

**V Unterirdische gleisgebundene Verknüpfungsstellen:
Konzeption, Funktionalität, Sicherheitsaspekte,
normative Regelungen**

Konrad Bergmeister, Andreas Busslinger, Jan-Eric Döhler,
Frank Leismann, Roland Leucker, Christoph Rudin
und Elisabeth Stierschneider

Leseprobe

Inhaltsverzeichnis

| | | | | |
|----------|---|------------|--|--|
| 1 | Einleitung | 147 | | |
| 1.1 | Vorbemerkungen | 147 | | |
| 1.2 | Definition der Verknüpfungsstellen | 147 | | |
| 2 | Normative Vorgaben zur Sicherheit von Tunnelanlagen | 147 | | |
| 2.1 | Einleitung | 147 | | |
| 2.2 | Verordnungen der Europäischen Union zur Tunnelsicherheit | 148 | | |
| 2.3 | Nationales Recht europäischer Staaten zur Tunnelsicherheit | 148 | | |
| 2.3.1 | Deutschland | 149 | | |
| 2.3.2 | Österreich | 150 | | |
| 2.3.3 | Schweiz | 150 | | |
| 2.3.4 | Italien | 150 | | |
| 2.3.5 | Frankreich | 150 | | |
| 2.3.6 | Belgien | 151 | | |
| 2.3.7 | Niederlande | 151 | | |
| 2.3.8 | Schweden | 151 | | |
| 2.3.9 | Portugal | 151 | | |
| 2.3.10 | Spanien | 151 | | |
| 2.3.11 | Dänemark | 151 | | |
| 2.3.12 | Zusammenfassung der anzuwendenden Regelwerke | 151 | | |
| 2.4 | Zusammenfassung und Schlussfolgerungen | 152 | | |
| 3 | Flucht- und Rettungskonzepte – Einflussfaktoren auf die Sicherheit | 152 | | |
| 3.1 | Allgemeines | 152 | | |
| 3.2 | Ereignisfälle | 152 | | |
| 3.3 | Angestrebte Schutzziele | 152 | | |
| 3.4 | Selbstrettung | 153 | | |
| 3.5 | Fremdrettung | 153 | | |
| 3.6 | Maßnahmen zur Unterstützung der Selbst- und Fremdrettung | 154 | | |
| 3.6.1 | Vorbeugung und Ausmaßverminderung | 154 | | |
| 3.6.2 | Bauliche Maßnahmen | 155 | | |
| 3.6.3 | Anlagentechnische Maßnahmen | 155 | | |
| 3.6.3.1 | Beleuchtung | 155 | | |
| 3.6.3.2 | Lüftung in unterirdischen Bahnanlagen | 156 | | |
| 3.6.3.3 | Löschsysteme und Brandbekämpfungsanlagen | 156 | | |
| 3.6.4 | Organisatorische Maßnahmen | 156 | | |
| 4 | Unterirdische Verknüpfungsstellen – systemische Überlegungen | 157 | | |
| 4.1 | Einführung und Übersicht | 157 | | |
| 4.2 | Variante 1: Einbindung 1 × 2-gleisig ohne Überleitstelle (Streckenzusammenführung) | 158 | | |
| 4.2.1 | Beschreibung | 158 | | |
| 4.2.2 | Spezifische Sicherheitsmaßnahmen | 158 | | |
| 4.3 | Variante 2: Einbindung 2 × 1-gleisig ohne Überleitstellen (Streckenzusammenführung) | 158 | | |
| 4.3.1 | Beschreibung | 158 | | |
| 4.3.2 | Spezifische Sicherheitsmaßnahmen | 159 | | |
| 4.4 | Variante 3: Einbindung 1 × 2-gleisig (Streckenzusammenführung) | 160 | | |
| 4.4.1 | Beschreibung | 160 | | |
| 4.4.2 | Spezifische Sicherheitsmaßnahmen | 160 | | |
| 4.5 | Variante 4: Einbindung 2 × 1-gleisig (Streckenzusammenführung) | 160 | | |
| 4.5.1 | Beschreibung | 160 | | |
| 4.5.2 | Spezifische Sicherheitsmaßnahmen | 162 | | |
| 4.6 | Variante 5: Einbindung 2 × 1-gleisig mit Überleitstellen in Kaverne (Streckenzusammenführung) | 163 | | |
| 4.6.1 | Beschreibung | 163 | | |
| 4.6.2 | Spezifische Sicherheitsmaßnahmen | 163 | | |
| 4.7 | Variante 6: 2 × 2-gleisig ohne Überleitstellen | 165 | | |
| 4.7.1 | Beschreibung | 165 | | |
| 4.7.2 | Spezifische Sicherheitsmaßnahmen | 165 | | |
| 4.8 | Variante 7: 4 × 1-gleisig ohne Überleitstellen | 165 | | |
| 4.8.1 | Beschreibung | 165 | | |
| 4.8.2 | Spezifische Sicherheitsmaßnahmen | 165 | | |
| 4.9 | Variante 8: 4-gleisig ohne Überleitstelle | 168 | | |
| 4.9.1 | Beschreibung | 168 | | |
| 4.9.2 | Spezifische Sicherheitsmaßnahmen | 168 | | |
| 4.10 | Variante 9: 2 × 2-gleisig | 169 | | |
| 4.10.1 | Beschreibung | 169 | | |
| 4.10.2 | Spezifische Sicherheitsmaßnahmen | 169 | | |
| 4.11 | Variante 10: 2 × 2-gleisig mit Überleitstellen in Kaverne | 169 | | |
| 4.11.1 | Beschreibung | 169 | | |
| 4.11.2 | Spezifische Sicherheitsmaßnahmen | 171 | | |
| 4.12 | Variante 11: 4 × 1-gleisig | 171 | | |
| 4.12.1 | Beschreibung | 171 | | |
| 4.12.2 | Spezifische Sicherheitsmaßnahmen im Bereich der Verknüpfungsstelle | 171 | | |
| 4.13 | Variante 12: 4 × 1-gleisig mit Überleitstellen in Kaverne | 174 | | |
| 4.13.1 | Beschreibung | 174 | | |
| 4.13.2 | Spezifische Sicherheitsmaßnahmen | 175 | | |
| 4.14 | Variante 13: 4-gleisig | 175 | | |
| 4.14.1 | Beschreibung | 175 | | |
| 4.14.2 | Spezifische Sicherheitsmaßnahmen | 176 | | |
| 4.15 | Bewertung der Varianten von unterirdischen Verknüpfungsstellen | 176 | | |
| 4.15.1 | Kriterien und Verfahren der Bewertung | 176 | | |
| 4.15.2 | Vergleichende Darstellung der Bewertung der einzelnen Varianten | 178 | | |
| 5 | Zusammenfassende Feststellungen | 180 | | |
| | Literatur | 181 | | |

1 Einleitung

1.1 Vorbemerkungen

Bereits in früheren Beton-Kalendern wurde das Thema der Tunnelsicherheit umfassend dargestellt. Im Beton-Kalender 2005 wurde die „Tunnelsicherheit“ vom Autorenteam *Bergmeister, Matousek, Haack* aufgearbeitet, im Beton-Kalender 2013 hat *Bergmeister* den Beitrag „Sicherheit und Brandschutz im Tunnelbau“ verfasst und im Beton-Kalender 2018 wurde der Themenbereich „Beton unter hoher Temperaturbeanspruchung – Brandschutz und Rettungssysteme in Tunneln“ von *Bergmeister, Cordes, Lun, Murr* und *Reichel* behandelt.

In diesem Beitrag wird vornehmlich auf gleisgebundene unterirdische Verknüpfungsstellen mit Mischbetrieb von Güter- und Personenzügen auf Eisenbahnstrecken eingegangen. Einleitend werden dazu die aktuell gültigen nationalen und internationalen Normen und Richtlinien in Bezug auf die Sicherheit in unterirdischen Verknüpfungsstellen angeführt und vergleichend bewertet. Im Hauptteil werden unterschiedliche Varianten unterirdischer Verknüpfungsstellen schematisch ausgearbeitet und hinsichtlich der Maßnahmen zur Erreichung einer ausreichenden Sicherheit, des baulichen Realisierungsaufwands, der betrieblichen Flexibilität im Ereignisfall und des Instandhaltungsaufwands der betrieblichen Ausstattung bewertet.

Bei konkreten Bauprojekten müssen Verknüpfungsstellen im Gesamtsystem unter Berücksichtigung anschließender Tunnel betrachtet werden. Dabei resultiert die Notwendigkeit bestimmter Streckenverbindungen oder allenfalls notwendiger Überleitstellen aus betrieblichen Szenarien und in Abstimmung mit den Betreibern. Auch sind zugehörige Rettungsszenarien in Abstimmung mit örtlichen Rettungskräften unter Einbezug der örtlichen Gegebenheiten und Erfahrungen festzulegen.

