



DDipl.-Ing. Thomas Thaller

Tunneltüren in zweiröhrigen, eingleisigen Eisenbahntunneln am Beispiel Semmering-Basistunnel

DISSERTATION

zur Erlangung des akademischen Grades
Doktor der technischen Wissenschaften

eingereicht an der

Technischen Universität Graz

Betreuer

Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Peter Veit
Institut für Eisenbahnwesen und Verkehrswirtschaft, TU Graz

Ao Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Peter Sturm
Institut für Verbrennungskraftmaschinen und Thermodynamik, TU Graz

Graz, im März 2020

Für die Ermöglichung, Betreuung und Übernahme der Begutachtung danke ich Herrn *Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr. Peter Veit* sehr herzlich.

Dafür danke ich ebenso Herrn *Ao.Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr. Peter Sturm*, mein besonderer Dank gebührt ihm aber auch für seine zu jeder Zeit fördernde Unterstützung während der Entstehung der vorliegenden Arbeit.

Mein aufrichtiger Dank gilt außerdem Herrn *Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr. Robert Galler* für seine spontane Bereitschaft, als dritter Gutachter zur Verfügung zu stehen.

Für die Zusammenarbeit bei der Durchführung der Großversuche im Abschnitt KAT1 des Koralmtunnels (November 2016 bis Jänner 2017) bedanke ich mich schließlich bei allen Beteiligten des Instituts für Verbrennungskraftmaschinen und Thermodynamik der TU Graz, allen voran bei Herrn *Dipl.-Ing. Dr. Johannes Rodler*.

Meinem Vater

Baurat h.c. Dipl.-Ing. Dr.techn.

Otto Thaller

Zivilingenieur i.R.

Bauingenieur aus Leidenschaft

zum 90. Geburtstag am 04.04.2020

Eidesstattliche Erklärung

Ich erkläre an Eides statt, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig verfasst, andere als die angegebenen Quellen/Hilfsmittel nicht benutzt, und die den benutzten Quellen wörtlich und inhaltlich entnommenen Stellen als solche kenntlich gemacht habe. Das in TUGRAZonline hochgeladene Textdokument ist mit der vorliegenden Dissertation identisch.

I declare that I have authored this thesis independently, that I have not used other than the declared sources/resources, and that I have explicitly indicated all material which has been quoted either literally or by content from the sources used. The text document uploaded to TUGRAZonline is identical to the present dissertation.

DDipl.-Ing. Thomas.Thaller

Graz, 31.03.2020

Kurzfassung

Lange Eisenbahntunnel wie der Semmering-Basistunnel (Gesamtlänge rd. 27,3 km), werden heute auf Grundlage von geltenden Sicherheitsvorschriften als zweiröhrige Anlagen konzipiert. Die beiden Fahrrohre werden im Abstand von max. 500 m durch sog. Querschläge miteinander verbunden, die einerseits der Unterbringung von für den Eisenbahnbetrieb erforderlichen technischen Anlagen und andererseits als sichere Bereiche während der Durchführung von Instandhaltungsarbeiten und als Fluchtwege im Ereignisfall (= Brandfall) dienen.

Der Abschluss der Querschläge zum Fahrtunnel hin wird von besonderen Türen gebildet, die nicht nur den o.a. Anforderungen genügen, sondern einer Vielzahl von weiteren sehr speziellen Beanspruchungen wie beispielsweise aus Zuggeschwindigkeiten von bis zu 230 km/h resultierenden Druck-/Sogbelastungen standhalten müssen. Aufgrund behördlicher Vorgaben können sie als Pendel- oder Schiebetüren ausgeführt werden.

Durch Zusammenführung von existierenden Vorschriften und weiterer dzt. bekannter Fakten sowie aufgrund von Erkenntnissen, die sich durch die Auswertung umfangreichen Datenmaterials aus durchgeführten Großbrandversuchen ergeben, und mithilfe einer fundierten Wirtschaftlichkeitsbetrachtung wird ein Überblick über die maßgebenden Aspekte für die Wahl des geeigneten Türsystems gegeben.

Abschließend wird unter Berücksichtigung der o.a. technischen Grundlagen und wirtschaftlichen Kennzahlen eine Bewertung von Pendel- und Schiebetüre für ihre Eignung als Querschlagtüre in zweigleisigen Eisenbahntunneln vorgenommen.

Abstract

Long railway tunnels such as the Semmering Base Tunnel (total length approx. 27.3 km) are now designed as twins-bore systems on the basis of current safety regulations. The two tubes are connected at a distance of max. 500 m by so-called cross-passages, which, on the one hand, are necessary for the accommodation of technical installations for rail operation and, on the other hand, are serving as safe areas during maintenance work and as escape routes in case of emergency (= fire).

The end of the cross-passages towards the tunnel is formed by special doors, which not only meet the above requirements, but have to withstand a large number of other very special stresses such as pressure/suction loads resulting from train speeds of up to 230 km/h. Due to official requirements, they can be designed as two-way swing doors or as sliding doors.

By merging existing regulations and other now known facts, as well as on the basis of findings, resulting from the evaluation of extensive data from full-scale fire tests, and also by well-founded economic analysis an overview of the relevant aspects for the choice of the appropriate door system is given.

Taking into account the technical bases as well as economic key numbers, finally an evaluation of the two-way swing doors and of the sliding doors is carried out for their suitability as a cross-passage door.

INHALTSVERZEICHNIS

1	EINLEITUNG.....	1
2	PROBLEMSTELLUNG	3
3	GRUNDLAGEN.....	6
3.1	Verwendete Unterlagen.....	6
3.2	Begriffe.....	8
3.3	Tunnelsicherheit.....	13
3.3.1	Technische Spezifikation Interoperabilität SRT (TSI - SRT)	13
3.3.2	UIC-Kodex 779-9	15
3.3.3	ÖBFV-Richtlinie A-12	15
4	SEMMERING-BASISTUNNEL	18
4.1	Anlageverhältnisse	18
4.1.1	Querschläge.....	18
4.1.2	Nothaltestelle	20
4.2	Tunnelsicherheitskonzept.....	22
4.3	Lüftungskonzept.....	25
4.3.1	Normalbetrieb.....	25
4.3.2	Instandhaltungsbetrieb	25
4.3.3	Ereignisfall	25
5	TÜREN IN TUNNELBAUWERKEN – STATE OF THE ART	29
5.1	Funktionale Türtypen.....	29
5.1.1	Notausgangstür.....	30
5.1.2	Schleusentür	31
5.1.3	Zugangstür.....	31
5.1.4	Technikraumtür	31
5.1.5	Sonstige Tür.....	31
5.2	Konstruktive Türtypen	31
5.2.1	Drehflügeltür	32
5.2.2	Pendeltür.....	32
5.2.3	Schiebetür.....	33
5.2.4	Gelenkschiebetür	34
5.2.5	Teleskopschiebetür	34
5.2.6	Schwenkschiebetür	35
5.3	Vergleichbare Tunnelprojekte.....	36
5.3.1	Österreich	36
5.3.2	Europa	40
6	RECHTLICHE RAHMENBEDINGUNGEN UND WEITERE ASPEKTE.....	50
6.1	Rechtliche Rahmenbedingungen.....	50
6.1.1	Einreichprojekt 2010 „SEMMERING-BASISTUNNEL NEU“	50
6.1.2	Übersicht.....	52
6.2	§31a-Gutachten 2019.....	53
6.2.1	Stellungnahme Bahn Consult TEN Bewertungsgesellschaft.....	53
6.2.2	Entfluchtungssimulationen.....	54
6.3	Geometrische Bedingungen	58
6.3.1	Querschlag.....	58
6.3.2	Fluchtstollen in der Nothaltestelle.....	59
6.4	Brand	61
6.5	Rauchgase.....	64

6.6	Wirkung der Lüftung im Ereignisfall	66
6.6.1	Zughalt in der Nothaltestelle	66
6.6.2	Zughalt außerhalb der Nothaltestelle	69
6.7	Aerodynamik im Tunnel	74
6.8	Lebenszyklusbetrachtung	75
6.9	Wartung und Instandhaltung	75
6.10	Resultierende Anforderungen	76
7	MESSTECHNISCHE UNTERSUCHUNGEN	78
7.1	Ausgangslage	78
7.1.1	Rauchfreihaltung der Querschläge	78
7.1.2	Fluchttüren	79
7.2	Versuchsziele	79
7.3	Versuchsanordnung	80
7.4	Versuchsvorbereitung/-aufbau	80
7.4.1	Brandschutzeinhausung	81
7.4.2	Versuchstüren	82
7.4.3	Messtechnik	84
7.4.4	Visualisierung der Rauchausbreitung	85
7.4.5	Brandlast	85
7.4.6	Lüftungsverhältnisse	86
7.4.7	Hochdruckwassernebelanlage (HDWNA)	86
7.4.8	Sicherheit	89
7.4.9	Weitere Aspekte	90
7.5	Versuchsdurchführung	91
7.5.1	Zeitlicher Ablauf	91
7.6	Messergebnisse	93
7.6.1	Versuche mit 2 Brandtassen	94
7.6.2	Versuche mit 4 Brandtassen	95
7.6.3	Versuche mit 6 Brandtassen	98
7.6.4	Versuche mit 8 Brandtassen	102
7.6.5	Versuche mit 10 Brandtassen	105
7.6.6	Einsatz der Hochdruckwassernebelanlage	108
7.6.7	Türöffnungskräfte	112
7.7	Zusammenfassung der Versuchsergebnisse	113
7.7.1	Geringe durchschnittliche Brandlasten bis ca. 6 MW	113
7.7.2	Mittlere durchschnittliche Brandlasten bis ca. 9 MW	114
7.7.3	Hohe Brandlasten bis ca. 14,5 MW	114
7.7.4	Maximale Lufttemperaturen	115
7.7.5	Sichtverhältnisse	117
7.7.6	Hochdruckwassernebelanlage	118
7.7.7	Türöffnungskräfte	118
8	WIRTSCHAFTLICHKEITSBETRACHTUNG	119
8.1	Lebenszykluskosten	119
8.1.1	Definition	119
8.1.2	Erstinvestitionskosten	120
8.1.3	Kosten in der Betriebsphase	120
8.1.4	Abbruch und Entsorgung	122
8.2	Berechnungsgrundlagen	122
8.2.1	Erstinvestition	122
8.2.2	Betriebsphase	123
8.3	Lebenszyklen	124
8.3.1	Pendeltür	125
8.3.2	Schiebetür	125

8.4	Kostenvergleich.....	125
8.5	Dynamische Wirtschaftlichkeitsberechnung	126
8.5.1	Kapitalwert	127
8.5.2	Kapitalwiedergewinnungsfaktor	127
8.5.3	Annuität.....	127
8.5.4	Betriebserschwerniskosten.....	129
8.6	Sensitivitätsanalyse.....	130
8.6.1	Modifikation Wartung und Funktionsprüfung	130
8.6.2	Modifikation Störungen.....	132
8.6.3	Kritische Werte für die Schiebetür	134
8.6.4	Zusammenstellung Ergebnisse	136
8.6.5	Plausibilitätsbetrachtung	137
9	BESCHAFFUNG	139
9.1	Prüfsystem	139
9.2	Vergabeverfahren	139
9.2.1	I. Stufe: Teilnahmeantrag (Technische Lieferbedingungen).....	139
9.2.2	II. Stufe: Ausschreibung (Projektbezogenes Leistungsverzeichnis).....	140
9.3	Projektbezogenes Leistungsverzeichnis.....	143
10	ZUSAMMENFASSUNG UND RESÜMEE.....	144
	ANHANG.....	149
	ABKÜRZUNGEN.....	151
	EINHEITEN.....	153
	SONDERZEICHEN	153
	QUELLENANGABEN	154
	INTERNETNACHWEISE.....	159
	ABBILDUNGSVERZEICHNIS	160
	TABELLENVERZEICHNIS	167

1 EINLEITUNG

Lange Eisenbahntunnel wie der Semmering-Basistunnel (Gesamtlänge rd. 27,3 km), werden heute auf Grundlage von geltenden Sicherheitsvorschriften als zweiröhrige Anlagen (jeweils eingleisig) konzipiert. Die beiden Röhren werden aufgrund von europaweit gültigen Bestimmungen der *Technischen Spezifikation für die Interoperabilität bzgl. der Sicherheit in Eisenbahntunneln* (2) (3) und des *UIC-Kodex 779-9* (4) im Abstand von max. 500 m durch sog. Querschläge miteinander verbunden (s. Abb. 1).

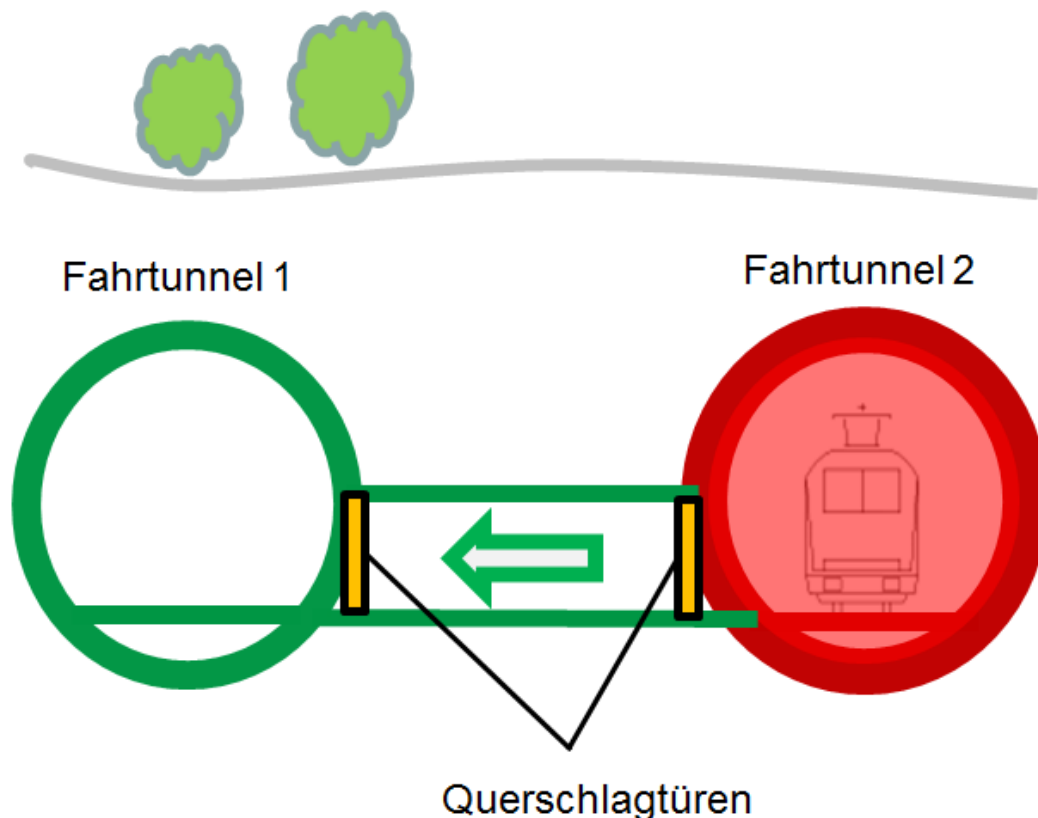


Abb. 1: zweiröhriger, eingleisiger Eisenbahntunnel – Systemdarstellung

Diese Querschläge dienen einerseits der Unterbringung von für den Eisenbahnbetrieb erforderlichen technischen Anlagen (z.B. Trafos, Telekommunikationseinrichtungen, etc.) und andererseits v.a. aber als sichere Bereiche während der Durchführung von Instandhaltungsarbeiten und als Fluchtwege im Ereignisfall.

Die technischen Anlagen sind in den meisten Fällen in eigenen Technikräumen mit einfachen Türen untergebracht, welche insbes. die starke Staubbelastung der installierten Komponenten so gering wie möglich halten sollen und auf diese Weise ihre störungsfreie Funktion sowie entsprechend lange Lebensdauern sicherstellen sollen.

Mit der Anordnung von eigenen Technischen Räumen in den Querschlägen und zusätzlich einem verhältnismäßig dichten Querschlagabschluss aus Querschlagwänden und -türen wird somit der wichtigen Nebenbedingung nach Staubfreiheit Rechnung getragen und folglich ein Höchstmaß an Betriebssicherheit erreicht.

Hauptzweck der Querschläge ist jedoch die Trennung der beiden Fahrrohre im Hinblick auf die Sicherheit von Zugpassagieren im Ereignisfall. Während des Betriebes stellt der Brand die Hauptgefahr in einem Tunnel dar, weshalb das Szenario „Brand in einem personenbefördernden Zug“ unter Berücksichtigung von Eintrittswahrscheinlichkeit und Schadensausmaß als das maßgebende Szenario hinsichtlich Tunnelsicherheit gilt.

Für den Eintritt eines Notfalles sind lange Eisenbahntunnel auch mit einer Nothaltestelle ca. in Tunnelmitte ausgestattet, die für den Nothalt eines Zuges konzipiert ist und als Flucht- und Evakuierungsort für die Reisenden dient. Der Abschluss der in die Nothaltestelle führenden Fluchttunnel zum Fahrtunnel hin wird ebenso von dichten Abschlusswänden und systemgleichen Türen wie beim Querschlag gebildet, da diese ja den gleichen Beanspruchungen wie die Querschlagtüren ausgesetzt sind.

Für den Ereignisfall wird aus dem Blickwinkel „Brand in einem personenbefördernden Zug“ der Personenschutz als das oberste Ziel angesehen. Befindet sich ein personenbefördernder Zug noch vor der Nothaltestelle, so ist im Brandfall in dieser anzuhalten, hat der Zug jedoch die Nothaltestelle bereits passiert, soll er ins Freie fahren. Im ungünstigsten Fall kann es allerdings auch zu erzwungenen Zughalten in den Bereichen zwischen den Portalen und der Nothaltestelle kommen, dann ist die Personenevakuierung über die nächstgelegenen Querschläge notwendig.

In jedem Fall ist die Rauchfreihaltung der Fluchtwege sicherzustellen. Dazu wird die nicht betroffene Tunnelröhre lüftungstechnisch unter Überdruck gesetzt und somit ein Überströmen der Rauchgase von der Brandröhre in die nicht betroffene Röhre verhindert. Um einen Raucheintrag in die Fluchtstollen der Nothaltestelle bzw. in die Querschläge dauerhaft zu verhindern, ist die Aufrechterhaltung der Druckdifferenz maßgeblich.

Der Abschluss der Querschläge zum Fahrtunnel hin wird von besonderen Türen gebildet, die nicht nur den o.a. Anforderungen genügen, sondern einer Vielzahl von weiteren sehr speziellen Beanspruchungen wie beispielsweise aus Zuggeschwindigkeiten von bis zu 230 km/h resultierenden Druck-/Sogbelastungen standhalten müssen. Sie können in Abhängigkeit von den spezifischen Gegebenheiten des betreffenden Tunnels grundsätzlich auf verschiedenste Weise, z.B. als Pendel- oder Schiebetürsystem, ausgeführt werden.

2 PROBLEMSTELLUNG

Das bereits einleitend angeführte Erfordernis von Querschlägen im Abstand von max. 500 m bei zweiröhrigen Tunnelanlagen sowie einer Nothaltestelle (Länge > 20 km) resultiert aus der Thematik Tunnelsicherheit und beruht auf Vorgaben der bereits angeführten *Technischen Spezifikation für die Interoperabilität bzgl. der Sicherheit in Eisenbahntunneln* (2) (3) und des *UIC-Kodex 779-9* (4).

Auf Grundlage dieser zwei Regelwerke und zusätzlich unter Berücksichtigung der *ÖBFV-Richtlinie A-12* (7) (8), in welcher die Vorgaben des Österreichischen Bundesfeuerwehrverbandes bzgl. Sicherheit in Eisenbahntunneln festgehalten sind, wurden in der Einreichplanung für das eisenbahnrechtliche Baugenehmigungsverfahren des SBT im Jahr 2010 Pendeltüren als Türsystem für den Querschlagabschluss vorgesehen. Diese Doppelschwingtüren – die Türflügel schlagen in beide Richtungen auf – erfüllen die Anforderungen hinsichtlich Fluchtweg am besten: die Türen können abhängig von der Ereignisröhre in die eine oder andere Richtung als Notausgang genutzt werden. Alternativ sollten gem. Tunnelsicherheitskonzept aber auch Schiebetüren zur Anwendung kommen können.

Bei der Wahl des Türsystems muss eine Vielzahl von Anforderungen, wie z.B. konstruktive (Querschlagprofil), bahnbetriebliche (Zuggeschwindigkeiten bis 230 km/h etc.) oder instandhaltungsbedingte (Verschleißtauglichkeit etc.) Aspekte berücksichtigt werden.

Vor allem aber spielen Einflüsse, die aus dem Lüftungskonzept als Teil des Tunnelsicherheitskonzeptes resultieren, eine wesentliche Rolle. So müssen auf einem Fluchtweg im Ereignisfall Bedingungen herrschen, welche die Selbstrettung von Flüchtenden in kurzer Zeit ermöglichen. Das betrifft im Falle eines Brandes – dieser stellt das maßgebliche Ereignis in einem Eisenbahntunnel dar – neben den entstehenden hohen Temperaturen in besonderem Maße die Sichtverhältnisse, welche infolge von Rauchentwicklung stark beeinträchtigt sein können.

Um der Verrauchung von Fluchtwegen und sicheren Bereichen entgegenzuwirken, wird auch im Fall des SBT die nicht betroffene Tunnelröhre lüftungstechnisch unter Überdruck gesetzt. Für die dauerhafte Verhinderung von Raucheinträgen sowohl in die Querschläge als auch in die Fluchtstollen der ca. in Tunnelmitte situierten Nothaltestelle, welche einen Bereich mit günstigen Bedingungen für die Selbstrettung darstellt, ist die Aufrechterhaltung dieser Druckdifferenz maßgeblich.

Für die bahntechnischen Ausrüstungskomponenten von Eisenbahntunneln ergeben sich daraus vielfältige und teilweise sogar widersprüchliche Anforderungen. Die Querschlagtüren sind im Besonderen davon betroffen, weil sie einerseits nicht nur dem dauerhaften Widerstand gegen die aerodynamische Druck-/Sogbelastung aus der Zugvorbeifahrt, sondern auch den Anforderungen hinsichtlich Rauchdichtheit genügen müssen und andererseits in ihrer Funktion als Fluchttüren im Ereignisfall aufgrund von Bestimmungen der *Richtlinie ÖBFV-RL A-12 „Sicherheitsmaßnahmen in Eisenbahntunnelanlagen“* (7) (8) eine Öffnungskraft von 100 N nicht überschritten werden darf.

Aus Simulationsberechnungen zu Entfluchtungszeiten von Reisenden in Eisenbahntunneln (12) lässt sich ableiten, dass die Evakuierung unter den gegebenen Umständen relativ rasch erfolgen kann. So können lt. Simulationsergebnissen die rd. 1.200 Passagiere eines doppelten RailJets (Länge 412 m) in weniger als 10 Minuten über einen Querschlag den sicheren Bereich erreichen, im Bereich der Nothaltestelle sind dafür überhaupt nur wenige Minuten erforderlich.

Untersuchungen zu den Auswirkungen eines Feuers wurden von *Aram Amouzandeh et al.* mittels CFD-Simulation durchgeführt und im Beitrag „CFD-Brandsimulation zur Untersuchung der Personensicherheit in zweiröhren Tunnel mit Querschlägen“ (27) veröffentlicht. Dabei wurde die Temperaturentwicklung aufgrund eines Brandes mit hoher Brandlast (28 MW) im Bereich des Querschlages bei geöffneter Fluchttüre und bei unterschiedlichen Längsströmungsgeschwindigkeiten simuliert. Die zugrunde gelegten Randbedingungen entsprechen zwar nicht völlig den wirklichen Verhältnissen (z.B. Leckagen werden nicht berücksichtigt) lassen aber doch qualitative Rückschlüsse zu.

Während also der Brand bzw. die aus dem Feuer resultierenden Temperaturen bereits untersucht wurden, sind bzgl. Rauchausbreitung bei großen Brandlasten relativ wenig empirische Erkenntnisse vorhanden. Um auch über die tatsächlich herrschenden Verhältnisse hinsichtlich Rauchausbreitung insbes. in den ersten Minuten des Brandes Aufschlüsse zu erhalten, wurden Großversuche in einem bereits fertig gestellten Abschnitt des Koralmtunnels durchgeführt (15).

Mit der Durchführung der Brandversuche sollten mögliche Auswirkungen auf die bauliche Gestaltung der Querschlagabschlüsse sowie die notwendige Ausrüstungstechnik zur Rauchfreihaltung der Querschläge erfasst werden. Gleichzeitig sollte jedoch v.a. das Verhalten von Querschlagtüren (Pendel- und Schiebetür) bei hohen Differenzdrücken zwischen den beiden Bahntunnelröhren untersucht und geprüft werden, ob die maximal zulässige Kraft von 100 N zum vollständigen Öffnen der Fluchtwegtüre bei aktiver Ereignisfalllüftung eingehalten werden kann.

Erstes Ziel ist es, durch Zusammenführung von existierenden Vorschriften und weiterer dzt. bekannter Fakten sowie aufgrund der Erkenntnisse, die sich durch die Auswertung des umfangreichen Datenmaterials aus den Großbrandversuchen ergeben, eine qualifizierte Aussage über die Eignung des jeweiligen Türsystems als Querschlagtüre in zweigleisigen Eisenbahntunneln zu erhalten.

In einem weiteren Schritt sollen die für den Einsatz in Betracht kommenden Türsysteme einer fundierten Wirtschaftlichkeitsbetrachtung unterzogen werden. Dazu ist es zunächst notwendig, für beide Türsysteme einen individuellen Lebenszyklus zu erstellen, in welchem die erforderlichen Maßnahmen (Investition, Instandhaltung, Entstörung) erfasst und die entsprechenden Mengengerüste über die jeweilige Nutzungsdauer hinweg dargestellt werden.

Aufgrund der Tatsache, dass sich mit dem Wienerwaldtunnel (A) seit 2012 und dem Lötschberg-Basistunnel (CH) seit dem Jahr 2007 erst zwei vergleichbare Tunnelanlagen über einen zumindest etwas längeren Zeitraum in Betrieb befinden, gibt es zum gegenwärtigen Zeitpunkt keinerlei wirkliche Langzeiterfahrungen über das Verhalten von Querschlagtüren in Eisenbahntunneln. Dennoch stellen gerade deshalb diese zwei Tunnel die einzigen Referenzprojekte mit verfügbaren längerfristigen Daten dar, weshalb die Evaluierungsberichte *Anlagenbericht: Tunneltüren im Fahrtunnel (Notausgangs- und Schleusentüren)* (33) und *Schiebetüren als Tunneltüren – Schiebetüren in Eisenbahntunneln der Schweiz* (34) als Datengrundlage für die Erstellung von Lebenszyklen und herangezogen werden.

Nach Ermittlung und Vergleich der Annuität für Pendel- und Schiebetüre unter Zugrundelegung des jeweiligen Lebenszyklus sollen im Rahmen einer Sensitivitätsanalyse jeweils einzelne Faktoren wie z.B. die Anzahl der kostenintensiven Einsätze für Wartung und Entstörung variiert sowie kritische Investitionskosten und Nutzungsdauern etc. ermittelt werden. Mit dieser Vorgehensweise soll das Ziel eines möglichst umfangreichen wirtschaftlichen Überblicks als Beurteilungsgrundlage erreicht werden.

Abschließend soll schließlich als Schlussfolgerung unter Berücksichtigung der technischen Grundlagen sowie der wirtschaftlichen Kennzahlen eine endgültige Bewertung von Pendel- und Schiebetüre vorgenommen werden.

3 GRUNDLAGEN

3.1 Verwendete Unterlagen

- (1) Semmering-Basistunnel neu, Einreichoperat für das eisenbahnrechtliche Baugenehmigungsverfahren einschließlich wasserrechtlicher Belange, April 2010
- (2) Technische Spezifikation für die Interoperabilität bezüglich der „Sicherheit in Eisenbahntunneln“ TSI - SRT, 07.03.2008
- (3) Technische Spezifikation für die Interoperabilität bezüglich der „Sicherheit in Eisenbahntunneln“ TSI - SRT, 12.12.2014
- (4) UIC-Kodex 779-9E „Sicherheit in Eisenbahntunneln“, Internationaler Eisenbahnverband (1. Ausgabe, August 2003)
- (5) ArbeitnehmerInnenschutzgesetz (ASchG), BGBl. Nr. 450/1994, Fassung 19.09.2019
- (6) Eisenbahnbau- und betriebsverordnung (EisbBBV), BGBl. II Nr. 398/2008
- (7) Richtlinie „Bau und Betrieb von neuen Eisenbahntunneln bei Haupt- und Nebenbahnen, Anforderungen des Brand- und Katastrophenschutzes“ (ÖBFV-RL A-12), Österreichischer Bundesfeuerwehrverband, 1. Ausgabe 2000
- (8) Richtlinie „Sicherheitsmaßnahmen in Eisenbahntunnelanlagen“ (ÖBFV-RL A-12), Österreichischer Bundesfeuerwehrverband, 3. Ausgabe, Juni 2015
- (9) Regelwerk 06.01.06 „Instandhaltungsplan für maschinelle Anlagen“, ÖBB Infrastruktur AG, Stand 01.08.2014
- (10) Regelwerk 10.04.03.01 „Türen und Tore in Tunnelbauwerken“, ÖBB Infrastruktur AG, Stand 17.11.2014
- (11) Regelwerk 18.11.03.01 „Tunneltür- und Tunneltoranlagen“, ÖBB Infrastruktur AG, Stand 29.05.2018
- (12) Stellungnahme der Gutachter analog §31a EisbG „zu den Modifikationen gegenüber der eisenbahnrechtlichen Baugenehmigung zur Unterstützung der §40 Person“, Bahn Consult TEN Bewertungsges.m.b.H., 31.10.2019
- (13) Detailplanung Ereignisfalllüftung, Bericht Nr. 206`756`000-01, Gruner GmbH, 31.10.2013
- (14) Erläuterungsbericht zur Ausführungsplanung (Erläuterungsbericht Tunneltüren Typ A, Typ B und Typ E), VDE 8.2 NBS Erfurt-Leipzig/Halle, FCP Fritsch, Chiari & Partner ZT GmbH, 02.09.2013
- (15) Rauchgasproblematik im Querschlagbereich von Eisenbahntunneln, Bericht Nr. I-05/17/JR V&U INST-15/01/640, Rodler / Sturm, TU Graz, Inst. f. Verbrennungskraftmaschinen und Thermodynamik, 31.07.2017
- (16) Vergleich Feste Fahrbahn - Systeme hinsichtlich Life Cycle Management, FCP Fritsch, Chiari & Partner ZT GmbH, 29.04.2015
- (17) Vergleichende Lebenszykluskosten-Betrachtung Konventionelles Drainagespülen vs. MDB System, FCP Fritsch, Chiari & Partner ZT GmbH, 14.12.2016

-
- (18) Investitionsrechnung – 211.332, Vorlesungsskriptum Sommersemester 2017, Veit, Inst. f. Eisenbahnwesen u. Verkehrswirtschaft, TU Graz
 - (19) Neubaustrecke Wien - St. Pölten, Bauinformation, ÖBB Infrastruktur AG, Februar 2009
 - (20) Koralmbahn, Graz – Klagenfurt, Bauinformation, ÖBB Infrastruktur AG
 - (21) Koralmbahn, Abschnitt St. Andrä – Aich, Bauinformation, ÖBB Infrastruktur AG, April 2015
 - (22) Der Brenner Basistunnel – ein neuer Verbindungsweg durch die Alpen, Projektinformation, Brenner Basistunnel BBT SE
 - (23) Lötschberg-Basistunnel, BLS AG, Februar 2018
 - (24) Gotthard-Tunnel mit ift-geprüften Fluchttüren, Türen als Lebensretter im Tunnel, Presseinformation 16-06-61, ift Rosenheim, 08.07.2016
 - (25) Tunnel-Fluchttüren, Erfahrungen und Erkenntnisse aus 20 Jahren Tunnelbau, Lierau / Römer / De Candido, Swiss Tunnel Congress 2016
 - (26) Kanaltunnel: Vier Sicherheitszonen mit Wassernebeltechnik, Brux, Der Eisenbahningenieur, November 2010
 - (27) CFD-Brandsimulation zur Untersuchung der Personensicherheit in zweiröhri gen Tunnel mit Querschlägen, Amouzandeh / Zeiml / Lackner, Materialtechnologie Innsbruck MTI, Heissenberger, ÖBB Infrastruktur AG, Bauingenieur, Band 91, Mai 2016
 - (28) Rauchgasausbreitung im Bereich der Querschläge von Eisenbahntunneln – Ergebnisse aus Großbrandversuchen, Thaller / Sturm, ÖIAZ, 163. Jg., Heft 1-12/2018
 - (29) Baudynamische Analysen bei der Entwicklung von Tunneltüren für die ÖBB – Simulationsberechnungen der Druck- und Stoßbelastung, Stoßspektren, Ermüdungsbemessung, Kari / Steiner / Reiterer, Tagungsband STUVA-Tagung 2017
 - (30) ÖBB Forschungsprojekt: Untersuchung der Querschlagproblematik bei Eisenbahntunneln, Präsentation, Rodler, TU Graz, Inst. f. Verbrennungskraftmaschinen und Thermodynamik, 03.10.2017
 - (31) Entwerfen von Bahnanlagen in Tunnel und tunnelähnlichen Bauwerken, Funktionale Anforderungen an Anlagen in Tunneln, Anlage XX Tunneltüren – ENTWURF, Liebwald / Trinkl, ÖBB Infrastruktur, ES-STB / ISM-ITC, 03.03.2014
 - (32) Betriebserschwerungskosten – Statusbericht, Marschnig / Vidovic, Inst. f. Eisenbahnwesen u. Verkehrswirtschaft, TU Graz, 2018
 - (33) Tunneltüren im Fahrtunnel (Notausgangs- und Schleusentüren), Anlagenbericht, Sturzeis, ÖBB Infrastruktur AG, 29.08.2019
 - (34) Schiebetüren als Tunneltüren – Schiebetüren in Eisenbahntunneln der Schweiz, Bericht Nr. ECH-223.10_25-002, ENOTRAC AG, 18.02.2018
 - (35) A13835 – Produktion, Lieferung und Montage von Tunneltüren für die Koralmbahn, Teilnahmeantrag, Sampl, ÖBB Infrastruktur AG, 18.10.2017
 - (36) A13835 – Ausschreibung für Tunneltüren, Lieferung und Montage, Anhang 1, Technische Vertragsbedingungen KAB, Teilnahmeantrag, Sampl, ÖBB Infrastruktur AG, 18.10.2017

3.2 Begriffe

B

<i>Bestandsstrecke:</i>	Bestehende, in Betrieb befindliche Eisenbahnstrecke Im Bereich des SBT ist dies die Bergstrecke über den Semmering zwischen Gloggnitz und Mürzzuschlag; Betreiber ist die ÖBB Infrastruktur AG.
<i>Betriebsführung:</i>	Summe aller Maßnahmen und Verfahren, die zur Durchführung von Eisenbahnverkehr notwendig sind
<i>Betriebsgebäude:</i>	Gebäude, in denen Anlagen der bahntechnischen Ausrüstung (wie z.B. Fernmeldeanlagen, Trafostationen, Mittel- und Niederspannungsschaltanlagen) untergebracht sind

D

<i>Durchgangslichte:</i>	Lichte Durchgangsweite u. lichte Durchgangshöhe Gemäß ÖNORM A 6240-2 jener Querschnitt der Tür, der für das Durchschreiten/Durchfahren tatsächlich nutzbar ist. Die Durchgangslichte wird durch Angabe der Breite und Höhe der nutzbaren Türöffnung beschrieben.
--------------------------	---

E

<i>Einreichprojekt:</i>	Planliche Darstellung und Beschreibung eines Bauvorhabens inkl. aller auf den Entwurfsplänen basierenden Berechnungen und sonstigen Schriftstücke, die für die Erteilung von behördlichen Genehmigungen (Eisenbahnrechtliche Baugenehmigung) notwendig sind
<i>Einsatzorganisationen:</i>	Alle auf dem Gebiet des Hilfs- und Rettungswesens tätigen Einsatzkräfte wie z.B. Feuerwehr, Rotes Kreuz, Rettungsdienste etc.
<i>Ereignisfall:</i>	Abweichung vom Regelbetrieb
<i>Ereignisröhre:</i>	Jene Tunnelröhre (→), in der ein Ereignisfall (→) eingetreten ist
<i>Erneuerung:</i>	Vollständiger Ersatz einer Anlage oder eines Systems
<i>Entstörung:</i>	Physische Maßnahmen, die ausgeführt werden, um die Funktion einer fehlerhaften Einheit wiederherzustellen

F

- Fahrröhre:* Tunnelröhre (→), in welcher der Verkehr gemäß EisbBBV abgewickelt wird und dessen Anfang und Ende durch jeweils ein Portal ins Freie begrenzt ist
- Fluchtwege:* Befestigte Gehflächen, die im Ereignisfall dazu dienen, die sicheren Bereiche (→) zu erreichen
- Fremdrettung:* Maßnahmen von Einsatzkräften bzw. -organisationen zur Rettung von Personen in Zusammenarbeit mit dem Bahnpersonal

G

- Gegenröhre:* Der Ereignisröhre (→) gegenüberliegende Tunnelröhre (→)

H

- Handlauf:* Taktile Leiteinrichtung im Bereich der Fluchtwege (→), die bei Sichtbehinderung dazu dient, die Notausgänge (→) sicher aufzufinden
- HDWNA:* Hochdruckwasservernebelungsanlage
Dient zur Brandbekämpfung mittels kleinster Wassertropfen, die unter Druck erzeugt werden.

I

- Inspektion:* Maßnahmen zur Feststellung und Beurteilung des Ist-Zustandes einer Einheit in bestimmten zeitabständen, nach einer festgelegten Anzahl von Betriebseinsätzen oder ereignisbezogen
- Instandhaltung:* Kombination aus allen technischen und administrativen Maßnahmen während des Lebenszyklus einer Einheit zur Erhaltung des funktionsfähigen Zustandes oder der Rückführung in diesen, sodass sie die geforderte Funktion erfüllen kann
- Instandsetzung:* Maßnahmen zur Wiederherstellung des Sollzustandes von Gebäuden, Anlagen und technischen Arbeitsmitteln mit Aufbereitung oder Ersatz von Teilen nach Inspektionsergebnissen

L

- LCC:* Life Cycle Costs (Lebenszykluskosten)
Summe aller Kosten, welche über die gesamte Lebensdauer eines Bauwerks entstehen

- l.d.B.:* Links der Bahn
Angabe immer in Bezug auf die aufsteigende Kilometrierung
- Löschwasseranlage:* Umfasst alle Anlagen im Bereich der NHS (→), die der Gewinnung, Verteilung (durch Löschwasserleitungen) und der Entnahme von Löschwasser dienen

N

- NHS:* Nothaltestelle
Die Nothaltestelle stellt einen Bereich zusätzlich erhöhten Sicherheitsniveaus im Störfall dar. Sie ist für einen Nothalt eines Zuges konzipiert und dient als Flucht- und Evakuierungsort für die Reisenden.
- Notausgang:* Jene Stelle, welche die Grenze zwischen Ereignisröhre (→) und einem Sicherem Bereich (→) bildet
- Notfall:* Ereignisse und Unfälle, die zu einer Personengefährdung führen oder führen können

Q

- QS:* Querschlag
Verbindung zwischen den beiden Tunnelröhren (→)

R

- Randweg:* Randwege dienen als Zugänge und Arbeitsraum für die Wartung und Inspektion der Ausrüstungselemente der Strecke. Im Tunnel dienen die Randwege gleichzeitig als Fluchtwege (→)
- r.d.B.:* Rechts der Bahn
Angabe immer in Bezug auf die aufsteigende Kilometrierung
- Regeln der Technik, allgemein anerkannte:* Technische Regeln, die in der Wissenschaft als theoretisch richtig geprüft und anerkannt worden sind und sich in der Praxis bereits über einen längeren Zeitraum bewährt haben, und zwar dadurch, dass sie von der überwiegenden Mehrheit der betreffenden Fachleute mit Erfolg angewandt worden sind.
Diese technischen Regeln bzw. Technologien zeichnen sich dadurch aus, dass sie sowohl von der Wissenschaft als auch von der Praxis als zeitgemäß anerkannt werden. Die technischen Normen repräsentieren notwendigerweise, aber nicht ausschließlich allgemein anerkannte Regeln der Technik.

S

<i>Schleusen:</i>	Abschnitte in der NHS und in Querschlägen, die durch Brandschutztüren zum Haupttunnel als auch zu den sicheren Bereichen hin abgeschlossen sind. Die Schleusen erhalten eine Belüftung und werden unter Überdruck gehalten, sodass Rauch aus der Ereignisröhre (→) bei geöffneter Schleusentür nicht mehr eindringen kann.
<i>Selbstrettung:</i>	Maßnahmen des Eisenbahnpersonals und der Reisenden zur Abwendung von unmittelbarer Gefahr, zur Begrenzung eines bereits eingetretenen Schadens, die gegenseitige Hilfeleistung im Rahmen der bestehenden Möglichkeiten und das Erreichen von sicheren Bereichen (→) aus eigener Kraft. Selbstrettungsmaßnahmen werden hauptsächlich vom Zugpersonal veranlasst bzw. eingeleitet.
<i>SFE:</i>	Sicherungs-, Fernmelde-, Elektrobetriebstechnik Bezeichnung für Signalinnen- und Signalausßenanlagen, Fernmeldeanlagen, 16,7 Hz – und 50 Hz – Energieanlagen
<i>Sicherer Bereich:</i>	Gemäß TSI - SRT „safe area“ – jener Teil innerhalb eines Tunnelbauwerks, in dem die Reisenden und das Zugpersonal nach der Evakuierung aus dem Zug temporär Schutz finden und bis zum Erreichen des „endgültigen sicheren Orts“ im Freien (gemäß TSI - SRT „final place of safety“) überleben können.
<i>Sichere Röhre:</i>	Jene Tunnelröhre (→), die im Ereignisfall den sicheren Bereich darstellt
<i>Sicherheitskonzept:</i>	Dokument, in der für die eisenbahnrechtliche Verhandlung die Darstellung aller sicherheitstechnisch maßgeblichen baulichen Anlagen und eine Beschreibung des Zusammenwirkens dieser Maßnahmen im Ereignisfall sowie eine Erhebung und Darstellung der Grundzüge des Einsatzkonzeptes erfolgt. Dieses ist mit der Feuerwehr (Landesfeuerwehrinspektorat, Bezirksfeuerwehrinspektorate, Landesfeuerweherschule, Berufsfeuerwehr ...), dem Landesverband des Roten Kreuzes sowie den ÖBB abgestimmt. Bis zur Betriebsbewilligung wird auf Basis des tatsächlich ausgeführten Detailprojektes eine anlagenbezogene Detaillierung des Einsatzkonzeptes mit Erstellung der hierzu erforderlichen Unterlagen (Alarm- und Einsatzpläne, Tunnelsicherheitsplan etc.) erfolgen.
<i>SOK:</i>	Schienenoberkante
<i>Störung:</i>	Zustand einer Einheit, gekennzeichnet durch seine Unfähigkeit, aus beliebigem Grund eine geforderte Funktion zu erfüllen

T

<i>Technische Räume:</i>	Räume in den Querschlägen und in der Nothaltestelle, in welchen sich technische Anlagenteile zur Versorgung der technischen Anlagen im Tunnel befinden
<i>TSI:</i>	Technische Spezifikation Interoperabilität Regelwerke, in denen technische Festlegungen für strukturbezogene Teilsysteme (Infrastruktur, Energieversorgung, Zugsteuerung, Zugsicherung, Signalgebung, Fahrzeuge) und betriebsbezogene Bereiche (Instandhaltung, Betrieb, Umwelt) erarbeitet wurden, um z.B. einem interoperablen Zug zu ermöglichen, restriktionsfrei von einem europäischen Mitgliedsstaat in einen anderen zu fahren. Die TSI stellen die Umsetzung der die Verfahren regelnden Richtlinie 96/48/EG (Richtlinie über die Interoperabilität des Hochgeschwindigkeitsbahnsystems) dar.
<i>Tunnel:</i>	Als Tunnel gilt das ganze untertägige Bauwerk einschließlich der zugehörigen Querschläge und der Nothaltestelle.
<i>Tunnelröhre:</i>	Einzelne Röhre eines Tunnelbauwerks
<i>TUSI-Konzept:</i>	Tunnelsicherheitskonzept Beschreibt alle für die Sicherheit der Reisenden und des Zug- bzw. Instandhaltungspersonals sowie der Notfalldienste relevanten baulichen, technischen und organisatorischen Maßnahmen für den Notfall in der für die jeweilige Projektphase bis zur Inbetriebnahme erforderlichen Detailtiefe. Der Notfallplan (gemäß TSI-SRT „emergency plan“) ist Teil des Tunnelsicherheitskonzeptes.

U

<i>UIC:</i>	Union Internationale des Chemins de fer (Internationaler Eisenbahnverband)
<i>UVP:</i>	Umweltverträglichkeitsprüfung Verfahren zur Prüfung technischer Großprojekte auf Verträglichkeit mit der Umwelt

W

<i>Wartung:</i>	Präventive Maßnahmen, ausgeführt in festgelegten Abständen oder nach vorgeschriebenen Kriterien zur Bewahrung des Soll-Zustandes
-----------------	--

3.3 Tunnelsicherheit

Unter einer Vielzahl von internationalen und nationalen gesetzlichen Vorschriften, Normen, Richtlinien etc. sind drei Dokumente als maßgebend hinsichtlich Bestimmungen betr. Sicherheit in Eisenbahntunneln anzusehen:

- Technische Spezifikation für Interoperabilität bezüglich „Sicherheit in Eisenbahntunneln“ (TSI - SRT) der Europäischen Union (2) (3)
- UIC-KODEX 779-9 „Sicherheit in Eisenbahntunneln“ des Internationalen Eisenbahnverbandes (4)
- Richtlinie A12 „Sicherheitsmaßnahmen in Eisenbahntunnelanlagen“ des Österreichischen Bundesfeuerwehrverbandes (7) (8)

3.3.1 Technische Spezifikation Interoperabilität SRT (TSI - SRT)

Dem eisenbahnrechtlichen Genehmigungsverfahren des Semmering-Basistunnels im Jahr 2010 liegt die Ausgabe 2008-03-07 zugrunde. Im Jahr 2014 wurde eine überarbeitete Version von der EU-Kommission verordnet (Ausgabe 2014-12-12).

In beiden Ausgaben der TSI - SRT werden allerdings Brände als die Hauptgefahr in Tunneln definiert, weshalb der Brand in einem personenbefördernden Zug als maßgebendes Szenario anzusehen ist. Hinsichtlich der sicheren Bereiche und der Fluchtwege finden sich jedoch unterschiedliche Formulierungen und Angaben.

Aus diesem Grund müssen im Folgenden immer beide Versionen betrachtet werden.

3.3.1.1 TSI - SRT, 2008-03-07

Ein „Sicherer Bereich“ ist ein Ort innerhalb oder außerhalb eines Tunnels, an dem alle der folgenden Voraussetzungen erfüllt sind:

- Die Bedingungen erlauben das Überleben.
- Der Zugang für Personen ist sowohl mit als auch ohne Hilfe möglich.
- Personen sind, falls die Gelegenheit besteht, zur Selbstrettung in der Lage oder können, entsprechend den im Notfallplan geregelten Verfahren, auf die Rettung durch die Rettungsdienste warten.
- Kommunikation ist entweder per Mobiltelefon oder per Standleitung zur Leitstelle des Infrastrukturbetreibers möglich.

(vgl. 4.2.2.6.1 *Definition des sicheren Bereichs*)

Als Grundprinzip muss beim Entwurf eines Tunnels berücksichtigt werden, dass Einrichtungen bereitgestellt werden müssen, die einerseits den Reisenden und dem Personal die Möglichkeit der Selbstrettung und die Evakuierung gewähren und andererseits den Rettungsdiensten ermöglichen, Personen im Falle eines Ereignisses in einem Tunnel zu retten. (vgl. 4.2.2.6.2 *Allgemeines*)

Querschlagtüren sind mindestens mit einer Breite von 1,40 m und einer Höhe von 2,20 m vorzusehen. (vgl. 4.2.2.6.4 *Querschläge zur anderen Röhre*)

Die Breite des Fußwegs muss mindestens 0,75 m betragen, die lichte Höhe über dem Fußweg beträgt mindestens 2,25 m. (vgl. 4.2.2.7 *Fluchtfußwege*)^[1]

3.3.1.2 TSI - SRT, 2014-12-12

Spezifikation „Sicherer Bereich“ (Gültigkeit für alle Tunnel mit einer Länge von über 1 km):

- Ein sicherer Bereich muss die Evakuierung aus Zügen, die im Tunnel verkehren, ermöglichen. Er muss eine Kapazität aufweisen, die der maximalen Kapazität der Züge entspricht, die auf der Strecke verkehren, auf der sich der Tunnel befindet.
- Im sicheren Bereich müssen die Reisenden und das Zugpersonal für jenen Zeitraum überleben können, der die vollständige Evakuierung vom sicheren Bereich bis an einen endgültig sicheren Ort ermöglicht.
- Von unterirdisch oder unter Wasser gelegenen sicheren Bereichen müssen die Personen ins Freie gelangen können, ohne die betroffene Tunnelröhre erneut betreten zu müssen.
- Die Gestaltung von unterirdischen sicheren Bereichen und der zugehörigen Ausrüstung muss eine Kontrolle der Verrauchung, insbesondere zum Schutz der Personen, welche die Selbstrettungseinrichtungen benutzen, berücksichtigen.

(vgl. 4.2.1.5.1 *Sicherer Bereich*)

Die Angaben für Querschlagtüren und Fluchtwege in Ausgabe 2014 sind nahezu mit jenen der Ausgabe 2008 ident:

Querschlagtüren müssen eine lichte Öffnung von mindestens von 1,4 m Breite und 2,0 m Höhe aufweisen. (vgl. 4.2.1.5.2 *Zugang zum sicheren Bereich*)

Die Breite des Fußwegs muss mindestens 0,8 m betragen, die lichte Höhe über dem Fußweg beträgt mindestens 2,25 m. (vgl. 4.2.1.6 *Fluchtwege*)^[2]

3.3.2 UIC-Kodex 779-9

Auch im UIC-Kodex 779-9 werden Unfälle in Tunneln, bei denen ein Feuer ausbricht, als kritisch angesehen, weil sie in der geschlossenen Umgebung des Tunnels katastrophale Folgen haben können.

Grundprinzipien betr. Tunnelsicherheit können in der Reihenfolge ihrer Wirksamkeit folgendermaßen zusammengefasst werden:

- Unfallverhinderung
- Ausmaßminderung
- Erleichterung der Selbstrettung
- Erleichterung der Fremdrettung ^[3]

Im UIC-Kodex werden überblicksartig Maßnahmen im Bereich der Infrastruktur für alle 4 Teilbereiche angeführt, wobei sich die beschriebenen Maßnahmen zur Erleichterung der Selbstrettung in erster Linie auf Fluchtwege beziehen. Es werden Fluchtwege selbst, ihre Notfallbeleuchtung, die Notfallkommunikation, Fluchtdistanzen sowie vertikale/seitliche Aus-/ Zugänge und Querstollen unter unterschiedlichen Gesichtspunkten beschrieben. Konkrete Spezifikationen finden sich allerdings nur wenige, so sind beispielsweise eine minimale Fluchtwegbreite von 70 cm und eine optimale Breite von 1,20 m angeführt. (vgl. *I-40 Fluchtwege*).^[4]

3.3.3 ÖBFV-Richtlinie A-12

Ähnlich wie bei der TSI - SRT ist auch bei der Richtlinie A-12 auf die Ausgabe 2000, die den entsprechenden Dokumenten im eisenbahnrechtlichen Einreichverfahren 2010 zugrunde gelegen ist, eine fortgeschriebene Version (Ausgabe Juni 2015) gefolgt.

Auch hier finden sich in den beiden Ausgaben diverse unterschiedliche Formulierungen und Angaben und es müssen daher ebenso immer beide Ausgaben betrachtet werden.

Beide Versionen beschreiben aber Art und Umfang der baulichen und betrieblichen Sicherheitsmaßnahmen, die nach dem Stand der Technik notwendig sind, um in Eisenbahntunneln die Selbstrettung von Reisenden und des Eisenbahnpersonals sowie einen möglichst wirkungsvollen Fremdrettung (Einsatz von Hilfs- und Rettungskräften) zu ermöglichen. (vgl. *1.1 Geltungs-/Anwendungsbereich*)

3.3.3.1 ÖBFV-RL A-12, 2000

Von jeder Stelle eines Fahrtunnels muss ein sicherer Bereich in Entfernung höchstens 250 m Entfernung erreichbar sein.

Sichere Bereiche sind

- Notstiegenhäuser mit Schleusen,
- Rettungsstollen mit Schleusen,
- Tunnelportale,
- Verbindungsbauwerke zu einem anderen Fahrtunnel
- sowie der andere Fahrtunnel selbst.

Neben jedem Gleis ist ein eigener Fluchtweg mit einer lichten Durchgangshöhe von mindestens 2,20 m und mindestens 1,20 m Breite anzulegen (vgl. 2.2 *Sichere Bereiche, Fluchtwege*).

Türflügel müssen eine Mindestbreite von 1,0 m haben und müssen in Fluchtrichtung aufschlagen. Zur maximalen Türöffnungskraft sind keine Angaben vorhanden, allerdings sind sie brandbeständig T90 auszuführen. (vgl. 2.3 *Notausgänge, Notstiegenhäuser, Rettungsstollen*)^[5]

Weitere Inhalte betreffen die Fluchtwegbeleuchtung und -kennzeichnung sowie die bauliche Gestaltung von Rettungsplätzen, Zufahrten etc. Außerdem werden die Erfordernisse bzgl. Energie- und Löschwasserversorgung sowie an Kommunikationseinrichtungen u.a. beschrieben.

Jeweils als eigene Punkte sind betriebliche Anforderungen (z.B. Fahrzeuge, Heißläuferortungsanlagen, organisatorische Maßnahmen) und ein Rettungskonzept sowie sonstige Maßnahmen (Alarmpläne, Übungen Schulungen etc.) für den Feuerwehreinsatz im Ereignisfall angeführt.

3.3.3.2 ÖBFV-RL A-12, Juni 2015

Sichere Bereiche sind neben dem Freien und den Vorportalbereichen durch bauliche Maßnahmen getrennte Abschnitte des Tunnels, die gegen das Eindringen von Rauch und Wärme geschützt sind.

Zu den sicheren Bereiche zählen beispielsweise:

- Stiegenhäuser mit Schleusen
- Rettungsstollen mit Schleusen
- Querschläge mit Schleusen
- bei mehrröhriigen Tunnelanlagen die vom Ereignis nicht betroffene/n Tunnelröhren/n

Neben jedem Gleis ist ein eigener Gehweg mit einer lichten Durchgangshöhe von mindestens 2,25 m und mindestens 1,20 m Breite anzulegen. (vgl. 3.2 *Sichere Bereiche, Fluchtwege, Gehwege*)

Türen müssen eine lichte Mindestbreite von 1,00 m und eine lichte Mindesthöhe von 2,00 m haben und dürfen nicht gegen die Fluchtrichtung aufschlagen. Außerdem müssen Türen im Fluchtwegverlauf mit einem Fluchttür- oder Panikbeschlag ausgerüstet sein und müssen mit normalem Kraftaufwand (max. 100 N) zu öffnen sein. Weiters sind sie so auszuführen, dass ein Brandabschluss für 90 Minuten gewährleistet ist.

Aus der in dieser Ausgabe gewählten Formulierung, dass die Türen nicht gegen die Fluchtrichtung aufschlagen dürfen und dass Ausgänge mindestens so breit sein müssen wie der Gehweg kann geschlossen werden, dass Schiebetüren mit einer lichten Öffnungsweite von mindestens 1,20 m x 2,20 m ebenso zulässig sind. (vgl. 3.3.3 *Schleusen*)^[6]

Neben den o.a. Angaben finden sich unter den baulichen Maßnahmen auch noch Maßnahmen, welche die bauliche Gestaltung von Stiegenhäusern, Rettungsplätzen, Zufahrten etc. zum Inhalt haben.

Betriebs- und sicherheitstechnische Maßnahmen betreffen auch hier die Fluchtwegbeleuchtung und -kennzeichnung samt entsprechender Beschilderung. Außerdem werden die Erfordernisse bzgl. Energie- und Löschwasserversorgung, Brandrauchentlüftung sowie z.B. an Kommunikationseinrichtungen beschrieben.

Schließlich sind ebenso organisatorische Maßnahmen, Rettungskonzept, Angriffswege im Tunnel sowie sonstige Maßnahmen (Alarm- und Einsatzpläne, Übungen Schulungen etc.) für den Feuerwehreinsatz angeführt.

4 SEMMERING-BASISTUNNEL

4.1 Anlageverhältnisse

Der Semmering-Basistunnel ist zwischen den Bahnhöfen Gloggnitz (NÖ) und Mürzzuschlag (ST) geplant. Die Länge des Tunnels beträgt rd. 27,3 km (s. Abb. 2). Aufgrund der topographischen und geologischen Zwangspunkte beträgt die maximale Neigung im Tunnel rd. 8,4 ‰.

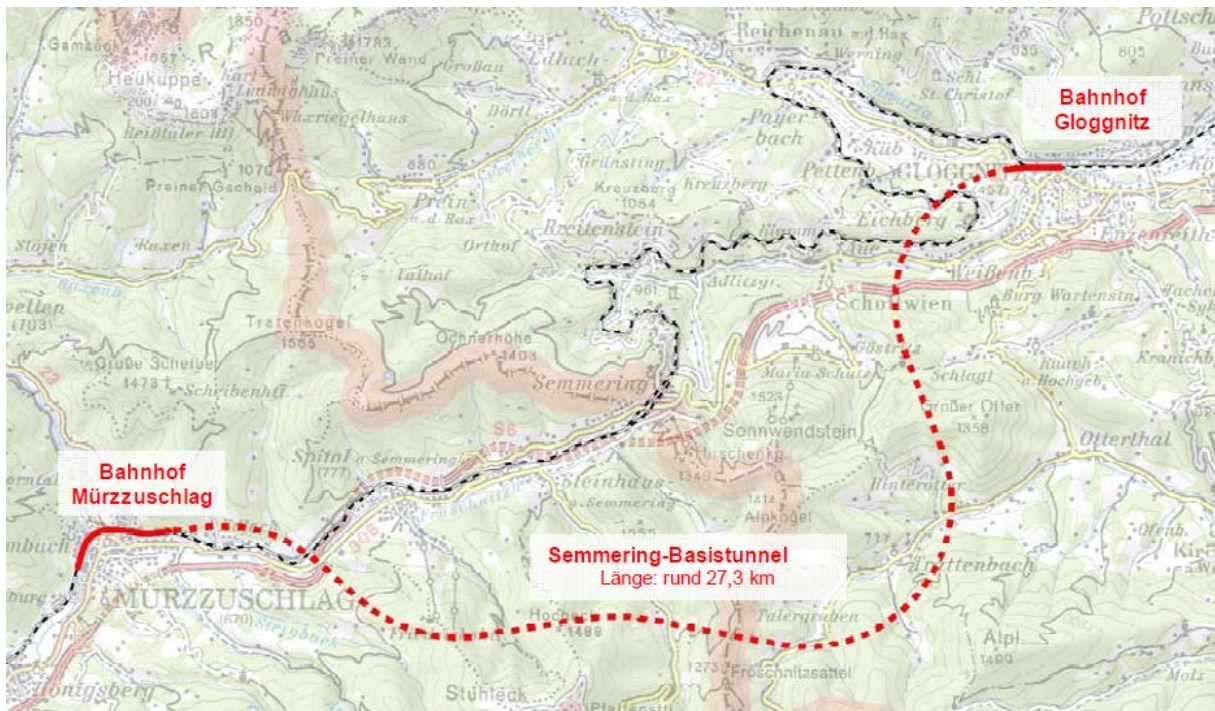


Abb. 2: Übersichtskarte Semmering-Basistunnel

Der Semmering-Basistunnel wird als ein zweiröhriges Tunnelsystem mit Querschlägen im Abstand von max. 500 m und einer Nothaltestelle ca. in Tunnelmitte mit einem Zuluft- und einem Abluftschacht ausgebildet. Die beiden Tunnelröhren weisen im Regelprofil einen lichten Querschnitt von 41,65 m² (zyklischer Vortrieb) bzw. 42,71 m² (kontinuierlicher Vortrieb) auf.^[7] Der Gleisabstand zwischen den beiden Röhren beträgt je nach geologischen Gegebenheiten und trassierungstechnischen Erfordernissen zwischen 40 m und 80 m.

4.1.1 Querschläge

Die Querschläge dienen sowohl als Fluchtwege wie auch zur Unterbringung von Hoch- und Niederspannungsräumen, Trafo-, Telekom- sowie einem Haustechnikraum. Aufgrund des

variierenden Achsabstandes zwischen den beiden Fahrtunnelröhren ist die Länge der insgesamt 56 Querschläge veränderlich, wodurch sich bei gleichen Raumaufteilungen für die technischen Räume unterschiedliche Restlängen in den einzelnen Querschlägen ergeben. In jedem Querschlag sind somit 6 Technische Räume mit (bis auf wenige Ausnahmen) fixen Raumlängen untergebracht (s. Abb. 3).

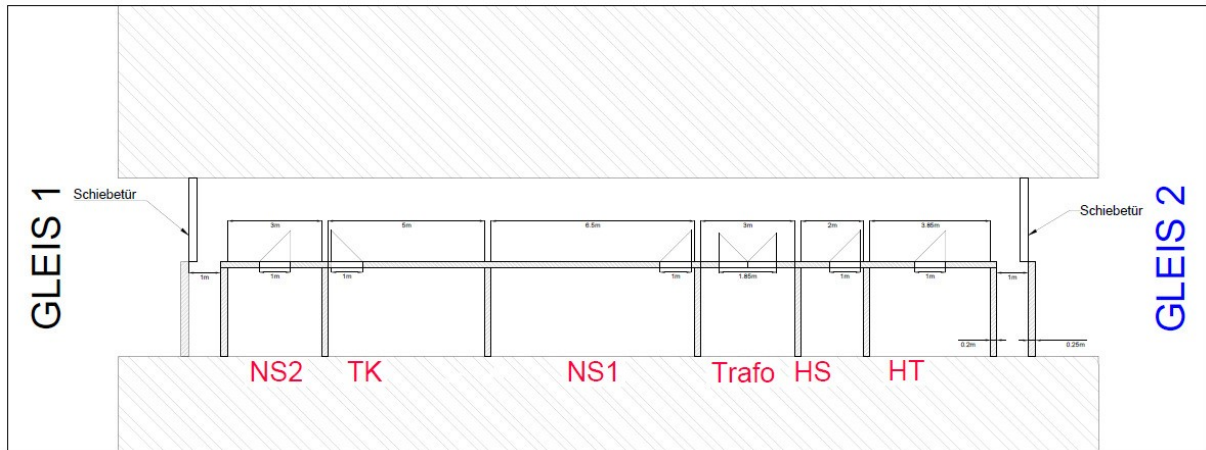


Abb. 3: Regelquerschlag, längenunspezifisch (Ausführung Schiebetür)

Der den Querschlägen zugrunde liegende Lichtraum enthält einen Fluchtbereich von 2,25 m x 2,25 m (B x H) sowie einen Installationsbereich von 2,25 m x 2,50 m (B x H), baulich voneinander getrennt durch eine im Querschlag längs verlaufende Betonwand (s. Abb. 4).

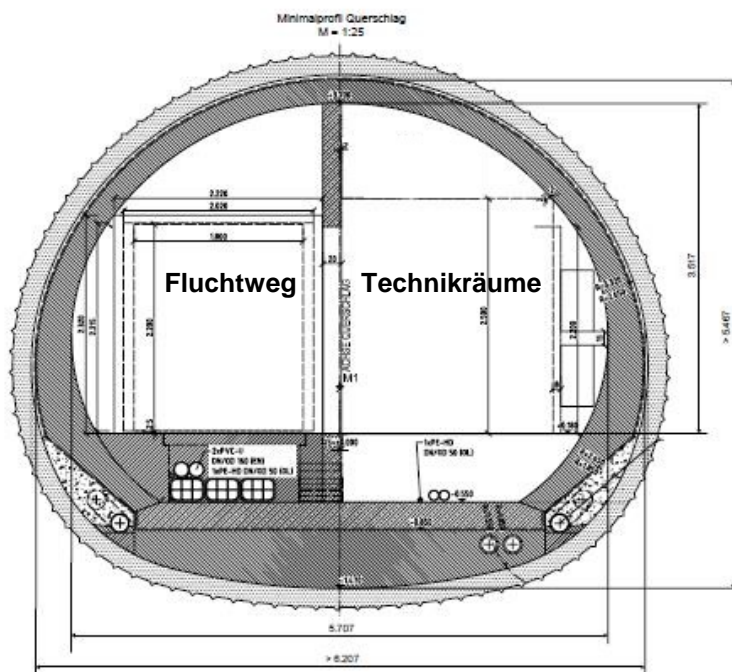


Abb. 4: Minimalprofil Querschlag

Zugangstüren führen vom Fluchtbereich in die Technischen Räume. Querschnittsbestimmend war die Aussparung für die ursprünglich im Einreichprojekt vorgesehene und im Zuge der Tunnelausrüstung von Dritten einzubauende Pendeltüre. Die Mindestrohbaulichte beträgt 2,22 m x 2,32 m (B x H) und ist notwendig, um eine Pendeltüre mit einer Lichtenweite von 1,80 m x 2,20 m (B x H) einbauen zu können.

4.1.2 Nothaltestelle

Die Nothaltestelle besteht aus einem Komplex von Kavernen, Stollen und Tunnelröhren. Zwischen den beiden Streckenröhren ist eine zusätzliche Röhre angeordnet, die durch Stollen mit den Streckenröhren verbunden ist. Im mittleren Bereich sind hauptsächlich aus baugelogistischen Anforderungen Kavernen angeordnet, in denen auch Technikräume analog zur Querschlagsausbildung integriert sind. Die jeweils 9 Fluchtstollen je Seite haben einen Achsabstand von 50 m zueinander. Den westlichen und östlichen Abschluss bilden die Querschläge 33 und 34.

