoch nicht gleichzeitig in Betrieb sein.

- **Rettungsmittel**
Der Bedarf an Rettungsmitteln wird gemäss der Grösse des Tunnels, des Verkehrs und der Entfernung zu den öffentlichen Rettungsmitteln festgelegt.
- **Zwingend vorgeschriebene Unterlagen**
 - Verkehrsregeln
 - Betriebsvorschriften
 - Einsatz- und Sicherheitsplan
- **Erhalt der Sicherheitskategorie**
 - Übungen
 - Auffrischungsübungen auf der Basis eines Berichts über bedeutende Zwischenfälle und Unfälle
- **Benutzerinformation**

8.4 Bemessungskonzept

8.4.1 Vorgaben zur Brandschutzbemessung

Um den Zielen von Kapitel 8.3 zu entsprechen, wurden vier Feuerwiderstandsklassen festgelegt:

- **Klasse N0 - Keine Einsturz-Kettenreaktion bei lokalem Einbruch während des Brandes**
 - Ein Fall, in welchem ein lokaler Einbruch ohne Auswirkungen auf die Sicherheit der Benutzer oder Rettungskräfte bleibt, die sich möglicherweise an einer anderen Stelle des Tunnels befinden
- **Klasse N1 - Feuerwiderstand im Falle eines Normfeuers nach CN120 (Feuerdauer von 2 Stunden nach ISO-Norm)**
 - Struktur, welche einen Verkehrsweg oder einen für Fussgänger zugänglichen Bereich trägt, mit der Möglichkeit, den Verkehr einzustellen oder den Bereich zu evakuieren
 - Struktur, welche zur Erhaltung der Stabilität einer anderen Röhre oder der Trennung von der besagten Röhre erforderlich ist; bei direkten Verbindungen zur Aussenwelt und der Möglichkeit, den Verkehr in der zweiten Röhre binnen kurzer Zeit zu verbieten
 - Struktur, deren lokaler Einbruch einen Belüftungsschacht oder Längskabel zu unterbrechen vermag, welche für die Rettungseinsätze erforderlich sind
- **Klasse N2 - Feuerwiderstand bei verstärktem Kohlenwasserstofffeuer nach HCM 20**
 - Struktur, welche einen Verkehrsweg oder einen für Fussgänger zugänglichen Bereich trägt, bei Unmöglichkeit, den Verkehr auf dem getragenen Verkehrsweg zu verbieten oder den Bereich zu evakuieren (eventuell N3 bei wichtigem Verkehrsweg)
 - Struktur, welche zur Erhaltung der Stabilität einer anderen Röhre oder der Trennung von der besagten Röhre erforderlich ist; bei direkten Verbindungen zur Aussenwelt und der Unmöglichkeit, den Verkehr in der zweiten Röhre binnen kurzer Zeit zu verbieten
 - Struktur, deren lokaler Einbruch einen Belüftungsschacht oder Längskabel zu unterbrechen vermag, welche für die Nutzung der Unterstände und der Zugangswege, welche den Zugang von Aussen ermöglichen
- **Klasse N3 - Feuerwiderstand bei Feuer nach HCM 120 oder ISO240**
 - Struktur, welche einen Verkehrsweg oder einen für Fussgänger zugänglichen Bereich trägt, bei Unmöglichkeit, den Verkehr auf dem getragenen Verkehrsweg zu verbieten
 - Überschwemmungs- oder Erdbehrschgefahr

- Risiko von Schäden an der Oberfläche oder anderen in der Nähe gelegenen Bauten

Für Tunnel kleineren Umfangs (unter 3.50 m) liegt der Feuerwiderstand bei CN60 für die Klassen N1, N2 und N3 vorbehaltlich dessen, dass ein Gebäude dem Brand ausgesetzt sein könnte. In diesem Fall sind CN120, CN180 und CN 240 je nach Art des Gebäudes erforderlich.

Bei Ausbauelementen werden Widerstandsklassen für folgende Elemente festgelegt:

- Zwischendecken und Trennwände von Belüftungsschächten
- Technikräume und Belüftungseinrichtungen
- Evakuierungs- und Schutzseinrichtungen für Benutzer und der Zufahrtswege für die Rettungskräfte
- Fahrbahntragplatte
- Schutz gegen herab fallende Ausstattungsgegenstände

8.4.2 Berechnungsmodell

Der richtige Feuerwiderstand kann folgendermassen ermittelt werden:

- Durchführung von Versuchen
- Bezugnahme auf frühere Versuche
- Berechnung
- Kombination der verschiedenen Mittel

Ein Versuch allein vermag fast niemals eine Struktur unter komplexer Belastung darzustellen. Eine Berechnung zur Ermittlung des Feuerwiderstands ist daher fast immer unerlässlich.

Eine Einteilung der Analysekatgorie steht im methodischen Führer des CETU.

- Analysekatgorie G0 - Einschätzung ohne Berechnung
 - Für den Nachweis bei Klasse N0 zulässig, auf der Basis einer Betrachtung Strukturstabilität in Serie
- Analysekatgorie G1 - Einschätzung mit vereinfachter Berechnung
 - Mittels Nomogramm ermittelter Temperaturbereich, vereinfachte Berechnungen (konstante Parameter oder Feinberechnung (thermoplastische Parameter, die mit der Temperatur variieren)
 - Berechnung der mechanischen Beanspruchung an einem linearen Modell (lineare Verformung der Abschnitte und elastische Abschnitte mit Veränderung der Festigkeit je nach Temperatur)
 - Prüfung der Widerstandsfähigkeit der Struktur an einem linearen Model (auszuhaltende Belastungen nach Abschnitt, berechnet bei Hitze unter Anbringung eines Abzugs wegen der Temperatur)
- Analysekatgorie G2 - Einschätzung mit Standardberechnung
 - Mittels Feinberechnungen ermittelter Temperaturbereich (thermoplastische Parameter, die mit der Temperatur variieren)
 - Berechnung der mechanischen Belastung an einem insgesamt linearen Modell, welches jedoch lokal nicht linear ist (Berücksichtigung von plastischen Gelenken, Veränderung der Tragbedingungen, Berücksichtigung der Abschlackung)
 - Prüfung der Widerstandsfähigkeit der Struktur an einem insgesamt linearen Modell, welches jedoch lokal nicht linear ist (Prüfung der Verformungen der plastischen Gelenke, Gesamtstabilität der Struktur)
- Analysekatgorie G3 - Einschätzung mit erweiterter Berechnung
 - Mittels Feinberechnungen ermittelter Temperaturbereich (thermoplastische Parameter, die mit der Temperatur variieren)

- Berechnung der mechanischen Beanspruchung an einem insgesamt nicht linearen Modell (tatsächliche Verformungen und aufgezwungene Verformungen, elastoplastische Materialien, Rissbildung im Beton, Veränderung der Tragbedingungen, grosse Verschiebungen, Berücksichtigung der Abschlackung)
- Prüfung der Widerstandsfähigkeit der Struktur an einem insgesamt nicht linearen Modell (mechanische Verformungen in der ganzen Struktur)

Ratschlag

Abhängig von der erforderlichen Widerstandsklasse ist die Analysekatgorie zu wählen:

- Anforderungsklasse N0 - Kategorie G0
- Anforderungsklasse N1 - Kategorie G1 oder G2
- Anforderungsklasse N2 oder N3 - wirtschaftliche Analyse zur Ermittlung der stichhaltigsten Kategorie:
 - Kategorie G1 mit passivem thermischem Schutz
 - Kategorie G2 oder G3 ohne passiven thermischen Schutz, jedoch mit Versuchen im Ofen zur Charakterisierung des Abschlackungsphänomens
 - Kategorie G3 unter Verwendung innovativer Techniken und Versuchen im Ofen

8.4.3 Einwirkungsfaktoren

Wie in Kap. 8.4.2 beschreiben, erfolgt die Berücksichtigung der Parameter anhand der Analysekatgorie G1, G2 und G3.

8.4.4 Bettung/Gebirgsumgebung

--

8.4.5 Einfluss des Brands auf die Materialien

Die thermischen und mechanischen Eigenschaften der Materialien sind im DTU und der nationalen Anwendungsnorm der europäischen Norm definiert.

8.5 Konstruktive Durchbildung

8.5.1 Vorgaben zu konstruktiven Durchbildungen

S. Kap. 8.1

8.5.2 Materialanforderungen

In Frankreich werden die Materialien gemäss der europäischen Klassierung und weiter der französischen Klassierung Reaktion auf Feuer eingeteilt, welche in diesem Kapitel vorgestellt werden. Letztere soll jedoch zugunsten der europäischen Klassierung aufgeben werden. Die Klassierung beruht auf den Versuchen mithilfe der kalorimetrischen Bombe (NF EN ISO 1716), dem vorrangigen Strahlungsversuch (NF P 92-501), zusätzlichen Versuchen wie der Ausbreitung des Feuers (NF P 92-504) und Versuchen für schmelzbare Materialien (NF P 92-505). Die Materialien werden in zwei Kategorien eingeteilt: Weiche Produkte mit einer Stärke von weniger als 5 mm und andere Produkte (feste Produkte aller Stärken und weiche Produkte mit einer Stärke von mehr als 5 mm).

Die französischen Klassierungen:

- MO - nicht brennbar und nicht entflammbar (Stein, Ziegel, Zement, Gips, Gesteinsfasern)
- M1 - brennbar und nicht entflammbar (Verbundmaterialien, PVC, mineralische Platten, Polyester)
- M2 - brennbar und schwer entflammbar (Spannplatten, Wandbelag)
- M3 - brennbar und durchschnittlich entflammbar (Holz, Bodenbelag aus Gummi, Wolle)
- M4 - brennbar und leicht entflammbar (Papier, Polypropylen, Teppiche aus Mischfasern)

- NC - keine Klassierung

Die Baumaterialien für Haupt- und Ausbaustrukturen sind mit Ausnahme der Fahrbahnelemente unter M0 zu klassieren. Folgende Ausnahmen sind zulässig:

- M2 für Deckenelemente einer leichten Abdeckung
- M1 für Seitenverkleidungen unter Vorbehalt von besonderen Nachweisen für das Fehlen des Risikos der Brandausbreitung
- M1 für verschiedene Ausstattungen im Innern des Tunnels

8.5.3 Konstruktive Massnahmen

Die Widerstandsfähigkeit im Falle einer Kurve für verstärktes Kohlenwasserstofffeuer erfordert im Allgemeinen die Verwendung eines passiven thermischen Schutzes für die Betonoberflächen, um dem Abschlackungsphänomen vorzubeugen. Bei Tunnel gängiger Grösse, die eine Widerstandsklasse von N2 oder N3 erreichen müssen, kann eine solche Vorrichtung praktisch nie weggelassen werden.

Bei den Widerstandsklassen N0 oder N1, sowie N2 oder N3 für Tunnel von kleinerer Grösse, kann die Brandwiderstandsfähigkeit mithilfe angemessener Verkleidungen und unter Einhaltung der gesamten Bestimmungen aus dem DTU P92-701 und der Euronorm NF EN 1992-1-2 erreicht werden.

Nachstehend ist ein Verzeichnis einiger Bauvorschriften aus dem DTU P92-701 aufgeführt (die Norm NF EN 1992-1-2, die der in Kapitel 1 vorgestellten Norm sehr ähnlich ist):

- Richtig ausgelegte Dehnungsfugen, welche die dimensionalen Variationen berücksichtigen, den Flammen den Durchgang verwehren und die Emission entflammbarer Gase verhindern
- Geometrische Anordnung der Böden und Pfeiler, welche Schwachpunkte meidet (Keilverbindungen, Isostasie, zu kleine Kragsteine und zu feine Elemente)
- Anordnung der Armierung, um zu vermeiden, die ganze Armierung an kritischen Lastpunkten und vorspringenden Ecken anzubringen sowie Anbringung eines Gitterwerks für Verkleidungen mit einer Höhe von 7 cm oder mehr

8.5.4 Nutzungsanforderungen

Wie im vorangehenden Kapitel erwähnt, wird die Genehmigung zur Inbetriebnahme alle sechs Jahre erneuert und kann mit Einschränkungen bezüglich der Nutzung des Bauwerks oder besonderen Betriebsvorschriften belegt werden.

Zwei besondere Nutzungsfälle werden beschrieben:

- Städtische Tunnel mit einer zulässigen Grösse von weniger oder genau 3.50 m
- Für Gefahrguttransporte zugelassene Tunnel (TMD)

9 Niederlande

9.1 Normen und Richtlinien

9.1.1 Störfallvorsorge in den Niederlanden

Als EU-Mitglied sind die Niederlande verpflichtet, die europäische Richtlinie 96/82/EG (sog. Seveso-II-Richtlinie) in nationales Recht zu überführen. Die genauen Hintergründe, wie dies in den Niederlanden umgesetzt wird, konnten im Rahmen des vorliegenden Forschungsprojektes nicht genauer untersucht werden. Allerdings wird ähnlich wie in der Schweiz ein risikobasierter Ansatz verfolgt. Als Beurteilungskriterium zur Akzeptanz von Risiken von Industrieanlagen wird in den Niederlanden das auch in anderen Ländern übliche individuelle Todesfallrisiko¹ betrachtet. Für neue Anlagen gilt in den Niederlanden ein maximal zulässiges, individuelles Todesfallrisiko von max. 10⁻⁶ pro Jahr. Für bestehende Anlagen beträgt das zulässige, individuelle Todesfallrisiko max. 10⁻⁵ pro Jahr, wobei für diese Ausnahmeregelung die Übergangsfrist 2010 abläuft. Die Behörde kann keine weiterführenden Massnahmen fordern, wenn das individuelle Todesfallrisiko bereits unterschritten wird [58], [59].

Das kollektive Risiko (zur Betrachtung von seltenen Ereignissen mit grossem Ausmass) kann zur Orientierung ebenfalls herangezogen werden, ist aber nicht verbindlich. Als obere Akzeptanzgrenze gilt 10⁻³ / N2, als untere Grenze für vernachlässigbare Risiken 10⁻⁵ / N2 im Wahrscheinlichkeits-Ausmass-Diagramm (N = Anzahl Todesopfer) [59].

Für die Niederlande liegt neben dem Eurocode kein allgemeines Regelwerk für den baulichen Brandschutz vor. Brandschutzmassnahmen werden zurzeit projektbezogen geregelt und funktional ausgeschrieben.

9.1.2 Bemessung und Nachweisverfahren

Die Brandlast wird durch die Rijkswaterstaat-Kurve (RWS) definiert. Diese wurde im Rahmen von Brandversuchen in einem Tunnel kleinen Querschnitts speziell für Tunnelbrände definiert (vgl. Abbildung 4).

¹ Die zur Bemessung von Risiken häufig zu Verwendung kommende Vergleichsgrösse "individuelles Risiko" bezeichnet die Wahrscheinlichkeit, dass eine Person bei permanenter Anwesenheit an einem bestimmten Ort in der Nähe des Gefahrenpotentials von einem entsprechenden Ereignis betroffen wird. Beim "kollektiven Risiko" wird zusätzlich die Anzahl der betroffenen Personen berücksichtigt. Dazu wird mittels Ereignisanalysen sowohl die Eintretenswahrscheinlichkeit als auch das Schadensausmass verschiedener Szenarien ermittelt und in einem Wahrscheinlichkeits-Ausmass-Diagramm (W-A-Diagramm) dargestellt. Bei der Beurteilung von kollektiven Risiken kann für grosse Ereignisse eine Risikoaversion angewendet werden.

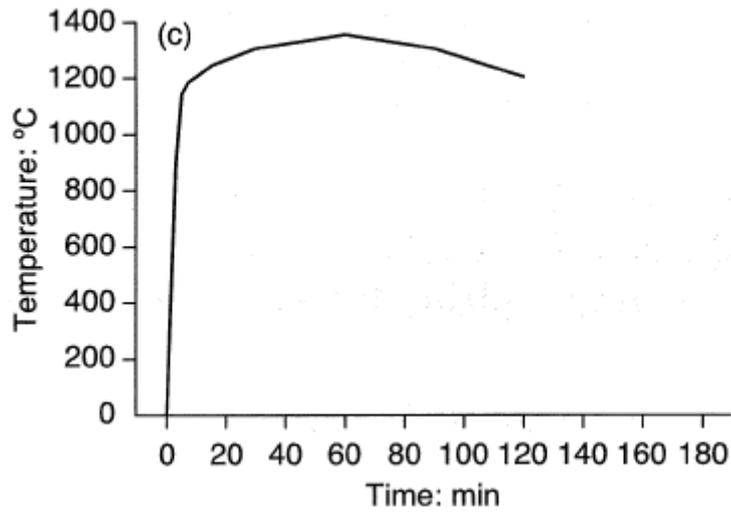


Abbildung 4: Temperatur-Zeit-Kurve RWS

Für den Brandschutz wird traditionell ein passiver Brandschutz in Form von Brandschutzplatten eingebaut.

