

INHALTSVERZEICHNIS

0	VORWORT	I
1	EINLEITUNG	1
1.1	Allgemeines	1
1.2	Stand der Erkenntnisse.....	3
1.2.1	Richtlinien und Regelwerke	3
1.2.2	Tunnelbrände und Branderfahrungen	6
1.2.2.1	Überblick.....	6
1.2.2.2	Euro-Tunnel-Brand 1996	6
1.2.2.3	Montblanc-Tunnel-Brand 1999	10
1.2.2.4	Tauern-Tunnel-Brand 1999	14
1.3	Literatur zum Kapitel 1	23
2	GRUNDLAGEN ZUM BRANDSCHUTZ IN TUNNELN.....	28
2.1	Häufigkeit von Tunnelbränden.....	28
2.2	Charakterisierung von Tunnelbränden	31
2.2.1	Brandursachen	31
2.2.2	Brandentwicklung	32
2.3	Ergebnisse aus den Eureka-Tunnelbrandversuchen	40
2.3.1	Tunnelgeometrie.....	40
2.3.2	Brandlasten von Fahrzeugen	41
2.3.3	Belüftungsverhältnisse	42
2.3.4	Temperaturverläufe	42
2.3.5	Temperaturverteilung im Tunnel	44
2.4	Brandrauchausbreitung im Tunnel.....	46
2.4.1	Grundsätze der Brandrauchausbreitung	46
2.4.2	Toxische Rauchgaskomponenten.....	47
2.4.3	Flucht- und Rettungsmöglichkeiten	48
2.4.4	Sichtverhältnisse – Rauchdichte am Beispiel der Eureka-Versuche	54
2.4.5	Ausbreitungsgeschwindigkeit der Rauchgase am Beispiel der Eureka-Versuche	56
2.5	Ingenieurmäßige Bewertung von Tunnelbränden	57
2.5.1	Grundlegende Betrachtungen.....	57

2.5.2	Quantifizierung von Brandabläufen.....	60
2.5.3	Beobachtete Branddauern bei Tunnelbränden	61
2.5.4	Luftbedarf.....	64
2.5.5	Brandleistung	68
2.6	Anlagentechnische Brandschutzmaßnahmen.....	70
2.6.1	Brandrauchentlüftungssysteme für Straßentunnel	70
2.6.2	Automatische Brandmeldesysteme	86
2.6.3	Automatische Tunnellöschanlagen	95
2.6.4	Sonstige betriebstechnische Einrichtungen.....	110
2.7	Literatur zum Kapitel 2.....	113
3	SCHUTZNIVEAUS FÜR BAHN- UND STRAßENTUNNEL	116
3.1	Einführung.....	116
3.1.1	Risikobewertung.....	116
3.1.2	Gefahrenanalysen für Bahntunnel.....	118
3.1.3	Gefahrenanalysen für Straßentunnel.....	122
3.2	Schutzziele und Vorgehensweise.....	124
3.2.1	Vorbemerkung.....	124
3.2.2	Personenschutz im Tunnel	125
3.2.3	Sachschatz im Tunnel	126
3.3	Gefährdungspotential von Tunneln.....	128
3.3.1	Elemente der Gefährdung und Sicherheit zur Festlegung des Gefährdungspotentials von Tunneln	128
3.3.2	Berechnung des Gefährdungspotentials für Straßentunnel.....	130
3.4	Schutzniveaus für den baulichen Brandschutz in Straßen- und Eisenbahntunneln.....	135
3.4.1	Schutzniveauparameter	135
3.4.2	Schutzniveau für Straßentunnel	136
3.4.3	Schutzniveau für Eisenbahntunnel.....	141
3.5	Literatur zum Kapitel 3.....	148
4	BRANDSCHUTZ-RICHTLINIEN ZUM BAU UND BETRIEB VON TUNNELN	150
4.1	Vorgehensweise und Erläuterungen.....	150
4.2	Richtlinie des Eisenbahn-Bundesamtes (EBA-RL).....	151
4.2.1	Aufbau und Inhalt.....	151