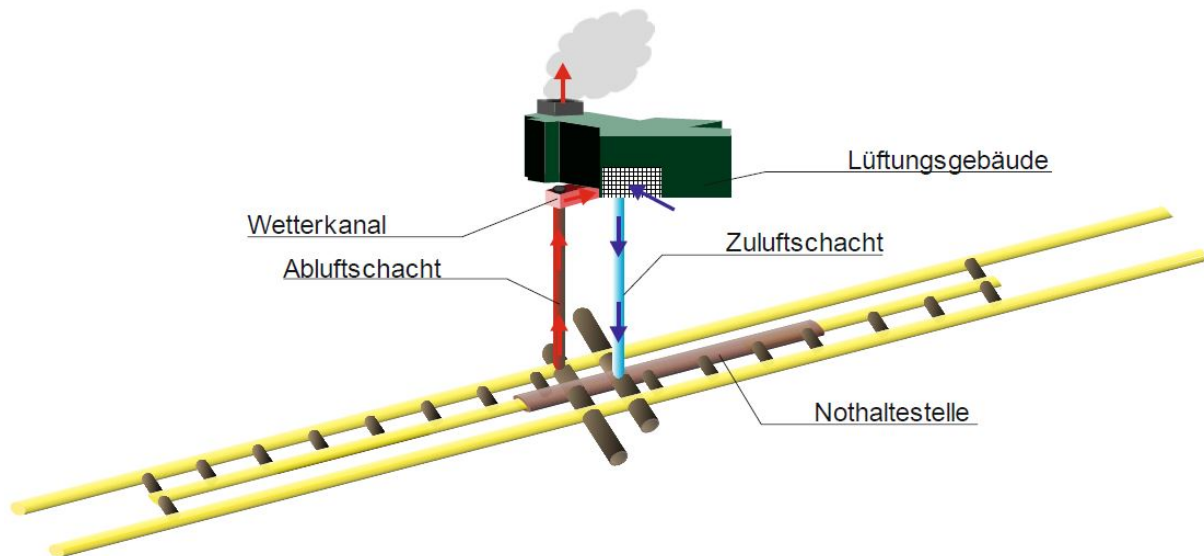


Abb. 5: Nothaltestelle

Für den Tunnelvortrieb wurden zwei ca. 400 m tiefe Schächte hergestellt, welche im Endausbau der Belüftung bzw. der Abluftbeförderung von der Nothaltestelle beim Schachtfuß über das Lüftungsgebäude an der Oberfläche bis ins Freie dienen. Außerdem ist im Zuluftschacht (Schacht Fröschnitz 1, Durchmesser 11,0 m) auch die Medienversorgung über mehrere Kabelschächte untergebracht. Weil sich der Abluftschacht (Schacht Fröschnitz 2, Durchmesser 8,5 m) nicht, wie der Zuluftschacht, direkt unterhalb des Lüftungsgebäudes befindet, erfolgt dessen Verbindung mit Hilfe eines Wetterkanales, der knapp unter der Geländeoberkante zwischen dem Schacht und dem Gebäude geführt wird (s. Abb. 5).

Eine Nothaltestelle im Tunnel hat den Zweck, im Tunnel einen Bereich mit überdurchschnittlich günstigen Bedingungen für die Selbstrettung im Ereignisfall zu schaffen. [8]

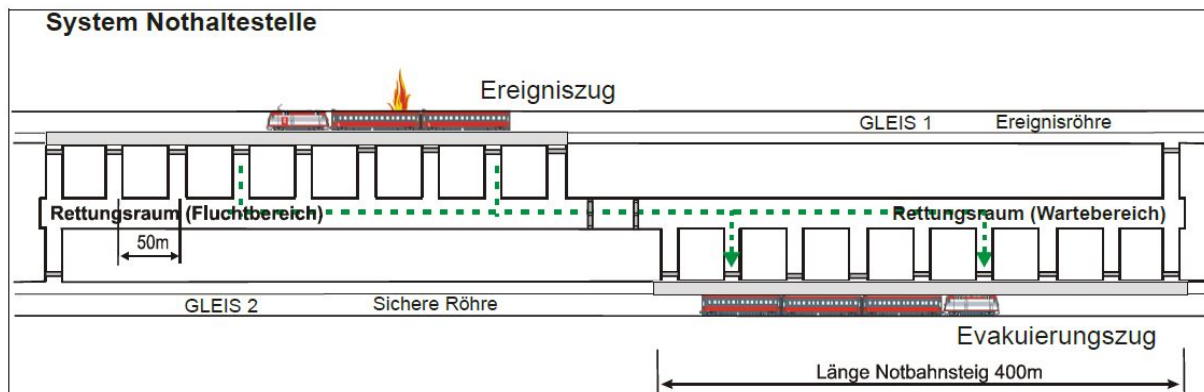


Abb. 6: System Nothaltestelle

Der Abschluss zwischen Fahrtunnel und Rettungsraum ist mittels einer Türebene mit mindestens 2 (Türflügel) x 1,00 m x 2,20 m (B x H), selbstschließend vorgesehen. Diese Notausgangstüren zu den Fluchtstollen und dem anschließend mittig liegenden Rettungsraum (Flucht- bzw. Wartebereich) werden so ausgeführt, dass die Türflügel in Fluchtrichtung (vom Bahnsteig zum Rettungsraum hin) aufschlagen. Die für einen Flüchtenden aufzubringende Türöffnungskraft darf 100 N nicht überschreiten (andernfalls ist eine kraftunterstützende Antriebsmöglichkeit vorzusehen). Dem Lüftungskonzept entsprechend müssen die Türen auch fernbedient werden können.

In der Mitte des Rettungsraumes wird der Wartebereich vom Fluchtbereich durch einen Übergangsbereich getrennt. Durch die Trennung des Wartebereichs vom Fluchtbereich und vom Bahnsteig ist eine klare Brandabschnittsbildung zum Wartebereich gegeben (s. Abb. 6). Die Türen im Übergangsbereich werden abhängig von der Ereignisröhre in die eine oder andere Richtung als Fluchttüren genutzt. Daher können die Türflügel in beide Richtungen (Fluchtrichtung) aufschlagen. Im Ereignisfall ist vorgesehen, dass die Türen vom Fluchtbereich zum Übergangsbereich ebenfalls über die Lüftungssteuerung fernbedient geöffnet werden. [9]

Im Bereich der Nothaltestelle befindet sich in jeder Röhre ein ca. 400 m langer Notbahnsteig, welcher damit den Anforderungen der TSI für einen interoperablen Zug entspricht. Die versetzt situierten Notbahnsteige liegen auf der gleichen Seite wie der jeweilige Randweg im eingleisigen Tunnelbereich und gewährleisten so die einheitliche Lage der Notausgänge. Zusätzlich weist der Notbahnsteig eine Höhe von 55 cm über Schienenoberkante auf, die Breite beträgt mindestens 2 m.

4.2 Tunnelsicherheitskonzept

Im Gegensatz zur freien Strecke sind Unfälle, bei denen Feuer ausbricht, in Tunneln besonders kritisch. In der geschlossenen Umgebung eines Tunnels können derartige Unfälle katastrophale Folgen haben. Andere für die freie Strecke typische Ereignisse wie z.B. Zusammenstöße mit Hindernissen auf dem Gleis oder Entgleisungen aufgrund von Naturereignissen sind in Tunneln dagegen meist nicht möglich.

Beruhend auf den Grundlagen bzgl. Tunnelsicherheit gem. Kap. 3.3 wird aus diesen Gründen unter Berücksichtigung von Eintrittswahrscheinlichkeit und Schadensausmaß das Szenario „Brand in einem personenbefördernden Zug“ als das Hauptszenario (= maßgebendes Szenario) für die Personensicherheit angesehen.^[10]

Daher liegt dem Rettungskonzept im Rahmen des Tunnelsicherheitskonzeptes auch der Grundsatz „Oberstes Ziel ist der Personenschutz im Ereignisfall“ zugrunde. Dabei wird davon ausgegangen, dass bei einem Notfall in der ersten Phase die Selbstrettung und in der zweiten Phase die Fremdrettung erfolgen soll.

Selbstrettung bedeutet in diesem Zusammenhang, dass sich die Reisenden möglichst aus eigener Kraft aus dem Gefahrenbereich in einen sicheren Bereich (z.B. Nothaltestelle) bringen. Im Anschluss an diese erste Phase soll die Fremdrettung, die durch das Zusammenwirken von Bahnpersonal und Einsatzorganisationen gekennzeichnet ist, erfolgen. Ziel der Fremdrettung ist es, jene Personen aufzufinden, die den Gefahrenbereich nicht selbstständig verlassen konnten, und sie in einen sicheren Bereich zu führen bzw. auf andere Weise deren Sicherheit zu gewährleisten.^[11]

Bei Feststellen eines Brandes in einem Zug im Tunnel ist es das erste Ziel, dass der Zug den Tunnel verlässt. Bei personenbefördernden Zügen sind für diesen Fall am Rollmaterial Brandschutzwände, Notbremsüberbrückungen und definierte Notlaufeigenschaften vorgesehen, damit ein Reisezugwagen auch bei Vollbrand noch 15 Minuten lauffähig bleibt und so im Brandfall mit einer reduzierten Geschwindigkeit von 80 km/h mind. 20 km zurückgelegt werden können.^[12]

Da die definierten Notlaufeigenschaften jedoch nicht immer ausreichen, um ins Freie zu fahren, ist auch beim SBT eine Nothaltestelle ca. in Tunnelmitte vorhanden (s. Abb. 7). Befindet sich ein Zug noch vor dieser Nothaltestelle, so ist im Brandfall in dieser anzuhalten.^[13]

Die Nothaltestelle schafft einen Bereich mit günstigen Bedingungen für die Selbstrettung im Brandfall. Durch die zusätzlich vorgesehene Brandrauchentlüftung können flüchtende

Personen rasch den sicheren Rettungsraum (Wartebereich) erreichen und werden von dort gleisgebunden über die zweite Röhre ins Freie gebracht.

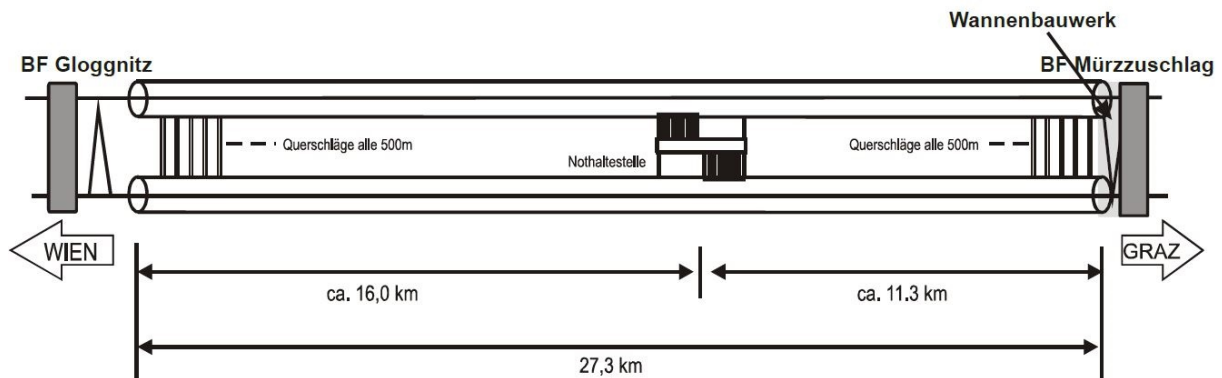


Abb. 7: Systemdarstellung SBT

Personenbefördernde Züge sollen also im Brandfall gemäß den betrieblichen Vorgaben mit verringerter Geschwindigkeit weiterfahren (Berücksichtigung der Beeinflussung der Lüftungswirkung). Im Abschnitt Portal bis Nothaltestelle sollen diese Züge im Brandfall in der Nothaltestelle anhalten, sofern der zur Verfügung stehende Bremsweg dies noch zulässt (s. Abb. 8). Ansonsten soll der Zug ins Freie fahren. Personenbefördernde Züge im Abschnitt Nothaltestelle bis Portal sollen im Brandfall ins Freie fahren. ^[14]

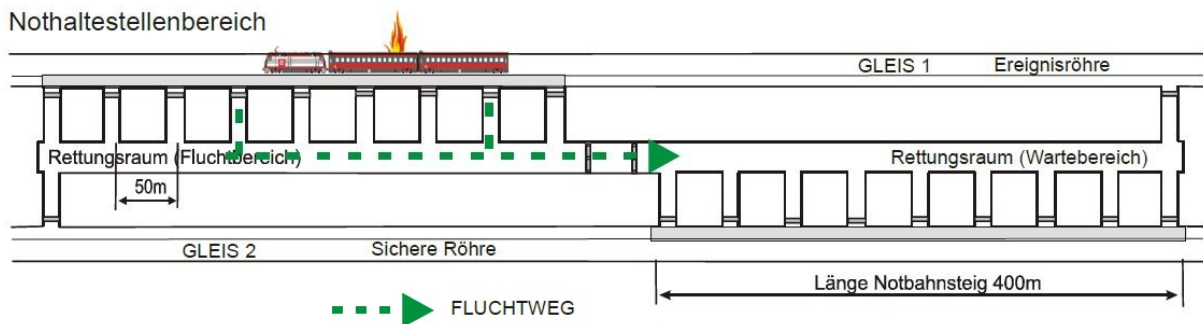


Abb. 8: Fluchtweg Nothaltestellenbereich

Da bei einem Notfall, bei dem der Zug im Tunnel zum Stillstand kommt, ein Weiterfahren nicht möglich ist und Personengefährdung besteht, kommt zuerst die Selbstrettung zum Einsatz: im normalen Bereich der eingleisigen Tunnelröhren erfolgt diese über die nächstgelegenen Querschläge in die zweite Röhre, die als sicherer Bereich dient (s. Abb. 9). ^[15]

Die Evakuierung ins Freie kann folgendermaßen erfolgen:

- Durch Anhalten bzw. Benützen eines im Tunnel (sichere Röhre) befindlichen Reisezugs, der ausreichend Platz für die Aufnahme der Flüchtenden besitzt.

- Durch Einfahren eines Reisezuges von einem der beiden Portale (Reisende müssen bei den Bahnhöfen aussteigen) in die sichere Röhre und Aufnahme der Flüchtenden.
- Durch Einfahren eines Rettungs- bzw. Evakuierungszuges vom Ost- oder Westportal, Aufnahme der Flüchtenden und ggf. Pendelverkehr zu den Bahnhöfen Gloggnitz oder Müzzzuschlag (Rückfallebene).

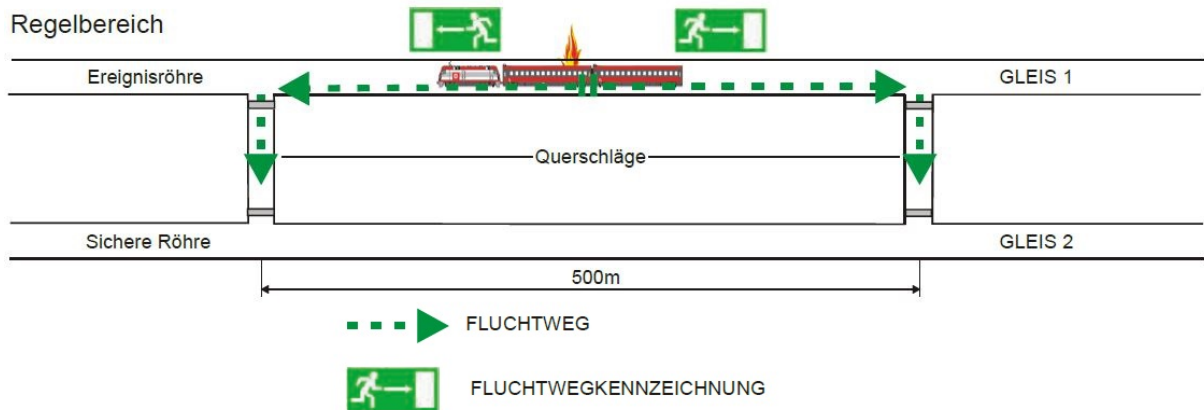


Abb. 9: Fluchtweg Regelbereich

Die Räumung weiterer Züge erfolgt nur, wenn eine Gefährdung besteht und ein Ausfahren des Zuges aus dem Tunnel nicht möglich bzw. sinnvoll ist. Außerdem soll das Einfahren weiterer Züge in den Tunnel bei einem Notfall im Tunnel verhindert werden.^[16]

Alle Züge, die sich zusätzlich zum Ereigniszug im Tunnel befinden, sollen diesen möglichst verlassen, um das Tunnelsystem für die Evakuierung ins Freie und den Zugriff der Notfalldienste möglichst rasch und flexibel nutzbar zu machen. Dem Freifahren des Tunnels werden dabei folgende Ansätze zugrunde gelegt:

- Züge, die die Unfallstelle bereits passiert haben, sollen ins Freie fahren (gilt sowohl für Züge in der Ereignisröhre als auch in der sicheren Röhre).
- Züge in der sicheren Röhre dürfen durch Abstimmung von organisatorischen und betrieblichen Maßnahmen keine Gefährdung für Flüchtende darstellen.
- Züge hinter dem Ereigniszug sollen durch Rückwärtsfahren möglichst weit aus dem Gefahrenbereich gebracht werden, wenn möglich den Tunnel verlassen.

Nicht personenbefördernde Züge (Güterzüge) haben im Hinblick auf Notlaufeigenschaften keine besonderen Eigenschaften und sollen im Brandfall möglichst ins Freie fahren. Ein gezieltes Anhalten eines nicht personenbefördernden Zuges (Güterzuges) in der Nothaltestelle ist nicht vorgesehen.^[14] Bei einem Notfall mit Stillstand im Tunnel erfolgt die Selbstrettung des Zugpersonals wie bei einem personenbefördernden Zug über die nächstgelegenen Querschläge in die zweite, d.h. sichere Röhre (s. Abb. 9).

4.3 Lüftungskonzept

Der Semmering-Basistunnel ist mit einer sog. Ereignisfalllüftung ausgestattet, d.h. das Lüftungskonzept sieht bei einem Brandereignis eine zentrale Absaugung kombiniert mit einer Frischluftzufuhr vor. Die dazu notwendigen Ventilatoren sind im Betriebs- und Lüftungsgebäude Fröschnitzgraben untergebracht, welches sich an der Oberfläche direkt über der Nothaltestelle befindet. Das Gebäude und die Nothaltestelle sind durch die Schächte Fröschnitz 1 (Zuluft) und Fröschnitz 2 (Abluft) miteinander verbunden (s. Abb. 5).

4.3.1 Normalbetrieb

Im Normalbetrieb ist keine aktive Lüftung vorgesehen. Bedingt durch thermische Auf- und Abtriebe (Kamineffekt) sowie durch den Kolbeneffekt der Züge stellt sich in den Fahrtunneln eine Längsströmung ein. Diese führt während der Betriebszeiten zu einem kontinuierlichen Luftaustausch und auch die im Tunnel anfallende technische Abwärme wird auf diese Weise in ausreichendem Maße abtransportiert.

Dagegen haben sowohl Wind als auch thermisch oder barometrisch bedingte Druckdifferenzen zwischen den beiden Portalen nur einen untergeordneten Einfluss auf die Tunnelströmung während des Betriebes.

4.3.2 Instandhaltungsbetrieb

Im Instandhaltungsbetrieb erfolgt die Lüftung bei Bedarf mit denselben Anlagen, die für die Ereignisfalllüftung zur Verfügung stehen. Die ausreichende Belüftung der Querschläge und insbes. der Technischen Räume kann mit mobilen Ventilatoren gewährleistet werden, wobei die endgültige Auslegung der Steuerung sowie der erforderlichen Luftmengen noch festzulegen sind. ^[17]

4.3.3 Ereignisfall

Über die Lüftungsschächte werden bei einem Brandereignis einerseits die Rauchgase aus der Ereignisröhre abgesaugt und andererseits wird Frischluft in den Rettungsraum (Ereignis mit Halt in der Nothaltestelle) oder in die Gegenröhre (Ereignis mit Halt außerhalb der Nothaltestelle) gefördert. Durch die entstehende Druckdifferenz wird ein Überströmen von Rauch in die sicheren Bereiche (Warteraum der Nothaltestelle bzw. Gegenröhre) verhindert.

4.3.3.1 Zughalt in der Nothaltestelle

Der Rettungsraum der Nothaltestelle ist in drei Bereiche gegliedert. Die äußeren Räume sind jeweils mit den seitlich versetzten Notbahnsteigen über 9 Fluchtstollen verbunden und bilden den Flucht- bzw. Wartebereich. Dazwischen ist der Übergangsbereich angeordnet. Die über den Zuluftschacht zuströmende Frischluft ($100 \text{ m}^3/\text{s}$) wird durch den Übergangsbereich in den Fluchtbereich geführt. Von dort werden die automatisch geöffneten Türen in den Fluchtstollen in Richtung betroffene Tunnelröhre durchströmt, der Raucheintritt in den sicheren Bereich wird dadurch verhindert.

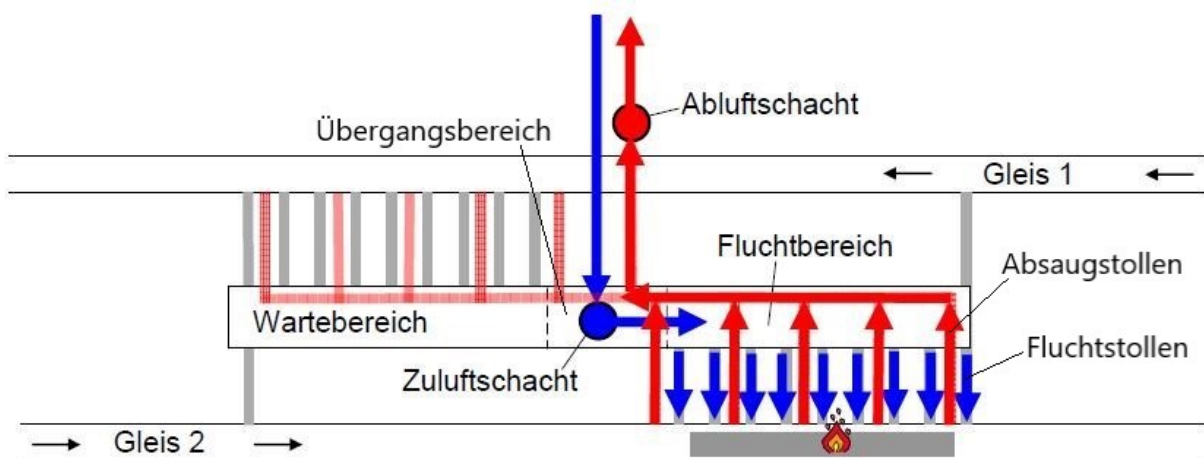


Abb. 10: Lüftungsprinzip für Ereignis mit Zughalt in der Nothaltestelle

Der Rauch wird über 5 im Deckenbereich des Notbahnsteigs angeordnete Absaugstollen abgesaugt und über einen oberhalb des Rettungsraums angeordneten Abluftkanal geführt (Abluftmenge $250 \text{ m}^3/\text{s}$). Oberhalb des Übergangsbereichs wird die Abluft über einen rechtwinklig angeordneten Kanal geführt und von dort über den Abluftschacht abgesaugt (s. Abb. 10).^[18]

4.3.3.2 Zughalt außerhalb der Nothaltestelle

Kommt ein Zug außerhalb der Nothaltestelle zum Stehen, erfolgt ebenso die Aktivierung der Ereignisfalllüftung mit Rauchabsaugung und Frischluftzufuhr über die beiden Schächte im Bereich der Nothaltestelle (s. Abb. 11). Dabei wird Zuluft ($100 \text{ m}^3/\text{s}$) über einen sog. Entlastungsstollen in die Gegenröhre geführt. Die Türen zu den Fluchtstollen der Nothaltestelle bleiben geschlossen, jedoch wird auch in diesem Fall eine Luftmenge von $250 \text{ m}^3/\text{s}$ aus der betroffenen Röhre über die 5 Absaugstollen in der Nothaltestelle abgesaugt.

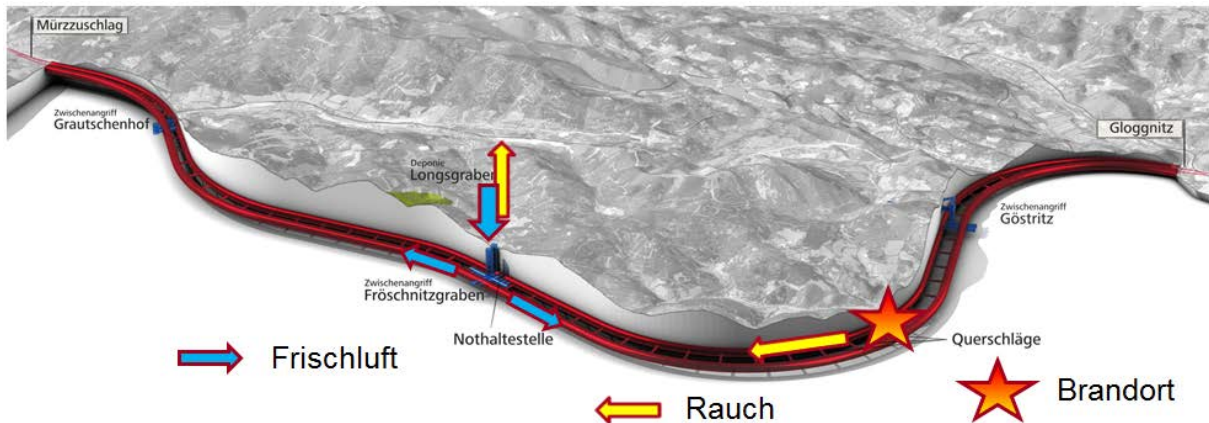


Abb. 11: Ereignisfalllüftung bei Zughalt außerhalb der Nothaltestelle

Durch die Luftzuführung in die Gegenröhre und die Absaugung aus der Ereignisröhre entsteht eine Druckdifferenz zwischen den Bahntunnelröhren, mit Überdruck in der Gegenröhre gegenüber der Ereignisröhre (s. Abb. 12). Nach Öffnen der Querschlagtüren strömt aufgrund des Überdrucks Frischluft in die Ereignisröhre und verhindert so einen Raucheintritt in die gegenüberliegende, sichere Röhre. ^[19]

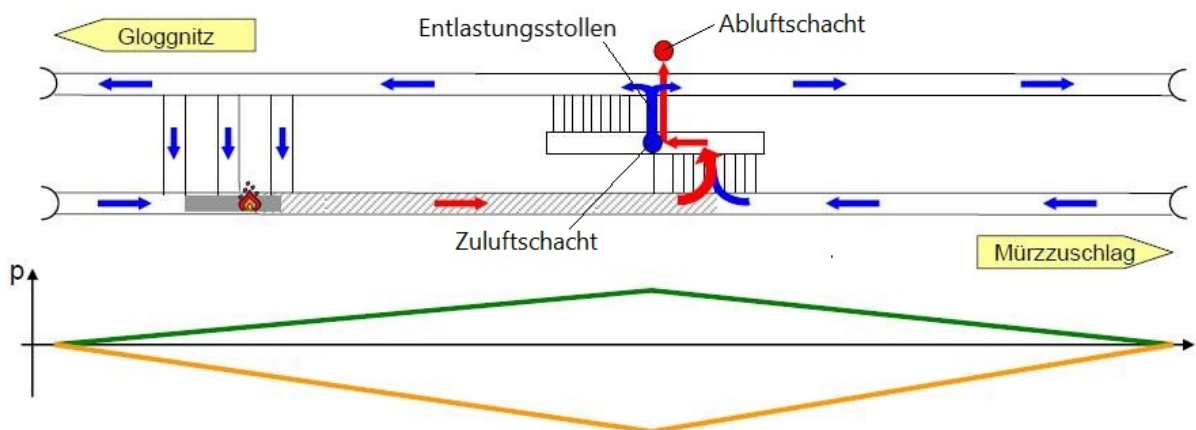


Abb. 12: Lüftungsprinzip für Ereignis mit Zughalt außerhalb der Nothaltestelle mit dazugehörigem Druckprofil (orange: Ereignisröhre, grün: sichere Röhre)

Um bei einem Ereignis außerhalb der Nothaltestelle einen Rauchübertritt in die sichere Gegenröhre zu verhindern, muss das Druckniveau in der Gegenröhre also stets höher sein als in der Ereignisröhre. Die Druckdifferenzen im stationären Zustand (ohne Störgrößen) sind bei den gewählten Luftmengen über die gesamte Tunnellänge hinweg ausreichend hoch, um einem Überströmen von Rauchgasen in die sichere Röhre entgegenzuwirken. Die minimalen Druckdifferenzen ergeben sich naturgemäß in der Nähe der Portale.

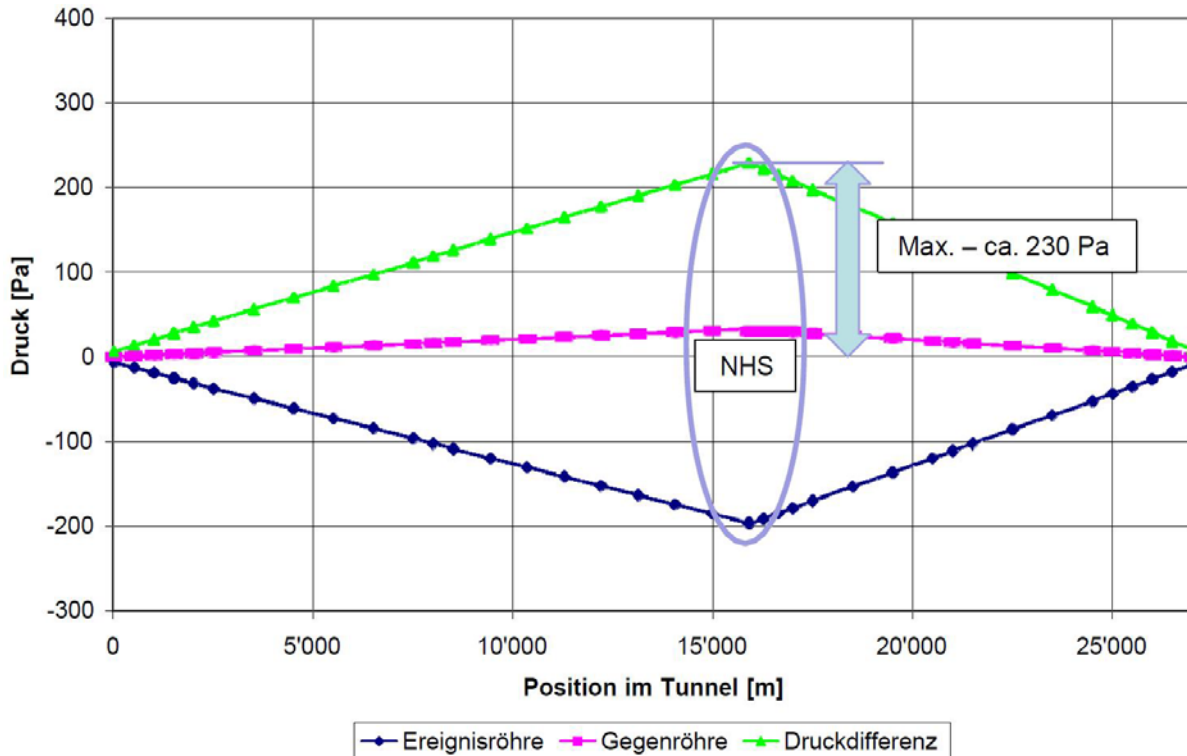


Abb. 13: Druckprofil bei geschlossenen Querschlagtüren und ohne Störgrößen

Die maximale Druckdifferenz zwischen der Gegenröhre und der Ereignisröhre beträgt (bei einer Absaugmenge von $250 \text{ m}^3/\text{s}$ aus der Ereignisröhre und einer Zuluftmenge von $100 \text{ m}^3/\text{s}$ in die Gegenröhre) etwa 230 Pa (s. Abb. 13). Der über die Tunnellänge gemittelte Durchschnittswert beträgt ca. 100 Pa .^[20]

Die o.a. Druckdifferenzen zwischen den beiden Bahntunnelröhren sind notwendig, um im Ereignisfall die minimalen Strömungsgeschwindigkeiten durch die Querschläge sicher zu stellen. Demnach dürfen die über den Querschnitt gemittelten Strömungsgeschwindigkeiten in den Fluchttüren der Querschläge, die auf der nicht verrauchten Seite des Brandes liegen, in 95% der Fälle den Wert 1.0 m/s und auf der verrauchten Seite des Brandes 1.5 m/s bei zwei gleichzeitig offenen Querschlägen nicht überschreiten.^[21]

Andererseits soll die über den Querschnitt gemittelte Strömungsgeschwindigkeit in den Fluchttüren der Querschläge auch bei nur einem offenen Querschlag den Wert von 10 m/s nicht wesentlich überschreiten, um den Fluchtvorgang nicht zu behindern.^[22]

5 TÜREN IN TUNNELBAUWERKEN – STATE OF THE ART

Gem. ÖBB Regelwerk 10.04.03.01 *Türen und Tore in Tunnelbauwerken* (10) ist eine Tür eine Einrichtung, um eine Öffnung zu verschließen, die als Durchgang für Personen dient oder die als Durchfahrt für Fahrzeuge vorgesehen ist.

Die Planung von Tunneltüren hat immer unter Berücksichtigung der Wechselwirkungen im Gesamtsystem des Tunnelbauwerks zu erfolgen. Insbesondere sind hierbei die aerodynamischen Belastungen aus dem Bahnverkehr sowie der Einfluss des Belüftungssystems anzuführen. Die Aspekte des sicheren Betriebs gem. EisbBBV (6), einer möglichst hohen Verfügbarkeit des Tunnelbauwerks, der Notfallbewältigung, sowie die Anforderungen aus der Wartung und Instandhaltung sind ebenfalls vollumfänglich zu berücksichtigen. ^[23]

Fluchtwegtüren befinden sich auf dem signalisierten Weg von der Fahrrohre in eine Nothaltestelle oder ins Freie, aber auch über eine Schleuse in die andere Fahrrohre. Die nachfolgend beschriebenen Türtypen dienen der Abgrenzung von Bereichen mit unterschiedlicher Funktion (Fahrtunnel, Schleuse, Technischer Raum, etc.).

5.1 Funktionale Türtypen

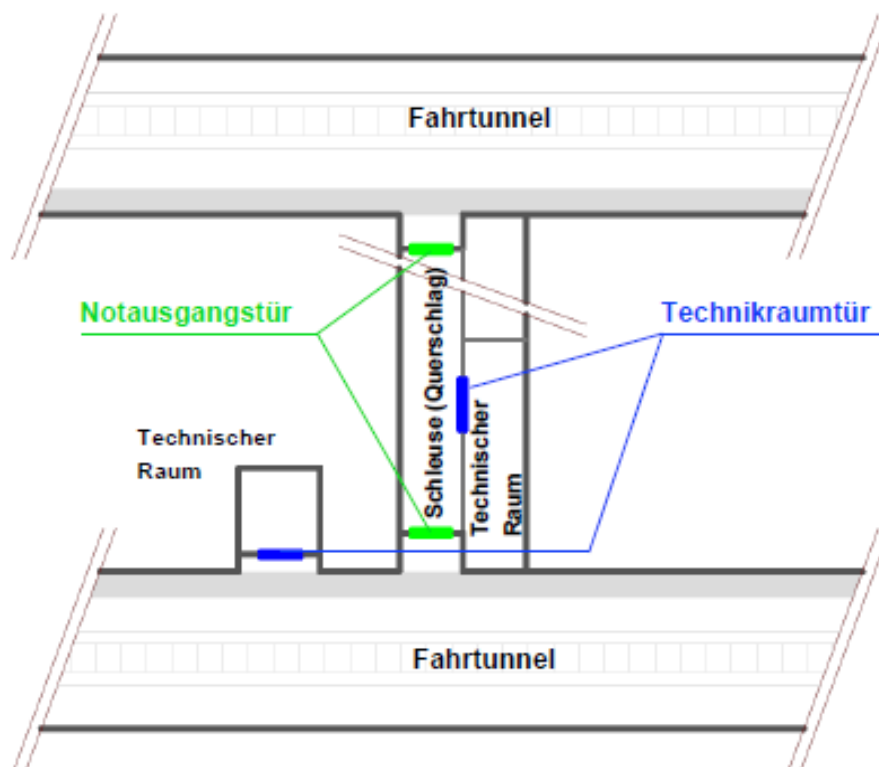


Abb. 14: Tunnelbauwerk mit 2 Fahrtunneln in Parallelage u. Verbindung durch Querschläge

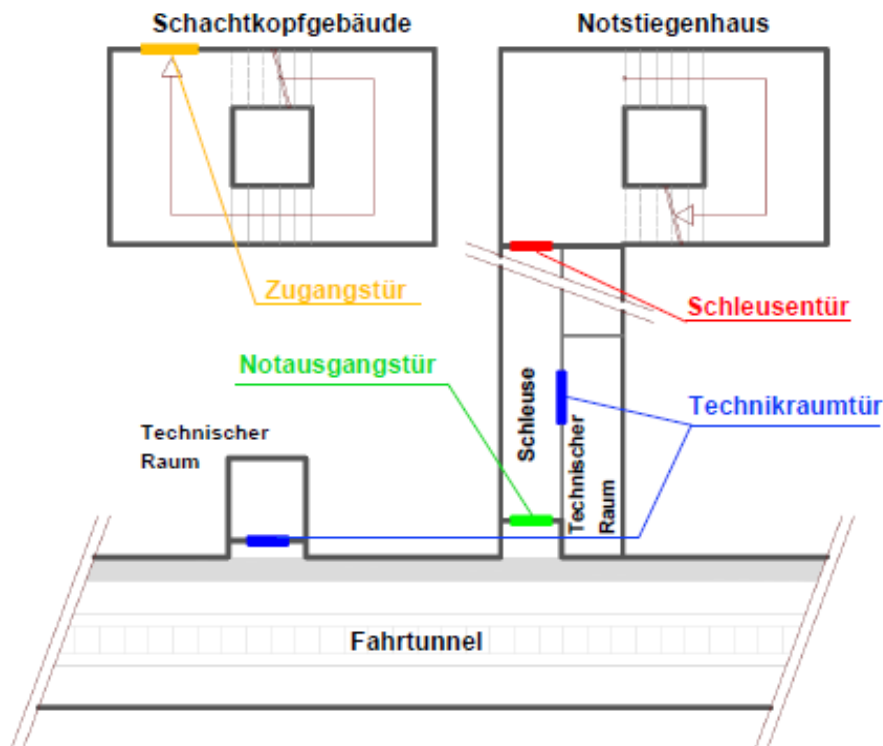


Abb. 15: Tunnelbauwerk bei Anordnung eines Notstiegenhauses mit Schachtkopfgebäude an der Oberfläche

5.1.1 Notausgangstür

Eine Notausgangstür dient der Abgrenzung des Fahrtunnels von einem sicheren Bereich und führt vom Fahrtunnel in den sicheren Bereich (s. Abb. 14 und Abb. 15, GRÜN).^[24]

Eine Notausgangstür hat den Anforderungen an Brandschutz sowie dauerhaft jenen aus Druck- und Sogbelastung zu genügen. Türen, die auf einem Fluchtweg liegen, wie z.B. eine Notausgangstür, dürfen nicht gegen die Fluchtrichtung zu öffnen sein. Die benötigte Kraft zum Öffnen einer Tür am Fluchtweg muss auch einen allfälligen Lüftungsbetrieb berücksichtigen und darf nie mehr als 100 N betragen.

Die Tür muss über einen Selbstschließmechanismus verfügen, welcher jederzeit ein zeitnahes Schließen sicherstellt. Hierbei sind insbesondere die zu erwartenden Luftströmungsgeschwindigkeiten zufolge der natürlichen Luftströmung, des Verkehrs sowie einer allfälligen mechanischen Belüftung zu berücksichtigen. Für die Instandhaltung muss eine für dynamische Einwirkung ausreichend dimensionierte Arretierung in der Offenstellung möglich sein.^[25]

5.1.2 Schleusentür

Eine Schleusentür dient der Schaffung eines Schleusenbereichs und unterscheidet sich von der Notausgangstür nur durch ihre Anordnung (z.B. als Zugangstür zu einem Notstiegenhaus, siehe Abb. 15, ROT).^[24]

Notausgangstüren der beiden Fahrtunnel als Zugang zum Querschlag bilden formal gesehen jedoch keine Schleuse, sondern nur die Abgrenzung zum sicheren Bereich (s. Abb. 14,).

5.1.3 Zugangstür

Eine Zugangstür führt vom Tunnelbauwerk (Notausgangsbauwerk) ins Freie. In Ausnahmefällen kann sie auch in einen öffentlichen Raum führen. Sie wird von den Notfalldiensten im Ereignisfall sowie auch für Instandhaltungszwecke als Zugang in das Tunnelbauwerk herangezogen (s. Abb. 15, GELB).^[24]

5.1.4 Technikraumtür

Eine Technikraumtür dient der Abgrenzung von technischen Räumen zu anderen Bereichen (Fahrtunnel, Querschlag, etc.) sowie zu anderen technischen Einrichtungen (z.B. Löschwasserbecken, Pumpenschacht, etc.; s. Abb. 14 und Abb. 15, BLAU).^[15]

5.1.5 Sonstige Tür

Eine Tür mit untergeordneten Anforderungen, die beispielsweise zu sanitären Anlagen, Personalräumen in Nothaltstellen oder in Notausgangsbauwerken etc. führt, wird als Sonstige Tür bezeichnet.^[24]

5.2 Konstruktive Türtypen

Fluchttüren nehmen bei der Planung der Tunnelausrüstung eine zentrale Rolle ein. So hängt die Wahl des geeigneten Türsystems neben den Anforderungen und Funktionalitäten auch vom Ort und Abschlusstyp (z.B. Querschlag etc.) ab.^[26] Das Öffnungsprinzip hat daher Auswirkungen auf die bauliche konstruktive Gestaltung und muss frühzeitig in der Planung festgelegt werden.

Im Wesentlichen kann zwischen zwei Öffnungsprinzipien unterschieden werden:

- Drehflügeltür und Pendeltür (hier dreht sich das Türblatt um eine Achse)
- Schiebetür (hier wird das Türblatt in der Türblattebene verschoben)

5.2.1 Drehflügeltür

Eine Drehflügeltür ist eine Tür, deren Türblatt an einer Seite über Bänder (Bandseite) befestigt ist. Die gegenüberliegende Seite (Schlossseite) enthält den Verschluss. Eine Drehflügeltür kann ein- oder zweiflügelig ausgeführt werden und kann nur in eine Richtung geöffnet werden (s. Abb. 16).^[27]

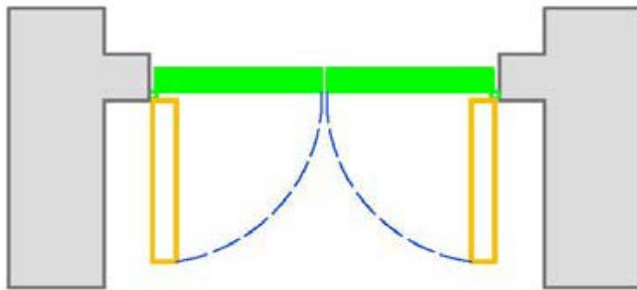


Abb. 16: (zweiflügelige) Drehflügeltür

Die Drehflügeltür ist – bei entsprechenden Rahmenbedingungen – das wohl am häufigsten eingesetzte Türsystem. Der wesentliche Vorteil der Drehflügeltür ist die einfache und kostengünstige Bauweise, welche ein weites Einsatzspektrum zulässt.

Größter Nachteil der Drehflügeltür ist jedoch ihre Abhängigkeit der Öffnungskräfte von der anliegenden Druckdifferenz. Liegt gegen Öffnungsrichtung ein zu hoher Überdruck an, um die Rauchentweichung in den Fahrtunnel zu verhindern, kann die Tür möglicherweise nicht mehr mit der geforderten max. Öffnungskraft von 100 N geöffnet werden. In diesem Fall können nur zusätzliche mechanisch-elektrische Öffnungshilfen Abhilfe schaffen.^[28]

5.2.2 Pendeltür

Eine Pendeltür ist eine Sonderform der Drehflügeltür: Bei ihr kann der Türflügel in beide Richtungen geöffnet werden und schwingt nach dem Öffnen automatisch in die Grundstellung (geschlossen und verriegelt) zurück (s. Abb. 17). Ein Durchschlagen des Türblatts über die Grundstellung hinaus ist nicht zulässig. Eine Pendeltür kann ebenso ein- oder zweiflügelig ausgeführt werden.^[27] Daher stellt sie auch für die Anwendung bei Querschlägen in Eisenbahntunneln die bessere Alternative zur Drehflügeltür dar.

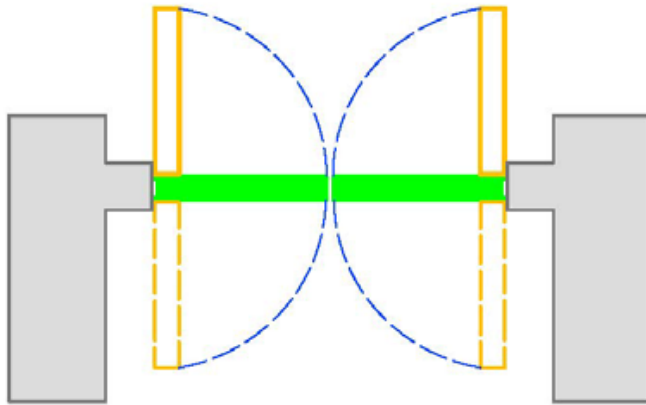


Abb. 17: (zweiflügelige) Pendeltür

Da die Pendeltür auf dem gleichen Grundsatz wie die Drehflügeltür aufbaut, wirkt sich auch bei ihr besonders die große Druckabhängigkeit nachteilig aus. Wiederum wirkt der Überdruck auf der Fluchtseite dem Öffnen der Tür entgegen und bedingt ein eigenes Antriebs- und Schließsystem, um das ordnungsgemäße Öffnen und Schließen sicherzustellen. Allerdings stellt so ein Antriebsmechanismus ein komplexes System dar, welches unter Tunnelbedingungen noch nicht erprobt ist. ^[28]

5.2.3 Schiebetür

Eine Schiebetür ist eine Tür, deren Türblatt geführt ist und durch horizontales Verschieben geöffnet und geschlossen wird (s. Abb. 18). Eine doppelte Schiebetür besteht aus zwei Türblättern, die in entgegengesetzte Richtungen geöffnet und geschlossen werden. Jedes Türblatt ist mit einem Verschlussmechanismus auszustatten. ^[29]

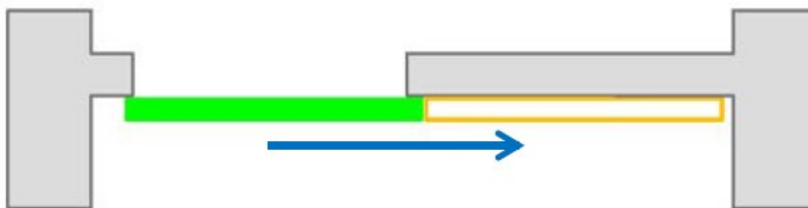


Abb. 18: einflügelige Schiebetür

Die im Gegensatz zu Drehflügel- und Pendeltür geringere Drucksensibilität ermöglicht den Einsatz bei Raumabschlüssen mit höheren Druckdifferenzen. Nachteilig wirken sich u.U. bauseitige Maßnahmen zur Aufnahme des Türblattes, der höhere Platzbedarf und z.T. hohe Gewichte in Abhängigkeit der Druckbelastung aus, welche Antriebssysteme zum Bedienen der Türen erforderlich machen.

Dennoch bestehen einflügelige und zweiflügelige Schiebetüren durch eine simple und kompakte Bauweise mit verhältnismäßig einfachen Dichtkanten. Obwohl Schiebetüren häufig mit Antrieben versehen sind, können diese auch manuell z.B. mittels Gegengewicht als automatischem, stromlosem Schließmechanismus den Fluchanforderungen genügen. ^[30]

5.2.4 Gelenkschiebetür

Eine Gelenkschiebetür (auch Gliederschiebetür) ist eine Tür, deren Türblätter geführt sind und durch horizontales Verschieben geöffnet oder geschlossen werden. Die Tür besteht aus mindestens zwei gelenkig miteinander verbundenen Türblättern, wobei diese beim Öffnen über eine Führungsschiene um ein Gelenk gedreht werden (s. Abb. 19). ^[29]

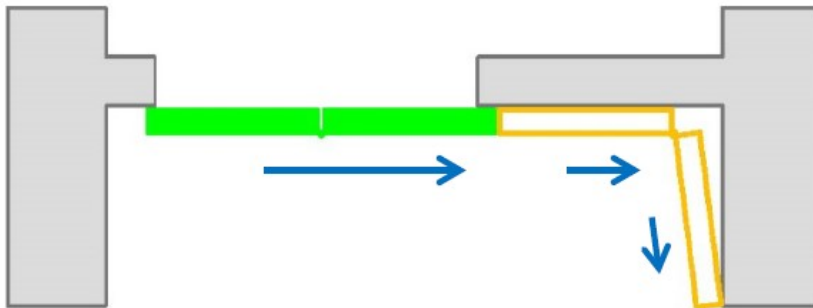


Abb. 19: Gelenkschiebetür

Durch das Wegklappen eines Flügels kann das System auch bei engen Platzverhältnissen eingebaut werden. Auch hier kann ein automatischer, stromloser Schließmechanismus mittels Gegengewicht zum Einsatz kommen. Nachteilig wirken sich allerdings die komplexeren Dichtsysteme sowie die Verschmutzungsanfälligkeit in den Gelenken aus. Bei hohen Dichtigkeitsanforderungen muss daher oft ein zusätzliches Dichtsystem wie beispielsweise eine aufblasbare Dichtung eingesetzt werden. ^[30]

5.2.5 Teleskopschiebetür

Eine Teleskopschiebetür ist eine Tür, deren Türblatt geführt ist und durch horizontales Verschieben geöffnet wird. Die Tür besteht aus mindestens zwei Türblättern, wobei jeweils eines der beiden Türblätter beim Öffnen hinter bzw. vor das andere geschoben wird (s. Abb. 20). ^[29]

Teleskopschiebetüren sind daher besonders geeignet, bei geringen Platzverhältnissen eine breite Durchgangspassage zu erreichen, allerdings sind sie ebenso wie die Gelenkschiebetüren nicht für einen Einsatz mit hohen Dichtigkeitsanforderungen prädestiniert.

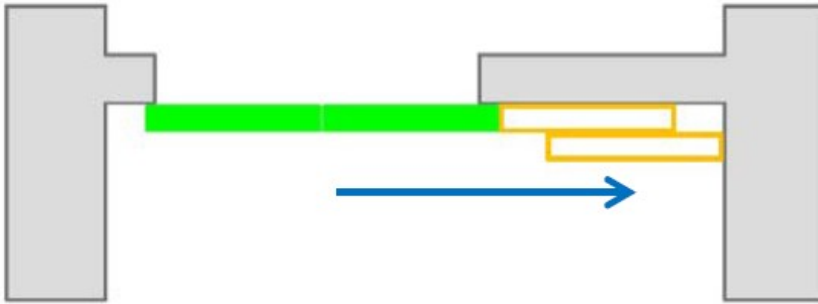


Abb. 20: Teleskopschiebetür

Je nach Ausführung kann pro Flügel eine Führungsschiene oder ein Schienen-/Weichensystem zur Ausführung gelangen. Die etwas aufwendigere schwere Bauweise wird durch Kompaktheit besonders bei sehr großen Ausführungen kompensiert. ^[30]

5.2.6 Schwenkschiebetür

Eine Schwenkschiebetür ist eine Tür, deren Türblatt geführt ist und durch horizontales Verschieben bei gleichzeitigem Drehen des Türblattes aus der Wandebene heraus geöffnet wird (s. Abb. 21). ^[31]

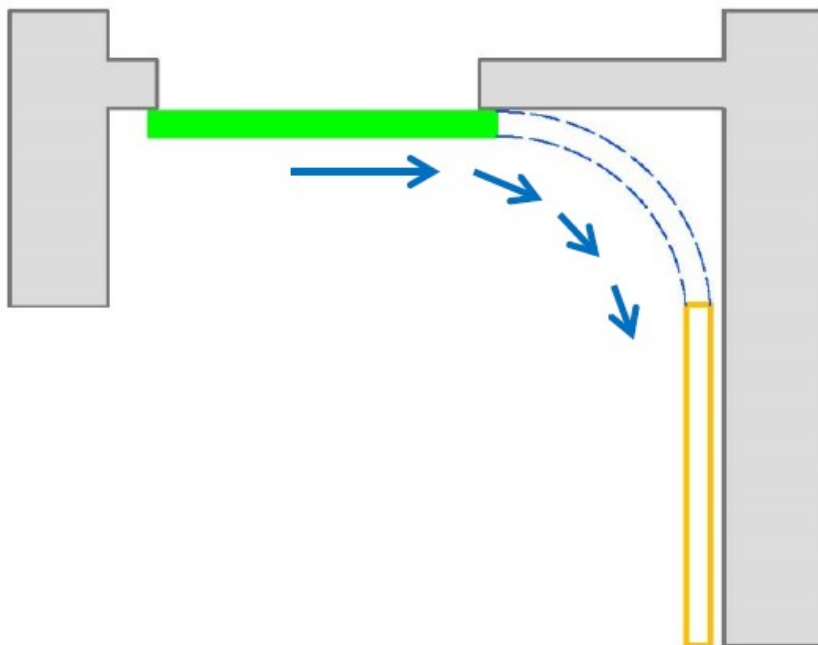


Abb. 21: Schwenkschiebetür

Da sich der Drehpunkt nahezu in Raummitte befindet, benötigt dieses ansonsten sehr einfache System sehr viel Platz. ^[32]

5.3 Vergleichbare Tunnelprojekte

Nachfolgend sind einzelne Tunnelprojekte angeführt, welche aufgrund ihrer Konzeption als zweiröhrige, eingleisige Eisenbahntunnel mit dem Semmering-Basistunnel vergleichbar sind.

5.3.1 Österreich

5.3.1.1 Wienerwaldtunnel

Der Wienerwaldtunnel ist Bestandteil der 44 km langen Neubaustrecke Wien – St. Pölten, die wiederum einen wesentlichen Bestandteil des Ausbaus zur viergleisigen Weststrecke zwischen Wien und Wels darstellt. Der Abschnitt Wienerwald hat eine Gesamtlänge von 14,4 km, davon entfallen 13,3 km auf den Wienerwaldtunnel (s. Abb. 22). Dieser wird in Richtung Westen über eine Länge von 2,2 km als zweigleisiger Tunnel geführt, welcher sich anschließend in zwei eingleisige Tunnel teilt. ^[33]

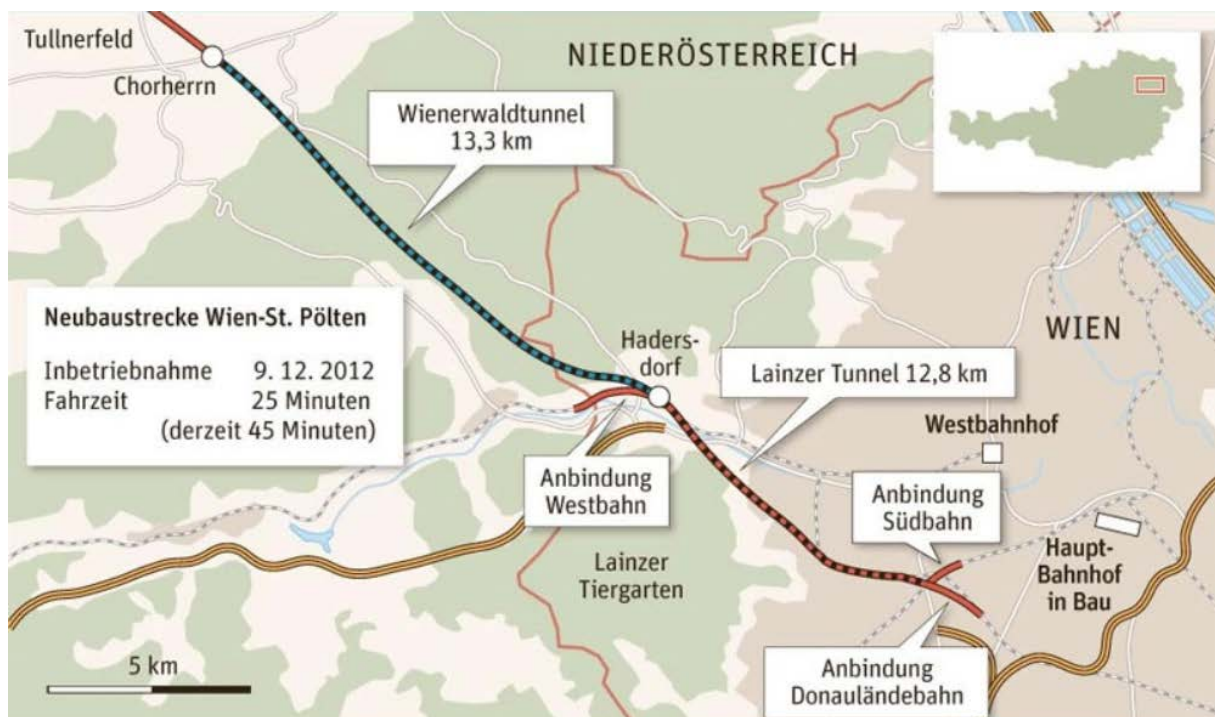


Abb. 22: Wienerwaldtunnel (A) – Trassenverlauf

Der Wienerwaldtunnel ist der drittlängste in Betrieb befindliche Eisenbahntunnel Österreichs. Seit Inbetriebnahme des Abschnitts zwischen Wien und St. Pölten beträgt die Fahrzeit zwischen den beiden Städten nur noch 25 Minuten, was eine Fahrzeiterparnis von über 15 Minuten bedeutet. ^[34]

Die Tunnelröhren des Wienerwaldtunnels sind im Abstand von 500 Metern durch 22 Querschläge miteinander verbunden. Um der Anforderung als Fluchtweg in beide Richtungen gerecht zu werden, wurden je Querschlagseite zwei zweiflügelige Drehflügeltüren ausgeführt. Die Drehflügeltüren wurden zueinander rechtwinklig situiert, wobei die der Tunnelröhre zugewandte Türe die Fluchttüre in den Querschlag im Ereignisfall darstellt (s. Abb. 23 ①). Über die zweite im rechten Winkel angeordnete Türe wird der sichere Bereich (die zweite Tunnelröhre) erreicht (s. Abb. 23 ②).



Abb. 23: Wienerwaldtunnel (A) – Querschlagtüren

Mit Fahrplanwechsel im Dezember 2012 wurde der Wienerwaldtunnel als Teil der neuen Hochleistungsstrecke in Betrieb genommen.

5.3.1.2 Koralmtunnel

Die 130 Kilometer lange Koralmbahn zwischen Graz und Klagenfurt zählt mit rd. 47 Tunnelkilometern, über 100 Brücken sowie 12 neuen Bahnhöfen und Haltestellen zu den bedeutendsten Verkehrsinfrastrukturprojekten in Europa. Sie ist Teil der neuen Südstrecke und damit auch wichtiger Bestandteil des Baltisch-Adriatischen Korridors. Herzstück der Koralmbahn ist der sechstlängste Eisenbahntunnel der Welt: der rd. 33 km lange Koralmtunnel (KAT) zwischen dem neu zu errichtenden Bahnhof Weststeiermark im Gemeindegebiet von Groß St. Florian und St. Andrä i.L. ^[35]

Mit der Inbetriebnahme der gesamten Strecke soll sich die Fahrzeit von Graz nach Klagenfurt von gegenwärtig drei auf eine Stunde verkürzen. Da sie für bis zu 250 km/h ausgelegt wird, wird sie neben der Weststrecke die am schnellsten befahrbare Eisenbahnstrecke Österreichs sein. Mit dieser neuen Eisenbahn-Hochleistungsverbindung sollen neue Kapazitäten und deutlich verbesserte Voraussetzungen für Personen- und Bahngüterverkehr geschaffen werden. ^[36]

Das Tunnelsystem besteht aus zwei eingleisigen Röhren, die alle 500 m durch insgesamt 69 Querschläge miteinander verbunden sind (s. Abb. 24). Die Tunnelgradiente steigt mit 5,44 ‰ bis zum Hochpunkt ca. an der Landesgrenze Steiermark – Kärnten an und fällt anschl. mit 3,00 ‰ in Richtung Westen. In Tunnelmitte befindet sich außerdem eine Nothaltestelle, die für Selbst- und Fremdrettung besonders günstige Bedingungen zur Verfügung stellt (s. Kap. 4.1.2).

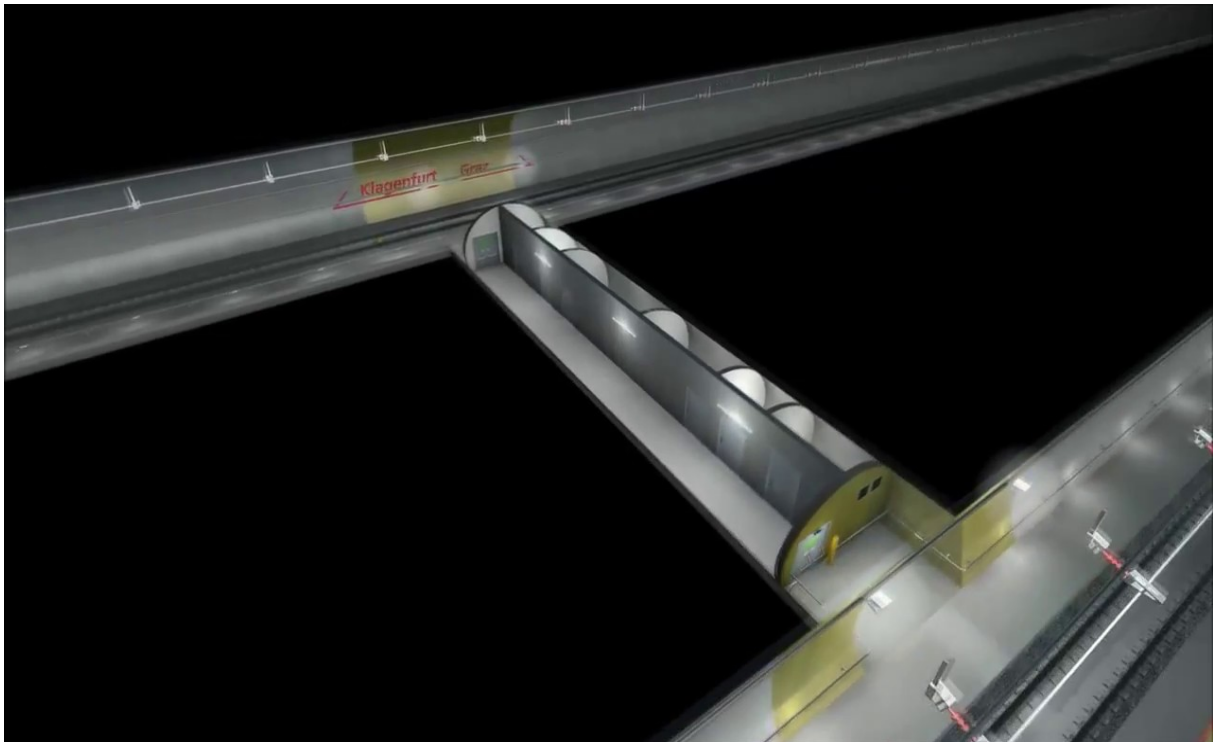


Abb. 24: Koralmtunnel (A) – Querschlag (Visualisierung)

Als Querschlagtüren werden inzwischen Schiebetüren geplant, nachdem wie beim Semmering-Basistunnel ursprünglich Pendeltüren vorgesehen waren. Bei den Fluchtstollen im Bereich der Nothaltestelle müssen die Schiebetüren aufgrund eingeschränkter Platzverhältnisse als Gelenkschiebetüren ausgeführt werden.

Die Inbetriebnahme des Koralmtunnels ist mit Fahrplanwechsel 2025/26 geplant.

5.3.1.3 Tunnelkette Granitztal

Mit einer Länge von 6,1 Kilometern ist die Tunnelkette Granitztal das zweitlängste Tunnelsystem der Koralmbahn. Es verbindet das Lavanttal auf direktem Weg mit dem Jauntal und besteht aus dem Tunnel Deutsch Grutschen, der Einhausung Granitztal sowie dem Tunnel Langer Berg. Das Nordportal befindet sich im Lavanttal im Bereich des aufgelassenen Steinbruchs von Kollnitz, im Süden erreichen die Tunnelröhren zwischen Eis und St. Radegund wieder die Oberfläche. ^[37]

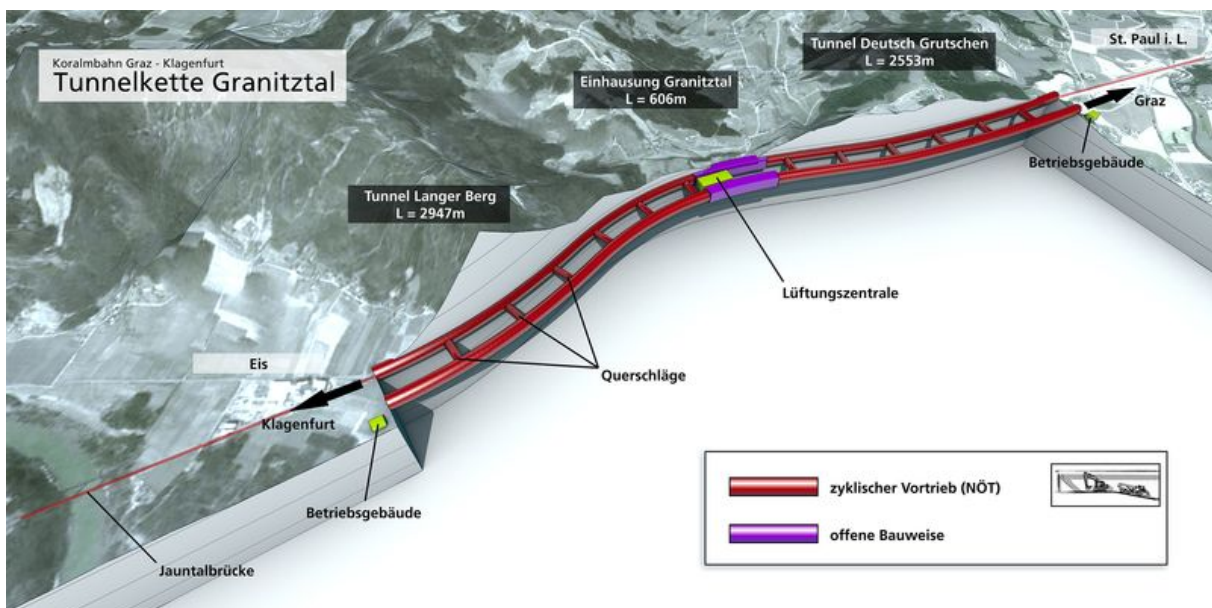


Abb. 25: Tunnelkette Granitztal (A)

Wie der Koralmtunnel, wird auch die Tunnelkette Granitztal durchgehend als zweiröhriges System gebaut und ist mit 12 Querschlägen im Abstand von max. 500 m ausgestattet (s. Abb. 25). Auch hier sind Schiebetüren als Türsystem für den Querschlagabschluss geplant.

Die Fertigstellung ist für das Jahr 2023 (Teilbetriebnahme Ende 2022) vorgesehen.

