



DZSF-Studie

Untersuchung der Auswirkungen unterirdischer
Verknüpfungsstellen auf Neubaustrecken
am Beispiel des deutschen Brenner-Nordzulaufs



Impressum

HERAUSGEBER

Deutsches Zentrum für Schienenverkehrsforschung beim Eisenbahn-Bundesamt

August-Bebel-Straße 10

01219 Dresden

www.dzsf.bund.de

DURCHFÜHRUNG DER STUDIE

Projektgruppe Brenner-Nordzulauf am DZSF

ABSCHLUSS DER STUDIE

Januar 2022

[doi: 10.57729/dzsf.220001.01](https://doi.org/10.57729/dzsf.220001.01)

Dresden, Januar 2022

Inhaltsverzeichnis

Abkürzungsverzeichnis.....	7
Kurzbeschreibung	8
1 Ausgangslage.....	9
1.1 Güterkorridore in Europa.....	9
1.2 Der Güterverkehrskorridor Skandinavien–Mittelmeer.....	10
1.3 Der Brenner Basistunnel und Trassenfindung München–Kufstein.....	10
2 Trassierung der Brennerzulaufstrecke im Inntal	13
2.1 Projektierung der DB Netz AG.....	13
2.1.1 Randbedingungen für die Neubaustrecke	13
2.1.2 Definition Verknüpfungsstelle	14
2.2 Alternativvorschlag der Interessengemeinschaft Inntal 2040.....	16
2.3 Konsequenzen des alternativen Trassierungsvorschlages.....	18
2.4 Auftrag an das DZSF und Abgrenzung	18
3 Inhalt und Methodik dieser Studie	20
3.1 Aufbau	20
3.2 Vorgehensweise	20
4 Wesentliche Herausforderungen beim Betrieb von Eisenbahntunneln	21
4.1 Vorbemerkungen.....	21
4.2 Zugbegegnungen.....	21
4.3 Kollisionen.....	22
4.4 Entgleisungen	23
4.5 Brandereignisse	24
4.6 Evakuierung.....	26
4.7 Räumung.....	27
4.8 Instandhaltung.....	27
4.9 Zwischenfazit zu tunnelspezifischen Herausforderungen.....	27
5 Regelwerk für Eisenbahntunnel.....	28
5.1 Überblick.....	28
5.2 Sicherheitskonzept.....	29
5.3 Regelwerksanforderungen an die Verknüpfungsstelle bei Niederaudorf.....	30
5.3.1 Vorbemerkungen.....	30

5.3.2	Bauliche Trennung	31
5.3.3	Befahrbarkeit von Tunneln für die Fremdrettung	31
5.3.4	Evakuierungseinrichtungen „Sicherer Bereich“ im Tunnel.....	31
5.3.5	Zugang zum sicheren Bereich.....	32
5.3.6	Anforderungen an sehr lange Tunnel (>20 km).....	33
5.3.7	Evakuierungs- und Rettungspunkte Brenner-Nordzulauf	33
5.3.8	Betriebliche Anforderung zur Trennung der Betriebsarten.....	35
5.3.9	Zwischenfazit zu den Regelwerksanforderungen.....	35
6	Vergleich des alternativen Trassierungsvorschlags mit existierenden oder projektierten Tunnelbauwerken.....	36
6.1	Vorbemerkungen.....	36
6.2	Relevante Eisenbahntunnel in der Europäischen Union sowie der Schweiz.....	38
6.2.1	Anmerkungen zur Auswahl.....	38
6.2.2	Inntaltunnel (Südümfahrung Innsbruck).....	38
6.2.3	Lötschberg-Basistunnel (LBT)	40
6.2.4	Zimmerberg-Basistunnel (ZBT).....	42
6.2.5	Wienerwaldtunnel (WWT).....	43
6.2.6	Gotthard-Basistunnel (GBT).....	45
6.2.7	Neue Unterinntalbahnen (Terfnertunnel, Münsterertunnel und Angerberg tunnel)	47
6.2.8	Valico-Tunnel (VT)	50
6.2.9	Mont Cenis Basistunnel (MCBT)	52
6.2.10	Brenner Basistunnel (BBT).....	54
6.2.11	Ceneri-Basistunnel (CBT).....	56
6.2.12	Zwischenfazit zu Referenzobjekten	58
7	Zusammenfassung und Fazit.....	61
	Literaturverzeichnis	64
	Glossar	70
	Anhang.....	72