10 Italien

10.1 Normen und Richtlinien

10.1.1 "Decreto Legislativo 5 Ottobre 2006" zu Strassentunneln

Die Mindestanforderungen an die Sicherheit in Strassentunneln werden durch die Richtlinie 2004/54/EG des europäischen Parlamentes und Rates festgelegt, welche mit dem "Decreto Legislativo 5 Ottobre 2006 n°264" gesetzlich verankert wurde.

10.1.2 Richtlinie der ANAS zu Strassentunneln

Neben diesem Gesetzestext hat die ANAS (Nationale autonome Strassenbetriebsgesellschaft) eine eigene Richtlinie, basierend auf der europäischen Richtlinie, auf diversen nationalen Normen sowie auf Studien von Universitäten und privaten Fachexperten unter dem Namen "Linee guida per la progettazione della sicurezza nelle gallerie stradali, 2006" ausarbeiten lassen.

10.2 Brandschutzziele

Die Ziele der ANAS-Richtlinie sind folgende (ANAS-Richtlinie, Kap 2.1):

- Schutz der Benutzer
- Schutz der Rettungskräfte
- Schutz der Struktur
- Minimierung von betrieblichen Einschränkungen
- Minimierung von Umwelteinflüssen

Folgende Konzepte sollen zur Umsetzung dieser Ziele beitragen (ANAS-Richtlinie, Kap 2.1):

- Definition von Mindestanforderungen an die Sicherheitsanlagen, -ausrüstung
- Formulierung und Charakterisierung der wesentlichen Brandszenarien
- Kriteriendefinition, welche das Überleben von Nutzern durch Selbstrettung ermöglichen
- Entwicklung von Fluchtstrategien

10.2.1 Risikoanalyse/Sicherheitsplanung

Der Artikel 13 des "Decreto Legislativo 5 ottobre 2006" erläutert das Konzept der Risikoanalyse. In der Richtlinie der ANAS wird die Durchführung der quantitativen Risikoanalyse beschrieben (Kap. 1.1.4, 2.5 und 3.4).

Demnach muss die Risikoanalyse nachweisen, dass zum Erreichen des geforderten Schutzziels zusätzlich zu den bereits vorgesehenen Einrichtungen geeignete ergänzende Massnahmen getroffen werden - insbesondere gilt dies für die Tunnelbenutzer, für das Personal des Tunnelbetreibers und für die Einsatzkräfte.

Die Risikoanalyse soll von einer dritten, unabhängigen Instanz durchgeführt werden.

Die Ergebnisse und die Analyse selbst müssen dokumentiert und der nationalen Kommission, welche für die Bewertung und Entscheidungsfindung zuständig ist, zugänglich gemacht werden.

Darüber hinaus ist im "Decreto Legislativo 5 ottobre 2006" auf Basis numerischer Werte und nach dem Bewertungskriterium ALARP (As Low As Reasonably Practicable) festgelegt, welche numerischen Werte nicht überschritten werden dürfen, um das Risiko im akzeptierten Rahmen zu behalten.

10.2.2 Schutz des Lebens

Im Brandfall muss eine sichere Evakuierung von Personen aus dem Tunnel ins Freie oder in einen durch das Feuer nicht gefährdeten Bereich möglich sein. Auch die Einsatzkräfte müssen unter sicheren Verhältnissen operieren können (Kap 4.2.1.4).

10.2.3 Schutz des Bauwerks

Gemäss "Decreto Legislativo 5 ottobre 2006" müssen alle tragenden Elemente des Tunnel einen ausreichenden Feuerwiderstand aufweisen, um das Ziel zu erreichen, einen Kollaps des Tunnel infolge Brandeinwirkung zu verhindern.

In der ANAS-Richtlinie wird diese Forderung präzisiert, indem der Feuerwiderstand aller tragenden Bauteile, aber auch aller Sicherheitselemente auf mindestens 120 Minuten festgesetzt wird (Kap. 4.2.1.8.2). Zudem wird im Kap. 4.2.1.8.1 definiert, dass alle Anstriche und Wandverkleidungen mit Materialien der Brandverhaltensklasse 0 auszuführen sind, welche durch Hitzeeinwirkung keine giftigen Gase freisetzen. Weiter muss die Funktionstüchtigkeit von Ventilatoren und deren Stromversorgung im Brandfall für mindestens 90 Minuten bei einer Temperatur von 400°C gewährleistet werden.

10.2.4 Schutz Dritter

Zu diesem Thema konnte in den unter 10.1 aufgeführten Dokumenten keine Angaben gefunden werden.

10.2.5 Andere Brandschutzziele

Zu diesem Thema konnte in den unter 10.1 aufgeführten Dokumenten keine Angaben gefunden werden.

10.2.6 Akzeptierte Risiken

Die ANAS-Richtlinie geht auf akzeptierte Risiken ein. Dabei werden diese nicht namentlich benannt, sondern wird als Funktion in Abhängigkeit der Opferzahlen und Ereignishäufigkeit angegeben.

F
 [probabilità di superamento della soglia:
 cioè *eventi/anno* che possono
 comportare un numero di vittime $\geq N$]

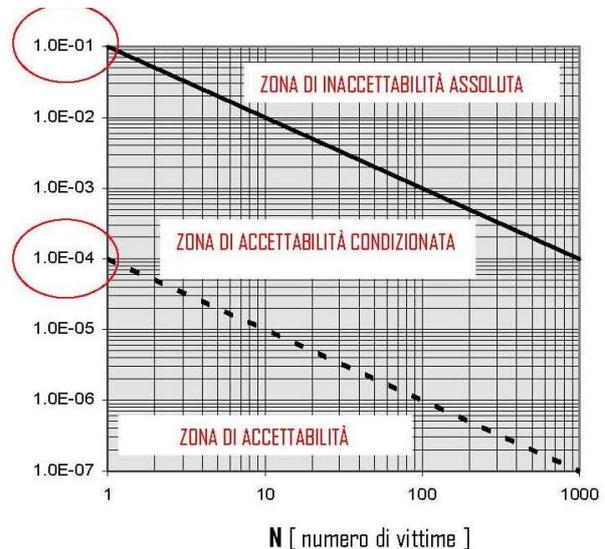


Tabelle 15: Definizione der akzeptierten Risiken für Strassentunnel gem. "D. L. 5 ottobre 2006"

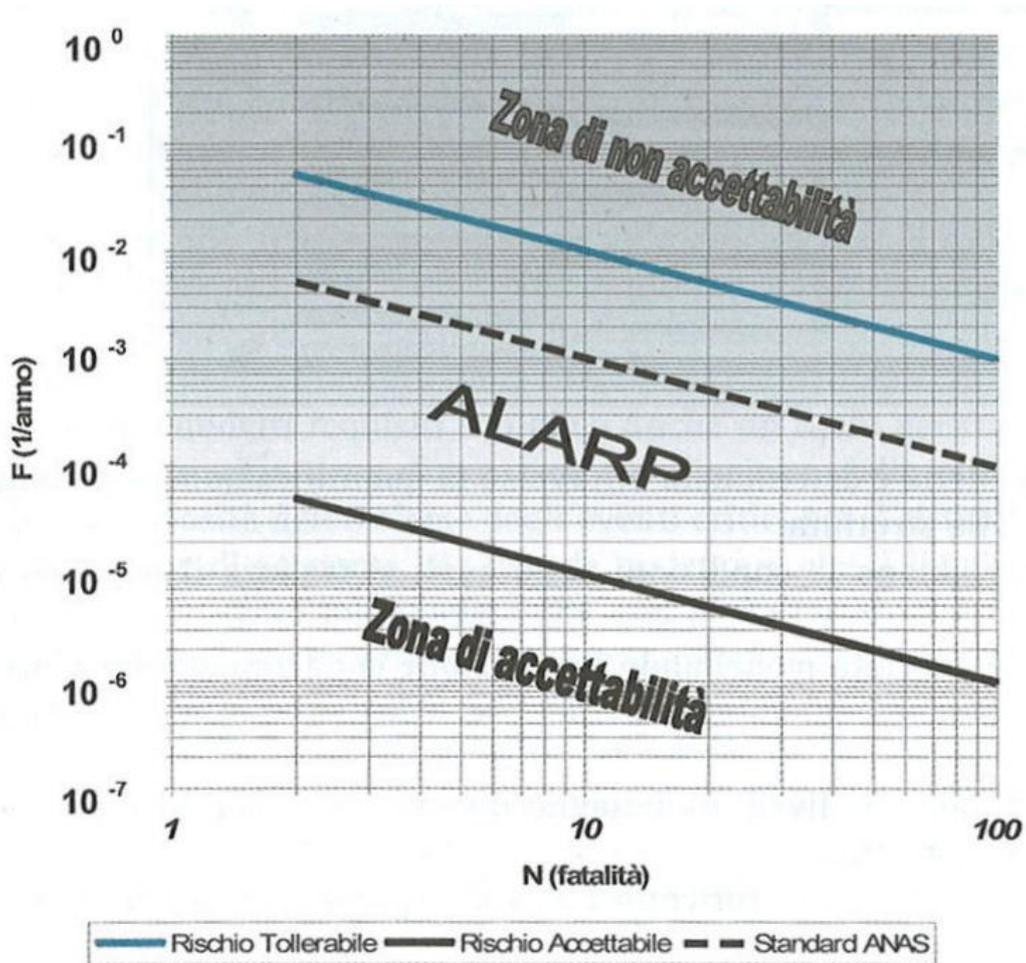


Tabelle 16: Definition der akzeptierten Risiken für Strassentunnel gem. Richtlinie der ANAS

10.3 Brandschutzkonzept

Das Brandschutzkonzept ist die Gesamtheit der Massnahmen und der Handlungen, um eine Gefahr zu begrenzen.

10.3.1 Vorgaben zu baulichen Brandschutzmassnahmen

Das "Decreto Legislativo 5 ottobre 2006" verweist auf die Richtlinie 2004/54/EG.

Die Richtlinie der ANAS differenziert zwischen folgenden entscheidenden Kriterien (Kap. 4.2.1.1 bis 4.2.1.6):

- Anzahl der Tunnelröhren und Anzahl der Fahrspuren je Röhre
- Linienführung (Lage und Höhe), Fahrspurweite und Mindestquerschnittsfläche in Abhängigkeit der Fahrspuranzahl
- Bankette
- Notausgänge
- Sicherheitsstollen
- Haltebuchten
- Überwachungszentrale (siehe auch 10.3.3)

10.3.2 Vorgaben zu technischen Brandschutzmassnahmen

Die Richtlinie der ANAS sieht folgenden Massnahmen vor:

- Brandnotbeleuchtung mindestens alle 100 m
- Automatisches Lüftungssystem
- Löschwasserversorgung mindestens alle 150 m
- Handfeuerlöscher mindestens alle 150 m
- Feuerwiderstand der tragenden Struktur und der Sicherheitselemente
- Branddetektionsanlage (Trübungsmessung, CO- und CO₂-Messung, lineare Temperaturmessung, Rauchererkennung) und Videoüberwachungsanlagen
- LSA, Wechselverkehrszeichen, Notfallbeschilderung
- Kommunikationssysteme wie Notrufstationen alle mind. 150 m
- Funkanlage

10.3.3 Vorgaben zu organisatorischen Brandschutzmassnahmen

Die Richtlinie der ANAS schreibt für Tunnel mit einer Länge grösser als 3'000 m und mit einem täglichen Verkehrsaufkommen grösser als 2'000 Fahrzeuge pro Fahrtrichtung eine Überwachungszentrale vor (Kap. 4.2.2.2.5). Die Überwachung mehrerer Tunnels kann in einer einzigen Zentrale gebündelt werden. Die Kontrollpersonen müssen spezifisch ausgebildet und in gewissen Zeitabständen geschult werden (Koordinierungs- und Einsatzplan).

10.4 Bemessungskonzept

10.4.1 Vorgaben zur Brandschutzbemessung

Im Anhang 6 der ANAS-Richtlinie werden kritische Ereignisse und deren Eintretenswahrscheinlichkeit definiert.

Hierin werden die möglichen kritischen Ereignisse aufgelistet:

- Brand
- Kollision, welche zu einem Brand führt
- Auslaufen von brennbaren Flüssigkeiten
- Explosion
- Freisetzen von giftigen Substanzen

10.4.2 Berechnungsmodell

Die Eintrittswahrscheinlichkeit der kritischen Ereignisse kann über verschiedene Ansätze ermittelt werden:

- historische Datengrundlage
- Ereignisbaum
- Expertengutachten
- Statistik

Empfohlen wird die Berechnung mittels IRAM (Italian Risk analysis method), welche mittels stochastischem Ansatz die Eintrittswahrscheinlichkeit eines bestimmten kritischen Ereignisses angibt.

10.4.3 Einwirkungsfaktoren

Im Anhang 5 der ANAS-Richtlinie wird die Brandquelle definiert. Daraus ergibt sich die Energiemenge (z.B. 6'000 MJ für einen kleinen PW; 400'000 MJ für einen Lkw beladen mit entzündbarer Flüssigkeit). Auf Basis der vorhandenen Energiemenge ergibt sich die Brandleistung, welche beispielsweise für einen grossen Pw 8 MW und für einen Lkw, beladen mit entzündbarer Flüssigkeit 100 MW beträgt.

Im Regelfall wird von einer Brandleistung von 10-30 MW ausgegangen; die Richtlinie empfiehlt allerdings den Nachweis mittels IRAM.

In der ANAS-Richtlinie wird präzisiert, dass der Feuerwiderstand aller tragenden Bauteile, aber auch aller Sicherheitselemente auf mindestens 120 Minuten festgesetzt wird (Kap. 4.2.1.8.2). Die Brandtemperatur orientiert sich an der ISO834. Sobald jedoch brennbare Flüssigkeiten durch einen Tunnel transportiert werden - und davon ist bei Personen- bzw. Lastkraftwagenverkehr i.d.R. auszugehen - gilt ein erhöhter Berechnungsansatz für die Temperatur. Dieser lässt sich durch Formeln ermitteln und hat sein Maximum bei ca. 1100°C.

10.4.4 Bettung/Gebirgsumgebung

Die Richtlinie der ANAS sieht als Grundlage für die Risikoanalyse Registerkarten vor (Anhang 2), welche mit den Kennwerten des Tunnels versehen werden. In der Registerkarte Nr. 4 werden Umwelteinflüsse definiert. Dazu gehören u.a.:

- Klimatische Zone
- Mittlere Temperatur im Winter und im Sommer
- Mittlere Windgeschwindigkeit an den Portalen sowie der Hauptwindrichtungen
- Abstand zur nächstgelegenen Ortschaft

10.4.5 Einfluss des Brandes auf Materialien

Siehe Kap. 10.2.3

10.5 Konstruktive Durchbildung

10.5.1 Vorgaben zu konstruktiven Durchbildungen

Zu diesem Thema konnte in den unter 10.1 aufgeführten Dokumenten keine Angaben gefunden werden.

10.5.2 Materialanforderungen

siehe Kap. 10.2.3.

10.5.3 Konstruktive Massnahmen

Weder im "Decreto Legislativo 5 ottobre 2006", noch in der Richtlinie der ANAS gibt es eine Aussage zur konstruktiven Ausbildung.

Im "Decreto ministeriale" vom 16. Februar 2007" (Nr. 87) wird auf die Norm UNI 9502/2001 verwiesen, welche Tabellen für die Bestimmung der Feuerbeständigkeit von strukturellen Elementen beinhaltet, die hauptsächlich von der Betondeckung abhängt.

Tunnel, welche länger als 500 m sind, müssen über eine Löschwasserversorgung verfügen, welche eine Wassermenge von mindestens 1'200 l/min. mit einem Druck von 0.5 MPa mittels Hydranten im Regelabstand von 150 m sicherstellt. Die Löschwasservorrichtung muss in der Lage sein, an mehreren Hydranten eine gleichmässige Wassermengenentnahme von mind. 300 l/min. bei einem Druck von 0.5 MPa zu gewährleisten. Die Einspeisung muss für mindestens 2 Stunden sichergestellt werden.