5.3.1.4 Brenner Basistunnel

Der Brenner Basistunnel (BBT) ist ein flach verlaufender Eisenbahntunnel, der Österreich und Italien verbindet. Er führt von Innsbruck nach Franzensfeste (55 km). Rechnet man die bereits bestehende Eisenbahnumfahrung Innsbruck dazu – in sie mündet der BBT – ist der Alpendurchstich 64 km lang. Er ist damit die längste unterirdische Eisenbahnverbindung der Welt. ^[38]

Der BBT besteht aus zwei Tunnelröhren, die in einem Abstand von 40 - 70 m in etwa parallel verlaufen. Alle 333 m gibt es Querschläge, welche die zwei Röhren verbinden und in Notfallsituationen als Fluchtweg dienen. Eine Besonderheit stellt der durchgehende Erkundungsstollen dar, welcher sich mittig zwischen den zwei Haupttunnelröhren befindet (12 m darunter) und im Endausbau eine wichtige Rolle für die Entwässerung spielt (s. Abb. 26).^[39]

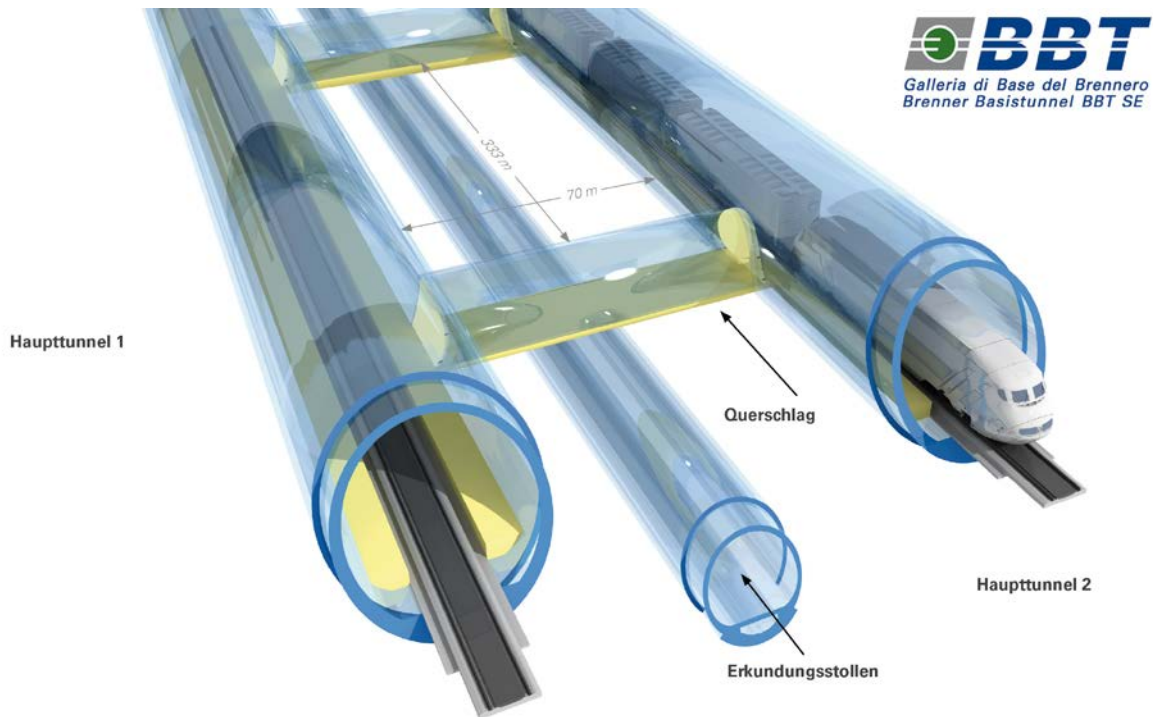


Abb. 26: Brenner Basistunnel (AI) – System (Visualisierung)

Aufgrund seiner Länge sind 3 Nothaltestellen notwendig und mind. 165 Querschläge geplant. Inkl. Rettungsstollen und Verbindungstunnel werden daher insgesamt rd. 380 Schwenkschiebetüren und zahlreiche Schleusentore erforderlich.^[40]

Die voraussichtliche Fertigstellung ist für das Jahr 2027 vorgesehen.

5.3.2 Europa

5.3.2.1 Lötschberg-Basistunnel (CH)

Der Lötschberg-Basistunnel zählt wie der Gotthard-Basistunnel (s. Kap. 5.3.2.2) und der Ceneri-Basistunnel (s. Kap. 5.3.2.3) zur NEAT (Neue Eisenbahn-Alpentransversale), die ein zentrales Element des Ausbaus und der Modernisierung der schweizerischen Schieneninfrastruktur darstellt. Damit soll für den Güter- und Personenverkehr in der Schweiz eine attraktive Alternative zur Straße geboten werden.^[41]

Auf einer Länge von 34,6 km verbindet der Lötschberg-Basistunnel das Nordportal Frutigen mit dem Südportal in Raron. Für eine größtmögliche Betriebssicherheit ist er als zweiröhriger Einspurtunnel konzipiert. Aus Kostengründen wurde vorerst nur eine Röhre durchgehend bahntechnisch ausgebaut und die Parallelröhre größtenteils im Rohbau belassen.

Die beiden Röhren sind alle 333 m mit einem Querstollen verbunden. Dadurch wird der eine Tunnel jeweils zum Rettungstunnel des anderen.^[42] Die 108 Querschläge, welche die beiden Tunnelröhren verbinden, dienen als Rettungswege und als Standorte für insgesamt 1.450 Schränke.

In Ferden befindet sich eine Nothaltestelle, die als ein zwischen den beiden Tunnelröhren liegender und mit Frischluft versorgter Fluchtstollen ausgebildet ist. Sie stellt im Ereignisfall die Flucht- und Evakuierungsstelle für Passagiere dar und ist u.a. mit einer unabhängigen Frischluftzufuhr, Rauchabsaugung, Kommunikations- und Videoanlagen sowie mit verstärkter Beleuchtung ausgestattet.

Beim Fußpunkt in Mitholz besteht weiters eine Diensthaltestelle. Auch sie kann im Ereignisfall benutzt werden, um einen Zug zu evakuieren.^[43]



Abb. 27: Lötschberg-Basistunnel (CH) – Querschlagtor, Fahrtunnel



Abb. 28: Lötschberg-Basistunnel (CH) – Querschlagtor, Querschlag innen

An den Eingängen zu den Querschlägen, Querverbindungen, Notausstiegen und Fluchtstollen sind insgesamt 173 motorisierte Schiebetüren (s. Abb. 27 und Abb. 28) angebracht (153 Querschlagtore, 20 Nothaltestellentore). Diese können über das Tunnelleitsystem ferngesteuert bedient und mit den vorhandenen Sicherungsanlagen überwacht werden. Bei offenen Türen sind Zugsfahrten nur mit max. 40 km/h zugelassen. ^[44]

Die Eröffnung erfolgte am 9. Dezember 2007.

5.3.2.2 Gotthard-Basistunnel (CH)

Der Gotthard-Basistunnel bildet neben dem Lötschberg-Basistunnel den zweiten wesentlichen Bestandteil der NEAT. Er verbindet das Nordportal in Erstfeld im Kanton Uri mit dem Südportal in Bodio, Kanton Tessin.

Der Gotthard-Basistunnel besteht aus zwei 57 km langen Einspurröhren mit einem Durchmesser von jeweils ca. 9,40 m und ist somit dzt. der längste Eisenbahntunnel der Welt. Die beiden Fahrrohre sind alle 325 Meter durch Querschläge miteinander verbunden.

Zwei Multifunktionsstellen in Faido und Sedrun unterteilen die beiden Tunnelröhren in drei ungefähr gleich lange Abschnitte. Hier befinden sich auch die Nothaltestellen und je zwei Spurwechsel.

Der Achsabstand zwischen den beiden Fahrrohren beträgt im Regelfall 40 Meter (max. 70 m). Die 178 Querschläge im Gotthard-Basistunnel bilden einerseits geschützte Räume zur Unterbringung von Schränken mit bahntechnischen Anlagen. Andererseits dienen sie im Ereignisfall als Fluchtwege in die andere Röhre, weshalb sie mit Flucht- und Brandschutztüren abgeschlossen sind (356 Querschlagtüren, 24 Nothaltestellentüren). Diese Querschlagtüren sind als Gelenkschiebetüren (ohne Motorunterstützung) ausgeführt (s. Abb. 29 und Abb. 30).^[45]

Im Vorfeld der Tunnelausrüstung wurden die Querschlagtüren einer Dauerlastprüfung mit insgesamt 500.000 Druck- und Sogstößen bei einer Frequenz von 2 Sekunden unterzogen, die bei einer Umgebungstemperatur von 40°C (wie sie im Gotthard-Tunnel vorherrscht) erfolgen musste. Dieser große Aufwand war notwendig, da die Tunneltüren zentraler Bestandteil des Sicherheitskonzeptes sind: die Türen gewährleisten im Normalbetrieb nicht nur die Abschottung, sondern müssen einem Tunnelbrand 90 Minuten widerstehen, um ein Übergreifen des Feuers in den Querschlag und damit in die „gesunde“ Nachbarröhre zu verhindern. Trotz dieser extremen Belastung muss die Tür im Bedarfsfall jeder Zeit manuell und intuitiv von beiden Seiten mit maximal 100 N Kraftaufwand zu öffnen sein.^[46]



Abb. 29: Gotthard-Basistunnel (CH) – Querschlagtüre geschlossen (Systemdarstellung)



Abb. 30: Gotthard-Basistunnel (CH) – Querschlagtüre geöffnet

Die feierliche Eröffnung des Gotthard-Basistunnels erfolgte im Juni 2016.

5.3.2.3 Ceneri-Basistunnel (CH)

Der Ceneri-Basistunnel stellt den südlichen Zubringer des Gotthard-Basistunnel dar und besteht aus zwei 15,4 km langen einspurigen Tunnelröhren, die rd. 40 m auseinanderliegen und ebenso alle 325 Meter durch insgesamt 48 Querschläge miteinander verbunden sind. ^[47]

Das Nordportal befindet sich in Vigana, das Südportal bei Vezia. Die Steigungen betragen weitgehend weniger als 7 ‰, abschnittsweise jedoch 10 bis 12,5 ‰. Die Überdeckung mit Gebirge in der Ceneri-Zone beträgt 500 bis 800 Meter.

Um die Ersatzteilkhaltung und die Zulassungsprozesse zu vereinfachen, werden im Ceneri-Basistunnel wenn immer möglich die gleichen Komponenten für die Tunnelausrüstung verwendet wie im Gotthard-Basistunnel. So werden die Querschläge mit baugleichen Gelenkschiebetüren wie im Gotthard-Basistunnel ausgerüstet (s. Abb. 31).

Im Gegensatz zum Gotthard-Basistunnel sind im Ceneri-Basistunnel allerdings aufgrund seiner geringeren Länge keine Multifunktionsstellen mit Spurwechsel, Nothaltestellen und Technischen Räumen vorgesehen. ^[48]



Abb. 31: Ceneri-Basistunnel (CH) – Querschlagtüre

Die Eröffnung und Inbetriebnahme des Ceneri-Basistunnels ist für 2020 geplant.

5.3.2.4 Bahnmagistrale Nürnberg–Erfurt–Leipzig/Halle–Berlin, VDE 8.2 (D)

Das Verkehrsprojekt Deutsche Einheit Nr. 8 (VDE 8, s. Abb. 32) ist das größte Schienenverkehrsprojekt der Verkehrsprojekte Deutsche Einheit. Es umfasst den Neu- und Ausbau von Eisenbahnstrecken bzw. Streckenabschnitten mit einer Gesamtlänge von 515 km zwischen Nürnberg, Erfurt, Halle (Saale), Leipzig und Berlin.

Das Projekt gliedert sich in drei Abschnitte:

- VDE 8.1 Neu- und Ausbaustrecke Nürnberg–Ebensfeld–Erfurt
- VDE 8.2 Neubaustrecke Erfurt–Leipzig/Halle
- VDE 8.3 Ausbau Bahnstrecken Berlin–Halle und Trebnitz–Leipzig

Es umfasst insgesamt 1.164 km Oberleitungen, 214 Durchlässe, 177 Straßenbrücken, 335 Eisenbahnbrücken, 48 Bahnhöfe, 40 Talbrücken, 27 Tunnel und 190 km Bahnenergieleitungen. ^[49]

Im Mittelabschnitt VDE 8.2 wird der Finne-Höhenzug mit Tunnelbauwerken von insgesamt 15,4 Kilometer Länge durchfahren.

Die drei Tunnelbauwerke der Neubaustrecke VDE 8.2

- Finnetunnel, Länge rd. 7 km
- Bibratunnel, Länge rd. 6,5 km
- Osterbergtunnel, Länge rd. 2 km

befinden sich zwischen Buttstädt und Karsdorf in Sachsen-Anhalt. Alle drei Tunnel wurden als Doppelröhrentunnel gebaut und im Dezember 2015 in Betrieb genommen. ^[50]



Abb. 32: Verkehrsprojekt Deutsche Einheit (VDE) Nr. 8

Der Finnetunnel ist mit einer Länge von 6.970 Metern der längste Eisenbahntunnel der Neubaustrecke Erfurt–Leipzig/Halle. Er durchquert zwischen Eßleben-Teutleben und Bad Bibra bei einer maximalen Überdeckung von 65 Metern den Höhenzug Finne. Er besitzt 10 einfache Verbindungsstollen als Rettungsweg, 3 ausschließliche Technikstollen parallel zu den Verbindungsstollen und 3 kombinierte Verbindungs- und Technikstollen mit separaten Technikräumen im Maximalabstand von 500 m. ^[51]

Der 6.466 Meter lange Bibratunnel liegt zwischen der Saubachtalbrücke und der Unstruttalbrücke bei Karsdorf, die Überdeckung beträgt hierbei zwischen 15 und 50 Meter. Er besitzt 13 Querschläge (alle 500 m). [52]

Der Osterbergtunnel schließt sich an die Unstruttalbrücke an und hat eine Länge von 2.082 Metern. Die beiden Röhren sind alle 400 m durch insgesamt 4 Querschläge miteinander verbunden. [53]

Die Notausgänge (Verbindungsstollen / Querschläge) aller drei Tunnel sind mit Pendeltüren (zweiflüglige Türen $\geq 1,0$ m lichte Breite und $\geq 2,0$ m lichte Höhe) ohne Mittelpfosten ausgestattet, deren lichte Gesamtöffnungsbreite $\geq 2,00$ m betragen muss (s. Abb. 33). [54]

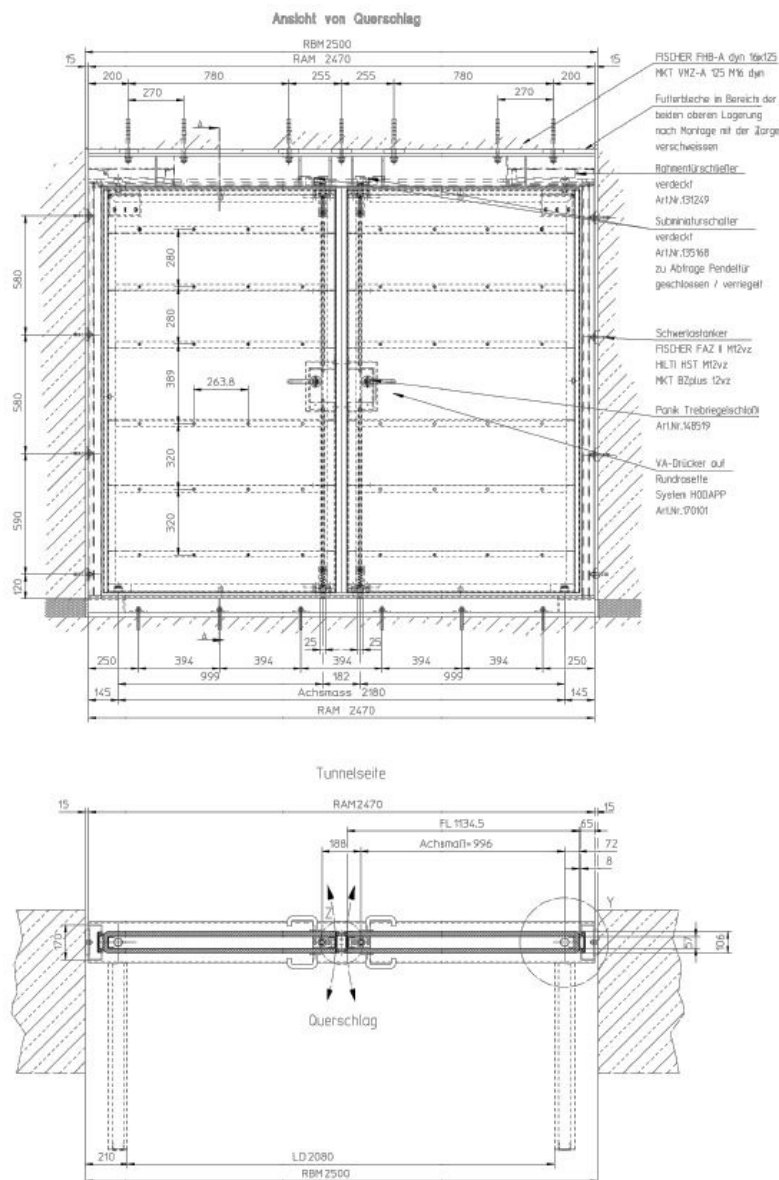


Abb. 33: Finnetunnel, Bibratunnel, Osterbergtunnel (D) – Pendeltür

5.3.2.5 Eurotunnel (F/GB)

Der Eurotunnel (auch: Kanaltunnel) ist ein 50 km langer Eisenbahntunnel zwischen Folkestone in Kent (GB) und Coquelles nahe Calais (F). Mit einem Streckenanteil von 37 km unter der Straße von Dover ist er der längste Unterwassertunnel der Erde.

Der Eurotunnel besteht aus zwei eingleisigen Fahrtunneln (Durchmesser 7,6 m) im Abstand von etwa 30 m und einem dazwischenliegenden kleineren zweispurigen Servicetunnel für schmale Straßenfahrzeuge (Durchmesser 4,8 m). Die beiden Fahrtunnel sind ca. alle 375 m über Querschläge mit dem Servicetunnel verbunden (s. Abb. 34).^[55]

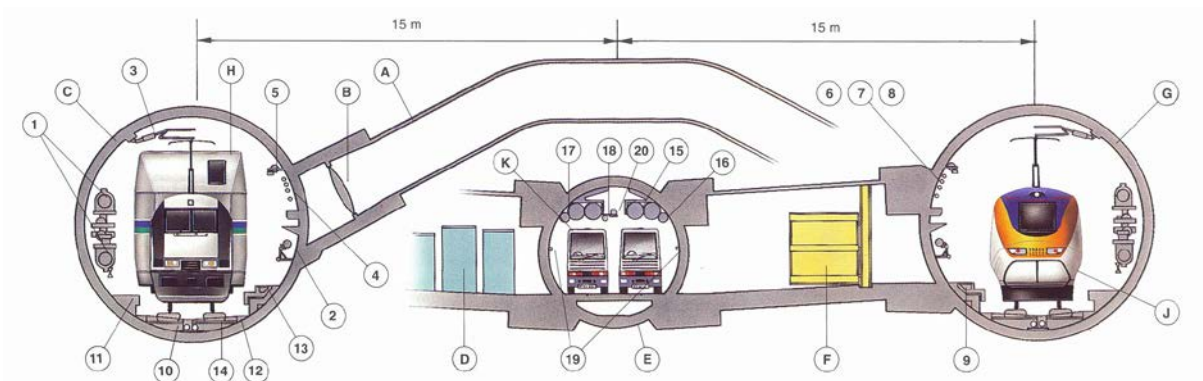


Abb. 34: Querschnitt Eurotunnel (F/GB) – Systemdarstellung

Gem. Sicherheitskonzept des Eurotunnels können Reisende innerhalb von 90 Minuten evakuiert werden. Es existieren an beiden Enden des Tunnels Rettungseinheiten, die mit ihren speziell für die Fahrt durch den Servicetunnel konzipierten Rettungsfahrzeugen den Unfallort schnell erreichen können. Die Querverbindungen, welche mittels motorbetriebener einflügeliger Drehflügeltüren (s. Abb. 35) von den Fahrtunneln getrennt sind, ermöglichen im Ereignisfall einen schnellen Zugang zur Serviceröhre, welcher dann als Rettungs- und Evakuierungstunnel dient.^[56]

Nach folgenschweren Bränden von LKW's auf Shuttles in den Jahren 1996 und 2008, bei denen jedoch aufgrund der hohen Sicherheitsstandards kein Personenschaden entstand, wurden an 4 Stellen im Tunnel Löschbereiche eingerichtet, in denen Zugbrände schnell und wirkungsvoll bekämpft werden können. In diesen jeweils 900 m langen Sicherheitszonen wird die Evakuierung der Zugpassagiere mittels Hochdruck-Wassernebelanlagen unmittelbar unterstützt. Die Verantwortung zur Rettung der Fahrgäste verbleibt jedoch unverändert beim Zugpersonal, bei den Rettungseinheiten und bei den Leitständen.^[57]



Abb. 35: Eurotunnel – Querschlagtüre

Der Tunnel wurde am 6. Mai 1994 offiziell eröffnet. Der erste Güterzug verkehrte am 1. Juni 1994 durch den Tunnel. Der Zugverkehr mit Passagieren wurde am 14. November 1994 aufgenommen. Der Eurotunnel bietet somit seitdem eine direkte Eisenbahnverbindung zwischen Frankreich und England.

6 RECHTLICHE RAHMENBEDINGUNGEN UND WEITERE ASPEKTE

Für das Türsystem bei Querschlägen und Fluchtstollen der Nothaltestelle als Abschluss zur Fahrrohre ist eine Reihe von Faktoren zu berücksichtigen, welche aus verschiedenen Rahmenbedingungen resultieren. Beispielsweise stellen nationale und internationale Regelwerke und Richtlinien, Vorgaben aus dem eisenbahnrechtlichen Genehmigungsverfahren, aber natürlich auch die herrschenden geometrischen Verhältnisse maßgebende Grundlagen dar.

Insbesondere durch ihre Funktion als Notausgangstüren auf dem Fluchtweg sind weitere Einflüsse wie Temperaturen, Verrauchung und die damit verbundenen Sichtverhältnisse im Ereignisfall (Brandfall) zu betrachten. Die dafür konzipierte Ereignisfalllüftung hat aufgrund der unterschiedlichen Druckverhältnisse in den beiden Fahrrohren ebenfalls unmittelbare Auswirkungen auf die Türen.

Selbstverständlich stellen die ständigen Belastungen aus dem laufenden Betrieb, das sind v.a. Druck- und Sogbelastung infolge hoher Fahrgeschwindigkeiten sowie die natürliche Verschmutzungsproblematik, zusätzliche wesentliche Anforderungen an die Querschlag- und Nothaltestellentüren dar.

Nicht zuletzt dürfen auch die Einflüsse, welche sich aus regelmäßiger Wartung und dem Unterhalt der Systeme zur Sicherung der gestellten Anforderungen und geforderten Qualität im Sinne eines sicheren und reibungslosen Bahnbetriebes nicht außer Acht gelassen werden.

6.1 Rechtliche Rahmenbedingungen

6.1.1 Einreichprojekt 2010 „SEMMERING-BASISTUNNEL NEU“

Die maßgebende Quelle für rechtlich verbindliche Rahmenbedingungen stellt zuallererst das Einreichprojekt 2010 „SEMMERING-BASISTUNNEL NEU“ (1) dar, weil mit dem dazu ergangenen Bescheid vom 27.05.2011 des Bundesministeriums für Verkehr, Innovation und Technologie (BMVIT) die Baugenehmigung für den „Semmering-Basistunnel neu“ erteilt wurde. Somit haben die im Zuge der zugehörigen eisenbahnrechtlichen Verhandlung seitens der beteiligten Sachverständigen für das jeweilige Fachgebiet getroffenen Vorschriftenen Rechtskraft erlangt.

Diese Festlegungen und Vorschriften beruhen natürlich auf den als übergeordnet anzusehenden Verordnungen, Normen, Richtlinien etc. und müssen mit diesen in Einklang stehen. Dabei sind insbes.

- die Technische Spezifikation für Interoperabilität SRT (2) (3) und
 - die Richtlinie A12 des Österreichischen Bundesfeuerwehrverbandes (7) (8)
- anzuführen. (vgl. Kap. 3.3.1 und 3.3.3)

6.1.1.1 Gutachten gem. §31a Eisenbahngesetz 1957 idgF

Im Gutachten ist unter Pkt. 2.15.1.1.5 *Maßnahmen Rettungskonzept* angeführt, dass auf der Seite der Querschläge ein Flucht- und Rettungsweg von mindestens 1,2 m Breite und 2,25 m Höhe vorgesehen ist.

Im Bereich der Nothaltestelle ist gem. Pkt. 2.15.1.1.5.1 *Nothaltestelle* Bereich in jeder Röhre ein ca. 400 m langer Notbahnsteig vorgesehen. Die Breite des Notbahnsteiges ist mit 2 m, die Höhe mit + 55 cm über SOK festgelegt, die lichte Höhe über dem Notbahnsteig beträgt 2,25 m. Der Abschluss zwischen dem Fahrtunnel und dem Rettungsraum (9 Fluchtstollen mit einem Abstand von ca. 50 m) erfolgt mittels einer Türebene mit 2 (Türflügel) x 1,00 m x 2,20 m lichte Weite, selbstschließend und fernbedienbar. Die Türöffnungskraft darf dabei 100 N nicht überschreiten.

Gem. Pkt. 2.15.1.1.5.2 *Querschläge* ist außerdem festgehalten, dass der Abschluss zwischen dem Fahrtunnel und den Querschlägen wie in der Nothaltestelle mit selbstschließenden, allerdings nicht fernbedienbaren Türen mit mindestens 2 (Türflügel) x 1,00 m x 2,20 m lichte Weite erfolgt. Ebenso wird die maximal aufzubringende Türöffnungskraft mit 100 N definiert und festgelegt, dass ein Brandwiderstand zwischen den beiden Fahrrohren über mindestens 180 Minuten gewährleistet sein muss. ^[58]

6.1.1.2 Tunnelsicherheitskonzept

Die Angaben im Tunnelsicherheitskonzept entsprechen jenen des §31a-Gutachtens:

Unter Pkt. 5.3.1 *Flucht- und Rettungsweg* des Tunnelsicherheitskonzeptes findet sich der Hinweis, dass auf der Seite der Querschläge ein Flucht- und Rettungsweg von mindestens 1,2 m Breite und 2,25 m Höhe zur Verfügung steht.

Im Bereich der Nothaltestelle ist gem. Pkt. 5.3.5 *Nothaltestelle* in jeder Röhre ein ca. 400 m langer Notbahnsteig mit einer Breite von 2 m, einer Höhe von + 55 cm über SOK und einer lichten Höhe über dem Notbahnsteig von 2,25 m vorgesehen. Der Abschluss der 9 Fluchttollen zum Fahrtunnel erfolgt mittels einer Türebene mit 2 (Türflügel) x 1,00 m x 2,20 m lichte Weite. Die Türen sind selbstschließend und fernbedienbar auszuführen. Die Türöffnungskraft darf dabei 100 N nicht überschreiten. (vgl. Kap.4.1.1)

Gem. Pkt. 5.3.2 *Querschläge* hat der Abschluss zwischen dem Fahrtunnel und den Querschlägen ebenso mit Türen mit mindestens 2 (Türflügel) x 1,0 x 2,2 m lichte Weite, selbstschließend zu erfolgen. Ergänzend wird beschrieben, dass die Türen in Form von Doppelschwingtüren (Pendeltüren) geplant sind, alternativ jedoch auch Schiebetüren zur Anwendung kommen können. Auch die für einen Flüchtenden aufzubringende Türöffnungskraft darf 100 N nicht überschreiten und der Brandwiderstand des Systems muss über eine Zeitspanne von 180 Minuten gewährleistet sein. (vgl. Kap. 4.1.2) ^[59]

6.1.2 Übersicht

In Tab. 1 sind die Vorgaben aus den rechtlichen Rahmenbedingungen gem. Kap. 6.1.1 sowie aus den Grundlagen der Tunnelsicherheit gem. Kap. 3.3.1 und 3.3.3 übersichtlich und zusammenfassend dargestellt:

	SBTN - EB 2010		TSI SRT		ÖBFV RL A-12	
	§31a-Gutachten	TUSI-Konzept	2008	2014	2000	2015
Lichte Türöffnung	2 x 1,00 / 2,20 m	2 x 1,00 / 2,20 m	1,40 x 2,20 m	1,40 x 2,00 m	Türflügel B= 1,00 m (in Fluchtrichtung)	Türflügel B = 1,00 m H = 2,00 m (nicht gegen Fluchtrichtung)
Fluchtweg	B = 1,20 m (H = 2,25 m)	B = 1,20 m (H = 2,25 m)	B = 0,75 m (H = 2,25 m)	B = 0,80 m (H = 2,25 m)	B = 1,20 m (H = 2,20 m)	B = 1,20 m (H = 2,25 m)
Öffnungskraft	100 N	100 N	k. A.	k. A.	k. A.	100 N
Brandbeständigkeit*	180 min. Gesamtsystem	180 min. Gesamtsystem	k. A.	k. A.	T90	90 min.

Tab. 1: *Mindestabmessungen, Max. Öffnungskräfte, Brandbeständigkeiten*

* Brandbeständigkeit bedeutet in diesem Zusammenhang brand- bzw. feuerbeständig über einen bestimmten Zeitraum gem. Einheitstemperaturkurve (ETK).

6.2 §31a-Gutachten 2019

6.2.1 Stellungnahme Bahn Consult TEN Bewertungsgesellschaft

Im Rahmen einer gutachterlichen Stellungnahme analog §31a EisbG durch die Bahn Consult TEN Bewertungsges.m.b.H. zu den *Modifikationen gegenüber der eisenbahnrechtlichen Baugenehmigung zur Unterstützung der §40 Person (12)* wurden mögliche Abweichungen der Notausgangstüren in ihrer Durchgangsbreite wie auch der Typ der Türe zum EB-Bescheid 2010 untersucht bzw. begutachtet. Dabei erfolgte die Bewertung in Hinblick auf die Auswirkungen auf das Fachgebiet „Brandschutz“, wobei dabei insbesondere auf die Aspekte der „Tunnelsicherheit“ sowie „Entfluchtung und Smoke Management“ Bedacht genommen wurde.

Die angestrebten Modifikationen betreffen die Türbreite und den Türtyp der Notausgangstüren im Bereich der Querschläge und der Nothaltestelle:

- Die ursprünglich geplanten und dem Einreichoperat zugrunde liegenden lichten Weiten der Notausgangstüren mit 2 x 100 x 220 cm können im Semmering-Basis-tunnel nicht umgesetzt und somit nicht eingehalten werden.
Dies ist damit zu begründen, dass bei den ursprünglichen Projektüberlegungen Pendeltüren (daher auch die Angabe von 2 x 100 cm bei der lichten Türbreite) als Notausgangstüren vorgesehen waren, die jedoch nach genauerer Analyse der Randbedingungen (z.B. auftretende Druckdifferenzen vor/hinter den Notausgangstüren) nunmehr als nicht machbar – z.B. hinsichtlich der geforderten maximalen Bedien-/Öffnungskräfte – eingestuft werden müssen.
- Darum ist nun den Einbau von Schiebetüren beabsichtigt.
Die nunmehr zum Einsatz kommenden Schiebetüren können konstruktionsbedingt bei den real zur Verfügung stehenden lichten Querschnitten (Querschläge, Fluchtstollen) in der ursprünglich geplanten Größe von 2 x 100 x 220 cm nicht eingebaut werden. Aus diesem Grund wird im Zuge der Projektumsetzung eine lichte Durchgangsweite von 160 cm Breite im Bereich der Querschläge und von 140 cm Breite im Bereich der Nothaltestelle (Fluchtstollen) angestrebt. ^[60]

Aufgrund der vorgelegten Planungsunterlagen wurden die Modifikationen als zur Ausführung geeignet und weiters den Erfordernissen der Sicherheit und Ordnung des Betriebes und des Verkehrs sowie des Standes der technischen Entwicklung entsprechend befunden.

Es bestehen gegen die Umsetzung des Projektes, unter der Leitung einer gem. §40 EisbG 1957 idgF verzeichneter Person, keine Bedenken. ^[61]

6.2.2 Entfluchtungssimulationen

Als sicherheitstechnischer Nachweis des Rettungskonzeptes wurden von der ÖBB Infrastruktur AG, Streckenmanagement und Anlagenentwicklung, Bautechnik – Streckenplanung im Vorfeld Entfluchtungssimulationen durchgeführt.

Ziel war die Ermittlung jener Kombination aus Breite des Randweges und lichter Durchgangsbreite der Querschlagtür, welche für die untersuchten Szenarien die günstigste, d.h. kürzeste Entfluchtungszeit aus einem im Tunnel zum Stillstand gekommenen Personenzug in den sicheren Bereich ermöglicht. ^[62]

Die Untersuchungen wurden auf den aus früheren Simulationen bekannten ungünstigsten Annahmefall – doppelter RailJet (14 Reisezugwagen, Gesamtlänge 412 m, maximal 1.196 Personen) mit Zugposition mittig vor dem Querschlag (s. Abb. 36) – beschränkt.

Die Ermittlung der Entfluchtungszeiten erfolgte mit dem dynamischen Simulationsprogramm *SimWalk Transport 4.3* der Firma Savannah Simulations ^[63], bei welchem jede Person (= Agent) mit personenspezifischen Eigenschaften (Geschlecht, Körpergröße, Alter, Schulterbreite, mittlere Gehgeschwindigkeit...) innerhalb von gewählten Bandbreiten definiert wird. ^[64]

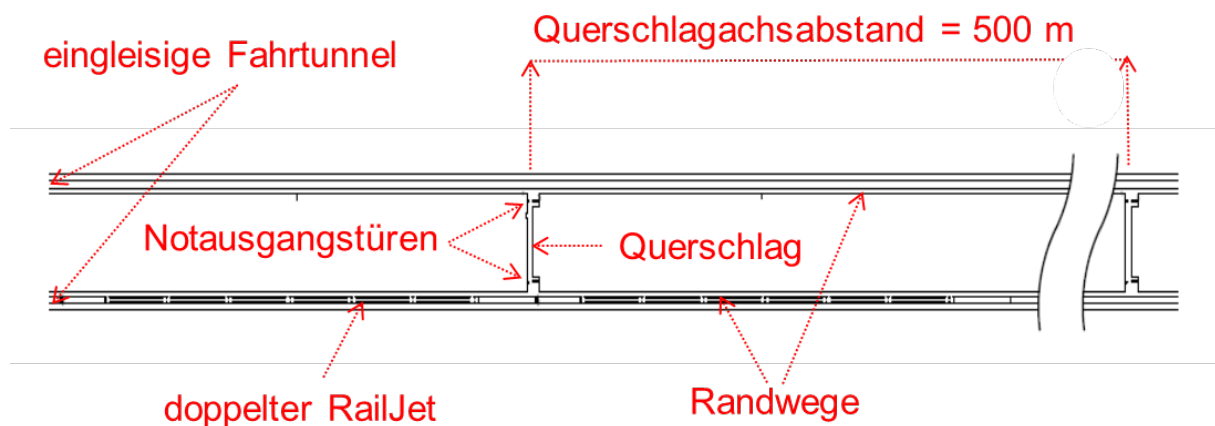


Abb. 36: Geometrisches Modell Querschlag

In der Untersuchung wird davon ausgegangen, dass die Entfluchtung von Reisenden und dem Zugpersonal im Sinne der *Technischen Spezifikation für die Interoperabilität bezüglich der Sicherheit in Eisenbahntunneln* (2) (3) durch Selbstrettung erfolgt. Die Entfluchtungszeit ist dabei als der Zeitraum ab dem Verlassen des Zuges und Betreten des Fluchtweges (Randweges) durch die erste Person bis zum Durchschreiten der Notausgangstür der letzten Person in einen sicheren Bereich definiert.

Die Entfluchtungszeit wird vorrangig durch folgende drei Parameter beeinflusst:

- lichte Durchgangsbreite der Waggontür
- Breite des Randweges
- lichte Durchgangsbreite der Notausgangstür ^[62]

Für insgesamt 12 Szenarien wurden Entfluchtungssimulationen durchgeführt: Neben dem durch das Projekt definierten Szenario „Einreichplanung“ wurden auch die beiden den Stand der Technik abbildenden Szenarien „TSI SRT“ und „A12“, welche auf den Mindestvorgaben der *Technische Spezifikationen für die Interoperabilität bezüglich der Sicherheit in Eisenbahntunneln* (2) (3) und der ÖBFV-Richtlinie *Sicherheitsmaßnahmen in Eisenbahntunnelanlagen* (7) (8) basieren, untersucht. ^[65]

Weitere 9 Szenarien („angestrebter Zustand“) ergeben sich aus der Kombination von jeweils 3 verschiedenen Durchgangslichten und Randwegbreiten. Die gewählten Randwegbreiten von 1,60 m, 1,80 m und 2,00 m resultieren aus den örtlichen Gegebenheiten des SBT, d.h. aus den unterschiedlichen Tunnelquerschnitten aufgrund zyklischen bzw. konventionellen Vortriebs sowie aus der Lage an Bogeninnenseite bzw. Bogenaußenseite. Als lichte Durchgangsbreiten wurden die realistisch möglichen lichten Türöffnungen von 1,60 m, 1,80 m sowie 2,00 m den Simulationen zugrunde gelegt.

Um softwarebedingte Ungenauigkeiten entsprechend zu berücksichtigen, wird eine quantitative Grenze von 98 % der Flüchtenden für die vollständige Evakuierung des RailJets definiert. Damit ergeben sich die nachfolgend angeführten Entfluchtungszeiten (s. Abb. 37). ^[66]

		98%	lichte Durchgangsbreite 1. Notausgangstür [m]				
			1,2	1,4	1,6	1,8	2,0
Breite Randweg [m]	0,8		○ 12:25				
	1,2	○ 12:13				● 08:08	
	1,6			09:33	08:32	07:52	
	1,8			09:34	08:41	08:04	
	2,0			09:37	08:39	07:52	

TSI - SRT ○ Technische Spezifikation für die Interoperabilität - Sicherheit im Eisenbahntunnel

A12 ● Richtlinie: "Sicherheitsmaßnahmen in Eisenbahntunnelanlagen"

Einreichplanung ●

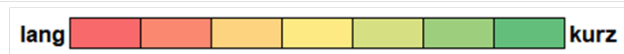


Abb. 37: Entfluchtungszeiten für 1. Querschlagtür

98%		lichte Durchgangsbreite 2. Notausgangstür [m]				
		1,2	1,4	1,6	1,8	2,0
Breite Randweg [m]	0,8		○ 13:15			
	1,2	○ 14:15				○ 09:26
	1,6			10:45	09:45	09:07
	1,8			10:45	09:58	09:29
	2,0			10:47	09:59	09:07

TSI - SRT ○ Technische Spezifikation für die Interoperabilität - Sicherheit im Eisenbahntunnel

A12 ○ Richtlinie: "Sicherheitsmaßnahmen in Eisenbahntunnelanlagen"

Einreichplanung ○

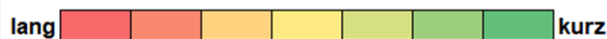


Abb. 38: Entfluchtungszeiten für 2. Querschlagtür

Aus den Ergebnissen der durchgeführten Simulationen lässt sich ablesen, dass mit Ausnahme der Szenarien „TSI SRT“ und „A12“ die jeweiligen Entfluchtungszeiten kaum nennenswerte Unterschiede aufweisen. Generell ist ersichtlich, dass nach nicht einmal 10 Minuten der Fahrtunnel (= Ereignisröhre) vollständig evakuiert ist und max. 1,5 Minuten später der sichere Bereich (= Gegenröhre) von allen Flüchtenden (98 %) erreicht wird (s. Abb. 38).

Auch für die Nothaltestelle wurden Entfluchtungssimulationen durchgeführt. Wiederum ist der Simulation ein Zug bestehend aus zwei Railjet - Garnituren zugrunde gelegt (14 Reisezugwagen, Gesamtlänge 412 m, maximal 1.196 Personen). Der Zug hat randwegseitig 26 Waggontüren mit einer nutzbaren lichten Durchgangsbreite von jeweils 0,85 m. Der Einsatz der beiden im Zug vorhandenen Rollstuhlhebelifte wurde für die Simulation jedoch nicht berücksichtigt. ^[67]

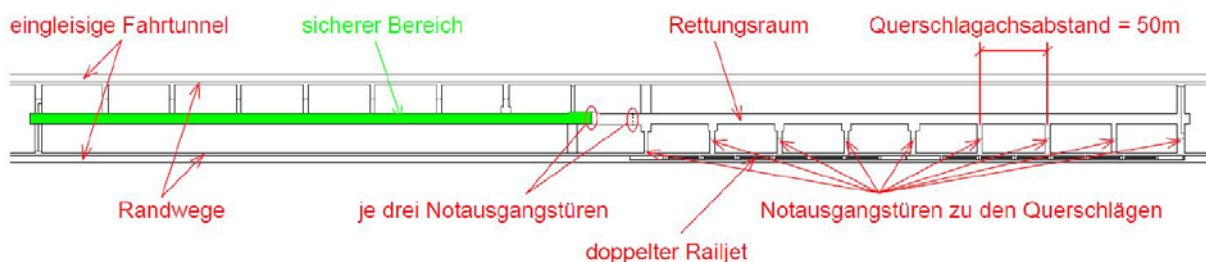


Abb. 39: Geometrisches Modell Nothaltestelle

Die Zugposition ist so gewählt, dass der Führerstand des Lokführers direkt vor dem ersten Querschlag zu stehen kommt (s. Abb. 39). Die Entfluchtung sämtlicher Personen erfolgt über die Fluchtwege bis in den sicheren Bereich (s. Abb. 40).

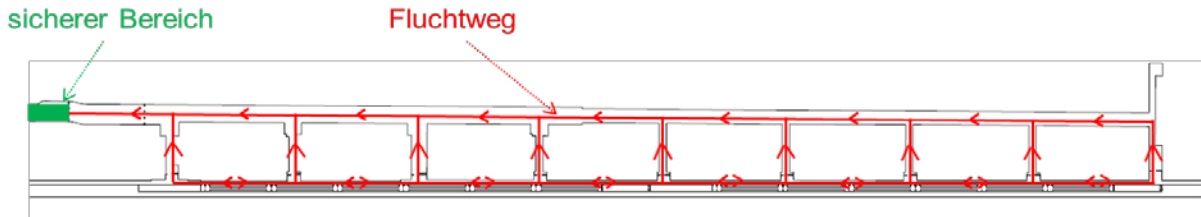


Abb. 40: Fluchtweg Nothaltestelle

Es wurden Simulationen für 4 Szenarien mit unterschiedlichen lichten Durchgangsbreiten der Notausgangstüren (1,4 m / 1,6 m / 1,8 m / 2,0 m) durchgeführt. Die Randwegbreite im Bereich der Nothaltestelle ist konstant und beträgt 2,0 m. Auch die lichten Durchgangsbreiten der sechs Schleusentüren in den im Projekt definierten sicheren Bereich wurden nicht variiert und in allen Szenarien konstant mit 2,0 m zugrunde gelegt. ^[68]

Aufgrund der kurzen Fluchtwege bis hinter die erste Notausgangstür im Querschlag tritt das Phänomen des softwarebedingten, unrealistischen „Nachlaufes“ der Agents nicht zu Tage. Aus diesem Grund werden hier die Entfluchtungszeiten für 100 % aller Agents für Vergleiche der Simulationszeiten herangezogen. ^[69]

Breite Randweg [m]		1. Notausgangstür				2 x 3 Notausgangstüren			
		lichte Durchgangsbreite Notausgangstür [m]				lichte Durchgangsbreite Notausgangstür [m]			
		1,4	1,6	1,8	2,0	1,4	1,6	1,8	2,0
2,0		02:07	02:09	02:01	02:15	24:49	24:14	23:41	23:23

lang kurz

Abb. 41: Entfluchtungszeiten für 1. Notausgangstür und 2 x 3 Notausgangstüren

Es ist klar ersichtlich, dass die Variation der lichten Durchgangsbreite der Notausgangstüren auf die Entfluchtungszeiten in der Nothaltestelle so gut wie keinen Einfluss hat. Insbes. die Simulationen für die Selbstrettung bis hinter die Fluchttüren am Notbahnsteig (= 1. Notausgangstür) ergeben Unterschiede von wenigen Sekunden, aber auch die Zeiten für das Erreichen des Wartebereichs hinter der Schleuse aus 2 Türebene mit jeweils 3 Notausgangstüren weichen nur vergleichsweise geringfügig voneinander ab (s. Abb. 41).

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass die Reduktion der Durchgangslichte der Querschlagtüren in Kombination mit verschiedenen Randwegbreiten zu keinen wesentlich längeren Entfluchtungszeiträumen führt. Im Bereich der Nothaltestelle ist eine Verringerung der Durchgangslichte hinsichtlich Entfluchtungszeit überhaupt nicht maßgebend.

6.3 Geometrische Bedingungen

Für die Umsetzbarkeit von Pendeltüren oder Schiebetüren spielen die vorherrschenden bzw. vorgegebenen Platzverhältnisse im Tunnel eine wichtige Rolle. Generell ist für den Einbau einer Pendeltür weniger Platz als für eine Schiebetür mit der gleichen lichten Öffnungsweite erforderlich, weil die beiden Türflügel der Pendeltür lediglich in Fluchrichtung aufschlagen und somit keinen zusätzlichen Raum benötigen. Dem gegenüber steht bei der Schiebetür das Erfordernis, dass das Türblatt beim Öffnen „irgendwohin“ verschoben werden muss. (vgl. Kap. 5.2.2 und Kap. 5.2.3)

6.3.1 Querschlag

Bei den Querschlagen des Semmering-Basistunnels ist neben Pendeltüren auch der Einbau von Schiebetüren mit einer lichten Öffnungsweite von 1,60 m x 2,20 m (B x H) ohne zusätzliche Maßnahmen möglich (s. Abb. 42).

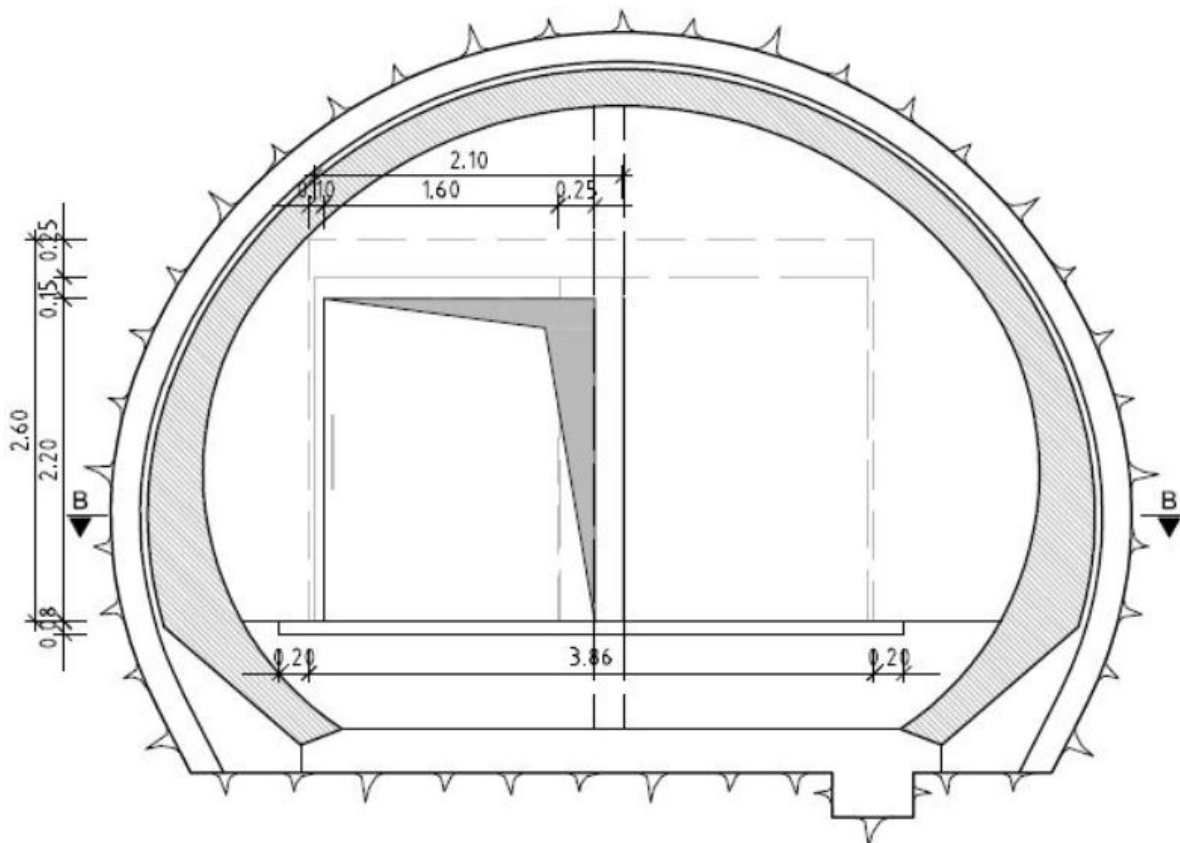


Abb. 42: Querschlag SBT – Schiebetür 1,60 m x 2,20 m (Ansicht)

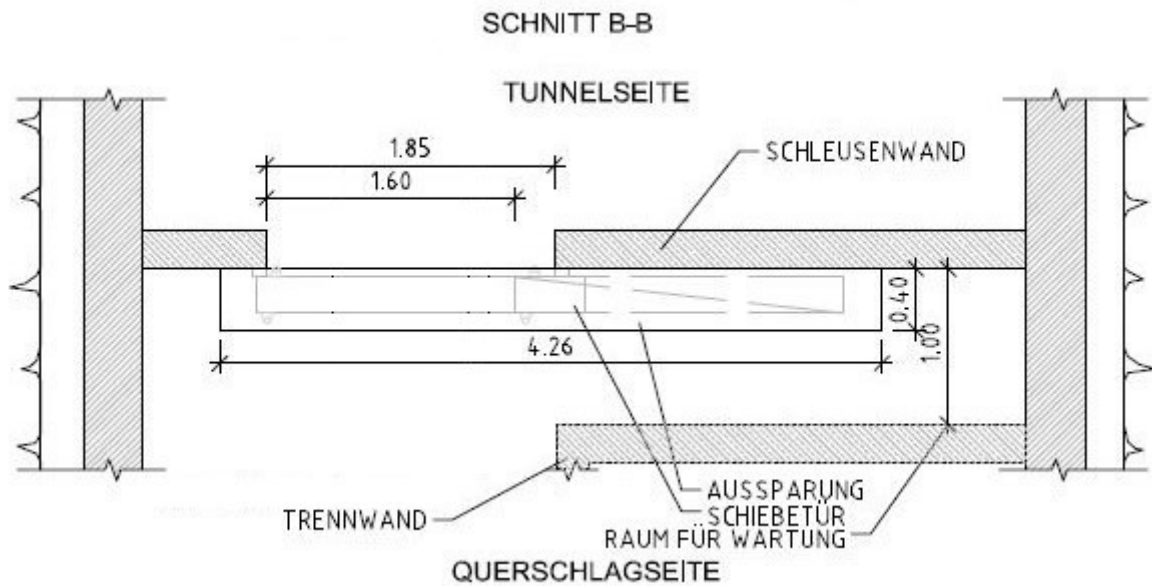


Abb. 43: Querschlag SBT – Schiebetür 1,60 m x 2,20 m (Grundriss)

Aufgrund der Querschlaglängen von i.d.R. mind. 40 m, welche sich durch die Lage der beiden Fahrrohre zueinander ergeben, ist es durch die Anordnung eines Schlitzes von 1 m Breite hinter der Querschlagwand (gleichzeitig Raum für Wartung) möglich, die Querschlagtüre als einflügelige Schiebetüre auszuführen (s. Abb. 43). Einzig für den Querschlag 01 ist wegen seiner geringen Länge von nur rd. 30 m eine Anpassung der Technischen Räume im Querschlag erforderlich.

6.3.2 Fluchtstollen in der Nothaltestelle

Nachdem die Fluchtstollen im Bereich der Nothaltestelle einen gegenüber den Querschlägen kleineren Querschnitt aufweisen, ist hier der Einbau von Schiebetüren ohne weiteres nicht möglich. Durch die Aufweitung des Fluchtstollens auf eine Länge von rd. 2 m kann jedoch auch hier eine Schiebetür mit einer lichten Öffnungsweite von 1,40 m x 2,20 m (B x H) installiert werden (s. Abb. 44).

In Fällen, wo eine derartige Aufweitung aus den verschiedensten Gründen (z.B. Baufortschritt) nicht möglich ist, aber dennoch das System Schiebetür zur Anwendung kommen soll, bleibt keine andere Möglichkeit als auf eine Sonderform, wie beispielsweise Gelenk- oder Teleskopschiebetür, auszuweichen. So werden Gelenkschiebetüren z.B. beim Gotthard-Basistunnel nicht nur im Nothaltestellenbereich, sondern auch bei den Querschlägen installiert. (vgl. Kap. 5.3.2.2)

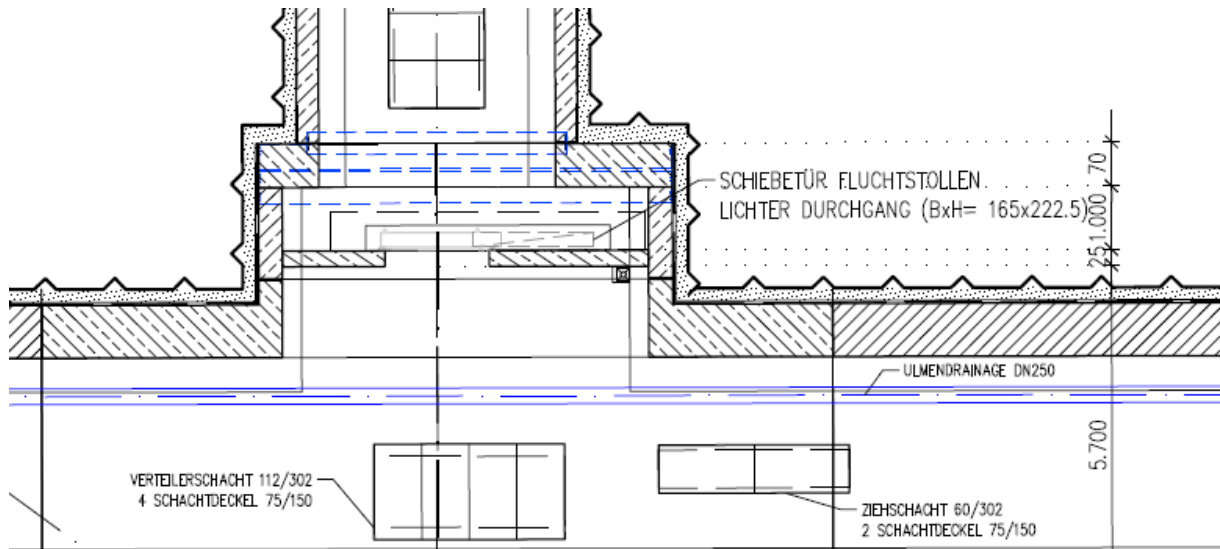


Abb. 44: Fluchtstollen SBT – Aufweitung für Schiebetüren

Jedenfalls wäre bei den beengten Platzverhältnissen in den Fluchtstollen allerdings der Einbau von Drehflügeltüren oder Pendeltüren einfach möglich (s. Abb. 45).

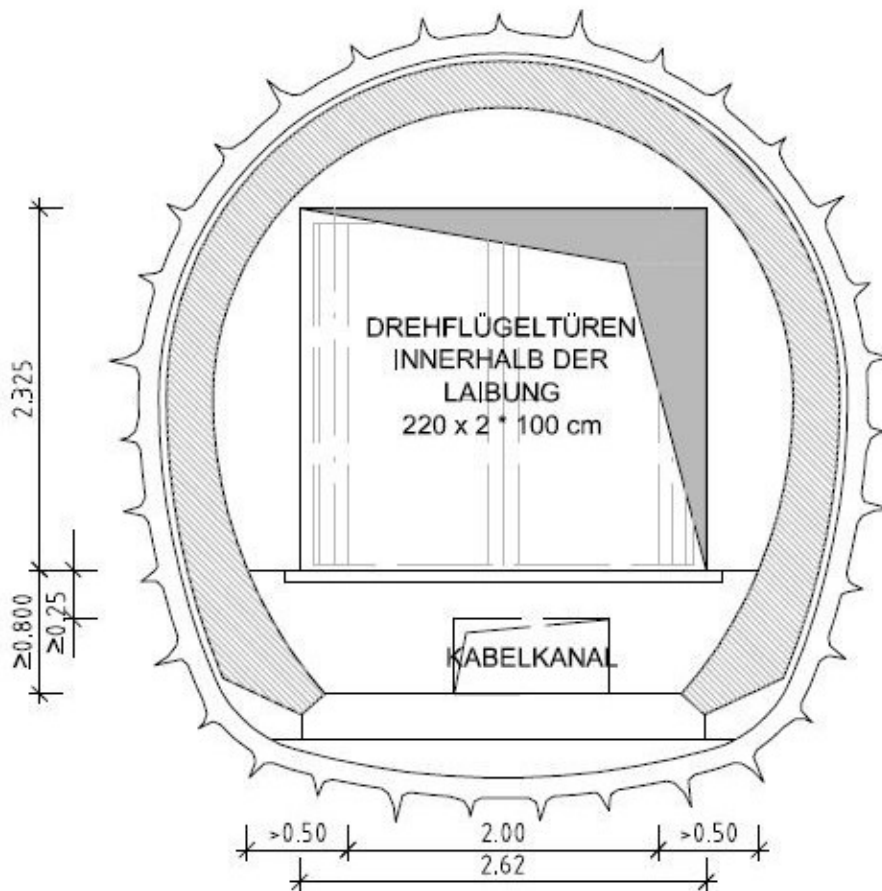


Abb. 45: Fluchtstollen SBT – Drehflügeltüren 2 x 1,00 x 2,20 m

6.4 Brand

Die Auswirkungen eines Feuers (mit einer Brandlast von 28 MW) im Fahrtunnel im Bereich eines Querschlags auf die Personensicherheit während der Evakuierung wurden von *Aram Amouzandeh et al.* untersucht.^[70] Die Ausbreitung der Heißgase stellt dafür einen wesentlichen Faktor dar. Mittels CFD-Simulation wurde daher die Temperaturverteilung im Fahrtunnel und im Querschlag jeweils bei einseitig geöffneter Fluchttüre und bei beidseitig geöffneten Fluchttüren ermittelt.

Den numerischen Strömungssimulationen wurde ein zweiröhriges Tunnelsystem mit jeweils 40,9 m² Querschnittsfläche zugrunde gelegt. Die Brandquelle wurde 4 m stromaufwärts angeordnet, da hier aufgrund von Erkenntnissen aus vorangegangenen Studien die maximalen Temperaturen in Querschlagnähe auftreten.

Für die auf einer Höhe von 2 m liegende Feuerquelle wird eine Brandkurve vorgeschrieben, deren Verlauf von der Brandlastkurve eines Personenwaggons der Deutschen Bahn abgeleitet wurde.^[71]

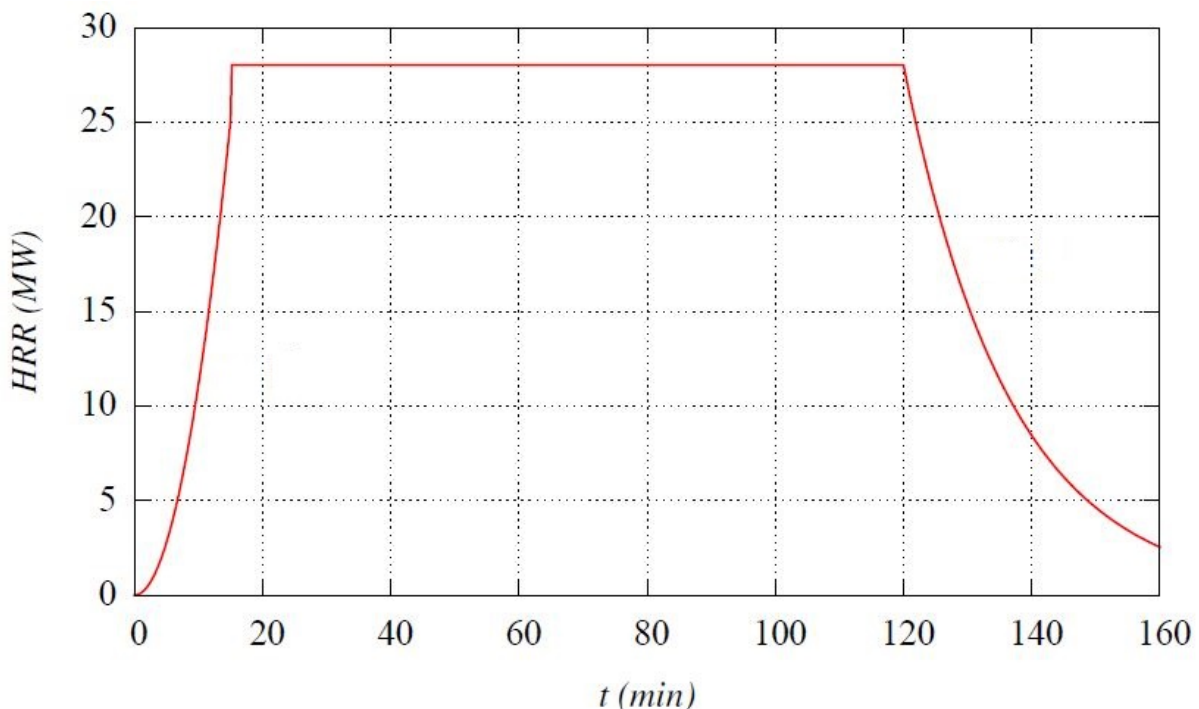


Abb. 46: Brandkurve – max. Brandlast 28 MW

Die maximale Leistung von 28 MW wird dabei nach einem quadratischen Anstieg bei 15 Minuten erreicht und fällt nach 120 Minuten Brand exponentiell ab (s. Abb. 46).

Der während des Brandes im Tunnel verbleibende Zug befindet sich von der Brandquelle 5 m entfernt stromabwärts (s. Abb. 47).

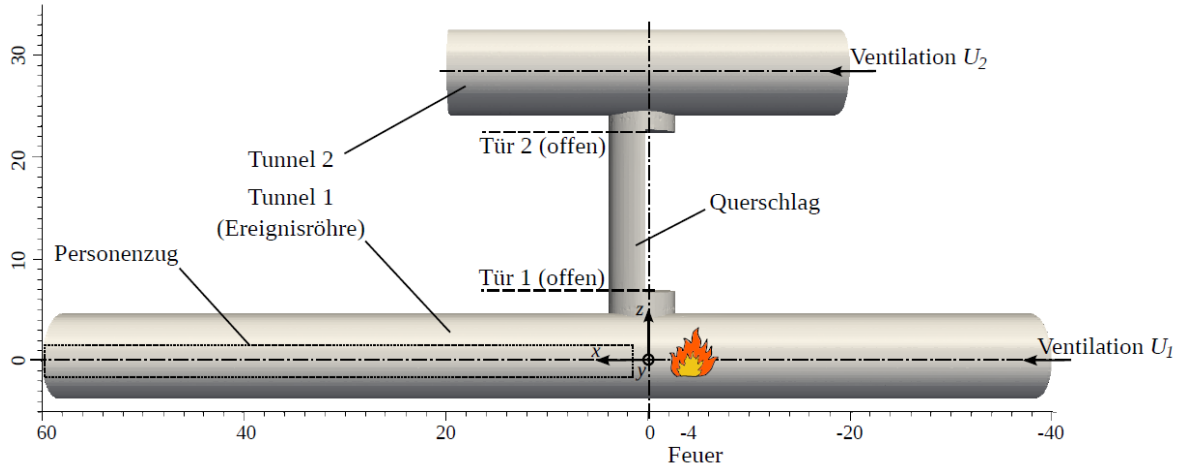


Abb. 47: Tunnelsystem für CFD-Simulationen (Szenario 2)

Als weitere Festlegung wurde ein kurzer Querschlag (Abstand der zwei Querschlagtüren 23 m) angenommen, weil dieser durch die geringere Oberfläche für die Wärmeaufnahme einer ungünstigeren Konfiguration entspricht.

Im Rahmen der CFD-Simulationen wurden zwei Szenarien betrachtet:

- Tür 1 geöffnet, Tür 2 geschlossen (Szenario 1)
- Tür 1 und Tür 2 geöffnet (Szenario 2)

Dabei wurden zu Beginn zwei unterschiedliche Längsströmungsgeschwindigkeiten (0,5 m/s und 3,0 m/s) in den Fahrtunneln angenommen und nach näherer Untersuchung 0,5 m/s als die jeweils ungünstigere gewählt.

Die Simulationsergebnisse für das Szenario 1 bei 0,5 m/s zeigen in zeitlicher Abhängigkeit nachfolgende Temperaturentwicklungen (bezogen auf die Türmittenlinie, s. Abb. 48). Daraus ist ersichtlich, dass die Temperaturen im Bereich der Querschlagtüre bereits nach 10 Minuten den Bereich 40°C bis 80°C erreichen, allerdings wirkt die Querschlagwand bis zur Türoberkante als Brandschürze, wodurch die Temperaturen im Querschlag wieder sinken und sich am Ende des Querschlags an Tür 2 bei ca. 50°C in Kopfhöhe einpendeln.

Im weiteren Verlauf steigen die Temperaturen im Querschlag kontinuierlich stark an und erreichen v.a. im Übergangsbereich Spitzenwerte von mehreren hundert °C.

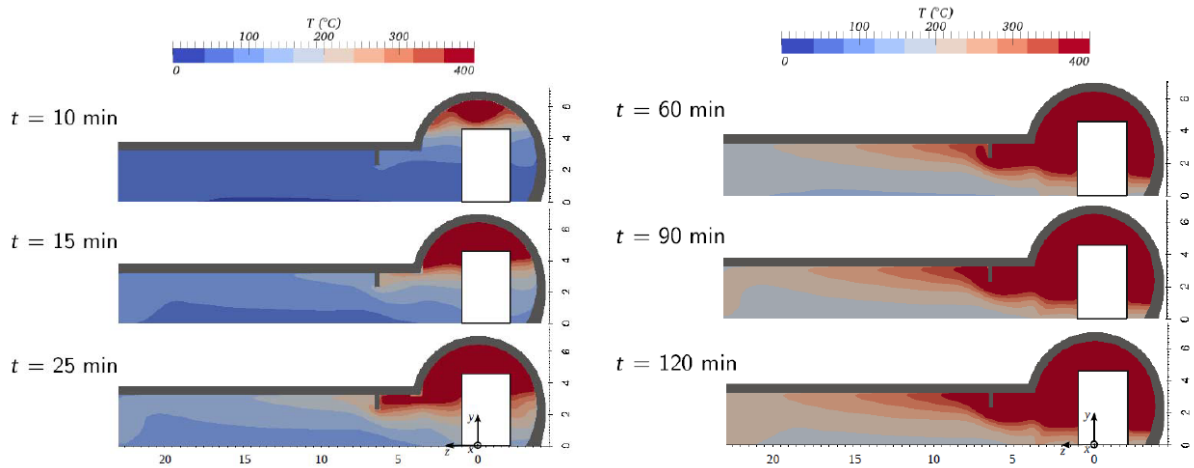


Abb. 48: Temperaturverteilung in zeitlicher Abhängigkeit (Szenario 1)

Für das Szenario 2 wird in beiden Tunnelröhren die gleiche Längsströmungsgeschwindigkeit von 0,5 m/s zugrunde gelegt und die vom Tunnel 2 in den Querschlag einströmende Luft hat eine konstante Temperatur von 18°C.