1.2 Definition der Verknüpfungsstellen

Als **Verknüpfungsstelle** wird ein Streckenabschnitt mit einer Kombination aus Abzweigstellen (Verknüpfungen zwischen verschiedenen Strecken) und Überleit-

stellen (zwischen Regel- und Gegengleis derselben Strecke) bezeichnet. Diese kann unterschiedliche betriebliche Funktionen erfüllen und sich sowohl auf der freien Strecke als auch in einem Tunnel befinden. Die Ausprägung einer Verknüpfungsstelle wird schematisch in Bild 1 illustriert. Wenn alle dargestellten Verbindungsmöglichkeiten gegeben sind, spricht man von einer vollständigen Verknüpfungsstelle.

Unter der **Streckenverknüpfung** versteht man die Zusammenführung oder Abzweigung von Strecken. Diese Verknüpfungen werden gemäß Eisenbahn-Bau- und Betriebsordnung (EBO) [1] als Abzweigstellen bezeichnet. Dort können Züge von einer auf eine andere Strecke übergehen.

Als **Überleitstelle** wird die Verbindung zweier Gleise mit entgegengesetzter Fahrtrichtung derselben Strecke bezeichnet. Hierbei handelt es sich um eine Verbindung von Regelgleis zu Gegengleis.

Baulich können unterirdische Verknüpfungsstellen entweder als ein 4-gleisiger Tunnel, zwei 2-gleisige Tunnel oder vier 1-gleisige Tunnel realisiert werden.

2 Normative Vorgaben zur Sicherheit von Tunnelanlagen

2.1 Einleitung

Unter Sicherheit versteht man im Allgemeinen eine weder zeitlich noch räumlich begrenzte Situation, in der das vorhandene Risiko geringer als ein Grenzkrisiko ist. Dieses Grenzkrisiko (auch akzeptables Risiko genannt) wird abhängig von den sozial-, wirtschafts- und kulturpolitischen Randbedingungen von der Gesellschaft gerade noch akzeptiert [2]. Das Risiko wird als Produkt aus der Eintrittswahrscheinlichkeit und dem Schadensausmaß definiert. Als Gefahr bezeichnet man einen Zustand, bei dem das vorliegende Risiko über dem Grenzkrisiko liegt. Dabei wird die Wahrnehmung einer Gefahr von der Gesellschaft unterschiedlich bewertet. Ereignisse mit geringer Eintrittswahrscheinlichkeit, bei denen plötzlich viele Menschen zu Schaden kommen, werden viel intensiver wahrgenommen und daher auch als „Schockrisiken“ bezeichnet. Solche Schockrisiken,

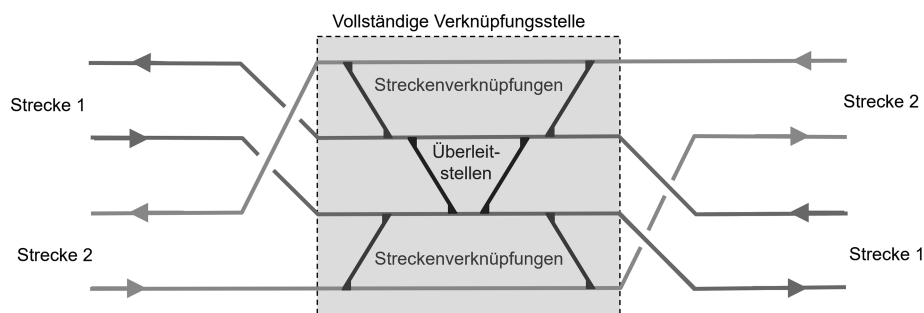


Bild 1. Schematische Darstellung einer vollständigen Verknüpfungsstelle

wie sie beispielsweise bei seltenen Ereignissen mit einer hohen Anzahl an Todesopfern (z. B. bei einem Erdbeben) auftreten, erzeugen Angst, obwohl das errechnete Risiko klein sein kann. Daher ist es wichtig, dass bei der Bewertung von Risiken eine gewisse Resilienz bei der Bewertung der Eintrittswahrscheinlichkeit und des möglichen Schadensausmaßes vorhanden ist. Man spricht dabei von einer Risikokompetenz [3].

Zur Gewährleistung der Sicherheit in Eisenbahntunneln wurden von der Europäischen Union sowie verschiedenen europäischen Ländern Normen und Richtlinien veröffentlicht. Die maßgeblichen davon werden in den folgenden Abschnitten aufgeführt. Bei der Darstellung werden insbesondere die Inhalte beleuchtet, die eine Umsetzung von unterirdischen Verknüpfungsstellen maßgeblich beeinflussen.

2.2 Verordnungen der Europäischen Union zur Tunnelsicherheit

Die Europäische Union (EU) strebt den Aufbau eines transeuropäischen Verkehrsnetzes an. In der EU-Verordnung 1315/2013 [4] wird dabei die Schaffung eines leistungsfähigen und sicheren europäischen Schienennetzes ausdrücklich erwähnt. Die Verordnung benennt Vorhaben von gemeinsamem Interesse und gibt die Anforderungen vor, die im Hinblick auf den Betrieb der Infrastruktur des transeuropäischen Verkehrsnetzes eingehalten werden müssen. Dabei stellt ein einheitliches europäisches (Mindest-)Sicherheitsniveau eine wichtige Grundlage dar.

Die zentrale Richtlinie der EU für die Sicherheit in Eisenbahntunneln ist die Verordnung 1303/2014 über die technische Spezifikation für die Interoperabilität bezüglich der „Sicherheit in Eisenbahntunneln“, kurz TSI SRT [5]. Die TSI SRT ist in den Mitgliedstaaten unmittelbar in allen ihren Teilen verbindlich für das Netz des Eisenbahnsystems der Union. Sie gilt für die Teilsysteme „Zugsteuerung/Zugsicherung und Signalgebung“, „Infrastruktur“, „Energie“, „Betrieb“ und „Fahrzeuge“. Mit ihr soll erreicht werden, dass „Fahrzeuge, die der vorliegenden TSI entsprechen, ungehindert und unter harmonisierten Sicherheitsbedingungen in Eisenbahntunneln verkehren können“.

Die TSI SRT schreibt Maßnahmen vor, durch deren Anwendung ohne weiteren Nachweis ein definiertes Sicherheitsniveau erreicht wird. Dieses in der TSI SRT definierte Sicherheitsniveau darf in den Ländern der EU nicht durch nationale Richtlinien herabgesetzt werden (Ziffer 1.1 e). Die Mitgliedstaaten können jedoch strengere Anforderungen festlegen, sofern diese nicht den Betrieb von Zügen verhindern, die der TSI entsprechen. Deshalb müssen nationale Rechtsvorschriften mit den Bestimmungen der TSI SRT abgestimmt sein. Dazu muss jeder Mitgliedstaat die nationalen Vorschriften notifizieren.

Grundsätzlich kann das nach TSI SRT geforderte Sicherheitsniveau auch durch abweichende Maßnahmen erreicht werden, wenn ein Nachweis mindestens glei-

cher Sicherheit erfolgt. Die Sicherheit des Systems gilt als grundsätzlich nachgewiesen, wenn für die Teilsysteme „Infrastruktur“ und „Energie“ die Spezifikationen der TSI SRT eingehalten werden.

Alternativ zur Einhaltung der Spezifikationen kann die Common Safety Method (CSM) für die Risikobewertung angewendet werden. Die Anforderungen an die CSM sind in der Durchführungsverordnung 402/2012 definiert [6].

In der TSI SRT sind funktionale und technische Spezifikationen der Teilsysteme „Infrastruktur“ und „Energie“ für Tunnel festgelegt. Dazu zählen unter anderem Anforderungen an Evakuierungseinrichtungen, einen sicheren Bereich und den zugehörigen Zugang zu diesem sowie Kommunikationseinrichtungen, Notfallbeleuchtung und Fluchtwegkennzeichnung.

Als Eisenbahntunnel im Sinne der TSI SRT gelten Tunnel mit einer Länge von mindestens 0,1 km. Für alle Tunnel mit einer Länge über 0,5 km muss in eingleisigen Tunnelröhren auf mindestens einer Seite des Gleises ein Fluchtweg gebaut werden. In mehrgleisigen Tunnelröhren müssen auf beiden Seiten der Tunnelröhre Fluchtwege vorhanden sein. In Tunnelröhren mit mehr als zwei Gleisen muss die Zugänglichkeit zu einem Fluchtweg von jedem Gleis aus gewährleistet sein. Als Mindestbreite sind 0,8 m und als lichte Höhe über dem Fluchtweg mindestens 2,25 m gefordert. Der Fluchtweg muss auf Höhe der Schienenunterkante oder darüber liegen. In Tunneln von mehr als 1 km Länge müssen für die Selbstrettung und die Notfalldienste Zugänge zum sicheren Bereich vorhanden sein, und zwar in Form von horizontalen Rettungstollen oder vertikalen Rettungsschächten ins Freie mindestens alle 1000 m oder in Form von Querschlägen zwischen benachbarten getrennten Tunnelröhren im Abstand weniger als 500 m.

Soweit Güterzüge den gültigen Verordnungen an Fahrzeuge und Ladung entsprechen, dürfen diese alle Tunnel befahren. Nach TSI SRT kann die Sicherheit des Güter- und Personenverkehrs durch Betriebsvorschriften, beispielsweise eine Trennung der beiden Verkehrsarten, gewährleistet werden. Ein explizites Begegnungsverbot von Güter- und Personenverkehr in Tunneln besteht nach TSI SRT nicht.

