

11

Realitätsnahe Ansätze für Brandlasten in Eisenbahntunnel

Ao.Univ.Prof.i.R. DI Dr.techn. Peter Sturm (Graz), DI Dr.techn. Michael Bacher (Graz)

Die Brandsicherheit von Tunnelanlagen ist ein zentraler Punkt in der Dimensionierung der Anlage. Während für Tunnelinnenschalen in der Regel Vorgaben auf nationaler Ebene vorliegen (z.B. RVE 08.01.01), ist dies für die Dimensionierung anderer sicherheitsrelevanter Komponenten, wie z.B. die Lüftungsanlage, nicht der Fall. Hier wird oft projektspezifisch entschieden, wobei immer eine technische Realisierbarkeit unter ökonomischen Gesichtspunkten zu beachten ist. Bei anderen sicherheitstechnischen Bauteilen, wie z.B. Querschlagstüren oder Klappen gibt es oft Anforderungen über die Brandschutzklasse, jedoch ist nicht klar, ob standardisierte Prüfbedingungen auch für Brandereignisse in Tunnelanlagen geeignet sind.

Dieser Beitrag beschreibt Dimensionierungsvorgaben für Eisenbahnprojekte am Beispiel des Koralmtunnel-Eisenbahntunnels und führt einen Vergleich zu internationalen Forschungen und Vorgaben für Straßentunnel an.

11.1 Einleitung

Brandereignisse in unterirdischen Verkehrsanlagen stellen immer eine Herausforderung für die Dimensionierung des Bauwerkes und der technischen Einrichtungen dar. Obwohl Brandereignisse sehr selten auftreten, stellen sie doch für den Betrieb der Anlage ein äußerst kritisches Szenario dar. Neben den thermischen Herausforderungen an das Bauwerk stellt der beengte Raum in einem Tunnel ein großes Hindernis für die Flucht und Rettung von Passagieren im Brandfall und in weiterer Folge für die Brandbekämpfung dar.

Als typische Beispiele für Brände im Straßentunnelbereich mit Personenschäden werden immer die Brände im Mt. Blanc Tunnel (1999), Tauerntunnel (1999) und Gotthardtunnel (2001) genannt. Diese fanden in Straßentunneln statt und führten zu einem gänzlichen Umdenken der sicherheitstechnischen Aspekte und der notwendigen technischen Voraussetzungen zur Entrauchung.

Im Eisenbahntunnel sind Brandereignisse mit Personenschäden bis dato eher auf unterirdische Haltestellen und den U-Bahnbetrieb beschränkt. Als negativer Höhepunkt für Brände in Tunneln mit schienengebundenen Fahrzeugen wird der Brand im Stollen der Kapruner Gletscherbahn genannt, bei dem im Jahr 2000 155 Personen durch Rauchgase und Hitze starben [1]. Dieses Ereignis passierte in einer sehr steilen Stollenbahn und ist mit Standardverkehrstunneln im Eisenbahnwesen kaum vergleichbar.

Eine Analyse der International Fire Academy (IFA) von Bränden in Verkehrstunneln in den Ländern Schweiz, Deutschland und Österreich im Zeitraum von 2012 bis 2023 ergab 439 Brandereignisse bzw. 3 Brände pro Monat [3]. Drei Viertel der Brände passieren in Straßentunneln, während sich das restliche Viertel auf die schienengebundenen Verkehrsträger im Lokal-, Nah- und Fernverkehr aufteilt. Während sich die Anzahl der Feuer in Straßentunneln im Beobachtungszeitraum fast verdoppelt hat, war dies bei Eisenbahntunneln nicht der Fall. Eine weitere interessante Information brachte die Studie der IFA zutage. Während bei Straßentunnel von den registrierten 331 Bränden 91% auf die Fahrzeuge (61% PKW, 25% LKW, Rest nicht zuordenbar) zurückzuführen waren, war die Brandursache in Eisenbahntunnel nur zu 22% den Fahrzeugen zuzuordnen. Fast zwei Drittel der Feuer in Eisenbahntunneln fielen in den Bereich der unterirdischen Regional- und Nahverkehrslinien inklusive Bahnsteigbereiche.