Die Ergebnisse für das Szenario 2 zeigen ein ähnliches Bild, allerdings ergibt sich aufgrund der geöffneten Tür 2 und der dadurch einströmenden kalten Luft in Bodennähe eine stärkere Zirkulation der Heißgase im Querschlag, was einen positiven Effekt darstellt. So erreichen die Temperaturen an den Querschlagtüren in diesem Fall zwar kaum geringere Werte als bei Szenario 1, allerdings werden im Tunnel 2 zu keinem Zeitpunkt 40°C erreicht. Auch in diesem Fall ist wie bei Szenario 1 die Wirkung der Bereiche über den Türoberkanten als Brandschürze durch einen merkbaren Temperaturabfall gut erkennbar (s. Abb. 49).^[70]

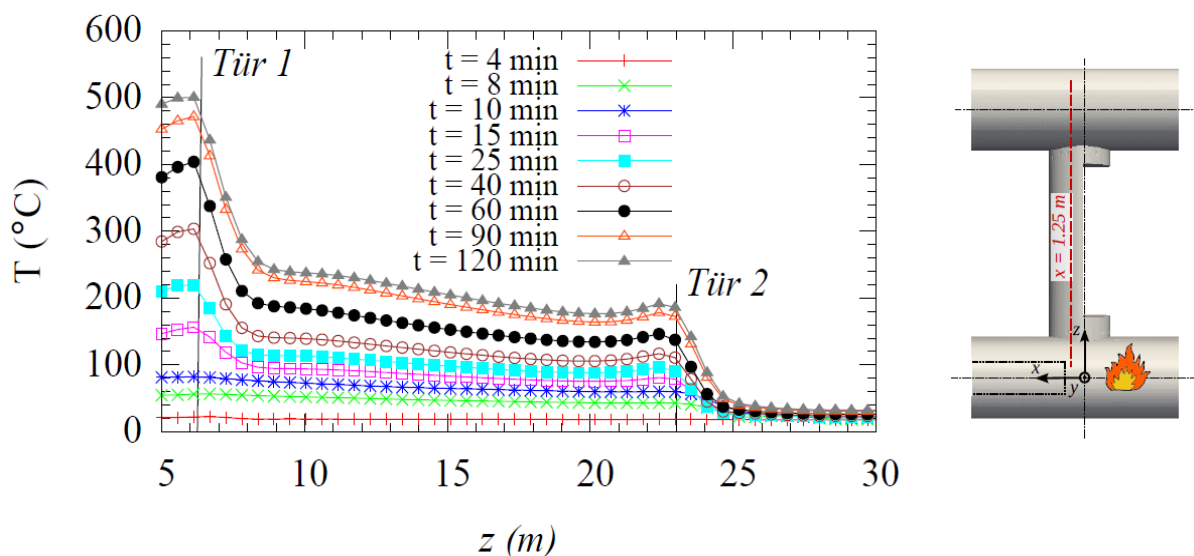


Abb. 49: Temperaturausbreitung in Kopfhöhe im Querschlag (Szenario 2)

6.5 Rauchgase

Rauch ist ein aus feinverteilten Staubpartikeln und feinen Flüssigkeitströpfchen bestehendes Aerosol, das vornehmlich bei Verbrennungsprozessen gebildet wird.

Die Zusammensetzung hängt vom verbrannten Material ab. Bei den festen Bestandteilen handelt es sich hauptsächlich um unverbranntes Material, Flugasche und Ruß. Die Flüssigkeitströpfchen bestehen aus Wasser, Ölen und Säuren. Ein hoher Rußanteil ist an seiner dunklen, schwärzlichen Färbung zu erkennen, während ein hoher Wassergehalt den Rauch weißlich färbt.

Die Rauchgase enthalten neben den feinen festen und flüssigen Bestandteilen auch Stickstoff, Wasserdampf, Kohlenstoffdioxid, Schwefeloxide und Stickstoffoxide, bei unvollständiger Verbrennung auch Kohlenmonoxid und Wasserstoff. ^[72]

Wesentliche Bestandteile von Rauchgas sind:

- Kohlendioxid (CO₂)
... wird bei der Verbrennung von organischen Stoffen (Kohlenstoff) unter Zufuhr von ausreichend Sauerstoff freigesetzt. In deutlich höherer Konzentration führt es zur Verminderung oder Aufhebung des reflektorischen Atemanreizes und schließlich zum Atemstillstand.
- Wasserdampf (H₂O)
... entsteht bei der Verbrennung aus der Feuchtigkeit und dem oxidierten Wasserstoff im Brennstoff.
- Kohlenmonoxid (CO)
... entsteht durch die Verbrennung von organischen Stoffen (wie z.B. Holz, Papier, Textilien oder Treibstoffen) unter Sauerstoffmangel und ist leichter als Luft. Von CO geht eine besondere Gefahr aus, da es als farb- und geruchloses Gas nur mit Messgeräten festgestellt werden kann. Wird Kohlenmonoxid eingeatmet, bindet es sich an Stelle der Sauerstoffatome an die roten Blutkörperchen und verhindert so den Sauerstofftransport im Körper.
- Zyanid (HCN, Blausäure)
... wird bei der Verbrennung von Substanzen mit Stickstoff und Kohlenstoff (wie z.B. Teppich, Kleidung, Polster- oder Isolierungsmaterial, aber auch bei Plastik) freigesetzt. Ähnlich wie beim Kohlenmonoxid führt das Einatmen von Zyanid zu einer inneren Erstickung. Im Gegensatz zu CO bindet sich das Zyanid jedoch nicht an das Hämoglobin, sondern verhindert den Gasaustausch zwischen Blut und Zellen.

- Chlorwasserstoff (HCL, in Wasser gelöst als Salzsäure)
... entsteht v.a. bei der Verbrennung von Kunststoffen und führt bei geringen Mengen zu einer Reizung, bei höherer Konzentration zu Verätzungen der Schleimhaut.
- Rußpartikel
... können ebenfalls bei der Verbrennung organischer Stoffe entstehen. Es handelt sich dabei um winzige unverbrannte Kohlenstoff-Teilchen. Diese können auftreten, wenn die Verbrennung rasch abläuft und nicht ausreichend Sauerstoff zum Brandherd zuströmen kann. ^[73]

Für den Großteil der Bestandteile von Brandrauch gilt, dass sie der Gesundheit des Menschen massiv schaden können. Diese schädliche Wirkung beruht allerdings auf verschiedenen Mechanismen: Während zum Beispiel Kohlendioxid „nur“ den Sauerstoff verdrängt und daher zum Erstickten führt, wirkt Kohlendioxid als Gift. Andere Gase wie zum Beispiel Chlorwasserstoff oder Schwefeldioxid zeigen (auf den Schleimhäuten, in den Augen usw.) ätzende Eigenschaften. Schließlich können Rußpartikel und Dioxine durch ihre Krebs erregende Wirkung Langzeitschäden hervorrufen. ^[74]

Die wichtigsten Faktoren für den Prozess der Rauchentstehung im Tunnel sind die Zusammensetzung des Brandguts sowie die Energiefreisetzungsrate und die Sauerstoffversorgung des Brandherdes (Längslüftung, Querlüftung, Punkt-Absaugung). Weiters spielen die Tunnelgeometrie (Tunnelquerschnitt und -steigung) und meteorologische Randbedingungen (Druckdifferenzen, Wind auf das Portal) eine Rolle (s. Abb. 50).

Einflussfaktoren für L_b :

- **Brandlast (HRR)**
- **Längsströmungsgeschwindigkeit**
- **Tunnelhöhe**
- **Meteorologische Randbedingungen**

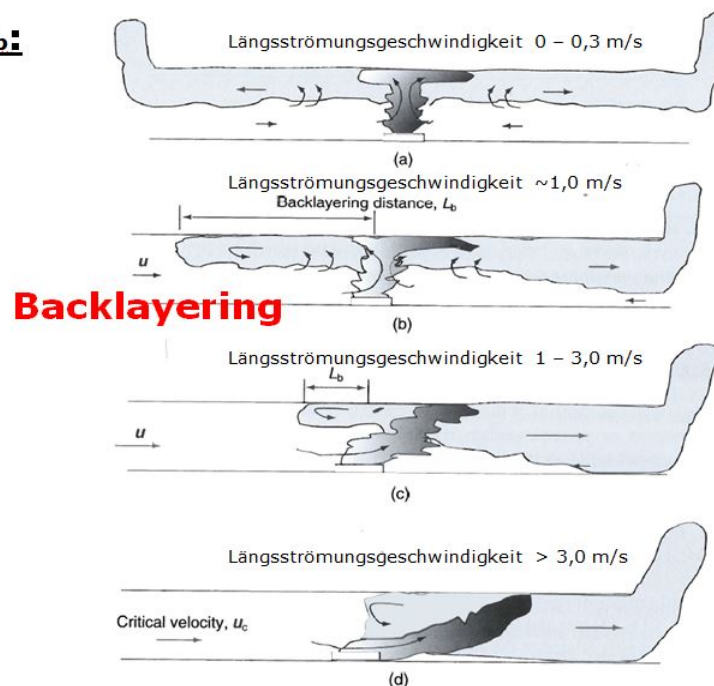


Abb. 50: Einflussfaktoren Rauchausbreitung

Brandrauch breitet sich generell schnell und ungehindert aus. In Tunnelanlagen auftretende Längsströmungen (z.B. infolge hoher Portaldruckdifferenzen, durch den Kolbeneffekt von fahrenden Zügen oder durch die Lüftungsanlage erzeugt) beeinflussen allerdings die Rauchausbreitung. Die kritische Geschwindigkeit stellt dabei jene Geschwindigkeit der Luft stromaufwärts des Brandereignisses dar, die zur Verhinderung eines Backlayering, d.h. dass der Rauch sich entgegen der Strömungsrichtung der Lüftung ausbreiten kann, führt. ^[75]

6.6 Wirkung der Lüftung im Ereignisfall

Das Lüftungskonzept des Semmering-Basistunnels stellt einen wesentlichen Teil des Tunnelsicherheitskonzeptes dar. Als Grundlage für dessen Erstellung wurden im Vorfeld 1D-Simulationsrechnungen durchgeführt, um Strömungen und Temperaturen berechnen sowie Rauchkonzentrationen abschätzen zu können.

Den 1D-Simulationen wurde gem. der eisenbahnrechtlichen Einreichplanung die Ausführung von Pendeltüren mit Abmessungen von 2 x 1,0 m x 2,2 m lichter Weite zugrunde gelegt. Damit ergibt sich für Fluchtstollen und Querschläge eine freie Querschnittsfläche von 4,4 m².

Die in den nachfolgend beschriebenen Szenarien angesetzten zeitlichen Abläufe stellen Annahmen dar, welche zum Zeitpunkt der 1D-Simulationen, d.h. im Zuge der eisenbahnrechtlichen Einreichplanung, als plausibel anzusehen waren. Daher können auch nur qualitative Rückschlüsse auf die Verhältnisse im Tunnel gezogen werden.

6.6.1 Zughalt in der Nothaltestelle

Bei einem Zughalt in der Nothaltestelle (Bremsverzögerung 0,5 m/s²) sind die Fluchtstollen bereits geöffnet, wenn der Ereigniszug in der Nothaltestelle hält. Es wird angenommen, dass die Selbstrettung (in den Fluchtbereich hinter die 1. Notausgangstür) 10 Minuten nach Zughalt abgeschlossen ist und die Fluchttüren zu diesem Zeitpunkt schließen (s. Abb. 51). ^[76]

Somit lässt sich das Szenario für die Verhältnisse im SBT wie folgt beschreiben:

- 5 Minuten nach Simulationsbeginn fährt ein Reisezug mit einer Geschwindigkeit von 80 km/h (wurde aufgrund von Festlegungen in der TSI – SRT, 2008 gewählt, wonach im Brandfall bei einer Lauffähigkeit für 15 Minuten unter Einsatz von Notlaufeigenschaften 20 km zurückgelegt werden können und somit die Nothaltestelle sicher erreicht wird) in den Tunnel ein und beginnt 2 Minuten später zu brennen.

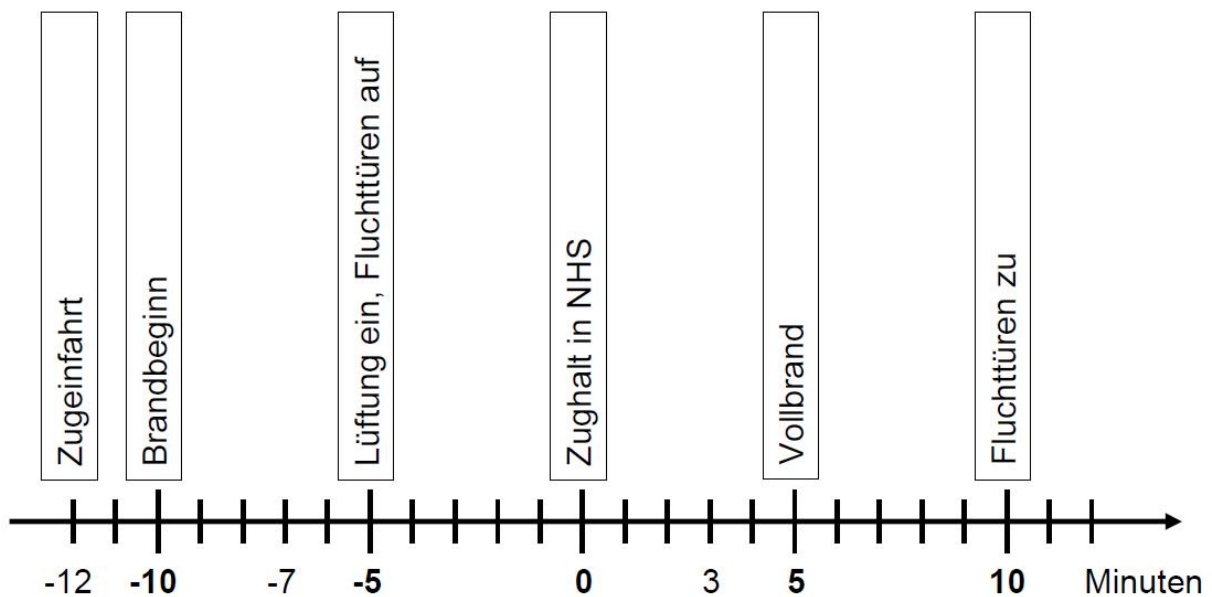


Abb. 51: Zeitlicher Ablauf bei einem Ereignis in der Nothaltestelle

- 5 Minuten nach Brandbeginn wird die Lüftung aktiviert (Zu- und Abluft) und die 9 Fluchstollen werden geöffnet.
- Weitere 5 Minuten später (ca. 17 Minuten nach Simulationsbeginn) fährt der brennende Zug in die Nothaltestelle ein. Der Ereigniszug hat eine Länge von ca. 400 m, der Zugkopf hält zwischen den beiden letzten Fluchstollen (FS8 und FS9), wo sich auch der letzte Absaugstollen (AS5) befindet. Der Brand befindet sich in der Zugmitte etwa zwischen FS4 und FS5.
- Ca. 5 Minuten nach Zughalt ist die Vollbrandphase erreicht. Bei Simulationsminute 27 werden die 9 Fluchstollen wieder geschlossen.
- Aufgrund von thermischem Auftrieb wird eine Druckdifferenz von 100 Pa vom Portal Ost nach Portal West angenommen. (s. Abb. 52)

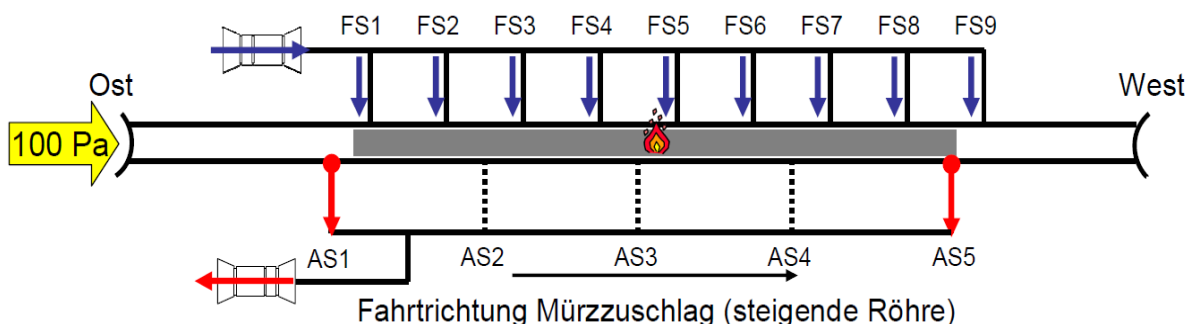


Abb. 52: Szenario ohne Störgrößen (mit 100 Pa Druckdifferenz)

Beim Öffnen der Fluchttüren 12 Minuten nach Simulationsbeginn stellt sich in allen Fluchttüren eine Strömung in Richtung Ereignisröhre ein. Während der Einfahrt des Zuges in die Nothaltestelle (Minute 17) schwanken die Durchströmungsgeschwindigkeiten in den offenen Fluchtstollen zwischen 0,9 m/s (FS1) und 4,1 m/s (FS8 und FS9). Nach Halt des Zuges stellen sich Durchströmungsgeschwindigkeiten zwischen 2,2 und 2,6 m/s in den Türquerschnitten ein (und bleiben während des gesamten Fluchtvorgangs in etwa konstant), wobei die geringen Geschwindigkeiten in den mittleren Fluchtstollen (FS5 und FS6) auftreten (s. Abb. 53).^[77]

Bei einem Ereignis mit Zughalt in der Nothaltestelle ist der Zugverkehr in der Gegenröhre nicht relevant, da keine aerodynamische Verbindung zur Gegenröhre vorhanden ist, die die Strömungsverhältnisse in den Fluchtstollen oder die Entrauchung beeinträchtigen könnte.

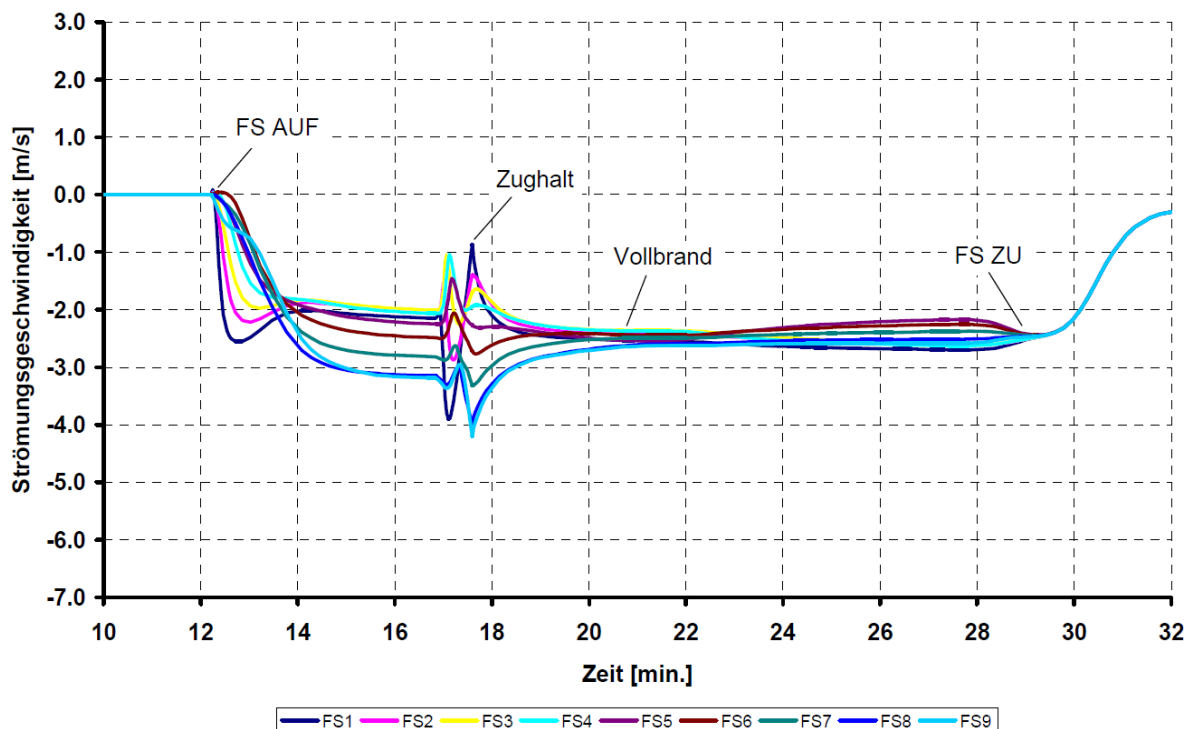


Abb. 53: Strömungsverlauf durch die Fluchttüren (von Rettungsraum nach Ereignisröhre)

Zugverkehr in der Ereignisröhre (z.B. ein- und ausfahrende Rettungszüge) stellt hingegen bei einem Ereignis in der Nothaltestelle einen relevanten Faktor dar, da bei zu hohen Fahrgeschwindigkeiten sowohl die Strömungsverhältnisse auf dem Notbahnsteig (Erhöhung der Längsströmung und damit Beeinträchtigung einer möglichen Rauchsichtung) als auch die Durchströmungsgeschwindigkeiten in den Fluchtstollen (ungleiche Verteilung der Frischluftmenge durch die Fluchtstollen) ungünstig beeinflusst werden können. Daher sind entsprechende Richtgeschwindigkeiten für die verschiedenen Zugtypen festzulegen.^[78]

6.6.2 Zughalt außerhalb der Nothaltestelle

Bei einem Zughalt außerhalb der Nothaltestelle handelt es sich um einen unplanmäßigen Halt. Es wird daher davon ausgegangen, dass der Zug abrupt zum Stehen kommt (Bremsverzögerung $1,1 \text{ m/s}^2$).

Zum Zeitpunkt der Lüftungsaktivierung wird in den Simulationen die Frischluft direkt über den Entlastungsstollen in die Gegenröhre geführt bei gleichzeitiger Rauchabsaugung aus der Ereignisröhre. (vgl. Kap. 4.3.3.2) Daher ergeben sich auch in diesem Fall die gleichen Strömungsverhältnisse in den Querschlägen wie bei einem Zughalt in der Nothaltestelle.

Der zeitliche Ablauf für das Öffnen und Schließen der Querschläge wird für die Simulation wie folgt festgelegt: der mittlere Querschlag (QS 02) wird bereits 5 Minuten nach Zughalt durch den ersten Flüchtenden geöffnet und bleibt für 10 Minuten geöffnet. Die beiden benachbarten Querschläge (QS 01 und QS 03) werden 10 Minuten nach Zughalt geöffnet und bleiben für 20 Minuten geöffnet. Durch diese Annahme ergibt sich eine Zeitspanne von 5 Minuten, in der 3 Querschläge gleichzeitig geöffnet sind. (s. Abb. 54). ^[79]

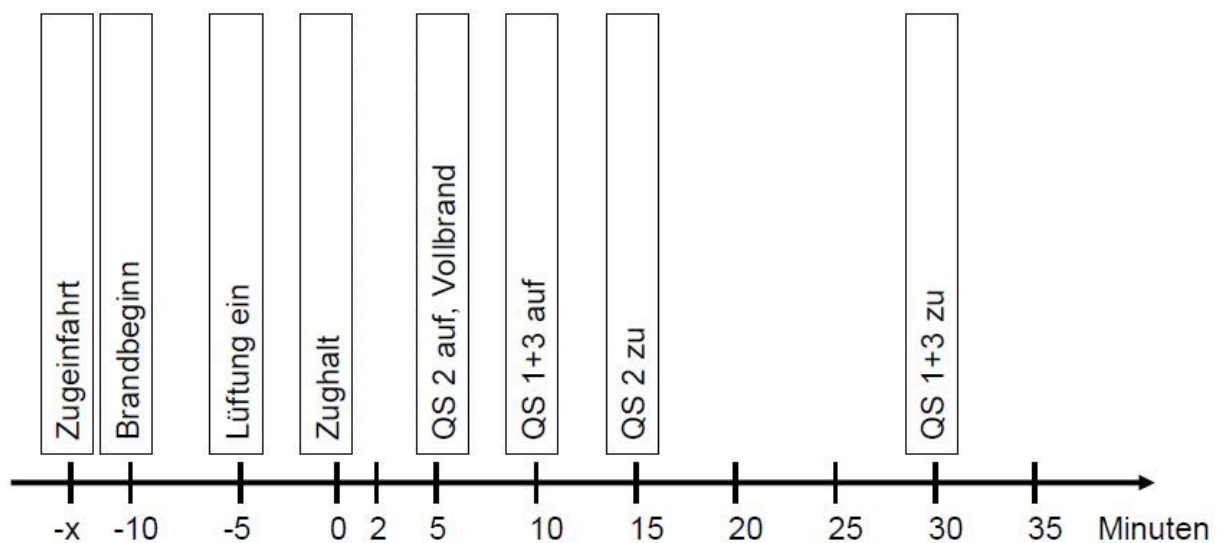


Abb. 54: Zeitlicher Ablauf bei einem Ereignis außerhalb der Nothaltestelle

Gem. der o.a. Festlegungen lässt sich das Szenario für die Verhältnisse im SBT wie folgt beschreiben:

- Der Ereigniszug fährt (5 Minuten nach Simulationsbeginn) mit einer Geschwindigkeit von 80 km/h (vgl. Kap. 6.6.1) mit Fahrtrichtung Mürzzuschlag in den Tunnel ein (steigende Röhre).

- Bei Minute 11 der Simulationszeit beginnt der Zug zu brennen, 5 Minuten später wird die Lüftung aktiviert (Absaugung aus der Ereignisröhre und Luftzufuhr in die Gegenröhre).
- Weitere 5 Minuten später kommt der brennende Zug etwa 6 km vor dem Ausfahrtsportal zum Stehen. Der Brand befindet sich, zwischen Querschlag 42 (Zugmitte) und Querschlag 43 (Zugkopf).
- Bei Minute 26 (und somit 5 min nach Zughalt) steht der Zug im Vollbrand. Zu diesem Zeitpunkt wird der mittlere Querschlag (QS 42) geöffnet und bleibt für 10 Minuten offen.
- Die äußeren Querschläge (QS 41 und QS 43) sind in der Zeit von Minute 31 bis Minute 51 geöffnet.
- Es wird eine Druckdifferenz von 100 Pa vom Portal Ost nach Portal West angenommen. (s. Abb. 55) ^[80]

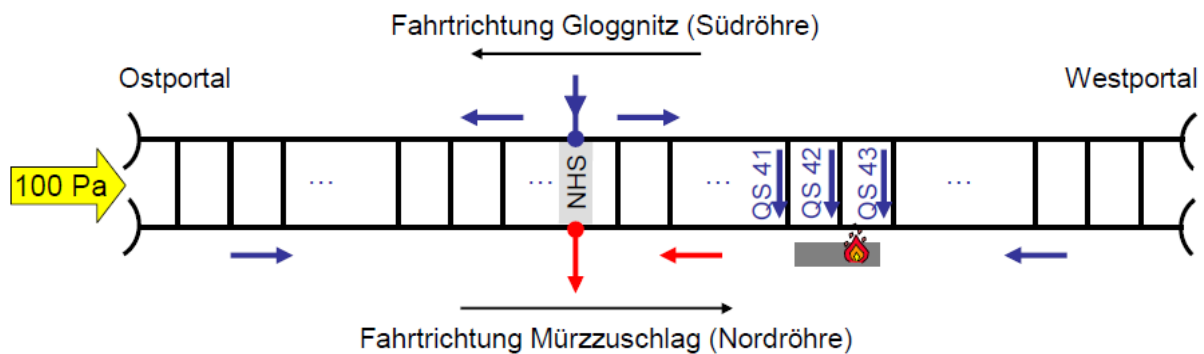


Abb. 55: Szenario ohne Störgrößen (mit 100 Pa Druckdifferenz)

Die Strömungsgeschwindigkeiten betragen in den offenen Querschlagtüren etwa 1 Minute nach Öffnen der Türen mindestens 2 m/s. Bei nur einem geöffneten Querschlag (QS 42) beträgt die Strömungsgeschwindigkeit im lichten Querschnitt der Türe etwa 6,6 m/s.

Werden zusätzlich die äußeren Querschläge (QS 41 und QS 43) geöffnet, betragen die Strömungsgeschwindigkeiten zwischen 3,8 m/s (außen liegender Querschlag 43) und 5,9 m/s (innen liegender Querschlag 41). Sind nur die beiden äußeren Querschläge gleichzeitig geöffnet, betragen die Strömungsgeschwindigkeiten im stationären Zustand zwischen 4,7 m/s und 6,7 m/s. Die maximale Strömungsgeschwindigkeit liegt kurzzeitig (beim Schließen von QS 42) bei 8,0 m/s (s. Abb. 56). ^[81]

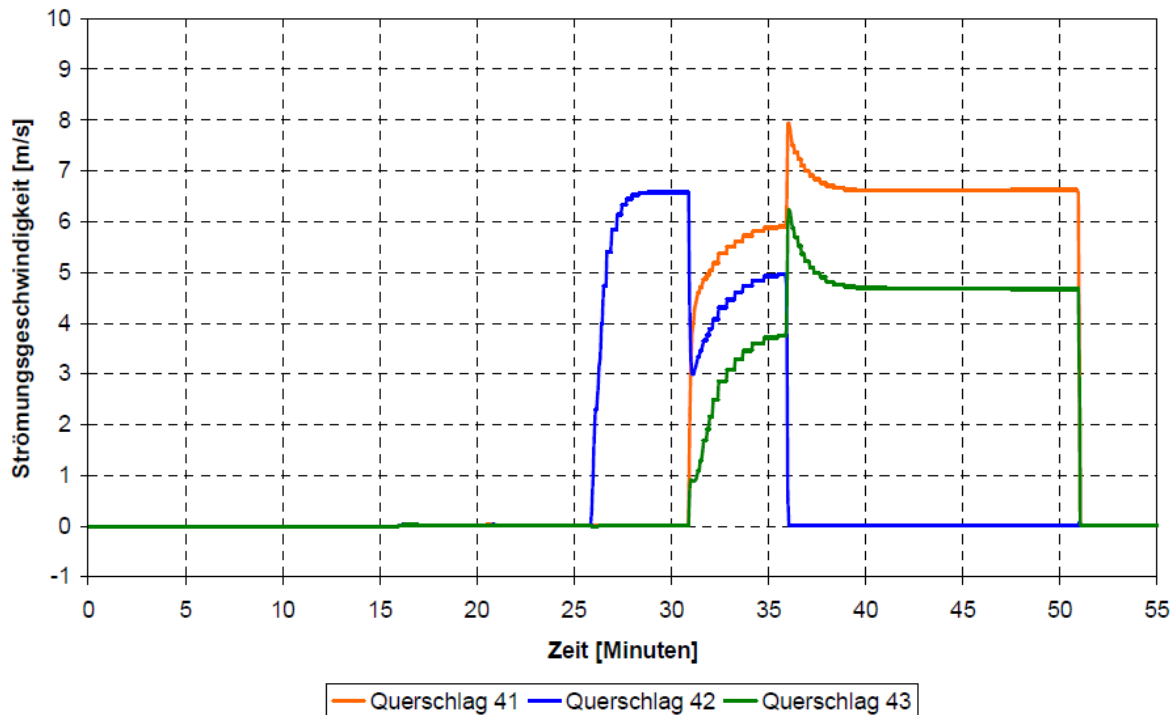


Abb. 56: Strömungsverlauf durch die Querschlagtüren (von Gegenröhre nach Ereignisröhre)

Werden fahrende Züge in der Gegenröhre berücksichtigt, lässt sich das Szenario für die Verhältnisse im SBT wie folgt beschreiben:

- Der Ereigniszug fährt (5 Minuten nach Simulationsbeginn) mit einer Geschwindigkeit von 80 km/h mit Fahrtrichtung Mürzzuschlag in den Tunnel ein (steigende Röhre).
- Bei Minute 14 beginnt der Zug zu brennen. 5 Minuten später wird die Lüftung aktiviert (Absaugung aus der Ereignisröhre und Luftzufuhr in die Gegenröhre).
- 4 Minuten bevor der Ereigniszug ca. 1.5 km vor dem Ausfahrtsportal zum Stehen kommt, fährt ein langer Güterzug (600 m) in der Gegenröhre am Ereignisort vorbei. Ein weiterer, langer Güterzug passiert 3 Minuten nach Zughalt in der Gegenröhre den Ereignisort. Der Zugbrand befindet sich zwischen Querschlag 50 (Zugmitte) und Querschlag 51 (Zugkopf).
- Bei Minute 29 (und somit 2 Minuten nach Vorbeifahrt des zweiten Güterzugs) steht der Zug im Vollbrand (28 MW). Zu diesem Zeitpunkt wird der mittlere Querschlag (QS 50) geöffnet und bleibt für 10 Minuten offen.
- Die äußeren Querschläge (QS 49 und QS 51) sind in der Zeit von Minute 34 bis Minute 54 geöffnet.
- Es wird wiederum eine Druckdifferenz von 100 Pa vom Portal Ost nach Portal West angenommen. (s. Abb. 57)

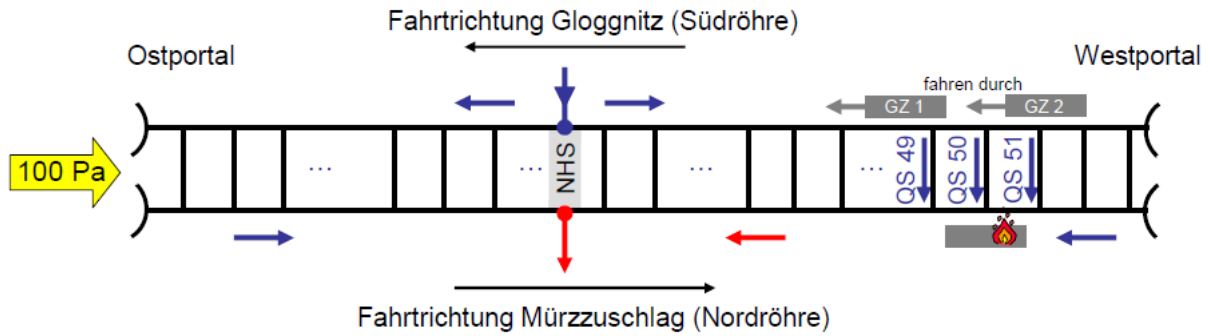


Abb. 57: Szenario mit fahrenden Zügen in der Gegenröhre (mit 100 Pa Druckdifferenz)

Die Strömungsgeschwindigkeiten in den offenen Querschlagtüren, die sich bei Zuggeschwindigkeiten von 80 km/h für die beiden ausfahrenden Güterzüge in der Gegenröhre ergeben, sind nicht zulässig, da sie in die falsche Richtung (von der Ereignisröhre in die Gegenröhre) zeigen (s. Abb. 58). In diesem Fall würde ein starkes Eindringen von Rauch in die Gegenröhre stattfinden.

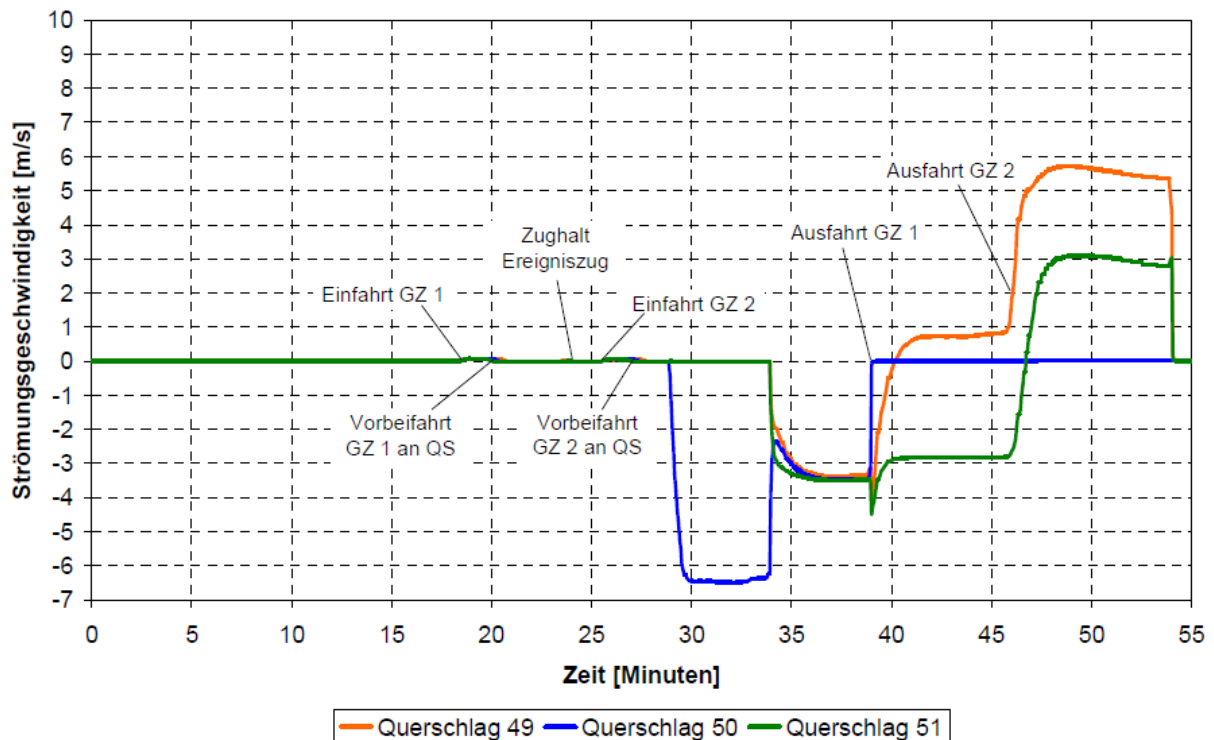


Abb. 58: Strömungsverlauf durch die Querschlagtüren bei zwei aus der Gegenröhre ausfahrenden Güterzügen mit 80 km/h (von Gegenröhre nach Ereignisröhre)

Nach Ausfahrt des ersten Güterzuges (GZ 1) wechselt die Durchströmungsgeschwindigkeit im Querschlag auf der verrauchten Seite des Brandes (Querschlag 49) das Vorzeichen und die Luft strömt mit ca. 0,8 m/s in Richtung Ereignisröhre. Auf der Seite des Brandes, auf der

im stationären Zustand Frischluft nachströmt, liegt die Geschwindigkeit bei einem ausfahrenden, langen Güterzug bei knapp 3 m/s von der Ereignisröhre in Richtung Gegenröhre. Nach Ausfahrt des zweiten Güterzuges (GZ 2) liegen die Durchströmungsgeschwindigkeiten in beiden Querschlägen wieder deutlich über den angestrebten 1.5 m/s.

Bei Reduktion der Zuggeschwindigkeit für die beiden ausfahrenden Güterzüge auf 40 km/h ergeben sich Strömungsgeschwindigkeiten in den offenen Querschlagtüren, die auf der verrauchten Seite des Brandes selbst bei 3 offenen Querschlägen bei mindestens 2,2 m/s betragen (Querschläge 49, 50). Auf der nicht verrauchten Seite, d.h. auf derjenigen Seite des Brandes, bei der im stationären Zustand Frischluft nachströmt, tritt in diesem Fall eine negative Strömungsgeschwindigkeit (d.h. von der Gegenröhre in die Ereignisröhre) in Höhe von ca. 1,5 m/s auf (Querschlag 51). Bei nur mehr 2 offenen Querschlägen betragen die Durchströmungsgeschwindigkeiten in den Querschlagtüren mindestens 0,6 m/s auf der nicht verrauchten Seite und 4 m/s auf der verrauchten Seite des Brandes (s. Abb. 59).^[82]

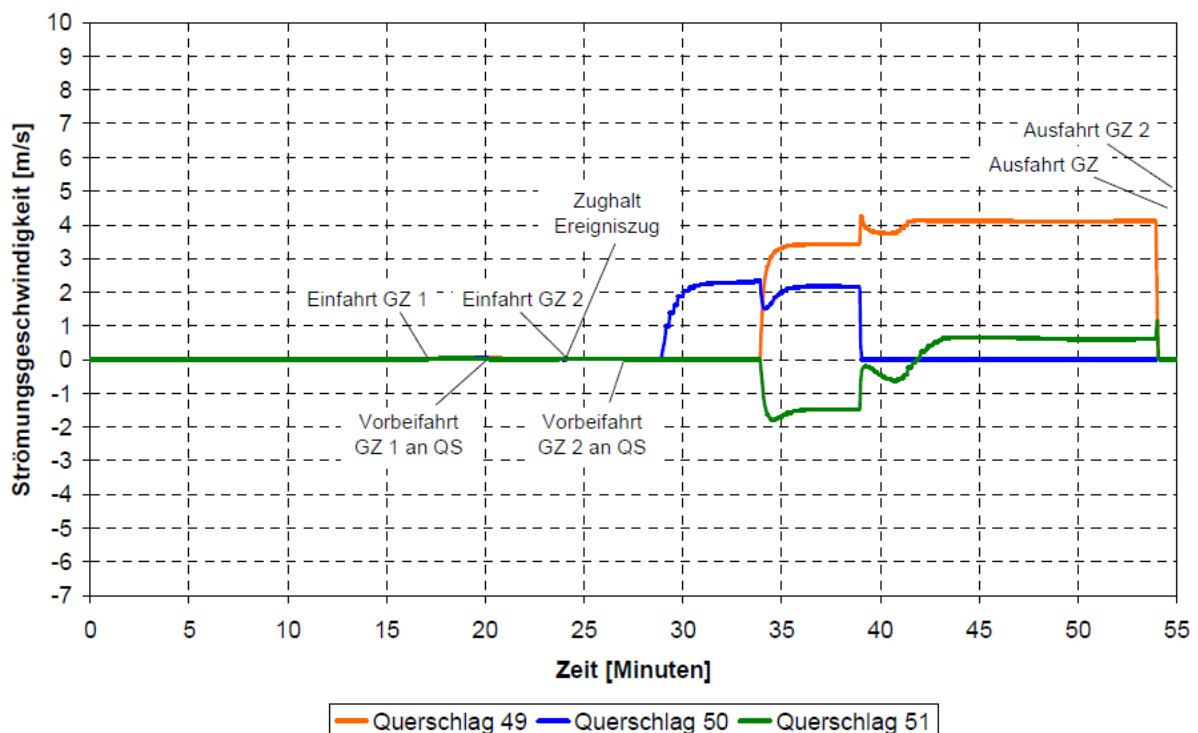


Abb. 59: Strömungsverlauf durch die Querschlagtüren bei zwei aus der Gegenröhre ausfahrenden Güterzügen mit 40 km/h (von Gegenröhre nach Ereignisröhre)

Die Simulationsrechnungen zeigen, dass ausfahrende Züge in der Gegenröhre einen wesentlichen Einfluss auf die Durchströmungsgeschwindigkeiten in den Querschlägen haben. Um die Wirkung der Ereignisfalllüftung nicht zu beeinträchtigen, ist in bestimmten Fällen eine Geschwindigkeitsreduktion für ausfahrende Züge notwendig.^[83]

6.7 Aerodynamik im Tunnel

Die größte Beanspruchung von Fluchttüren entsteht durch die Druckwechselbelastung aus dem Zugverkehr im Tunnel.^[84] Zugsbewegungen im Tunnel verursachen Druckänderungen, welche sich mit Schallgeschwindigkeit ausbreiten und an Querschnittsänderungen sowie am Tunnelanfang und -ende reflektiert werden. Durch die Dämpfung der Druckwellen im Tunnelsystem nehmen die zuginduzierten Druckänderungen mit zunehmender Zeit ab. Durch Überlagerung (Superpositionsprinzip) der Druckwellen ergeben sich bei der Durchfahrt eines Zuges und speziell bei der zeitgleichen Durchfahrt mehrerer Züge (Hintereinanderfahren) komplexe Druckänderungsprofile.

Für die Dimensionierung der Notausgangstüren im Tunnel, müssen einerseits die maximal auf die Türen wirkenden zeitlichen Verläufe der Druck- und Sogbelastungen und andererseits die Anzahl der Lastspiele (das Lastkollektiv) ermittelt werden.

Die tatsächlich im Tunnelbauwerk auftretenden gesamtheitlichen aerodynamischen Belastungen sowie die Belastungen durch Lüftungsanlagen (Tunnelbelüftung, Notausgangsbilüftung, Brandrauchentlüftung) und den vorherrschenden natürlichen thermischen Verhältnissen, welche auf die jeweilige Tunneltür- und Tunneltoranlagen wirken, ergeben sich unter anderem aus dem Zusammenwirken verschiedener projektspezifischer Faktoren, wie Tunnellänge sowie Tunnelquerschnitt, Zuggattung und Höchstgeschwindigkeit.^[85]

Dabei ist für alle Querschlagtüren und die Fluchttüren in der Nothaltestelle des SBT eine charakteristische Belastung aus Druck und Sog von $+10,5 \text{ kN/m}^2$ und $-12,0 \text{ kN/m}^2$ dem Tragsicherheitsnachweis zugrunde zu legen. Nachdem Druckwellen im Tunnel mehrmals an den Tunnelenden reflektiert werden und dabei interagieren, kommt es bei einer einzigen Zugsdurchfahrt zu mehreren Belastungszyklen. Aus diesem Grund ist für die Türen auch ein Ermüdungsnachweis für eine charakteristische Belastung von $\pm 7,5 \text{ kN/m}^2$ und 1,0 Mio. Lastwechsel zu führen. In den angegebenen Belastungen ist ein dynamischer Stoßfaktor von $\phi = 1,4$, welcher die plötzliche stoßartige Druckaufbringung auf die Türe berücksichtigt, bereits inkludiert (s. Abb. 60).

Aerodynamische Lastklasse - High S (inkl. $\phi = 1,4$) bis 350km/h

TRAGLAST

$p_{k, D, \text{High S}} = + 10,5 \text{ bis } - 12,0 \text{ kN/m}^2$

ERMÜDUNGSLAST

Schadensäquivalente Druckschwingbreite $\Delta p^*_{k, D, \text{High S}} = 7,5 \text{ kN/m}^2$

Zugehörige Anzahl von Lastzyklen $n^*_{k, D, \text{High S}} = 1.0 \text{ Mio. LW}$

Abb. 60: Traglast / Ermüdungslast – Langer Tunnel (>5 km), zweiröhrig eingleisig u. 40 m²

6.8 Lebenszyklusbetrachtung

Neben den technischen Aspekten muss auch der Alterung des Systems besondere Beachtung geschenkt werden. Gerade die Gewährleistung des Türsystems über eine übliche Lebensdauer von 30 bis 40 Jahren stellt eine große Herausforderung dar.

Eine maßgebende Rolle spielen dabei Temperatur und Feuchtigkeit. Je nach Überdeckung und Außentemperaturen können diese schnell im Bereich von etwa -15°C bis $+40^{\circ}\text{C}$ bei einer relativen Luftfeuchtigkeit von bis zu 90 % (im Portalbereich auch 100 %) betragen. Gerade in Anbetracht dieser Umgebungsbedingungen sollten alle Türkomponenten aus hochwertigen Materialien gefertigt sein. Bei Metallstrukturen hat sich der Einsatz von rostfreien Stählen bewährt. Zwar bieten auch verzinkte Oberflächen ebenfalls guten Schutz, dieser kann aber durch Staub, Steinschlag oder andere Fremdeinwirkungen beschädigt werden, sodass das Grundmaterial korrodiert.

Im Zusammenhang mit der Wechselbelastung aus Druck- und Sogbelastung spielt Staub, auch eine weitere wesentliche Rolle. Aufgrund der Saug-Pump-Bewegung lagert sich der feucht-klebrige Staub überall ab. Besonders bei elektrischen Komponenten kann dies zu Kurzschlüssen führen, welche den Tunnelbetrieb wesentlich beeinträchtigen können. ^[86]

6.9 Wartung und Instandhaltung

Als Leitgedanke für die Planung gilt eine möglichst hohe Verfügbarkeit des Tunnelbauwerks für den Betrieb gemäß EisbBBV (6). Die Zuverlässigkeit der Türen und ihrer Komponenten ist daher mit geringem Instandhaltungsaufwand auf hohem Niveau zu halten. Hierbei ist sicherzustellen, dass die Lebensdauer des Gesamtsystems nicht durch unzureichend dimensionierte Einzelteile verringert wird.

Unter dem Begriff der Wartung sind Maßnahmen zu verstehen, welche zur Bewahrung des Sollzustandes der Anlage erforderlich sind. Die Wartung dient zur Erhaltung der Funktionsfähigkeit, Betriebssicherheit, Erhöhung der Ausfallsicherheit und zur Werterhaltung der Anlage.

Die Anlage muss in dem Zustand, für den sie von der zulassenden Stelle, Behörde etc. zugelassen wurde, gehalten werden und „konform“ gemäß dieser Vereinbarung sein. Sind im Sinne effektiver Instandhaltung bzw. erhöhter Verfügbarkeit oder aus anderen Gründen (Innovation) Umbauten erforderlich, so sind die erforderlichen Genehmigungen der zulassenden Stelle zu erwirken.

Die Wartungshäufigkeit (Anzahl der Wartungen/Jahr) ist abhängig von der Art und Nutzungsintensität der Anlage, Bescheidvorgaben, Regeln der Technik sowie von den übertragenen Empfehlungen des Herstellers (Gewährleistung) bzw. Interessen des Eigentümers. Sie wird zeit- oder betriebsstundenabhängig in vorgegebenen Wartungsintervallen durchgeführt.

Die Tätigkeiten bei der Wartung werden nach Einsatzplänen und Prüfbuch (Anlagenbuch) vom Instandhalter ausgeführt. Die Wartung inkludiert grundsätzlich die Durchführung von Tätigkeiten gemäß Empfehlung/Vorschreibungen des Herstellers bzw. nach individuell, den Anforderungen entsprechenden Einsatzplänen pro Anlage, z.B.

- Auswechseln, Prüfen oder Ergänzen von Betriebsstoffen (Öl, Fette usw.)
- Tausch von Verschleiß- oder Dichtungsteilen
- Kontrolle und Festziehen von Schraubverbindungen
- Nachstellen von justierbaren Elementen
- Funktionskontrolle inklusive Reinigung
- etc. ^[87]

Die Türen erfordern erfahrungsgemäß einen hohen Instandhaltungsaufwand. Aus diesem Grund ist die Anzahl der Türen entsprechend dem Grundsatz „So wenig wie möglich, so viel wie notwendig“ auf ein notwendiges Mindestmaß zu reduzieren.

Unter den voran genannten Einflüssen stellen die regelmäßige Wartung und Instandhaltung der Systeme einen wichtigen Faktor zur Sicherung der gestellten Anforderungen und der geforderten Qualität dar.

6.10 Resultierende Anforderungen

Die Angaben in den beiden maßgeblichen Dokumenten (§31a-Gutachten und Tunnelsicherheitskonzept) des Einreichoperates für das eisenbahnrechtliche Baugenehmigungsverfahren verlangen sowohl für die Querschläge als auch für die Fluchtstollen im Bereich der Nothaltestelle die Ausführung von Pendeltüren mit den Abmessungen 2 (Türflügel) x 1,00 m x 2,20 m (B x H) und stehen somit in Einklang mit der als übergeordnet anzusehenden TSI - SRT und der Feuerwehrrichtlinie A12.

Gem. Tunnelsicherheitskonzept sollen nach eingehender Analyse im Zuge der Detailplanung auch Schiebetüren zur Ausführung kommen können, wobei für diese keine Angaben bzgl. lichter Öffnungsweiten festgehalten sind. Es ist davon auszugehen, dass die gleichen lichten Öffnungsweiten vorzusehen sind. (vgl. Kap. 6.1)

Zur Konkretisierung der möglichen Öffnungsweiten von Schiebetüren wurde eine gutachterliche Stellungnahme (§31a-Gutachen) eingeholt. Demnach besteht aus der Sicht des Fachgebietes Brandschutz unter Bedachtnahme der fachspezifischen Aspekte „Tunnelsicherheit“ und „Entfluchtung – Smoke Management“ kein Einwand gegen eine mögliche Ausführung mit lichten Durchgangsweiten von

- 160 cm bei Querschlägen und
- 140 cm bei Fluchtstollen,

wobei die lichte Höhe mit 220 cm jeweils unverändert bleibt und den o.a. Vorgaben entspricht. (vgl. Kap. 6.2.1)

Aufgrund der gegebenen Platzverhältnisse ist in den Querschlägen des Semmering-Basistunnels neben Pendeltüren auch der Einbau von Schiebetüren mit diesen Abmessungen ohne zusätzliche Maßnahmen möglich. Auch bei den Fluchtstollen der Nothaltestelle können durch eine Aufweitung am Fluchtstollenzugang Schiebetüren mit den o.a. Abmessungen installiert werden. (vgl. Kap. 6.3)

Die Forderung aus §31a-Gutachten und Tunnelsicherheitskonzept (für beide Türsysteme) nach einer für den Flüchtenden maximal aufzubringenden Türöffnungskraft von 100 N wird unter den herrschenden Bedingungen bei einem Brandereignis mit Über- bzw. Unterdruck in den beiden Tunnelröhren mit großer Wahrscheinlichkeit von der Schiebetüre leichter zu erfüllen sein (s. Pkt. 7.6.7).

Die Konstruktion der Türen hat sich an weiteren wichtigen Einflüssen zu orientieren. So sind in erster Linie die auftretenden dynamischen Belastungen zu berücksichtigen, weshalb für die Türen ein Ermüdungsnachweis für eine charakteristische Belastung von $\pm 7,5 \text{ kN/m}^2$ und 1,0 Mio. Lastwechsel zu führen ist. (vgl. Kap. 6.7) Daneben müssen natürlich auch die Forderungen hinsichtlich Brandbeständigkeit und Rauchdichtheit erfüllt werden, was durch entsprechende Vorgaben bzw. die Definition der diesbzgl. Anforderungen für jeden Türtyp bedarfsgerecht definiert werden kann.

Bei Berücksichtigung all dieser Anforderungen ist die Ausstattung der Notausgangstüre mit einer mechanischen Öffnungs-/Schließhilfe (Motorantrieb) unabhängig vom Türsystem zu überlegen.

Bzgl. Kosten wird an dieser Stelle auf Kap. 8 WIRTSCHAFTLICHKEITSBETRACHTUNG verwiesen.

Eine umfassende Zusammenstellung bzgl. Anforderungen an die Notausgangstüren im Tunnel (Pendel- und Schiebetüre) findet sich auch im Anhang.

7 MESSTECHNISCHE UNTERSUCHUNGEN

Während des Betriebes stellt der Brand die Hauptgefahr in Tunneln dar, weshalb das Szenario „Brand in einem personenbefördernden Zug“ unter Berücksichtigung von Eintrittswahrscheinlichkeit und Schadensausmaß als das maßgebende Szenario hinsichtlich Tunnelsicherheit anzusehen ist. Für den Ereignisfall sieht das Tunnelsicherheitskonzept als oberstes Ziel das Verlassen des Tunnels vor. Befindet sich ein personenbefördernder Zug noch vor der Nothaltestelle, so ist im Brandfall in dieser anzuhalten, hat der Zug jedoch die Nothaltestelle bereits passiert, soll er ins Freie fahren. (vgl. Kap. 4.2)

Im ungünstigsten Fall kann es allerdings auch zu erzwungenen Zughalten in den Bereichen zwischen den Portalen und der Nothaltestelle kommen, dann ist die Personenevakuierung über die nächstgelegenen Querschläge notwendig. In jedem Fall ist die Rauchfreihaltung der Fluchtwege sicherzustellen. Dazu wird die nicht betroffene Tunnelröhre lüftungstechnisch unter Überdruck gesetzt und somit ein Überströmen der Rauchgase von der Brandröhre in die nicht betroffene Röhre verhindert. Um einen Raucheintrag in die Querschläge zu verhindern, ist die Aufrechterhaltung der Druckdifferenz maßgeblich. ^[88]

Um über die tatsächlich herrschenden Verhältnisse im Ereignisfall, insbes. hinsichtlich Rauchausbreitung in den einzelnen Entwicklungsphasen des Brandes, Aufschlüsse zu erhalten, wurden von November 2016 bis Jänner 2017 Großversuche im bereits fertig gestellten Abschnitt des Koralmtunnels (KAT1) durchgeführt.

Aufgrund der gemäß Berechnung mittels Ventilatoren erzeugten Druckunterschiede sollte es weiters möglich sein, die tatsächlich erforderlichen Öffnungskräfte bei verschiedenen Türtypen (Pendeltür und Schiebetür) zu simulieren.

7.1 Ausgangslage

7.1.1 Rauchfreihaltung der Querschläge

Die Querschläge dienen einerseits in hohem Maße der Unterbringung von betriebs- und sicherheitstechnischen Einrichtungen, sie werden andererseits im Ereignisfall aber auch als Fluchtwege in den sicheren Bereich genutzt.

Bei einem Brandereignis werden im Semmering-Basistunnel die Rauchgase aus der Ereignisröhre abgesaugt und Frischluft in den Rettungsraum (Ereignis mit Halt in der Nothaltestelle) oder in die Gegenröhre (Ereignis mit Halt außerhalb der Nothaltestelle)

gefördert. Durch die entstehende Druckdifferenz wird das Überströmen von Rauch in die sicheren Bereiche verhindert. Entscheidend ist, ob die bei einem Brandereignis entstehenden hohen Temperaturen und Rauchmengen die Fluchtmöglichkeiten während der Selbstrettungsphase einschränken. ^[89]

7.1.2 Fluchttüren

Für die bahntechnischen Ausrüstungskomponenten von Eisenbahntunneln ergeben sich vielfältige und teilweise sogar widersprüchliche Anforderungen. Die Querschlagtüren sind im Besonderen davon betroffen, weil sie einerseits neben dem dauerhaften Widerstand gegen die aerodynamische Druck-Sogbelastung aus der Zugvorbeifahrt auch die Anforderungen hinsichtlich Rauchdichtheit gewährleisten müssen und andererseits in ihrer Funktion als Fluchttüren im Ereignisfall eine Öffnungskraft von 100 N nicht überschritten werden darf. ^[90]

7.2 Versuchsziele

Aufwändige Realbrandversuche mit Brandlasten bis zu 21 MW und einem Rauch-/ Abluftvolumenstrom von bis zu 150 m³/s wurden durchgeführt, um zu ermitteln, bis zu welcher Brandleistung bei vorgegebenen Längsgeschwindigkeiten kein Rauchübertritt in die Querschläge erfolgt, selbst wenn keine speziellen Maßnahmen (Ereignisfalllüftung) getroffen werden. Der Zeitraum bis der Rauch in den Querschlag übertritt sollte in Abhängigkeit von der Brandlast ermittelt werden. Entscheidend ist, ob die entstehenden Rauchmengen die Fluchtmöglichkeiten während der Selbstrettungsphase einschränken.

Durch Aktivierung der Ereignisfalllüftung entstehen zwischen den beiden Tunnelröhren teilweise große Druckdifferenzen (> 200 Pa), welche das Überströmen von Rauch aus der Brandröhre in die Fluchtwege (QS) verhindern. Dadurch sind mechanische Anlagenteile (z.B. Klappen, Türen, ...) möglicherweise in ihrer Funktion eingeschränkt bzw. lassen sich nicht mehr ohne erhöhten Kraftaufwand betätigen. Das Verhalten von Querschlagtüren (Pendel- und Schiebetür) bei hohen Differenzdrücken zwischen den beiden Bahntunnelröhren sollte daher im Rahmen der Versuche ebenfalls untersucht und das Erfordernis von mechanischen Öffnungshilfen für Fluchttüren festgestellt werden.

Mit der Durchführung der Brandversuche sollten also mögliche Auswirkungen auf die bauliche Gestaltung der Querschlagabschlüsse sowie die notwendige Ausrüstungstechnik zur Rauchfreihaltung der Querschläge erfasst und schlussendlich Entscheidungsgrundlagen für die Wahl des Türsystems geschaffen werden. ^[91]

7.3 Versuchsanordnung

Die Versuche fanden im auf Rohbauniveau fertiggestellten Abschnitt KAT1 (zwischen Ostportal und Schacht Leibenfeld) des Koralmtunnels statt (s. Abb. 61). Sie wurden außerhalb des Schutterbetriebes in der Zeit von 22:00 bis 05:00 Uhr in der Nordröhre des Tunnels durchgeführt, da die Südröhre durch das Vorhandensein eines Förderbandes für den Schutterbetrieb nicht geeignet gewesen wäre.

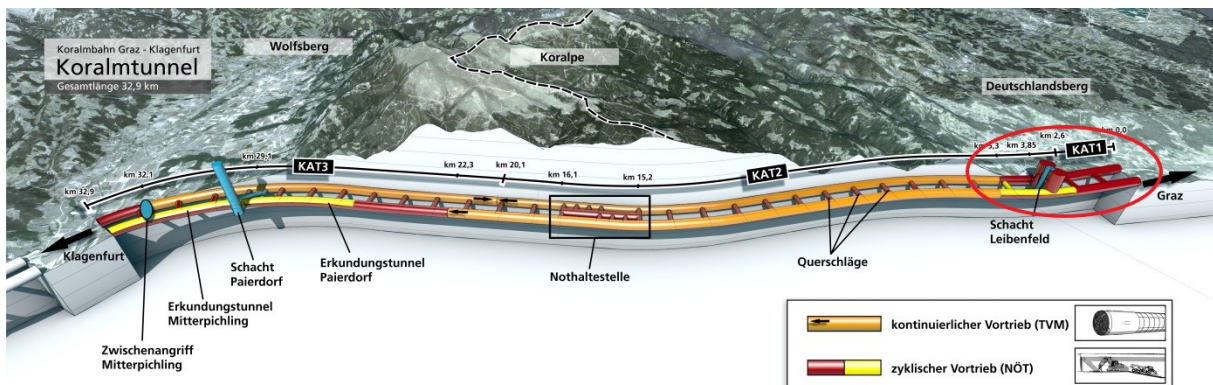


Abb. 61: Schematische Darstellung des Koralmtunnels

Als Versuchsort wurde der Bereich des Querschlages 2 (QS02), ca. 1.000 m vom Ostportal gewählt. Der Vorteil eines portalnahen Versuchsortes besteht einerseits darin, dass die Zufahrt über das Portal kürzer ist als der alternative Zugang über den Bauschacht an der Baugrenze zu KAT2 (ca. 2,5 km vom Ostportal) und andererseits darin, dass nur ein relativ kurzes Tunnelstück tatsächlich den Rauchgasen ausgesetzt ist. Darüber hinaus verkürzen sich die Fluchtwege, wodurch ein geringeres Gefährdungspotential gegeben ist.

7.4 Versuchsvorbereitung/-aufbau

Um wirklichkeitsnahe Strömungs- und Druckverhältnisse in den beiden Tunnelröhren zu erzeugen, wurden zwei Axialventilatoren im Nahbereich des Portals der Nordröhre installiert und über Lutten an eine neu errichtete, ca. 200 m vom Portal entfernte Wetterwand angeschlossen. Zusätzlich wurden auch die in den Wetterwänden an der Baugrenze installierten Axialventilatoren in das Belüftungsregime eingebunden.

Der nächste in Richtung Baugrenze gelegene Querschlag (QS03) wurde für den Fall eines unerwarteten Ereignisses mit einem Rolltor verschließbar gemacht, während die übrigen Querschläge im KAT1 baulich verschlossen und mit einfachen Türen ausgestattet waren.

Zusätzlich wurde eine Zugattrappe durch einen Hohlkörper 3,0 x 5,0 m ausgebildet und unmittelbar vor dem Querschlag 2 (QS02) situiert (s. Abb. 62). Auf diese Weise wurde die Querschnittsverengung, hervorgerufen durch eine Zuggarnitur, nachgestellt. ^[92]

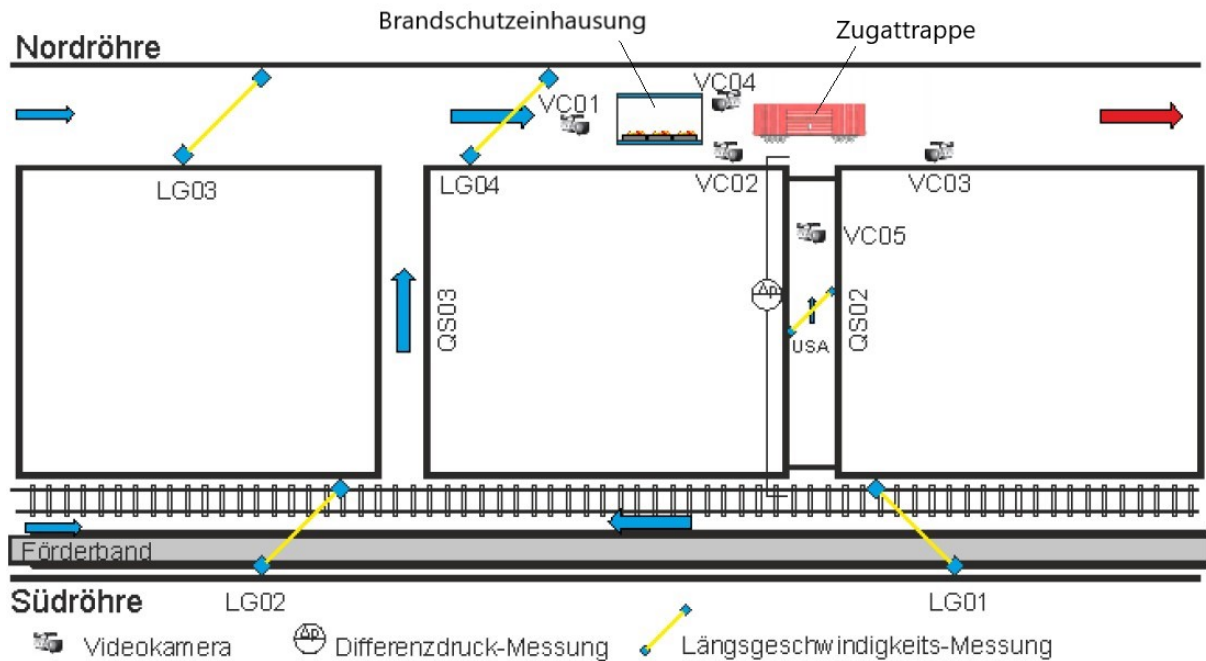


Abb. 62: Versuchsanordnung

7.4.1 Brandschutzeinhausung

Nachdem die Bemessungsbrände für den Koralmtunnel mit 25 MW und für den Semmering-Basistunnel mit 28 MW festgelegt wurden, sollten bei den Versuchen maximale Brandlasten von bis zu 20 MW simuliert werden. Temperaturmessungen bei Realbrandversuchen haben gezeigt, dass bei Bränden mit einer Brandleistung von 20 MW im unmittelbaren Bereich des Brandortes Temperaturen bis zu 1.000°C auftreten können.

Um dem thermischen Bauwerksschutz Rechnung zu tragen, wurde im Vorfeld eine Brandschutzeinhausung bestehend aus einem Stahl-Gerüst (ca. 5,0 m x 5,0 m x 20,0 m), auf welches innen zwei Lagen PROMATECT-T-Brandschutzplatten (Stärke je 25 mm) angebracht wurden, errichtet (s. Abb. 63).

Die Situierung im Tunnel erfolgte derart, dass der Boden der Einhausung etwa dem späteren Niveau der Fahrbahn entsprach. In Tunnellängsachse wurde die Brandschutzeinhausung so positioniert, dass das Ende der Einhausung (Austritt der Rauchgase) 50 m vom Querschlag 2 entfernt lag (s. Abb. 62).