Unterirdische Verknüpfungsstellen sowie Streckenverknüpfungen oder Überleitstellen werden nicht ausgeschlossen und sind damit in TSI-SRT-konformen Tunneln zulässig.

2.3 Nationales Recht europäischer Staaten zur Tunnelsicherheit

Nachfolgend werden einige nationale und europäische Regelungen angeführt, um einerseits die nationalen Auslegungen darzustellen und andererseits eine globalere Sicht zu ermöglichen. Auf Europäischer Ebene liegt die Verantwortung bei der Europäischen Eisenbahngesellschaft (ERA) und den nationalen Sicherheitsbehörden (NSA).

2.3.1 Deutschland

Grundlage für den Bau und Betrieb von Eisenbahnen sind in Deutschland das Allgemeine Eisenbahngesetz [7] sowie die Eisenbahn-Bau- und Betriebsordnung [1]. Das Allgemeine Eisenbahngesetz (AEG) dient dabei grundsätzlich der Gewährleistung eines sicheren Betriebs der Eisenbahn und eines attraktiven Verkehrsangebots auf der Schiene. Nach § 4 Abs. 3 AEG sind die Eisenbahnen und Halter von Eisenbahnfahrzeugen verpflichtet, ihren Betrieb sicher zu führen sowie an Maßnahmen des Brandschutzes und der Technischen Hilfeleistung mitzuwirken. Eisenbahnen sind zudem verpflichtet, die Eisenbahninfrastruktur sicher zu bauen und in betriebs sicherem Zustand zu halten.

Folglich sind die Eisenbahnen (hier z. B. die Eisenbahninfrastrukturunternehmen) für die Sicherheit verantwortlich. Die Eisenbahn-Bau- und Betriebsordnung (EBO) gilt für regelspurige Eisenbahnen und regelt die Anforderungen an Bahnanlagen, Fahrzeuge und Personal sowie den Bahnbetrieb und die Sicherheit auf dem Gebiet der Bahnanlagen.

In Deutschland ist das Eisenbahn-Bundesamt (EBA) nach § 3 Abs. 1a Bundeseseisenbahnverkehrsverwaltungsgesetz (BEVVG) die Sicherheitsbehörde nach AEG (§ 5 Absatz 1d Satz 2 und Absatz 1e Satz 2). Es ist danach mit den Aufgaben der Eisenbahnsicherheit im Sinne des EU-Rechts betraut. Somit ist das EBA die Aufsichts- und Genehmigungsbehörde für nationale und europäische Aufgaben in seinem Zuständigkeitsbereich. Das EBA hat zusätzlich zur TSI SRT die Richtlinie „Anforderungen des Brand- und Katastrophenschutzes an den Bau und Betrieb von Eisenbahntunneln“ (kurz EBA-Tunnelrichtlinie) [8] und die Eisenbahnspezifischen technischen Baustimmungen (EiTB) [9] herausgegeben.

Die EBA-Tunnelrichtlinie beschreibt die Art und den Umfang der baulichen und betrieblichen Sicherheitsmaßnahmen, die nach dem Stand der Technik notwendig sind, um in Eisenbahntunneln die Selbstrettung der Reisenden und des Eisenbahnpersonals sowie den Einsatz der Rettungsdienste zu ermöglichen.

Die in den EiTB enthaltenen technischen Regeln und Festlegungen sind bei der Auslegung der Anforderungen an die Sicherheit und Ordnung heranzuziehen (§ 2 Abs. 1 EBO). Das sind technische Baubestimmungen sowie technische Vorschriften (im Sinne der Eisenbahn-Inbetriebnahmegenehmigungsverordnung, EIGV).

Das Erfordernis zur Anwendung weiterer anerkannter Regeln der Technik sowie von Regeln aufgrund anderer gesetzlicher Vorschriften bleibt davon unberührt. Gemäß EiTB ist die EBA-Tunnelrichtlinie als ermessensbindende Richtlinie bei Entscheidungen über den Bau und Betrieb von neuen Eisenbahntunneln zugrunde zu legen.

Die EBA-Tunnelrichtlinie (unter Berücksichtigung der EiTB 2023) fordert bei zweigleisigen Strecken, für Tun-

nel über 1000 m Länge die Fahrtunnel als parallele, eingleisige Tunnel anzulegen, wenn das „Betriebsprogramm den uneingeschränkten gleichzeitigen Betrieb von Reise- und Güterzügen im Tunnel vorsieht“. Das Rettungskonzept ist dann nach dem Zweiröhrenkonzept umzusetzen. Gemäß EiTB 2023 ist das Zweiröhrenkonzept definiert als ein Rettungskonzept für ein oder mehrere parallel verlaufende Fahrtunnel, die über Verbindungsbauwerke verbunden sind. Darin erfolgen die Maßnahmen der Selbst- und Fremdreitung über eine vom Ereignis nicht betroffene Fahrtunnelröhre. In den EiTB ist ausgeführt, dass, sofern unterirdische Personenverkehrsanlagen vorhanden sind, auch dort eine vollständige bauliche Trennung vorhanden sein muss, um den Übertritt von Brandgasen auszuschließen.

In Tunneln des Zweiröhrenkonzepts muss die Möglichkeit bestehen, dass Einsatzfahrzeuge der Fremdreitungskräfte in die jeweils nicht betroffene Fahrtunnelröhre einfahren und diese durchfahren können, ohne wenden zu müssen. Der Tunnelquerschnitt ist so zu wählen, dass Einsatzfahrzeuge aneinander vorbeifahren können.

Von jeder Stelle eines Fahrtunnels muss ein sicherer Bereich in höchstens 500 m Entfernung erreichbar sein. Für Tunnel des Zweiröhren-Konzepts wird explizit auf die Regelungen der TSI SRT verwiesen.

Für die Umsetzung von Fluchtwegen gilt die Forderung, dass in Tunneln mit Querschlägen zur anderen Röhre der Fluchtweg im gesamten Tunnel auf der Seite anzulegen ist, auf der sich die Querschläge zur anderen Röhre befinden. Darüber hinaus darf in eingleisigen Tunneln der Fluchtweg das Gleis nicht kreuzen. In zweigleisigen (bzw. mehrgleisigen) Tunneln darf der Fluchtweg nur zum Erreichen des Notausgangs, wenn dieser nicht auf beiden Tunnelseiten vorhanden ist, in Höhe des Notausgangs die Gleise kreuzen. Der Übergang (doppelte Fluchtwegbreite) ist in Anlehnung an die Anforderungen an die Beschaffenheit von Fluchtwegen herzustellen.

Gemäß EiTB sind Abweichungen von der Richtlinie zulässig, wenn mindestens das gleiche Sicherheitsniveau auf andere Weise erreicht und dies nachgewiesen wird oder die Einhaltung einzelner Bestimmungen im Einzelfall unverhältnismäßig wäre. Es wird darauf hingewiesen, dass bei Entscheidungen über Ausnahmen insbesondere die örtlichen Gegebenheiten, wie Überdeckung, Lage des Tunnels, sowie Anrückzeit und -weg der Rettungsdienste zu beurteilen sind. Eine gleichlautende Formulierung ist in der EBO festgeschrieben: gemäß § 2 Abs. 1 und 2 sind die Anforderungen an die Sicherheit erfüllt, wenn Vorschriften oder anerkannte Regeln der Technik eingehalten werden. Von den anerkannten Regeln der Technik darf abgewichen werden, wenn mindestens die gleiche Sicherheit wie bei Beachtung dieser Regeln nachgewiesen ist.

2.3.2 Österreich

Die Grundlage für den Bau und Betrieb von Eisenbahnen ist in Österreich das Eisenbahngesetz [10]. Nach Aussage des österreichischen Bundesministeriums für Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie liegen für die Sicherheit in Eisenbahntunneln keine nationalen Regelwerke vor. Die Sicherheit wird ausschließlich nach den Vorgaben der EU gemäß TSI SRT geregelt.

Darüber hinaus gibt es in Österreich die vom österreichischen Bundesfeuerwehrverband herausgegebene Regelung A-12/15 RL „Sicherheitsmaßnahmen in Eisenbahntunnelanlagen“ [11]. Sie gibt Empfehlungen für die Gefahrenabwehr bei Bränden von Verkehrsmitteln in unterirdischen Verkehrsanlagen und beschreibt die baulichen und betriebstechnischen Voraussetzungen für eine erfolgreiche Einsatzdurchführung und -bewältigung.

Ferner sind die Richtlinien und Vorschriften für das Eisenbahnwesen der Forschungsgesellschaft Straße, Schiene, Verkehr (FSV) zu beachten. So ist die RVE 08.01.01 „Baulicher Brandschutz in unterirdischen Verkehrsbauwerken“ [12] in der Tragwerksplanung (Tragwerksbemessung für den Brandfall) von unterirdischen Verkehrsbauwerken für Eisenbahnanlagen unter Berücksichtigung der aus den Schutzziele resultierenden Brandschutzanforderungen anzuwenden. Sie gilt jedoch nicht für die Festlegung von organisatorischen Maßnahmen und Ausrüstungskomponenten (Kommunikation, Stromversorgung, Sicherheitseinrichtungen, Lüftungsanlagen, Brandbekämpfungsanlagen etc.). Es werden auch keine über den definierten Brandfall hinausgehende Notfallszenarien (z. B. Explosionen) berücksichtigt. Die genannte RVE hat der Gesetzgeber nicht für verbindlich erklärt; sie stellt aber den Stand der Technik dar, sodass deren Anwendung empfohlen ist.