10.5.4 Nutzungsanforderungen

Im Anhang 3 der ANAS-Richtlinie werden die Strassentunnel in Abhängigkeit ihrer Länge und des Verkehrsaufkommens folgendermassen klassifiziert:

Gruppe	Verkehrsführung	Verkehrsaufkommen VT [Kfz/Spur]	Tunnellänge [m]
I	Richtungsverkehr	$\leq 2'000$	500 – 1'000
II	Richtungsverkehr	$\leq 2'000$	> 1'000
III	Richtungsverkehr	> 2'000	500 – 1'000
IV	Richtungsverkehr	> 2'000	1'000 – 3'000
V	Richtungsverkehr	> 2'000	> 3'000
VI	Gegenverkehr	$\leq 2'000$	500 – 1'000
VII	Gegenverkehr	$\leq 2'000$	> 1'000
VIII	Gegenverkehr	2'000 – 10'000	500 – 1'000
IX	Gegenverkehr	2'000 – 10'000	1'000 – 3'000
X	Gegenverkehr	2'000 – 10'000	> 3'000

In aufsteigender Form erhöhen sich die Anforderungen an die Struktur (max. zul. Steigung, Bankette, Tunnelentwässerung, Feuerwiderstand der tragenden Bauteile, Notausgänge, Haltebuchten etc.) und an die sicherheitsrelevanten Anlagenteile (Beleuchtung, Lüftung, Kommunikation, Detektion, Notfallausrüstung, Verkehrstelematik, Feuerwiderstand an die EM etc.).

11 Grossbritannien

11.1 Normen und Richtlinien

11.1.1 Störfallvorsorge in Grossbritannien

Als EU-Mitglied ist Grossbritannien verpflichtet, die europäische Richtlinie 96/82/EG (sog. Seveso-II-Richtlinie) in nationales Recht zu überführen. Die genauen Hintergründe, wie dies in Grossbritannien umgesetzt wird, konnten im Rahmen des vorliegenden Forschungsprojektes nicht genauer untersucht werden. Allerdings wird ähnlich wie in der Schweiz ein risikobasierter Ansatz verfolgt. Die Grenzwerte für die Akzeptanz der Risiken von Industrieanlagen beziehen sich in Grossbritannien aber nicht wie in anderen Ländern üblich auf die Todesfallwahrscheinlichkeit², sondern auf die Exposition gegenüber einer "dangerous dose". Diese entspricht einer Letalitätssrate von etwa 1% B.J.M. Ale, "Tolerable or Acceptable: A Comparison of Risk Regulation in the United Kingdom and in the Netherlands", Risk Analysis, Vol. 25, No. 2, p. 231-241, 2005.[59] [60].

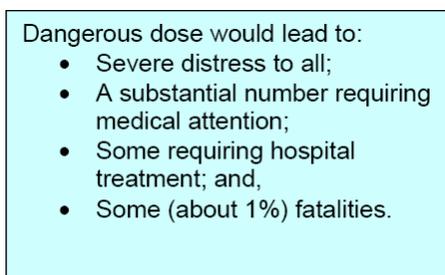


Abbildung 5: Dangerous dose [59].

Als Limiten für die Exposition gegenüber einer "dangerous dose" gilt für bestehende Anlagen ein individuelles Risiko von max. 10⁻⁴ pro Jahr, für neue Anlagen von max. 10⁻⁵ pro Jahr. Als vernachlässigbar gelten Ereignisse mit einer Wahrscheinlichkeit von < 10⁻⁷ pro Jahr.

Bei der englischen Regelung ist aber zu beachten, dass ein Unterschreiten der Limite für die individuelle Todesfall-Häufigkeit nicht bedeutet, dass ein Risiko deshalb akzeptiert wird. Unterhalb dieser Limite gilt das ALARP-Prinzip³ und Betreiber, lokale Behörde und HSE⁴ einigen sich gemeinsam auf die zu treffenden Sicherheitsmassnahmen. HSE hat dabei die Funktion eines "Pflichtberaters" ("statutory consultee"), dessen Rat gesucht werden muss und der von der Behörde nur schwer ignoriert werden kann. Das Kosten/Nutzen-Verhältnis muss sehr ungünstig sein, damit die verbleibenden Risiken als ALARP-konform akzeptiert werden. Das individuelle Todesfallrisiko fällt in der Praxis deshalb deutlich tiefer aus als dies die Grenzwerte vorgaukeln [59].

² Die zur Bemessung von Risiken häufig zu Verwendung kommende Vergleichsgrösse "individuelles Risiko" bezeichnet die Wahrscheinlichkeit, dass eine Person bei permanenter Anwesenheit an einem bestimmten Ort in der Nähe des Gefahrenpotentials von einem entsprechenden Ereignis betroffen wird. Beim "kollektiven Risiko" wird zusätzlich die Anzahl der betroffenen Personen berücksichtigt. Dazu wird mittels Ereignisanalysen sowohl die Eintretenswahrscheinlichkeit als auch das Schadensausmass verschiedener Szenarien ermittelt und in einem Wahrscheinlichkeits-Ausmass-Diagramm (W-A-Diagramm) dargestellt. Bei der Beurteilung von kollektiven Risiken kann für grosse Ereignisse eine Risikoaversion angewendet werden.

³ ALARP = As Low As Reasonably Practicable

⁴ HSE = Health and Safety Executive. Die HSE ist eine unabhängige öffentlich-rechtliche Anstalt ("non-departmental public body which has statutory responsibility") und von der rechtlichen Stellung her vergleichbar mit schweizerischen Organisationen wie der Suva oder dem ENSI.

11.1.2 Konstruktive Durchbildung

In Grossbritannien wird in der Richtlinie UK BD 78/99 für Strassentunnel [30], ähnlich der deutschen EBA-Richtlinie, gefordert, dass die Betonabplatztiefe in der Planung abgeschätzt wird. Weitere Hinweise sind dem EC2 und dem BS 8110 für die Bemessung von Stahlbetonkonstruktionen bei hohen Temperaturen zu entnehmen. Dort werden Hinweise zu Mindestwerten des Bewehrungsstahldurchmessers und der Betonüberdeckung gegeben.

12 Slowakei

12.1 Normen und Richtlinien

12.1.1 Eurocode

Die Normen EN 1991-1-2, 1992-1-2 und 1993-1-2 sind in nationalen Normen STN EN umgesetzt. Die Brandeinwirkung auf Bauteile und die Tragwerksbemessung im Brandfall werden nach dem Eurocode durchgeführt.

12.1.2 Technische Bedingungen: Brandsicherheit der Strassentunnel

Die Technischen Bedingungen (TB) dienen zur Planung, Bauausführung und zum Betreiben von neuen Strassentunneln in Bezug auf die Feuersicherheit. Für die Planung von bereits bestehenden Tunneln gelten die Bestimmungen dieser Richtlinie entsprechend.

Die TB bestimmen die brandtechnischen Parameter des Tunnels und die grundlegenden technischen Anforderungen an die Sicherstellung eines ausreichenden Sicherheitsniveaus für die Benutzer des Tunnels sowie Anforderungen an die Brandsicherheit.

Die TB enthalten keine Angaben zur Bemessung und konstruktiven Ausführung der Bauteile.

12.2 Brandschutzziele

12.2.1 Risikoanalyse

Eine weitere Beurteilung von möglichen Risiken ist nicht vorgesehen.

12.2.2 Schutz des Lebens

Im Brandfall muss eine sichere Evakuierung von Personen aus dem Tunnel ins Freiland oder in einen durch das Feuer nicht gefährdeten Bereich möglich sein. Auch der Einsatz der Feuerwehr muss unter sicheren Verhältnissen möglich sein.

12.2.3 Schutz des Bauwerks

Im Brandfall muss die Tragfähigkeit und Stabilität entsprechend dem Brandwiderstand sichergestellt sein.

12.2.4 Schutz Dritter

Die Zweckmässigkeit der Platzierung des Bauwerkes in Bezug auf die umliegende Bebauung ist bei der Planung zu berücksichtigen. Es werden keine konkreten Vorschläge oder Anforderungen an die Standortwahl oder zu berücksichtigenden Abstände zu vorhandenen Bauwerken formuliert.

12.2.5 Andere Brandschutzziele

In den vorliegenden Dokumenten wurde kein Hinweis auf andere Brandschutzziele gefunden.

12.2.6 Akzeptierte Risiken

In den vorliegenden Dokumenten wurde kein Hinweis auf andere Brandschutzziele gefunden.

12.3 Brandschutzkonzept

Strassentunnel müssen in Bezug auf die Brandsicherheit so bemessen, realisiert und benutzt werden, dass im Brandfall innerhalb der entsprechend dem Brandwiderstand ermittelten Zeit seine Tragfähigkeit und Stabilität erhalten bleibt.

12.3.1 Vorgaben zu baulichen Brandschutzmassnahmen

Die baulichen Brandschutzmassnahmen umfassen (TB Kap. 2.4):

- Verhinderung der Feuerausbreitung in andere Feuerabschnitte, auch über das Entwässerungssystem
- Abführung der Wärme und Abgase ausserhalb des Tunnels
- Gewährleistung eines wirksamen und sicheren Einsatzes der Feuerwehr
- Bestimmung der minimalen erforderlichen Wassermenge und der Art der Löschwasserversorgung
- Sicherstellen der Erreichbarkeit der Zufahrtstrassen und Aufstellflächen
- Auslegung eines ausreichenden Lüftungssystems
- Anforderungen an das Fluchtwegsystem (Anzahl und Länge)

12.3.2 Vorgaben zu technischen Brandschutzmassnahmen

Die technischen Brandschutzmassnahmen umfassen (TB Kap. 7):

- Löschwasserleitung und Hydranten
- Elektrische Brandmeldeanlage
- Feuerlöschanlage und Feuerlöschgeräte
- Evakuierungsleitsystem
- Brandlüftung
- SOS-Kabinen / Notfallnischen

12.3.3 Vorgaben zu organisatorischen Brandschutzmassnahmen

In den vorliegenden Dokumenten wurde kein Hinweis auf organisatorische Brandschutzmassnahmen gefunden.

12.4 Bemessungskonzept

12.4.1 Vorgaben zur Brandschutzbemessung

Die Brandgefahr in den Tunnelröhren wird durch die Wärmeleistung des wahrscheinlichen Brandes zum Ausdruck gebracht. Die Wärmeleistung ist abhängig von:

- Länge des Tunnels [m]
- Verkehrsintensität [Fahrzeuge/24 Stunden]
- Anteil der LKW [m]

Kriterien	Tunnelröhre			
	Richtungsverkehr		Gegenverkehr	
	30 MW	50 MW	30 MW	50 MW
a) Länge des Tunnels [m]	≤ 3'000	> 3'000	≤ 1'000	> 1'000
b) Verkehrsintensität [Fahrzeuge/24 Stunden]	≤ 25'000	> 25'000	≤ 15'000	> 15'000
c) Anteil der LKW am Verkehr [m]	≤ 15	> 15	≤ 15	> 15

Anmerkung:

Für die Bestimmung einer höheren Wärmeleistung des wahrscheinlichen Brandes muss entweder das Kriterium a) oder die Kriterien b) und c) gleichzeitig erfüllt sein.

Tabelle 17: Wärmeleistung des voraussichtlichen Brandes

Abhängig von der Art der Bauteile und der Wärmeleistung müssen die Bauteile auf einen entsprechenden Brandwiderstand [min] ausgelegt und bemessen werden. Die Zuordnung des Brandwiderstandes für die einzelnen Bauteile erfolgt anhand Tabelle 2 aus [54] mithilfe der ermittelten Wärmeleistung.

Die Vorgaben und Anforderungen gemäss EN 13501-1 [9] und 13501-2 [10] sind zu beachten.

12.4.2 Berechnungsmodell

Die Einwirkungen und das Tragverhalten werden gemäss EN 1991-1-2, 1992-1-2 und 1993-1-2 ermittelt.

12.4.3 Einwirkungsfaktoren

Siehe Kapitel 12.4.1, Tabelle 17

12.4.4 Bettung/Gebirgs Umgebung

Zu diesem Thema konnte in den unter 12.1 aufgeführten Dokumenten keine Angaben gefunden werden.

12.4.5 Einfluss des Brandes auf Materialien

Zu diesem Thema konnte in den unter 12.1 aufgeführten Dokumenten keine Angaben gefunden werden.

12.5 Konstruktive Durchbildung

12.5.1 Vorgaben zu konstruktiven Durchbildungen

Zu diesem Thema konnte in den unter 12.1 aufgeführten Dokumenten keine Angaben gefunden werden.

12.5.2 Materialanforderungen

Alle eingesetzten Materialien müssen in ihrer Art und Konstruktion dem geforderten Brandwiderstand entsprechen.

12.5.3 Konstruktive Massnahmen:

Die Konstruktionen sind z.B. durch Verkleidungen zu schützen. Ein Schutz durch Anstriche oder durch Aufspritzen ist nicht zulässig.

12.5.4 Nutzungsanforderungen

Zu diesem Thema konnte in den unter 12.1 aufgeführten Dokumenten keine Angaben gefunden werden.

13 Singapur

In Singapur gibt der Standard SS CP 65 Part 2, der auf dem British Standard basiert, Angaben zum Brandschutz an.

13.1.1 Bemessung und Nachweisverfahren

Im Standard SS CP 65 Part 2 werden drei Wege dargestellt, über die der Feuerwiderstand von Stahlbetonbauteilen bestimmt werden kann (CP 65 Part 2, Kap. 4.1.1):

- Tabellierte Daten
- Brandversuche
- brandingenieurtechnische Berechnungen

In allen drei Fällen beeinflussen die Bauteilabmessungen zusammen mit der Betondeckung den Feuerwiderstand des Bauteils. Einbezogen werden ebenso der Wassergehalt des Betons, die Betonsorte sowie die verwendeten Zuschläge.

13.1.2 Konstruktive Durchbildung

Mögliche Brandschutzmassnahmen sind:

- a) äusserer Schutz: Schutz des Betons vor einem schnellen Temperaturanstieg mithilfe einer feuerresistenten Isolierung (Brandschutzverkleidung, Brandschutzschicht). Weiteres dazu ist den Herstellerangaben der Produkte zu entnehmen
- b) innerer Schutz: Schutz des Betons vor Entstehen von hohem Wasserdampfdruck. PP-Fasern können beigemischt werden, um den Wasserdampfdruck und das Abplatzen des Betons zu reduzieren

Tabellen 3.5 und 4.9 sowie Abbildung 3.2 in Abschnitt 1 des CP65 werden die Mindestbetondeckung und die Mindestbauteilgrössen im Hinblick auf Brandbeanspruchung angeben.

14 Australien

14.1 Normen und Richtlinien

Zurzeit werden folgende Normen für Strassentunnel angewendet:

- AFAC Fire Safety Guidelines for Road Tunnels, 2001
- PIARC
- NFPA 502, Edition 2008, Standards for Road Tunnels, Bridges, and other Limited Access Highways
- EU Normen
- Road Tunnel Design Guideline, RTA – NSW (New South Wales) 2006

Die im Jahr 2001 von den australischen Behörden (The Australasian Fire Authorities Council AFAC) veröffentlichte "Fire Safety Guidelines for Road Tunnels" ist die einzige offiziell gültige Richtlinie für Sicherheit in Strassentunneln.

Die Ausarbeitung einer neuen Richtlinie ist in Vorbereitung.

In der NFPA 502 werden Tunnel in Abhängigkeit ihrer Länge in folgende Kategorien eingeteilt (NFPA 502, Kap. 7.2):

- Kategorie X: $l \leq 90 \text{ m (300 ft)}$
- Kategorie A: $240 \text{ m} > l > 90 \text{ m}$
- Kategorie B: $300 \text{ m} > l \geq 240 \text{ m (800 ft)}$
- Kategorie C: $1'000 \text{ m} > l \geq 300 \text{ m (1'000 ft)}$
- Kategorie D: $l \geq 1'000 \text{ m (3'280 ft)}$

Für die jeweilige Tunnelkategorie sind die geforderten Schutzausrüstungen bestimmt.