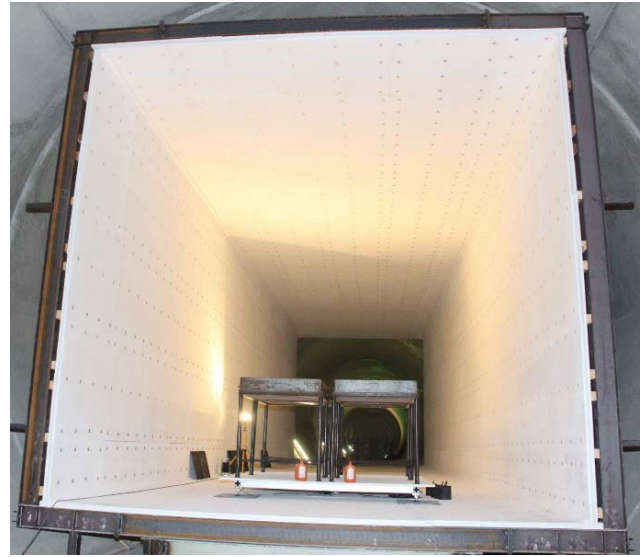
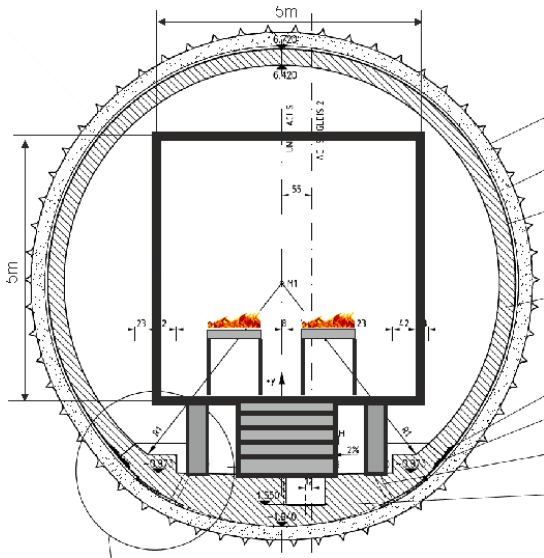


Abb. 63: Brandschutzeinhausung

Durch diese Einhausung des Brandortes konnte vor allem der Einfluss der Wärmestrahlung auf die Betonoberfläche (ca. 30 % der gesamten Wärmeleistung) vermieden werden. Der heiße Rauch, welcher vom Brandort weiter aus der Brandschutzeinhausung abströmt, erwärmte die angrenzenden Betonwände über den konvektiven Wärmeübergang, in Abhängigkeit von der vorherrschenden Längsströmungsgeschwindigkeit sowie weiteren Parametern. ^[93]

7.4.2 Versuchstüren

Im Rahmen der Vorbereitungsarbeiten für die Durchführung der Brandversuche wurden auch die Wandabschlüsse des Versuchsquerschlages 2 (QS02) für den Einbau von Tunneltüren adaptiert bzw. neu errichtet. Als Abschluss zum Versuchstunnel (Nordröhre) wurde eine Pendeltür in die bereits bestehende Wandscheibe eingebaut, auf der gegenüberliegenden Seite eine Schiebetür.

Anhand dieser Anordnung sollte während der einzelnen Brandversuche überprüft werden, ob mit der geplanten Ereignisfalllüftung auch bei vollständig geöffneter Fluchtwegtür eine ausreichend hohe Durchströmgeschwindigkeit von der Parallelröhre in die Brandröhre erzielt werden kann, um einen Rauchübertritt sicher zu verhindern.

Gleichzeitig sollte bei beiden Türsystemen kontrolliert werden, ob die maximal zulässige Kraft von 100 N zum vollständigen Öffnen der Fluchtwegtüre bei aktiver Ereignisfalllüftung eingehalten werden kann.

7.4.2.1 Pendeltür

Als Zugang zur Nordröhre wurde eine 2-flügelige, beidseitig öffnende Pendeltür der Firma HODAPP, Typ HPT-2 mit einer Türfläche von ca. 2 x 1,1 m x 2,0 m ausgeführt (s. Abb. 64).



Abb. 64: Querschlagabschluss mit Pendeltür (Nordröhre)

7.4.2.2 Schiebetür

An der Südseite des Querschlages war eine Querschlagwand zu errichten, in welche eine Schiebetür der Firma HODAPP, Typ HFS-1 mit einer lichten Türöffnung von ca. 1,6 m x 2,0 m eingebaut wurde (s. Abb. 65).



Abb. 65: Querschlagabschluss mit Schiebetür (Südröhre)

7.4.3 Messtechnik

Um wichtige Untersuchungsparameter wie Druckdifferenz, Temperatur, Längsströmungs-Geschwindigkeiten, Sauerstoffgehalt der Luft usw. zu ermitteln, wurde in den beiden Fahrrohren und im Querschlag 2 (QS02) ein umfangreiches Messequipment aufgebaut:

- Differenzdruck-Messumformer
zur kontinuierlichen Messung von Differenzdrücken zwischen den beiden Fahrrohren
- Temperatur-Sensoren
zur Erfassung der Veränderungen von Lufttemperatur und Temperaturschichtung der heißen Rauchgase entlang der Tunnelachse während der Brandentwicklung
- Ultraschall-Luftströmungsmessgeräte
zur Erfassung der aerodynamischen Randparameter während der Versuche ^[94]

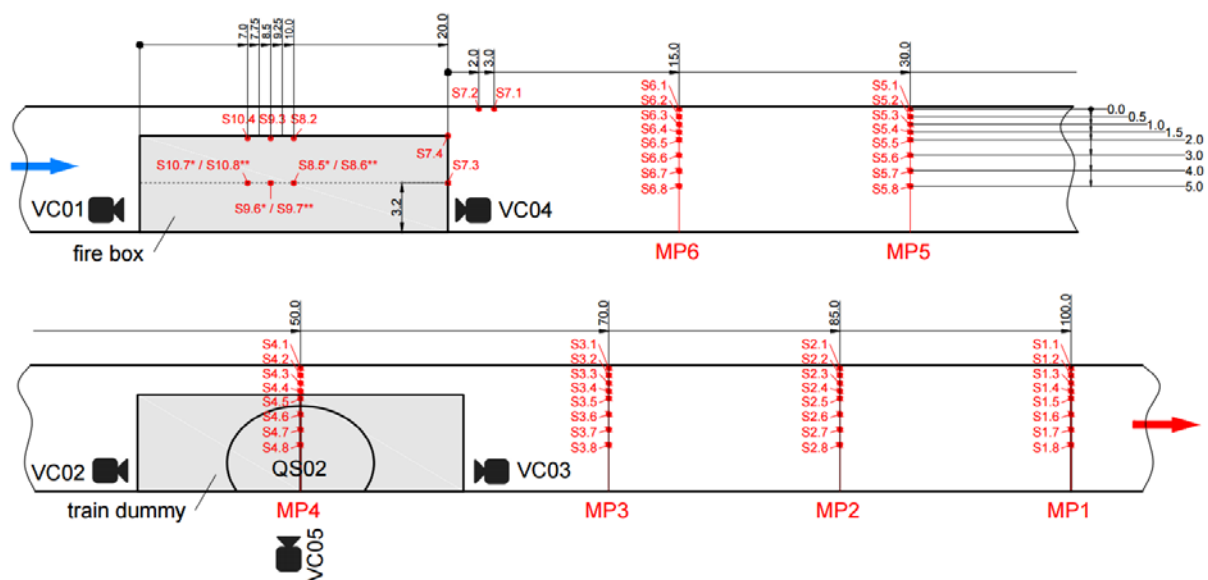


Abb. 66: Situierung von Temperatur-Sensoren und Videokameras

Mit geeigneten Temperatursensoren wurden während der gesamten Branddauer außerdem Temperaturen an und in der Betonoberfläche ebenso erfasst, wie die Temperaturen innerhalb der Brandschutzplatten-Beplankung in der Brandschutzeinhausung.

Die Positionierung der Messsensoren ist aus Abb. 66 ersichtlich: Jeweils 8 Temperatursensoren wurden in den Messpunkten MP1 bis MP6 in Tunnelachse angeordnet. Ihre Höhenlage orientiert sich an Firste und Schienenoberkante (SOK). Daraus ergibt sich für die Temperatur in Kopfhöhe (ca. 2 m über Randweg) ein gemittelter Wert aus Sx.7 und Sx.8.

7.4.4 Visualisierung der Rauchausbreitung

Zur Dokumentation der Rauchausbreitung in der Brandröhre und im Querschlag (QS02) wurden insgesamt 5 Videokameras (VC) an aussagekräftigen Positionen situiert (s. Abb. 66). Während der Versuchsdurchführung wurden an allen 5 Positionen Videoaufzeichnungen jeweils von Brandbeginn bis Brandende gemacht. Situativ wurden einzelne Videokameras auch auf andere Positionen umgestellt. ^[95]

7.4.5 Brandlast

Zur Erzeugung der gewünschten Brandlasten (vgl. Kap. 7.4.1) gelangten Brandtassen (sog. Poolfeuer) mit jeweils 1 m² Grundfläche (Stahlblech, 1,0 m x 1,0 m) zum Einsatz. Durch das Abbrennen eines Benzin/Diesel-Gemisches, das aufgrund der großen entstehenden Rauchmenge gut zur Visualisierung der Rauchausbreitung geeignet ist, kann je Brandtasse eine Wärmeleistung/m² von ca. 1,5 bis 2,0 MW erzeugt werden. Daher sind für eine durchschnittliche Brandlast von 20 MW sind etwa 10 bis 12 m² Brennstofffläche notwendig.

Bei den ggst. Brandversuchen erfolgte die Bestimmung der Wärmefreisetzungsrate mit einer exakten Abwägung der verbrannten Brennstoffmenge und Hochrechnung über den Heizwert des Brennstoffes (s. Abb. 67), nachdem erste Abschätzungen ergeben hatten, dass die Sauerstoffmethode für die anfänglich geringen Brandlasten zu ungenau sein würde. ^[96]



Abb. 67: Abbrandrate über die Zeit

Bei den Brandversuchen mit 8 und 10 Brandtassen erfolgte die Bestimmung der Brandlast zusätzlich über die Messung des Sauerstoffgehalts in der Luft vor und hinter dem Brand.

7.4.6 Lüftungsverhältnisse

Um die gewünschten Druckverhältnisse und Volumenströme einstellen zu können, wurden im Portalbereich der Nordröhre zwei Axialventilatoren (V1 und V2) installiert. (vgl. Kap. 7.4) Damit war einerseits die Absaugung von Luftmengen bis zu $125 \text{ m}^3/\text{s}$ aus dem Tunnel möglich und konnten andererseits beim Querschlag 2 (QS02) Druckdifferenzen von bis zu 150 Pa zwischen den beiden Fahrrohren eingestellt werden. Die Luftströmung erfolgte vorwiegend vom Ostportal der Südröhre, über den Querschlag 3 (QS03) zum Ostportal der Nordröhre (s. Abb. 68).^[97]

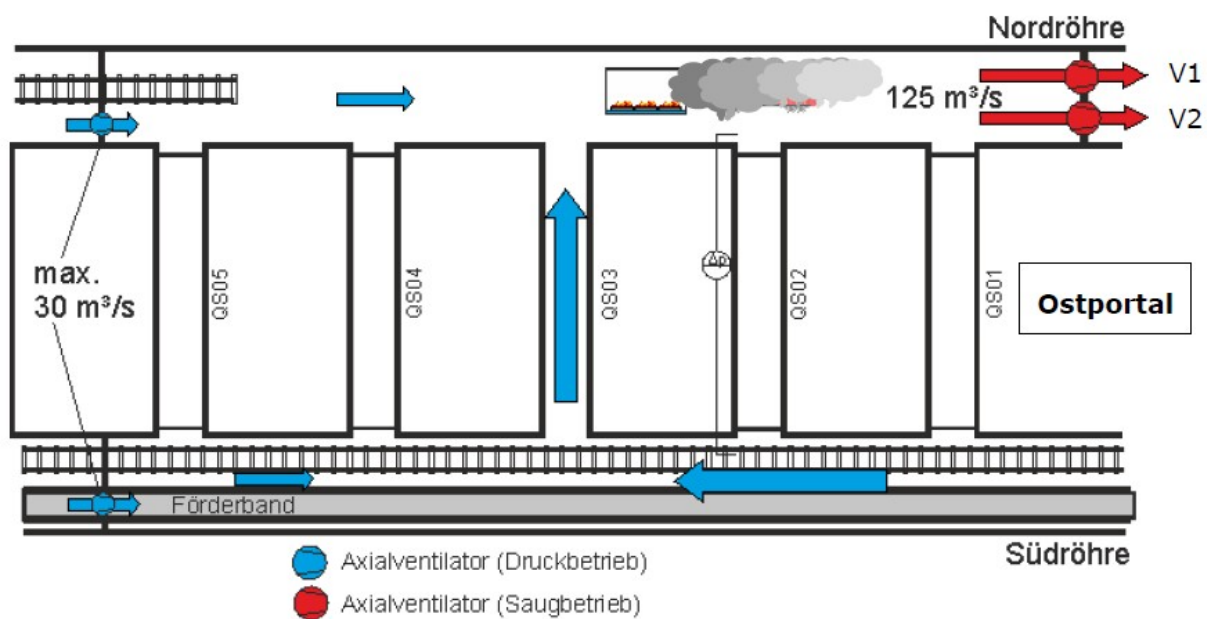


Abb. 68: Lüftungsschema

7.4.7 Hochdruckwassernebelanlage (HDWNA)

Beim Semmering-Basistunnel wird die Installation einer Hochdruckwassernebelanlage (HDWNA) in der Nothaltestelle (NHS) überlegt. Diese hat folgende Aufgaben zu erfüllen:

- Bauwerkschutz
- Verbesserung der Flucht- und Rettungsbedingungen
- Verbesserung der Möglichkeit zur Brandbekämpfung durch die Feuerwehr
- Merkliche Reduktion der Brandlast

Zur Veranschaulichung der Wirkungsweise wurde im Zuge der Versuchsvorbereitung auch der Einsatz eines entsprechenden HDWNA-Containeraggregates (s. Abb. 69) vorgesehen.



Druck/Durchfluss:	Betriebspunkt	ca. 58 bar bei 2200 L/min und Motordrehzahl 1790 min ⁻¹
	max. Systemdruck	64 bar
Temperaturen:	max. zulässige Wassertemperatur im Zulauf	+50 °C
	min. zulässige Temperatur für Betrieb	+5 °C
Filter	Material	Edelstahl
	Maschenweite	100 µm
Leistungen	1 Dieselmotor für Hochdruckpumpe (max. 1800 1/min)	350 kW
	1x Elektromotor Getriebeölkühlung 24VDC	0,37 kW
Spannungen	Elektromotoren der Pumpe für Getriebeölkühlung	24 VDC
	Steuerspannung	24 VDC
	Licht, Steckdosen, Batterieladegerät	230 VAC
	Stromanschluss Container und 400V Steckdose	400 VAC
div. Daten	Material Verrohrung	1.4571
	Lackierung Grundrahmen Pumpenaggregat	RAL 5015
	Lackierung Container	RAL 5010
	Schalldruckpegel Außen bei Betrieb (1m)	106 dB(A)
	Schalldruckpegel im Container bei Betrieb	112 dB(A)

Abb. 69: Containeraggregat inkl. Systemdaten

Mit diesem leistungsfähigen Aggregat war es möglich, eine Hochdruckvernebelungsanlage für zwei unterschiedliche Verwendungsarten unter realitätsnahen Bedingungen zu testen:

- Rauchgaskühlung (RGK)
- Brandbekämpfungsanlage

Die Verwendung dieses Containeraggregates erlaubte also die Bereitstellung von Druckwasser für eine Rauchgaskühlung (RGK), um bei den größeren Brandlasten (ab 10 Brandtassen) die Rauchgase so zu kühlen, dass eine Beschädigung des Tunnelbauwerks verhindert werden kann.

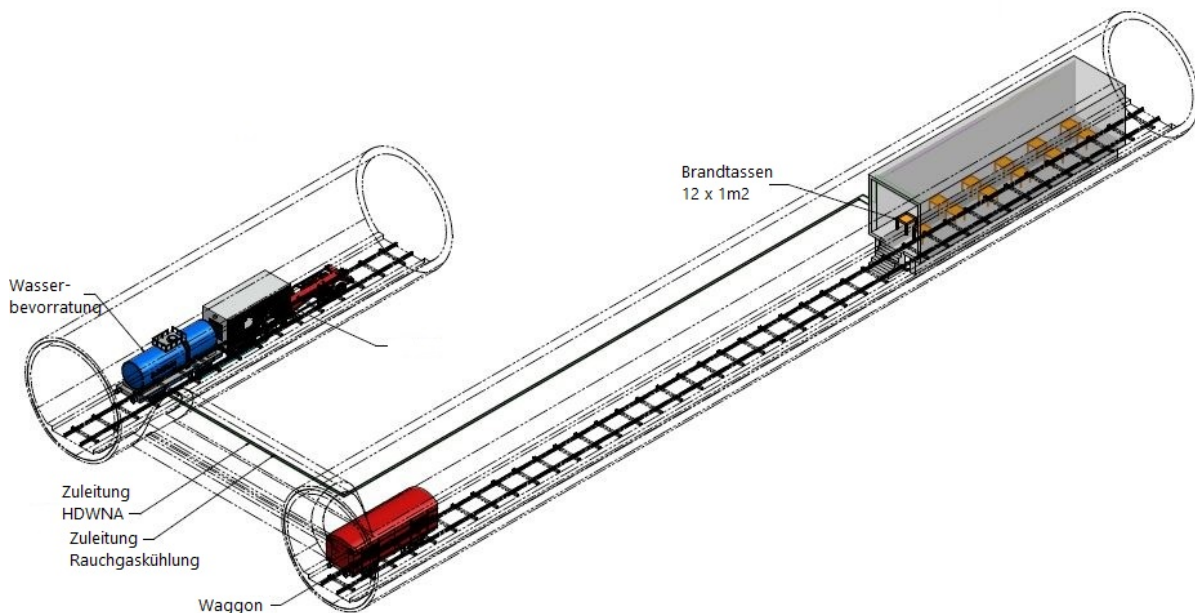


Abb. 70: HDWNA-Einsatzkonzept

Zu diesem Zweck wurde ein spezielles Einsatz-Konzept erarbeitet, das es ermöglicht, den HDWNA-Container während der versuchsfreien Zeit einfach und rasch aus dem Tunnel zu entfernen. Dabei wurde das Containeraggregat auf einem Eisenbahnwaggon aufgebaut und mittels eines angekoppelten Kesselwaggon mit Wasser versorgt. Die Druckleitung vom Containeraggregat verlief durch den Querschlag QS02 in die parallele Röhre mit dem Versuchsaufbau und versorgte dort einen Düsenkranz, der an der Rauchseite der Stirnseite der Brandschutzeinhausung angebracht war, mit Druckwasser (s. Abb. 70). Bei Überschreitung einer maximal zulässigen Betontemperatur konnte auf diese Weise jederzeit die Rauchgaskühlung aktiviert, und die Rauchgase dementsprechend abgekühlt werden.

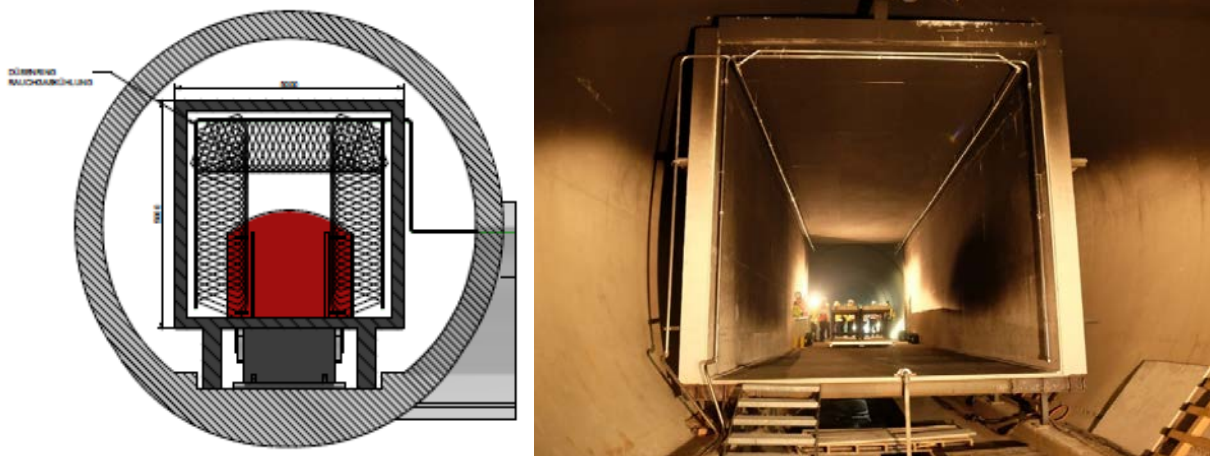


Abb. 71: HDWNA – Rauchgaskühlung und Brandbekämpfungsanlage

Die Brandschutzeinhausung wurde in den oberen Ecken mit jeweils 10 HD-Wassernebeldüsen ausgestattet (s. Abb. 71). Zusätzlich waren neben dem HDWNA-Aggregat folgende Einrichtungen für den Einsatz des HDWNA-Aggregates erforderlich:

- Zulaufleitung vom Kesselwaggon zum Containeraggregat
- 2 Druckleitungen (1 x Rauchgaskühlung, 1 x HDWNA) vom Containeraggregat durch den Querschlag und im Versuchstunnel zur Brandschutzeinhausung
- RGK Düsenkranz inkl. Wassernebeldüsen in der Brandschutzeinhausung
- HDWNA-Düsenleitungen inkl. Düsenköpfe in der Brandschutzeinhausung ^[98]

Als zusätzliches Sicherheitssystem und zu Demonstrationszwecken wurde die Brandschutzeinhausung mit einer Hochdruckwassernebel-Brandbekämpfungsanlage ausgestattet. Die HDWNA sollte somit in der Lage sein, die Flüssigkeitsbrände in den Brandtassen jederzeit innerhalb von wenigen Minuten zu löschen. Dabei ist allerdings anzumerken, dass der Einsatz der HDWNA mit dieser Versuchsanordnung auf eine einzelne Sektion beschränkt ist, während im Realeinsatz i.d.R. 3 Sektionen (Brandbereich + Nachbarsektionen) aktiviert werden.

7.4.8 Sicherheit

Im Vorfeld der Versuche war ein detailliertes Flucht- und Rettungskonzept (u.a. Festlegung von Sicheren Bereichen sowie Vorsichts- und Gefahrenbereichen, s. Abb. 72), für die Versuchsdurchführung auszuarbeiten und mit den Beteiligten abzustimmen, außerdem wurde eine Arbeitsplatzevaluierung gem. ASchG (10) durchgeführt.

Der sichere Bereich bietet Schutz vor den Rauchgasen, daher hatten sich während der Brandversuche alle anwesenden Personen hier aufzuhalten. Als sichere Bereiche während der Versuche galten:

- das Tunnelportal
- die Querschläge QS01, QS02, QS04 und QS05
- die Südröhre (da auch in der Nacht Zugverkehr in der Südröhre möglich ist, darf diese jedoch nur mit Vorsicht betreten werden)

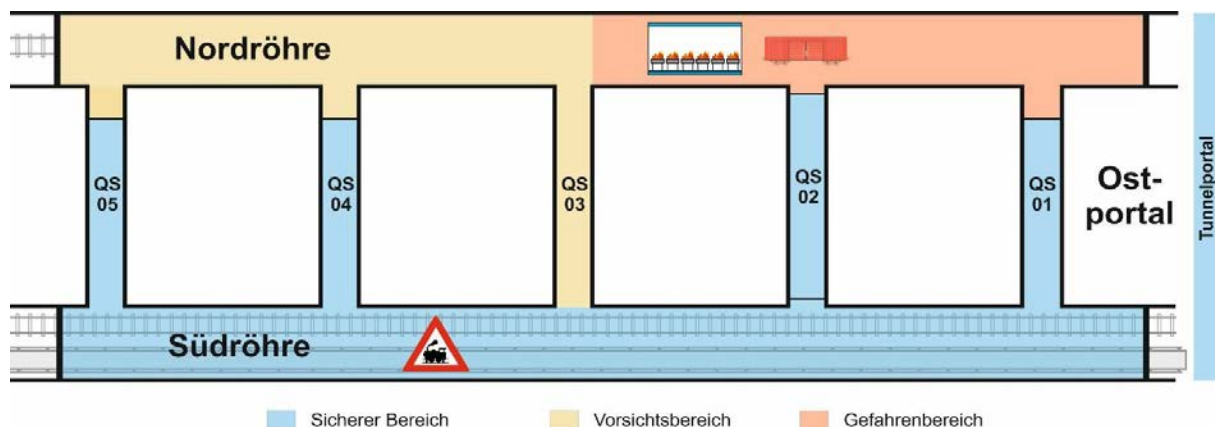


Abb. 72: Sichere Bereiche, Vorsichts- und Gefahrenbereiche

Der Vorsichtsbereich ist im Normalbetrieb als sicherer Bereich anzusehen. Jedoch können beim Ausfall eines oder mehrerer Lüfter während eines Versuches Rauchgase in den Vorsichtsbereich gelangen. Daher war ein Aufenthalt während der Versuche in diesem Bereich zu vermeiden.

Im Gefahrenbereich befanden sich während der Brandversuche Rauchgase, außerdem waren rund um die Brandschutzeinhausung sehr hohe Temperaturen zu erwarten. Daher durfte dieser Bereich ohne entsprechende Schutzausrüstung nicht betreten werden.

Als zusätzliche Sicherheitsvorkehrung war der Versuchsbereich durch Wetterwände aerodynamisch vom Rest des Tunnels abgetrennt. Mit den in den Wetterwänden an der

Baulosgrenze installierten Bauventilatoren, konnte jederzeit Frischluft von der abgeschotteten Seite des Tunnels in den Versuchsabschnitt eingeblasen werden.^[99]

Auf dieser Grundlage konnten die einzelnen Versuche in enger Abstimmung mit den ÖBB, der im Tunnel tätigen Baufirma (ARGE KAT2) sowie dem Sicherheitskoordinator (SiKo) der Baustelle durchgeführt werden.

7.4.9 Weitere Aspekte

Bei der Verbrennung eines Diesel-/Benzingemisches entstehen Rauchgase, die einen mehr oder weniger hohen Anteil an Rußpartikeln enthalten. Ruß enthält ölige Produkte aus unvollständiger Verbrennung. Der Großteil des entstandenen Verbrennungsrußes wurde mit der Luftströmung aus dem Tunnel transportiert und konnte in die Atmosphäre entweichen.

Ein geringerer Teil der Rußrückstände hat sich an den Tunnelwänden absetzt. Die Örtlichkeit der Versuchsdurchführung war so nahe wie möglich an einem Portal festgelegt, um die verschmutzten Flächen des Tunnels so gering wie möglich zu halten. Nach Abschluss der Versuche war der betroffene Tunnelabschnitt daher gründlich zu reinigen, die anfallenden Waschwässer waren zu sammeln und ordnungsgemäß zu entsorgen. Daher erfolgte die Sammlung der Waschwässer bereits innerhalb des Tunnels, um die Gewässerschutzanlage nicht zu belasten.

Die wichtigsten Verbrennungsprodukte beim Abbrand eines Diesel-/Benzingemisches sind Kohlendioxid (CO₂), Kohlenmonoxid (CO), Wasser (H₂O) sowie diverse unverbrannte Kohlenwasserstoffe (HC). Gesundheitlich relevant ist Kohlenmonoxid, das bei hohen Konzentrationen zur Verminderung des Sauerstofftransports im Blut führt. Kohlenmonoxid entsteht durch unvollständige Verbrennung von Kohlenstoff bei Luftmangel (s. Kap. 6.5). Allerdings konnte vorausgesetzt werden, dass durch die vorhandene Luftströmung ausreichend Sauerstoff vorhanden war und Kohlenmonoxid dadurch nur sehr lokal und in unbedenklichen (<100 ppm) Konzentrationen entstand.

Trotzdem waren Versuchsteilnehmer, welche sich zeitweilig im Abgasstrom befunden haben, mit CO-Warngeräten ausgestattet. Alle Versuchsteilnehmer trugen während der Versuche sogenannte Sauerstoff-Selbstretter (SSR) bei sich.

Anwesende Mitglieder der Freiwilligen Feuerwehren Freidorf und Deutschlandsberg waren mit Pressluftatmern ausgerüstet. Bei Versuchen mit sehr großen Brandlasten hatte im Vorfeld eine detaillierte Abstimmung mit den Einsatzdiensten zu erfolgen.^[100]

7.5 Versuchsdurchführung

7.5.1 Zeitlicher Ablauf

Die gesamte Dauer der durchgeführten Untersuchungen erstreckt sich über 4 Monate (Oktober 2016 bis Jänner 2017). In Tab. 2 ist der detaillierte Ablauf der Versuche mit den einzelnen Versuchszielen dargestellt.

Versuchsreihe	Versuch	Datum	Brandlast [MW]	Querschlag	Status Lüftung	Versuchsziel
A	#1	24.10.16	<i>gering</i> (3 - 6 MW)	Fluchttüre geöffnet	aktiv	Untersuchung ob / wieviel Rauch bei <i>geringer</i> Brandlast und höherer Längsströmung (hohe Druckdifferenz zwischen den Fahrröhren) in den QS eintritt. Zeitraum bis Rauch in den QS eintritt.
	#2			Fluchttüre geöffnet	aktiv	Untersuchung ob / wieviel Rauch bei <i>geringer</i> Brandlast und höherer Längsströmung (hohe Druckdifferenz zwischen den Fahrröhren) in den QS eintritt. Zeitraum bis Rauch in den QS eintritt.
B	#3	25.10.16	<i>gering</i> (3 - 6 MW)	Fluchttüre geöffnet	aktiv	Untersuchung ob / wieviel Rauch bei <i>geringer</i> Brandlast und <i>geringer</i> Längsströmung (geringe Druckdifferenz zwischen den Fahrröhren) in den QS eintritt. Zeitraum bis Rauch in den QS eintritt.
	#4			Fluchttüre geöffnet	aktiv	Untersuchung ob / wieviel Rauch bei <i>geringer</i> Brandlast und <i>geringer</i> Längsströmung (geringe Druckdifferenz zwischen den Fahrröhren) in den QS eintritt. Zeitraum bis Rauch in den QS eintritt.
C	#5	18.11.16	<i>mittel bis groß</i> (6 - 14 MW)	Fluchttüre geöffnet	aktiv	Untersuchung ob / wieviel Rauch bei <i>mittlerer</i> Brandlast und <i>geringer</i> Längsströmung (geringe Druckdifferenz zwischen den Fahrröhren) in den QS eintritt. Zeitraum bis Rauch in den QS eintritt.
	#6			Fluchttüre geöffnet	aktiv	Untersuchung ob / wieviel Rauch bei <i>großer</i> Brandlast und höherer Längsströmung (hohe Druckdifferenz zwischen den Fahrröhren) in den QS eintritt. Zeitraum bis Rauch in den QS eintritt.
D	#7	25.11.16	<i>gering bis groß</i> (3 - 20 MW)	Fluchttüre geöffnet	aktiv	Untersuchung ob / wieviel Rauch bei <i>großer</i> Brandlast und <i>geringer</i> Längsströmung (geringe Druckdifferenz zwischen den Fahrröhren) in den QS eintritt. Zeitraum bis Rauch in den QS eintritt.
	#8			Fluchttüre geöffnet	aktiv	Untersuchung ob / wieviel Rauch bei <i>geringer</i> Brandlast und <i>geringer</i> Längsströmung (geringe Druckdifferenz zwischen den Fahrröhren) in den QS eintritt. Zeitraum bis Rauch in den QS eintritt.
	#9			Fluchttüre geöffnet	aktiv	Untersuchung ob / wieviel Rauch bei <i>geringer</i> Brandlast und <i>geringer</i> Längsströmung (geringe Druckdifferenz zwischen den Fahrröhren) in den QS eintritt. Zeitraum bis Rauch in den QS eintritt. Untersuchung der Auswirkungen einer Rauchgaskühlung mittels HDWNA.
E	#10	16.12.16	<i>groß</i> (18 MW)	Fluchttüre geöffnet	aktiv	Untersuchung ob / wieviel Rauch bei <i>großer</i> Brandlast und <i>geringer</i> Längsströmung (geringe Druckdifferenz zwischen den Fahrröhren) in den QS eintritt. Zeitraum bis Rauch in den QS eintritt.

Versuchsreihe	Versuch	Datum	Brandlast [MW]	Querschlag	Status Lüftung	Versuchsziel
F	#11	12.01.17	mittel (10 MW)	Fluchttüre geöffnet	aktiv	Untersuchung ob / wieviel Rauch bei <i>mittlerer</i> Brandlast und sehr hoher Längsströmung (sehr hohe Druckdifferenz zwischen den Fahrrohren) in den QS eintritt. Zeitraum bis Rauch in den QS eintritt.
	#12			Fluchttüre geöffnet	aktiv	Untersuchung ob / wieviel Rauch bei <i>mittlerer</i> Brandlast und sehr hoher Längsströmung (sehr hohe Druckdifferenz zwischen den Fahrrohren) in den QS eintritt. Zeitraum bis Rauch in den QS eintritt.
G	#13	20.01.17	groß (maximal)	Fluchttüre geöffnet	aktiv	Untersuchung ob / wieviel Rauch bei <i>maximaler</i> Brandlast und höherer Längsströmung (hohe Druckdifferenz zwischen den Fahrrohren) in den QS eintritt. Zeitraum bis Rauch in den QS eintritt.
	#14			Fluchttüre geöffnet	aktiv	Untersuchung ob / wieviel Rauch bei <i>maximaler</i> Brandlast und geringer Längsströmung (geringe Druckdifferenz zwischen den Fahrrohren) in den QS eintritt. Zeitraum bis Rauch in den QS eintritt.

Tab. 2: Zeitlicher Versuchsablauf und Versuchsziele

Dabei bedeutet die Bezeichnung „Fluchttüre geöffnet“, dass die Fluchttüre auf der Seite des Querschlags zur Brandröhre hin offen war, der Abschluss zur sicheren Röhre jedoch geschlossen.^[101] In dieser Stellung kann ein Eindringen von Rauch in den Querschlag und damit in den Fluchtweg aufgrund einer nur geringen, dem Rauch entgegen wirkenden Luftströmung infolge Druckdifferenz zwischen den beiden Tunnelröhren nicht ausgeschlossen werden.

Test Nr.	Anzahl Brandtassen	Durchschnittliche Wärmefreisetzung	Maximale Wärmefreisetzung	Branddauer	Windgeschwindigkeit zu Versuchsbeginn	Durchschnittliche Windgeschwindigkeit
[#]	[#]	[MW]	[MW]	[min]	[m/s]	[m/s]
BV 1	2	2.3	4.0	00:15	1.54	1.30
BV 2	4	5.5	7.9	00:13	1.12	1.75
BV 3	2	2.3	4.0	00:16	0.60	1.22
BV 4	4	6.0	7.7	00:10	1.00	1.49
BV 5	6	7.2	11.5	00:12	1.20	1.74
BV 6	8	9.5	14.3	00:12	2.00	2.16
BV 7	8	14.5	19.5	00:08	1.43	1.77
BV 8	4	4.1	6.7	00:14	0.64	1.32
BV 9	4	6.0	8.0	00:10	1.23	1.54
BV 10	8	11.0	18.1	00:10	1.40	1.54
BV 11	6	5.0	9.3	00:17	2.30	2.21
BV 12	6	8.8	11.0	00:11	2.40	2.13
BV 13	10	9.0	21.0	00:16	2.00	1.91
BV 14	10	7.9	18.5	00:21	1.20	1.38

Tab. 3: Versuchsparameter

Tab. 3 enthält die wichtigsten Parameter der einzelnen Versuche. Die höchste maximale Brandlast wurde bei Versuch #13 mit 21 MW, die höchste durchschnittliche bei Brandversuch #7 mit 14,5 MW erreicht (s. auch Abb. 73).

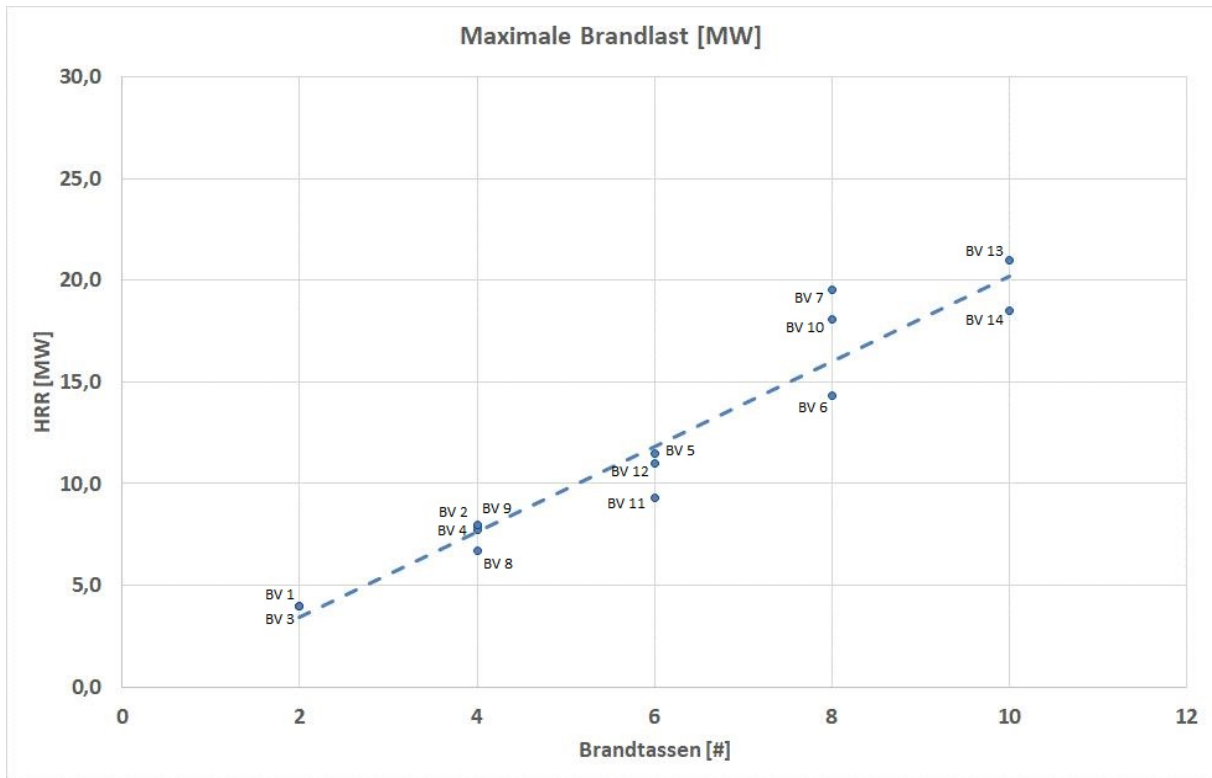


Abb. 73: Maximale Brandlasten

7.6 Messergebnisse

Prinzipiell konnte die Schichtung der Rauchgase hinsichtlich Temperatur und Sichtbarkeit gut aufgezeichnet werden. Die erreichten Luftgeschwindigkeiten während der Tests lagen stromaufwärts des Brandortes im Bereich von 1,5 bis 2,2 m/s. Diese recht moderaten Luftgeschwindigkeiten führten zu einer klar ausgebildeten Rauch- und Temperaturschichtung. Stromabwärts wurden selbst durch die Zugattrappe unmittelbar vor QS02 keine relevanten Turbulenzen ausgelöst. Ein gewisses Absinken von Rauch konnte dennoch beobachtet werden, allerdings nicht in einem Ausmaß, welches die Sicht in diesem Bereich stark reduziert hätte.

Die maximale Temperatur im Brandkanal betrug 615°C, die maximale Temperatur außerhalb, gemessen 15 m stromabwärts (MP6), fast 330°C (Versuch #14). Gleichzeitig blieben die Oberflächentemperaturen an der Betondecke immer unter den zulässigen 120°C (Sensor S7.1). Angemerkt werden muss allerdings, dass bei Versuch #14 die Hochdruckwassernebelanlage aktiviert werden musste, um die zulässigen Grenzen nicht zu überschreiten. Die Temperaturen im Fahrraum erreichten auf Höhen von ca. 2 m über Grund (Kopfhöhe) in den meisten Fällen nicht mehr als 40°C.

7.6.1 Versuche mit 2 Brandtassen

Die ersten Brandversuche wurden mit geringen Brandlasten ausgeführt und dienten primär der Erkundung und dem Kennenlernen der Versuchsanordnung.

Versuchsreihe	Versuch	Datum	Brandtassen	max. Brandlast	Zündung	Brand aus	Dauer	Strömung
	Nr.	tt.mm.jjjj	#	MW	hh:mm	hh:mm	Min	m/s
A	#1	24.10.2016	2	4,0	22:44	22:59	15	1,30
B	#3	25.10.2016		4,0	22:23	22:39	16	1,22

Tab. 4: Brandversuche #1 und #3

Bei den Brandversuchen #1 und #3 (s. Tab. 4) betragen die Strömungsgeschwindigkeiten im Mittel rd. 1,3 m/s bzw. 1,2 m/s. Mit der erreichten max. Brandlast (jeweils 4 MW) und diesen Strömungsgeschwindigkeiten ergab sich ein wenig ausgeprägtes Backlayering (ca. 20 bis 30 m, s. Abb. 74 rechts).



Abb. 74: Brandversuch #1 am 24.10.2016

Generell war die Rauchsichtung sehr schön ausgeprägt und während der gesamten Versuchsdauer herrschte sehr gute Sicht im Versuchsbereich (s. Abb. 74). Es erfolgte kein Raucheintritt in den Querschlag, außerdem herrschten unkritische Temperaturen ($< 20^{\circ}\text{C}$) bis 4 m unter Firste.

Bei einem Feuer mit 2 Brandtassen erreicht die Lufttemperatur im Deckenbereich der Brandschutzeinhausung max. ca. 140°C . Die austretenden Rauchgase erreichen 15 m hinter dem PROMAT-Kanal (MP6) im Deckenbereich Temperaturen von max. 85°C und in einer Höhe von etwa 2 m über der zukünftigen Fahrbahn erreichen die Temperaturen knapp über 20°C (s. Abb. 75).

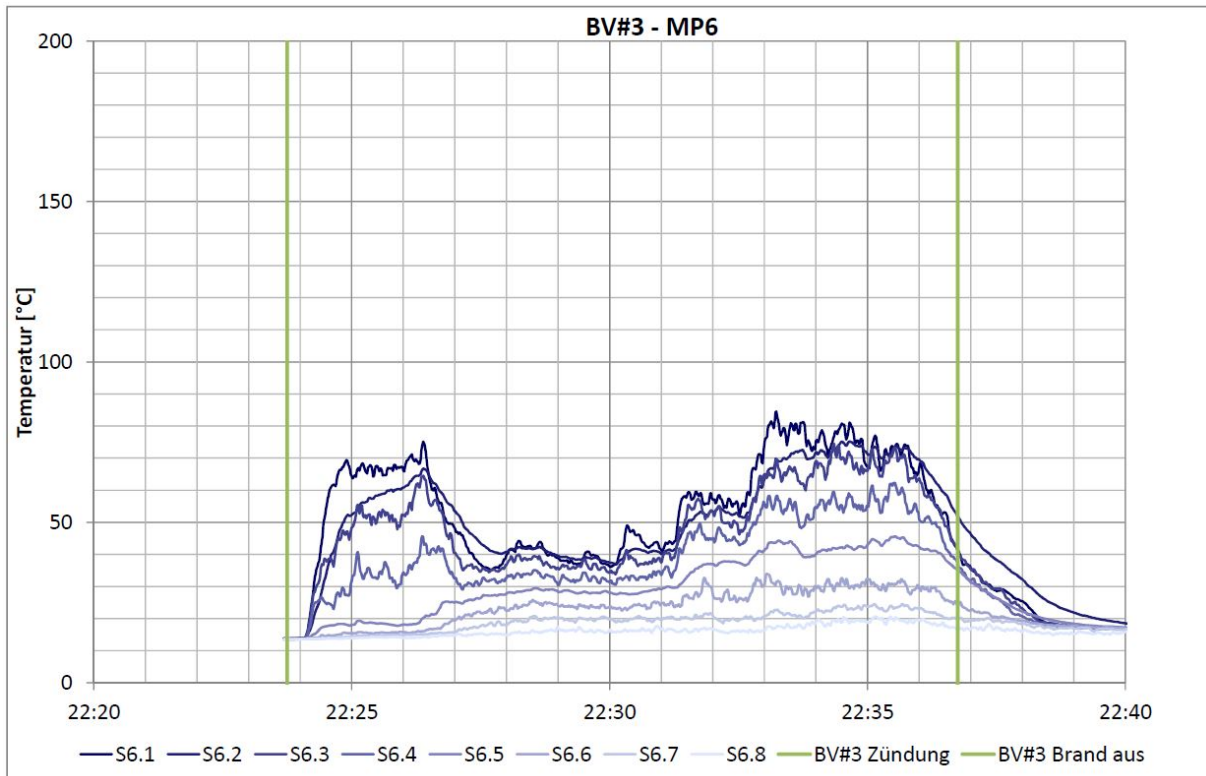


Abb. 75: Temperaturverlauf 15 m nach dem Brandkanal (MP6) bei Brandversuch #3

7.6.2 Versuche mit 4 Brandtassen

Bei den Brandversuchen #2, #4, #8 und #9 (s. Tab. 5) kamen jeweils 4 Brandtassen zum Einsatz.

Versuchsreihe	Versuch	Datum	Brandtassen	max. Brandlast	Zündung	Brand aus	Dauer	Strömung
	Nr.	tt.mm.jjjj	#	MW	hh:mm	hh:mm	Min	m/s
A	#2	24.10.2016	4	8,5	23:37	23:50	13	1,75
B	#4	25.10.2016		7,7	23:21	23:31	10	1,49
D	#8	25.11.2016		6,7	23:52	00:06	14	1,32
D	#9	25.11.2016		8,0	00:37	00:47	10	1,54

Tab. 5: Brandversuche #2, #4, #8 und #9

Bei einer max. Brandlast von 8,5 MW und einer mittleren Strömungsgeschwindigkeit von 1,75 m/s in Brandversuch #2 betrug das Backlayering ca. 110 m. Aufgrund einer etwas niedrigeren Anströmgeschwindigkeit zu Beginn von Versuch #4 betrug die Strömungsgeschwindigkeit im Mittel nur 1,49 m/s, das Backlayering erreichte dabei eine Länge von ca. 90 m.

Die Rauchschiichtung war bei beiden Versuchen wiederum sehr klar ausgeprägt und ebenso herrschte während der gesamten Versuchsdauer sehr gute Sicht im Versuchsbereich (s. Abb. 76). Auch erfolgte kein Raucheintritt in den Querschlag und die Temperaturen bewegten sich bis 4 m unter der Firste im unkritischen Bereich ($< 30^{\circ}\text{C}$).



Abb. 76: Brandversuch #4 am 25.10.2016

Mit 4 Brandtassen erreicht die Lufttemperatur im Deckenbereich der Brandschutzeinhausung bereits über 300°C , während die aus der Brandschutzeinhausung austretenden Rauchgase 15 m hinter dem PROMAT-Kanal (MP6) im Firstbereich noch Temperaturen von etwa 170°C erreichen. In einer Höhe von etwa 2 m über der zukünftigen Fahrbahn betragen die Temperaturen jedoch maximal moderate 30°C (s. Abb. 77).

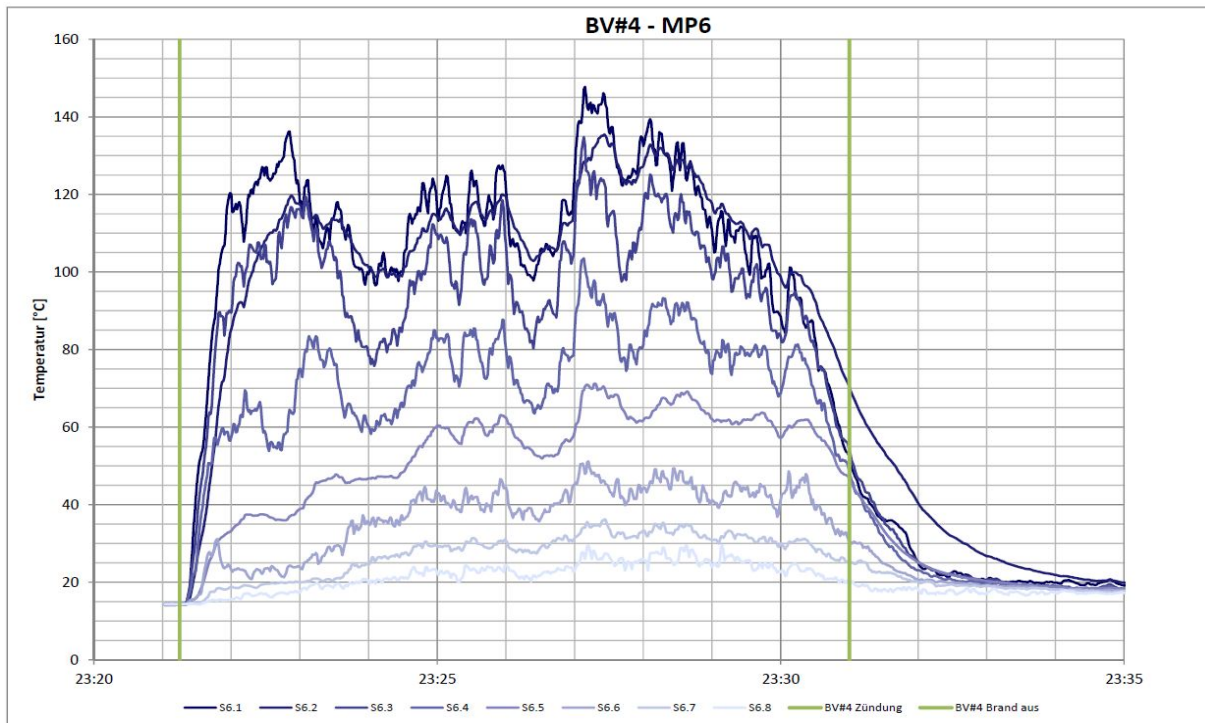


Abb. 77: Temperaturverlauf 15 m nach dem Brandkanal (MP6) bei Brandversuch #4

Die Lufttemperatur im Deckenbereich der Brandschutzeinhausung erreichen diesmal nur 280°C, während die aus der Brandschutzeinhausung austretenden Rauchgase 15 m hinter dem PROMAT-Kanal (MP6) im Firstbereich noch fast 150°C erreichen. An der Referenz-Messstelle (S7.1) wird im Beton eine Temperatur von 42,5°C gemessen gegenüber 58°C bei Brandversuch #2.

Die Brandversuche #8 (s. Abb. 78) und #9 wurden ohne aktive Lüftung, nur mit einer natürlichen Anströmgeschwindigkeit von ca. 0,7 m/s bzw. mit einer geringfügig höheren von ca. 1,2 m/s gestartet. Nach ca. 2 Minuten wurde die Geschwindigkeit mit Hilfe der Axialventilatoren erhöht, im Mittel betrug die Anströmgeschwindigkeit bei beiden Versuchen 1,4 bis 1,5 m/s. Durch die insgesamt eher niedrige Anströmgeschwindigkeit war die Abbranddauer etwas länger als gewöhnlich. Insgesamt wurden auch geringere Brandleistungen erreicht: 6,7 und 8,0 MW.



Abb. 78: Brandversuch #8 am 25.11.2016

Die Lufttemperatur im Deckenbereich der Brandschutzeinhausung erreicht bei Brandversuch #8 ca. 250°C, während die aus der Einhausung austretenden Rauchgase 15 m hinter dem PROMAT-Kanal (MP6) im Firstbereich noch Temperaturen von etwa 160°C haben. An der Referenz-Messstelle (S7.1) wird wieder eine Temperatur von knapp 60°C gemessen.

Bei Brandversuch #9 erreichte die Lufttemperatur im Deckenbereich der Brandschutzeinhausung relativ rasch ca. 390°C, an der Referenz-Messstelle (S7.2) wurde nach etwa 5 Minuten eine Betontemperatur von rd. 70°C gemessen (s. Abb. 79).

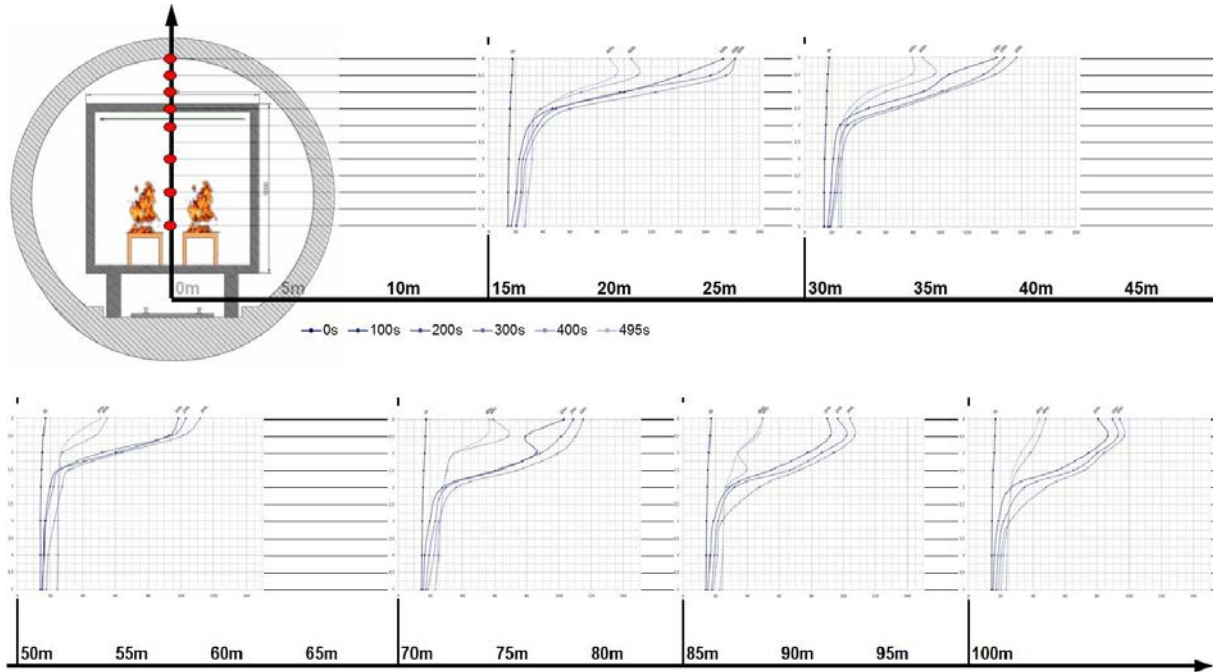


Abb. 79: Temperaturprofile stromab des Brandortes bei Brandversuch #9 mit einer durchschnittlichen Wärmefreisetzung von 4,6 MW und einem Spitzenwert von 8 MW

Danach wurde die Rauchgaskühlung aktiviert (s. Kap. 7.6.6).

7.6.3 Versuche mit 6 Brandtassen

Mit 6 Brandtassen werden bereits mittlere Brandlasten, d.h. maximale Brandleistungen von mehr als 10 MW erreicht. Jeweils 6 Brandtassen wurden bei den Brandversuchen #5, #11 und #12 eingesetzt (s. Tab. 6).

Versuchsreihe	Versuch	Datum	Brandtassen	max. Brandlast	Zündung	Brand aus	Dauer	Strömung
	Nr.	tt.mm.jjjj	#	MW	hh:mm	hh:mm	Min	m/s
C	#5	18.11.2016	6	11,5	22:33	22:45	12	1,74
F	#11	12.01.2017		9,3	22:42	22:59	17	2,21
F	#12	12.01.2017		10,4	23:41	23:52	11	2,13

Tab. 6: Brandversuche #5, #11 und #12

Das Abbrennen von 150 Litern Benzin/Diesel-Gemisch erzeugt beträchtliche Rauchmengen, was sich auch im Backlayering zeigt. Der stromaufwärts entstehende Rauch ist sehr dicht und füllt bereits einen großen Teil des Querschnitts aus. Dies ist auch dem Umstand geschuldet, dass bei Brandversuch #5 (s. Abb. 80) die Anströmgeschwindigkeit zu Beginn recht niedrig (1,0 bis 1,2 m/s) war. Außerdem wurden während des Versuchs kurzzeitig beide Querschlagtüren gleichzeitig geöffnet, wodurch es zu einem Kurzschluss über den Querschlag QS02 kam, was zu Verwirbelungen in der Brandröhre stromabwärts führte.



Abb. 80: Brandversuch #5 am 18.11.2016

Die Lufttemperatur im Deckenbereich der Brandschutzeinhausung erreicht bereits mehr als 350°C, die daraus austretenden Rauchgase haben 15 m hinter dem PROMAT-Kanal (MP6) im Firstbereich noch Temperaturen von ca. 200°C. An der Referenz-Messstelle (S7.1) wird eine Temperatur von max. 70°C gemessen.

Trotz der sehr starken Rauchentwicklung mit etwas weiterem Backlayering war die Rauchsichtung zu Beginn sehr klar ausgeprägt. Allerdings reichte das Backlayering im weiteren Verlauf tlw. bis zum Boden, vermutlich indirekt eine Folge des Öffnens der Querschlagtüren. Während der gesamten Versuchsdauer herrschte trotzdem noch ausreichende Sicht im Versuchsbereich, außerdem erfolgte wiederum kein Raucheintritt in den Querschlag. Bis 4 m unter Firste herrschten nach wie vor unkritische Temperaturen (< 25°C).

Bei Betrachtung der Temperaturen im Bereich des Querschlags (MP4) erkennt man deutlich, wie beim Öffnen beider Querschlagtüren (ca. 22:41) die Temperaturen durch die Frischluftzufuhr aus der parallelen Röhre stark abnehmen (s. Abb. 81). Gleichzeitig wird dadurch die Zuströmung zum Brand reduziert, was durch ein Absinken der Anströmgeschwindigkeit von rd. 2,3 auf ca. 2,0 m/s messtechnisch dokumentiert wird.

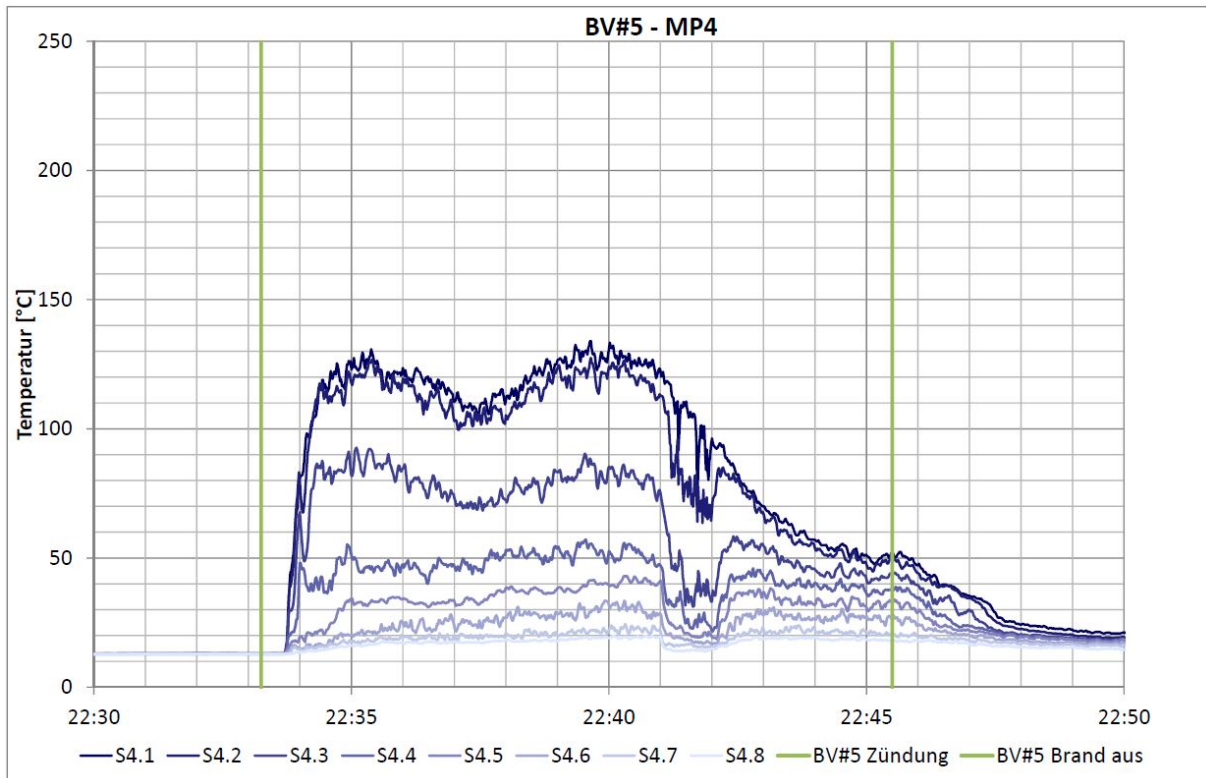


Abb. 81: Temperaturverlauf im Bereich des Querschlags (MP4) bei Brandversuch #5

Die Brandversuche #11 und #12 wurden mit etwas höheren Längsströmungsgeschwindigkeiten durchgeführt. Im Durchschnitt betragen die Anströmgeschwindigkeiten an der Messstelle LG04 2,2 m/s (BV#11, s. Abb. 82) und 2,1 m/s (BV#12).

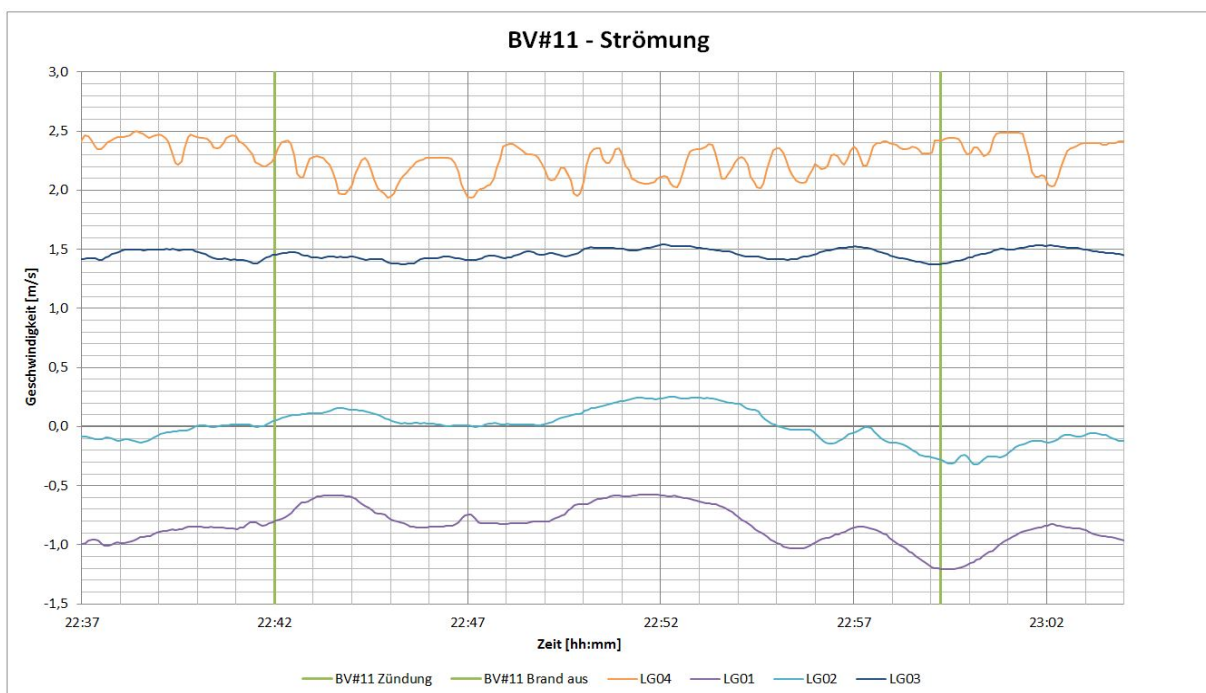


Abb. 82: Längsströmungsgeschwindigkeiten bei Brandversuch #11

Bei Brandversuch #11 ergab sich dadurch eine um ca. 20 % geringere maximale Wärmefreisetzung als beim Brandversuch #5 mit der gleichen Brennstoffmenge. Auch die erreichten Temperaturen sind etwas geringer, so erreichen die aus der Brandschutzeinhausung austretenden Rauchgase 15 m hinter dem PROMAT-Kanal (MP6) im Firstbereich Temperaturen von rd. 130°C. In einer Höhe von etwa 2 m über der zukünftigen Fahrbahn betragen die Temperaturen etwas mehr als 30°C (s. Abb. 83). An der Referenz-Messstelle (S7.1) wird eine Betontemperatur von nicht einmal 40°C gemessen.

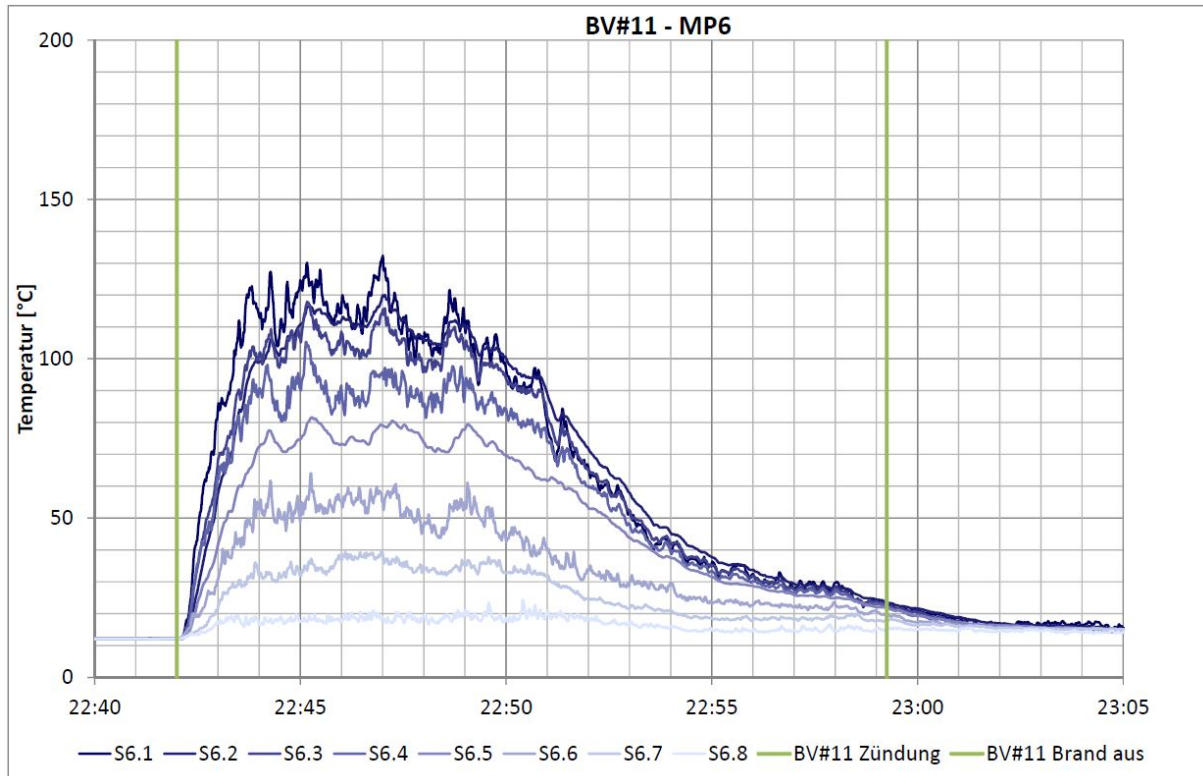


Abb. 83: Temperaturverlauf 15 m nach dem Brandkanal (MP6) bei Brandversuch #11

Bei Brandversuch #12 wurden zusätzlich mehrere EURO-Paletten aus Holz auf die Brandtassen gelegt. Somit kamen zu den etwa 123 kg flüssigen Brennstoff etwa 100 kg fester Brennstoff hinzu. Die Branddauer wurde bei diesem Versuch bis zum Abbrand des flüssigen Brennstoffs (Lachenbrand) definiert und betrug aufgrund der größeren Brandlast nur zwischen 11 und 12 Minuten, danach brannten nur noch die Holzpaletten längere Zeit weiter.