Die höhere Anzahl der Brandereignisse in Straßentunnel ist unter anderem darauf zurückzuführen, dass im Straßenverkehr eine merklich höhere Anzahl von unmittelbaren Unfallverursachern und somit Branderregern unterwegs ist als im schienengebundenen Bereich; jedes Fahrzeug ist eine potenzielle Unfallquelle. Dem steht gegenüber, dass die Anzahl der transportierten Personen pro Fahrzeug (=Personenzug) natürlich im Schienenverkehr viel höher ist.

Die Risiken und Konsequenzen eines Brandes in einem Verkehrstunnel haben dazu geführt, dass international sehr hohe Anforderungen an die Bauwerkssicherheit und die Sicherstellung von Fluchtmöglichkeiten aus dem Brandbereich gestellt werden.

11.2 Dimensionierungsbrandlasten

Die EU-Richtlinie Nr. 1303/2014 [4] betrifft das Thema Sicherheit in Eisenbahntunnel im Kontext der technischen Spezifikationen für die Interoperabilität im Eisenbahnsystem der EU. Diese umfassende Richtlinie beinhaltet alle Teilsysteme: Infrastruktur, Energie, Fahrzeuge (Rollendes Material), Zugsteuerung/Zugsicherung/Signalgebung und Betrieb. In dieser Richtlinie werden Maßnahmen zur Minderung spezifischer Tunnelrisiken festgelegt. Unter Punkt 4.2.1.2 Brandwiderstand des Tunnelbauwerkes, SRT TSI 2014R1303 [4] finden sich qualitative Aussagen zur notwendigen Systemerhaltung der baulichen Struktur während des Zeitraumes der Selbstrettung, die Evakuierung von Passagieren und Bediensteten und den Eingriff von Notfallkräften (siehe auch „guide for application of SRT TSI“, Kapitel 2.3.5, [5]). Dimensionierungsvorgaben in Bezug auf zu berücksichtigende Brandlasten finden sich dort nicht.

Die UIC Richtlinie IRS 70779-9 [8] behandelt die Sicherheit in Eisenbahntunneln. Dort finden sich zwar Themen, die unter anderem die Notlaufeigenschaften des rollenden Materials behandeln und die in Zusammenschau mit der TSI 2014 1303 zu dem Erfordernis von sicheren Evakuierungsplätzen in langen Eisenbahntunneln führen. Diese technischen Richtlinien geben aber ebenfalls keine Dimensionierungsvorgaben zur Berücksichtigung von Brandereignissen vor.

Im Straßenbereich gibt es Vorgaben im Bereich von Brandlasten zur Dimensionierung von mechanischen Lüftungsanlagen, die in Form von unverbindlichen Richtlinien auf internationaler Ebene (z.B. [9]) bzw. verbindlichen Richtlinien auf nationaler Ebene (z.B. [10]) vorliegen.

Bereits der Begriff Dimensionierungsbrandlast ist nicht eindeutig festgelegt. Im Prinzip sollte ein real auftretendes Brandereignis in Form eines Zeitverlaufes der Wärmefreisetzungsrate von Beginn des Brandes bis zu einem gewünschten Endzeitpunkt wiedergegeben werden. Um ein sicheres Bauwerk und eine sichere Nutzung zu gewährleisten, ist der Brandschutz auf plausible Brandszenarien auszulegen.

Abbildung 1 rechts zeigt beispielhaft die zeitlichen Verläufe von Oberflächentemperaturen, die typischerweise zur Bemessung von tragenden Baukörpern herangezogen werden. Traditionell findet für Bauteilprüfungen oft die Einheits-Temperaturzeitkurve (ETK) gem. ISO 834 Verwendung. Für Tunnelinnenschalen werden die Anforderungen in manchen Fällen

höher gesetzt. Die RWS (*Rijkswaterstaat*) Kurve stellt derzeit die obere Grenze der Dimensionierungsbrandlasten dar und findet dann Verwendung, wenn von sehr hohen Brandlasten ausgegangen werden muss. Anmerkung: diese Kurve wurde aus einem Brandereignis eines Tanklastzuges mit 50 m³ Benzin und einer abgeschätzten maximalen Wärmefreisetzungsrate von 300 MW abgeleitet.