14.2 Brandschutzziele

14.2.1 Risikoanalyse/Sicherheitsplanung

Das Risikomanagement der AFAC Fire Safety Guidelines for Road Tunnels folgt dem "Australian Standard 4360 Risk Management 1995". Dieses befasst sich insbesondere mit der Rauchausbreitung in Tunneln, welches mittels "Computational Fluid Dynamics" (CFD) durchgeführt wird.

Vor dem Tunneldesign muss eine Risikoanalyse durchgeführt werden. Die Ergebnisse dieser Risikoanalyse müssen sehr sorgfältig analysiert werden, da der nächste Schritt eine daraus resultierende Risikostufe bzw. von den Behörden akzeptierten Risikostufe ist (AFAC Kap. 4.1). Risiko kann nicht ausgeschlossen werden, nur gemindert werden (AFAC Kap. 4.3).

Das Brandschutzkonzept soll folgende Parameter in Betracht ziehen (AFAC Kap. 3.1):

- Wagentyp und verbundene Lasten z.B. PKW, Gefahrgut, schwere Lasten, etc
- Länge und Breite des Tunnels
- Anzahl von Röhren und Verkehrsrichtungen
- Anzahl und Länge von Zonen in jeder Röhre
- Baumaterialien
- Betrieb
- Verfügbarkeit von Brandlöscheinrichtungen
- Verfügbarkeit von Branddetektoren
- frühe- und durchschnitt Ankunftszeit der Feuerwehr

- Verfügbarkeit von Notausgänge
- Notfall-Leistung des Lüftungssystems
- Rauchentzugsleistung des Lüftungssystem
- Verkehrsdurchführung
- Steuerung der Brandausbreitung
- Applikationszeitpunkt des Löschmittels

14.2.2 Schutz des Lebens

Im Brandfall sind folgende Massnahmen vorgesehen:

- alle Tunnelbenutzer und die Kontrollorgane werden benachrichtigt
- alle Brandschutzmassnahmen werden aktiviert
- der Brandherd wird lokalisiert
- die Einsatzkräfte werden alarmiert

Schutzziele (AFAC Kap. 4.1):

- Schutz des Lebens des Fahrers, andere Insassen und Personal des Notfalldienstes
- Den Einsatz vom Notfalldienstpersonal ermöglichen

14.2.3 Schutz des Bauwerks

Hinsichtlich dem Schutz der Struktur wird lediglich beschrieben, welche Folgen ein Brand im Tunnel haben kann (z.B. Abplatzungen), es wird aber nicht darauf verwiesen, welche Massnahmen ergriffen werden können, um den Schutz der Struktur zu verbessern. Zusätzlich wird erwähnt, dass durch die Verwendung von Sprinkleranlagen das Abplatzen von Beton im Brandfall gefördert wird.

Schutzziele (AFAC Kap. 4.1):

- Die Auswirkung an Eigentum, Geschäftsunterbrechung und Umwelteinflüsse begrenzen

14.2.4 Schutz Dritter

Zu diesem Thema konnte in den unter 14.1 aufgeführten Dokumenten keine Angaben gefunden werden.

14.2.5 Andere Brandschutzziele

Zu diesem Thema konnte in den unter 14.1 aufgeführten Dokumenten keine Angaben gefunden werden.

14.2.6 Akzeptierte Risiken

Die akzeptierten Risiken werden durch die englische "Health and Safety Executive: Qualified Risk Assessment" definiert (AFAC Kap. 4.3):

- Falls das Risiko zu gross ist, wird dies nicht akzeptiert
- Falls das Risiko akzeptabel ist, müssen keine Massnahmen getroffen werden
- Falls das Risiko zwischen den beiden obengenannten Konzepten liegt, gilt die ALARP als angenommen

14.3 Brandschutzkonzept

Generell verweist die AFAC darauf, dass die Tunnelstruktur und die Tunnelschutzsysteme der Hitze widerstehen sowie die Ausbreitung gefährlicher Gase und die Rauchentwicklung kontrollieren können müssen.

14.3.1 Vorgaben zu baulichen Brandschutzmassnahmen

Um die Gefahr eines Brandes zu reduzieren sind folgende Methoden möglich (AFAC

Kap. 7.1):

- Installation eines geeigneten Brandschutzsystems (Gefahrgut kann den Einsatz von Schaumbekämpfungsmitteln bedingen)
- Adäquates Entwässerungssystem, Flammenabsperrvorrichtungen, Pumpen, Auffangbecken für Oberflächenwasser
- Redundantes Wasserversorgungssystem (Hydranten alle 60 m)
- Nebeldüse / Sprinkleranlage
- Notausgänge in angemessenen Abständen (Abstände werden von Fall zu Fall in Abhängigkeit des Verkehrsaufkommens und des Lüftungssystems definiert)
- Strassenverlauf und Fahrbahnoberfläche

In diesem Zusammenhang rät die PIARC jedoch vom Einsatz von Nebeldüsen / Sprinklern im Strassentunnel ab. Ein Löschwasserversorgungssystem ist einem Sprinklersystem vorzuziehen.

14.3.2 Vorgaben zu technischen Brandschutzmassnahmen

Gemäss AFAC muss die Wasserversorgung mindestens dem "Australian Standard 2118.1 Grade 1" entsprechen.

Zudem müssen folgende Detektionssysteme in einem Strassentunnel vorhanden sein (AFAC Kap. 6.1):

- Ortungseinrichtung zum Lokalisieren stehender Fahrzeuge
- Videoüberwachung
- Hitzemessgerät
- Branddetektor

Weiter sind folgende Brandbekämpfungsmittel entlang des Tunnels vorzusehen (AFAC Kap. 13.1):

- Schlauchtrommeln
- Hydranten
- Feuerlöscher

Die Detektoren müssen folgenden Anforderungen genügen (AFAC Kap. 7.2):

- Die Branddetektoren müssen es dem Tunnelbetreiber innerhalb 30 bis 60 Sekunden ermöglichen, einen Brand zu überprüfen

14.3.3 Vorgaben zu organisatorischen Brandschutzmassnahmen

Im Tunnel sind verschiedene Kommunikationssysteme vorzusehen, welche den Benützern den Kontakt zum Kontrollraum ermöglichen (AFAC Kap. 9.2, 10.11).

Von Seiten des Tunnelbetreibers muss in enger Zusammenarbeit mit den Einsatzkräften ein Notfallplan (Incident Management Plan, IMP) erarbeitet werden. Um im Ereignisfall genügend vorbereitet zu sein, erarbeitet der Tunnelbetreiber in Zusammenarbeit mit der Feuerwehr einen Evakuierungsplan (AFAC Kap. 10.7). Ein allfälliger Kontrollraum (Tunnel operations control room, TOCR) muss über alle nötigen Einrichtungen zur Gewährleistung der Tunnelsicherheit verfügen.

14.4 Bemessungskonzept

14.4.1 Vorgaben zur Brandschutzbemessung

Zu diesem Thema konnte in den unter 14.1 aufgeführten Dokumenten keine Angaben gefunden werden.

14.4.2 Berechnungsmodell

Zu diesem Thema konnte in den unter 14.1 aufgeführten Dokumenten keine Angaben gefunden werden. Es wird nur auf Computersimulationen verwiesen.

14.4.3 Einwirkungsfaktoren

Zu diesem Thema konnte in den unter 14.1 aufgeführten Dokumenten keine Angaben gefunden werden.

14.4.4 Bettung/Gebirgsumgebung

Zu diesem Thema konnte in den unter 14.1 aufgeführten Dokumenten keine Angaben gefunden werden.

14.4.5 Einfluss des Brandes auf Materialien

Zu diesem Thema konnte in den unter 14.1 aufgeführten Dokumenten keine Angaben gefunden werden.

14.5 Konstruktive Durchbildung

14.5.1 Vorgaben zu konstruktiven Durchbildungen

Gemäss AFAC (Kap. 13.4.1 und 13.4.2) muss die Tunnelstruktur im Brandfall solange einem Feuer standhalten, damit alle Benutzer aus dem Tunnel evakuiert werden können und den Einsatzkräften genügend Zeit zur Brandbekämpfung verbleibt. Die eingesetzten Materialien dürfen weder brennen, noch unter Hitzeeinwirkung gefährliche Gase freisetzen. Ein allfälliger lokaler Kollaps der Struktur darf lebensrettende Einrichtungen nicht beeinträchtigen (elektromechanische Einrichtungen, Kommunikationssysteme und Brandschutzeinrichtungen).

14.5.2 Materialanforderungen

Gemäss NFPA Kap. 7.3.4 müssen alle strukturellen Materialien eine minimale Schmelztemperatur von 1'350°C aufweisen.

Zusätzlich müssen alle sicherheitstechnischen Einrichtungen vor Schäden durch Fahrzeuge geschützt werden.

14.5.3 Konstruktive Massnahmen

Zu diesem Thema konnte in den unter 14.1 aufgeführten Dokumenten keine Angaben gefunden werden.

14.5.4 Nutzungsanforderungen

Zu diesem Thema konnte in den unter 14.1 aufgeführten Dokumenten keine Angaben gefunden werden.

15 Forschungsprojekte zur Brandbemessung

Im Rahmen der internationalen und nationalen Forschung, insbesondere der Europäischen Kommission im Rahmen des 5. Forschungsrahmenprogramms sind in der nahen Vergangenheit einige wichtige Forschungsprojekte zum Thema Brandschutz in Tunneln durchgeführt worden bzw. sind noch in der Durchführung.

Der Fokus der Mehrheit der Projekte liegt vorwiegend in Sicherheitsaspekten und betrieblichen Massnahmen in Tunneln. Einige Forschungsprojekte und Veröffentlichungen haben jedoch bemessungsrelevante Aspekte zum Ziel oder beinhalten diese Faktoren. Diese Erkenntnisse werden nachfolgend aufgezeigt.

15.1 ITA: Guidelines for Structural Fire Resistance for Road Tunnels

In Kooperation zwischen der ITA und der PIARC wurde im Mai 2005 ein Leitfaden herausgebracht, welcher sich mit dem Brandwiderstand von Bauteilen in Strassentunneln auseinandersetzt. In diesem Rahmen werden sowohl Angaben zur Bemessung und Brandlasten gemacht als auch zu baulichen Massnahmen, um der Brandlast entgegen zu wirken.

Der Leitfaden kann als Weiterentwicklung des Berichts „Fire and Smoke Control in Tunnels“ [34] angesehen werden, in welchem es bereits Empfehlungen zur Nutzung von Brandkurven gibt und welcher als Basis für die SIA 197/2 verwendet wurde (vgl. Kap. 3.1 dieses Berichtes).

Weitere Informationen unter <http://www.ita-aites.org>.

15.1.1 Brandschutzziele und -konzepte

Im Rahmen der Forschungsarbeit wird ein Konzept zur Bestimmung der besonders risikoreichen und somit besonders schützenswerten Bereiche dargestellt. Als Brandschutzziel für dieses Konzept wird einzig der Personenschutz zur sicheren Evakuierung von Fahrgästen und Rettungskräften deklariert.

Für das Konzept werden Kategorien definiert, welche sich an der Querschnittsform und Belüftung orientieren. Zudem wird der Baugrund für Unterkategorien einbezogen. Als Ergebnis wird für diese Kategorien angegeben, welche Bereiche insbesondere grosses Risikopotential enthalten und somit durch Brandschutzmassnahmen geschützt werden müssen. Folgende Bereiche werden unterschieden:

- Innenschale
- Zwischendecke
- Fahrbahn
- Leitungswände
- Querschläge
- Lüfterbereiche
- Zwischendeckenaufhängung

15.1.2 Bemessung und Nachweisverfahren

In Bezug auf die Bemessung werden verschiedene Temperatur-Zeit-Kurven evaluiert und eine Empfehlung formuliert, für welchen Fall welche Kurve für die Brandlast zugrunde gelegt werden sollte. Die Differenzierung berücksichtigt das Vortriebsverfahren, die Baugrundverhältnisse, das Bauteil sowie die Verkehrszusammensetzung (PKW oder LKW):

Traffic Type	Main Structure				Secondary Structures ⁴			
	Immersed or under/inside superstructure	Tunnel in unstable ground	Tunnel in stable ground	Cut & Cover	Air Ducts ⁵	Emergency exits to open air	Emergency exits to other tube	Shelters ⁶
Cars/ Vans	ISO 60 min	ISO 60 min	2	2	ISO 60 min	ISO 30 min	ISO 60 min	ISO 60 min
Trucks/ Tankers	RWS/ HC _{inc} 120 min ¹	RWS/ HC _{inc} 120 min ¹	3	3	ISO 120 min	ISO 30 min	RWS/ HC _{inc} 120 min	RWS/ HC _{inc} 120 min ⁷

Table 2.1: Recommendations of PIARC

Abbildung 6: Empfehlung PIARC zur Nutzung Temperatur-Zeit-Kurven [34]

In einer tieferen Studie wurde die Verkehrszusammensetzung in vier Kategorien eingeteilt und die Empfehlung vertieft. Die Kriterien zum Bauwerk bleiben unverändert. Das Ergebnis ist in der folgenden Tabelle dargestellt:

Classification	Type of Vehicle
Category 1	Cars only (no HGV).
Category 2	Heavy Lorries (HGV)
Category 3	Petrol Tankers
Category 4	Special Cases (ITT)

Table 2.2 — Road Tunnel Categories

Notes: Category 1: Passenger vehicles, light vans, and pickups.
Category 2: Heavy goods vehicles (HGV), including straight and trailer trucks, petrol tankers and other flammable hazardous materials.
HGV: Heavy goods vehicle

Category	Number Vehicles Involved	Immersed Tunnel	Tunnel in Unstable Ground	Tunnel in Stable Ground	Cut & Cover	Air Ducts	Exit to Open	Exit to Other Tube	Shelter
1	1-2	ISO 60 min.	ISO 60 min.	2	2	ISO 60 min.	ISO 30 min.	ISO 60 min.	ISO 60 min.
1	> 3	ISO 60 min.	ISO 60 min.	2	2	ISO 60 min.	ISO 30 min.	ISO 60 min.	ISO 60 min.
2	1-2	RWS/ HC _{inc} 2 hrs.	RWS/ HC _{inc} 2 hrs.	3	3	ISO 2 hrs.	ISO 30 min.	RWS/ HC _{inc} 2 hrs.	RWS/ HC _{inc} 2 hrs.
2	>3	RWS/ HC _{inc} 3 hrs.	RWS/ HC _{inc} 3 hrs.	3	3	ISO 2 hrs.	ISO 30 min.	RWS/ HC _{inc} 2 hrs.	RWS/ HC _{inc} 2 hrs.

Abbildung 7: Empfehlung PIARC zur Nutzung Temperatur-Zeit-Kurven vertieft [34]

Im Folgenden werden Erkenntnisse zum Materialverhalten im Verlauf eines Brandfalls erläutert.

Zudem werden in Anlehnung an die französische Norm Widerstandsklassen definiert, welche je Bauwerk zu erreichen sind. Das Verhalten von brandgeschädigten Tragstrukturen wird ausführlich erläutert. Es werden Empfehlungen für Temperaturgrenzwerte gegeben.

Diese wertvollen Erkenntnisse können in einen Vorschlag für einen Bemessungsablauf einfließen, konkrete Angaben zum Bemessungs- und Nachweisvorgehen werden jedoch nicht gemacht.

15.1.3 Konstruktive Durchbildung

Es werden Empfehlungen zur Verstärkung und Schutz verschiedener Bereiche gegeben. Die betrachteten Methoden sind:

- Erhöhung des Brandwiderstands im Beton selbst
- Brandschutzschicht zur Verzögerung der Hitzeentwicklung im Beton
- Zweite Innenschale
- Installation von Brandschutzmaterialien

15.2 FIT – Fire In Tunnels

Das Forschungsprojekt FIT – Fire In Tunnels wurde im Auftrag der Europäischen Kommission im Rahmen des 5. Forschungsrahmenprogramms zwischen 2001 und 2005 bearbeitet. [36]

Die Hauptthemen dabei waren:

- Festlegung von Bemessungsbränden
- Zusammenstellung und Auswertung von Richtlinien und Empfehlungen für brandschutztechnisch geeignete und optimierte Entwurfsgrundsätze sowie Empfehlungen zur Optimierung der Fluchtsituation, Fremdrettung und Brandbekämpfung

Mehr Informationen unter <http://www.etnfit.net>.