4.2.2	Bauliche Gestaltung von Tunneln.....	152
4.2.3	Betriebliche Anforderungen.....	160
4.2.4	Sonstige Maßnahmen.....	161
4.2.5	Rettungszüge.....	161
4.2.6	Bewertung der EBA-Richtlinie.....	164
4.3	Richtlinie des Österreichischen Bundesfeuerwehrverbandes (ÖBFV-RL)	165
4.3.1	Aufbau und Inhalt.....	165
4.3.2	Bauliche Gestaltung.....	166
4.3.3	Betriebliche Anforderungen.....	172
4.3.4	Rettungskonzept und sonstige Maßnahmen.....	173
4.3.5	Bewertung der ÖBFV-Richtlinie.....	175
4.4	Richtlinie der HL-AG, ÖBB und BEG (HL-RL)	176
4.4.1	Aufbau und Inhalt.....	176
4.4.2	Brandszenarien nach der HL-Richtlinie.....	177
4.4.3	Entscheidungsmatrix zur Festlegung der Bauteilanforderungen nach der HL-Richtlinie.....	180
4.4.4	Dimensionierung der Tunnelbauteile nach der HL-Richtlinie.....	184
4.4.5	Maßnahmen für den baulichen Brandschutz nach der HL-Richtlinie.....	186
4.4.6	Sonstige Anforderungen und Maßnahmen.....	187
4.4.7	Stellungnahme und Bewertung der HL-Richtlinie.....	188
4.4.8	Bestandsanlagen.....	188
4.5	Richtlinie der Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (RABT-RL)	189
4.5.1	Aufbau und Inhalt.....	189
4.5.2	Lüftung in Tunneln nach der RABT.....	190
4.5.2.1	Lüftungsanforderungen für den Brandfall.....	190
4.5.2.2	Art der Lüftungssysteme für den Brandfall.....	196
4.5.3	Bauliche und betriebliche Brandschutzanlagen nach der RABT....	200
4.5.3.1	Bauliche Anlagen.....	200
4.5.3.2	Kommunikationseinrichtungen.....	202
4.5.3.3	Brandmeldeanlagen.....	203
4.5.3.4	Löscheinrichtungen.....	204
4.5.3.5	Brandnotbeleuchtung und Fluchtwegkennzeichnung.....	205
4.5.4	Zusammenwirken der Sicherheitsanlagen.....	205
4.5.5	Stellungnahme und Bewertung der RABT-RL.....	206
4.6	Richtlinie der Bundesanstalt für Straßenwesen (ZTV-ING)	207

4.6.1	Aufbau und Inhalte.....	207
4.6.2	Allgemeine Anforderungen zum baulichen Brandschutz nach ZTV-ING.....	208
4.6.3	Brandschutzmaßnahmen für die Konstruktion bei Tunnelbränden	209
4.6.4	Rechnerische Nachweise.....	210
4.6.5	Brandschutzmaßnahmen für den Innenausbau nach ZTV	210
4.6.6	Stellungnahme und Bewertung der ZTV-ING.....	211
4.7	Richtlinien der Österreichischen Forschungsgemeinschaft Straße und Verkehr (RVS 9.ff).....	212
4.7.1	Aufbau und Inhalte.....	212
4.7.2	Tunnelquerschnitt RVS 9.232.....	213
4.7.3	Innenausbau RVS 9.234.....	214
4.7.4	Lüftungsanlagen – Grundlagen RVS 9.261	214
4.7.5	Beleuchtung RVS 9.27.....	215
4.7.6	Betriebliche Sicherheitseinrichtungen – Bauliche Anlagen RVS 9.281	215
4.7.7	Betriebs- und Sicherheitseinrichtungen – Tunnelausbau RVS 9.282	216
4.7.8	Betriebs- und Sicherheitseinrichtungen – Tunneleinrichtungen RVS 9.286	217
4.7.9	Tunnel-Erhaltung und Betrieb RVS 9.4.....	217
4.7.10	Ortsfeste Löschsysteme RVS 9.xxx.....	217
4.7.11	Stellungnahme und Bewertung der RVS 9.ff.....	218
4.8	Richtlinie des Bundesministeriums für Verkehr, Innovation und Technologie (RVS-RL).....	219
4.8.1	Aufbau und Inhalt.....	219
4.8.2	Brandszenarien in Straßentunneln nach der RVS-RL.....	220
4.8.3	Mindestanforderungen an die Tragsicherheit der Konstruktion	224
4.8.4	Dimensionierung der tragenden Bauteile.....	226
4.8.5	Maßnahmen zum baulichen Brandschutz	228
4.8.6	Brandschutztechnische Anforderungen an Zwischendecken.....	229
4.8.7	Vorbeugende technische Brandschutzeinrichtungen	229
4.8.8	Stellungnahme und Bewertung der RVS-RL.....	229
4.9	Richtlinie der ÖVBB für Tunnelbeton.....	230
4.9.1	Zielsetzung	230
4.9.2	Schutzziele für Tunnelbauwerke.....	231
4.9.3	Brandeinwirkungen auf Tunnelbauwerke	231
4.9.3.1	Eisenbahntunnel.....	231