Während der strukturelle Brandschutz auf Ereignisse zur Berücksichtigung maximaler Bauwerkssicherheit abzustellen ist, ist dies bei Vorgaben bezüglich der Sicherheit von Nutzern eher auf wahrscheinliche Ereignisse zu beziehen. Nach Auftretenswahrscheinlichkeit sind Brände in Reisezügen sehr wohl möglich, ein gleichzeitiger Vollbrand mehrerer mit Treibstoff beladener Güterwaggons eher nicht, bzw. wären bei derartigen Bränden die notwendigen Maßnahmen zur Bewältigung der Rauchmengen und Eindämmung des Brandes unverhältnismäßig hoch. Abbildung 1 links zeigt den bei den beiden Tunnelprojekten Koralmtunnel und Semmering-Basistunnel zur Lüftungsdimensionierung verwendeten Verlauf der Wärmefreisetzungsrate bei einem Brand eines Reisezuges.

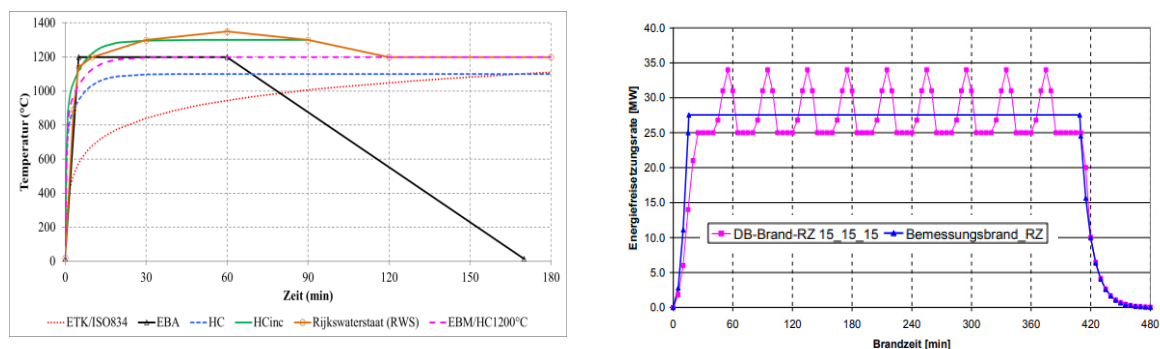


Abbildung 1 Wärmefreisetzungsrate als Funktion der Zeit, links: Temperaturverlauf für Bauwerke und Einbauten, rechts: Wärmefreisetzungsrate für Lüftungsdimensionierung

Bei Dimensionierungsvorgaben für Lüftungsanlagen wird in der Regel der zeitliche Verlauf einer Wärmefreisetzungsrate negiert und ein Maximalwert stationär vorgegeben. Die Brandlast ist stark abhängig vom betrachteten Fahrzeug. Tabelle 1 zeigt die Bandbreite von maximalen Wärmefreisetzungsraten in Abhängigkeit der Brandquelle.

Fahrzeug	Max. Wärmefreisetzungsrate	Quelle	Anmerkung
PKW	3-5 MW	PIARC 0	
Bus	20 – 30 MW	PIARC 0	
LKW	30 – 50 MW	PIARC 0, RVS 0	
LKW	bis 100 MW	RE-Ing 0	Nur bei sehr hohem LKW Anteil
Tanker	200 MW	NL, USA 0	
Personenzug-Waggon	7 – 43 MW	Ingason et al. 0	
Hochgeschwindigkeitszug	30 – 36 MW	Zhu et al. 0	
Güterzug-Waggon	bis 250 MW		Tankwagen Brand
Reisezug Waggon	30 MW	RVE 0	

Tabelle 1 Maximale Wärmefreisetzungsraten von Fahrzeugen

Die meisten der in Tabelle 1 genannten Angaben finden bei der Dimensionierung von Straßentunnel Verwendung und sind auch national in Richtlinien (z.B. RE-Ing [11], RVS 09.02.31 [10] oder NFPA 502 [12]) festgelegt.