Daneben ist die Richtlinie „Erhöhter baulicher Brandschutz für unterirdische Verkehrsbauwerke aus Beton“ von der Österreichischen Bautechnik Vereinigung (ÖBV) zu berücksichtigen [13]. In der Richtlinie werden die Grundlagen der Berechnung (Einwirkungen, Abplatzungen usw.), der Konstruktion und Bemessung (Temperaturentwicklung und -verteilung im Tunnelquerschnitt, konstruktive Durchbildung und Bewertung der Resttragfähigkeit) erläutert, auf die Herstellung und den Einbau von Beton näher eingegangen und Empfehlungen für die Ausschreibung baulicher Brandschutzmaßnahmen gegeben. Zur Unterstützung finden sich des Weiteren Hinweise auf Normen, Richtlinien, Vorschriften und Literatur. Die ÖBV-Richtlinie hat der Gesetzgeber nicht für verbindlich erklärt; sie stellt aber den Stand der Technik dar, sodass deren Anwendung empfohlen ist.

2.3.3 Schweiz

Grundlage für den Bau und Betrieb von Eisenbahnen sind in der Schweiz das Eisenbahngesetz 742.101 [14] und die Verordnung über den Bau- und Betrieb der Ei-

senbahnen [15]. In Ausnahmefällen kann das Bundesamt für Verkehr (BAV) Abweichungen von Vorschriften dieser Verordnung und ihrer Ausführungsbestimmungen anordnen, um Gefahren für Menschen, Sachen oder wichtige Rechtsgüter abzuwenden. Es kann auch in Einzelfällen Abweichungen bewilligen, wenn der Gesuchsteller nachweist, dass die Interoperabilität im grenzüberschreitenden und im nationalen Verkehr dadurch nicht beeinträchtigt wird und der gleiche Grad an Sicherheit gewährleistet ist oder kein inakzeptables Risiko entsteht sowie alle verhältnismäßigen risikoreduzierenden Maßnahmen ergriffen werden.

In der Schweiz ist die TSI SRT entsprechend dem „Beschluss Nr. 1/2021 des Landverkehrsausschusses“ [16] anzuwenden. Als nationale Regelungen existieren in der Schweiz die Schweizer Norm SIA 505 197/1 „Projektierung Tunnel – Bahntunnel“ [17] und die „Richtlinie Sicherheitsanforderungen für bestehende Eisenbahntunnel“ des Bundesamtes für Verkehr [18]. Einzelne Abschnitte der Schweizer Norm 505 197/1 sind als nationale technische Vorschrift notifiziert. Die Richtlinie des BAV definiert Sicherheitsanforderungen für alle bestehenden Teilsysteme im schweizerischen Eisenbahnnetz. Für Neubau, Änderungen und Erneuerungen im Netz des Eisenbahnsystems der europäischen Union gelten hingegen die TSI der europäischen Union. Die Richtlinie für Bestandstunnel formuliert die Forderung, dass die Zahl von Weichen in Tunneln auf das betriebliche Minimum zu reduzieren ist.

2.3.4 Italien

Das italienische Dekret zur Sicherheit in Eisenbahntunneln vom 28. Oktober 2005 wurde vom Ministerium für Infrastruktur und Verkehr erlassen und im Amtsblatt der Italienischen Republik am 6. April 2006 veröffentlicht [19]. Es legt fest, dass Eisenbahntunnel so geplant, gebaut, gewartet und betrieben werden müssen, dass sie den Benutzern, Arbeitern und Rettungskräften ein angemessenes Sicherheitsniveau bieten. Das Dekret enthält auch Anforderungen an die Sicherheitsausrüstung und -verfahren, die in Tunneln eingesetzt werden müssen, um eine ausreichende Sicherheit zu gewährleisten.

2.3.5 Frankreich

Nach Informationen des Delegierten für technische und regulatorische Fragen und Kommunikation von Voie Libre, Direktion für regulatorische, europäische und internationale Angelegenheiten EPSF existieren in Frankreich über die TSI SRT hinaus keine nationalen Richtlinien für Tunnelsicherheit.

Die interministerielle technische Anweisung des französischen Innenministeriums und des Ministeriums für Infrastruktur, Verkehr und Wohnungsbau vom 8. Juli 1998 betrifft die Sicherheit in Eisenbahntunneln [20]. Die Anweisung beschreibt Folgen und Maßnahmen zur Erhöhung der Widerstandsfähigkeit bei Brandeinwirkungen für neue Eisenbahntunnel mit einer Gesamtlänge zwischen 400 m und 10 km. Des Weiteren

zielt die technische Anweisung darauf ab, die Auftretenswahrscheinlichkeit von Ereignissen zu begrenzen sowie den Schutz und die Evakuierung von Personen sicherzustellen.

2.3.6 Belgien

In Belgien gibt es nach Auskunft des föderalen öffentlichen Dienstes für Mobilität und Transportwesen (mobilit.fgov.be) über die TSI SRT hinaus keine weiteren nationalen Eisenbahnvorschriften, die für Tunnel gelten. Auf betrieblicher Ebene hat der belgische Betreiber der Eisenbahninfrastruktur, Infrabel, spezifische interne Vorschriften erlassen.

2.3.7 Niederlande

In den Niederlanden gibt es nach Auskunft des Ministeriums für Infrastruktur und Wasserwesen (Inspetie Leefomgeving en Transport) keine nationalen Leitlinien für die Sicherheit in Eisenbahntunneln, die über die TSI SRT hinausgehen.

2.3.8 Schweden

Nach Auskunft der nationalen Sicherheitsbehörde für Eisenbahnen in Schweden (Transportstyrelsen) bestehen derzeit keine spezifischen Vorschriften für Eisenbahntunnel, die über die TSI SRT hinausgehen. Bei Änderungen des Eisenbahnsystems ist ein Genehmigungsverfahren zu durchlaufen und im Falle einer wesentlichen Änderung die CSM RA (402/2013) zu befolgen. Der wichtigste Infrastrukturbetreiber in Schweden, Trafikverket, verfügt zusätzlich über interne Vorschriften.

2.3.9 Portugal

In Portugal bestehen neben der TSI SRT keine notifizierten nationalen Vorschriften hinsichtlich zusätzlicher Anforderungen für den Bau und den Betrieb von Eisenbahntunneln. Auch die National Safety Authority (NSA) hat keine eigenen Richtlinien herausgegeben.

2.3.10 Spanien

In Spanien hat Administrador de Infraestructuras Ferroviarias (ADIF) eine Norm für die Planung und Instandhaltung der Eisenbahninfrastruktur des Schienennetzes veröffentlicht [21]. Des Weiteren besteht eine nationale Verordnung für die Planung und den Bau der Teilsysteme Infrastruktur (IFI) und Energie (IFE) [22]. Die darin enthaltenen Anforderungen gehen nicht über die Sicherheitsanforderungen der TSI SRT hinaus.

2.3.11 Dänemark

Nach Auskunft der dänischen Zivilluftfahrt- und Eisenbahnbehörde (Trafikstyrelsen) gibt es in Dänemark neben der TSI SRT keine gesonderten nationalen Anforderungen an die Sicherheit in Eisenbahntunneln. Teilweise bestehen zusätzliche funktionale Anforderungen, beispielsweise hinsichtlich der zulässigen Zeit

für die Evakuierung von Zügen. Derartige Anforderungen werden im Zusammenhang mit der Ausarbeitung von Baugesetzen gestellt, wenn die Einrichtung eines Sicherheitsausschusses gefordert wird. Es ist dann die Aufgabe des Sicherheitsausschusses, funktionale Anforderungen festzulegen.

2.3.12 Zusammenfassung der anzuwendenden Regelwerke

In Tabelle 1 werden die zuvor genannten nationalen Regelungen, die neben der TSI SRT in den jeweiligen Ländern gelten, nochmals aufgeführt, wobei Deutschland ausführlich in Abschnitt 2.3.1 behandelt wird.