4.9.3.2	Straßentunnel	234
4.9.4	Konstruktion und Bemessung	235
4.9.4.1	Vorgehensweise	235
4.9.4.2	Berechnung und Bemessung.....	236
4.9.4.3	Konstruktive Ausbildung.....	237
4.9.5	Tunnelinnenschalenbeton.....	237
4.9.5.1	Zusammensetzung und Anforderungen.....	237
4.9.5.2	Herstellung, Einbau und Prüfung.....	238
4.9.6	Ermittlung des notwendigen Fasergehaltes für die Faserbetonklasse BBG	239
4.9.7	Abschließende Bewertungen.....	240
4.10	Literatur zum Kapitel 4	240
5	NORMBRANDKURVEN FÜR STRAßEN- UND EISENBAHN-TUNNEL	244
5.1	Einführung	244
5.2	ETK – Einheitstemperaturkurve nach ISO 834.....	246
5.3	Kohlenwasserstoff-Brände	248
5.3.1	HC – Hydrocarbon-Kurve.....	248
5.3.2	HCinc – Hydrocarbon-increased-Kurve	250
5.3.3	RABT- und ZTV-Kurve.....	251
5.3.4	EBA-Kurve.....	254
5.3.5	RWS – Rijkswaterstaat-Kurve	256
5.3.6	Norm SIA-197/1 – Bahntunnel	258
5.3.7	Norm SIA-197/2 – Straßentunnel	259
5.4	Projektbezogene Temperatur-Zeit-Kurven	261
5.4.1	Übersicht projekt- bzw. betreiberbezogener Temperatur- Zeit-Kurven für Bahn und Straße.....	261
5.4.2	Temperatur-Zeit-Kurven SBB und Alp Transit Gotthard AG – Schweiz	261
5.4.3	Temperatur-Zeit-Kurven SNCF – Frankreich.....	263
5.4.4	Temperatur-Zeit-Kurven der Errichtergesellschaft Alpetunnel – GEIE – Mt d`Ambin-Tunnel – F/I	264
5.4.5	Temperatur-Zeit-Kurve der FS – Italien	265
5.4.6	Temperatur-Zeit-Kurve des Öresund-Tunnels – DK/S.....	265
5.4.7	Temperatur-Zeit-Kurve Storebelt-Tunnel – DK.....	266
5.5	Temperatur-Zeit-Kurven in Österreich.....	267
5.5.1	Temperatur-Zeit-Kurven für die Straße	267

5.5.2	Temperatur-Zeit-Kurven für die Bahn	270
5.5.3	Temperatur-Zeit-Kurve U-Bahn Wien.....	274
5.6	Literatur zum Kapitel 5	275
6	BRANDVERHALTEN VON TUNNELSCHALEN	280
6.1	Tunnelkonstruktionen – Bauarten	280
6.1.1	Geschlossene Tunnelbauweise.....	280
6.1.1.1	Neue Österreichische Tunnelbauweise – NÖT.....	281
6.1.1.2	Maschinelles Tunnelvortrieb.....	282
6.1.2	Offene Bauweise	285
6.1.2.1	Überblick.....	285
6.1.2.2	Tunnelinnenschale	286
6.1.2.3	Anforderungen an den Innenschalen- bzw. Auskleidungsbeton.....	288
6.2	Versagensarten bei Brandbeanspruchung.....	289
6.2.1	Übersicht	289
6.2.2	Versagenkriterien der Bauteile unter ETK-Beanspruchung.....	289
6.2.3	Kriterien für den Feuerwiderstand tragender Bauteile nach europäischer Normung	290
6.2.4	Versagen in der Zugzone	290
6.2.5	Versagen durch Schub- oder Torsionsbruch.....	291
6.2.6	Versagen der Druckzone	292
6.2.7	Versagen durch Abplatzungen	292
6.3	Brandschäden an Betontunneln	293
6.3.1	Überblick.....	293
6.3.2	Schadensausmaße an Tunnelkonstruktionen im Vergleich	294
6.3.3	Mechanische Eigenschaften von Beton und Betonstahl bei hohen Temperaturen.....	298
6.3.3.1	Hochtemperaturverhalten von Normalbetonen.....	298
6.3.3.2	Druckfestigkeit und E-Modul	299
6.3.3.3	Modellierung des Betonverhaltens bei hohen Temperaturen	300
6.3.3.4	Hochtemperaturverhalten von hochfestem Beton (HPC).....	307
6.3.4	Betonabplatzungen beim Brand	309
6.3.5	Explosive Abplatzungen	312
6.3.5.1	Thermische Prozesse.....	312
6.3.5.2	Thermomechanische Prozesse	314
6.3.5.3	Thermohydraulische Prozesse	317