Im Eisenbahnbereich sind die Vorgaben für Lüftungstechnische Dimensionierungen eher projektspezifisch. Für den Personenschutz in unterirdischen Verkehrsbauwerken gibt z.B. die RVE 08.01.01 [7] einen Wert von 30 MW (Personenzugwagen) als maximale Wärmefreisetzungsrate, stationär über den Zeitraum der Selbst- und Fremdreitung (Nachweiszeit), vor. Anders ist dies beim Objektschutz. Hier wird gemäß dieser RVE auf das Schutzniveau abgestellt. Bezüglich thermischer Einwirkung wird dann von einem Mischverkehr mit einer zugehörigen maximalen Wärmefreisetzungsrate von 210 MW ausgegangen. Als Temperatur-Zeitkurve wird der Verlauf der HC_{1200°C} Kurve (ÖNORM EN 1991-1-2:2013) vorausgesetzt.

Tabelle 2 enthält Wärmefreisetzungsrate, die bei Eisenbahntunneln zur Bemessung der Belüftung herangezogen wurden.

Tunnel	Max. Wärmefreisetzungsrate	Anforderung
Gotthard-Basistunnel	20 MW 40 MW	Personenzugbrand, – dimensionierungsrelevant, gleichzeitig 2 Wagons
	250 MW	Szenario Brand Rollende Landstraße – 45 Min Rauchabsaugung muss möglich sein
Koralm Tunnel, Semmering-Basistunnel	28 MW 100 MW	ICE-Reisewagen (Bemessungsbrandlast Lüftung) Triebfahrzeug Diesellok (brandschutztechnische Spezifikation Klappen, Türen)

Tabelle 2 Maximale Wärmefreisetzungsrate bei Lüftungsdimensionierungen und anderen technischen Einrichtungen

11.3 Brandschutztechnische Anforderungen an Türen und Lüftungstechnische Bauteile in den Querschlägen

Da Fluchtwege ein wesentlicher Bestandteil der Sicherheit von Eisenbahntunneln sind, erfordern die Fluchttüren selbst besondere Aufmerksamkeit. Die Türen müssen so stabil sein, dass sie den hohen Druckschwankungen des Hochgeschwindigkeitszugverkehrs standhalten und zudem hohen Temperaturen trotzen.

Wie in den obigen Kapiteln angeführt, definieren verschiedene Vorschriften die Temperaturanforderungen, z.B. für Betonoberflächen. Diese Anforderungen legen Temperaturwerte und Einwirkzeiten in Form von Zeit-Temperatur-Kurven fest. Da es keinen einheitlichen

internationalen Standard gibt, werden derartige Anforderungen weitgehend projektbezogen auf Basis des gegenwärtigen Wissensstandes festgelegt. Dabei ist immer eine Abwägung zwischen technisch Möglichem und ökonomisch Umsetzbaren anzustellen.

Im Zuge der Planung des Koralmtunnels wurden bereits im Vorfeld derartige Untersuchungen angestellt [14]. Um eine realistische Temperaturanforderung für Tunneltüren zu definieren, wurden numerische Untersuchungen durchgeführt, wobei eine maximale Wärme-freisetzungsrates von 100 MW (siehe Tabelle 2) als thermische Randbedingung diente. Gleichzeitig erfolgte ein Vergleich mit Temperatur-Zeit-Verlauf Kurven aus Realbrandversuchen. Die Brandquelle wurde in unmittelbarer Nähe stromaufwärts der Fluchttüre gesetzt. Diese erfolgte unter der Rahmenbedingung, dass Fluchttüren im direkten Bereich des Brandherdes nicht genützt werden. Abbildung 2 zeigt das Ergebnis nach 10 min Brandentwicklung. Während im Tunnelinneren die maximalen Temperaturen auf über 1700°C als Spitzenwert ansteigen, liegt die Spitzenbelastung an der nächsten Querschlagstüre außen bei 1095°C. Dies sind jedoch nur punktuell auftretende Temperaturen.