Durch die Verbrennung des zusätzlichen Holzes zusammen mit dem flüssigen Brennstoff wurden etwas höhere Temperaturen als beim vorangegangenen Brandversuch #11 erreicht. So erreichen die Temperaturen 15 m hinter dem PROMAT-Kanal (MP6) im Firstbereich max. 165°C, ca. 2 m über der zukünftigen Fahrbahn wiederum nur rd. 35°C (s. Abb. 84). Auch an der Referenz-Messstelle (S7.1) wird mit 48°C eine etwas höhere Temperatur gemessen.

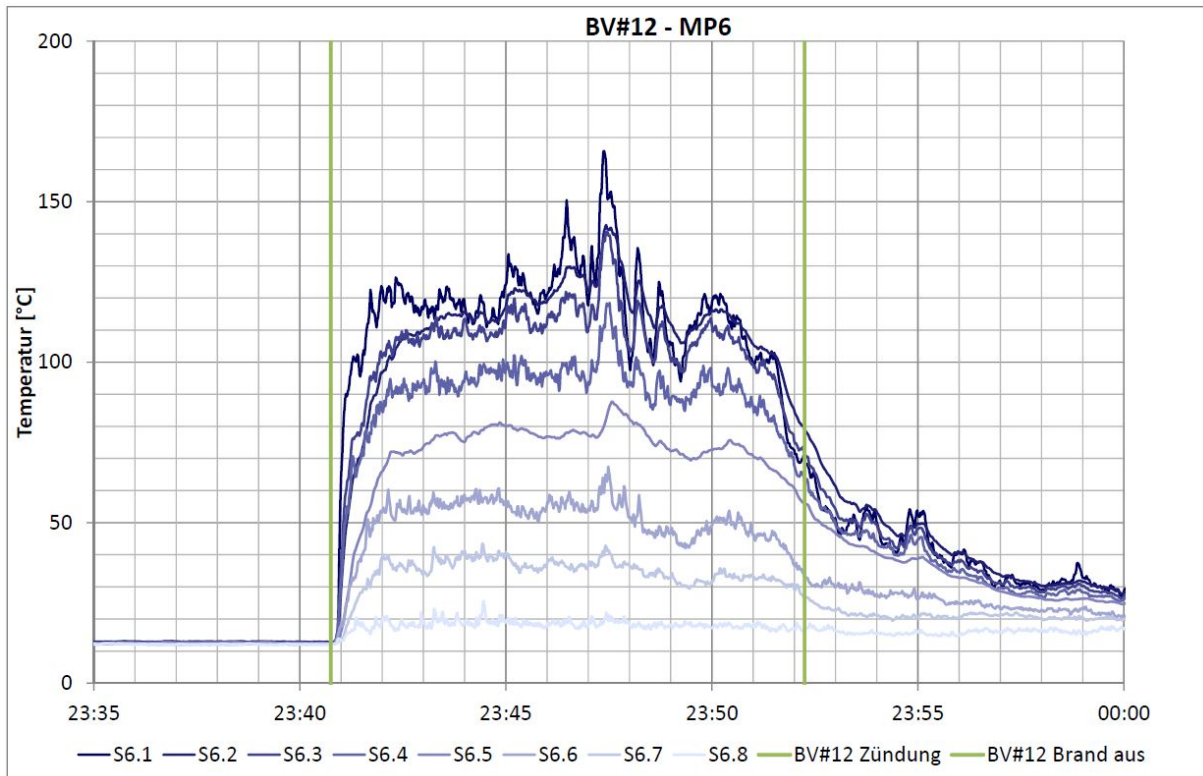


Abb. 84: Temperaturverlauf 15 m nach dem Brandkanal (MP6) bei Brandversuch #12

7.6.4 Versuche mit 8 Brandtassen

Bei Einsatz von 8 Brandtassen (Brandversuche #6, #7 und #10) wurden bereits hohe bis sehr hohe max. Brandlasten (nahezu 20 MW) erreicht (s. Tab. 7).

Versuchsreihe	Versuch	Datum	Brandtassen	max. Brandlast	Zündung	Brand aus	Dauer	Strömung
	Nr.	tt.mm.jjjj	#	MW	hh:mm	hh:mm	Min	m/s
C	#6	18.11.2016	8	14,3	00:16	00:28	12	2,16
D	#7	25.11.2016		19,5	22:36	22:44	8	1,77
E	#10	16.12.2016		18,1	23:18	23:28	10	1,54

Tab. 7: Brandversuche #6, #7 und #10

Bei Brandversuch #6 (s. Abb. 85) wurde versucht eine höhere Anströmgeschwindigkeit einzustellen. Zu Beginn wurde eine Geschwindigkeit von ca. 2,1 m/s erreicht. Etwa 4 Minuten nach Brandbeginn wurde durch Erhöhung der Ventilatorfrequenz kurzzeitig eine Anströmgeschwindigkeit von 2,9 m/s erzielt. Zwei Minuten später wurden die Frequenzumformer wieder zurückgeregelt, wodurch sich die Anströmgeschwindigkeit wieder auf rd. 2 m/s reduziert hat.



Abb. 85: Brandversuch #6 am 18.11.2016

Die mit 200 Liter Diesel-/Benzingemisch entzündeten Brandtassen verursachen beträchtliche Rauchmengen. Der Rauch stromaufwärts ist wiederum sehr dicht und füllt einen Großteil des Querschnitts aus, das Backlayering reicht nach einiger Zeit bis zum Boden (s. Abb. 85, rechts). Dadurch ist die Sichtfähigkeit nicht mehr vollständig gegeben.

Die Lufttemperatur im Deckenbereich der Brandschutzeinhausung erreicht 385°C , während die aus der Brandschutzeinhausung austretenden Rauchgase 15 m hinter dem PROMAT-Kanal (MP6) im Firstbereich noch Temperaturen von bis zu 240°C haben. Ca. 2 m über der zukünftigen Fahrbahn wird eine Temperatur von rd. 40°C gemessen (s. Abb. 86), im Beton an der Referenz-Messstelle (S7.1) etwa 90°C .

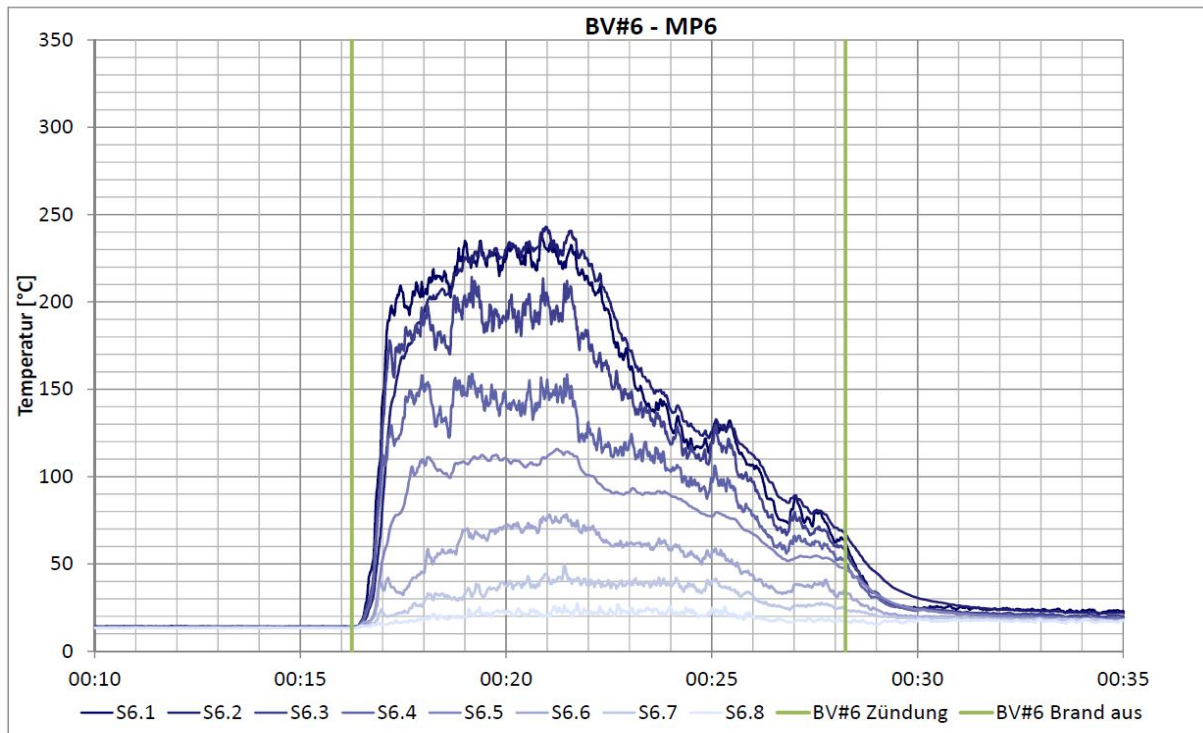


Abb. 86: Temperaturverlauf 15 m nach dem Brandkanal (MP6) bei Brandversuch #6

Bei Brandversuch #7 wird eine maximale Brandlast von 19,5 MW erreicht. Demzufolge steigt die Lufttemperatur im Deckenbereich der Brandschutzeinhausung auf über 410°C, während die aus der Brandschutzeinhausung austretenden Rauchgase 15 m hinter dem PROMAT-Kanal (MP6) im Firstbereich noch Temperaturen von etwa 270°C haben (s. Abb. 87). An der Referenz-Messstelle (S7.2) wird eine noch zulässige Temperatur von knapp 120°C gemessen. Etwa 2 m über der zukünftigen Fahrbahn herrschen bei dieser Brandleistung bereits ziemlich hohe Temperaturen (< 50°C).

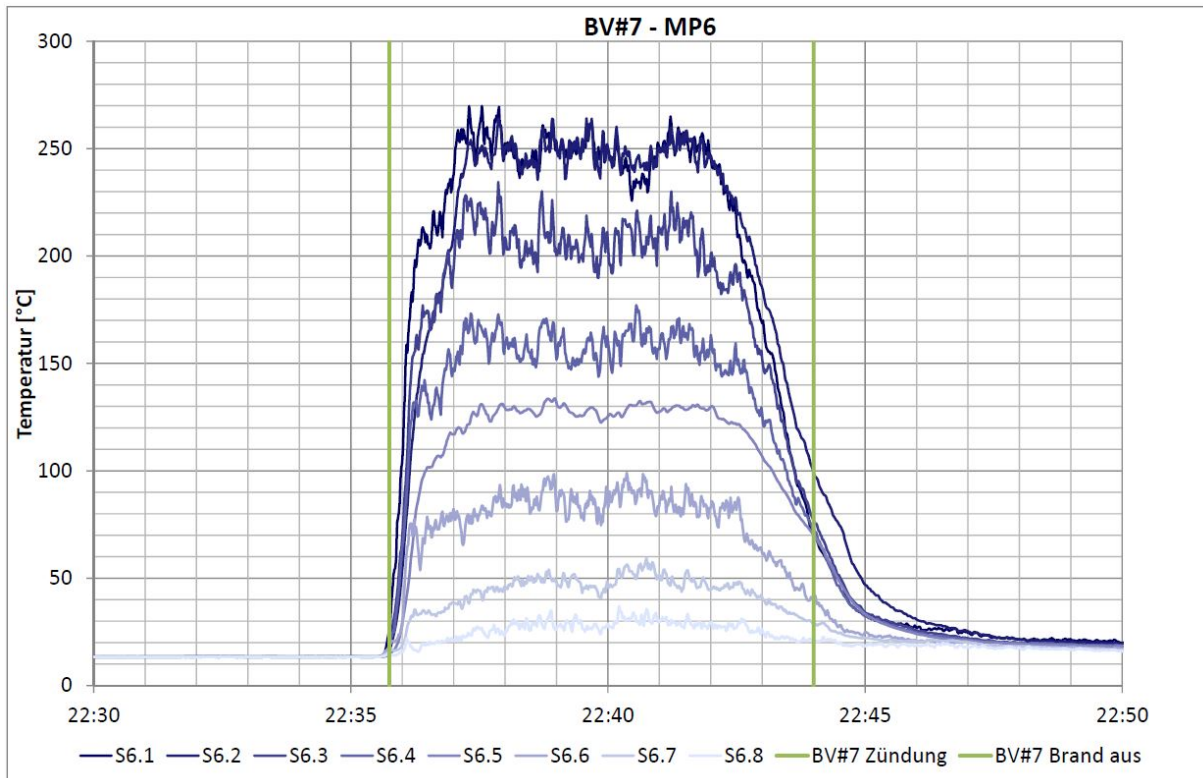


Abb. 87: Temperaturverlauf 15 m nach dem Brandkanal (MP6) bei Brandversuch #7

Bei Brandversuch #10 wurde mit 18,1 MW eine etwas geringere maximale Brandlast erzielt. Die Lufttemperatur erreichte im Deckenbereich der Brandschutzeinhausung trotzdem ca. 540°C. Auch die 15 m hinter dem PROMAT-Kanal aus der Brandschutzeinhausung austretenden Rauchgase (MP6) im Firstbereich erreichen Temperaturen von fast 300°C (s. Abb. 88). Diese Diskrepanz kann mit der niedrigeren Anströmgeschwindigkeit von 1,4 bis 1,9 m/s (bei BV#7 > 2,0 m/s) begründet werden.

Auch an der Referenz-Messstelle (S7.2) wurde während des Versuchs #10 eine etwas geringere Betontemperatur erreicht (rd. 105°C). Dagegen erreichen die Temperaturen in einer Höhe von etwa 2 m über der zukünftigen Fahrbahn mit ca. 50°C gleiche Werte.

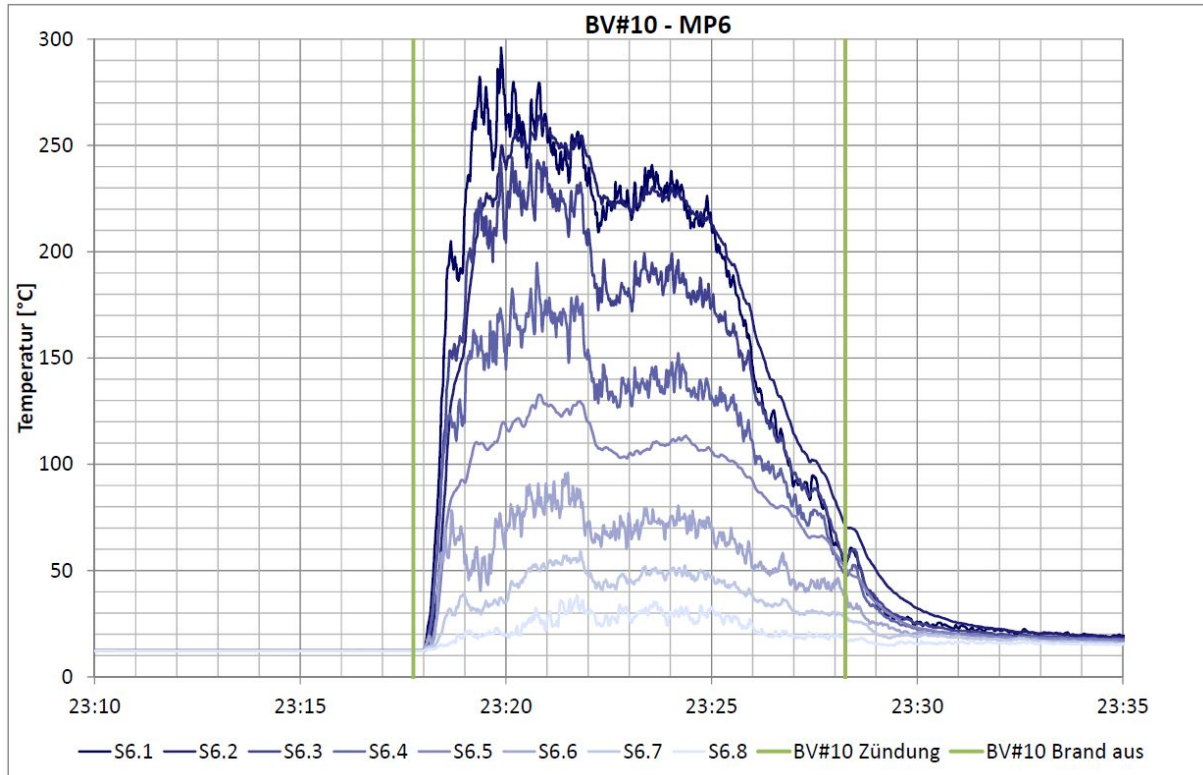


Abb. 88: Temperaturverlauf 15 m nach dem Brandkanal (MP6) bei Brandversuch #10

Trotz der jeweils starken Rauchentwicklung mit weitem Backlayering erfolgte auch bei keinem der Brandversuche mit 8 Brandtassen ein Raucheintritt in den Querschlag.

7.6.5 Versuche mit 10 Brandtassen

Die höchsten Brandlasten wurden naturgemäß bei den Brandversuchen mit 10 Brandtassen erzielt. Bei den Brandversuchen #13 und #14 (s. Tab. 8) kamen auf diese Weise jeweils 250 Liter Diesel-/ Benzingemisch zum Einsatz.

Versuchsreihe	Versuch	Datum	Brandtassen	max. Brandlast	Zündung	Brand aus	Dauer	Strömung
	Nr.	tt.mm.jjjj	#	MW	hh:mm	hh:mm	Min	m/s
G	#13	20.01.2017	10	21,0	22:34	22:50	16	1,91
G	#14	20.01.2017		18,5	23:58	00:19	21	1,38

Tab. 8: Brandversuche #13 und #14

Die Brandversuche der Versuchsreihe G stellten den Schlusspunkt der Großversuche zu den messtechnischen Untersuchungen dar und wurden daher mit den höchstmöglichen Brandlasten durchgeführt.



Abb. 89: Brandversuch #13 am 20.01.2017

Wie die Versuche mit 8 Brandtassen gezeigt hatten, musste bei dieser Brandlast damit gerechnet werden, dass die maximal zulässige Betontemperatur überschritten wird. Deshalb wurde die HDWNA in Bereitschaft versetzt, um im Ernstfall aktiviert werden zu können.

Für den Brandversuch #13 (s. Abb. 89) wurde eine Anströmgeschwindigkeit von ca. 2,0 m/s eingestellt und während der gesamten Versuchsdauer gehalten, wodurch im Beton an der Referenz-Temperaturmessstelle (S7.2) ein Maximalwert von lediglich rd. 100°C erreicht wurde und die HDWNA daher nicht aktiviert werden musste.

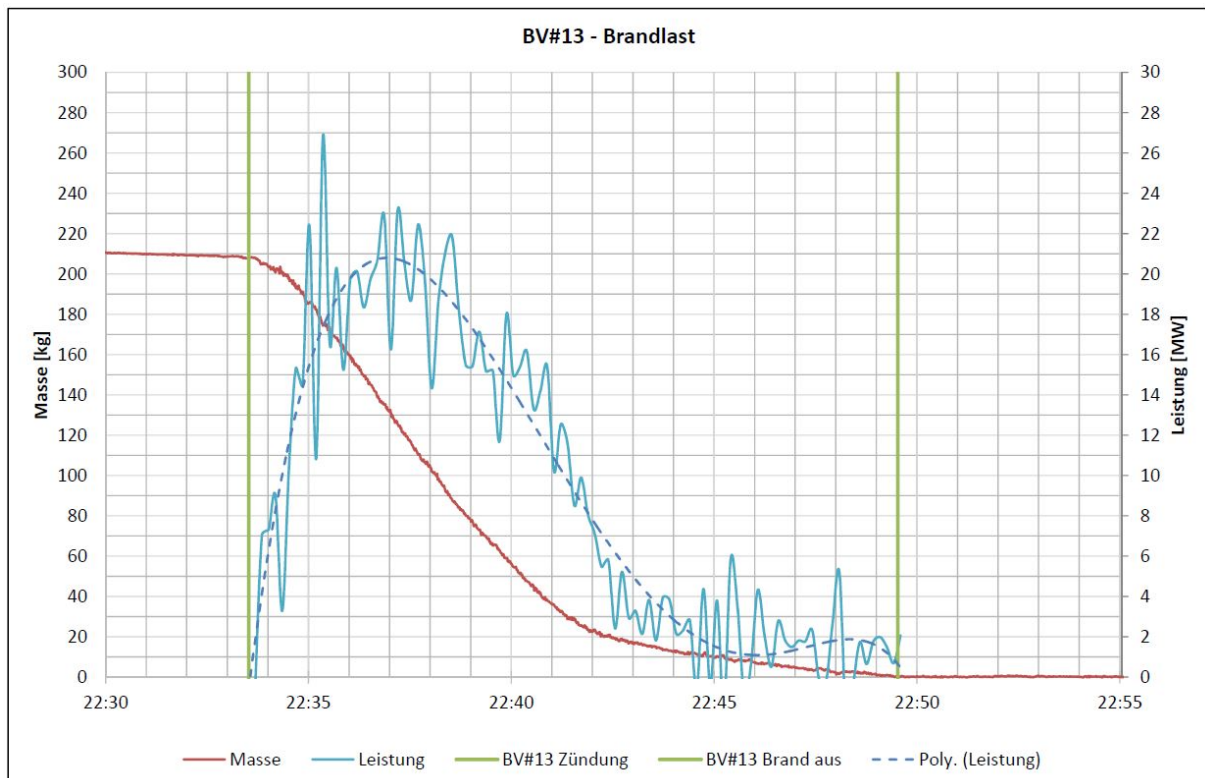


Abb. 90: Brandleistung bei Brandversuch #13

In Abb. 90 ist die über die sekundliche Massenabnahme berechnete Brandleistung dargestellt. Um die aufgrund von Messchwankungen bewirkten starken (berechneten) Leistungsschwankungen zu eliminieren, wird in die Graphik eine polynomische Trendlinie 6. Ordnung eingefügt. Die maximale Brandleistung wird daher im Hochpunkt abgelesen und die mittlere Brandleistung errechnet sich aus der verbrannten Brennstoffmenge dividiert durch die dafür benötigte Zeit. Somit wurde beim Brandversuch #13 mit 21 MW die höchste maximale Brandleistung von allen Versuchen erreicht (s. Abb. 90).

Die Lufttemperatur im Deckenbereich der Brandschutzeinhausung erreicht nahezu 420°C, während die aus der Brandschutzeinhausung austretenden Rauchgase 15 m hinter dem PROMAT-Kanal (MP6) im Firstbereich noch Temperaturen über 280°C haben (s. Abb. 91).

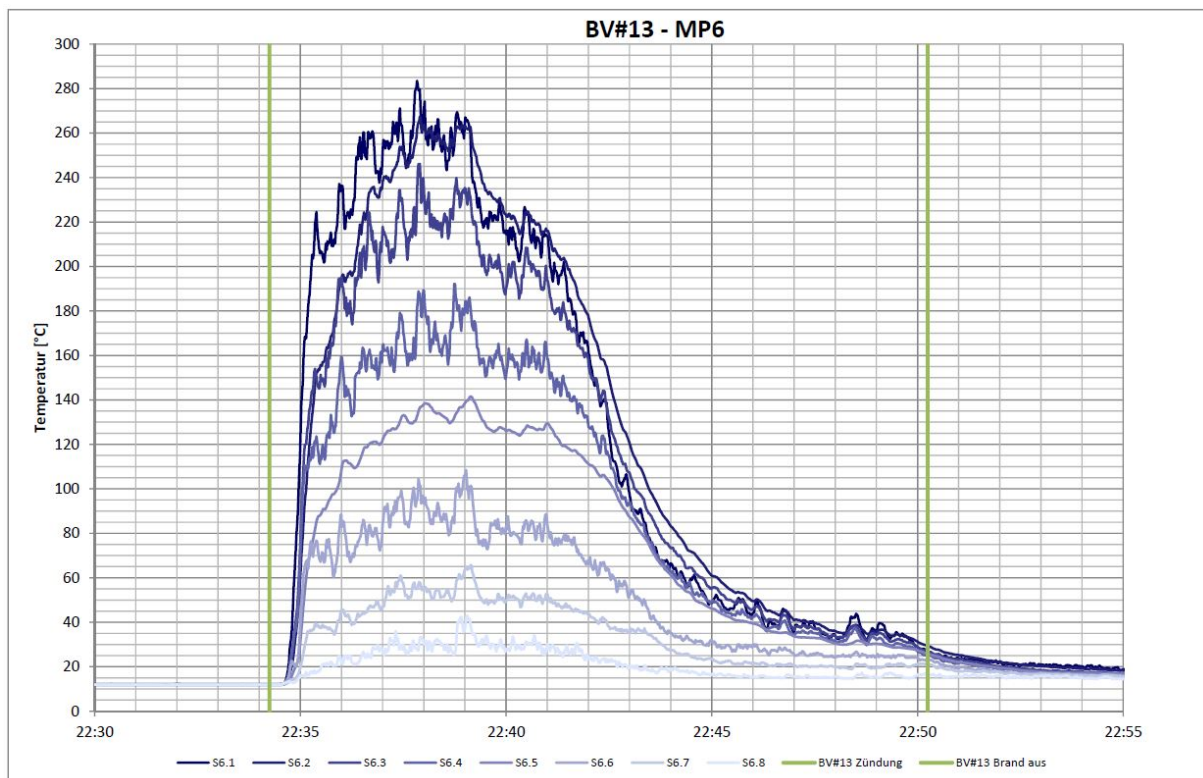


Abb. 91: Temperaturverlauf 15 m nach dem Brandkanal (MP6) bei Brandversuch #13

Etwa 2 m über der zukünftigen Fahrbahn herrschen bei der höchsten Brandleistung Temperaturen von höchstens 55°C. Trotz der sehr starken Rauchentwicklung mit stark ausgeprägtem Backlayering erfolgte auch bei Brandversuch #13 mit der höchsten Brandleistung aller Versuche kein Raucheintritt in den Querschlag.

Für den Brandversuch #14 (s. Abb. 95) wurde mit ca. 1,4 m/s eine niedrigere Anströmgeschwindigkeit eingestellt und während des Versuchs relativ konstant gehalten. Dadurch

wurde nach rd. 4 Minuten an den Referenz-Temperaturmessstellen (S7.1) der maximal zulässige Wert von 120°C erreicht und die HDWNA-Brandbekämpfungsanlage aktiviert (s. Kap. 7.6.6). Danach verzögert sich die Energiefreisetzung deutlich und die gemessenen Temperaturen gehen zurück.

7.6.6 Einsatz der Hochdruckwassernebelanlage

Bei Brandversuch #9 am 25.11.2016 (s. Kap. 7.6.2) wurde die Hochdruckwassernebelanlage (s. Kap. 7.4.7) als Rauchgaskühlung zum ersten Mal eingesetzt. Bei einem Brand mit 4 Brandtassen und mit einer anfänglich geringen Anströmgeschwindigkeit wurde am Referenzmesspunkt (S7.2) rasch eine Temperatur von über 70°C erreicht. Dann wurde die Rauchgaskühlung aktiviert, wodurch die Rauchgastemperatur 15 m hinter dem PROMAT-Kanal (MP6) schlagartig von etwa 190°C auf ca. 120°C abnimmt (s. Abb. 92).

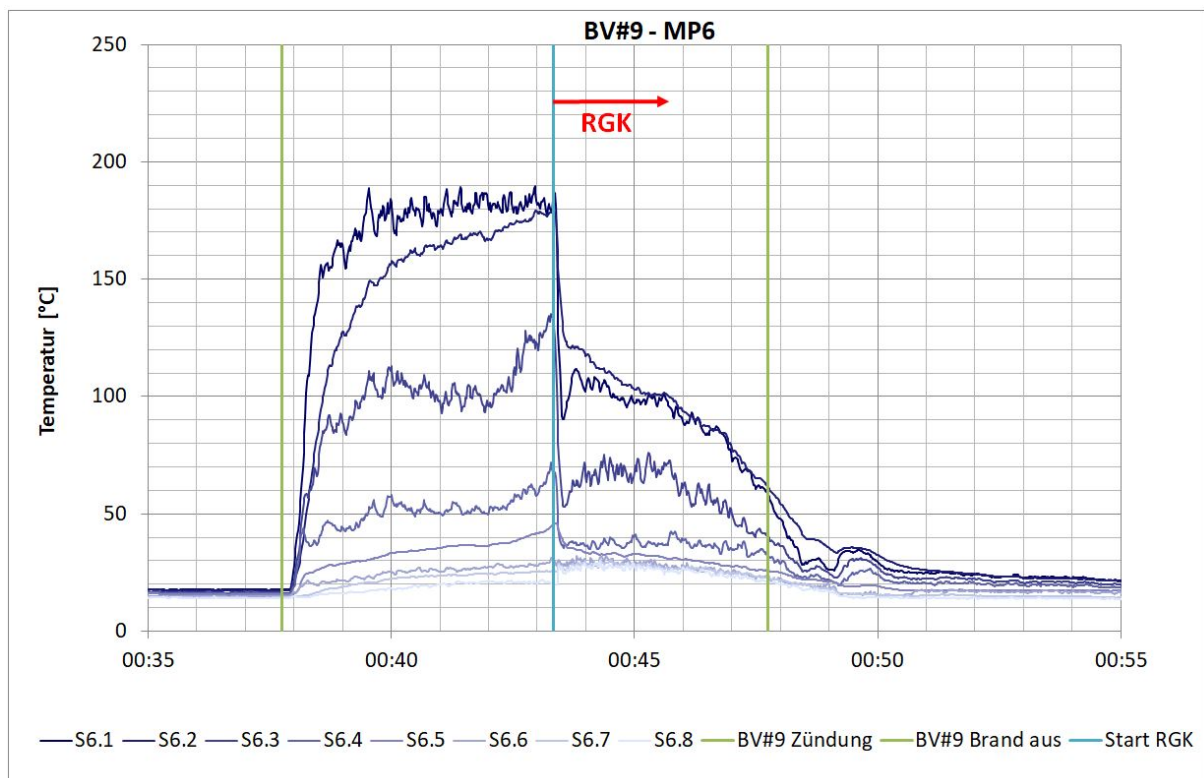


Abb. 92: Temperaturverlauf 15 m nach dem Brandkanal (MP6) bei Brandversuch #9

Aus den vertikalen Temperaturprofilen des Versuchs #9 (z.B. MP6, s. Abb. 93) ist ersichtlich, dass ca. 200 s nach Brandbeginn die maximale Temperatur erreicht und bis zum Einsatz der Rauchgaskühlung (RGK) gehalten wird. Durch den Einsatz der RGK werden die Temperaturen in allen Schichten deutlich gesenkt.

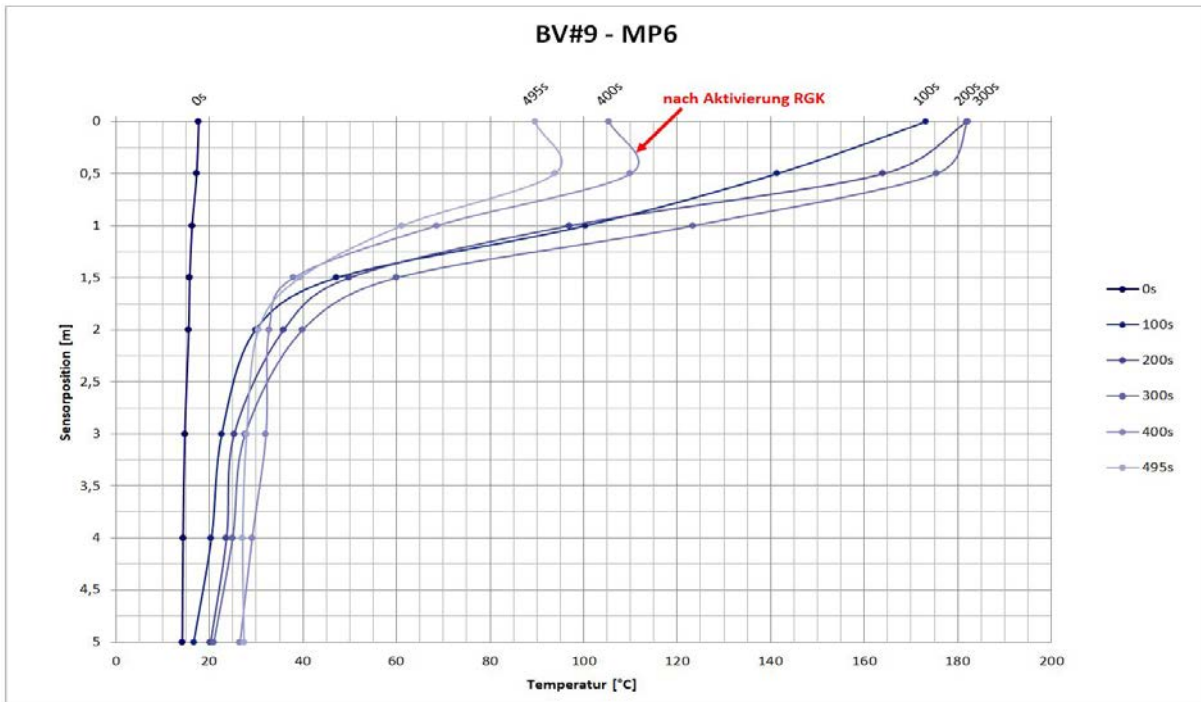


Abb. 93: Vertikale Temperaturprofile 15 m nach dem Brandkanal (MP6) bei Brandversuch #9

Allerdings ist der Einsatz der Rauchgaskühlung mit einer starken Rauchverwirbelung verbunden. Darüber hinaus führt die Kombination von Rauch und Wasser erwartungsgemäß zu einem Auswaschen des Rußes aus dem Rauch und somit zu einer sehr starken Verschmutzung der Umgebung (s. Abb. 94).



Abb. 94: Feuerwehrmann nach dem Einsatz der Rauchgaskühlung



Abb. 95: Brandversuch #14 am 20.01.2017

Bei Brandversuch #14 wurde nach einigen Minuten die HDWNA zur Brandbekämpfung und zum Bauwerksschutz aktiviert (s. Abb. 95 rechts). Zu Beginn des Brandes betrug die Längsströmungsgeschwindigkeit ca. 1,2 m/s und mit 18,5 MW eine etwas geringere maximale Brandlast als beim vorangegangenen Versuch #13 erzielt (s. Abb. 96).

Vor der Aktivierung erreichte die Lufttemperatur im Deckenbereich der Brandschutzeinhausung aufgrund der geringen Kühlwirkung der Frischluft jedoch fast 620°C.

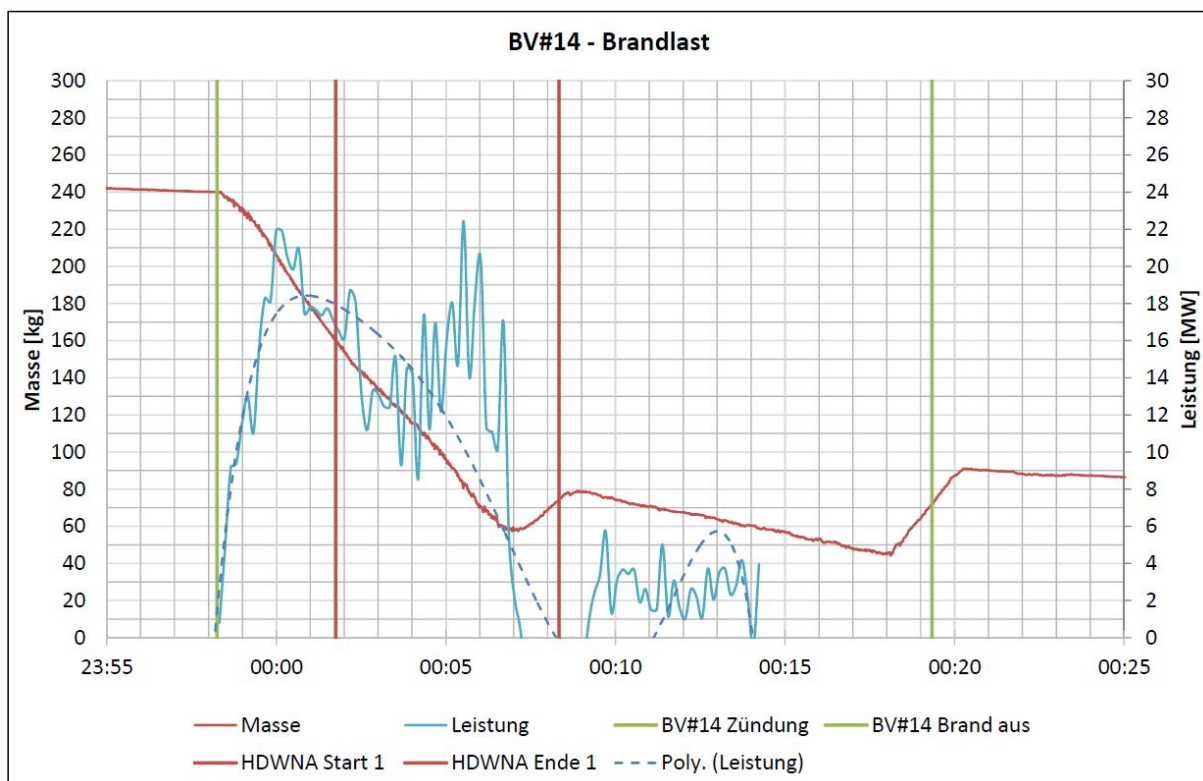


Abb. 96: Brandleistung bei Brandversuch #14

Auch die 15 m hinter dem PROMAT-Kanal aus der Brandschutzeinhausung austretenden Rauchgase (MP6) im Firstbereich haben bis unmittelbar nach Aktivierung der HDWNA Temperaturen von rd. 330°C (s. Abb. 97).

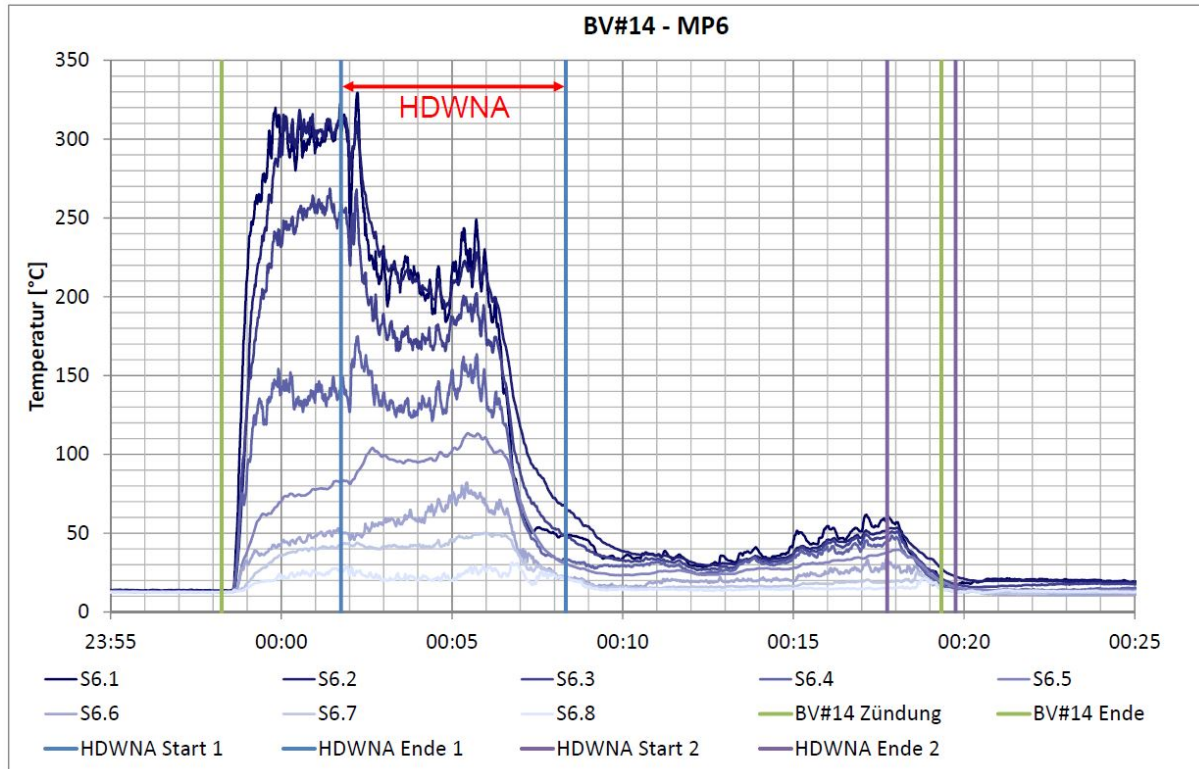


Abb. 97: Temperaturverlauf 15 m nach dem Brandkanal (MP6) bei Brandversuch #14

An der Referenz-Messstelle (S7.2) wurde während des Versuchs eine Betontemperatur von rd. 105°C erreicht. Die Temperaturen in einer Höhe von etwa 2 m über der zukünftigen Fahrbahn erreichen mit ca. 40°C etwas niedrigere Werte als bei Brandversuch #13.

Erwartungsgemäß stellte sich wiederum eine sehr starke Rauchentwicklung mit weitem Backlayering ein. Jedoch erfolgte wieder kein Raucheintritt in den Querschlag.

Das System der Fa. AQUASYS arbeitet mit einem Druck von 30 bar, die versprühte Wassermenge beträgt etwa 0,8 l/min/m³. Obwohl die Anlage eigentlich so installiert war, dass die gesamte Fläche der Brandschutzeinhausung erfasst werden sollte, wurde während des Versuchs aufgrund der Anströmgeschwindigkeit nicht die gesamte Brennstofffläche erreicht.

Kurz nach dem Einschalten der HDWNA (ca. 200 s) kommt es zu einer deutlichen Temperaturabnahme (s. Abb. 98) und mit etwas Verzögerung auch zum Absinken der Brandleistung (s. Abb. 96). Die durch die HDWNA entstehende Rauchverwirbelung hat abströmseitig jedoch nur kurzzeitig zu Sichtbeeinträchtigungen geführt.

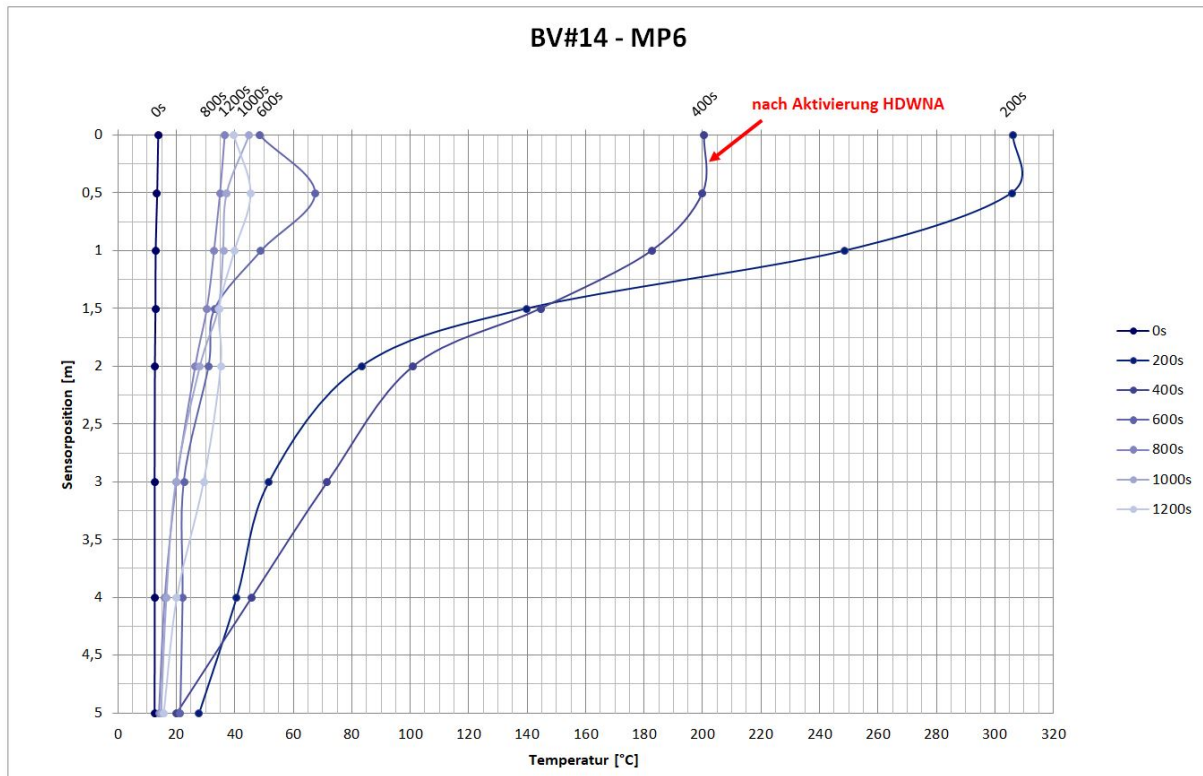


Abb. 98: Vertikale Temperaturprofile 15 m nach dem Brandkanal (MP6) bei Brandversuch #14

7.6.7 Türöffnungskräfte

Um festzustellen, ob die maximal zulässige Kraft von 100 N zum vollständigen Öffnen der Fluchtwegtüre eingehalten werden kann, wurden die Türöffnungskräfte bei unterschiedlichen Druckverhältnissen in den beiden Tunnelröhren untersucht.

Dabei hat sich gezeigt, dass schon ohne Druckdifferenz zwischen den beiden Fahrtunneln die Türöffnungskraft der Pendeltür rd. 100 N beträgt. Wie zu erwarten steigt die Türöffnungskraft mit Zunahme der Druckdifferenz zwischen den Röhren z.T. deutlich an.

PENDELTÜR				SCHIEBETÜR			
Datum	Uhrzeit	Differenzdruck	Kraft	Datum	Uhrzeit	Differenzdruck	Kraft
[TT:MM:JJ]	[hh:mm]	[Pa]	[N]	[TT:MM:JJ]	[hh:mm]	[Pa]	[N]
20.01.2017	17:10	0	100	20.01.2017	17:08	0	120
	17:13	20	120		17:12	20	120
	17:20	60	155		17:18	60	115
	17:23	80	180		17:22	80	120
	17:26	100	210		17:25	100	120
	17:07	200	280		17:05	200	115

Tab. 9: Türöffnungskräfte für Pendeltür und Schiebetür

Auch die Türöffnungskraft der Schiebetüre beträgt bereits ohne Druckbelastung zwischen den beiden Fahrtunneln rd. 120 N (s. Tab. 9). Es kann jedoch davon ausgegangen werden, dass dieser Wert bei optimaler Einstellung der Türe noch deutlich unterschritten werden kann. Im Gegensatz zur Pendeltüre ändert sich die Türöffnungskraft auch bei Erhöhung des Druckunterschiedes erwartungsgemäß nicht.

7.7 Zusammenfassung der Versuchsergebnisse

Im Zuge der Versuche stellte sich heraus, dass das aerodynamische System im Tunnel sehr instabil war. Trotz konstanter Ventilator-Einstellung am Ostportal der Nordröhre konnte in keinem Fall eine konstante Anströmgeschwindigkeit im Versuchsabschnitt erreicht werden. Variierende Bedingungen bzgl. Temperatur und relativer Feuchte der anströmenden Luft erschwerten die Vergleichbarkeit der einzelnen Versuche.

7.7.1 Geringe durchschnittliche Brandlasten bis ca. 6 MW

Bei geringen durchschnittlichen Brandlasten bis ca. 6 MW ergab sich erwartungsgemäß eine nur schwache Rauchentwicklung, weshalb bei Längsströmungsgeschwindigkeiten von mehr als 1 m/s im Bereich des Brandherdes der Tunnelquerschnitt auch nur gering verraucht wurde. Der Rauch bewegte sich aufgrund des thermischen Auftriebs entlang der Tunneldecke in Strömungsrichtung, sodass ein Bereich von etwa 3 m ab dem Boden rauchfrei blieb. Auch die Versperrung des Tunnelquerschnitts durch die Zugattrappe hatte keinen negativen Einfluss auf die Sicht in Bodennähe, da der Rauch über dem Wagen ausreichend Platz fand.

Eine Strömungsgeschwindigkeit von etwa 1,5 m/s war ausreichend, um ein Backlayering (Rückströmen des Rauchs gegen die Strömungsrichtung) zu verhindern. Bei einer reduzierten Längsströmungsgeschwindigkeit von etwa 0,5 m/s betrug das Backlayering je nach Brandlast rd. 40 bis 90 m. Der Rauch blieb jedoch immer an der Tunnelfirste, die Sicht auf Augenhöhe und auch darüber war zu jeder Zeit gut.

In keinem Fall war das Eindringen von Rauch in den Querschlag zu beobachten. Das lag zum einen an der Druckdifferenz von etwa 50 Pa zwischen den beiden Fahrtunnelröhren, was bei offener Querschlagtüre in der Versuchsröhre und gleichzeitig geschlossener Fluchttüre zur Südröhre (Schiebetür) zu einer Leckagegeschwindigkeit im Querschlag von etwa 1 m/s führte. Zum anderen strömte der Rauch weit oberhalb der Querschlagtüre vorbei.

Die Lufttemperaturen lagen im Bereich des Versuchs-Querschlags durchwegs im unkritischen Bereich. Höhere Temperaturen bis ca. 100°C wurden lediglich im Bereich der Tunnelfirste beobachtet.

7.7.2 Mittlere durchschnittliche Brandlasten bis ca. 9 MW

Mittlere durchschnittliche Brandlasten bis ca. 9 MW führten bereits zu einer starken Rauchentwicklung, welche die Sicht abströmseitig auch ziemlich stark beeinträchtigte. Dennoch war die Sicht jedenfalls ausreichend, um den nächsten Querschlag erkennen zu können. Da die Druckdifferenz zwischen den beiden Fahrtunnelröhren wieder etwa 50 Pa betrug, erfolgte auch in diesem Fall kein Eindringen von Rauch in den Querschlag.

7.7.3 Hohe Brandlasten bis ca. 14,5 MW

Hohe durchschnittliche Brandlasten bis zu 14,5 MW wurden bei Versuchen mit 8 bis 10 Brandtassen erzielt. Aus den vertikalen Temperatur-Profilen des Brandversuchs #13 mit der max. erreichten Brandlast von 21,0 MW (s. Abb. 99) ist ersichtlich, dass die höchsten Temperaturen zwar im oberen Bereich des Tunnels auftreten, jedoch auch im unteren Bereich deutlich höhere Temperaturen als bei den Versuchen mit geringeren Brandlasten entstehen. Trotzdem erreichten beispielsweise die Temperaturen, welche direkt vor dem Querschlag gemessen wurden, im Bereich bis 3 m Höhe mit deutlich unter 40°C unkritische Werte.

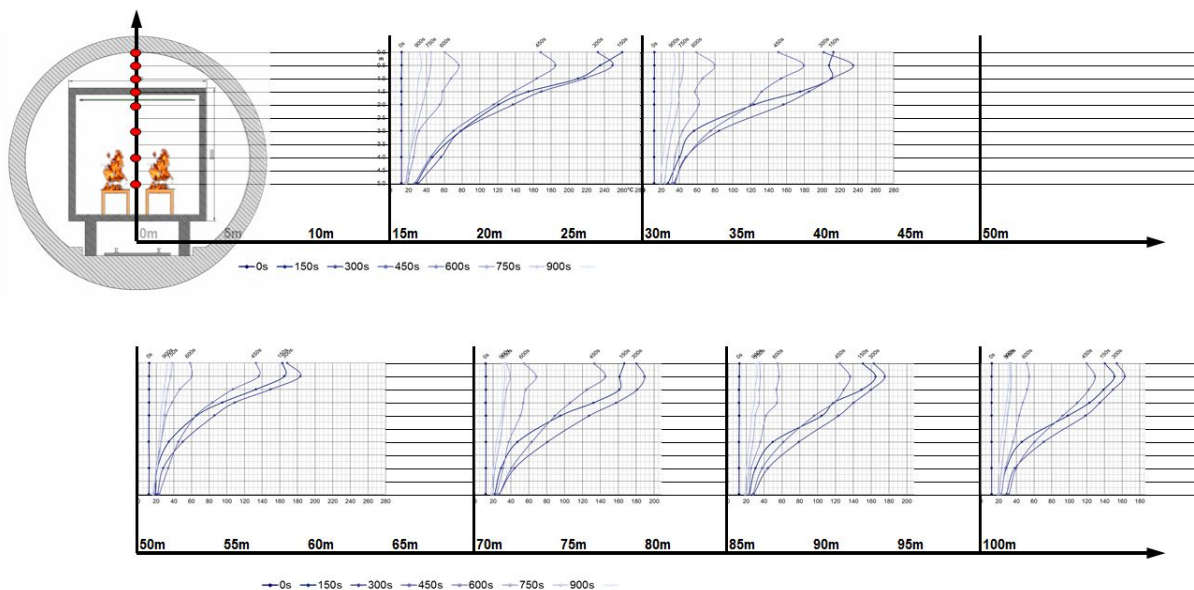


Abb. 99: Vertikale Temperaturprofile für Brandversuch #13

Trotz einer Strömungsgeschwindigkeit von ca. 2 m/s war ein ausgeprägtes Backlayering von ca. 120 m und mehr zu beobachten. Die Verrauchung abströmseitig war entsprechend stark, dennoch waren im Bereich des Brandes in Kopfhöhe wieder mehrere Meter Sicht gegeben.

Neben der Aufzeichnung der Rauchausbreitung mit Hilfe der Videokameras stellen die ermittelten vertikalen Temperaturprofile ebenfalls einen Indikator für die Dicke der Rauchschiene dar. Schichten mit hoher Temperatur sind durch das Feuer verursacht und somit auch vollgefüllt mit heißem Rauch. In Bereichen mit geringen Temperaturen, kann davon ausgegangen werden, dass nur wenig Rauch vorhanden ist. Die Sicht ist damit zumeist noch ausreichend.

7.7.4 Maximale Lufttemperaturen

In Tab. 10 sind die maßgeblichen max. Lufttemperaturen im Brandkanal (S10.4 bzw. S9.3), 15 m danach an der Tunnelfirste (S6.1) und in Kopfhöhe (S6.7 u. S6.8) sowie in Kopfhöhe vor dem Versuchsquerschlag QS02 (S4.7 u. S4.8) für die einzelnen Brandversuche zusammengefasst. Zusätzlich sind auch die Betontemperatur (S7.1 bzw. S7.2) unmittelbar nach dem Brandkanal und die jeweils zugehörigen durchschnittlichen Längsströmungsgeschwindigkeiten angeführt.

Versuch	max. Brandlast	S10.4	S9.3	S7.1	S7.2	S6.1	S6.7	S6.8	S4.7	S4.8	Strömung
Nr.	MW	°C		°C		°C		°C		m/s	
#1	4,0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1,30
#2	8,5	309,13		57,99		176,21	33,39	27,18	24,21	19,66	1,75
#3	4,0	142,77		25,58		84,52	24,55	20,64	20,44	17,41	1,22
#4	7,7	280,03		42,51		147,77	36,21	29,49	26,82	21,29	1,49
#5	11,5	357,70			69,42	202,31	36,44	27,03	24,40	19,85	1,74
#6	14,3	384,76		89,56		239,98	49,59	27,53	33,74	25,26	2,16
#7	19,5		415,85		116,36	269,87	59,45	36,99	30,83	24,94	1,77
#8	6,7	250,75			56,99	159,73	23,60	19,38	19,45	18,02	1,32
#9	8,0		389,54		72,63	189,77	30,45	29,85	25,64	25,18	1,54
#10	18,1	537,39			103,20	296,10	59,08	38,44	30,21	22,39	1,54
#11	9,3	408,09		36,72		132,35	39,90	24,36	26,91	21,71	2,21
#12	10,4	460,19		47,87		165,76	43,49	25,52	26,38	20,24	2,13
#13	21,0	417,68			100,31	283,52	65,74	42,94	36,95	24,25	1,91
#14	18,5		617,24	120,23		329,39	50,26	31,35	28,10	21,57	1,38

Tab. 10: Brandlasten, maßgebliche max. Temperaturen und Strömungsgeschwindigkeiten

Die absolut höchsten Temperaturen entstanden bei Brandversuch #13 mit der höchsten max. Brandlast. Betrachtet man die gemessenen Temperaturen in den Messpunkten MP6 (15 m nach dem Brandkanal, S6.7 u. S6.8) und MP4 (vor Querschlag QS02, S4.7 u. S4.8), so zeigt sich, dass sich diese in Kopfhöhe (ca. 2 m über der zukünftigen Fahrbahn) in einem tolerablen Bereich befinden.

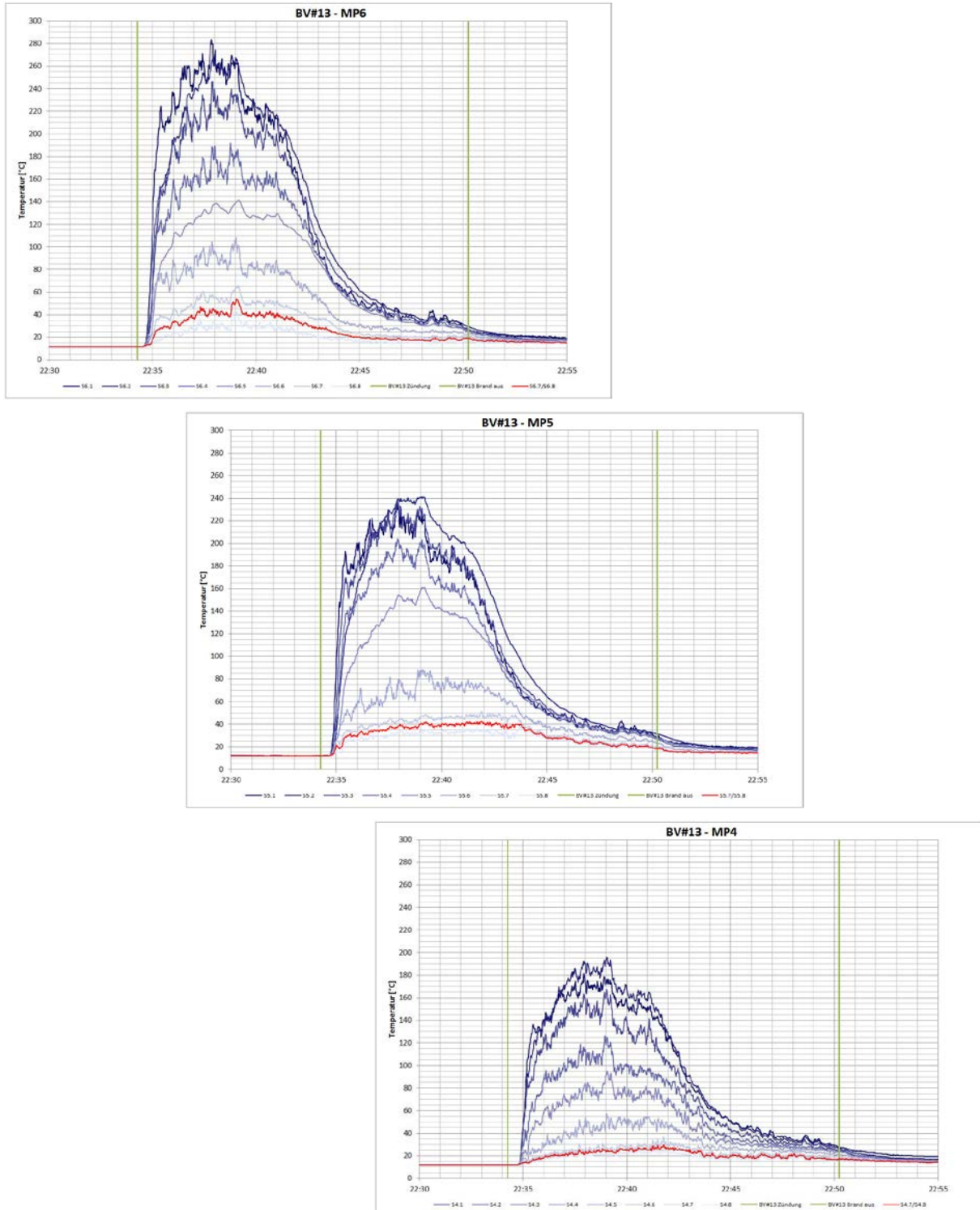


Abb. 100: Brandversuch #13 – Temperaturen in Kopfhöhe bei MP6 / MP5 / MP4

Der auf den ersten Blick sehr hohe Wert von rd. 55°C (Mittelwert S6.7 u. S6.8) tritt nur im kurzen Abschnitt nach dem Brandkanal und außerdem als kurzzeitiger Spitzenwert auf. Schon 15 m weiter sinkt die Temperatur in Kopfhöhe wieder unter 40°C und in weiterer Folge im Bereich des Querschlages auf rd. 30°C (Mittelwert S4.7 u. S4.8, s. Abb. 100).

Dies entspricht in etwa den Ergebnissen aus den CFD-Simulationen von *Aram Amouzandeh et al.* (vgl. Kap. 6.4) und bedeutet, dass die Temperaturen am Fluchtweg für Flüchtende in den ersten 10 bis 15 Minuten des Brandes – somit in jenem Zeitraum, in welchem die Selbstrettung der Zugpassagiere erfolgt und jedenfalls abgeschlossen sein sollte (vgl. Kap. 6.2.2) – im tolerablen Bereich liegen.

Aufgrund der relativ geringen Strömungsgeschwindigkeiten stromaufwärts des Brandortes (< 2,5 m/s) stellte sich vor allem bei den Versuchen mit sehr hoher Brandlast massives Backlayering mit Längen > 100 m ein. Eine Erhöhung der Brandlast führte nicht zu einer weiteren Längszunahme des Backlayering, sondern zu einer Zunahme der Dicke der Rauchsicht. So reichte die rückströmende Rauchsicht in diesen Fällen bis auf ca. 1 m über Bodenniveau herab.

7.7.5 Sichtverhältnisse

Die Sichtverhältnisse im Bereich des Fluchtweges, also stromabwärts der Brandquelle, waren durchwegs von der erzeugten Brandlast abhängig. Erwartungsgemäß ergaben sich bei geringen Brandlasten keine Einschränkungen, während sich mit Steigerung der Brandlast die Rauchbildung verstärkte. Doch auch bei den höchsten Brandlasten war trotz teilweise starker Verrauchung bis zum Boden ausreichende Sicht zum Querschlag gegeben.

Im Querschlag selbst war unabhängig von der jeweiligen Brandlast keinerlei Sichtbeeinträchtigung gegeben. Durch die Lüftungssteuerung wurde bei QS02 in den meisten Fällen eine dauerhafte Druckdifferenz zwischen Süd- und Nordröhre von ca. 50 Pa erreicht. Im Querschlag wurde die Schiebetüre zur Südröhre immer geschlossen gehalten, während die Pendeltüre auf der gegenüberliegenden Seite zur Versuchsröhre hin immer geöffnet war. Diese herrschende Druckdifferenz führte zu geringen Leckageströmungen von ca. 1 m/s durch die geschlossene Türe in Richtung Nord(Brand-)röhre. Diese Luftgeschwindigkeit war bereits ausreichend, um den Querschlag trotz geöffneter Türe zur Brandröhre rauchfrei zu halten.

7.7.6 Hochdruckwassernebelanlage

Bei Aktivierung der Wassernebelanlage ging die Sicht im Tunnel stromabwärts des Brandortes auf sehr kurze Distanzen zurück, sodass zwar zum einen – wie erwartet – die Brandlast und die Temperatur massiv reduziert wurden, zum anderen jedoch die Fluchtmöglichkeit durch die reduzierte Sicht erheblich eingeschränkt wurde.

Dabei muss allerdings nach der Verwendungsart der HDWNA und Ziel ihres Einsatzes unterschieden werden:

- zur Rauchgaskühlung
- zur Brandbekämpfung

Der Einsatz als Rauchgaskühlung in Form eines Düsenkranzes am Ende des Brandschutzkanals hatte zwar eine sehr rasche Abkühlung der Rauchgase zur Folge, jedoch auch bedingt durch die Verwirbelung des Rauches nach dem Sprühbogen eine dauerhafte Verschlechterung der Sichtverhältnisse verbunden mit einer ungewöhnlich starken Verschmutzung der näheren Umgebung.

Auch beim Einsatz als Brandbekämpfungsanlage durch die Aktivierung der HDWNA-Düsenleitungen in den oberen Ecken der Brandschutzeinhausung konnte eine schlagartige Senkung der Lufttemperaturen erreicht werden. Allerdings traten in diesem Fall nur geringfügige Rauchverwirbelungen auf, was nach Abschalten der Anlage einerseits eine Besserung der Sichtverhältnisse in verhältnismäßig kurzer Zeit und andererseits einen wesentlich geringeren Grad der Verschmutzung zur Folge hatte.

7.7.7 Türöffnungskräfte

Die Versuche bzgl. Verhalten von Querschlagtüren (Pendel- und Schiebetür) bei hohen Differenzdrücken zwischen den beiden Bahntunnelröhren haben die erwarteten Ergebnisse gezeigt. So steigt die aufzubringende Öffnungskraft für die Pendeltüre kontinuierlich mit der wachsenden Druckdifferenz, während sie bei der Schiebetüre unter Berücksichtigung von Messungenauigkeiten annähernd gleich bleibt.

Die maximal zulässige Öffnungskraft von 100 N wird allerdings auch bei der Schiebetüre um rd. 20 N überschritten, was jedoch einerseits auf die nicht unbedingt als hochwertig anzusehende Versuchstüre zurückzuführen ist und andererseits wäre bei sorgfältiger Einstellung der Türe sicher ein deutlich niedrigerer Wert erreichbar gewesen.

8 WIRTSCHAFTLICHKEITSBETRACHTUNG

Aufgrund von langen Lebensdauern, hohen Investitionssummen, laufenden Erhaltungs- und Reinvestitionsmaßnahmen kann eine Wirtschaftlichkeitsanalyse nur durch Betrachtung von Lebenszykluskosten erfolgen.

Zur Ermittlung der Lebenszykluskosten müssen alle Kostenfaktoren während des gesamten Nutzungszyklus erfasst werden:

- Investitionskosten
- Instandhaltungskosten
- Kosten aus Bahnbetrieb (Betriebserschwerisse)
- Abbruch (und Reinvestitionskosten)

8.1 Lebenszykluskosten

8.1.1 Definition

Unter dem Begriff Lebenszykluskosten wird die Summe aller Kosten verstanden, welche über die gesamte Lebensdauer eines Bauwerks entstehen.