Tabelle 1. Übersicht angewandter Regelungen zur Tunnelsicherheit in Europa

| Land | Ergänzende Regelungen, Anerkannte Regeln der Technik |
|-------------|---|
| Deutschland | Allgemeines Eisenbahngesetz [7] und die Eisenbahn-Bau- und Betriebsordnung [1] EBA-Tunnelrichtlinie [8] Eisenbahnspezifische technischen Baustimmungen (EiTB, 2023) [9] |
| Österreich | Eisenbahngesetz [10] ÖBfV A-12/15 RL „Sicherheitsmaßnahmen in Eisenbahntunnelanlagen“ [11] RVE 08.01.01 „Baulicher Brandschutz in unterirdischen Verkehrsbauwerken“ [12] ÖBV-Richtlinie „Erhöhter baulicher Brandschutz für unterirdische Verkehrsbauwerke aus Beton“ [13] |
| Schweiz | SIA 505 197/1 [17] Verordnung über den Bau- und Betrieb der Eisenbahnen, EBV [15] |
| Italien | Sicherheit in Eisenbahntunneln, 28.10.2005 sowie organisatorische und technische Hinweise vom 23.05.2012 bis 03.2021 [19] |
| Frankreich | Interministerielle technische Anweisung über die Sicherheit in Eisenbahntunneln, ITI – 98-300, Juli 1998 [20] |
| Belgien | Richtlinien Infrabel |
| Niederlande | – |
| Schweden | Richtlinien Trafikverket |
| Portugal | – |
| Spanien | Verordnung TMA/135/2023 vom 15. Februar 2023 [22] NAP 2-3-1.0+M1 Norma ADIF Plataforma Túneles [23] |
| Dänemark | Projektspezifische funktionale Anforderungen |

2.4 Zusammenfassung und Schlussfolgerungen

Die Sicherheit in Eisenbahntunneln ist für alle Mitgliedstaaten der Europäischen Union in der Technischen Spezifikation für die Interoperabilität bezüglich der Sicherheit in Eisenbahntunneln (TSI SRT) [5] verbindlich festgelegt. Abweichende nationale Rechtsvorschriften sind zulässig, sie dürfen das in der TSI SRT definierte Sicherheitsniveau aber nicht herabsetzen. Und sie dürfen den Betrieb von Zügen, die der TSI entsprechen, nicht verhindern. Die überwiegende Mehrheit der Mitgliedsstaaten der EU wendet deshalb ausschließlich die Regelungen der TSI SRT an. Nur in einzelnen Ländern bestehen zusätzliche nationale Regelungen (z. B. Deutschland, Österreich und Schweiz).

Grundsätzlich gilt in der Europäischen Union die Sicherheit eines Eisenbahnsystems als nachgewiesen, wenn die Spezifikationen der TSI SRT für die Teilsysteme „Infrastruktur“ und „Energie“ eingehalten werden. Bei Abweichungen von diesen Spezifikationen der TSI SRT kann ein gleichwertiges Sicherheitsniveau über die Common Safety Method (CSM) nachgewiesen werden.

Hinsichtlich der Zulässigkeit unterirdischer Verknüpfungsstellen kann festgestellt werden, dass weder in der TSI SRT noch in den nationalen Regelungen anderer europäischer Länder Vorgaben oder Einschränkungen zu solchen Bauwerken gemacht werden. Dementsprechend sind unterirdische Verknüpfungsstellen sowie Komponenten davon – wie Streckenverknüpfungen oder Überleitstellen – nach diesen Regelungen zulässig.

In Deutschland sind gemäß den anzuwendenden Regelungen (AEG, EBO, BEVVG, EBA-Tunnelrichtlinie, EiTB) unterirdische Verknüpfungsstellen ebenfalls nicht ausgeschlossen. Insofern ist eine weitgehende Übereinstimmung mit der TSI SRT und den nationalen Regelungen anderer europäischer Staaten festzustellen.

Allerdings geht die EBA-Tunnelrichtlinie mit der Forderung nach eingleisigen Röhren, wenn das „Betriebsprogramm den uneingeschränkten gleichzeitigen Betrieb von Reise- und Güterzügen im Tunnel vorsieht“ über die Forderungen der TSI SRT hinaus und weicht damit auch von den Regelungen aller anderen europäischen Länder ab.

Gleichzeitig ermöglichen die deutschen Regelungen aber – ähnlich wie die TSI SRT – Abweichungen von den anerkannten Regeln der Technik, wenn mindestens das gleiche Sicherheitsniveau wie bei Beachtung dieser Regeln auf andere Weise nachgewiesen wird oder wenn die Einhaltung einzelner Bestimmungen im Einzelfall unverhältnismäßig wäre.

Das EBA kann in solchen Fällen Ausnahmegenehmigungen in Form einer Zustimmung im Einzelfall (ZiE) auf der Grundlage eines Risikomanagementverfahrens oder einer eigenen Sicherheitsmethode (z. B. Unternehmensinterne Genehmigung, UiG) erteilen.

Im Ergebnis ist festzustellen, dass von den geltenden Regelungen abgewichen werden darf, wenn durch Kompensationsmaßnahmen mindestens die gleiche Sicherheit nachgewiesen wird. Möglichkeiten zur Kompensation von Abweichungen des nach der EBA-Tunnelrichtlinie geltenden Gebot von eingleisigen Röhren werden für den Fall einer Verknüpfungsstelle in den folgenden Abschnitten aufgezeigt.

3 Flucht- und Rettungskonzepte – Einflussfaktoren auf die Sicherheit

3.1 Allgemeines

Als Grundlage der Betriebsgenehmigung ist für jede unterirdische Verkehrsanlage ein Rettungskonzept auszuarbeiten. Darin muss unter Berücksichtigung lokaler Gegebenheiten und der Logistik primär der Ablauf der Selbstrettung und das anschließende Vorgehen von Einsatzkräften (Fremdrettung) im Notfall detailliert beschrieben werden. Dazu müssen die Ausstattung der Einsatzdienste, die Kommunikation und die Anfahrlogistik, die Transportmöglichkeiten von Verletzten, die Qualifikation und der Ausbildungsstand der Einsatzkräfte sowie weitere örtliche Randbedingungen für die Fremdrettung berücksichtigt werden. Dabei sind ggf. zusätzliche lokale Vorschriften zu beachten.

3.2 Ereignisfälle

Die Unfallhäufigkeit ist in Bahntunneln tendenziell geringer als auf offenen Strecken oder bei der Eisenbahn im Bereich von Bahnhöfen einzustufen, weil einzelne Gefährdungen beispielsweise aus Witterungseinflüssen, Kollisionen oder Unfallfolgen bei Entgleisungen weniger oft auftreten. Im Vergleich zur offenen Strecke erreichen jedoch Brandereignisse, weil die Brandgase im abgeschlossenen Raum nicht unmittelbar abströmen können, schnell ein kritisches Ausmaß.

Brände sowie daraus entstehende Rauchentwicklungen und hohe Temperaturen können potenziell folgenschwere Auswirkungen, insbesondere auf die Tunnelnutzer, aber auch auf die Infrastruktur haben. Aus diesem Grund zielen alle sicherheitsrelevanten Maßnahmen neben Prävention (Vorbeugung) und Ereignisminderung (Ausmaßreduzierung, z. B. durch die frühzeitige Erkennung und Eindämmung von Brandereignissen) auf die nachfolgend beschriebene Selbst- und Fremdrettung ab.

3.3 Angestrebte Schutzziele

Generell sind für den vorbeugenden und abwehrenden **Brandschutz** – auch in Bahntunneln – folgende Schutzziele definiert [24]:

- Rettung von Menschen

Dazu dienen die erforderlichen Rettungs- und Fluchtwege innerhalb und außerhalb von Bahnan-

- lagen. Eine frühzeitige Alarmierung und die Beleuchtung sowie Kennzeichnung von Rettungswegen ist von entscheidender Bedeutung für eine erfolgreiche Selbstrettung. Für die Fremdrettung – z. B. von Personen mit eingeschränkter Mobilität – können besondere Einrichtungen erforderlich sein.
- Schutz vor Feuer und Rauch
Bauliche Anlagen sind so anzuordnen, zu errichten, zu ändern und instand zu halten, dass der Entstehung eines Brands und der Ausbreitung von Feuer und Rauch (Brandausbreitung) vorgebeugt wird. Der Ausbreitung von Bränden wird z. B. durch Einführung von Brandabschnitten, durch raumabschließende Bauteile mit Widerstand gegen Feuer und/oder Rauch (z. B. Wände, Decken, Türen) sowie ggf. durch Lüftungsmaßnahmen (Überdruckbelüftung zur Gewährleistung sicherer Bereiche oder Entrauchungsanlagen zur Verhinderung einer unkontrollierten Rauchausbreitung) vorgebeugt.
 - Ermöglichung wirksamer Löscharbeiten
Ein Schutzziel ist es, dem abwehrenden **Brandschutz** durch die Feuerwehr „wirksame Löscharbeiten“ zu ermöglichen. Hier können z. B. fest installierte Leitungen für die Löschwasserversorgung oder Maßnahmen zur Rauchfreihaltung oder Entrauchung erforderlich sein. Der abwehrende **Brandschutz** und die Aufgaben der Feuerwehr sind in den jeweiligen Feuerwehrgesetzen der einzelnen Länder geregelt.