15.2.1 Brandschutzziele und -konzepte

Die im Rahmen des Forschungsprojekts ermittelten Brandschutzziele sind:

- Ziele zur Personensicherheit
 - Minimierung des Verletzungs- und Todesfallgefahr für Nutzer des Tunnels im Brandfall
 - Minimierung der Risiken für Personen ausserhalb des Tunnels
 - Minimierung der Verletzungs- und Todesfallgefahr für Rettungskräfte und Unterhaltspersonal
- Ziele zu ökonomischen Konsequenzen und Lebensqualität
 - Vermeidung von Schäden welche die Tragfähigkeit verringern, oder bleibende Verformungen verursachen und somit die Nutzung des Tunnels verschlechtern oder verhindern
 - Vermeidung von teuren Reparaturarbeiten
 - Vermeidung von langen Ausfallzeiten des Tunnels

Es wird darauf hingewiesen, dass die Brandschutzziele je Bauwerk in Abhängigkeit von der geographischen und ökonomischen Lage neu beurteilt und gegebenenfalls ergänzt werden sollten.

15.2.2 Bemessung und Nachweisverfahren

Als eines der Hauptziele wurde untersucht, welche Bemessungsbrände für welchen Fall einzusetzen sind. Im Vergleich der bekannten Temperatur-Zeit-Kurven für Tunnelbrände aus den nationalen und internationalen Normen und unter Berücksichtigung der Erkenntnisse aus den Empfehlungen der ITA / PIARC (vgl. Kap. 15.1 dieses Berichtes) wurde für verschiedene Tunnelnutzungen die zu verwendende Kurve ermittelt.

Es wird eine Empfehlung der zu nutzenden Kurve für die folgenden Tunnelarten gegeben:

- Strassentunnel
- Bahntunnel
- Metro

Es wird darauf hingewiesen, dass der Unterschied zwischen Materialprüfungen, z.B. Brandprüfungen an Betonprobekörpern, und der Beurteilung eines gesamten Tunnelbauwerks nicht aus den Augen gelassen werden dürfe. Ein vollständiger Tunnel

dürfe nicht ausschliesslich auf Basis von Brandprüfungen bemessen werden. Im Gegenteil seien bei der Bemessung eines Tunnelbauwerks stets die normalen Lasten mit den Brandlasten kombiniert zu betrachten, zusätzlich auch die statischen Auswirkungen, wenn die Umgebung des Tunnels ebenfalls aufgeheizt wird. Ein Vorschlag, wie dieser Appell umzusetzen sei, wird jedoch nicht gegeben.

15.2.3 Konstruktive Durchbildung

Zur konstruktiven Durchbildung werden im Rahmen des Forschungsauftrags keine Angaben gemacht.

15.3 ASTRA: Empfehlung zum Vorgehen für die Bemessung von Autobahnüberdeckungen und Autobahntunnel gegen Brandeinwirkung

Die Empfehlung wurde im April 2005 durch Dr. M. Fontana (ETH Zürich) im Auftrag des ASTRA erarbeitet, mit dem Ziel, Informationen zu Bränden und Brandverhalten zusammenzustellen und diese, wo erforderlich, zu ergänzen.

15.3.1 Brandschutzziele und -konzepte

Es werden die Schutzziele aus den Ergebnissen der PIARC [34] und der Norm SIA 197 wiedergegeben. Zur Umsetzung werden insbesondere die ersten beiden Schutzziele empfohlen (Empfehlung, Kap. 8.1).

- Personen innerhalb eines Tunnels sollen sich selbst retten können oder durch Rettungskräfte zu einem sicheren Ort geleitet werden
- Rettungsaktionen sollen unter sicheren Bedingungen möglich sein
- Übermässige finanzielle Schäden sollen vermieden werden

15.3.2 Bemessung und Nachweisverfahren

Es wird ein guter Überblick über die nationalen und internationalen Temperatur-Zeit-Kurven gegeben sowie über zusätzlich durchgeführte Brandversuche am vollen Tunnelquerschnitt (vgl. Kap. 15.4 und 15.5 dieses Berichtes). Es wird geäussert, dass die Normbrandkurven die wirklichen Verhältnisse jedoch nur angenähert widerspiegeln, für eine realistische Beurteilung seien Computersimulationen einzusetzen. Ein Entscheid für eine bestimmte Kurve steht gemäss Aussage derzeit noch aus.

Darüber hinaus wird das Brandverhalten von Baustoffen und Bauteilen aus Beton erläutert sowie Möglichkeiten zur Sanierung brandgeschädigter Stahlbetonteile aufgezeigt.

Die Bemessung wird entweder rechnerisch oder mit Ofenversuchen erläutert. Wird eine rechnerische Bemessung durchgeführt, wird auch hier empfohlen, das Abplatzverhalten vorgängig mit Versuchen nachzuweisen. Die Bemessung folgt folgendem Ablauf (Empfehlung, Kap. 8.3):

1. Berechnung der Temperaturen im Bauteil unter Brandeinwirkung (Temperaturfeldberechnungen mit geeignetem Computerprogramm)
2. Spannungsermittlung mittels Schichtenmodell (einfache Geometrien) oder numerischer Schalenberechnung mit nichtlinearem FEM (elastisch gebettete Tunnelgewölbe)

Als Schlussbemerkung wird empfohlen, vereinfachte Berechnungsansätze zu entwickeln, welche mindestens Vorbemessungen ähnlich wie im Hochbau erlauben würden.

15.3.3 Konstruktive Durchbildung

Folgende Empfehlungen zur Konstruktion werden gegeben (Empfehlung, Kap. 8.4):

- Fugen müssen derart gestaltet sein, dass das Feuer die Dichtungsfolie nicht erreicht
- Befestigungen und Verbindungen aus Metall zwischen Tübbingungen dürfen dem Feuer nicht ungeschützt ausgesetzt werden
- Dilatationsfugenbreiten dürfen nicht nur auf Raumtemperatur ausgelegt werden
- Auflager von Zwischendecken sind z.B. durch PP-Faserzugabe und ausreichend feine Bewehrung oder zusätzliche Aufhängungen zu sichern
- Wichtige Leitungen sind am besten unterhalb der Fahrbahn in kühlen Bereichen zu führen
- Entwässerungen sind gegen intensiven Löschangriff auszulegen und gegen explosive Dämpfe zu sichern

15.4 Eureka-Versuche

Im Rahmen der Eureka-Versuche im Jahr 1996 wurden in einem stillgelegten Bergwerksstollen die ersten Brandversuche an einem vollständigen Tunnelquerschnitt durchgeführt. [38]

Die gewonnenen Erkenntnisse über Brandverhalten, Rauchausbreitung, Belüftung und Bauschäden bildeten die Grundlage für neue Sicherheitsrichtlinien und -vorschriften in allen 10 Partnerländern.

15.5 Large Scale Fire Tests in the Runehamar Tunnel, Norway (Teil von UPTUN)

Im Rahmen des UPTUN Forschungsprojekts der Europäischen Kommission wurden im stillgelegten Runehamar Tunnel in Norwegen Brandversuche am vollen Tunnelprofil durchgeführt. [38]

15.5.1 Bemessung und Nachweisverfahren

Die Temperaturentwicklung wurde mit den gängigen Temperatur-Zeit-Kurven aus den nationalen und internationalen Normen verglichen. Es wurde festgestellt, dass die Kurve, welche der realen Entwicklung am nächsten kommt, die niederländische RWS-Kurve ist.

Darüber hinaus wurden Daten für die Heat Release Ratio (HRR), die Hitzeverteilung über den Querschnitt und Angaben zu Abplatzungen ermittelt. Diese HRR-Kurven können für die Bemessung verwendet werden, um Spannungen im Bauwerk zu ermitteln.

Eine wesentliche Erkenntnis der Forschung war die Schädlichkeit von Abplatzungen. Diese können:

- explosiv erfolgen
- die Bewehrung für hohe Temperaturen zugänglich machen
- die Tragkraft reduzieren
- zu Leckagen führen
- im Endeffekt zum Kollaps führen

Als Ergebnis wurden die Brandschutzziele wie folgt definiert (kurze Zusammenfassung):

- Flucht und Rettung von Personen
- Brandbekämpfung
- Schutz des Bauwerks
 - Temperatur
 - Abplatzungen

- Dauerhaftigkeit
- Verkehrslast
- Ästhetik, Oberflächengestaltung, Bauwerkserhaltung
- Ersatz / Reparatur Austausch im Brandfall
- Passiver Brandschutz des Betons
 - PP-Fasern, Stahlfasern
 - Betonzuschläge
 - Porosität
 - Feuchtigkeit
- Externer Brandschutz als thermische Barriere
 - Spritzbetonsysteme
 - Platten-/ Schutzwandsysteme
- DARTS (Durable And Reliable Tunnel Structures)
- FIT (Fire In Tunnels)
- Safe Tunnel (Innovative Systems and Frameworks for Enhancing of Traffic Safety in Road Tunnels)
- Sirtaki (Safety Improvement in Road&Rail Tunnels using Advanced Information Technologies and Knowledge Intensive Decision Support Models)
- Virtual Fires (Virtual real Time Emergency Simulator)
- Safe-T (Safety in Tunnels)

15.6 Uptun (Cost-effective, sustainable and innovative Upgrading Methods for Fire Safety in existing Tunnels)

Interessant im Zusammenhang mit den beim Forschungsprojekt UPTUN durchgeführten Grossbrandversuchen/Laborbrandversuchen sind die Resultate, die sich beim Test verschiedener Spritzbetone ergeben haben.

Untersucht wurden Spritzbetone mit:

- Feuerbeständigen Zuschlägen (z.B. Magnesium-Eisen-Hydrosilikat-Mineralien)
- PP-Fasern
- Speziellen Zusätzen
- Feinstäuben
- Zusatzmitteln

Die Ergebnisse zeigen extreme Schwankungen bei den gemessenen Temperaturen an der Oberfläche, in 10 mm Tiefe und in 30 mm Tiefe. Auffällig sind die stark unterschiedlichen Temperaturen an der Oberfläche und die nahezu gleichen Temperaturen in 30 mm Tiefe.

15.7 PIARC: An Assessment of Fixed Fire Fighting Systems

Die PIARC-Studie von 2008 [62] bietet einen umfassenden Überblick über den aktuellen Wissensstand bezüglich festinstallierter Brandlöschanlagen. Sie beinhaltet insbesondere eine Rundschau über verschiedene, heute verfügbare Löschrinzipien und die Wechselwirkung von Löschanlagen mit anderen Sicherheitseinrichtungen, insbesondere mit verschiedenen Lüftungstypen. In den Anhängen wird auch auf weitere Themen wie z.B. Installationskosten, Aufwand für Wartung und Unterhalt, Detektionssysteme und weltweite Anwendungsbeispiele von Löschanlagen eingegangen.

15.7.1 Löschsysteme

Grundsätzlich wird zwischen verschiedenen Löschrinzipien unterschieden:

- Verdrängen des Sauerstoffs (Ersetzen mit anderem Gas oder Nachströmen zum Brandort verhindern)
- Entzug von Wärme (Einsatz von Lüftungssystem, Sprühnebel, Sprinkler oder Schaum)
- Beeinflussung der chemischen Reaktion bei der Verbrennung⁵ (Entzug von Brennstoff, Sauerstoff oder Energie)

Im PIARC-Bericht finden sich insbesondere genauere Angaben zur Wirkungsweise von:

- Sprinkler-Anlagen
- Sprühnebel-Löschanlagen
- Schaumlöschanlagen
- Gaslöschanlagen (nur in Fahrzeugen)

15.7.2 Erfahrungen aus anderen Ländern

Europa

Einige europäische Länder haben bereits einzelne Tunnels mit festinstallierten Brandlöschanlagen ausgerüstet (Niederlande, Österreich, Spanien), wobei diese als Ausnahmelösungen zu werten sind. Andere Staaten sind noch zurückhaltend und betreiben verschiedene Forschungsprojekte auf diesem Gebiet (Deutschland, Frankreich). Die früher noch stärkeren Vorbehalte in Europa gegenüber Brandlöschanlagen in Tunnels sind allerdings zurückgegangen und die Vor- und Nachteile von fest installierten Löschanlagen werden heute genauer untersucht.

Japan

Sprinklersysteme werden schon seit über 40 Jahren in japanischen Strassentunnels eingesetzt. Aufgrund der hohen Kosten allerdings nur in Tunnels mit einem Verkehrsaufkommen von mehr als 4000 Fahrzeugen pro Tag. Die Entscheidung über die effektive Installation eines Löschrystems in einem neuen Tunnel basiert auf den japanischen Sicherheitsstandards und auf einer Kosten/Nutzen-Analyse. Der Zeitpunkt der Aktivierung einer Löschanlage wird durch den Betreiber bzw. das Überwachungspersonal festgelegt.

Australien

In einigen australischen Tunnels werden Sprühwasserlöschanlagen eingesetzt. Die ursprüngliche Absicht bei der Installation war der Schutz des Bauwerks. Der Verwendungszweck hat sich aber inzwischen teilweise geändert und die Löschanlagen können unter gewissen Voraussetzungen auch für den Schutz von Personen eingesetzt werden.

Unter bestimmten Bedingungen, welche im PIARC-Bericht genauer erläutert sind, werden Löschräume jeweils nach der Detektion und Lokalisierung eines Brandes sofort aktiviert. Dies basiert auf der Überzeugung, dass eine rasche Reaktion das Feuer klein hält und so das Risiko eines Grossbrandes reduziert wird. Gemäss dieser Betrachtungsweise werden nachteilige Konsequenzen wie Zerstörung der Rauchsichtung, reduzierte Sicht etc. überkompensiert durch das Minimieren der Brandgrösse und Verhindern des Übergreifens auf andere Fahrzeuge.

⁵ Den Verfassern der vorliegenden Studie ist nicht klar, in wie fern sich dieser Punkt von den beiden oberen unterscheidet. Die im PIARC-Bericht aufgeführten Beispiele decken sich mit denjenigen für die oberen beiden Punkte. Verglichen mit dem Modell des Brand-Dreiecks würde als dritter Punkt "Entzug von Brennstoff" erwartet.

USA

In den USA sind nur einige wenige Strassentunnels mit fest installierten Brandlöschanlagen ausgerüstet. In den meisten Fällen war der Grund dafür die Absicht, in diesen Tunnels unbegleitete Gefahrguttransporte zuzulassen oder die Infrastruktur über dem Tunnel zu schützen.

Fazit

Die Ziele des Einsatzes von Brandlöschsystemen sind:

- Reduktion der Geschwindigkeit der Brandentwicklung
- Reduktion der Wärmefreisetzungsrate
- Reduktion der Brandgrösse
- Verhindern der Brandausbreitung von einem Fahrzeug auf andere

Mit Ausnahme von Japan existieren bis heute keine generellen Standards für den Einsatz von fest installierten Brandlöschsystemen. Die PIARC empfiehlt zur Entscheidungsfindung, ob ein Löschesystem installiert werden soll, das Abwägen verschiedener Faktoren wie:

- Verfügbarkeit des Löschesystems
- Benutzersicherheit
- Wirkungsbegrenzung der Rettungsdienste
- Brandwiderstand der Baustruktur
- Interaktion mit anderen Sicherheitssystemen
- und das Durchführen einer Kosten/Nutzen-Analyse.

Zur Unterstützung des Entscheidungsfindungsprozesses wird das Durchführen einer Risikoanalyse empfohlen. Brandlöschsysteme sind nur eines von vielen Mitteln um die Sicherheit in Tunnelanlagen zu erhöhen. Grundsätzlich muss die Wirksamkeit des Gesamtsystems sichergestellt sein. Für Brandlöschsysteme bedeutet das insbesondere, dass diese korrekt unterhalten und gewartet werden müssen.

Vor der Installation eines Brandlöschsystems in einem Tunnel muss dessen Integration in das Tunnel-Sicherheitskonzept erarbeitet werden, wobei die Wechselwirkung mit anderen Systemen zu berücksichtigen ist. Insbesondere sind die operativen Entscheide zu bedenken, wann, wo und durch wen (oder was) das Brandlöschsystem aktiviert werden soll.

Löschesysteme sollten auch nur dann installiert werden, wenn Möglichkeiten zur zuverlässigen Detektion und Lokalisierung des Brandes zur Verfügung stehen.