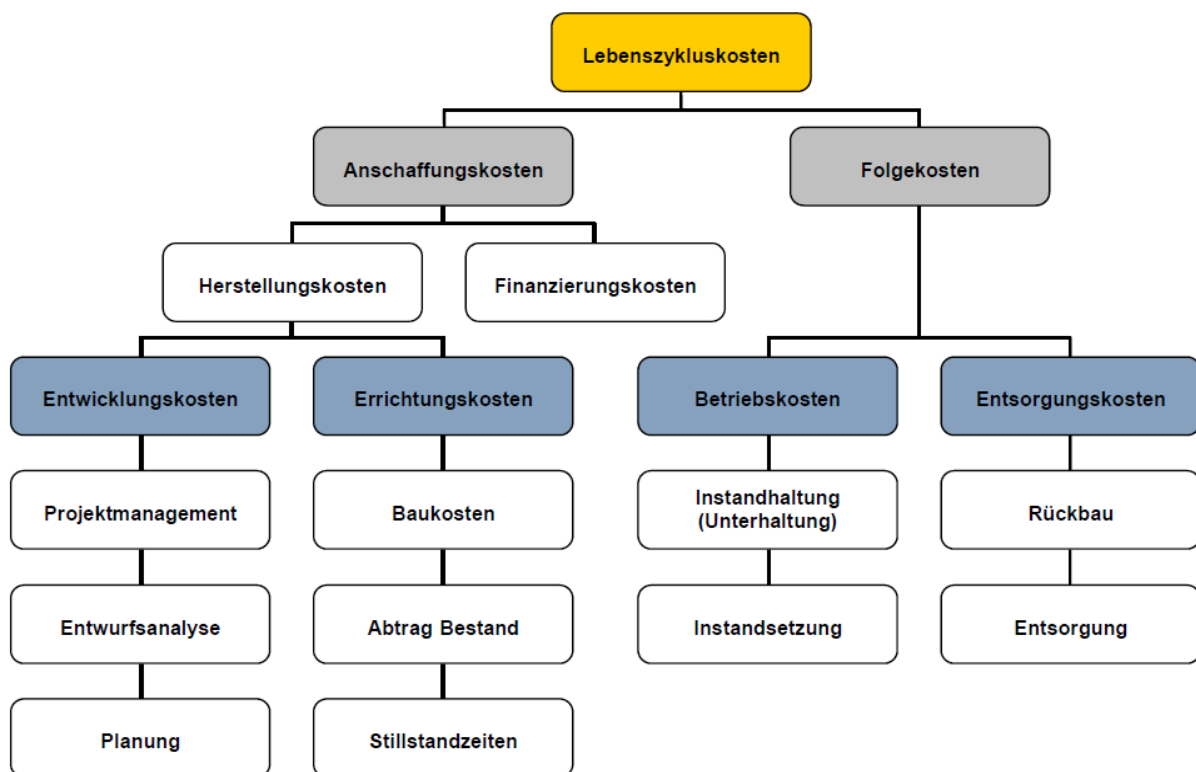


Abb. 101: Aufgliederung Lebenszykluskosten

Als Funktion über die Zeit betrachtet lassen sich die Kosten in drei wesentliche Gruppen unterteilen:

- Erstinvestitionskosten (Neubau)
- Betriebskosten (Instandhaltung, Instandsetzung, Erneuerung)
- Abbruch und Entsorgung^[102]

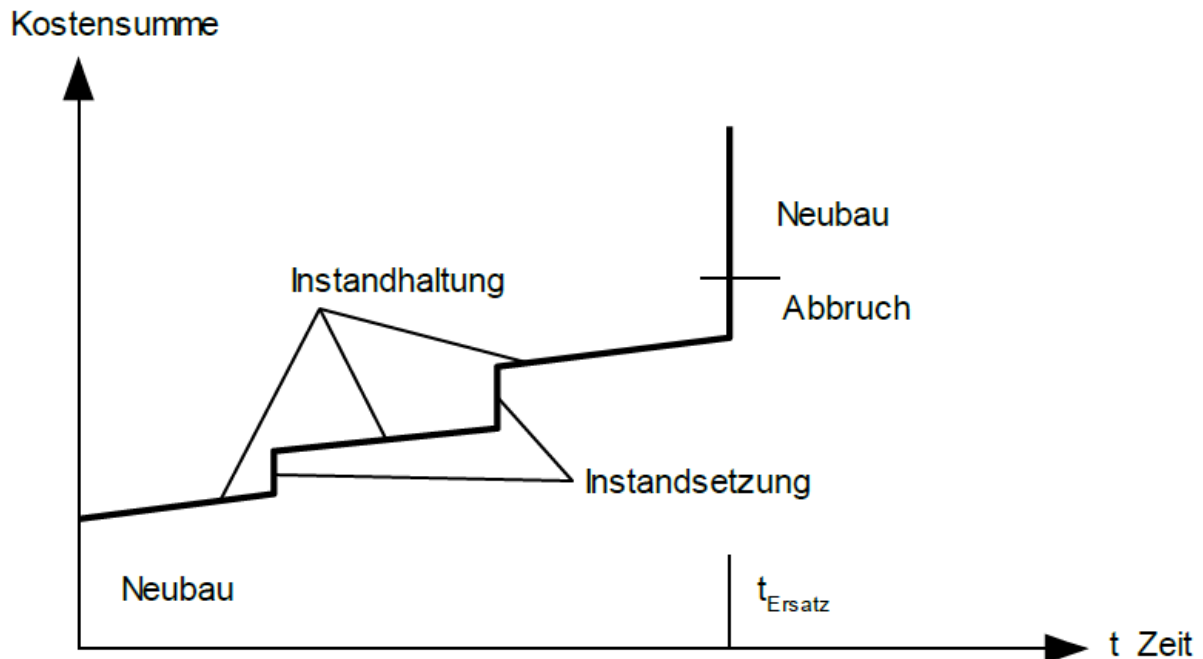


Abb. 102: Schematische Darstellung Lebenszykluskosten

8.1.2 Erstinvestitionskosten

Die Erstinvestitionskosten setzen sich aus den Kosten für die Produktion, Lieferung und Montage der Querschlag- bzw. Fluchttür zusammen.

8.1.3 Kosten in der Betriebsphase

Zu den Kosten in der Betriebsphase zählen die periodischen Instandhaltungskosten sowie die geplanten (Erneuerung) und die außerplanmäßigen Instandsetzungskosten (Störung).

Zur Ermittlung dieser Kosten werden für die beiden zu vergleichenden Türsysteme jene Maßnahmen betrachtet, die innerhalb der nächsten 120 Jahre Nutzungsdauer zu erwarten sind.

Alle Instandhaltungsmaßnahmen werden in weiterer Folge mit

- **direkten** (= Kosten der betrieblichen und baulichen Instandhaltung) und
- **indirekten** (= Betriebserschwerungskosten für Gleissperren und eingeschränktem Gleisbetrieb im Zuge von Instandhaltungs-/Instandsetzungsmaßnahmen)

Kostenansätzen hinterlegt.

Betriebserschwerungskosten stellen ein Spezifikum des Eisenbahnwesens dar. Es handelt sich dabei um jene Kosten die entstehen, wenn der Regelbetrieb (Abwicklung des Fahrplans) durch geplante oder ungeplante Maßnahmen gestört wird. Diese Störungen können die Verfügbarkeit des Systems reduzieren und zusätzliche Kosten verursachen. ^[103] Ziel der Berücksichtigung von Betriebserschwerungskosten ist es, betriebliche Behinderungen verursachungsgerecht und umfassend zu bewerten.

Betriebliche Behinderungen können im Vergleich zum ungestörten Betrieb Zusatzkosten, Kostensteigerungen sowie Erlösrückgänge verursachen. Dabei handelt es sich zum Teil um echte Kosten und zum Teil um Erlösminderungen, die nicht notwendigerweise unmittelbar und am Ort ihrer Verursachung anfallen. Oftmals werden sie zu einem anderen Zeitpunkt in einer anderen Organisationseinheit ausgabewirksam.

Betriebliche Behinderungen können außerdem folgende Auswirkungen haben, die neben direkten Kosten auch einen höheren Organisationsaufwand verursachen:

- Verspätungen und Folgeverspätungen
- Umleitungen von Zügen
- Ausfall von Zügen bzw. Ersatzzüge
- Schienenersatzverkehre
- Probleme in der nachfolgenden Zugbildung
- Zusatzkosten im Verschub
- Negative Marktreaktionen (Kundenabwanderungen)
- Pönalezahlungen
- etc.

Diese Auswirkungen sind vernetzt und hängen von der Strecke, dem Betriebsprogramm und der betrieblichen Abwicklung zufolge der betrieblichen Behinderung ab.

Mit dem Betriebserschwerungskosten-Katalog (32) liegen für bestehende Referenzstrecken im Streckennetz der ÖBB für verschiedene Gleissperrdauern Tarife für Betriebserschwerungskosten vor. Ihre Grundlage sind beispielhafte Auswertungen typischer Situationen im Netz der ÖBB.

8.1.4 Abbruch und Entsorgung

Im Rahmen der vorliegenden Untersuchung wurde eine Nutzungsdauer von 120 Jahren als Analysezeitraum festgelegt. Da aber davon ausgegangen wird, dass der Semmering-Basistunnel über diesen Analysezeitraum hinaus weiter betrieben wird, werden die Kosten für Abbruch und Entsorgung nicht in die Berechnung der Lebenszykluskosten miteinbezogen.^[104]

8.2 Berechnungsgrundlagen

Nachfolgend werden die den Lebenszykluskostenberechnungen zugrundeliegenden Annahmen und Festlegungen erläutert, die für die beiden zu vergleichenden Türsysteme herangezogen werden.

8.2.1 Erstinvestition

Aufgrund der Tatsache, dass bis zum heutigen Tag in Österreich in vergleichbaren Eisenbahntunneln weder Pendeltüren noch Schiebetüren eingebaut wurden und somit keine Anhaltspunkte für die jeweiligen Erstinvestitionskosten gegeben sind, müssen diese aus anderen verfügbaren Informationen abgeleitet werden.

Für die Pendeltüre (PT) wird der Angebotspreis für die Ausrüstung des Pummersdorfer Tunnels (Güterzugumfahrung St. Pölten) mit Drehflügeltüren vom 04.11.2015 zugrunde gelegt, wonach für eine Drehflügeltüre rd. 45.000 EUR anzusetzen sind.^[105] Wegen der höheren Komplexität des Türsystems im Vergleich zur Drehflügeltüre werden für die Pendeltüre jedoch Kosten von 55.000 EUR angenommen.

Auch für die Schiebetüre (ST) muss eine Annahme getroffen werden, welche sich in diesem Fall aus der Kostenschätzung für die Ausrüstungsarbeiten des SBT aus dem Jahr 2016 mit 80.000 EUR je Schiebetüre ergibt. Der Pauschalpreis basiert auf Erkenntnissen, welche im Rahmen eines Arbeitskreises zur Erstellung eines Prüfsystems für ÖBB-Tunneltüren durch Informationsaustausch mit den marktführenden Erzeugern von Tunneltüren gewonnen wurden.

- ⇒ PT: **55.000 EUR** (aus Angebot für Drehflügeltüre – Pummersdorfer Tunnel)
- ⇒ ST: **80.000 EUR** (aus Kostenschätzung 2016 – Angabe Kari, 19.10.2016)^[106]

8.2.2 Betriebsphase

8.2.2.1 Periodische Instandhaltung

In einem „Anlagenbericht“ vom 29.08.2019 (33) wurden seitens ÖBB die bisher vorrangig auf der Neubaustrecke Wien Meidling – St. Pölten Hauptbahnhof gewonnenen Erfahrungen mit Drehflügeltüren dokumentiert. Darin sind u.a. die Störmeldungen in den Jahren 2015 bis 2017 insbes. für den Wienerwaldtunnel erfasst.^[107] Auf dieser Grundlage und unter Berücksichtigung der höheren Komplexität im Vergleich zur Drehflügeltüre werden für die Pendeltüre 1 Wartung sowie 3 zusätzliche Funktionsprüfungen pro Jahr für die Instandhaltung angenommen.

Nachdem für Schiebetüren keine ÖBB-internen Erfahrungen vorliegen (vgl. Kap. 8.2.1), müssen für die Intervalle von Instandhaltungsmaßnahmen die Angaben eines marktführenden Herstellers herangezogen werden. Demnach ist für Schiebetüren eine „jährliche Wartung“ durchzuführen^[108], allerdings verlangen ÖBB-Vorgaben für maschinen-technische Anlagen eine zusätzliche Funktionsprüfung pro Jahr.

Für die jährliche Wartung ist gem. Instandhaltungsplan für den Semmering-Basistunnel ein Zeitaufwand von 1 Stunde mit 2 Mitarbeitern anzusetzen, während die Funktionsprüfung in nur 10 Minuten ebenfalls von 2 Mitarbeitern durchgeführt werden kann.

- ⇒ PT: **1x Wartung/J.** (1 Std., 2 MA), **3x Funktionsprüfung/J.** (10 Min., 2 MA)
- ⇒ ST: **1x Wartung/J.** (1 Std., 2 MA), **1x Funktionsprüfung/J.** (10 Min., 2 MA)

8.2.2.2 Erneuerung (geplante Instandsetzung)

Auch für die Abschätzung des Zeitpunktes für die erforderliche Erneuerung der Querschlag- und Fluchttüren in der Nothaltestelle muss aufgrund mangelnder Erfahrungswerte auf in- und ausländische Studien zurückgegriffen werden.

Basierend auf dem bereits erwähnten „Anlagenbericht“ wird für die Pendeltüre eine Lebensdauer von 10 Jahren abgeschätzt.

Zur Beurteilung der möglichen Lebensdauer einer Schiebetüre wird das Dokument „Schiebetüren in Eisenbahntunneln der Schweiz“ der ENOTRAC AG (im Auftrag der ÖBB) vom 18.02.2018 (34) herangezogen, wonach mit einer Spanne von mind. 30 Jahren gerechnet werden kann.^[109]

- ⇒ PT: alle **10 Jahre** (Annahme aufgrund „Anlagenbericht“ – ÖBB/Sturzeis, 29.08.2019)
- ⇒ ST: alle **30 Jahre** (Annahme aufgrund Bericht „Schiebetüren in Eisenbahntunneln der Schweiz“ – ENOTRAC AG im Auftrag ÖBB, 18.02.2018)

8.2.2.3 außerplanmäßige Instandsetzung (Störung)

Im „Anlagenbericht“ werden für die Drehflügeltüren in österr. Tunnelbauwerken in den Jahren 2015 bis 2017 insgesamt 386 Störungen dokumentiert. Davon entfallen 32 Meldungen auf die Kategorie 1 (KAT 1 – hohe Priorität, sofortige Behebung erforderlich) und 354 auf die Kategorie 2 (KAT 2 – mittlere Priorität, Behebung bei nächster Möglichkeit). Daraus lassen sich 11 Störungen KAT 1 sowie 118 Störungen KAT 2 pro Jahr errechnen und als Grundlage für außerplanmäßige Instandsetzungsarbeiten bei Pendeltüren heranziehen.^[107]

Im Bericht „Schiebetüren in Eisenbahntunneln der Schweiz“ ist u.a. festgehalten, dass Störungen bei den Schiebetüren im Lötschberg-Basistunnel wenn überhaupt nur im Bereich der Sensorik aufgrund von Verschmutzung auftreten und lediglich die Stellungen *Geschlossen* bzw. *Verriegelt* nicht korrekt gemeldet werden. Eine Tendenz zu mehr und schwerwiegenderen Störungen ist auch nach über 10 Jahren Betrieb nicht festzustellen.^[109] Da diese Fehlermeldungen Störungen der Kategorie 2 entsprechen und sehr selten sind, werden 2 Störungen KAT 2 pro Monat angenommen.

Weil eine Störung KAT 1 sofort behoben werden muss, wird dafür ein Zeitaufwand von 3,5 Stunden für 3 Mitarbeiter (inkl. 1 Fahrzeugführer) und 1 Fahrzeug angesetzt. Dagegen ist für eine Störung KAT 2 nur ein Aufwand von 1,5 Stunden für 2 Mitarbeiter und kein eigenes Fahrzeug zu berücksichtigen, da diese Störungsbehebung im Zuge der planmäßigen Instandhaltungsarbeiten durchgeführt werden kann.

- ⇒ PT: **11 KAT 1/J.** (3,5 Std., 2 MA u. 1 Fzg./Fzg.-Führer), **118 KAT 2/J.** (1,5 Std., 2 MA)
- ⇒ ST: **24 KAT 2/J.** (1,5 Std., 2 MA)

8.3 Lebenszyklen

Die Darstellung der Lebenszyklen für Pendel- und Schiebetür erfolgt in Form eines sog. Standardelementes. Damit können die erforderlichen Maßnahmen (Investition, Instandhaltung, Entstörung) erfasst und die entsprechenden Mengengerüste über die jeweilige Nutzungsdauer hinweg anschaulich dargestellt werden (s. Tab. 11 und Tab. 12).

8.3.1 Pendeltür

SBT		27,3 km	ingleisig										
Typ	Anzahl QS	Anzahl NHS											
Pendeltür	112	18,0											
Instandhaltungsarbeit	ND in Jahren	10,0	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	
Erstinvestition/Erneuerung		1,0	1										
Wartung	Anzahl in ND	10,0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	
Funktionsprüfung	Anzahl in ND	30,0	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	
Störung KAT1	Anzahl in ND	110,0	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11	
Störung KAT2	Anzahl in ND	1.180,0	118	118	118	118	118	118	118	118	118	118	

Tab. 11: *Standardelement Pendeltür*

8.3.2 Schiebetür

SBT		27,3 km	ingleisig										
Typ	Anzahl QS	Anzahl NHS											
Schiebetür	112	18,0											
Instandhaltungsarbeit	ND in Jahren	10,0	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Erstinvestition/Erneuerung		1,0	1										
Wartung	Anzahl in ND	30,0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Funktionsprüfung	Anzahl in ND	30,0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Störung KAT1	Anzahl in ND	0,0											
Störung KAT2	Anzahl in ND	720,0	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24

11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24

Tab. 12: *Standardelement Schiebetür*

8.4 Kostenvergleich

Die Kostenvergleichsrechnung stellt eine statische Wirtschaftlichkeitsrechnung dar, welche von konstanten Geldwerten ausgehen und den Zahlungszeitpunkt nicht berücksichtigen.

Für die Ermittlung der jeweiligen Gesamtkosten (120 Jahre) werden folgende Stundensätze zugrunde gelegt:

- 90,00 EUR ... 1 MA je Stunde
- 250,00 EUR ... 1 Fzg. inkl. Fzg.-Führer je Stunde

(i) Pendeltür:

$$GK_{PT} = 55.000 + (2 \times 90,00 + 3 \times 2 \times \frac{10}{60} \times 90,00) \times 120 + 55.000 \times 11 + (11 \times 3,5 \times (2 \times 90,00 + 250,00) + 118 \times 2 \times 1,50 \times 90,00) \times 120 = \mathbf{6.502.200 \text{ EUR}}$$

(ii) Schiebetür:

$$GK_{ST} = 80.000 + (2 \times 90,00 + 1 \times 2 \times \frac{10}{60} \times 90,00) \times 120 + 80.000 \times 3 + (24 \times 2 \times 1,50 \times 90,00) \times 120 = \mathbf{1.122.800 \text{ EUR}}$$

Die so ermittelten Gesamtkosten für eine Nutzungsdauer von 120 Jahren würden den Schluss zulassen, dass bereits nach weniger als einem Jahr gleichsam der „Break Even Point“ erreicht ist und die Schiebetür trotz höherer Erstinvestitionskosten allerdings wesentlich geringerer Instandhaltungskosten die um ein Vielfaches günstigere Variante darstellt.

Nachdem dieser Kostenvergleichsrechnung allerdings deutliche Abweichungen der Investitionskosten und v.a. unterschiedlich lange Nutzungsdauern zugrunde liegen, ist diese scheinbar eindeutige Aussage nicht ohne weiteres zulässig.

Aus diesem Grund wird für die Beurteilung der beiden Varianten eine dynamische Wirtschaftlichkeitsrechnung herangezogen. Dabei wird der Zahlungszeitpunkt berücksichtigt und somit ein echter Vergleich möglich.

8.5 Dynamische Wirtschaftlichkeitsberechnung

Unter den verschiedenen dynamischen Methoden der Wirtschaftlichkeitsrechnungen stellt die Annuitätenmethode die einzige Möglichkeit dar, unterschiedliche Nutzungsdauern zu berücksichtigen. Außerdem sind dabei auch unterschiedliche Größenordnungen der Investitionskosten zulässig, weshalb unter diesen Voraussetzungen nur die Annuitätenmethode einen aussagekräftigen Vergleich zulässt. Es ist jener Variante der Vorzug zu geben, welche die höchste Annuität besitzt bzw. den geringsten negativen Wert aufweist (Wirtschaftlichkeitsrechnungen ohne Erlöse).

Die Annuität gibt also die durchschnittlichen Jahreskosten unter der Berücksichtigung der Zinseszinsrechnung an und errechnet sich aus dem Produkt von Kapitalwert (NPV) und Kapitalwiedergewinnungsfaktor (KWF):

$$A = NPV \times KWF$$

Die Wirtschaftlichkeitsrechnung wird ohne Berücksichtigung der Inflation durchgeführt, da weit in die Zukunft reichende Inflationsraten nicht bekannt sind. Es würde damit eine sehr unsichere Rechengröße berücksichtigt, die bei der Ergebnisinterpretation wieder zu eliminieren ist, weshalb daraus kein Wissensgewinn resultieren würde.

Da die Entscheidungsrechnung für die Investition erfolgt, wird als Bezugszeitpunkt, auf welchen alle Zahlungen bezogen werden, wie allgemein üblich der Zeitpunkt der Investition, d.h. das Jahr 0 herangezogen. ^[110]

Der sich durch das Außerachtlassen der Inflation ergebende reale Diskontierungszinssatz $i_{(\text{real})}$ beschreibt die Realverzinsung bzw. die realen Kapitalbindungskosten und wird mit 2,5 % niedrig angesetzt (bei ÖBB-Investitionen zwischen 2,5 % und 5 %). ^[111]

8.5.1 Kapitalwert

Der Kapitalwert (NPV) ist die Summe aller Barwerte:

$$\text{NPV} = \sum \text{BW}_{(t)}$$

Der Barwert (BW) stellt wiederum den Wert einer Zahlung, d.h. den Zeitwert (ZW) bezogen auf den Bezugszeitpunkt (Zeitunterschied t) dar:

$$\text{BW} = \text{ZW} \times (1 + i)^{-t}$$

Damit werden die unterschiedlichen Werte der Zahlungen zu unterschiedliche Zeitpunkten und damit auch die Kapitalbindungskosten berücksichtigt.

8.5.2 Kapitalwiedergewinnungsfaktor

Der Kapitalwiedergewinnungsfaktor (KWF) ist im Grunde eine Rechenmethode, die eine Gesamtsumme unter Berücksichtigung der Zinseszinsrechnung auf konstante (und damit durchschnittliche) Jahresraten umrechnet:

$$\text{KWF} = \frac{(1 + i)^t \times i}{(1 + i)^t - 1} \quad [100]$$

8.5.3 Annuität

Zur Berechnung der Annuität für das jeweilige Türsystem werden die bereits für den einfachen Gesamtkostenvergleich (vgl. Kap. 8.4) eingesetzten Werte herangezogen.

8.5.3.1 Pendeltür

- Erstinvestition: 55.000 EUR
- Wartung: 180 EUR (= 2 x 90,00)
- Funktionsprüfung: 90 EUR (= 3 x 2 x $^{10}/_{60}$ x 90,00)
- Störung KAT 1: 16.555 EUR (= 11 x 3,5 x (2 x 90,00 + 250,00))
- Störung KAT 2: 31.860 EUR (= 118 x 2 x 1,50 x 90,00)

Mithilfe der Tab. 13 erfolgt die Ermittlung des Kapitalwertes (NPV) für die Pendeltür:

PT								
Jahr	Investition	Wartung	Funktionsprfg.	KAT1	KAT2	Summe	f	Barwert
0	-55.000	-180	-90	-16.555	-31.860	-103.685	1,0000	-103.685
1		-180	-90	-16.555	-31.860	-48.685	0,9756	-47.498
2		-180	-90	-16.555	-31.860	-48.685	0,9518	-46.339
3		-180	-90	-16.555	-31.860	-48.685	0,9286	-45.209
4		-180	-90	-16.555	-31.860	-48.685	0,9060	-44.106
5		-180	-90	-16.555	-31.860	-48.685	0,8839	-43.030
6		-180	-90	-16.555	-31.860	-48.685	0,8623	-41.981
7		-180	-90	-16.555	-31.860	-48.685	0,8413	-40.957
8		-180	-90	-16.555	-31.860	-48.685	0,8207	-39.958
9		-180	-90	-16.555	-31.860	-48.685	0,8007	-38.983
						-541.850	NPV	-491.747

Tab. 13: Ermittlung Kapitalwert Pendeltür

Der Kapitalwiedergewinnungsfaktor berechnet sich wie folgt:

$$\text{KWF} = \frac{(1 + 0,025)^{10} \times 0,025}{(1 + 0,025)^{10} - 1} = 0,11426$$

Somit ergibt sich die Annuität für die Pendeltür mit

$$A = \text{NPV} \times \text{KWF} = -491.747 \times 0,11426$$

$$\boxed{A = -56.186}$$

8.5.3.2 Schiebetüre

- Erstinvestition: 80.000 EUR
- Wartung: 180 EUR (= 2 x 90,00)
- Funktionsprüfung: 30 EUR (= 2 x $^{10}/_{60}$ x 90,00)
- Störung KAT 1: 0 EUR
- Störung KAT 2: 6.480 EUR (= 24 x 2 x 1,50 x 90,00)

Auf die Gleiche Weise wird der Kapitalwert (NPV) für die Schiebetür ermittelt (s. Tab. 14):

ST								
Jahr	Investition	Wartung	Funktionsprfg.	KAT1	KAT2	Summe	f	Barwert
0	-80.000	-180	-30	0	-6.480	-86.690	1,0000	-86.690
1		-180	-30	0	-6.480	-6.690	0,9756	-6.527
2		-180	-30	0	-6.480	-6.690	0,9518	-6.368
3		-180	-30	0	-6.480	-6.690	0,9286	-6.212
4		-180	-30	0	-6.480	-6.690	0,9060	-6.061
5		-180	-30	0	-6.480	-6.690	0,8839	-5.913
6		-180	-30	0	-6.480	-6.690	0,8623	-5.769
7		-180	-30	0	-6.480	-6.690	0,8413	-5.628
8		-180	-30	0	-6.480	-6.690	0,8207	-5.491
9		-180	-30	0	-6.480	-6.690	0,8007	-5.357
10		-180	-30	0	-6.480	-6.690	0,7812	-5.226
11		-180	-30	0	-6.480	-6.690	0,7621	-5.099
12		-180	-30	0	-6.480	-6.690	0,7436	-4.974
13		-180	-30	0	-6.480	-6.690	0,7254	-4.853
14		-180	-30	0	-6.480	-6.690	0,7077	-4.735
15		-180	-30	0	-6.480	-6.690	0,6905	-4.619
16		-180	-30	0	-6.480	-6.690	0,6736	-4.507
17		-180	-30	0	-6.480	-6.690	0,6572	-4.397
18		-180	-30	0	-6.480	-6.690	0,6412	-4.289
19		-180	-30	0	-6.480	-6.690	0,6255	-4.185
20		-180	-30	0	-6.480	-6.690	0,6103	-4.083
21		-180	-30	0	-6.480	-6.690	0,5954	-3.983
22		-180	-30	0	-6.480	-6.690	0,5809	-3.886
23		-180	-30	0	-6.480	-6.690	0,5667	-3.791
24		-180	-30	0	-6.480	-6.690	0,5529	-3.699
25		-180	-30	0	-6.480	-6.690	0,5394	-3.609
26		-180	-30	0	-6.480	-6.690	0,5262	-3.521
27		-180	-30	0	-6.480	-6.690	0,5134	-3.435
28		-180	-30	0	-6.480	-6.690	0,5009	-3.351
29		-180	-30	0	-6.480	-6.690	0,4887	-3.269
						-146.900	NPV	-140.015

Tab. 14: Ermittlung Kapitalwert Schiebetür

Der Kapitalwiedergewinnungsfaktor berechnet sich wie folgt:

$$\text{KWF} = \frac{(1 + 0,025)^{30} \times 0,025}{(1 + 0,025)^{30} - 1} = 0,04778$$

Somit ergibt sich die Annuität für die Schiebetür mit

$$A = \text{NPV} \times \text{KWF} = -140.015 \times 0,04778$$

A = -6.690

8.5.4 Betriebserschwerungskosten

Aufgrund der eindeutigen Ergebnisse der Annuitätenberechnungen werden die zumindest bei Störungen der Kategorie 1 anfallenden Betriebserschwerungskosten nicht berücksichtigt.

Diese würden nur zu einer weiteren Verschlechterung der Ergebnisse führen und sind darüber hinaus bei den Störungen der Kategorie 2 nicht relevant, da die Störungsbehebung in diesen Fällen im Zuge der geplanten Instandhaltungsarbeiten erfolgt (vgl. Kap. 8.2.2.3).

8.6 Sensitivitätsanalyse

Im Rahmen der Sensitivitätsanalyse werden zunächst die Eingangswerte für Wartung und Funktionsprüfung sowie für die Störungen der Kategorien 1 und 2 modifiziert, um den Einfluss dieser Größen auf den Wert der Annuität beurteilen zu können.

In einem zweiten Schritt werden anschließend für die Schiebetüre die kritischen Werte für Investition, Störungen sowie Nutzungsdauer im Vergleich zur Pendeltür ermittelt und einer Plausibilitätsanalyse unterzogen.

8.6.1 Modifikation Wartung und Funktionsprüfung

8.6.1.1 Pendeltür

Der Aufwand für die jährliche Wartung wird auf 40 Minuten und für die Funktionsprüfung auf 2 x jährlich 10 Minuten (jeweils 2 Mitarbeiter) reduziert.

- Wartung: 120 EUR ($= 2 \times \frac{40}{60} \times 90,00$)
- Funktionsprüfung: 60 EUR ($= 2 \times 2 \times \frac{10}{60} \times 90,00$)

PT								
Jahr	Investition	Wartung	Funktionsprfg.	KAT1	KAT2	Summe	f	Barwert
0	-55.000	-120	-60	-16.555	-31.860	-103.595	1,0000	-103.595
1		-120	-60	-16.555	-31.860	-48.595	0,9756	-47.410
2		-120	-60	-16.555	-31.860	-48.595	0,9518	-46.253
3		-120	-60	-16.555	-31.860	-48.595	0,9286	-45.125
4		-120	-60	-16.555	-31.860	-48.595	0,9060	-44.025
5		-120	-60	-16.555	-31.860	-48.595	0,8839	-42.951
6		-120	-60	-16.555	-31.860	-48.595	0,8623	-41.903
7		-120	-60	-16.555	-31.860	-48.595	0,8413	-40.881
8		-120	-60	-16.555	-31.860	-48.595	0,8207	-39.884
9		-120	-60	-16.555	-31.860	-48.595	0,8007	-38.911
						-540.950	NPV	-490.939

Tab. 15: Ermittlung Kapitalwert Pendeltür bei reduziertem Aufwand für Wartung und Funktionsprüfung

Mit dem Kapitalwert gem. Tab. 15 und dem unveränderten Kapitalwiedergewinnungsfaktor 0,11426 lässt sich nun die Annuität für die Pendeltür wie folgt berechnen:

$$A = \text{NPV} \times \text{KWF} = -490.939 \times 0,11426$$

$$A = -56.094$$

8.6.1.2 Schiebetür

Der Aufwand für die jährliche Wartung wird auf 80 Minuten und für die Funktionsprüfung auf 2 x jährlich 15 Minuten (jeweils 2 Mitarbeiter) erhöht.

- Wartung: 240 EUR ($= 2 \times \frac{80}{60} \times 90,00$)
- Funktionsprüfung: 45 EUR ($= 2 \times \frac{15}{60} \times 90,00$)

ST								
Jahr	Investition	Wartung	Funktionsprfg	KAT1	KAT2	Summe	f	Barwert
0	-80.000	-240	-45	0	-6.480	-86.765	1,0000	-86.765
1		-240	-45	0	-6.480	-6.765	0,9756	-6.600
2		-240	-45	0	-6.480	-6.765	0,9518	-6.439
3		-240	-45	0	-6.480	-6.765	0,9286	-6.282
4		-240	-45	0	-6.480	-6.765	0,9060	-6.129
5		-240	-45	0	-6.480	-6.765	0,8839	-5.979
6		-240	-45	0	-6.480	-6.765	0,8623	-5.833
7		-240	-45	0	-6.480	-6.765	0,8413	-5.691
8		-240	-45	0	-6.480	-6.765	0,8207	-5.552
9		-240	-45	0	-6.480	-6.765	0,8007	-5.417
10		-240	-45	0	-6.480	-6.765	0,7812	-5.285
11		-240	-45	0	-6.480	-6.765	0,7621	-5.156
12		-240	-45	0	-6.480	-6.765	0,7436	-5.030
13		-240	-45	0	-6.480	-6.765	0,7254	-4.907
14		-240	-45	0	-6.480	-6.765	0,7077	-4.788
15		-240	-45	0	-6.480	-6.765	0,6905	-4.671
16		-240	-45	0	-6.480	-6.765	0,6736	-4.557
17		-240	-45	0	-6.480	-6.765	0,6572	-4.446
18		-240	-45	0	-6.480	-6.765	0,6412	-4.337
19		-240	-45	0	-6.480	-6.765	0,6255	-4.232
20		-240	-45	0	-6.480	-6.765	0,6103	-4.128
21		-240	-45	0	-6.480	-6.765	0,5954	-4.028
22		-240	-45	0	-6.480	-6.765	0,5809	-3.930
23		-240	-45	0	-6.480	-6.765	0,5667	-3.834
24		-240	-45	0	-6.480	-6.765	0,5529	-3.740
25		-240	-45	0	-6.480	-6.765	0,5394	-3.649
26		-240	-45	0	-6.480	-6.765	0,5262	-3.560
27		-240	-45	0	-6.480	-6.765	0,5134	-3.473
28		-240	-45	0	-6.480	-6.765	0,5009	-3.388
29		-240	-45	0	-6.480	-6.765	0,4887	-3.306
						-147.650	NPV	-140.688

Tab. 16: Ermittlung Kapitalwert Schiebetür bei erhöhtem Aufwand für Wartung und Funktionsprüfung

Mit dem Kapitalwert gem. Tab. 16 und dem ebenso unveränderten Kapitalwiedergewinnungsfaktor 0,04778 berechnet sich die Annuität für die Schiebetür nun wie folgt:

$$A = NPV \times KWF = -140.688 \times 0,04778$$

A = -6.722

8.6.2 Modifikation Störungen

Für die folgenden Berechnungen und Vergleiche werden die Störungen der Kategorien 1 und 2 aus Gründen der einfacheren Handhabung zu „Fehlern“ zusammengefasst.

8.6.2.1 Pendeltür

Störungen KAT 1 werden auf 5 x jährlich und Störungen KAT 2 auf 90 x jährlich (jeweils 2 Mitarbeiter, Aufwand 3,5 inkl. Fzg. u. Fzg.-Führer bzw. 1,5 Stunden) reduziert.

- Störung KAT 1: 7.525 EUR (= 5 x 3,5 x (2 x 90,00 + 250,00))
 - Störung KAT 2: 24.300 EUR (= 90 x 2 x 1,50 x 90,00)
-
- Fehler: 31.825 EUR

PT							
Jahr	Investition	Wartung	Funktionsprfg.	Fehler	Summe	f	Barwert
0	-55.000	-180	-90	-31.825	-87.095	1,0000	-87.095
1		-180	-90	-31.825	-32.095	0,9756	-31.312
2		-180	-90	-31.825	-32.095	0,9518	-30.548
3		-180	-90	-31.825	-32.095	0,9286	-29.803
4		-180	-90	-31.825	-32.095	0,9060	-29.076
5		-180	-90	-31.825	-32.095	0,8839	-28.367
6		-180	-90	-31.825	-32.095	0,8623	-27.675
7		-180	-90	-31.825	-32.095	0,8413	-27.000
8		-180	-90	-31.825	-32.095	0,8207	-26.342
9		-180	-90	-31.825	-32.095	0,8007	-25.699
					-375.950	NPV	-342.920

Tab. 17: Ermittlung Kapitalwert Pendeltür bei reduzierter Störungsanzahl KAT 1 und KAT 2

Daraus ergibt sich die Annuität (NPV gem. Tab. 17, Kapitalwiedergewinnungsfaktor 0,11426):

$$A = NPV \times KWF = -342.920 \times 0,11426$$

A = -39.182

8.6.2.2 Schiebetür

Es werden 2 jährliche Störungen KAT 1 angenommen (2 Mitarbeiter, Aufwand 3,5 Stunden inkl. Fzg. u. Fzg.-Führer).

Die Störungen KAT 2 werden auf 30 x jährlich erhöht (2 Mitarbeiter, Aufwand 1,5 Stunden).

- Störung KAT 1: 3.010 EUR (= 2 x 3,5 x (2 x 90,00 + 250,00))
 - Störung KAT 2: 8.100 EUR (= 30 x 2 x 1,50 x 90,00)
-
- Fehler: 11.110 EUR

ST							
Jahr	Investition	Wartung	Funktionsprfg.	Fehler	Summe	f	Barwert
0	-80.000	-180	-30	-11.110	-91.320	1,0000	-91.320
1		-180	-30	-11.110	-11.320	0,9756	-11.044
2		-180	-30	-11.110	-11.320	0,9518	-10.775
3		-180	-30	-11.110	-11.320	0,9286	-10.512
4		-180	-30	-11.110	-11.320	0,9060	-10.255
5		-180	-30	-11.110	-11.320	0,8839	-10.005
6		-180	-30	-11.110	-11.320	0,8623	-9.761
7		-180	-30	-11.110	-11.320	0,8413	-9.523
8		-180	-30	-11.110	-11.320	0,8207	-9.291
9		-180	-30	-11.110	-11.320	0,8007	-9.064
10		-180	-30	-11.110	-11.320	0,7812	-8.843
11		-180	-30	-11.110	-11.320	0,7621	-8.627
12		-180	-30	-11.110	-11.320	0,7436	-8.417
13		-180	-30	-11.110	-11.320	0,7254	-8.212
14		-180	-30	-11.110	-11.320	0,7077	-8.011
15		-180	-30	-11.110	-11.320	0,6905	-7.816
16		-180	-30	-11.110	-11.320	0,6736	-7.625
17		-180	-30	-11.110	-11.320	0,6572	-7.439
18		-180	-30	-11.110	-11.320	0,6412	-7.258
19		-180	-30	-11.110	-11.320	0,6255	-7.081
20		-180	-30	-11.110	-11.320	0,6103	-6.908
21		-180	-30	-11.110	-11.320	0,5954	-6.740
22		-180	-30	-11.110	-11.320	0,5809	-6.575
23		-180	-30	-11.110	-11.320	0,5667	-6.415
24		-180	-30	-11.110	-11.320	0,5529	-6.259
25		-180	-30	-11.110	-11.320	0,5394	-6.106
26		-180	-30	-11.110	-11.320	0,5262	-5.957
27		-180	-30	-11.110	-11.320	0,5134	-5.812
28		-180	-30	-11.110	-11.320	0,5009	-5.670
29		-180	-30	-11.110	-11.320	0,4887	-5.532
					-193.200	NPV	-181.550

Tab. 18: Ermittlung Kapitalwert Schiebetür bei erhöhter Störungsanzahl KAT 1 und KAT 2

Daraus ergibt sich die Annuität (NPV gem. Tab. 18, Kapitalwiedergewinnungsfaktor 0,04778):

$$A = \text{NPV} \times \text{KWF} = -181.550 \times 0,04778$$

A = -8.674

8.6.3 Kritische Werte für die Schiebetür

Zur Ermittlung der einzelnen kritischen Werte wird von der gem. Kap. 8.5.3.1 ermittelten Annuität für die Pendeltür ausgegangen, um zu untersuchen, wie weit eine Eingangsgröße variiert werden kann, bis sich die Reihung der Türsysteme ändert.

8.6.3.1 Investition

ST	Investition	Wartung	Funktionsprfg.	Fehler	Summe	f	Barwert
0	-1.115.980	-180	-30	-6.480	-1.122.670	1,0000	-1.122.670
1		-180	-30	-6.480	-6.690	0,9756	-6.527
2		-180	-30	-6.480	-6.690	0,9518	-6.368
3		-180	-30	-6.480	-6.690	0,9286	-6.212
4		-180	-30	-6.480	-6.690	0,9060	-6.061
5		-180	-30	-6.480	-6.690	0,8839	-5.913
6		-180	-30	-6.480	-6.690	0,8623	-5.769
7		-180	-30	-6.480	-6.690	0,8413	-5.628
8		-180	-30	-6.480	-6.690	0,8207	-5.491
9		-180	-30	-6.480	-6.690	0,8007	-5.357
10		-180	-30	-6.480	-6.690	0,7812	-5.226
11		-180	-30	-6.480	-6.690	0,7621	-5.099
12		-180	-30	-6.480	-6.690	0,7436	-4.974
13		-180	-30	-6.480	-6.690	0,7254	-4.853
14		-180	-30	-6.480	-6.690	0,7077	-4.735
15		-180	-30	-6.480	-6.690	0,6905	-4.619
16		-180	-30	-6.480	-6.690	0,6736	-4.507
17		-180	-30	-6.480	-6.690	0,6572	-4.397
18		-180	-30	-6.480	-6.690	0,6412	-4.289
19		-180	-30	-6.480	-6.690	0,6255	-4.185
20		-180	-30	-6.480	-6.690	0,6103	-4.083
21		-180	-30	-6.480	-6.690	0,5954	-3.983
22		-180	-30	-6.480	-6.690	0,5809	-3.886
23		-180	-30	-6.480	-6.690	0,5667	-3.791
24		-180	-30	-6.480	-6.690	0,5529	-3.699
25		-180	-30	-6.480	-6.690	0,5394	-3.609
26		-180	-30	-6.480	-6.690	0,5262	-3.521
27		-180	-30	-6.480	-6.690	0,5134	-3.435
28		-180	-30	-6.480	-6.690	0,5009	-3.351
29		-180	-30	-6.480	-6.690	0,4887	-3.269
					-1.182.880	NPV	-1.175.995

KWF	0,04778
------------	---------

A	-56.186
----------	---------

Tab. 19: Ermittlung kritischer Wert Investition für die Schiebetür

In Tab. 19 ist der kritische Wert für die Investition der Schiebetür ersichtlich:

$$I_{\text{krit.}} = -1.115.980$$

8.6.3.2 Störungen

ST							
Jahr	Investition	Wartung	Funktionsprfg.	Fehler	Summe	f	Barwert
0	-80.000	-180	-30	-121.962	-202.172	1,0000	-202.172
1		-180	-30	-121.962	-122.172	0,9756	-119.192
2		-180	-30	-121.962	-122.172	0,9518	-116.285
3		-180	-30	-121.962	-122.172	0,9286	-113.449
4		-180	-30	-121.962	-122.172	0,9060	-110.682
5		-180	-30	-121.962	-122.172	0,8839	-107.982
6		-180	-30	-121.962	-122.172	0,8623	-105.349
7		-180	-30	-121.962	-122.172	0,8413	-102.779
8		-180	-30	-121.962	-122.172	0,8207	-100.272
9		-180	-30	-121.962	-122.172	0,8007	-97.827
10		-180	-30	-121.962	-122.172	0,7812	-95.441
11		-180	-30	-121.962	-122.172	0,7621	-93.113
12		-180	-30	-121.962	-122.172	0,7436	-90.842
13		-180	-30	-121.962	-122.172	0,7254	-88.626
14		-180	-30	-121.962	-122.172	0,7077	-86.464
15		-180	-30	-121.962	-122.172	0,6905	-84.356
16		-180	-30	-121.962	-122.172	0,6736	-82.298
17		-180	-30	-121.962	-122.172	0,6572	-80.291
18		-180	-30	-121.962	-122.172	0,6412	-78.333
19		-180	-30	-121.962	-122.172	0,6255	-76.422
20		-180	-30	-121.962	-122.172	0,6103	-74.558
21		-180	-30	-121.962	-122.172	0,5954	-72.740
22		-180	-30	-121.962	-122.172	0,5809	-70.965
23		-180	-30	-121.962	-122.172	0,5667	-69.235
24		-180	-30	-121.962	-122.172	0,5529	-67.546
25		-180	-30	-121.962	-122.172	0,5394	-65.898
26		-180	-30	-121.962	-122.172	0,5262	-64.291
27		-180	-30	-121.962	-122.172	0,5134	-62.723
28		-180	-30	-121.962	-122.172	0,5009	-61.193
29		-180	-30	-121.962	-122.172	0,4887	-59.701
					-1.301.720	NPV	-1.175.989

KWF	0,04778
------------	---------

A	-56.186
----------	---------

Tab. 20: Ermittlung kritischer Wert Fehler für die Schiebetür

In Tab. 20 ist der kritische Wert für Störungen der Schiebetür ersichtlich:

$$F_{\text{krit.}} = -121.962$$

8.6.3.3 Nutzungsdauer

ST							
Jahr	Investition	Wartung	Funktionsprfg.	Fehler	Summe	f	Barwert
0	-80.000	-180	-30	-6.480	-86.690	1,0000	-86.690
					-86.690	NPV	-86.690

KWF	1,28008
------------	---------

A	-110.971
----------	-----------------

Tab. 21: Ermittlung kritischer Wert Nutzungsdauer (Jahr 0) für die Schiebetür

ST							
Jahr	Investition	Wartung	Funktionsprfg.	Fehler	Summe	f	Barwert
0	-80.000	-180	-30	-6.480	-86.690	1,0000	-86.690
1		-180	-30	-6.480	-6.690	0,9756	-6.527
					-93.380	NPV	-93.217

KWF	0,51883
------------	---------

A	-48.363
----------	----------------

Tab. 22: Ermittlung kritischer Wert Nutzungsdauer (Jahr 1) für die Schiebetür

Aus den Tab. 21 und Tab. 22 kann geschlossen werden, dass der kritische Wert für die Nutzungsdauer der Schiebetür kurz vor Ablauf des Jahres 1 liegen muss.

8.6.4 Zusammenstellung Ergebnisse

		PENDELTÜR	SCHIEBETÜR
MODIFIKATION	BASIS	A = - 56.186	A = - 6.690
	WARTUNG + FUNKTIONSPRÜFUNG	A = - 56.094	A = - 6.722
	STÖRUNGEN	A = - 39.182	A = - 8.674
KRIT. WERTE	INVESTITION	A = - 56.186	I _{krit.} = - 1.115.980
	STÖRUNGEN		F _{krit.} = - 121.962
	NUTZUNGSDAUER		ND _{krit.} < 2 Jahre

Tab. 23: Zusammenstellung Ergebnisse Sensitivitätsanalyse

Die in der Tab. 23 als BASIS angeführte Annuität beschreibt die durchschnittlichen Jahreskosten, welche auf den Lebenszyklen für das jeweilige Türsystem (vgl. Kap. 8.3.1 und Kap. 8.3.2) beruhen. Dabei werden die Erstinvestitionskosten und die laufenden Kosten für Wartung, Funktionsprüfung sowie Entstörung (KAT 1 u. KAT 2) berücksichtigt.

Unter MODIFIKATION (WARTUNG + FUNKTIONSPRÜFUNG und STÖRUNGEN) sind in Tab. 23 Ergebnisse angeführt, welche sich aufgrund der Variation dieser Eingangswerte für die jährlichen Durchschnittskosten (= Annuität) ergeben.

Wirklich aussagekräftig bzw. plakativ sind die in der Tabelle angeführten KRIT. WERTE, die klar zeigen, ab welchen Größen die Pendeltür in wirtschaftlicher Hinsicht der Schiebetür vorzuziehen wäre: unrealistische Werte für Investitionskosten von $> 1,1$ Mio EUR, Kosten für Störungsbehebung > 122.000 EUR und eine Nutzungsdauer < 2 Jahre.

8.6.5 Plausibilitätsbetrachtung

Nachdem die in den Kap. 8.5 und 8.6 ermittelten Werte (vgl. Tab. 23) einen ganz eindeutigen Vorteil der Schiebetüre gegenüber der Pendeltüre aufzeigen, ist es zur Plausibilisierung dieser Ergebnisse von Interesse, welches Maß an Störungen für die Pendeltüre überhaupt zulässig wäre, um einen Gleichstand aus wirtschaftlicher Sicht zu erreichen.

PT							
Jahr	Investition	Wartung	Funktionsprfg.	Fehler	Summe	f	Barwert
0	-55.000	-180	-90	-126	-55.396	1,0000	-55.396
1		-180	-90	-126	-396	0,9756	-386
2		-180	-90	-126	-396	0,9518	-377
3		-180	-90	-126	-396	0,9286	-368
4		-180	-90	-126	-396	0,9060	-359
5		-180	-90	-126	-396	0,8839	-350
6		-180	-90	-126	-396	0,8623	-341
7		-180	-90	-126	-396	0,8413	-333
8		-180	-90	-126	-396	0,8207	-325
9		-180	-90	-126	-396	0,8007	-317
					-58.960	NPV	-58.552

KWF	0,11426
------------	---------

A	-6.690
----------	--------

Tab. 24: Ermittlung kritischer Wert Fehler für die Pendeltür

Dazu wird von der gem. Kap. 8.5.3.2 ermittelten Annuität für die Schiebetür ausgegangen und entsprechende kritische Wert Fehler für die Pendeltür ermittelt.

In Tab. 24 ist der so berechnete kritische Wert für Störungen der Pendeltür ersichtlich:

$$F_{\text{krit.}} = -126$$

Der ermittelte Betrag von 126 EUR pro Jahr ist jedenfalls als realitätsfern anzusehen. Unter Zugrundelegung der Kosten für eine Störungsbehebung KAT 2 von 270 EUR (vgl. Kap. 8.5.3.1) könnte dieses Ergebnis auch so interpretiert werden, dass nur ca. jedes zweite Jahr eine einzige Störungsbehebung erlaubt ist, damit die wirtschaftliche Gleichwertigkeit gegeben bleibt. Jedenfalls wird damit aber wiederum bestätigt, dass die Pendeltüre aus wirtschaftlichen Gesichtspunkten in keinsten Weise mit der Schiebetüre konkurrieren kann und das wirtschaftlich eindeutig ungünstigere Türsystem darstellt.

9 BESCHAFFUNG

Die Beschaffung der Querschlagtüren und der Fluchttüren in der Nothaltestelle soll im Wege eines mehrstufigen Verhandlungsverfahrens erfolgen. Dieses Procedere wurde seitens ÖBB für die zukünftige Beschaffung aller Tunneltüren gewählt, um bei den jeweiligen Ausschreibungsverfahren v.a. die unbedingt erforderliche technische Qualität der angebotenen Produkte sicherzustellen, aber auch um den wirtschaftlichen Aspekten Rechnung tragende Angebote in einem von vornherein kleinen Marktumfeld zu erreichen.

9.1 Prüfsystem

Für die Produktfreigabe sind umfangreiche Prüfungen bzw. Nachweise (vor allem für Notausgangstüren) als „Erstmusterprüfung“ im Sinn eines Prüfsystems für jeden einzelnen Türtyp vorgesehen. Liegt eine positive „Produktfreigabe“ für einen Türtyp vor, so erhält dieser durch ÖBB die generelle Zulassung mit einer längerfristigen Gültigkeit (z.B. 5 Jahre). Damit wird es dem Türhersteller ermöglicht, auch an anderen zukünftigen Ausschreibungen der ÖBB betr. Tunneltüren teilzunehmen, ohne jeweils Produktprüfungen von neuem durchlaufen zu müssen.

Außerdem beabsichtigen die ÖBB als Auftraggeber diese „Erstmusterprüfung“ mittels eines festgelegten einmaligen Pauschalbetrages zu vergüten, um auch einen entsprechenden finanziellen Anreiz für die erhebliche Investition der Entwicklung eines Prototyps zu bieten.

9.2 Vergabeverfahren

9.2.1 I. Stufe: Teilnahmeantrag (Technische Lieferbedingungen)

In der ersten Verfahrensstufe ist von jedem Bewerber der Teilnahmeantrag zu stellen, d.h. es ist die Eignung zur Teilnahme an der Ausschreibung für die *Produktion, Lieferung und Montage von Tunneltüren* nachzuweisen. ^[112]

Das bedeutet den Nachweis von

- beruflicher Zuverlässigkeit,
- finanzieller und wirtschaftlicher Leistungsfähigkeit sowie
- technischer Leistungsfähigkeit (Referenzen)
- etc.

im in den Teilnahmeunterlagen geforderten Umfang.

9.2.2 II. Stufe: Ausschreibung (Projektbezogenes Leistungsverzeichnis)

In der zweiten Verfahrensstufe erfolgt die eigentliche Ausschreibung.

Mit der Angebotslegung (ausgepreistes Leistungsverzeichnis, technische Dokumentation und Konstruktionszeichnungen sowie Bauzeitplan des AN etc.) ist die Detailplanung für den jeweiligen Türtyp den zuständigen Stellen der ÖBB zur Genehmigung vorzulegen. Anschließend erfolgt die Produktion eines Prototypen und seine Erstprüfung hinsichtlich aller für die ÖBB-Prüfung definierten Werte (z.B. Abmessungen, Bedienkräfte, Nutzungssicherheit etc.).

Nach positiver Erstprüfung, Übergabe der technischen Dokumentation sowie einer positiven Prüfung der statischen Berechnungen werden schließlich zum Nachweis der Dauer- und Funktionsfähigkeit die Erstmusterprüfungen (vgl. Kap. 9.1) in einer vom AG ausgewählten akkreditierten Prüfstelle durchgeführt:

- Dauerschwingversuch (1:1 Belastungs-Realversuch) inkl. der Überprüfung der Gebrauchstauglichkeit bzw. der Tür-Bedienkräfte
- Brandversuch - Nachweis des Feuerwiderstandes
- Nachweis der Luftdurchlässigkeit bzw. Rauchschutzeigenschaften
- Nachweis der selbstschließenden Eigenschaft inkl. Nutzungssicherheit ^[113]

Aufgaben des Bieters im Rahmen der Erstmusterprüfungen:

- Planung, Produktion und Lieferung der oben angeführten Türen zum Prüfinstitut
- Montage der Türen beim Prüfinstitut
- Beistellen und Vorhalten von Personal zur Durchführung von Wartungsarbeiten an den Türen während der Versuchsdurchführung entsprechend des Wartungsplans des Bieters
- Entsorgung der geprüften Türen ^[114]

Die Dauerschwingversuche werden kraft geregelt durchgeführt und mit einer Frequenz von 5 Hz gefahren. Die Dauerfunktionsprüfung ist jeweils im Anschluss an den entsprechenden Zyklus der Lastwechsel (beginnend mit 100.000 und schrittweise Steigerung bis 300.000) durchzuführen.

Der Bieter hat die Möglichkeit, in den Pausen zwischen den Zyklen Wartungsarbeiten entsprechend der zuvor übergebenen Wartungsanweisung durchzuführen. Die vom Bieter durchgeführten Wartungsarbeiten werden von der Prüfstelle dokumentiert. ^[115]

Zwischen zwei Zyklen sowie nach Erreichen von 1,5 Mio. Lastwechseln wird vom Prüfinstitut die Lastverteilkonstruktion demontiert und eine Funktionsprüfung wie folgt durchgeführt:

- Prüfung und Dokumentation der Öffnungs- und Schließkraft
- Prüfung der Öffnen- und Schließbarkeit (Gängigkeit), d.h. Feststellung ob erhöhte Reibungseffekte bzw. ein erhöhter Widerstand beim Öffnen der Türe auftreten
- Prüfung von gegenüber dem Zustand vor Beginn der Eignungsprüfung unüblicher Geräuscentwicklungen die beim Öffnen- und Schließen auftreten
- Begutachtung der Anschlusskonstruktionen und Aufhängungen der Türe an den Beton-Prüfraumen in Hinblick auf Anzeichen von Ermüdungsschäden
- Prüfung ob Brandschutzplatten zerrieben wurden, d.h. ob Plattenstaub oder Plattenkörner von den Brandschutzplatten abgelöst wurden
- Visuelle Überprüfung der Schweißnähte in Bezug auf Rissentwicklungen
- Überprüfung und Dokumentation von lockeren Schrauben; im Fall von lockeren Schrauben hat der Hersteller die Möglichkeit diese Schrauben wieder fest anzuziehen
- Generelle Mängel- bzw. Schadensfeststellung der gesamten Türkonstruktion - Türblatt, Verbindungsmittel, Türmechanik, Verankerungskonstruktionen an den Beton-Prüfraumen, etc.
- Prüfung und Überwachung der übermittelten Meldungen (Offen/geschlossen + verriegelt / entriegelt) durch die Fernwirk-Leittechnik-Anlage der ÖBB
- Am Ende des Versuchs ist zwecks Zustandsüberprüfung der Brandschutzplatten das Deckblech der Türe zu entfernen und etwaige Schäden zu dokumentieren

Ein Versuch wird als positiv bestanden gewertet, wenn nach 1,5 Mio. Lastwechseln keine Schäden an der Tür feststellbar sind und nach 10.000 Öffnungszyklen die volle Funktionstüchtigkeit der Türe gegeben ist und die Öffnungskräfte eingehalten werden.

Treten während des Versuchs Ermüdungsbrüche oder andere schwerwiegende Mängel auf, die durch „übliche“ Wartungsarbeiten entsprechend der (eigenen) Wartungsanweisung nicht behoben werden können, so gilt der Versuch als gescheitert, wird abgebrochen und als negativ beurteilt.

Bei einem negativen Versuch kann der Bieter auf eigenen Wunsch und eigene Kosten konstruktive Verbesserungen an der Tür vornehmen und die Tür einem erneuten Versuch unterziehen. Unterlässt der Bieter bei einem negativen Versuch eine Verbesserung und erneute Versuchsdurchführung, so wird er aus dem Verfahren ausgeschieden. ^[116]

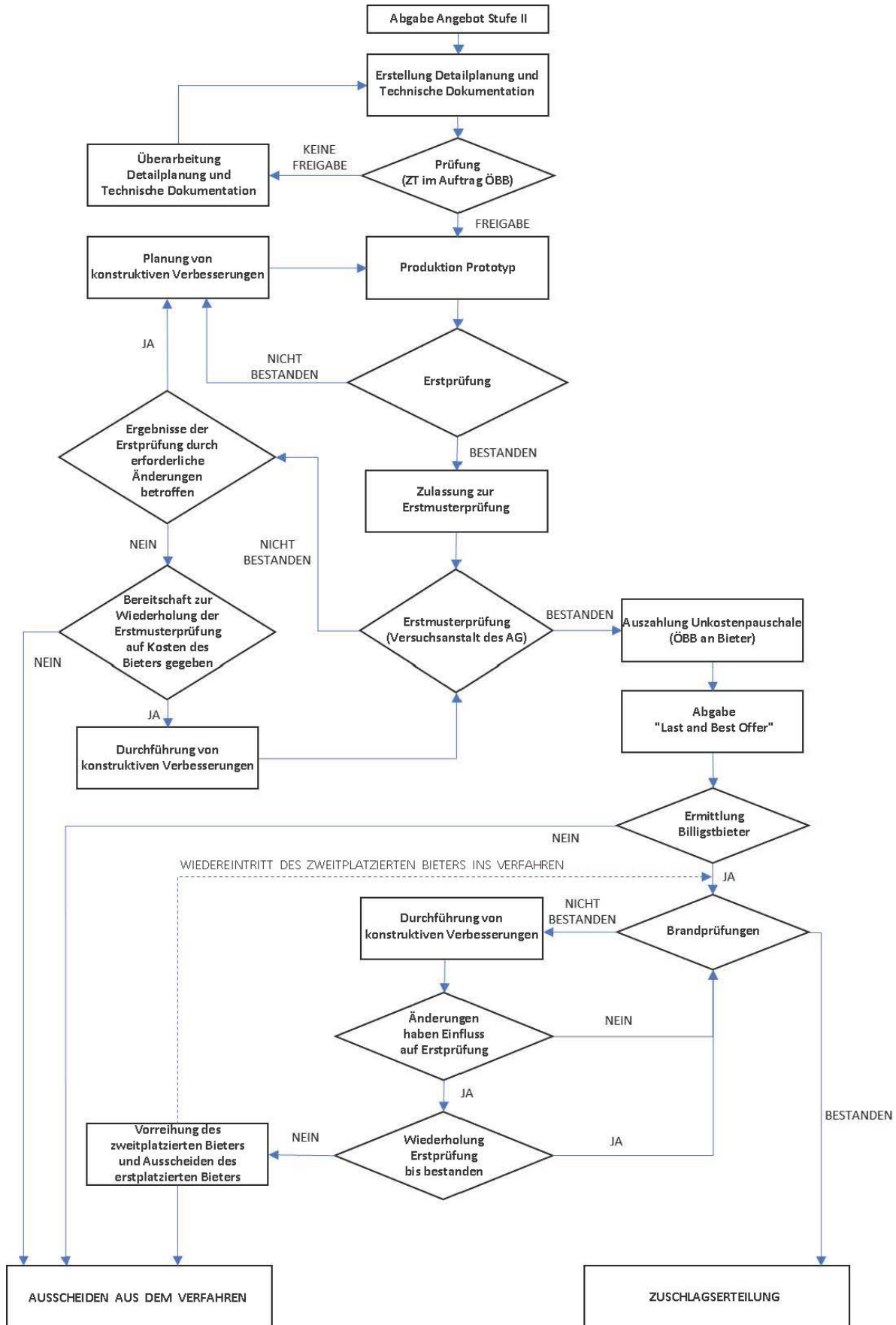


Abb. 103: Verfahrensablauf

9.3 Projektbezogenes Leistungsverzeichnis

Wie in Kap. 9.2.2 angeführt erfolgt in der II. Stufe die eigentliche Ausschreibung für die Beschaffung der erforderlichen Anzahl von Tunneltüren (Querschlagtüren, Fluchttüren in der Nothaltestelle). Dafür werden projektbezogene Ausschreibungsunterlagen mit entsprechenden Angaben zu Stückzahl, Ort, Zeit, div. weiteren Randbedingungen etc. erstellt.

Die Grundlage für die Ermittlung des Billigstbieters stellt das ausgefüllte Leistungsverzeichnis mit Preisen je Türtyp dar. Verfügt der Bieter bereits aus früheren Vergabeverfahren über eine gültige ÖBB-Zulassung für den ausgeschriebenen Türtyp (Schiebetüre oder Pendeltüre mit unterschiedlichen lichten Öffnungsweiten) ist nur mehr die Abgabe des „Last and Best Offers“ erforderlich (s. Abb. 103).

Mit der auf Grundlage der Angebotsprüfung erfolgenden Zuschlagserteilung wird der Vergabeprozess abgeschlossen.

10 ZUSAMMENFASSUNG UND RESÜMEE

Ein für Geschwindigkeiten > 200 km/h konzipierter Eisenbahntunnel stellt in jeder Hinsicht ein äußerst komplexes System dar. Insbes. durch die bei solch hohen Geschwindigkeiten entstehenden aerodynamischen Belastungen werden Einbauten im Tunnel in vielfacher Weise z.T. außerordentlich stark beansprucht.

Notausgangstüren, die den Übergang vom Fahrtunnel in einen sicheren Bereich (Nothaltestelle oder Querschlag) bilden, müssen daher einer Vielzahl von Anforderungen genügen. Neben der Widerstandsfähigkeit gegen zyklisch auftretende Druck-Sog-Belastungen, Staubanfall bzw. Verschmutzung und ähnlicher während des Regelbetriebes auftretender Einwirkungen ist vor allem die Sicherstellung ihrer Funktion als Notausgangstüre im Ereignisfall von zentraler Bedeutung.

Bei einem Brand als maßgebendem Szenario muss die Selbstrettung von Fahrgästen in einem kurzen Zeitraum möglich sein. Daher spielen die auf dem Fluchtweg herrschenden Bedingungen eine wesentliche Rolle:

- Fluchtwegbreiten
- System und lichte Durchgangsweiten der Notausgangstüren
- Temperaturen
- Rauchentwicklung bzw. Sichtweiten

In der ggst. Arbeit wurde versucht, Anforderungen an Notausgangstüren, die ein zentrales Element auf dem Fluchtweg und damit für die Selbstrettung darstellen, systematisch zu erarbeiten und darzustellen. Zunächst wurden die maßgebenden Bestimmungen und gesetzlichen Vorgaben betr. Tunnelsicherheit, die in den europaweit gültigen Regelwerken *Technische Spezifikation für die Interoperabilität bzgl. der Sicherheit in Eisenbahntunneln* (2) (3) und *UIC-Kodex 779-9* (4) sowie in der nationalen *ÖBFV-Richtlinie A-12* (7) (8) zu finden sind, zusammengefasst.

Am Beispiel Semmering-Basistunnel konnte die Umsetzung dieser Grundlagen bei der Konstruktion (z.B. zweiröhrige, jeweils eingleisige Tunnelanlage) und v.a. im zugehörigen Tunnelsicherheitskonzept sowie den daraus resultierenden Folgerungen (z.B. Lüftungskonzept) gezeigt werden.

Bei einem Ereignisfall mit Zughalt in der Nothaltestelle sind aufgrund der im Tunnelsicherheitskonzept vorgesehenen Maßnahmen günstige Bedingungen für die Selbstrettung der Flüchtenden gewährleistet. (vgl. Kap. 4.2)

Eigene Notbahnsteige für Gleis 1 und Gleis 2 mit Gesamtlängen > 400 m und einem Höhenniveau von + 55 cm über SOK sowie einem Lichtraumprofil von mind. 2,0 m x 2,25 m (B x H) bilden zusammen mit den jeweils 9 Fluchtstollen im Abstand von je 50 m die baulichen Voraussetzungen, um via Fluchttüren und Fluchtstollen rasch in den sicheren Rettungsraum (Wartebereich) gelangen zu können.

Durch die direkt über der Nothaltestelle situierten Abluft- und Zuluftschächte werden eine effektive Rauchabsaugung und eine ausreichende Frischluftzufuhr während der Selbstrettungsphase, welche gem. Simulation (vgl. Kap. 6.2.2) nur wenige Minuten dauert, sichergestellt. Die Notausgangstüren in der Nothaltestelle müssen bei Einfahrt des in Brand geratenen Zuges bereits ferngesteuert geöffnet sein, um die dabei entstehenden Luftgeschwindigkeiten in den Fluchtstollen im akzeptablen Bereich (< 10 m/s) zu halten.

Daher spielt die Wahl des Türsystems im Fall der Nothaltestelle eine untergeordnete Rolle, weil durch die motorbetriebene Öffnung der Türen maximal zulässige Türöffnungskräfte (100 N) nicht zum Tragen kommen und weil auch weitere mögliche Einflüsse wie z.B. Zugverkehr in der Gegenröhre durch die gegebene aerodynamische Unterbrechung keine Auswirkungen auf die Situation im Fluchtbereich haben.

Aus Kontinuitätsgründen und im Hinblick auf Wartung und Instandhaltung sollte jedoch das gleiche Türsystem wie für die Querschlagtüren gewählt werden, wenngleich für die Fluchttüren in der Nothaltestelle eine geringere lichte Weite (140 cm) ausreichend ist (vgl. Kap. 6.2).