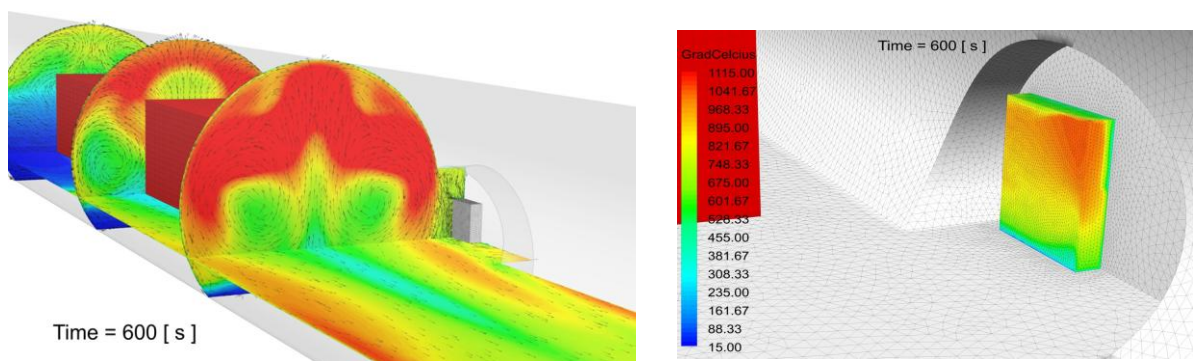


Abbildung 2 Temperaturverteilung aus CFD Simulation eines 100 MW Brandes, links Fahr-
raum, rechts Detail Querschlagstüre

Abbildung 2 und Abbildung 3 zeigt den zeitlichen Verlauf der Temperaturentwicklung an der Oberfläche der Querschlagstüre im Vergleich zu den Testbedingungen nach ETK, HC oder HC_{inc}. Dargestellt ist der Verlauf der berechneten maximalen Temperatur (CFD-T_{max}) sowie der sogenannten „flächengemittelten“ (auf die Türfläche bezogenen) Temperaturen (CFD-T_{average}) [14]. Es ist ersichtlich, dass die flächengemittelte Gastemperatur an der Türoberfläche ab einer Einwirkzeit von 30 Minuten unterhalb der ETK zu liegen kommt. Der Maximalwert der flächengemittelten Temperatur an der Türaußenseite liegt bei 860°C und somit unter dem ETK Wert von 1000°C.

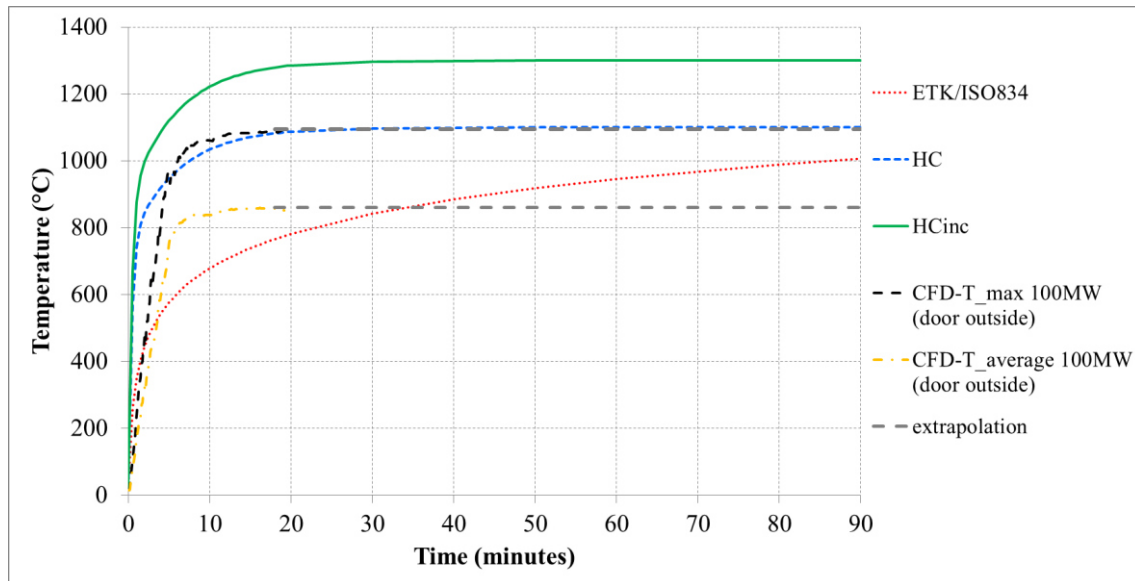


Abbildung 3 Vergleich typischer Temperatur-Zeit -Verlauf Kurven mit der zeitabhängigen Gas Temperatur an der Oberfläche der Querschlagstür bei einer Brandlast von 100 MW

Tabelle 3 zeigt Kennwerte der Temperaturbelastung der Querschlagstüre gemäß unterschiedlichen Temperatur-Zeit-Verlauf Kurven sowie das Ergebnis der 100 MW CFD Belastung. Betrachtet man die relevanten Größen, wie den spezifischen Wärmeeintrag und die maximale flächengemittelte Temperatur, so erkennt man, dass die ETK/ISO 834 Kurve den 100 MW Brand sehr gut abbildet.