16 Beispiele aus der Praxis

Im Folgenden werden einzelne Projekte vorgestellt, im Rahmen welcher durch die Projektbeteiligten Bemessungsverfahren für den Brandfall eingesetzt wurden. Die verwendeten Bemessungsverfahren werden kurz erläutert.

16.1 Nachweis der Tagbaustrecke Bodio, Gotthard-Basistunnel, 15.07.2002

Anhand eines eindimensionalen Berechnungsmodells wurden der Temperaturverlauf und die Wärmeübertragung im Beton nachgebildet und somit die temperaturinduzierten Beanspruchungen berechnet (thermische Einwirkungen) und mit den statischen Belastungen überlagert. Das Gewölbe wurde in Elemente von 1 cm unterteilt (FE-Analyse).

Folgendes Vorgehen wurde gewählt:

- a) Bestimmung der minimalen Dicke einer wärmeisolierenden Schutzschicht aus speziellen Betonmischungen (Feuerwiderstand durch wärmedämmende Schutzschicht).

Bemessungskriterium: Begrenzung der maximal erlaubten Temperatur an der Oberfläche des Gewölbebetons (Kontaktfläche Schutzschicht-Gewölbebeton) auf 400°C.

Festlegung der massgebenden Parameter des Gewölbebetons gemäss EC2 für quarzhaltige Zuschläge und des Brandschutzmaterials gemäss Angaben Hersteller.

Nachbilden des Temperaturverlaufs und der Wärmeübertragung im Beton durch Anwendung des thermischen Berechnungsmodells.

Bestimmung der minimalen Dicken, um die Temperatur an der Oberfläche auf 400°C zu begrenzen bzw. die Eindringtiefe der Temperatur (von 400°C) auf die Schutzschicht zu begrenzen und die Temperatur im Bereich der statischen Bewehrung auf 250 °C zu begrenzen.

- b) Untersuchung der Entwicklung der Temperatur im Gewölbe
- c) Statische Überprüfung:
 - gerissener Querschnitt
 - Überlagerung Eigengewicht, Auflasten und Temperaturbeanspruchung
 - Berechnung der Schnittgrössen im Beton
 - Gegenüberstellung von Beanspruchung und plastischem Widerstand des Querschnitts, Bestimmung eines Sicherheitsfaktors

16.1.1 Versuche Versuchsstollen Hagerbach und Ergebnisse

Auf Grundlage der Versuchsergebnisse zu Tiefe von Abplatzungen und entfestigten Bereichen von PP-Faserbeton [47] wurde für den Gotthard-Basistunnel der Nachweis der Normalkraftübertragung für den Restquerschnitt gem. DAFStb Heft 220 Kap. 1.7 geführt und die Reduktion der Biegespannungen abgeschätzt (IG-interne Untersuchung als Grundlage für Brandschutzmassnahmen am GBT [48]).

Für bewehrte Innengewölbe im standfesten Gebirge wurde neben der Querschnittsreduktion auch der Ausfall der inneren Bewehrung berücksichtigt.

Für den Nachweis der vertikal aufgehängten Innengewölbe der Abluftschächte für die getrennte Abluftführung wurde auf Grundlage der thermischen Berechnungen die ausreichende Betonüberdeckung für die Aufhängebewehrung nachgewiesen [49].

16.2 Nachweis des Tunnel Engstlige, Anschluss Frutigen, Lötschberg-Basistunnel

Der Tunnel Engstlige ist ein doppelröhriger Tagbautunnel mit Rechteckquerschnitt. Er ist Teil des Anschlusses Frutigen an den Lötschberg-Basistunnel. Er unterquert den Fluss Engstlinge mit einem geringen Abstand von 2 m zwischen Flusssohle und Tunneldecke. Aus diesem Grund sind die Wände und Decke mit einem Brandschutzmörtel beschichtet (passiver Brandschutz).

Anforderungen an den Brandschutz:

- Brandleistung: 300 MW
- Temperatur-Zeit-Kurve: verlängerte RABT-Brandkurve (ZTV-Tunnel), innerhalb von 6 min bis 1'200 °C, nach 60 min beginnt eine Abkühlphase von 110 min.
- Über den gesamten Zeitraum von 170 min keine Temperaturerhöhung grösser 300°C am Bewehrungsstahl
- Keine Abplatzungen des Betons zulässig
- Keine Beeinträchtigung der Wirksamkeit des Brandschutzsystems infolge der Feuchtigkeitsbelastung (Tunnel liegt im Grundwasser)
- Maximale Stärke der Beschichtung / Brandschutzplatten: 50 mm

Der genaue Projektierungs- resp. Dimensionierungsablauf ist den Autoren nicht bekannt. Die genannten Anforderungen lassen jedoch den Schluss zu, dass die Statik der Tragkonstruktion nicht für den Lastfall Brand bemessen wurde, sondern durch eine isolierende Brandschutzschicht die negativen Einwirkungen des Brandes verhindert werden. Es ist anzunehmen, dass das Vorgehen in etwa analog dem Kapitel 10.1 ist.

16.3 Nachweis der Einspurtunnel, Gotthard-Basistunnel

In kritischen Bereichen der Einspurtunnel des Gotthard-Basistunnels ist im Brandfall mit einem Einsturz des Gewölbes und Nachbrechen des anstehenden Gebirges zu rechnen, was zu langen Instandstellungszeiten sowie zu einer unzulässigen Beanspruchung der Nachbarröhre führen kann. Dies trifft hauptsächlich auf Störzonen mit einer längeren Ausdehnung sowie auf das TZM-Nord und die Piora-Mulde zu.

In diesen kritischen Bereichen werden dem Ortbeton für das (unbewehrte) Gewölbe PP-Fasern mit einer Dosierung von 2 kg/m³ zugegeben.

Während der Ausführung hat sich gezeigt, dass an einigen Stellen unter anderem aufgrund von nicht eingetretenen Gebirgsdeformationen ein Überprofil im Bereich von 50% der Innenschalenstärke und mehr vorhanden ist. In diesen Bereichen kann auf eine Zugabe von PP-Fasern verzichtet werden, wenn der nach einem Brand vorhandene Restquerschnitt des Gewölbes (Querschnitt abzüglich Abplatzungen und entfestigter Bereich) die Lasten im aussergewöhnlichen Ereignis Brand noch aufnehmen kann.

$$ISS_{eff} - A - 0.5 \cdot E \geq ISS_{\gamma=1.0} (xy)$$

ISS_{eff} effektive Innenschalenstärke (inkl. Überprofil)

A Abplatzungstiefe 25 cm (in Versuchen ermittelt, inkl. Sicherheitszuschlag)

E Entfestigungsbereich 10 cm (in Versuchen ermittelt, f_c ~ linear zunehmend)

$ISS_{\gamma=1.0}$ notwendige Innenschalenstärke mit reduziertem Widerstandsbeiwert

Dieser Ansatz kann verallgemeinert auch als Konzept für die Dimensionierung eines Brandschutzes mit Opferbeton betrachtet werden.

Der Ansatz kann wirtschaftlich werden, wenn die Kosten für die Beigabe von PP-Fasern zum gesamten Konstruktionsbeton höher sind, als die zusätzlichen Kosten für den „Opferbeton“, was gerade bei grossen Innenschalenstärken gegeben ist, wie sie im druckhaften Gebirge oder in Störzonen notwendig sind.

Die folgenden Beispiele sind komprimierte Kurzzusammenfassungen und erheben keinen Anspruch auf Vollständigkeit. Textpassagen können "Auszüge" darstellen. Die Projekte bilden den zurzeit der Ausschreibungsphase aktuellsten Stand der Normungen, Gesetzgebung, Richtlinien und der Vertragsgestaltung ab. Verweise und Umsetzungen können daher vom heutigen Stand der Technik abweichen.

16.4 Beispiel Adlertunnel

Der Adlertunnel ist ein zweispuriger Eisenbahntunnel zwischen Muttenz und Pratteln (Nähe Basel, Schweiz). Hier galt es, die hitzeempfindlichen und für das Tragwerk essentiellen Anker, die über einen PL3-Schutz (Kunststoffummantelung) verfügen, gegenüber Temperaturen über 120°C zu schützen. Massgebende Parameter für die Wärmedurchgangsberechnung der Brandschutzmassnahmen waren auf Seiten der Einwirkung Branddauer und Brandtemperatur. Diese beiden Parameter gilt es mit dem Auftraggeber zu kommunizieren und festzulegen.

Auf Seiten der Brandschutzmaterialien flossen folgende Kennwerte in die Berechnungen ein:

- Dicke und Toleranzen
- Rohdichte
- Wärmeleitfähigkeit
- Glühverlust
- Lineare Schwindung
- Druckspannung an der konventionellen Elastizitätsgrenze / zugehörige Stauchung
- Zugfestigkeit senkrecht zur Plattenebene
- Biegefestigkeit

16.5 BEISPIEL ZÜRCHER OBERLANDAUTOBAHN

Das Brandschutz- / Sicherheitskonzept beinhaltet insbesondere folgende Elemente:

- Im Brandfall in einer Röhre verhindert die Lüftung die Ausbreitung der Rauchgase entgegen der Fahrtrichtung ("backlayering")
- Die Querverbindungen zwischen den parallelen Röhren stehen den Tunnelbenützern als Fluchtweg zur Verfügung. Bei einem Brandalarm wird deswegen die Einfahrt in beiden Tunnelröhren mit geeigneten Massnahmen sofort unterbunden
- Die Lüftung garantiert, dass im Brandfall kein Eindringen von Rauchgasen von der einen in die andere Röhre möglich ist, indem sie einen genügenden Überdruck in der sicheren Röhre aufrechterhält

Folgende Massnahmen wurden umgesetzt:

- Bemessung auf Normbrandlast Feuerwiderstandsklasse R 90
- Sicherheitstechnische Einrichtungen (SOS-Nischen Löscheinrichtungen / Hydrantenanschlüsse)
- Minimale Betonüberdeckung: $u_{min} = 30 \text{ mm}$

Innengewölbe:

Der bergmännisch vorgetriebene Teil des Tunnels besteht aus einem bewehrten Aussengewölbe, einer Abdichtung und einer unarmierten Innenschale. Diese innere unarmierte Schale ist gegenüber Brandeinwirkung weitgehend unempfindlich. Abplatzungen sind möglich. Es wurden keine speziellen Massnahmen getroffen.

16.6 BEISPIEL Durchmesserlinie Zürich

Beim Weinbergtunnel handelt es sich um einen Doppelspurtunnel (Eisenbahn), der im Brandfall in beiden Richtungen gesperrt werden muss.

Für den Normalbetrieb wurde keine Lüftung im Weinbergtunnel vorgesehen. Für den Brandfall wurden die Fluchtstollen mit einer Überdrucklüftung ausgerüstet.

Aufgrund der besonders schützenswürdigen Bebauung resp. Infrastruktur an der Oberfläche kam bei der Unterfahrung Südtrakt ein hohes Schutzniveau zur Anwendung. Die geforderte Sicherheitszeit, resp. Branddauer wurde mit 180 Minuten angenommen. Innerhalb dieser Zeitspanne müssen Personen im Gefahrenbereich evakuiert und der Brand gelöscht sein.

Der bergmännisch vorgetriebene Teil des Tunnels besteht aus einem Ring von armierten Tübbingen, einer Abdichtung und einer unarmierten Innenschale. Diese innere unarmierte Schale ist gegenüber Brandeinwirkung weitgehend unempfindlich. Abplatzungen sind möglich. Es waren keine speziellen Massnahmen zu treffen. Die vorgespannte Abfangdecke unter dem Südtrakt wurde gemäss Kap. 6.3 mit Brandschutzplatten geschützt.

Mit dem Einsatz von Brandschutzplatten können Schäden an der Betonkonstruktion vermieden werden. Der Tunnel kann nach dem Ersatz der betroffenen Brandschutzplatten sofort wieder eröffnet werden, womit die Zeit des Betriebsausfalls gering ausfällt.

17 Fazit und Ausblick

Im vorliegenden Bericht wurde dargestellt, welche Vorgaben zu Bemessungsverfahren in Bezug auf Brandeinwirkung in Tunnelbauwerken in verschiedenen länderspezifischen Regelungen und Normen existieren. Fokus wurde insbesondere auf europäische Länder gelegt, einige Länder blieben noch unberücksichtigt und könnten in einer weiteren Überarbeitung integriert werden. Berücksichtigt wurden hingegen auch abgeschlossene und aktuelle Forschungsvorhaben im Bereich Brandschutz im Tunnel.

Es stellt sich heraus, dass im überwiegenden Anteil der untersuchten länderspezifischen Regelungen durchaus Vorgaben zur Bemessung im Brandfall, auch teilweise spezifisch für Tunnelbauwerke, vorliegen. Einige Bereiche, insbesondere die Brandeinwirkung und die Wahl der Brandkurve wurden bereits in verschiedenen Forschungsprojekten in unterschiedlichen Detaillierungstiefen aufgegriffen.

Die in der Schweiz gültigen Normen und Richtlinien weisen Defizite bei der Brandbemessung in Tunnelbauwerken auf. Insbesondere die folgenden Aspekte wurden im Rahmen der vorliegenden Untersuchung als Gegenstand weiterer Vertiefung identifiziert:

- Möglichkeit der Integration von durch den Bauherrn definierten Schutzzielen
- Wahl der spezifischen Lastfälle, insbesondere der Brandeinwirkung (Temperatur-Zeit-Kurve) unter Berücksichtigung verschiedener, für das Tunnelbauwerk spezifischer Parameter
- Vorgaben für die Berücksichtigung des Lastfalls Brand in der Bemessung / Ermittlung des Grenzzustands der Tragfähigkeit
- Berücksichtigung von Brandschutzmassnahmen in der Bemessung

Im Folgenden werden mögliche Präzisierungen in Anlehnung an bereits existierende Dokumentationen dargestellt.

17.1 Mögliche Präzisierungen der SIA-Normen bzgl. Vorgaben zur Bemessung gegen Brandeinwirkung

- Schutzziele sollten nicht nur namentlich genannt werden, sondern – entsprechend ihrer Gewichtung / Bedeutung – aktiven Eingang in die Bemessung finden. Insbesondere durch die Bauart und die vorgesehene Nutzung des Tunnelbauwerks können sich durch den Bauherrn unterschiedlich definierte Schutzziele ergeben. In den Normen und Regelwerken der Länder Österreich und vor allem Frankreich finden sich hierzu Ansätze, welche auch im Forschungsprojekt FIT näher beleuchtet werden. Die Bildung von Schutzniveaus bzw. Gefährdungsklassen aus den definierten Schutzzielen, welches auf tabellarischer Basis erfolgt, ist ein Ansatz, welcher auch für die SIA-Normen verfolgt werden kann. Die Schutzniveaus können zu einem faktorbasierten Einfluss auf die Brandeinwirkung führen oder, wie in Frankreich, auch zur Wahl der Brandkurve (Temperatur-Zeit-Kurve) herangezogen werden (siehe hierzu nächsten Punkt).
- In der SIA 197/2, Anhang B sind bereits für Strassentunnel Empfehlungen abgebildet, welche für die Wahl der Brandeinwirkung bzw. der Temperatur-Zeit-Kurve verwendet werden können. Sie haben jedoch nur informativen Charakter und stützen sich auf die Ergebnisse der PIARC von 1999 ab. Diese Vorgaben bilden eine gute Grundlage, die Forschung ist in diesem Bereich jedoch durch die ITA/PIARC in 2004 sowie durch das Forschungsvorhaben FIT bis 2005 und die bisherige Forschung des ASTRA weiter fortgeschritten und präzisiert worden, insbesondere durch die Aufnahme weiterer Eingangsparameter in Bezug auf das Tunnelbauwerk und den Verkehr. Die Integration dieser Ergebnisse in die SIA-Normen stellt eine mögliche Ergänzung der Normen dar. Zudem sollte die Integration weiterer Ansätze wie desjenigen im französischen Regelwerk, welcher zusätzlich noch das Schutzniveau bei der Wahl der Brandkurve berücksichtigt, untersucht werden. Auch in den Regelwerken der Länder Slowakei,

Deutschland und Italien finden sich Vorgaben für die Wahl der Brandkurve, welche näher beleuchtet werden sollten.