3.4 Selbstrettung

Die Anforderungen und Randbedingungen für die Selbstrettung in unterirdischen Verknüpfungsstellen entsprechen den allgemeinen Anforderungen an Bahntunnel. Dabei bezieht sich der Begriff „Selbstrettung“ in Bahntunneln auf die Fähigkeit und die Maßnahmen, die es Fahrgästen und Personal ermöglichen, sich im Falle eines Ereignisses, wie z. B. eines Brandes oder eines technischen Versagens, selbstständig in Sicherheit zu bringen. Die Selbstrettung hat höchste Priorität im Sicherheitskonzept von Bahntunneln und umfasst verschiedene Aspekte:

- Evakuierungsmöglichkeiten: Vorhandensein von Notausgängen, Fluchtwegen und sicheren Bereichen, die im Ereignisfall erreichbar sind.
- Beschilderung und Beleuchtung: Klare und deutliche Kennzeichnung der Fluchtwege sowie Notbeleuchtung, um Orientierung und Sichtbarkeit auch bei Ausfall der regulären Beleuchtung zu gewährleisten.
- Information und Kommunikation: Systeme, die es ermöglichen, Passagiere und Personal im Ereignisfall schnell und effektiv zu informieren und Anweisungen zur Selbstrettung zu geben.
- Schulung und Anweisungen: Regelmäßige Schulungen für das Personal und Informationen für die Passagiere über die Verhaltensweisen im Ereignisfall, einschließlich der Wege zur Selbstrettung.
- Zugänglichkeit und Sicherheit der Fluchtwege.

- Ausrüstung zur Selbstrettung: Bereitstellung von Ausrüstungen wie Lüftungseinrichtungen, Notfallkommunikationseinrichtungen, Atemschutzgeräten oder Leuchtmitteln, die im Falle eines Notfalls die Selbstrettung unterstützen.

Selbstrettung in Bahntunneln wird so konzipiert, dass sie auch unter erschwerten Bedingungen, wie Rauchentwicklung oder Stromausfall, effektiv funktioniert. Eine Selbstrettung erfolgt in der Regel ohne Atemschutz und ist daher nur möglich, wenn die Konzentrationen von giftigen und reizenden Gasen unterhalb von Grenzwerten liegen. Gegenüber einem Brand im Freien können Brandgase nicht ungehindert nach oben abströmen und verbleiben bei einem Brand länger im Tunnel. Die toxische Wirkung von Brandgasen kann z. B. anhand der Konzentrationen von Kohlenmonoxid (CO), Cyanwasserstoff (HCN), Chlorwasserstoff (HCl) ermittelt werden. Darüber hinaus können Brandgase die sensorischen Fähigkeiten beeinträchtigen und reduzieren dadurch bereits in geringen Konzentrationen die Orientierung und die Erkennungsweite.

Neben den toxischen Wirkungen des Brandrauchs hat auch die Temperatur einen wesentlichen Einfluss auf die Fähigkeit zur Selbstrettung. Diese Belastung muss in der Zeitspanne der Selbstrettung so gering wie möglich gehalten werden. Die thermische Einwirkung basiert grundlegend auf drei Mechanismen die zur Handlungsunfähigkeit, zu schweren Verletzungen oder auch zum Tode führen können. Diese sind der thermische Schock, Hautverbrennungen und Verbrennungen der Lunge. Diese Schädigungen durch heiße Gase stellen sich ein, wenn Personen längere Zeit einer erhöhten Umgebungstemperatur ausgesetzt sind. Entsprechend kritische Temperaturen hängen von der Luftfeuchtigkeit und der Expositionsdauer ab und reichen von 120 °C bei trockener Luft bis zu 80 °C bei feuchter Luft.

3.5 Fremdrettung

Für eine erfolgreiche Fremdrettung in Bahntunneln – also Rettungseinsätze durch professionelle Rettungskräfte wie Feuerwehr, technische Hilfswerke oder Rettungsdienste – müssen technische und organisatorische Voraussetzungen erfüllt sein. Diese umfassen

- Zugänglichkeit und Erreichbarkeit des Tunnels: Der Tunnel muss für Rettungsfahrzeuge schnell zugänglich sein. Dazu gehören beispielsweise Zufahrtswege (Befahrbarkeit mit Straßenbereifung) für Rettungsfahrzeuge und die Verfügbarkeit geeigneter Rettungszüge.
- Brandbekämpfungseinrichtungen: Dazu gehören ortsfeste wie auch mobile Löscheinrichtungen im Tunnel (z. B. Löschwasserleitungen mit regelmäßig vorhandenen Wasserentnahmestellen, Wassernebelanlagen oder Löschfahrzeuge mit Löschwasservorrat, etc.)
- Effektive Kommunikationssysteme: Ein zuverlässiges Kommunikationssystem ist entscheidend, um ei-

- ne schnelle Reaktion und Koordination der Rettungskräfte zu ermöglichen. Dies schließt auch die Kommunikation mit dem Zugpersonal und den im Tunnel befindlichen Personen ein.
- Notfall- und Rettungspläne: Detaillierte und aktuelle Notfallpläne, die spezifische Szenarien für den jeweiligen Tunnel berücksichtigen, sind notwendig.
 - Ausbildung und Training der Rettungskräfte: Spezielle Ausbildung und regelmäßiges Training für Einsätze in Tunnelumgebungen sind erforderlich, um auf die spezifischen Herausforderungen und Gefahren in Tunneln vorbereitet zu sein.
 - Spezielle Ausrüstung für Tunnelrettungseinsätze: Die Rettungskräfte benötigen spezielle Ausrüstung, die für Einsätze in beengten und potenziell gefährlichen Umgebungen wie Tunneln geeignet ist. Dazu gehören Atemschutzgeräte, spezielle Beleuchtung und Rettungsgeräte.
 - Interoperabilität und Koordination verschiedener Rettungsdienste: Eine effektive Zusammenarbeit und Koordination zwischen verschiedenen Rettungsdiensten und Organisationen ist entscheidend für eine erfolgreiche Rettungsaktion.
 - Übungen und Simulationen: Regelmäßige Übungen und Simulationen von Rettungseinsätzen im Tunnel tragen dazu bei, die Abläufe zu optimieren und die Reaktionsfähigkeit der beteiligten Kräfte zu verbessern.

Diese Voraussetzungen sind notwendig, um im Falle eines Ereignisses in einem Bahntunnel schnelle, koordinierte und effektive Rettungsaktionen durchführen zu können. Sie ergänzen die Maßnahmen zur Selbstrettung und sind ein integraler Bestandteil des umfassenden Sicherheitskonzepts für Bahntunnel.

Eine wichtige Voraussetzung für eine erfolgreiche Fremdrettung ist eine möglichst kurze Zeit zwischen dem Auslösen des Alarms bis zum Erreichen des Ereignisorts. Bei einem langen Tunnel ist neben der Anfahrtszeit insbesondere die Zeit für das Vorrücken in der Röhre der einschränkende, zeitintensive Faktor. Für die Fremdrettung werden oft eigene Lösch- und Rettungsfahrzeuge vorgehalten. Diese befinden sich entweder unmittelbar bei den Tunnelportalen oder definierten Punkten. Letzteres ist vor allem der Fall, wenn reguläre, speziell für Tunnelleinsätze ausgebildete Feuerwehreinheiten, eingesetzt werden. Dadurch können sich auch längere Anfahrtswege ergeben. Die Entscheidung, ob ein Fremdrettungseinsatz notwendig ist, hängt von vielen Fragestellungen ab und kann nur ereignisspezifisch entschieden werden.

3.6 Maßnahmen zur Unterstützung der Selbst- und Fremdrettung

3.6.1 Vorbeugung und Ausmaßverminderung

Neben der zuvor erläuterten Selbst- und Fremdrettung (für den Ereignisfall) gilt es, bereits im Vorfeld durch Vorbeugung (Prävention) Ereignisse zu vermeiden und, falls sie dennoch eintreten, im Ausmaß zu be-

grenzen. In diesem Zusammenhang sind die folgenden Hinweise zu beachten.

Präventive Maßnahmen, wie Signalsysteme und Zugfunk, sind nicht tunnelspezifisch, sondern haben eine positive Auswirkung auf die Sicherheit im gesamten Eisenbahnnetz. Durch systematische Instandhaltungs- und -setzungsmaßnahmen sowie die periodische Überwachung von Gleiskontinuitäten können Unfälle vermieden werden. Durch Überwachungsportale vor einem Tunnel oder durch spezifisch angeordneten Temperatur- und Rauchsensoren soll das Einfahren von Zügen mit erhöhten Temperaturen oder bereits brennenden Zügen verhindert werden. Außerdem ist durch regelmäßige Wartungsarbeiten an Zügen das Unfallrisiko durch mangelhafte oder beschädigte Fahrzeuge zu reduzieren. Ferner muss vermieden werden, dass weitere Züge in den Tunnel einfahren, wenn sich im Tunnel ein Brand ereignet hat. Alle Informationen laufen in einer Tunnelleitzentrale zusammen, von wo aus auch die Unterstützung eines möglichen Fremdeinsatzes erfolgen kann.

Durch Brandlöschrichtungen im Zug und fallweise entlang des Tunnels (eher in Ausnahmefällen vorhanden) sollten sowohl die weitere Entwicklung wie auch die Ausbreitung des Brands vermindert werden. Dazu sind Maßnahmen zur Sicherstellung der Notlaufeigenschaften und Notbremsüberbrückung zu implementieren. Laut TSI LOC&PAS [25] muss ein Zug (der Brandschutzkategorie B) ab Brandbeginn noch 15 min lang (bei 80 km/h) fahrfähig bleiben. Diese Anforderung wird gestellt, damit der Zug noch eine geeignete Stelle zum Anhalten erreichen kann, an der die Fahrgäste und das Zugpersonal aus dem Zug in einen sicheren Bereich evakuiert werden können (z. B. außerhalb des Tunnels bei kurzen Tunneln oder Brandbekämpfungsstellen, bei langen Tunneln max. alle 20 km).