	Spez. Wärmeeintrag (zeitgemittelte Temperaturerhöhung)	Max. flächengemittelte Temperatur	Max. lokal auftretende Temperatur
HC _{inc}	1249 K	1300°C	1300°C
HC	1054 K	1100°C	1100°C
ETK	838 K	1000°C	1000°C
100 MW Türe außen	816°K	860°c	1095°C

Tabelle 3: Temperaturbelastung der Fluchttüre für unterschiedliche Brandkurven und der durchgeführten Berechnungen [14]

Durch den Einbau entsprechender Brandschutztüren der Klassifikation Ei 90 ($v_e, i_{\leftrightarrow 0}$) S gemäß ÖNORM EN 13501-3:2009 und einer Feuerwiderstandsprüfung nach DIN 1366-2:2015 unter den Beflammungsbedingungen der Einheits-Temperaturzeitkurve nach ÖNORM EN 13501-3:2009 wird ein adäquater Raumabschluss sichergestellt.

Am Koralmtunnel kommen neben Fluchttüren bei jedem Querschlag auch Druckschutzklappen mit einer Klappenblattfläche von ca. 0,125 m² zum Einsatz. Diese Druckschutzklappen können aus technischen Gründen nicht mit einem isolierten Klappenblatt ausgeführt werden. Um eine Selbstzündung von Anlagenteilen im Querschlag auszuschließen, ist

daher nachzuweisen, dass die Strahlungsflussdichte des Klappenblattes $\leq 15 \text{ kW/m}^2$ in einem Abstand von 1 m zum nächsten – hinter der Türe im Querschlag liegenden – Anlagenteil beträgt.

Die Wärmestrahlung wird von der heißen Oberfläche entsprechend dem Stefan-Boltzmann-Gesetz $P = \epsilon \sigma T^4$ an die Umgebung abgegeben. Dabei ist ϵ der Emissionsgrad und σ die Stefan-Boltzmann-Konstante ($\sigma = 5,6704 \cdot 10^{-8} \text{ W/m}^2\text{K}^4$). Da sich die abgestrahlte Energie im Raum verteilt, trifft in einem Meter Entfernung nur ein Teil davon auf benachbarte Bauteile. Eine einfache Abschätzung der Strahlungsleistung lässt sich mit der Kombination aus Stefan-Boltzmann-Gesetz und geometrischer Näherung nach Formel (1) durchführen:

$$E \approx \frac{\sigma \cdot \epsilon \cdot T^4 \cdot A}{\pi \cdot r^2} \quad (1)$$

Hierbei steht A für die Fläche der strahlenden Quelle und r für den Abstand. Bei einer heißen Oberfläche mit $T = 1000^\circ\text{C} = 1273 \text{ K}$, einem Emissionsgrad $\epsilon = 0,9$ (angenommen) und einer Klappenfläche (= strahlende Quelle) von $A = 0,125 \text{ m}^2$ ergibt sich bei einem Abstand von 1 m eine Strahlungsflussdichte von etwa $E \approx 5,4 \text{ kW/m}^2$.

Dieser Wert liegt deutlich unter der maximal zulässigen Strahlungsflussdichte von 15 kW/m^2 , sodass keine Selbstzündungsgefahr für angrenzende Anlagenteile besteht und auch in diesem Fall ein sicherer Abschluss zur Brandröhre besteht.

11.4 Zusammenfassung

Die Brandsicherheit von Tunnelanlagen ist ein zentraler Punkt in der Dimensionierung der Anlage. Während für Tunnelinnenschalen in der Regel Vorgaben auf nationaler Ebene vorliegen (z.B. RVE 08.01.01, HC₁₂₀₀ Kurve), ist dies für die Dimensionierung anderer sicherheitsrelevanter Komponenten, wie z.B. die Lüftungsanlage, nicht der Fall. Hier wird oft projektspezifisch entschieden, wobei immer eine technische Realisierbarkeit unter ökonomischen Gesichtspunkten zu beachten ist. International hat sich gezeigt, dass z.B. Lüftungsanlagen für die Personenrettung ausgelegt werden, wobei die Brandlasten um die 20 bis 40 MW schwanken. Gleichzeitig werden auch Szenarienbetrachtungen angestellt, die punktuell höhere Brandlasten betrachten (z.B. einzelne Güterzugwaggons oder Diesellokomotiven), aber in der Regel nicht dimensionierungsrelevant sind. Betrachtet man Komponenten wie Querschlagstüren, so konnte nachgewiesen werden, dass mit Prüfbedingungen nach Vorgaben der Einheits-Temperatur-Zeit-Verlauf Kurve (ETK) in der Regel das Auslangen gefunden werden kann.