6.3.6	Auswirkungen explosionsartiger Abplatzungen	320
6.3.6.1	Arten der Betonzerstörung	320
6.3.6.2	Abplatzzeitpunkt	321
6.3.7	Chloridschäden	321
6.3.8	Strukturabhängige Schäden	322
6.3.9	Hochtemperaturverhalten von Betonstahl	322
6.3.9.1	Zugspannungs-Dehnungsverhalten	323
6.3.9.2	E-Modul von Stählen	325
6.3.9.3	Thermische Dehnung	325
6.3.9.4	Warmkriechverhalten	325
6.3.9.5	Kritische Stahltemperaturen	326
6.4	Temperaturberechnung und -verteilung in Tunnelbauteilen	327
6.4.1	Grundlagen der Temperaturberechnung	327
6.4.2	Temperaturverteilungen in Stahlbetonbauteilen	330
6.4.3	Temperaturverteilung in dreiseitig beanspruchten Betonbalken	331
6.4.3.1	Temperaturverteilung in Tunnelschalen	332
6.4.3.2	Temperatureindringkurven anhand von Großplattenversuchen	333
6.4.3.3	Temperatureindringkurve für Bahn- und Straßentunnel nach der ÖVBB-Richtlinie	333
6.5	Literatur zum Kapitel 6	335
7	MAßNAHMEN ZUR ERHÖHUNG DER BRANDBESTÄNDIGKEIT VON TUNNELSCHALEN UND DEREN SANIERUNG	338
7.1	Betontechnologische Maßnahmen – Brandschutzbetone	338
7.2	Tunnelinnenschalenbeton mit Polypropylenfasern	338
7.3	Tunnelinnenschalenbeton mit Leichtbetonzuschlag	345
7.4	Brandschutzbekleidungen	348
7.4.1	Anforderungen an Brandschutzplattenbekleidungen	348
7.4.2	Tunnelbrandschutzplatte Promatect-H	350
7.4.3	Tunnelbrandschutzplatten aus Glasfaserleichtbeton AESTUVER	355
7.4.4	Temperatureinwirkung bei der Verwendung von Brandschutzplatten	357
7.4.5	Anforderungen an Brandschutzbekleidungen in Eisen- bahntunneln gemäß HL-Richtlinie [HL 01]	359
7.5	Brandschutzsystem mit beschichteten Stahllochblechen	364
7.6	Putzbekleidungen und Opferschichten bei Tunnelinnenschalen	365

7.7	Vergleiche der Brandschutzsysteme im Tunnelausbau.....	366
7.8	Sanierung brandgeschädigter Tunnelschalen	369
7.8.1	Schadensanalyse.....	369
7.8.2	Sanierungsmaßnahmen	370
7.8.3	Sanierungs- und Verstärkungsstoffe für Betonbauteile	371
7.9	Literatur zum Kapitel 7.....	372
8	UNTERSUCHUNGEN AN TUNNELBETONEN IM BRANDLABOR.....	375
8.1	Laborprüfungen – Versuchsdurchführung	375
8.2	Abplatzverhalten	376
8.3	Temperaturkurven.....	383
8.4	Brandversuche nach der ETK-Kurve	387
8.5	Temperaturabhängige Festigkeiten.....	388
8.5.1	Versuchsdurchführung	388
8.5.2	Warmdruckfestigkeiten	390
8.5.3	Kaltdruckfestigkeiten	394
8.5.4	Gegenüberstellung der Warm- und Kaltdruckfestigkeiten	395
8.5.5	Gewichtsverlust.....	399
8.5.6	Erkenntnisse für die Praxis.....	400
8.6	Großbrandversuche	401
8.6.1	Tunnelinnenschalenbeton – Projekt [VÖZFI 01].....	401
8.6.1.1	Zielsetzung.....	401
8.6.1.2	Probekörperherstellung.....	401
8.6.1.3	Konstruktive Durchbildung der Kalotte	403
8.6.1.4	Einbau in den Brandraum	403
8.6.1.5	Ergebnisse	406
8.6.1.6	Erkenntnisse aus den Versuchen.....	407
8.7	Erhöht brandbeständiger Spritzbeton	408
8.7.1	Einführung.....	408
8.7.2	Probekörperherstellung	409
8.7.3	Schlussfolgerungen aus dem Versuch.....	411
8.8	Zuschlagsoptimierte Betone für höchsten Brandwiderstand mit reduzierter Wärmeleitung.....	412
8.8.1	Schlussfolgerungen aus den Versuchen	416
8.9	Spezielle Untersuchungen an HPC	416
8.9.1	Verwendung hochfester Betone als Tunnelbeton	416

8.9.2	Abplatzverhalten	421
8.10	Temperaturverhalten.....	427
8.10.1	Temperatureindringkurven.....	427
8.10.2	Temperaturabhängige Festigkeiten bei hochfesten PP- Faserbetonen.....	428
8.10.3	Absolute Druckfestigkeit	428
8.10.4	Relative Druckfestigkeit.....	429
8.10.5	Bruchverhalten der untersuchten HPC.....	432
8.10.6	Gegenüberstellung von Warm- und Kaltdruckfestigkeiten	434
8.10.7	Vergleich von Ergebnissen hochfester Betone aus RWS- und ETK-Belastungen	436
8.11	Literatur zum Kapitel 8.....	437