Die Ausbildung der Brandbekämpfungsstellen muss derart erfolgen, dass möglichst schnell ein sicherer Bereich erreicht werden kann, in dem die Flüchtenden bis zur Evakuierung aus dem Tunnel vor Rauchgasen und hohen Temperaturen geschützt sind.

Im Ereignisfall ist es wichtig, die Positionen ggf. weiterer Züge im Tunnel zu kennen, um die geeigneten Sofortmaßnahmen zur Räumung des Tunnels einleiten zu können. Die Effizienz einer unterstützenden Ereignisfalllüftung kann durch die Präsenz anderer Züge im Tunnel signifikant beeinträchtigt werden, da die Rauchausbreitung bei einem Zugbrand durch die Position vorausfahrender oder nach einem Halt rückwärts ausfahrender Züge beeinflusst wird. Da die Ereignisfalllüftung auch zur Vermeidung eines Rauchübertritts über Fluchtverbindungen in die Gegenröhre genutzt werden kann, ist die Kenntnis über in der Ereignis- und Gegenröhre befindliche Züge sehr wichtig. Letztendlich sind die betrieblichen Evakuierungsmaßnahmen unter Berücksichtigung der lokalen Randbedingungen zu wählen. Diesbezüglich ist zu beachten, dass in Deutschland Bahntunnel in der Regel ohne mechanische Lüftung betrieben werden.

3.6.2 Bauliche Maßnahmen

Aus der TSI SRT [4] ergeben sich zusätzliche Maßnahmen für die Infrastruktur. Zu den wesentlichen zählen:

- Brandschutzanforderungen an Bauwerke und an Baumaterialien: Die Standsicherheit des Bauwerks muss im Falle eines Brandes zumindest für den Zeitraum der Selbstrettung und Evakuierung von Reisenden sowie des Personals und für den Zeitraum der Fremdrettung ohne Gefährdung der Tragsicherheit des Tunnelbauwerks gewährleistet werden.
- Horizontale und/oder vertikale Notausgänge ins Freie (min. alle 1000 m).
- Bei Zweiröhrenkonzept: Querschläge zur anderen Tunnelröhre (min. alle 500 m).
- Fluchtwege und deren Notbeleuchtung sowie Kennzeichnung.
- Zugänge für Rettungsdienste und Feuerwehr.
- Rettungsbereiche außerhalb von Tunneln (min. 500 m²).

In Bezug auf den **Brandschutz** wird auf die Veröffentlichung „Beton unter hoher Temperaturbeanspruchung – Brandschutz und Rettungssysteme in Tunneln“ von *Bergmeister, Cordes, Lun, Murr und Reichel* im Beton-Kalender 2018 verwiesen [24]. Wesentlich sind die Brandphasen mit den dabei entstehenden Temperaturen, die in Tabelle 2 angeführt sind. Nachfolgend werden die Notausgänge und die Fluchtwegtüren kurz angeführt, da diese bei unterirdischen Verknüpfungsstellen wichtig sind.

Notausgänge

In Tunneln von mehr als 1 km Länge müssen mindestens alle 1000 m Notausgänge vorhanden sein, und zwar in Form von horizontalen Rettungsstollen oder vertikalen Rettungsschächten ins Freie. Im Falle von Querschlägen zwischen benachbarten getrennten Tunnelröhren müssen die Notausgänge im Abstand weniger als 500 m angeordnet werden. Notausgänge sind im Fahrtunnel durch hinterleuchtete Rettungszeichen nach BGV A8 VBG 125 (E 01) [27] besonders zu

kennzeichnen. Diese sind (in Deutschland) abweichend von [27] mit blauem Grund auszuführen. Rettungszeichen sind notwendig, um Reisende über die Lage des nächstgelegenen Tunnelportals oder Notausgangs unmittelbar zu informieren, falls das Zugpersonal dazu nicht in der Lage ist. Die Entfernungsangabe ist vor allem aus psychologischen Gründen erforderlich. Die Kennzeichnung von Notausgängen durch blaues Kennlicht verhindert die Verwechslung mit Signalen. Sie ist für Straßen- und U-Bahnen gesetzlich geregelt und wird im Interesse der Einheitlichkeit auch bei Eisenbahntunneln angewandt [8].

Fluchtwegtüren

Nach TSI-SRT [4] müssen Türen, die vom Fluchtweg in den sicheren Bereich führen, eine lichte Öffnung von mindestens 1,4 m Breite und 2,0 m Höhe aufweisen. Alternativ sind auch mehrere nebeneinanderliegende, schmalere Türen zulässig, sofern nachgewiesen wird, dass ihre Durchlasskapazität gleich groß oder größer ist. Nach der EBA-Tunnelrichtlinie [8] und den EiTb [9] müssen Notausgangstüren mindestens so breit sein wie der Fluchtweg. Türen müssen in Fluchtrichtung aufschlagen. Türflügel müssen eine Mindestbreite von 1,0 m haben. Notausgangstüren müssen mindestens feuerhemmend, rauchdicht und selbstschließend (T 30 RS bzw. EI₂30-C-S200) sein. Notausgänge sind gegen unbefugten Zutritt von außen zu sichern.

In den DB-Ril 853 [21] werden die zuvor zitierten Anforderungen quasi zusammengefasst und Fluchttüren mit einer lichten Breite von mindestens 2,00 m und einer lichten Höhe mindestens 2,00 m gefordert. Die Breite ergibt sich aus der Forderung, dass diese nach TSI-SRT mindestens 1,40 m betragen muss, nach EBA-Tunnelrichtlinie aber jeder Flügel mindestens 1,00 m breit sein muss. Über die Angaben in der EBA-Tunnelrichtlinie hinaus müssen die Türen selbstverriegelnd sein und einen bauaufsichtlichen Verwendbarkeitsnachweis (EBA-Zulassung) besitzen. Sollte ein solcher Verwendbarkeitsnachweis nicht vorliegen, ist eine Zustimmung im Einzelfall (ZiE) beim EBA zu beantragen.

Tabelle 2. Brandphasen und Temperaturentwicklung (s. [26])

| Brandphasen | Entwicklungsbrand | | Vollbrand |
|--------------|-------------------|--------------------|-------------------------------------|
| Risiken | Entzündung | Schwelen | Ausbreitung und Abklingen |
| | Entzündbarkeit | Flammenausbreitung | Substanzerhaltung der Konstruktion |
| | Entflammbarkeit | Wärmeentwicklung | Verhinderung der Branddurchdringung |
| Temperaturen | 20 °C–25 °C | ca. 100 °C | bis 1500 °C |

3.6.3 Anlagentechnische Maßnahmen

3.6.3.1 Beleuchtung

Die Beschilderung und die Beleuchtung sind erforderlich, um die Fluchtrichtung und Fluchtwege eindeutig erkennbar zu machen und die „sicheren Bereiche“ zu beleuchten. Neueste LED- und Steuerungstechnik ermöglichen auch eine Lenkung der Fluchtbewegung (zum Beispiel mittels beleuchteten Laufleisten welche in den Handlauf oder Boden eingelassen werden). Bei der Lichtstärke sieht die TSI SRT für Bahntunnel ein Mindestmaß von einem Lux vor [4].

3.6.3.2 Lüftung in unterirdischen Bahnanlagen

Obwohl eine mechanische Lüftung in Bahntunneln in Deutschland nicht vorgesehen ist, kann sie notwendig sein, wenn beispielsweise ein Fahrtunnel in einen Bahnhof mündet. Eine mechanische Lüftung kann auch angeordnet werden, um Sicherheitsdefizite zu kompensieren. Ziel ist es, die Sicherheit im Fluchtwegbereich zu gewährleisten, indem die Rauchgase (ins Freie) abgeleitet werden und die Selbst- und Fremddrettung mit frischer, nicht kontaminierter Luft ermöglicht wird.

3.6.3.3 Löschsysteme und Brandbekämpfungsanlagen

Eine schnelle Brandbekämpfung kann die Schäden durch einen Brand reduzieren. Sie sollte möglichst frühzeitig erfolgen und kann im Falle automatischer Brandbekämpfungsanlagen bereits in der Selbst- und Fremddrettungsphase zur Erhöhung der Sicherheit beitragen. Sie soll im Wesentlichen die Wärmefreisetzung reduzieren, kann aber auch nützlich sein, um Rauchpartikel niederzuschlagen und einzelne giftige oder reizende Gase durch den Wasserdampf auszuwaschen.

Löschwasserleitung

In den Fahrtunneln müssen auf der Seite des Fluchtwegs durchgehende Löschwasserleitungen verlegt werden. Die Wasserentnahme erfolgt aus Hydranten, welche in einem regelmäßigen Abstand angeordnet sind. Diese Löschwasserleitungen sind so zu bemessen, dass sie gemäß EBA-Richtlinie [8] mindestens 800 Liter Wasser/min bei einem statischen Druck von 8 bar bzw. einem Druck bei Entnahme von Löschwasser von 5 bar gewährleisten können. Darüber hinaus sollen Löschwasserhydranten in den Portalbereichen vorgesehen werden.