Literatur

- [1] fireworld.at, <https://www.fireworld.at/2020/11/11/geschichte-die-seilbahn-katastrophe-von-kaprun-am-11-november-2000/> (Zugriff 20.10.2025)
- [2] BMIMI: Bericht über Brände und Unfälle in Tunnelanlagen 1999 – 2023, Bericht gemäß § 3 Abs 8 STSG beziehungsweise EU-Direktive 2004/54/EG, Bundesministerium für Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie (BMIMI), 2024
- [3] IFAB, Tunnel fires from 2012 to 2023 – International Fire Academy analyses media reports, September 2024: <https://www.ifa-swiss.ch/en/magazine/detail/tunnel-fires-from-2012-to-2023-statistics-from-media-reports>
- [4] EU Nr. 1303/2014 der Kommission vom 18.11.2014, Technische Spezifikation für die Interoperabilität bezüglich der Sicherheit in Eisenbahntunneln im Eisenbahnsystem der Europäischen Union, Version vom 29. Jänner 2024, ELI: <http://data.europa.eu/eli/reg/2014/1303/2024-01-29>, Zugriff: 20.10.2025
- [5] EAR, Guide for the application of the SRT TSI. In accordance with Article 19(3) of Regulation (EU) 2016/796 of the European Parliament and of the Council of 11 May 2016, www.era.europa.eu (Zugriff 28.10.2025)
- [6] EAR, Guide for the application of the CCS TSI In accordance with Article 19(3) of Regulation (EU) 2016/796 of the European Parliament and of the Council of 11 May 2016, www.era.europa.eu (Zugriff 28.10.2025)
- [7] FSV: RVE 08.01.01 Tunnel und tunnelähnliche Bauwerke, Baulicher Brandschutz in unterirdischen Verkehrsbauwerken, Österreichische Forschungsgesellschaft Straße Schiene Verkehr, Dezember 2018
- [8] UIC 70779-9: Safety in railway tunnels, Union Internationale des Chemins de Fer, 01.06.2021
PIARC: Design fire characteristics for road tunnels; technical Report 2017R01EN, ISBN: 978-2-84060-471-6, 2017
- [9] FSV: RVS 09.02.31 Tunnelausrüstung Belüftung Grundlagen, Forschungsgesellschaft Straße, Schiene, Verkehr, Wien, 2014
- [10] RE-ING: Richtlinien für den Entwurf, die konstruktive Ausbildung und Ausstattung von Ingenieurbauten (RE-ING), 2023/03, Bundesministerium für Digitales und Verkehr, Deutschland
- [11] NFPA: NFPA 502, Standards for Road Tunnels, Bridges, and other Limited Access Highways, 2026
- [12] H. Ingason, Y.Z. Li, A. Lönnemark: Tunnel fire dynamics, Springer Verlag ISBN 978-1-4939-2198-0, 2015
- [13] H. Steiner, M. Beyer, P. Sturm: Requirements for escape doors in the tunnels of the Koralm railway line – special focus on thermal loads during fire, in 9th Symposium Tunnel Safety and Ventilation, June 2018, Graz Austria, ISBN: 978-3-85125-606-2, https://tunnel-graz.at/assets/files/tagungsbaende/Tunnel-Safety-and-Ventilation-GRAZ-09_2018.pdf (Zugriff 3.11.2025)
- [14] Y. Zhou, H. Wang, B. Haiquan, L. Xiaoxia und G. Qilin, "Heat release rate of high-speed train fire in railway tunnels," Tunnelling and Underground Space Technology, Jg. 2020, Nr. 105, S. 1–13, 2020, doi: 10.1016/j.tust.2020.103563