- Die Bemessung ist in allen vorhandenen Regelwerken und Normen nicht spezifisch für Tunnelbauwerke dargestellt. Es sollte überdacht werden, ob die allgemeinen Vorgaben für die Ermittlung des Grenzzustands der Tragfähigkeit bzw. der Bemessung durch Vorgaben für Tunnelbauwerke ergänzt werden sollen. Insbesondere, sollte die Brandeinwirkung durch Faktoren für z.B. Schutzziele beaufschlagt werden. Auch eine Beschreibung des Versagensmechanismus der Tragkonstruktion unter Berücksichtigung der möglichen plastischen Verformung oder Abplatzungen und die Berücksichtigung der Änderung der Materialeigenschaften im Brandfall sind mögliche Präzisierungsansätze.
- Die Brandeinwirkung kann je Bauteil unterschiedlich ausfallen und auch unterschiedlich zu bewerten sein, da einige Bauteile ausschlaggebend für die Sicherheit und Tragfähigkeit des Gesamtsystems sein können. Eine unterschiedlich gewichtete Bemessung der Bauteile sowie anschliessend eine Betrachtung des Gesamtsystems können mögliche Präzisionen für die Bemessung darstellen.
- Es ist in den SIA-Normen noch nicht oder nur wenig umfassend festgehalten, welche Auswirkungen aktive und passive Brandschutzeinrichtungen auf die Tragfähigkeit des Tunnelbauwerks haben. Ihre Einflüsse auf die Bemessung fließen ebenfalls nicht oder in ungenügendem Mass in die Dimensionierung von Bauteilen. Z.B. Löschsysteme können kühlende Auswirkungen auf das Bauwerk ausüben, allerdings sind nachteilige Effekte wie beispielsweise Einfluss auf die Unfallgefahr und das Fluchtverhalten noch wenig untersucht. Passive Brandschutzelemente wie Betonzusätze oder Schutzschichten müssen ebenfalls einen sinnvollen Eingang in die Bemessung finden. Mögliche Ansätze wären ein faktorbasierter Einfluss oder die Berücksichtigung in der Berechnung oder Modellierung.
- In einigen länderspezifischen Regelwerken werden umfangreiche Vorgaben für die konstruktive Durchbildung gegeben, z.B. die Vorgabe von Materialkennwerten, maximalen Temperaturen je Bauteil, maximalen Abplatztiefen etc. Diesbezügliche Vorgaben finden sich u.a. in den Regelwerken der Länder Italien, Singapur, Deutschland und Österreich und sind bereits Thema verschiedener Forschungsprojekte. Eine Integration solcher Vorgaben in die SIA-Norm sollte untersucht werden.

17.2 Mögliche weitere Abgrenzung des Forschungsvorhabens

- Im weiteren Ablauf des Forschungsprojektes sollte darüber diskutiert werden, den Brandschutz für Eisenbahn- und Strassentunnel getrennt zu betrachten. Die Möglichkeiten, die Rettungskräfte an den Kern des Ereignisortes heran zu führen, werden erschwert durch die geschlossene Tunnelanlage, die grosse Hitze- und Rauchentwicklung bei Bränden sowie eventuell durch Blockierung der Wege. Gerade letzteres Problem ist in Strassentunneln noch erheblicher als in Eisenbahntunneln. Das Betriebssystem der Eisenbahn gestattet es, von Anfang an den Schwerpunkt auf Massnahmen zu legen, die eine Ereigniswahrscheinlichkeit soweit wie möglich reduzieren bzw. ein eingetretenes Ereignis begrenzen. Im Gegensatz dazu muss im Strassentunnel der Schwerpunkt in den Massnahmen der Selbst- und Fremdreitung liegen. Das Nachfahren in einen Tunnel, in dem ein Ereignis stattgefunden hat, ist bei Strassentunneln praktisch nicht sofort zu verhindern. Ein Kraftfahrzeug stellt zudem durch den mitgeführten Kraftstoff eine erhebliche Brandlast dar.
- Es sollte überdacht werden, ob die Vorgaben der Bemessung sowohl für Neubauten als auch für Projekte der Bauwerkserhaltung bzw. -sanierung gelten können, oder ob hier differenziert werden muss. Allenfalls bereits existierende alte Bausubstanz könnte möglicherweise nicht nach dem gleichen Raster beurteilt werden wie ein neu erstelltes Tunnelbauwerk, auch die Ansätze des Bauherrn für Schutzziele können variieren.

17.3 Mögliche Ansätze für weitere Forschungsvorhaben ausserhalb des vorliegenden Projekts

Die folgenden Ansätze stellen mögliche zukünftige Forschungsvorhaben dar, welche jedoch nicht oder nur indirekt im Zusammenhang mit dem vorliegenden Projekt stehen. Sie wurden im Rahmen der Überlegungen zum vorliegenden Bericht diskutiert und werden daher als Vorschläge aufgeführt.

- Brandschutz im Falle von Gefahrgutunfällen. Einige Brände lassen sich nur schwer, gar nicht oder gar kontraproduktiv mit Wasser löschen. Können automatische Löschsysteme dies detektieren und den veränderlichen Ansprüchen gerecht werden? Bzw. ist dies überhaupt erforderlich?
- Generell wird in Übereinstimmung mit international anerkannten Brandverlaufskurven wie z.B. Kurve des Eisenbahnbundesamtes Bonn (EBA) oder der Rijkswaterstaat Kurve (RWS) die Einschränkung auf ein massgebliches Brandereignis mit nur einem Fahrzeug (z.B. Triebfahrzeug, Waggon, LKW) zu Grunde gelegt. Welche Auswirkungen haben Massenbrände durch z.B. Massenkarambolagen oder Brände durch Verunglückung vieler, verschiedener Fahrzeugtypen (z.B. Chemie-Transporter, kunststoffbeladener LKW, Dieseltankfahrzeug)?
- Meist liegen den Brandkurven (z.B. HC und HCinc.) definierte Flüssigkeits- und Feststoffbrände zu Grunde. Welche Auswirkungen haben Brände mit anderen als den definierten Flüssigkeiten oder Feststoffen Welche Einflüsse üben die Verpackungseinheiten auf die Brandkurven aus? Welche Auswirkungen haben Brände bei gasförmigen Stoffen (z.B. Autogastankfahrzeuge; Gasflaschenfahrzeugbrand, Inertgase)?
- Welchen Einfluss haben Explosionen und explosionsartige Verbrennungen auf die Schutzziele im Tunnelbau? Wie wirken sich Umstände wie "Explosionsdruckwelle", etc. auf die Personen im Tunnel und die verschiedenen Bauteile der Konstruktion aus?

18 Vorschlag zur Kapitelstruktur einer Bemessungsrichtlinie oder -norm

18.1 Organisation / Administration

Nicht Inhalt dieser Abhandlung (Phase 1), jedoch für die kommende Phase 2 bedeutend sind unter anderem folgende Grundsätze/-fragen (nicht abschliessend):

- Soll eine Norm oder eine Richtlinie erarbeitet werden?
- Welches Gremium soll bei der Bearbeitung mitwirken bzw. genehmigen?
- Der Geltungsbereich (Abgrenzung, etc.) ist frühzeitig festzulegen.
- Welcher Zeithorizont bis zum Inkrafttreten ist möglich?
- Übernahme von den Ergebnissen aus laufenden Forschungsaufträgen.

18.2 Brandschutzziele

Als Grundlage für die Bemessung eines Bauwerkes gegenüber der Einwirkung Brand sollten konkrete Schutzziele vorgegeben werden.

Mögliche Grundlagen für Brandschutzziele, welche noch weiter konkretisiert werden können, finden sich beispielsweise in der Österreichischen Richtlinie RVS 09.01.45 oder im Europäischen Forschungsprojekt "FIT – Fire in Tunnels" (vgl. Kap. 7.2 bzw. 15.2 im vorliegenden Bericht).

18.2.1 Risikoanalyse / Sicherheitsplanung

Risikoanalysen werden in verschiedenen untersuchten Ländern zur Beurteilung der Verkehrssicherheit durchgeführt. Der dabei angewandte Fokus unterscheidet sich daher von der Fragestellung für die Bemessung der Tragstruktur gegenüber Brandeinwirkung.

In wie fern eine Risikoanalyse tauglich ist um die Bemessungsanforderungen gegenüber dem Lastfall Brand festzulegen, ist noch näher zu untersuchen. Möglicherweise kann ein risikobasierter Ansatz gewählt werden, um deterministische Bemessungsanforderungen abhängig von verschiedenen Bauwerksklassen festzulegen. Eine mögliche Grundlage für die risikobasierte Auswahl von Temperatur-Zeit-Kurven und Einwirkungsdauer findet sich im Europäischen Forschungsprojekt "FIT – Fire in Tunnels" (vgl. Kap. 15.2 im vorliegenden Bericht).

Ein anderer Ansatz für die Brandrisikobewertung von Bauwerken in der Schweiz ist in der SIA-Dokumentation 81 beschrieben.

18.2.2 Schutz des Lebens, Bauwerks, Dritter und andere Brandschutzziele

Mögliche Grundlagen für Schutzziele finden sich in der bestehenden SIA-Norm 197/2. Zu allfälligen Erweiterung des dort beschriebenen Ansatzes können beispielsweise das Europäische Forschungsprojekt "FIT – Fire in Tunnels" oder die österreichische Richtlinie RVS 09.01.45 (vgl. Kap. 15.2 bzw. 7.2 im vorliegenden Bericht) konsultiert werden.

Einen sehr umfassenden Überblick zum Thema verschafft auch der Deutsche Leitfaden "Ingenieurmethoden des Brandschutzes" [16].

18.2.3 Akzeptierte Risiken

Grenzwerte für die Akzeptabilität von Risiken sind grundsätzlich durch die Behörden festzulegen. Dafür kann entweder analog zur Schweizerischen Störfallverordnung der Ansatz einer Summenkurve im W/A-Diagramm gewählt werden (vgl. Abbildung 1, Kap. 3.2 im vorliegenden Bericht), oder aber wie in der Erdbebensicherheit ein maximaler Risikoerwartungswert (Todesfallhäufigkeit in Anz. pro Jahr, vgl. Kap. 4.2.1 im vorliegenden Bericht). Ein Dritter Ansatz besteht darin, das Restrisiko von normkonformen Tunneln generell zu akzeptieren.

18.3 Brandschutzkonzept / Vorgaben zu baulichen, technischen und organisatorischen Brandschutzmassnahmen

[Kapitel 3.3] Grundsätzlich sind bauliche, technische bzw. betriebliche und organisatorische Massnahmen aufeinander abzustimmen und zusätzlich feuerpolizeiliche Vorschriften der Kantone zu beachten. Weiterhin ist u.a. die erforderliche Abschnittsbildung sowie der jeweilige Feuerwiderstand in der Projektbasis festzuhalten.

Generell empfehlenswert scheint auch ein Abgleich mit aktuellen laufenden Forschungsprojekten (siehe Kapitel 15). Artverwandte Themenblöcke finden sich in den Projekten ITA (Guidelines for Structural Resistance for Road Tunnels), FIT (Fire in Tunnels), ASTRA (Empfehlungen zum Vorgehen für die Bemessung von Autobahnüberdeckungen und Autobahntunnel gegen Brandeinwirkung), PIARC (An Assessment of Fixed Fire Fighting Systems) und weiteren. Hier könnten sinnvoll Synergien genutzt und in kommende Abhandlung integriert werden.

Im Folgenden soll speziell auf die positiven, besonders hervorzuhebenden Normen/Richtlinien der einzelnen Länder/Organisationen hingewiesen werden. Im Zuge einer Weiterentwicklung des Schweizer Normenwerkes scheint eine vertiefte Auseinandersetzung mit diesen Richtlinien durchaus erwägenswert.

Vorgaben zu baulichen Brandschutzmassnahmen

Welche Methoden zur Reduktion von Brandgefahr in Australien allgemein möglich sind, zeigt Kapitel 14.3.1. Was bauliche Brandschutzmassnahmen mindestens umfassen sollten, siehe Kapitel 3.3.1.

Auf sinnvolle Ansätze, speziell zu Evakuierungs- und Rettungswegen wird im Kapitel 4.3.1 hingewiesen.

Ein vertiefter und detaillierter Ansatz wird in Deutschland (siehe Kapitel 6.3.1) mit der RABT verfolgt. Sie bietet gute Grundlagen rund um den baulichen Brandschutz.

Als vorbildlich und praxistauglich im internationalen Vergleich erweist sich die österreichische RVS (siehe Kapitel 7.3.1). Sie teilt ein in Tunnelkategorien, Gefährdungsklassen und Schutzniveaus. Sie definiert Mindestanforderungen und geht sogar auf verschiedene Materialeigenschaften ein. Auch die italienische ANAS differenziert in verschiedene Kriterien (siehe 10.3.1).

Kapitel 8.3.1 könnte als Grundlage für eine Checkliste dienen, um sicherzustellen, dass möglichst viele Bauwerke/Bauteile (z.B. Helikopterlandeplätze, behindertengerechtes Bauen) bei der Planung der baulichen Brandschutzmassnahmen berücksichtigt wurden.

Vorgaben zu technischen Brandschutzmassnahmen

Im Schweizer Normenwerk fehlen Aussagen über ausrüstungstechnische Schutzmassnahmen, welche explizit den Erhalt der Bausubstanz beinhalten.

Was technische Brandschutzmassnahmen mindestens umfassen sollten, siehe Kapitel 3.3.2. Auf sinnvolle Ansätze, speziell zur Anbringung von Löschvorrichtungen wird im Kapitel 4.3.2 hingewiesen.

Weitere Verweise auf Lüftungskonzeption, Brandmelde- und Löschanlagen sind in Kapitel 6.3.2 zu finden. Kapitel 8.3.2 könnte auch als Grundlage für eine Checkliste dienen, um sicherzustellen, dass möglichst viele Anlagenteile (z.B. Strom, Belüftung, Brandmeldung,

Signaletik) bei der Planung der technischen Brandschutzmassnahmen berücksichtigt wurden.

Vorgaben zu organisatorischen Brandschutzmassnahmen

Eine generelle Abgrenzung zur Projektphase 1 und 2 (Bemessungsrichtlinie bzw. -norm) stellt der organisatorische Brandschutz in Strassentunneln dar. In einer eigenen Abhandlung sind u.a. Fragen zu Zuständigkeiten (zuständige Aufsichtsbehörde /-stelle, etc.), Bewilligungsverfahren, Koordination, etc. zu benennen. Anhaltspunkte geben z.B. die SIA 261 / Kap. 15.2.4.

Was organisatorische Brandschutzmassnahmen mindestens umfassen sollten, siehe Kapitel 3.3.3.

Interessante Ansätze zu Überwachungskategorien (einfache Bereitschaft, ..., durchgehende Überwachung durch Personen) enthält Kapitel 8.3.3.

Ein sinnvoller Ansatz findet sich in Kap. 14.3.3, wonach prinzipiell jeder Tunnel (auch aus Redundanzgründen) mit verschiedenen Kommunikationssystemen auszurüsten ist.

18.4 Bemessungskonzept

18.4.1 Vorgaben zur Brandschutzbemessung

In den untersuchten Regelwerken wurden folgende Vorgaben für Brandschutzbemessung identifiziert:

- Angabe von Brandlast-Grenzwerten
- Definition eines Feuerwiderstandes

Brandlast-Grenzwerte geben Auskunft darüber, wie lange definierte Bauteile vorgegebenen Temperaturen oder Brand-Energiewerten ohne Versagen ausgesetzt werden können.

Bsp.: Grenzwert Brandlast für geschützte Personen gem. SIA 197/2: Kein Versagen bei Brandlast 450° über 30 Min. (s. Kap. 3.4.1).

Am häufigsten wird dabei auf die Ermittlung der Brandlast mittels Temperatur-Zeit-Kurven verwiesen (Bsp. SIA-Normen, EN-Normenwerk, ÖNORM ...). Auch tabellarische Angaben zur Ermittlung der Brandlast sind im untersuchten Regelwerk häufig anzutreffen (z.B. Angaben der Brandenergie und Brandtemperatur in Abhängigkeit des Fahrzeugtyps gem. SIA 197/2 oder Angabe der Wärmeleistung in Abhängigkeit der Tunnellänge, der Verkehrsintensität und des Anteils LKW am Verkehr, gem. EN-Normierung).

Aus den verschiedenen Definitionen der Brandlasten geht auch hervor, dass diese als Einwirkungen zu verstehen sind.