Lösch- und Rettungsfahrzeuge mit Löschwasservorrat

Für Bahntunnel werden als Lösch- und Rettungsfahrzeuge auch schienengebundene, mit Diesel betriebene Gerätefahrzeuge mit einem Tanklöschwagen verwendet. Jede Einheit verfügt über eine druckdicht ausgeführte und mit Atemluft versorgte Führerstandkabine. Der Lösch- und Rettungszug fährt im Normalfall maximal 100 km/h. Unter bestimmten Voraussetzungen werden auch radgebundene Löschfahrzeuge verwendet [24].

Brandbekämpfungsanlagen

Brandbekämpfungsanlagen hemmen die Ausbreitung eines Brands, indem sie die Brandlast kühlen und die freigesetzte Energie zur Verdampfung des Wassers nutzen. Damit sorgen sie insbesondere für eine effiziente Schadensbegrenzung am Betonbauwerk. Im Gegensatz zu herkömmlichen Sprinkleranlagen werden bei Brandbekämpfungsanlagen sehr kleine Wassertropfen (Wasserdampf) genutzt. Es gibt Niederdruckanlagen (Betriebsdruck bei ca. 10 bar) und Hochdruckanlagen

(Betriebsdruck bei ca. 60 bar). Bei den Hochdruckwassernebelanlagen vergrößert sich aufgrund des hohen Drucks die Reaktionsoberfläche im Vergleich zu einem herkömmlichen Sprinklersystem um das mehr als 200-Fache. Das Vernebeln des Löschwassers erzeugt viele sehr kleine Tropfen mit einer insgesamt sehr großen Oberfläche und bewirkt damit eine extrem effiziente Kühlung. Dem Feuer wird so schnell und effektiv die Energie entzogen.

Der ausgeprägte Kühleffekt schützt darüber hinaus Menschen und Sachgüter vor Wärmeeinwirkung. Durch den Abschirmeffekt der Tröpfchen gegen Wärmestrahlung lassen sich wirksame Wassernebelabschottungen für fliehende Personen und Einsatzkräfte aber auch für Bauteile, Wandöffnungen, Fassaden usw. schaffen. Weiterhin ist unmittelbar am Brandherd der Effekt der Sauerstoffverdrängung relevant. Durch die schnelle Verdampfung der Wassertropfen wird dem Feuer Energie und Sauerstoff entzogen. Der Wasserdampf hat ein 1640-fach größeres Volumen als das Wasser, wodurch der Sauerstoff direkt am Brandherd verdrängt und ein Stickstoffeffekt erzeugt wird. Dies geschieht jedoch nur unmittelbar am Brandherd, eine Gefahr für flüchtende Personen aufgrund von Sauerstoffmangel besteht nicht. Die bei konventionellen Wasserlöschsystemen (z. B. Niederdruckwassernebel-Anlagen) verwendeten größeren Tropfen verdampfen deutlich langsamer als bei Hochdruckwassernebel oder zu einem erheblichen Teil überhaupt nicht. Die Vernebelung hat auch den Vorteil, dass sie in gewissem Maße auch in Hohlräume besser eindringen kann aufgrund der leichten „Verschiebbarkeit“ der kleinen Wassertropfen. Dies hat speziell bei Zuggarnituren, die oft zumindest von oben her sehr dicht sind, enorme Vorteile.

Eine Brandbekämpfungsanlage sollte automatisch ausgelöst werden, um die Temperatur rasch zu senken und die Brandausbreitung zu begrenzen sowie die Bildung von Rauch und Ruß zu reduzieren. Der anschließende Einsatz der Einsatzkräfte und die Durchführung der Fremddrettung werden maßgeblich erleichtert. Der Einsatz einer Wassernebelanlage weist in Bezug auf die Fremddrettung eine sehr hohe Wirksamkeit auf.

3.6.4 Organisatorische Maßnahmen

Eine wichtige Voraussetzung für ein rasches und erfolgreiches Reagieren bei einem Ereignis in einer unterirdischen Bahnanlage ist die Kommunikation zwischen Ereignisort und Leitzentrale. Die Kommunikationsinfrastruktur (z. B. Streckentelefon, Zugfunk etc.) wirkt daher sowohl ausmaßmindernd wie auch unterstützend für die Selbstrettung und Fremddrettung.

Bei Tunnelleinsätzen gibt es spezielle Herausforderungen. Zumeist werden bei einem Ereignis zeitgleich mehrere Feuerwehren und Rettungsdienste alarmiert; dies basierend auf den speziell abgestimmten Rettungskonzepten und -plänen. Die Einsatzkräfte können bei grenzüberschreitenden unterirdischen Anlagen auch

Tabelle 3. Übersichtstabelle zu den 13 Grundvarianten unterirdischer Verknüpfungsstellen

| Varianten | Art der Verknüpfungsstelle | Strecken- verknüpfungen | Überleitstellen | Anzahl Gleise in Verknüpfungsstelle |
|---------------------------|---------------------------------|----------------------------|-----------------|--|
| Variante 1, Abschn. 4.2 | Streckenzusammenführung | X | – | 1 × 2-gleisig |
| Variante 2, Abschn. 4.3 | Streckenzusammenführung | X | – | 2 × 1-gleisig |
| Variante 3, Abschn. 4.4 | Streckenzusammenführung | X | X | 1 × 2-gleisig |
| Variante 4, Abschn. 4.5 | Streckenzusammenführung | X | X | 2 × 1-gleisig |
| Variante 5, Abschn. 4.6 | Streckenzusammenführung | X | X | 2 × 1-gleisig (mit Kaverne) |
| Variante 6, Abschn. 4.7 | Vollständige Verknüpfungsstelle | X | – | 2 × 2-gleisig |
| Variante 7, Abschn. 4.8 | Vollständige Verknüpfungsstelle | X | – | 4 × 1-gleisig |
| Variante 8, Abschn. 4.9 | Vollständige Verknüpfungsstelle | X | – | 1 × 4-gleisig |
| Variante 9, Abschn. 4.10 | Vollständige Verknüpfungsstelle | X | X | 2 × 2-gleisig |
| Variante 10, Abschn. 4.11 | Vollständige Verknüpfungsstelle | X | X | 2 × 2-gleisig (mit Kaverne) |
| Variante 11, Abschn. 4.12 | Vollständige Verknüpfungsstelle | X | X | 4 × 1-gleisig |
| Variante 12, Abschn. 4.13 | Vollständige Verknüpfungsstelle | X | X | 4 × 1-gleisig (mit Kaverne) |
| Variante 13, Abschn. 4.14 | Vollständige Verknüpfungsstelle | X | X | 1 × 4-gleisig |

aus verschiedenen Sprach- und Kulturräumen kommen. Daher ist ein hoher Koordinationsaufwand mit klarer Kommunikation erforderlich. Die Rettungsabläufe müssen regelmäßig geschult und beübt werden.

4 Unterirdische Verknüpfungsstellen – systemische Überlegungen

4.1 Einführung und Übersicht

Die in einer Verknüpfungsstelle erforderlichen (Trasierungs-)Elemente resultieren aus den projektspezifischen baulichen und betrieblichen Erfordernissen. Vor diesem Hintergrund hat im Gesamtsystem unter Berücksichtigung der spezifischen Randbedingungen aus den nachfolgend dargestellten Varianten die Auswahl möglicher Lösungen zu erfolgen.

Grundsätzlich ist eine Vielzahl von Varianten für unterirdische Verknüpfungsstellen denkbar. In Tabelle 3 werden 13 wesentliche Grundvarianten zusammenfassend aufgeführt, die in den folgenden Abschnitten genauer beschrieben werden.

Die 13 Grundvarianten der untersuchten unterirdischen Verknüpfungsstellen unterscheiden sich im Wesentlichen in Bezug auf ihre betriebliche Funktionalität und ihre bauliche Ausgestaltung. Für diese Grundvarianten werden entsprechende sicherheitsrelevante Maßnahmen festgelegt, wobei für einzelne Untervarianten unterschiedliche Sicherheitsmaßnahmen entwickelt werden. Zur besseren Übersicht werden die 13 identifizierten Varianten nach funktioneller und baulicher Komplexität gemäß Bild 2 gegliedert. Hierbei wird zwischen Streckenzusammenführungen (Zeile 1 und 2)

und vollständigen Verknüpfungsstellen (Zeile 3 und 4) unterschieden. Dabei sind Streckenzusammenführungen (Variante 1 bis 5) weniger komplex als vollständige Verknüpfungsstellen (Variante 6 bis 13). Insofern steigt in Bild 2 die funktionelle Komplexität über die Anzahl der Zeilen; die bauliche Komplexität nimmt mit den Spalten von links nach rechts zu. Dadurch können innerhalb einer Komplexitätsstufe auf funktioneller Ebene die Varianten auch nach baulicher Komplexität gegliedert werden.

Die in Bild 2 gegliederten Varianten von unterirdischen Verknüpfungsstellen werden in den folgenden Unterabschnitten genauer beschrieben und in Hinblick auf Sicherheitsmaßnahmen, bauliche Gestaltung, Betrieb im Ereignisfall und Instandhaltbarkeit der Maßnahmen bewertet.