In jeder Hinsicht schwieriger stellt sich die Situation für die Selbstrettung bei einem Zughalt zwischen Einfahrtsportal und Nothaltestelle bzw. zwischen Nothaltestelle und Ausfahrtsportal dar. Gem. Tunnelsicherheitskonzept (vgl. Kap. 4.2) sollte dieser Fall eigentlich nur dann eintreten, wenn ein Brandschaden an der Lok selbst auftritt und infolge dessen eine Weiterfahrt des personenbefördernden Zuges unmittelbar nicht möglich ist. Auch wenn die Eintrittswahrscheinlichkeit für dieses Szenario vergleichsweise gering ist, kann es natürlich nicht gänzlich ausgeschlossen werden.

Im Fahrtunnel sind anders als in der Nothaltestelle keine Bahnsteige vorhanden, so liegt die Oberkante des auf Querschlagseite angeordneten Flucht- und Rettungsweges auf Höhe + 18 cm. Seine Breite ist einerseits vom Tunnelprofil (zyklischer od. kontinuierlicher Vortrieb) und andererseits von der Lage im Bogen (Innen- od. Außenseite) abhängig. Daraus ergeben sich im wesentlichen Randwegbreiten von 1,60 m, 1,80 m und 2,0 m. Dennoch sind auch mit diesen baulichen Rahmenbedingungen die Voraussetzungen für eine zügige Selbstrettung von Reisenden über den Querschlag in den sicheren Bereich gegeben (vgl. Kap. 6.2.2).

Den größten Einfluss auf die Selbstrettung im Fahrtunnel haben jedoch die aus dem Brandereignis resultierenden Temperaturen und Luftgüte- bzw. Sichtverhältnisse. Was die Temperaturen am Fluchtweg anbelangt, so legen sowohl die durchgeführten CFD-Berechnungen (vgl. Kap. 6.4) als auch die Messergebnisse aus den Großversuchen (vgl. Kap. 7.6) den Schluss nahe, dass diese zumindest für den relativ kurzen Zeitraum der Selbstrettung (vgl. Kap. 6.2.2) als unkritisch anzusehen sind.

Am schwierigsten ist es eindeutig zu beurteilen, ob die bei einem Brandereignis entstehenden Rauchmengen die Fluchtmöglichkeiten während der Selbstrettungsphase einschränken. Neben dem Lüftungsregime, welches gem. Lüftungskonzept im Ereignisfall als Maßnahme zur Rauchfreihaltung der Fluchtwege vorgesehen ist, beeinflussen auch einige weitere Faktoren die Verhältnisse am Fluchtweg: Meteorologische Portaldruckdifferenzen, fahrende Züge in der Gegenröhre, Freifahren beider Fahrtunnel etc.

Gerade das Freifahren der Gegenröhre kann auf die Wirkungsweise der Lüftung im Ereignisfall negative Auswirkungen nach sich ziehen. So kann bei zu hohen Geschwindigkeiten der ausfahrenden Züge und bei geöffneten Querschlagtüren nicht nur die für die Rauchfreihaltung notwendige Strömungsgeschwindigkeit von ≥ 1 m/s unterschritten werden, sondern es muss auch mit einer Umkehrung der Luftströmung gerechnet werden. (vgl. Kap. 6.6.2) Dies würde allerdings dem in der Einreichplanung definierten Lüftungskonzept entgegenstehen, weshalb maximal zulässige Geschwindigkeiten für das Freifahren des Tunnels im Rahmen von betrieblichen Vorgaben festzulegen sind.

Wenn es also im Ereignisfall bei einem Zughalt außerhalb der Nothaltestelle gelingt, unter Berücksichtigung der vorgegebenen Richtgeschwindigkeiten für ausfahrende Züge im Querschlag mithilfe der Ereignisfalllüftung Luftgeschwindigkeiten ≥ 1 m/s sicherzustellen, sind aufgrund der herrschenden Bedingungen gute Voraussetzungen für die Selbstrettung von Zugreisenden gegeben:

- einerseits bewegen sich die Temperaturen in Kopfhöhe (ca. 2,0 m) in einem zulässigen Bereich (max. ca. 40°C)
- andererseits beeinträchtigt die entstandene Verrauchung brandabwärts unabhängig von der Brandlast die Sicht höchstens geringfügig

Weil allerdings diese erforderlichen Luftgeschwindigkeiten ≥ 1 m/s teilweise hohe Differenzdrücke in den beiden Tunnelröhren bedingen, stellt die maximal zulässige Türöffnungskraft von 100 N ein entscheidendes Kriterium für das Türsystem dar. Unter diesem Gesichtspunkt wäre eindeutig der Schiebetüre als Fluchttüre für den Querschlag der Vorzug gegenüber der Pendeltüre zu geben (vgl. Kap. 7.6.7).

Aufgrund der durchgeführten Versuche mit Einsatz der Hochdruckwassernebelanlage ist davon auszugehen, dass zwar die Brandlast und die Temperatur massiv reduziert werden könnten, dass jedoch in jedem Fall auch die Sicht im Tunnel stromabwärts des Brandortes auf sehr kurze Distanzen zurückgeht und somit die Fluchtmöglichkeit durch die verminderte Sicht erheblich eingeschränkt wird.

Daher ist die Installation einer HDWNA in der Nothaltestelle nur aus Gründen des Bauwerksschutzes als sinnvoll anzusehen. In diesem Fall müssen auch entsprechende Festlegungen für den Einsatz getroffen werden. Das betrifft in erster Linie eine zuverlässige Regelung für die Lokalisierung des Brandortes und für den Zeitpunkt der Aktivierung – nämlich nach Abschluss der Selbstrettung von Reisenden und Zugpersonal.

Für die Wirtschaftlichkeitsbetrachtung mussten als erstes die Berechnungsgrundlagen festgelegt werden. Wie einleitend erwähnt wurden dafür die Evaluierungsberichte *Anlagenbericht: Tunneltüren im Fahrtunnel (Notausgangs- und Schleusentüren)* (33) und *Schiebetüren als Tunneltüren – Schiebetüren in Eisenbahntunneln der Schweiz* (34) als einzig verfügbare plausible Datenquellen herangezogen.

Damit konnten zum einen Ansätze Instandhaltung, Instandsetzung sowie Störungen getroffen und zum anderen Lebenszyklen für Pendel- und Schiebetüre erstellt werden. Realistische Erstinvestitionskosten wurden dagegen für die Pendeltüre aus Angebotspreisen abgeleitet und für die Schiebetüre durch Informationsaustausch mit marktführenden Erzeugern von Tunneltüren gewonnen.

In einem ersten Schritt wurde für beide Türsysteme mittels dynamischer Wirtschaftlichkeitsrechnung die Annuität als charakteristische Größe ermittelt, welche bereits eine sehr eindeutige Tendenz zugunsten der Schiebetüre erkennen lässt (Faktor > 8). Diese Tendenz wurde durch die nachfolgende Modifikation von Eingangsgrößen (z.B. Wartung, Funktionsprüfung u. Störungen) und die Berechnung verschiedener kritischer Kennwerte für die Schiebetüre wie z.B. Investition, Störungen u. Nutzungsdauer verstärkt, da sich bei dieser Sensitivitätsanalyse im allgemeinen nur wenig bessere Zahlen (Faktor 4,5 bis 9) bzw. unrealistische kritische Werte (z.B. kritische Investitionskosten > 1,1 Mio EUR od. kritische Nutzungsdauer < 2 Jahre) ergaben (vgl. Kap. 8.6.4).

Zur Plausibilisierung dieser Ergebnisse wurde zusätzlich noch der kritische Wert für Störungen der Pendeltür ermittelt. Mit einem absolut realitätsfernen Betrag von 126 EUR jährlich (was de facto nur 1 notwendige Störungsbehebung der Kategorie 2 ca. alle zwei Jahre bedeuten würde!) untermauert diese Berechnung den bereits zuvor aufgezeigten wirtschaftlichen Nachteil der Pendeltüre gegenüber der Schiebetüre (vgl. Kap. 8.6.5).

Resümee

Notausgangstüren in Eisenbahntunneln stellen ein zentrales bauliches Element des Fluchtweges dar und haben somit wesentlichen Einfluss auf die Selbstrettung von Zugpassagieren und Zugpersonal im Ereignisfall.

Aus einer Reihe von verschiedenen Türsystemen werden Pendel- und Schiebetüren für den Einbau als Notausgangstüren in einer Nothaltestelle und in Querschlägen von Eisenbahntunneln als am besten geeignet angesehen. Deshalb werden sie auch von behördlicher Seite im Genehmigungsverfahren als die zwei für die Ausführung zulässigen Bauarten vorgegeben.

Für lange zweiröhrige, jeweils eingleisige Eisenbahntunnel konnte am Beispiel Semmering-Basistunnel eindeutig gezeigt werden, dass Schiebetüren das in nahezu jeder Hinsicht bessere Türsystem darstellen:

- Generell mehr Platzbedarf als die Pendeltüre, diese geometrischen Erfordernisse lassen sich jedoch leicht berücksichtigen
- Einhaltung der max. zulässigen Öffnungskraft von 100 N unter den herrschenden Bedingungen im Ereignisfall (Über-/Unterdruck in den beiden Fahrtröhren) im Gegensatz zur Pendeltüre (ohne zusätzlichen unterstützenden Antrieb sicher nicht machbar) jedenfalls möglich
- Stabilere Konstruktion und damit für eine charakteristische Druck-/Sog-Belastung von $\pm 7,5 \text{ kN/m}^2$ geeigneter (Ermüdungsnachweis 1,0 Mio. Lastwechsel)
- Resultierende Zuverlässigkeit, d.h. geringere Störungsanfälligkeit (wesentlich weniger Betriebseinschränkungen)
- Geringerer Wartungsaufwand
- Trotz höherer Investitionskosten das auf lange Sicht (Lebenszykluskosten) mit großem Abstand wirtschaftlichere System

Somit kann schlussfolgernd festgehalten werden, dass im Semmering-Basistunnel und ebenso auch in Eisenbahntunnelanlagen mit vergleichbaren Rahmenbedingungen (d.h. Konstruktion als zweiröhriges, eingleisiges System, gleiches bzw. ähnliches Tunnelsicherheits- und Lüftungskonzept etc.) Schiebetüren als Fluchttüren sowohl bei den Fluchtstollen der Nothaltestelle als auch bei den Querschlägen eingesetzt werden sollen.

ANHANG

	Türtyp	
	Pendeltür (PT)	Schiebetür (ST)
Funktion	Notausgang	Notausgang
Anmerkungen	<p>Tür ohne Antrieb</p> <ul style="list-style-type: none"> * Stand der Technik * ausgereiftes / bewährtes System (DB) * Langzeiterfahrung vorhanden (DB) * nur für kurze bzw. Tunnels ohne Belüftungssystem (Fahrrohren bzw. Querschläge) bedingt geeignet <p>*****</p> <p>Tür mit Antrieb</p> <ul style="list-style-type: none"> * nicht Stand der Technik * kein ausgereiftes / bewährtes System * keine Langzeiterfahrung vorhanden 	<p>*****</p> <p>Tür mit Antrieb</p> <ul style="list-style-type: none"> * Stand der Technik * ausgereiftes / bewährtes System (CH) * Langzeiterfahrung vorhanden (CH)
Anzahl Türflügel	2	1
"Unter" - Türtypen	keine	<ul style="list-style-type: none"> * einflügelige Schiebetür * Gelenk-/ Gliederschiebetür * Schwenkschiebetür * Teleskopschiebetür
Öffnen		
mech. Unterstützung		
mit	* die Tür wird über den gesamten Öffnungs-/ Schließvorgang mechanisch (Maschine) betrieben	* ein Antrieb kann je nach Erfordernis als Voll-/ Hilfsantrieb, mech. Unterstützung, Öffnungshilfe, Niedrigenergieantrieb, elektromechanisch oder pneumatisch ausgeführt werden
ohne	* Öffnungskräfte können deutlich über 100 N liegen	* Öffnungskräfte können mehr als 100 N betragen
Anmerkungen	<ul style="list-style-type: none"> * durch die bestehenden Druckunterschiede vor / hinter der Tür können die geforderten max. Öffnungskräfte nur mittels Antrieb eingehalten werden * ohne konkreten Antrieb kann sich die Tür im Moment der Öffnung je nach Druckverhältnissen auch gegen die Fluchrichtung bewegen bzw. es kann die Tür auch aus der Hand gerissen werden * die Montage einer Öffnungshilfe ist schwierig, da sich die Tür in beide Richtungen öffnen muss 	<ul style="list-style-type: none"> * bestehende Druckunterschiede vor / hinter der Tür wirken sich bei einer Schiebetür nur in einem geringen Ausmaß auf die Öffnungskräfte aus und können durch eine individuelle Einstellung des Türantriebs kompensiert werden * Öffnungs-/ Schließgeschwindigkeiten bzw. die Zeit des Offenbleibens können eingestellt werden * Eine Fernbedienbarkeit (z.B. für den Bereich der Nothaltestelle) ist möglich
Schließen		
mech. Unterstützung		
mit	* die Tür wird über den gesamten Öffnungs-/ Schließvorgang mechanisch (Maschine) betrieben	* ein Antrieb kann je nach Erfordernis als Voll-/ Hilfsantrieb, mech. Unterstützung, Öffnungshilfe, Niedrigenergieantrieb, elektromechanisch oder pneumatisch ausgeführt werden
ohne	* die Montage eines Rotationsdämpfers (Türschließers) ist möglich	* die Montage eines Gegengewichts ermöglicht ein sicheres Schließen
Anmerkungen	<p>Tür ohne Antrieb</p> <ul style="list-style-type: none"> * bestehende Druckunterschiede / Luftgeschwindigkeiten können ein vollständiges Schließen der Tür verhindern * Druck-Sog können zu einem relativ unkontrollierten Zu-/Aufschlagen der Tür führen 	* die Tür wird durch ein Gegengewicht in jedem Fall wieder geschlossen
Nutzung	bekannte Türfunktion	bekannte Türfunktion
Anmerkungen	<ul style="list-style-type: none"> * bestehende Druckunterschiede / Luftgeschwindigkeiten können zu unerwartet hohen Bedienkräften führen * es könnte dabei der Eindruck einer verschlossenen und somit nicht offenbaren Tür entstehen 	<ul style="list-style-type: none"> * bisher untypisch als Fluchttür (Hochbau) * durch eine entsprechende Beschriftung / Kennzeichnung / Symbolik ist die Funktion / Bedienbarkeit der Tür klar erkennbar

	Türtyp	
	Pendeltür (PT)	Schiebetür (ST)
Dichtheit	kann durch entsprechende Vorgaben / Definiton der Anforderungen (z.B. < 50 m³/h bei 50 Pa Diff.Druck) / Erfahrungen aus der Vergangenheit / usw. für jeden Türtyp bedarfsgerecht (z.B. mittels aufblasbarer Lippendichtungen + Druckluftspeicher) definiert und eingehalten werden	
Lebensdauer / Instandhaltung	kann durch entsprechende Vorgaben / Definiton der Anforderungen / Auftretende Einwirkungen (+/- 7,5 kPa; Def. Lastkollektiv; 5 Mio. Lastwechsel) / Erfahrungen aus der Vergangenheit / Erkennen von Schwachstellen / usw. für jeden Türtyp bedarfsgerecht definiert und eingehalten werden	
Brandwiderstand	kann durch entsprechende Vorgaben / Definiton der Anforderungen (ETK, HC, EBM, ...) / usw. für jeden Türtyp bedarfsgerecht definiert und eingehalten werden	
Steuerung	<ul style="list-style-type: none"> * das Öffnen (Offenhaltezeiten) bzw. Schließen ist ferngesteuert / fernbedient nach Einbau eines Antriebs möglich * abhängig von der eingebauten Sensorik ist die Übertragung von Zustandsmeldungen möglich 	<ul style="list-style-type: none"> * das Öffnen (Offenhaltezeiten) bzw. Schließen ist ferngesteuert / fernbedient ist nach Einbau eines Antriebs möglich * abhängig von der eingebauten Sensorik ist die Übertragung von Zustandsmeldungen möglich
Erfahrungen	<u>Tür ohne Antrieb</u> * Langzeiterfahrungen vorhanden (DB) ***** <u>Tür mit Antrieb</u> * keine Langzeiterfahrungen vorhanden	<u>Tür ohne Antrieb</u> * Langzeiterfahrungen vorhanden (CH) ***** <u>Tür mit Antrieb</u> * Langzeiterfahrungen vorhanden (CH)
Redundanz	<u>Tür ohne Antrieb</u> * keine - rein mechanisch ***** <u>Tür mit Antrieb</u> * aufwändige Installationen erforderlich - keine Erfahrungen vorhanden	<u>Tür ohne Antrieb</u> * keine - rein mechanisch ***** <u>Tür mit Antrieb</u> * Systeme sind entsprechend redundant vorzusehen (z.B. Pneumatik)
Zusammenfassung / Vorteile	<u>Tür ohne Antrieb</u> * einfache Konstruktion * beidseitige Öffnungsrichtung * geringer Platzbedarf * langjährige Erfahrung (DB) ***** <u>Tür mit Antrieb</u> * beidseitige Öffnungsrichtung	<u>Tür mit Antrieb</u> * Öffnungskräfte druckunabhängig * langjährige Erfahrung (CH) * Einbau von Türen mit einer nutzbaren Durchgangslichte von 160 x 220 cm (Querschläge) und 140 x 220 cm (Fluchstollen Nothaltestelle) bei SBT möglich
Zusammenfassung / Nachteile	<u>Tür ohne Antrieb</u> * geforderte Öffnungskräfte nicht erreichbar ***** <u>Tür mit Antrieb</u> * keine Langzeiterfahrung * Platzbedarf – ist aus geometrischen Gründen beim SBT vermutlich nicht einbaubar * aufwändige Redundanzeinrichtungen * Quetschgefahr (Kniehebel)	<u>Tür ohne Antrieb</u> * geforderte max. Öffnungskräfte (100 N) werden wahrscheinlich überschritten ***** <u>Tür mit Antrieb</u> * redundante Öffnungshilfen sind vorzusehen ***** <u>Tür mit / ohne Antrieb</u> * Einbau von Türen mit einer nutzbaren Durchgangslichte von > 160 x 220 cm (Querschläge) und > 140 x 220 cm (Fluchstollen Nothaltestelle) bei SBT nicht möglich

Tab. 25: Gegenüberstellung Pendeltür - Schiebetür

Anmerkungen

Der **Stand der Technik** - im Sinne des EisBG § 9b - ist der auf den einschlägigen wissenschaftlichen Erkenntnissen beruhende Entwicklungsstand fortschrittlicher technologischer Verfahren, Einrichtungen, Bau- und Betriebsweisen, deren Funktionstüchtigkeit erwiesen und erprobt ist.

Bei der Bestimmung des Standes der Technik sind insbesondere vergleichbare Verfahren, Einrichtungen, Bau- oder Betriebsweisen heranzuziehen und die Verhältnismäßigkeit zwischen dem Aufwand für die nach der vorgesehenen Betriebsform erforderlichen technischen Maßnahmen und dem dadurch bewirkten Nutzen für die jeweils zu schützenden Interessen zu berücksichtigen.

Redundanz ist das zusätzliche Vorhandensein funktional gleicher oder vergleichbarer Ressourcen eines technischen Systems, wenn diese bei einem störungsfreien Betrieb im Normalfall nicht benötigt werden.

ABKÜRZUNGEN

1D	eindimensional
A	Austria, Österreich
Abb.	Abbildung
AG	Aktiengesellschaft
ARGE	Arbeitsgemeinschaft
AS	Absaugstollen
BBT	Brenner Basistunnel
BV	Brandversuch
bzgl.	bezüglich
bzw.	beziehungsweise
betr.	betreffend
ca.	circa
CFD	Computational Fluid Dynamics
CH	Confoederatio Helvetica, Schweiz
CO	Kohlenmonoxid
CO ₂	Kohlendioxid
D	Deutschland
d.h.	das heißt
div.	divers
EB	Eisenbahnrechtliches Einreichungsverfahren
et al.	et altera
etc.	et cetera
EUR	Euro
F	Frankreich
FS	Fluchtstollen
Fzg.	Fahrzeug
GB	Großbritannien
gem.	gemäß
ggf.	gegebenenfalls
GZ	Güterzug
HC	Kohlenwasserstoffe
HCL	Chlorwasserstoff, Salzsäure
HCN	Zyanid, Blausäure
HD	Hochdruck
HDWNA	Hochdruckwassernebelanlage
H ₂ O	Wasser

i.d.R.	in der Regel
insbes.	insbesondere
k. A.	keine Angabe
Kap.	Kapitel
KAT	Koralmtunnel
LG	Luftströmungsmessgerät
LKW	Lastkraftwagen
lt.	laut
MA	Mitarbeiter
max.	maximal
mech.	mechanisch
mind.	Mindestens
Mio.	Million
MP	Messpunkt
MW	Megawatt
NEAT	Neue Eisenbahn-Alpentransversale
NHS	Nothaltestelle
NÖ	Niederösterreich
ÖBB	Österreichische Bundesbahnen
QS	Querschlag
rd.	Rund
RGK	Rauchgaskühlung
S	Temperatursensor
s.	siehe
SBT	Semmering-Basistunnel
SBTN	Semmering-Basistunnel Neu, EB 2010
SiKo	Sicherheitskoordinator
sog.	sogenannt
SOK	Schienenoberkante
SSR	Sauerstoff-Selbststretter
ST	Steiermark
tlw.	teilweise
TSI	Technische Spezifikation Interoperabilität
u.	und
u.a.	unter anderem
usw.	und so weiter
u.U.	unter Umständen
V	Axialventilator
v.a.	vor allem

VC	Videokamera
VDE	Verkehrsprojekt Deutsche Einheit
vgl.	vergleiche
z.B.	zum Beispiel
z.T.	zum Teil

EINHEITEN

bar	Bar
°C	Grad Celsius
cm	Zentimeter
Hz	Herz
kg	Kilogramm
km	Kilometer
km/h	Stundenkilometer
kN/m ²	Kilonewton pro Quadratmeter
l/min/m ³	Liter pro Minute pro Kubikmeter
N	Newton
m	Meter
m ²	Quadratmeter
m/s	Meter pro Sekunde
m ³ /s	Kubikmeter pro Sekunde
mm	Millimeter
Pa	Pascal
s	Sekunde

SONDERZEICHEN

%	Prozent
‰	Promille
x	mal
<	kleiner
≤	kleiner gleich
>	größer
≥	größer gleich

QUELLENANGABEN

- [1] Technische Spezifikation für die Interoperabilität bezüglich der „Sicherheit in Eisenbahntunneln“ TSI - SRT, 07.03.2008 (2), S. 20 u. 21
- [2] Technische Spezifikation für die Interoperabilität bezüglich der „Sicherheit in Eisenbahntunneln“ TSI - SRT, 12.12.2014 (3), S. 406 u. 407
- [3] UIC–Kodex 779-9E „Sicherheit in Eisenbahntunneln“, Internationaler Eisenbahnverband, 1. Ausgabe August 2003, S. 4
- [4] Siehe ^[3], S. 27
- [5] Richtlinie „Bau und Betrieb von neuen Eisenbahntunneln bei Haupt- und Nebenbahnen, Anforderungen des Brand- und Katastrophenschutzes“ (ÖBFV-RL A-12), Österreichischer Bundesfeuerwehrverband, 1. Ausgabe 2000 (7), S. 10 u. 13
- [6] Richtlinie „Sicherheitsmaßnahmen in Eisenbahntunnelanlagen“ (ÖBFV-RL A-12), Österreichischer Bundesfeuerwehrverband, 3. Ausgabe, Juni 2015 (8), S. 10 u. 12
- [7] Semmering-Basistunnel neu, Einreichoperat für das eisenbahnrechtliche Baugenehmigungsverfahren einschließlich wasserrechtlicher Belange (1), Technischer Bericht Tunnelplanung, PGST c/o iC consulenten ZT GmbH, April 2010, S. 21 u. S. 25
- [8] Semmering-Basistunnel neu, Einreichoperat für das eisenbahnrechtliche Baugenehmigungsverfahren einschließlich wasserrechtlicher Belange (1), Technischer Bericht Tunnelsicherheitskonzept, ILF Beratende Ingenieure, April 2010, S. 34
- [9] Siehe ^[8], S. 35
- [10] Siehe ^[8], S. 14
- [11] Siehe ^[8], S. 17
- [12] Siehe ^[1], S. 11 und ^[3], S. 5
- [13] Siehe ^[8], S. 18
- [14] Siehe ^[8], S. 19
- [15] Siehe ^[8], S. 20
- [16] Siehe ^[8], S. 21
- [17] Detailplanung Ereignisfalllüftung, Bericht Nr. 206´756´000-01, Gruner GmbH, 31.10.2013 (13), S. 5
- [18] Siehe ^[17], S. 6
- [19] Siehe ^[17], S. 9
- [20] Semmering-Basistunnel neu, Einreichoperat für das eisenbahnrechtliche Baugenehmigungsverfahren einschließlich wasserrechtlicher Belange (1), Technischer Bericht Lüftungskonzept, Gruner GmbH, April 2010, S. 44 u. S. 45
- [21] Siehe ^[20], S. 9 u. 10
- [22] Siehe ^[20], S. 11

- [23] Regelwerk 10.04.03.01 „Türen und Tore in Tunnelbauwerken“, ÖBB Infrastruktur AG, Stand 17.11.2014 (10), S. 11
- [24] Siehe ^[23], S. 15
- [25] Siehe ^[23], S. 12
- [26] Tunnel-Fluchttüren, Erfahrungen und Erkenntnisse aus 20 Jahren Tunnelbau, Lierau / Römer / De Candido, Swiss Tunnel Congress 2016 (25), S. 184
- [27] Siehe ^[23], S. 18
- [28] Siehe ^[26], S. 185
- [29] Siehe ^[23], S. 19
- [30] Siehe ^[26], S. 186
- [31] Siehe ^[23], S. 20
- [32] Siehe ^[26], S. 187
- [33] Neubaustrecke Wien - St. Pölten, Bauinformation, ÖBB Infrastruktur AG, Februar 2009 (19), S. 5
- [34] <http://de.wikipedia.org>, Wienerwaldtunnel
- [35] Koralmbahn, Graz – Klagenfurt, Bauinformation, ÖBB Infrastruktur AG (25), S. 2
- [36] <http://de.wikipedia.org>, Koralmbahn
- [37] Koralmbahn, Abschnitt St. Andrä – Aich, Bauinformation, ÖBB Infrastruktur AG, April 2015 (21), S. 4
- [38] Der Brenner Basistunnel – ein neuer Verbindungsweg durch die Alpen, Projektinformation, Brenner Basistunnel BBT SE (22), S. 9
- [39] Siehe ^[38], S. 11
- [40] E-Mail vom 22.05.2019, T. Gangkofner (BBT SE)
- [41] Lötschberg-Basistunnel, BLS AG, Februar 2018 (23), S. 6
- [42] Siehe ^[41], S. 14
- [43] Siehe ^[41], S. 25
- [44] Siehe ^[41], S. 28
- [45] <http://alptransit.ch>, Gotthard-Basistunnel
- [46] Gotthard-Tunnel mit ift-geprüften Fluchttüren, Türen als Lebensretter im Tunnel, Presseinformation 16-06-61, ift Rosenheim, 08.07.2016 (24), S. 2
- [47] <http://alptransit.ch>, Ceneri-Basistunnel
- [48] <http://de.wikipedia.org>, Ceneri-Basistunnel
- [49] <http://de.wikipedia.org>, Verkehrsprojekt Deutsche Einheit Nr. 8
- [50] <http://vde8.de>, Verkehrsprojekt Deutsche Einheit Nr. 8
- [51] <http://de.wikipedia.org>, Finnetunnel
- [52] <http://de.wikipedia.org>, Bibratunnel
- [53] <http://de.wikipedia.org>, Osterbergtunnel

- [54] Erläuterungsbericht zur Ausführungsplanung (Erläuterungsbericht Tunneltüren Typ A, Typ B und Typ E), VDE 8.2 NBS Erfurt-Leipzig/Halle, FCP Fritsch, Chiari & Partner ZT GmbH, 02.09.2013 (14), S. 5
- [55] <http://de.wikipedia.org>, Eurotunnel
- [56] <https://www2.klett.de>, Sicherheitskonzept des Eurotunnels
- [57] Kanaltunnel: Vier Sicherheitszonen mit Wassernebeltechnik, Brux, Der Eisenbahningenieur, November 2010 (26), S. 14ff
- [58] Semmering-Basistunnel neu, Einreichoperat für das eisenbahnrechtliche Baugenehmigungsverfahren einschließlich wasserrechtlicher Belange (1), Gutachten gem. §31a Eisenbahngesetz 1957 idgF, Pittino ZT GmbH, Mai 2010, S. 377 u. 379
- [59] Siehe ^[8], S. 31 u. 33
- [60] Stellungnahme der Gutachter analog §31a EisebG „zu den Modifikationen gegenüber der eisenbahnrechtlichen Baugenehmigung zur Unterstützung der §40 Person“, Bahn Consult TEN Bewertungsges.m.b.H., 31.10.2019 (12), S. 25
- [61] Siehe ^[60], S. 44
- [62] Stellungnahme der Gutachter analog §31a EisebG „zu den Modifikationen gegenüber der eisenbahnrechtlichen Baugenehmigung zur Unterstützung der §40 Person“ (12), Beilage 1, Bericht – Entfluchtungssimulationen Semmering-Basistunnel, Querschläge und Nothaltestelle, Ebner / Krakhofer, ÖBB Infrastruktur AG, SAE – Bautechnik – Verkehrs- und Streckenplanung, 29.05.2019, S. 3
- [63] <https://www.simwalk.com>, Transport
- [64] Siehe ^[62], S. 4
- [65] Siehe ^[62], S. 8
- [66] Siehe ^[62], S. 11
- [67] Siehe ^[62], S. 18
- [68] Siehe ^[62], S. 19
- [69] Siehe ^[62], S. 20
- [70] CFD-Brandsimulation zur Untersuchung der Personensicherheit in zweiröhrigen Tunnel mit Querschlägen, Amouzandeh / Zeiml / Lackner, Materialtechnologie Innsbruck MTI, Heissenberger, ÖBB Infrastruktur AG, Bauingenieur, Band 91, Mai 2016 (27), S. 175ff
- [71] Ergebnisbericht zur Beurteilung von Bränden an Schienenfahrzeugen als Bemessungsbrände zur brandschutztechnischen Auslegung von oberirdischen Personenverkehrsanlagen der Deutschen Bahn AG, tech. rep., DB Station & Service, Fachstelle Brandschutz Frankfurt am Main, September 2000 (siehe ^[70])
- [72] <https://anthrowiki.at>, Rauch
- [73] <http://www.atenschutzlexikon.de>, Brandrauch
- [74] <http://www.feuerwehrverband.de>, Notfallstichwort: Rauchgasintoxikation

- [75] ÖBB Forschungsprojekt: Untersuchung der Querschlagproblematik bei Eisenbahntunneln, Präsentation, Rodler, TU Graz, Inst. f. Verbrennungskraftmaschinen und Thermodynamik, 03.10.2017 (30), Folie 4
- [76] Siehe ^[20], S. 30
- [77] Siehe ^[20], S. 51
- [78] Siehe ^[20], S. 61
- [79] Siehe ^[20], S. 30-31
- [80] Siehe ^[20], S. 67
- [81] Siehe ^[20], S. 68-69
- [82] Siehe ^[20], S. 75-76
- [83] Siehe ^[20], S. 77
- [84] Siehe ^[26], S. 188
- [85] Regelwerk 18.11.03.01 „Tunneltür- und Tunneloranlagen“, ÖBB Infrastruktur AG, Stand 29.05.2018 (11), S. 9
- [86] Siehe ^[26], S. 187-189
- [87] Entwerfen von Bahnanlagen in Tunnel und tunnelähnlichen Bauwerken, Funktionale Anforderungen an Anlagen in Tunneln, Anlage XX Tunneltüren – ENTWURF, Liebwald / Trinkl, ÖBB Infrastruktur, ES-STB / ISM-ITC, 03.03.2014 (31), S. 30
- [88] Rauchgasausbreitung im Bereich der Querschläge von Eisenbahntunneln – Ergebnisse aus Großbrandversuchen, Thaller / Sturm, ÖIAZ, 163. Jg., Heft 1-12/2018 (28), S. 2
- [89] Siehe ^[88], S. 3-4
- [90] Baudynamische Analysen bei der Entwicklung von Tunneltüren für die ÖBB – Simulationsberechnungen der Druck- und Stoßbelastung, Stoßspektren, Ermüdungsbemessung, Kari / Steiner / Reiterer, Tagungsband STUVA-Tagung 2017 (29), S. 393
- [91] Siehe ^[88], S. 4
- [92] Rauchgasproblematik im Querschlagbereich von Eisenbahntunneln, Bericht Nr. I-05/17/JR V&U INST-15/01/640, Rodler / Sturm, TU Graz, Inst. f. Verbrennungskraftmaschinen und Thermodynamik, 31.07.2017 (15), S. 15-17
- [93] Siehe ^[92], S. 27-28
- [94] Siehe ^[92], S. 20
- [95] Siehe ^[92], S. 26
- [96] Siehe ^[92], S. 24-26
- [97] Siehe ^[92], S. 28
- [98] Siehe ^[92], S. 79-80
- [99] Siehe ^[92], S. 29-30
- [100] Siehe ^[92], S. 30
- [101] Siehe ^[92], S. 13

- [102] Vergleich Feste Fahrbahn - Systeme hinsichtlich Life Cycle Management, FCP Fritsch, Chiari & Partner ZT GmbH, 29.04.2015 (16), S. 14-15
- [103] Investitionsrechnung – 211.332, Vorlesungsskriptum Sommersemester 2017, Veit, Inst. f. Eisenbahnwesen u. Verkehrswirtschaft, TU Graz (18), S. 28-29
- [104] Vergleichende Lebenszykluskosten-Betrachtung Konventionelles Drainagespülen vs. MDB System, FCP Fritsch, Chiari & Partner ZT GmbH, 14.12.2016 (17), S. 12-13
- [105] Leistungsverzeichnis „Brandschutztüren Pummersdorfer Tunnel u. Bründlkapellentunnel“, 29.06.2016, S. 35
- [106] Angabe gem. E-Mail vom 19.10.2016, H. Kari, ÖBB Infrastruktur AG, SAE – Bautechnik – Brückenbau
- [107] Tunneltüren im Fahrtunnel (Notausgangs- und Schleusentüren), Anlagenbericht, Sturzeis, ÖBB Infrastruktur AG, 29.08.2019 (33), S.14
- [108] E-Mail vom 15.03.2019, S. Mayer (HC-Electric GmbH)
- [109] Schiebetüren als Tunneltüren – Schiebetüren in Eisenbahntunneln der Schweiz, Bericht Nr. ECH-223.10_25-002, ENOTRAC AG, 18.02.2018 (34), S. 12
- [110] Siehe ^[104], S. 51-53
- [111] Siehe ^[104], S. 54-57
- [112] A13835 – Produktion, Lieferung und Montage von Tunneltüren für die Koralmbahn, Teilnahmeantrag, Sampl, ÖBB Infrastruktur AG, 18.10.2017 (35), S. 1
- [113] Siehe ^[112], S. 7
- [114] A13835 – Ausschreibung für Tunneltüren, Lieferung und Montage, Anhang 1, Techn. Vertragsbedingungen KAB, Teilnahmeantrag, Sampl, ÖBB Infrastruktur AG, 18.10.2017 (36), S. 35
- [115] Siehe ^[114], S. 37
- [116] Siehe ^[114], S. 38

INTERNETNACHWEISE

<http://elkuch.com>, Querschlagtore (06.12.2018 u. 06.06.2019)
<http://hc-electric.com>, Tunneltüren (06.06.2019)
<http://alptransit.ch>, Gotthard-Basistunnel (04.04.2019)
<http://de.wikipedia.org>, Ceneri-Basistunnel (04.04.2019)
<http://alptransit.ch>, Ceneri-Basistunnel (04.04.2019)
<http://de.wikipedia.org>, Gotthard-Basistunnel (04.04.2019)
<http://de.wikipedia.org>, Verkehrsprojekt Deutsche Einheit Nr. 8 (04.04.2019)
<http://vde8.de>, Verkehrsprojekt Deutsche Einheit Nr. 8 (04.04.2019)
<http://de.wikipedia.org>, Finnetunnel (04.04.2019)
<http://de.wikipedia.org>, Bibratunnel (04.04.2019)
<http://de.wikipedia.org>, Osterbergtunnel (04.04.2019)
<http://de.wikipedia.org>, Eurotunnel (04.04.2019)
<https://www.hochgeschwindigkeitszuege.com>, Eurotunnel – Eurostar-Tunnel unter dem Ärmelkanal (10.04.2019)
<https://www2.klett.de>, Sicherheitskonzept des Eurotunnels (04.04.2019)
<http://de.wikipedia.org>, Rauch (10.04.2019)
<http://www.atenschutzlexikon.de>, Brandrauch (10.04.2019)
<http://www.feuerwehrverband.de>, Notfallstichwort: Rauchgasintoxikation (10.04.2019)
<http://noe.orf.at/v2/news/stories/2549628/>, Trassenverlauf Wienerwaldtunnel (08.10.2019)
<http://de.wikipedia.org>, Wienerwaldtunnel (08.10.2019)
<http://de.wikipedia.org>, Koralmbahn (08.10.2019)
<https://www.simwalk.com>, Transport (11.10.2019)
<https://anthrowiki.at>, Rauch (16.10.2019)

ABBILDUNGSVERZEICHNIS

- Abb. 1: *zweiröhriger, eingleisiger Eisenbahntunnel – Systemdarstellung*
aus: Präsentation „Wiener Dynamik Tage 2016“ (Steiner / Reiterer / Kari),
06.10.2016, Folie 11
- Abb. 2: *Übersichtskarte Semmering-Basistunnel*
aus: Semmering-Basistunnel neu, Einreichoperat für das eisenbahnrechtliche
Baugenehmigungsverfahren einschließlich wasserrechtlicher Belange,
„Zusammenfassender Bericht gem. §6 Abs. 3 lit. 1 EBEV“ (PG-SBT, c/o ILF
Beratende Ingenieure), Mai 2010, S. 10
- Abb. 3: *Regelquerschlag, längenunspezifisch (Ausführung Schiebetür)*
aus: Aktenvermerk „Semmering-Basistunnel, Raumaufteilung und Kabelführungen
QS“ (P. Ablinger), 08.05.2018, S. 2
- Abb. 4: *Minimalprofil Querschlag*
aus: Bericht „Ausrüstungsphase SBTN Randbedingungen unter dem Aspekt
Lüftung“ (Gruner GmbH), 24.03.2014, S. 7
- Abb. 5: *Nothaltestelle*
aus: Bericht „Detailplanung Lüftung“ (Gruner GmbH), 31.10.2013, S. 4
- Abb. 6: *System Nothaltestelle*
aus: Semmering-Basistunnel neu, Einreichoperat für das eisenbahnrechtliche
Baugenehmigungsverfahren einschließlich wasserrechtlicher Belange,
„Technischer Bericht, Tunnelsicherheitskonzept“ (ILF Beratende Ingenieure),
April 2010, S. 35
- Abb. 8: *Fluchtweg Nothaltestellenbereich*
aus: Semmering-Basistunnel neu, Einreichoperat für das eisenbahnrechtliche
Baugenehmigungsverfahren einschließlich wasserrechtlicher Belange,
„Technischer Bericht, Tunnelsicherheitskonzept“ (ILF Beratende Ingenieure),
April 2010, S. 9
- Abb. 9: *Fluchtweg Regelbereich*
aus: Semmering-Basistunnel neu, Einreichoperat für das eisenbahnrechtliche
Baugenehmigungsverfahren einschließlich wasserrechtlicher Belange,
„Technischer Bericht, Tunnelsicherheitskonzept“ (ILF Beratende Ingenieure),
April 2010, S. 50
- Abb. 7: *Systemdarstellung SBT*
aus: Semmering-Basistunnel neu, Einreichoperat für das eisenbahnrechtliche
Baugenehmigungsverfahren einschließlich wasserrechtlicher Belange,
„Technischer Bericht, Tunnelsicherheitskonzept“ (ILF Beratende Ingenieure),
April 2010, S. 50
- Abb. 10: *Lüftungsprinzip für Ereignis mit Zughalt in der Nothaltestelle*
aus: Bericht „Detailplanung Lüftung“ (Gruner GmbH), 31.10.2013, S. 6
- Abb. 11: *Ereignisfalllüftung bei Zughalt außerhalb der Nothaltestelle*
aus: Präsentation „Rauchgasausbreitung im Bereich der Querschläge von
Eisenbahntunneln – Großbrandversuche zur Entscheidungsfindung“ (Sturm /
Thaller), 30.11.2017, Folie 5
- Abb. 12: *Lüftungsprinzip für Ereignis mit Zughalt außerhalb der Nothaltestelle mit
dazugehörigem Druckprofil (orange: Ereignisröhre, grün: sichere Röhre)*
aus: Bericht „Detailplanung Lüftung“ (Gruner GmbH), 31.10.2013, S. 9

- Abb. 13: *Druckprofil bei geschlossenen Querschlagtüren und ohne Störgrößen*
 aus: Semmering-Basistunnel neu, Einreichoperat für das eisenbahnrechtliche Baugenehmigungsverfahren einschließlich wasserrechtlicher Belange, „Technischer Bericht, Lüftungskonzept“ (Gruner GmbH), April 2010, S. 44
- Abb. 14: *Tunnelbauwerk mit 2 Fahrtunneln in Parallellage u. Verbindung durch Querschläge*
 aus: Regelwerk 10.04.03.01 „Türen und Tore in Tunnelbauwerken“ (ÖBB Infrastruktur AG), 17.11.2014, S. 16
- Abb. 15: *Tunnelbauwerk bei Anordnung eines Notstiegenhauses mit Schachtkopfgebäude an der Oberfläche*
 aus: Regelwerk 10.04.03.01 „Türen und Tore in Tunnelbauwerken“ (ÖBB Infrastruktur AG), 17.11.2014, S. 16
- Abb. 16: *(zweiflügelige) Drehflügeltür*
 aus: Regelwerk 10.04.03.01 „Türen und Tore in Tunnelbauwerken“ (ÖBB Infrastruktur AG), 17.11.2014, S. 18
- Abb. 17: *(zweiflügelige) Pendeltür*
 aus: Regelwerk 10.04.03.01 „Türen und Tore in Tunnelbauwerken“ (ÖBB Infrastruktur AG), 17.11.2014, S. 18
- Abb. 18: *einflügelige Schiebetür*
 aus: Regelwerk 10.04.03.01 „Türen und Tore in Tunnelbauwerken“ (ÖBB Infrastruktur AG), 17.11.2014, S. 19
- Abb. 19: *Gelenkschiebetür*
 aus: Regelwerk 10.04.03.01 „Türen und Tore in Tunnelbauwerken“ (ÖBB Infrastruktur AG), 17.11.2014, S. 19
- Abb. 20: *Teleskopschiebetür*
 aus: Regelwerk 10.04.03.01 „Türen und Tore in Tunnelbauwerken“ (ÖBB Infrastruktur AG), 17.11.2014, S. 20
- Abb. 21: *Schwenkschiebetür*
 aus: Regelwerk 10.04.03.01 „Türen und Tore in Tunnelbauwerken“ (ÖBB Infrastruktur AG), 17.11.2014, S. 20
- Abb. 22: *Wienerwaldtunnel (A) – Trassenverlauf*
 aus: <http://noe.orf.at/v2/news/stories/2549628/>
- Abb. 23: *Wienerwaldtunnel (A) – Querschlagtüren*
 Foto „Wienerwaldtunnel“ (K. Liebwald, ÖBB Infrastruktur AG)
- Abb. 24: *Koralmtunnel (A) – Querschlag (Visualisierung)*
 aus: Präsentation „Wiener Dynamik Tage 2016“ (Steiner / Reiterer / Kari), 06.10.2016, Folie 12
- Abb. 25: *Tunnelkette Granitztal (A)*
 aus: Bauinformation „Koralmbahn, Abschnitt St. Andrä - Aich“ (ÖBB Infrastruktur AG), April 2015, S. 4
- Abb. 26: *Brenner Basistunnel (A/I) – System (Visualisierung)*
 aus: Projektinformation „Der Brenner Basistunnel – ein neuer Verbindungsweg durch die Alpen“ (Brenner Basistunnel BBT SE), S. 11
- Abb. 27: *Lötschberg-Basistunnel (CH) – Querschlagtor, Fahrtunnel*
 aus: <http://hc-electric.com>, Tunneltüren
- Abb. 28: *Lötschberg-Basistunnel (CH) – Querschlagtor, Querschlag innen*
 aus: <http://hc-electric.com>, Tunneltüren

- Abb. 29: *Gotthard-Basistunnel (CH) – Querschlagtüre geschlossen (Systemdarstellung)*
aus: <http://elkuch.com>, Querschlagtüre
- Abb. 30: *Gotthard-Basistunnel (CH) – Querschlagtüre geöffnet*
aus: <http://elkuch.com>, Querschlagtüre
- Abb. 31: *Ceneri-Basistunnel (CH) – Querschlagtüre*
Foto „2016_03_11_CBT_Querschlag_CT39___6_“ (K. Liebwald, ÖBB Infrastruktur AG)
- Abb. 32: *Verkehrsprojekt Deutsche Einheit (VDE) Nr. 8*
aus: <http://vde8.de>, Verkehrsprojekt Deutsche Einheit Nr. 8
- Abb. 33: *Finnetunnel, Bibratunnel, Osterbergtunnel (D) – Pendeltür*
aus: Plan „VDE 8.2 NBS Erfurt-Leipzig/Halle, Zusammenbauplan Tunneltür Typ A_700.650.3895_01_0“ (FCP), 21.02.2013
- Abb. 34: *Querschnitt Eurotunnel (F/GB) – Systemdarstellung*
aus: <http://de.wikipedia.org>, Eurotunnel
- Abb. 35: *Eurotunnel – Querschlagtüre*
Foto „DSC04510“ (K. Liebwald, ÖBB Infrastruktur AG)
- Abb. 36: *Geometrisches Modell Querschlag*
aus: Bericht „Entfluchtungssimulationen Semmering-Basistunnel, Querschläge und Nothaltestelle“ (Ebner, Krakhofer; ÖBB Infrastruktur AG, SAE / Bautechnik / Verkehrs- und Streckenplanung), 29.05.2019, S. 6
- Abb. 37: *Entfluchtungszeiten für 1. Querschlagtür*
aus: Bericht „Entfluchtungssimulationen Semmering-Basistunnel, Querschläge und Nothaltestelle“ (Ebner, Krakhofer; ÖBB Infrastruktur AG, SAE / Bautechnik / Verkehrs- und Streckenplanung), 29.05.2019, S. 11
- Abb. 38: *Entfluchtungszeiten für 2. Querschlagtür*
aus: Bericht „Entfluchtungssimulationen Semmering-Basistunnel, Querschläge und Nothaltestelle“ (Ebner, Krakhofer; ÖBB Infrastruktur AG, SAE / Bautechnik / Verkehrs- und Streckenplanung), 29.05.2019, S. 11
- Abb. 39: *Geometrisches Modell Nothaltestelle*
aus: Bericht „Entfluchtungssimulationen Semmering-Basistunnel, Querschläge und Nothaltestelle“ (Ebner, Krakhofer; ÖBB Infrastruktur AG, SAE / Bautechnik / Verkehrs- und Streckenplanung), 29.05.2019, S. 18
- Abb. 40: *Fluchtweg Nothaltestelle*
aus: Bericht „Entfluchtungssimulationen Semmering-Basistunnel, Querschläge und Nothaltestelle“ (Ebner, Krakhofer; ÖBB Infrastruktur AG, SAE / Bautechnik / Verkehrs- und Streckenplanung), 29.05.2019, S. 19
- Abb. 41: *Entfluchtungszeiten für 1. Notausgangstür und 2 x 3 Notausgangstüren*
aus: Bericht „Entfluchtungssimulationen Semmering-Basistunnel, Querschläge und Nothaltestelle“ (Ebner, Krakhofer; ÖBB Infrastruktur AG, SAE / Bautechnik / Verkehrs- und Streckenplanung), 29.05.2019, S. 20-21
- Abb. 42: *Querschlag SBT – Schiebetür 1,60 m x 2,20 m (Ansicht)*
aus: Plan „Konstruktive Anforderungen für Tunneltüren, Regelquerschnitt, Querschläge mit Schiebetür 160“ VORABZUG (iC Consulente Ziviltechniker GesmbH), 22.10.2015
- Abb. 43: *Querschlag SBT – Schiebetür 1,60 m x 2,20 m (Grundriss)*
aus: Plan „Konstruktive Anforderungen für Tunneltüren, Regelquerschnitt, Querschläge mit Schiebetür 160“ VORABZUG (iC Consulente Ziviltechniker GesmbH), 22.10.2015

- Abb. 44: *Fluchtstollen SBT – Aufweitung für Schiebetüren*
 aus: Plan „Nothaltestelle, Fluchtstollen im Bereich RR, Grundriss K-K, O-O“ (iC Consulente Ziviltchniker GesmbH), Juli 2016
- Abb. 45: *Fluchtstollen SBT – Drehflügeltüren 2 x 1,00 x 2,20 m*
 aus: Plan „Konstruktive Anforderungen für Tunneltüren, Fluchtstollen/Fluchtweg, mit Drehflügeltüren 2x1m“ (iC Consulente Ziviltchniker GesmbH), 24.11.2015
- Abb. 46: *Brandkurve – max. Brandlast 28 MW*
 aus: Präsentation „CFD-Brandsimulationen in einem zweiröhrigen Tunnel mit Querschlag“ (A. Amouzandeh; Materialtechnologie Innsbruck MTI), 07.03.2014, Folie 7
- Abb. 47: *Tunnelsystem für CFD-Simulationen (Szenario 2)*
 aus: Präsentation „CFD-Brandsimulationen in einem zweiröhrigen Tunnel mit Querschlag“ (A. Amouzandeh; Materialtechnologie Innsbruck MTI), 07.03.2014, Folie 3
- Abb. 48: *Temperaturverteilung in zeitlicher Abhängigkeit (Szenario 1)*
 aus: Präsentation „CFD-Brandsimulationen in einem zweiröhrigen Tunnel mit Querschlag“ (A. Amouzandeh; Materialtechnologie Innsbruck MTI), 07.03.2014, Folien 9, 10
- Abb. 49: *Temperaturausbreitung in Kopfhöhe im Querschlag (Szenario 2)*
 aus: Präsentation „CFD-Brandsimulationen in einem zweiröhrigen Tunnel mit Querschlag“ (A. Amouzandeh; Materialtechnologie Innsbruck MTI), 07.03.2014, Folie 30
- Abb. 50: *Einflussfaktoren Rauchausbreitung*
 aus: Präsentation „ÖBB Forschungsprojekt: Untersuchung der Querschlagproblematik bei Eisenbahntunneln“ (J. Rodler; TU Graz, Inst. f. Verbrennungskraftmaschinen und Thermodynamik), 03.10.2017, Folie 5 [Quelle: A. Beard, R. Carvel; Handbook of Tunnel Fire Safety]
- Abb. 51: *Zeitlicher Ablauf bei einem Ereignis in der Nothaltestelle*
 aus: Semmering-Basistunnel neu, Einreichoperat für das eisenbahnrechtliche Baugenehmigungsverfahren einschließlich wasserrechtlicher Belange, „Technischer Bericht, Lüftungskonzept“ (Gruner GmbH), April 2010, S. 30
- Abb. 52: *Szenario ohne Störgrößen (mit 100 Pa Druckdifferenz)*
 aus: Semmering-Basistunnel neu, Einreichoperat für das eisenbahnrechtliche Baugenehmigungsverfahren einschließlich wasserrechtlicher Belange, „Technischer Bericht, Lüftungskonzept“ (Gruner GmbH), April 2010, S. 51
- Abb. 53: *Strömungsverlauf durch die Fluchttüren (von Rettungsraum nach Ereignisröhre)*
 aus: Semmering-Basistunnel neu, Einreichoperat für das eisenbahnrechtliche Baugenehmigungsverfahren einschließlich wasserrechtlicher Belange, „Technischer Bericht, Lüftungskonzept“ (Gruner GmbH), April 2010, S. 52
- Abb. 54: *Zeitlicher Ablauf bei einem Ereignis außerhalb der Nothaltestelle*
 aus: Semmering-Basistunnel neu, Einreichoperat für das eisenbahnrechtliche Baugenehmigungsverfahren einschließlich wasserrechtlicher Belange, „Technischer Bericht, Lüftungskonzept“ (Gruner GmbH), April 2010, S. 31
- Abb. 55: *Szenario ohne Störgrößen (mit 100 Pa Druckdifferenz)*
 aus: Semmering-Basistunnel neu, Einreichoperat für das eisenbahnrechtliche Baugenehmigungsverfahren einschließlich wasserrechtlicher Belange, „Technischer Bericht, Lüftungskonzept“ (Gruner GmbH), April 2010, S. 67

- Abb. 56: *Strömungsverlauf durch die Querschlagtüren (von Gegenröhre nach Ereignisröhre)*
 aus: Semmering-Basistunnel neu, Einreichoperat für das eisenbahnrechtliche Baugenehmigungsverfahren einschließlich wasserrechtlicher Belange, „Technischer Bericht, Lüftungskonzept“ (Gruner GmbH), April 2010, S. 69
- Abb. 57: *Szenario mit fahrenden Zügen in der Gegenröhre (mit 100 Pa Druckdifferenz)*
 aus: Semmering-Basistunnel neu, Einreichoperat für das eisenbahnrechtliche Baugenehmigungsverfahren einschließlich wasserrechtlicher Belange, „Technischer Bericht, Lüftungskonzept“ (Gruner GmbH), April 2010, S. 75
- Abb. 58: *Strömungsverlauf durch die Querschlagtüren bei zwei aus der Gegenröhre ausfahrenden Güterzügen mit 80 km/h (von Gegenröhre nach Ereignisröhre)*
 aus: Semmering-Basistunnel neu, Einreichoperat für das eisenbahnrechtliche Baugenehmigungsverfahren einschließlich wasserrechtlicher Belange, „Technischer Bericht, Lüftungskonzept“ (Gruner GmbH), April 2010, S. 76
- Abb. 59: *Strömungsverlauf durch die Querschlagtüren bei zwei aus der Gegenröhre ausfahrenden Güterzügen mit 40 km/h (von Gegenröhre nach Ereignisröhre)*
 aus: Semmering-Basistunnel neu, Einreichoperat für das eisenbahnrechtliche Baugenehmigungsverfahren einschließlich wasserrechtlicher Belange, „Technischer Bericht, Lüftungskonzept“ (Gruner GmbH), April 2010, S. 77
- Abb. 60: *Traglast / Ermüdungslast – Langer Tunnel (>5 km), zweiröhrig eingleisig u. 40 m2*
 aus: Präsentation „STUVA 2017: Baudynamische Analyse bei der Entwicklung von Tunneltüren für die ÖBB“ (Steiner / Reiterer / Kari), 07.12.2017, Folie 24
- Abb. 61: *Schematische Darstellung des Koralmtunnels*
 Datei „241a System Koralmtunnel“ (PLK 1, ÖBB Infrastruktur AG)
- Abb. 62: *Versuchsordnung*
 aus: Bericht „Rauchgasproblematik im Querschlagbereich von Eisenbahntunneln“ (Rodler, Sturm; TU Graz, Inst. f. Verbrennungskraftmaschinen und Thermodynamik), 31.10.2017, S. 17
- Abb. 63: *Brandschutzeinhausung*
 aus: Bericht „Rauchgasproblematik im Querschlagbereich von Eisenbahntunneln“ (Rodler, Sturm; TU Graz, Inst. f. Verbrennungskraftmaschinen und Thermodynamik), 31.10.2017, S. 28
- Abb. 64: *Querschlagabschluss mit Pendeltür (Nordröhre)*
 aus: Bericht „Rauchgasproblematik im Querschlagbereich von Eisenbahntunneln“ (Rodler, Sturm; TU Graz, Inst. f. Verbrennungskraftmaschinen und Thermodynamik), 31.10.2017, S. 18
- Abb. 65: *Querschlagabschluss mit Schiebetür (Südröhre)*
 aus: Bericht „Rauchgasproblematik im Querschlagbereich von Eisenbahntunneln“ (Rodler, Sturm; TU Graz, Inst. f. Verbrennungskraftmaschinen und Thermodynamik), 31.10.2017, S. 18
- Abb. 66: *Situierung von Temperatur-Sensoren und Videokameras*
 aus: Bericht „Rauchgasproblematik im Querschlagbereich von Eisenbahntunneln“ (Rodler, Sturm; TU Graz, Inst. f. Verbrennungskraftmaschinen und Thermodynamik), 31.10.2017, S. 21
- Abb. 67: *Abbrandrate über die Zeit*
 aus: Bericht „Rauchgasproblematik im Querschlagbereich von Eisenbahntunneln“ (Rodler, Sturm; TU Graz, Inst. f. Verbrennungskraftmaschinen und Thermodynamik), 31.10.2017, S. 24

- Abb. 68: *Lüftungsschema*
 aus: Bericht „Rauchgasproblematik im Querschlagbereich von Eisenbahntunneln“ (Rodler, Sturm; TU Graz, Inst. f. Verbrennungskraftmaschinen und Thermodynamik), 31.10.2017, S. 29
- Abb. 70: *HDWNA-Einsatzkonzept*
 aus: Bericht „Rauchgasproblematik im Querschlagbereich von Eisenbahntunneln“ (Rodler, Sturm; TU Graz, Inst. f. Verbrennungskraftmaschinen und Thermodynamik), 31.10.2017, S. 79
- Abb. 71: *HDWNA – Rauchgaskühlung und Brandbekämpfungsanlage*
 aus: Bericht „Rauchgasproblematik im Querschlagbereich von Eisenbahntunneln“ (Rodler, Sturm; TU Graz, Inst. f. Verbrennungskraftmaschinen und Thermodynamik), 31.10.2017, S. 80
- Abb. 72: *Sichere Bereiche, Vorsichts- und Gefahrenbereiche*
 aus: Bericht „Sicherheitskonzept für die Durchführung von Realbrandversuchen im Koralmtunnel“ (Rodler, Sturm; TU Graz, Inst. f. Verbrennungskraftmaschinen und Thermodynamik), 13.07.2016, S. 20
- Abb. 73: *Maximale Brandlasten*
 aus: Bericht „Rauchgasproblematik im Querschlagbereich von Eisenbahntunneln“ (Rodler, Sturm; TU Graz, Inst. f. Verbrennungskraftmaschinen und Thermodynamik), 31.10.2017, S. 31
- Abb. 74: *Brandversuch #1 am 24.10.2016*
 Fotos „IMG_4815“ und „IMG_4826“ (TU Graz, Inst. f. Verbrennungskraftmaschinen und Thermodynamik)
- Abb. 75: *Temperaturverlauf 15 m nach dem Brandkanal (MP6) bei Brandversuch #3*
 Auswertung Messdaten für Brandversuch #3 (25.10.2016)
- Abb. 76: *Brandversuch #4 am 25.10.2016*
 Fotos „IMG_4871“ und „IMG_4881“ (TU Graz, Inst. f. Verbrennungskraftmaschinen und Thermodynamik)
- Abb. 77: *Temperaturverlauf 15 m nach dem Brandkanal (MP6) bei Brandversuch #4*
 Auswertung Messdaten für Brandversuch #4 (25.10.2016)
- Abb. 78: *Brandversuch #8 am 25.11.2016*
 Foto „DSCF4515“ (P. Sturm; TU Graz, Inst. f. Verbrennungskraftmaschinen und Thermodynamik)
- Abb. 79: *Temperaturprofile stromab des Brandortes bei Brandversuch #9 mit einer durchschnittlichen Wärmefreisetzung von 4,6 MW und einem Spitzenwert von 8 MW*
 Auswertung Messdaten für Brandversuch #9 (25.11.2016)
- Abb. 80: *Brandversuch #5 am 18.11.2016*
 Fotos „IMG_4963“ und „IMG_4979“ (TU Graz, Inst. f. Verbrennungskraftmaschinen und Thermodynamik)
- Abb. 81: *Temperaturverlauf im Bereich des Querschlags (MP4) bei Brandversuch #5*
 Auswertung Messdaten für Brandversuch #5 (18.11.2016)
- Abb. 82: *Längsströmungsgeschwindigkeiten bei Brandversuch #11*
 Auswertung Messdaten für Brandversuch #11 (12.01.2017)
- Abb. 83: *Temperaturverlauf 15 m nach dem Brandkanal (MP6) bei Brandversuch #11*
 Auswertung Messdaten für Brandversuch #11 (12.01.2017)
- Abb. 84: *Temperaturverlauf 15 m nach dem Brandkanal (MP6) bei Brandversuch #12*
 Auswertung Messdaten für Brandversuch #12 (12.01.2017)

- Abb. 85: *Brandversuch #6 am 18.11.2016*
Fotos „IMG_5002“ und „IMG_5020“ (TU Graz, Inst. f. Verbrennungskraftmaschinen und Thermodynamik)
- Abb. 86: *Temperaturverlauf 15 m nach dem Brandkanal (MP6) bei Brandversuch #6*
Auswertung Messdaten für Brandversuch #6 (18.11.2016)
- Abb. 87: *Temperaturverlauf 15 m nach dem Brandkanal (MP6) bei Brandversuch #7*
Auswertung Messdaten für Brandversuch #7 (25.11.2016)
- Abb. 88: *Temperaturverlauf 15 m nach dem Brandkanal (MP6) bei Brandversuch #10*
Auswertung Messdaten für Brandversuch #10 (16.12.2016)
- Abb. 89: *Brandversuch #13 am 20.01.2017*
Fotos „IMG_5292“ und „IMG_5299“ (TU Graz, Inst. f. Verbrennungskraftmaschinen und Thermodynamik)
- Abb. 90: *Brandleistung bei Brandversuch #13*
Auswertung Messdaten für Brandversuch #13 (20.01.2017)
- Abb. 91: *Temperaturverlauf 15 m nach dem Brandkanal (MP6) bei Brandversuch #13*
Auswertung Messdaten für Brandversuch #13 (20.01.2017)
- Abb. 95: *Brandversuch #14 am 20.01.2017*
Fotos „DSCF4584“ und „IMG_5308“ (P. Sturm; TU Graz, Inst. f. Verbrennungskraftmaschinen und Thermodynamik)
- Abb. 96: *Brandleistung bei Brandversuch #14*
Auswertung Messdaten für Brandversuch #14 (20.01.2017)
- Abb. 97: *Temperaturverlauf 15 m nach dem Brandkanal (MP6) bei Brandversuch #14*
Auswertung Messdaten für Brandversuch #14 (20.01.2017)
- Abb. 92: *Temperaturverlauf 15 m nach dem Brandkanal (MP6) bei Brandversuch #9*
Auswertung Messdaten für Brandversuch #9 (25.11.2016)
- Abb. 93: *Vertikale Temperaturprofile 15 m nach dem Brandkanal (MP6) bei Brandversuch #9*
Auswertung Messdaten für Brandversuch #9 (25.11.2016)
- Abb. 94: *Feuerwehrmann nach dem Einsatz der Rauchgaskühlung*
Foto „DSCF4531“ (P. Sturm, TU Graz, Inst. f. Verbrennungskraftmaschinen und Thermodynamik)
- Abb. 98: *Vertikale Temperaturprofile 15 m nach dem Brandkanal (MP6) bei Brandversuch #14*
Auswertung Messdaten für Brandversuch #14 (20.01.2017)
- Abb. 99: *Vertikale Temperaturprofile für Brandversuch #13*
Auswertung Messdaten für Brandversuch #13 (20.01.2017)
- Abb. 100: *Brandversuch #13 – Temperaturen in Kopfhöhe bei MP6 / MP5 / MP4*
Auswertung Messdaten für Brandversuch #13 (20.01.2017)
- Abb. 101: *Aufgliederung Lebenszykluskosten*
aus: Bericht „Vergleich Feste Fahrbahn – Systeme hinsichtlich Life Cycle Management“ (FCP Fritsch, Chiari & Partner ZT GmbH), 29.04.2015, S. 14
- Abb. 102: *Schematische Darstellung Lebenszykluskosten*
aus: Bericht „Vergleich Feste Fahrbahn – Systeme hinsichtlich Life Cycle Management“ (FCP Fritsch, Chiari & Partner ZT GmbH), 29.04.2015, S. 15
- Abb. 103: *Verfahrensablauf*
aus: „A13835 Ausschreibung für Tunneltüren Lieferung u Montage“ (Entwurf), ÖBB Infrastruktur AG, 06/2018, S. 50

TABELLENVERZEICHNIS

- Tab. 1: *Mindestabmessungen, Max. Öffnungskräfte, Brandbeständigkeiten*
Th. Thaller
- Tab. 2: *Zeitlicher Versuchsablauf und Versuchsziele*
aus: Bericht „Rauchgasproblematik im Querschlagbereich von Eisenbahntunneln“
(Rodler, Sturm; TU Graz, Inst. f. Verbrennungskraftmaschinen und
Thermodynamik), 31.10.2017, S. 13 u. S. 14
- Tab. 3: *Versuchsparameter*
aus: Artikel „Rauchgasausbreitung im Bereich der Querschläge von
Eisenbahntunneln – Ergebnisse aus Großbrandversuchen“ (Thaller, Sturm;
ÖIAZ), 163. Jahrgang Heft 1-12/2018, S. 122
- Tab. 4: *Brandversuche #1 und #3*
Th. Thaller
- Tab. 5: *Brandversuche #2, #4, #8 und #9*
Th. Thaller
- Tab. 6: *Brandversuche #5, #11 und #12*
Th. Thaller
- Tab. 7: *Brandversuche #6, #7 und #10*
Th. Thaller
- Tab. 8: *Brandversuche #13 und #14*
Th. Thaller
- Tab. 9: *Türöffnungskräfte für Pendeltür und Schiebetür*
Th. Thaller
- Tab. 10: *Brandlasten, maßgebliche max. Temperaturen und Strömungsgeschwindigkeiten*
Th. Thaller
- Tab. 13: *Ermittlung Kapitalwert Pendeltür*
Th. Thaller
- Tab. 14: *Ermittlung Kapitalwert Schiebetür*
Th. Thaller
- Tab. 15: *Ermittlung Kapitalwert Pendeltür bei reduziertem Aufwand für Wartung und
Funktionsprüfung*
Th. Thaller
- Tab. 16: *Ermittlung Kapitalwert Schiebetür bei erhöhtem Aufwand für Wartung und
Funktionsprüfung*
Th. Thaller
- Tab. 17: *Ermittlung Kapitalwert Pendeltür bei reduzierter Störungsanzahl KAT 1 und KAT 2*
Th. Thaller
- Tab. 18: *Ermittlung Kapitalwert Schiebetür bei erhöhter Störungsanzahl KAT 1 und KAT 2*
Th. Thaller
- Tab. 19: *Ermittlung kritischer Wert Investition für die Schiebetür*
Th. Thaller
- Tab. 20: *Ermittlung kritischer Wert Fehler für die Schiebetür*
Th. Thaller

Tab. 21: *Ermittlung kritischer Wert Nutzungsdauer (Jahr 0) für die Schiebetür*
Th. Thaller

Tab. 22: *Ermittlung kritischer Wert Nutzungsdauer (Jahr 1) für die Schiebetür*
Th. Thaller

Tab. 23: *Zusammenstellung Ergebnisse Sensitivitätsanalyse*
Th. Thaller

Tab. 25: *Gegenüberstellung Pendeltür - Schiebetür*
aus: „Gegenüberstellung / Vergleich unterschiedlicher Türtypen“ (Th. Thaller, ÖBB
Infrastruktur AG), 11.06.2019