Ingenieurtechnische Ansätze für die Modellierung der Einwirkungsbrände (z.B. Ein-/Zwei-Zonen-Modelle oder Modelle mit Bezug der Fluid-Dynamik) werden lediglich im EN-Normenwerk aufgeführt.

⇒ *Die Anwendung von Brandlasten und Temperatur-Zeit-Kurven haben sich offensichtlich als Grundlage für die Brandschutzbemessung durchgesetzt und sind in ihrer Anwendung einfach nachzuvollziehen.*

⇒ *Weitergehende Modellierungen sind nur durch Spezialisten anwendbar.*

Die Definition der Feuerwiderstände legt den Tragwiderstand der Bauteile fest. Meist werden Widerstandsklassen definiert (z.B. in Funktion von Widerstandsdauer bei normierten Bränden). Weiter werden die Widerstände auch in Abhängigkeit der Bauteile selber festgelegt (tragend/nicht-tragend, vorgespannt, mit/ohne Sprinkleranlagen, Wärmedämmung, Raumabschluss etc.).

In Einzelfällen (Bsp. französisches Normenwerk, s. Kap. 8.4.1), werden die Feuerwiderstandsklassen auch mit Berücksichtigung der Folgen eines Bauteil-Versagens resp. der Relevanz eines Bauteiles festgelegt.

In den verschiedenen Normenwerken sind tabellarische Zusammenstellungen identifiziert worden. Diese legen v.a. die Zuteilung von Bauteilen in Widerstandsklassen fest. In Einzelfällen (z.B. SIA 262) werden auch bauliche Massnahmen definiert (z.B. in Form einer Mindestüberdeckung im Sinne der Gewährleistung eines bestimmten Brandwiderstandes).

Auf risikobasierte Ansätze wurden im untersuchten Regelwerk nur vereinzelt hingewiesen: Angabe von kritischen Ereignissen gem. ANAS-Richtlinie.

⇒ *Die Anwendung von Widerstandsklassen in Abhängigkeit der Bauteil-Funktion und einer zeitlichen Entwicklung eines Brandes als Bestandteil eines Grundlagen-Dokumentes (z.B. Brandschutznorm und/oder Nutzungsvereinbarung) stellt eine Gemeinsamkeit von verschiedenen Regelwerken dar und ist als zweckmässige Möglichkeit anzusehen.*

18.4.2 Berechnungsmodelle

Als „roter Faden“ betreffend der Bemessungsverfahren kann die Unterteilung der Nachweisverfahren in Kategorien mit unterschiedlichem „Schwierigkeitsgrad“ aufgeführt werden.

- Nachweis des Feuerwiderstandes nach Tabellen (massgebend: Art des Bauteils, Feuerwiderstandsklasse => Grösse der Überdeckung).
- Vereinfachte Berechnungsverfahren gem. EN: Definition eines Restquerschnittes (Reduktion der Materialfestigkeiten, Verkleinerung der Betonquerschnittsfläche infolge Brand), anschliessend Nachweis gem. Verfahren bei Normaltemperatur.
- Einteilung in Analysekatogorien gem. Leitfaden CETU, welche in Abhängigkeit von Anforderungsklassen angewendet werden können.

Als Analyseverfahren mit den höchsten Anforderungen werden dabei die Tragwerksanalysen mit Berücksichtigung des Lastfalles „Brand“ aufgeführt (i.d.R. „allgemeine Verfahren/Berechnungsverfahren“ genannt). Massgebend dabei sind die Änderungen des Tragverhaltens der Bauteile infolge thermischer Einwirkungen (Querschnittsreduktion infolge Abplatzungen, Verhalten der Bewehrung bei erhöhter Brandlast, etc.).

Diesen Rahmenbedingungen tragen einige der untersuchten Regelwerke Rechnung. Insbes. das SIA-Normenwerk und die EN-Regelwerke verweisen auf die gängigen Methoden zur Tragwerksuntersuchung (Untersuchung der Schnittgrössen), mit Berücksichtigung von thermischen Einflüssen:

- ⇒ Temperaturverteilung im Bauteil unter Beachtung der Baustoffeigenschaften (Grundlage: Wärmestrahlung, Wärmeleitung, Konvektion)
- ⇒ Ermittlung der thermischen Einwirkung, der Temperaturverteilung im Bauteil und des Tragverhaltens des Bauteiles mittels gesonderter Berechnungsverfahren.
- ⇒ Einflüsse von wärmedämmenden Schutzschichten.
- ⇒ Nachweise analog „konventioneller“ Beanspruchung bei Normaltemperaturen (Querkraft, Schub, Torsion, Durchstanzen und Nachweis von Druckgliedern) mit Berücksichtigung der Eigenspannungen

Das EN-Normenwerk führt dabei explizit eine thermische Analyse und eine mechanische Analyse auf

Thermische Analyse

- Thermische Einwirkungen, temperaturabhängige Materialeigenschaften, Einwirkung von Schutzschichten.

Mechanische Analyse

- Einwirkungsseite: Einflüsse aus Belastung, behinderte thermische Verformung, nichtlineare geometrischen Einflüsse.
- Bauteilwiderstand: temperaturabhängige thermo-mechanische Eigenschaften der Baustoffe, thermische Dehnung.

Der Verweis auf Versuche im Zusammenhang mit der Analyse des Verhaltens von Tragwerken ist im untersuchten Regelwerk häufig zu finden.

Auf die Art der Herleitung der thermischen Einwirkungen, Temperaturverteilung im Bauteil, und das Tragverhalten des Bauteiles werden keine Vorgaben gemacht. Der Verweis auf die Notwendigkeit von Versuchen ist in diesem Zusammenhang nachvollziehbar.

Zu erwähnen ist eine Weisung nach DE-Regelwerk, wonach schon die vereinfachten Verfahren, aber v.a. die allgemeinen Berechnungsverfahren nur durch Personen mit entsprechender Ausbildung/Erfahrung durchgeführt werden dürfen.

- ⇒ *Die tabellarischen Nachweisverfahren sowie die vereinfachten Verfahren berücksichtigen wesentliche Versagensarten von Bauteilen nicht (Ausknicken von Druckbewehrungen, Querschnittsreduktionen, etc.), sind also nur bedingt anwendbar. Effektiv wird die Anwendung dieser Verfahren z.B. in der EN 1992-1-2 explizit eingeschränkt.*
- ⇒ *Die allgemeinen Verfahren verfolgen im Wesentlichen dieselben Grundsätze wie die Bemessungsverfahren bei Normaltemperatur. Handlungsbedarf ist im Rahmen der Ermittlung der thermischen Einwirkungen sowie der thermischen Einflüsse auf der Seite des Tragwiderstandes gegeben.*

18.4.3 Einwirkungsfaktoren

Über Faktoren auf der Einwirkungs- und Tragwiderstands-Seite sind v.a. in der SN EN Normen 1991-1-2 und 1992-1-2 Angaben zu finden. In SN EN 1992-1-2 wird die Brandlast als aussergewöhnliche Einwirkung klassiert. Auch sind Kombinationsregeln für verschiedene, gleichzeitig eintretende Einwirkungen beschrieben.

- ⇒ *Der Beschrieb der Einwirkungsfaktoren ist in wenigen Regelwerken explizit beschrieben. In diesen dafür auf ausführliche Art und Weise (resp. analog den „herkömmlichen“ Lastfaktoren, z.B. gem. SIA-Normierung).*

18.4.4 Bettung / Gebirgsumgebung

Bezüglich Bettung / Gebirgsumgebung liegen v.a. im SIA-Normenwerk sowie in der ÖNORM Hinweise im Zusammenhang mit dem Brandwiderstand vor. In SIA 197/2 werden Empfehlungen für die Wahl der Brandkurven in Abhängigkeit folgender Faktoren abgegeben (angelehnt an AIPRC-Empfehlungen):

- Bauwerkstyp, resp. anstehende Geologie (Bsp. untersch. Anforderungen an einen Einschwimmtunnel als an einen Tunnel in standfestem Gebirge)
- Fahrzeugkategorie (PW/LKW/Tankwagen)
- Gliederung der Bauteile (Berücksichtigung von „sekundären“ Bauteilen, wie Zwischendecken).

Analoges findet sich in RVS 09.01.45, wobei dort die Nachbarobjekte (Überbauungen, etc.) mitberücksichtigt werden.

- ⇒ *Diese Empfehlungen sind in den Vorgaben zur Brandschutzbemessung zu integrieren. Im Rahmen einer Gefährdungsbild-Analyse sind nicht nur die Einflüsse eines Brandes auf das Bauteil und die Benutzer des Bauwerkes zu untersuchen, sondern auch die Gefährdung der Umgebung bei einem Bauwerks- oder Bauteilversagens.*

18.4.5 Einfluss des Brandes auf Materialien

Der Einfluss von Brandeinwirkungen auf Baumaterialien ist aus zweierlei Hinsicht für die Brandschutzbemessung relevant:

- Veränderung des Materialverhaltens infolge Brandeinwirkung
- Schutzfunktion von Materialien (Schutzmörtel, etc.)
- Freisetzung von Schadstoffen im Ereignisfall

V.a. die ersten beiden Aspekte fliessen in eine Brandbemessung ein (s. Kap 18.4.2). Was das Materialverhalten anbelangt, verweisen die untersuchten Regelwerke häufig auf Untersuchungen mittels Versuchen. Insbesondere für Schutzstoffe wie z.B. Schutzmörtel oder Brandschutzplatten liegen umfangreiche Prüfergebnisse vor. Dasselbe gilt auch für Betonprüfungen. Aus diesen spezifischen Prüfungen sind Resultate z.T. bereits in die

Regelwerke eingeflossen (Bsp. ÖNORM, SN EN Normen 1991-1-2 und 1992-1-2).

⇒ *Eine erste Aufgabe für die Phase 2 dieser Arbeit besteht im Zusammentragen und Auswerten der vorliegenden Publikationen.*

18.5 Konstruktive Durchbildung

18.5.1 Vorgaben zu konstruktiven Durchbildungen

Neben den im Zusammenhang mit der Bemessung aufgeführten Anforderungen (s. Kap. 18.4.2: Vorgaben in Form von Betonüberdeckungen und Bauteilabmessungen), sind konkrete Vorgaben betreffend der Konstruktion von einzelnen Bauteilen nur vereinzelt zu finden. Die Gestaltung von Bauwerken als Gesamtes hingegen wird direkt oder indirekt angesprochen. V.a. im Rahmen der Bemessungsverfahren wird auf direkte und indirekte Brandeinwirkungen eingegangen (s. B. SN EN 1991-1-2), was Überlegungen betreffend Brandabschnitten mit sich zieht.

⇒ *Vorgaben zu konstruktiven Durchbildungen einzelner Bauteile folgen aus der jeweiligen Bemessung der Bauteile. Im Fall von Strassentunnel und deren Einzel-Bauteilen (z.B. Zwischendecken) sind gemeinsame Anforderungen für Bauwerke mit ähnlichen Rahmenbedingungen und damit generelle Vorgaben für die Durchbildung denkbar. Diesem Punkt ist im Rahmen der Phase 2 Rechnung zu tragen.*

18.5.2 Materialanforderungen

In diversen Regelwerken wird auf Anforderungen von baulichen Materialien eingegangen (Bsp. schweizerisches Brandschutzregister VKF). Auch in SIA 262 wird auf die Auswirkung von Zusatzstoffen verwiesen (Bsp. PP-Fasern), resp. es werden Anforderungen an Materialkombinationen formuliert (Verklebung bei Klebebewehrungen). Über den Feuerwiderstand einzelner Materialien oder Bauteile liegen ebenfalls Daten und Angaben vor. Im Kontext mit der Brandschutzbemessung wird deutlich auf die Notwendigkeit von Versuchen, resp. auf einen Beleg des Brandwiderstandes mittels Versuchsergebnissen hingewiesen. Für die Bemessung relevant ist auch die zeitliche und temperaturabhängige Änderung der Materialeigenschaften (sowohl von „konventionellen“ Baustoffen als auch von Brandschutz-Baustoffen).

⇒ *Für das Thema „Materialanforderungen“ gilt Analoges wie zum Thema „Einfluss des Brandes auf Materialien“. Ein wesentlicher Schritt für Phase 2 besteht in der Zusammenstellung der vorhandenen Angaben.*

18.5.3 Konstruktive Massnahmen

S. Kap. 18.5.1

18.5.4 Nutzungsanforderungen

Mehrfach wird die Nutzung der Tunnels im Rahmen der Festlegung der Brandlasten aufgeführt (Art der Fahrzeuge, Gegenverkehr/Richtungsverkehr, Anteil und Art des Gefahrgutverkehrs, etc.). In der RVS z.B. werden dafür Tunnelkategorien definiert.

⇒ *Die Formulierung der Nutzungsanforderung steht an erster Stelle der Brandschutzbemessung (Nutzungsanforderung => Definition der Brandlast-Grenzwerte => Dimensionierung der Bauteile mit Berücksichtigung der Grenzwerte). Für die Erstellung einer Dimensionierungsnorm oder –richtlinie weist dieses Thema eine grosse Bedeutung auf. Daher stellt die Definition der Nutzungsanforderung im Hinblick auf die Brandbemessung voraussichtlich den ersten Schritt der Phase 2 dar.*

18.6 Erhaltung / Beurteilung bestehender Bauwerke

Dieser Gliederungspunkt ist nicht Bestandteil der Phase 1 und soll in Phase 2

ZZZ | Brandschutz im Tunnel:
Schutzziele u. Brandbemessung
Phase 1: Stand der Technik

aufgenommen/ ausgearbeitet werden.

Tabellenverzeichnis

- Tabelle 1: Zusammenstellung von Brandenergie und zugehöriger Brandtemperatur, bezogen auf die Art des Fahrzeugs gem. SIA 197/2, Anhang B, B4.1, Tabelle 3
- Tabelle 2: Wahl der Bemessungskurve und Einwirkungsdauer gem. SIA 197/2, Anhang B, Kap. B.6.2
- Tabelle 3: Feuerwiderstand bei nicht vorgespannten Bauteilen gem. SIA 262, Kap. 4.3.10.5.1
- Tabelle 4: Auszug aus der Richtlinie 14-03d der VKF, Anforderungen an den Feuerwiderstand
- Tabelle 5: Auszug aus der Richtlinie 14-03d der VKF, Anforderungen an den Feuerwiderstand mit Sprinkleranlage
- Tabelle 6: Massgebende Eurocode Normen
- Tabelle 7: Zuordnung der Feuerwiderstandsklassen nach DIN EN 13501-2
- Tabelle 8: Zuordnung der europäischen Baustoffklassen nach DIN EN 13501-1
- Tabelle 9: Zuordnung der Feuerwiderstandsklassen nach DIN EN 13501-2
- Tabelle 10: Zuordnung der europäischen Baustoffklassen nach DIN EN 13501-1
- Tabelle 11: Mindestanforderungen an die Tragsicherheit der Konstruktion
- Tabelle 12: Einteilung der Gefährdungsklassen gemäss RVS 09.02.31
- Tabelle 13: Mindestanforderungen an die Tragsicherheit der Konstruktion
- Tabelle 14: Mindestanforderungen an die Tragsicherheit der Konstruktion
- Tabelle 15: Definition der akzeptierten Risiken für Strassentunnel gem. "D. L. 5 ottobre 2006"
- Tabelle 16: Definition der akzeptierten Risiken für Strassentunnel gem. Richtlinie der ANAS
- Tabelle 17: Wärmeleistung des voraussichtlichen Brandes

Abbildungsverzeichnis

- Abbildung 1: Wahrscheinlichkeits-/Ausmass-Diagramm zur Beurteilung der Akzeptabilität von Risiken gemäss Beurteilungskriterien I zu Störfallverordnung STFV
- Abbildung 2: Einsatzempfehlungen auf der Basis des Prinzips der Verhältnismässigkeit der Massnahmen unter Berücksichtigung der Anforderungen an die individuelle Sicherheit
- Abbildung 3: Temperatur-Zeit-Verlauf der Brandbelastung nach ZTV-Ing
- Abbildung 4: Temperatur-Zeit-Kurve RWS
- Abbildung 5: Dangerous dose
- Abbildung 6: Empfehlung PIARC zur Nutzung Temperatur-Zeit-Kurven [34]
- Abbildung 7: Empfehlung PIARC zur Nutzung Temperatur-Zeit-Kurven vertieft [34]