Abkürzungsverzeichnis

BMVI	Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (seit: 12/2021: Bundesministerium für Digitales und Verkehr BMDV)
CSM-RA	Common Safety Methods – Risk Assessment
DZSF	Deutsches Zentrum für Schienenverkehrsforschung beim Eisenbahn-Bundesamt
EBA	Eisenbahn-Bundesamt
EBO	Eisenbahn-Bau- und Betriebsordnung
ETCS	European Train Control System (Europäisches Zugsicherungssystem)
EU	Europäische Union
EU-VO	Verordnung der Europäischen Union
ICE	InterCity Express (Marke der Hochgeschwindigkeitszüge der Deutschen Bahn AG)
ÖBB	Österreichische Bundesbahnen
TBV	Tunnelbegegnungsverbot
TEN	Transeuropäisches (Verkehrs-)Netz
TSI	Technische Spezifikationen für die Interoperabilität
VDE	Verkehrsprojekt Deutsche Einheit
VKS	Verknüpfungsstelle

Kurzbeschreibung

Durch die hohe Relevanz des Gesamtvorhabens Brenner-Nordzulauf für den gesamteuropäischen Schienengüterverkehr hat das BMVI das Deutsche Zentrum für Schienenverkehrsforschung (DZSF) gebeten, anhand der geplanten Verknüpfungsstelle bei Niederaudorf eine mögliche Einrichtung von unterirdischen Verknüpfungsstellen näher zu untersuchen und diese generell im Hinblick auf die Konformität bezüglich nationaler und europäischer Regelwerke zu bewerten.

Ziel dieser Studie ist es, auf allgemeinverständliche Art und Weise eine neutrale Beurteilung bezüglich der zugrundeliegenden Sicherheitsanforderungen, der Zulassungsfähigkeit und der Vereinbarkeit mit betrieblichen Randbedingungen dieser Fragestellung vorzunehmen. Dazu wird das geplante Vorhaben zunächst im europäischen Kontext dargestellt und die verkehrspolitische Relevanz skizziert. Es werden zudem vorgestellte Alternativen für eine mögliche unterirdische Gestaltung einer Verknüpfungsstelle und die Bedenken der DB Netz AG zu dieser Idee beschrieben. Anschließend wird der Untersuchungsgegenstand der vorliegenden Studie abgegrenzt sowie die methodische Herangehensweise erläutert, um danach wesentliche Herausforderungen beim Betrieb von Eisenbahntunneln zu illustrieren. Darüber hinaus werden die relevanten Regelwerke auf europäischer und deutscher Ebene vorgestellt und die für die Untersuchung relevanten Vorgaben zusammengetragen. Ein wesentlicher Kern der Studie bildet die anschließende Analyse von existierenden und in Planung befindlichen europäischen Tunnelbauwerken. Basierend auf diesen Recherchen wird zudem eine Einschätzung der Eignung als mögliches Referenzsystem für eine unterirdische Verknüpfungsstelle im betrachteten Fall abgeleitet.

Als Fazit dieser Untersuchung lässt sich festhalten, dass sich für die Einrichtung einer komplexen unterirdischen Verknüpfungsstelle in Tunneln für den Mischbetrieb von Güter- und Reisezügen innerhalb der EU kein vollständig geeignetes Referenzobjekt identifizieren lässt. Diese Tatsache zusammen mit den rechtlichen Rahmenbedingungen führen zu dem Schluss, dass die Verlegung der vorgesehenen Verknüpfungsstelle in einen Tunnel ohne Weiteres nicht uneingeschränkt regelwerkskonform ist. Der Aufwand, der zur Kompensation einer unvollständigen baulichen Trennung zweier Tunnelröhren betrieben werden müsste, ist zum einen groß und zum anderen mit tunnelspezifischen komplexen Fragestellungen verbunden, deren Analyse einen beträchtlichen Aufwand hinsichtlich Zeit und Kosten verursachen würde. Zudem gäbe es keine Garantie, dass diese Untersuchungen erfolgreich abgeschlossen werden können. Es ist daher sinnvoll abzuwägen, ob der Aufwand den erwartbaren Nutzen rechtfertigt.

Hinweis zu den Abbildungen

Sämtliche verwendete Abbildungen sind eigene Darstellungen, falls dies nicht anderweitig durch entsprechende Referenzierung gekennzeichnet ist.

1 Ausgangslage

1.1 Güterkorridore in Europa

Der Europäische Binnenmarkt benötigt leistungsfähige Infrastrukturen für den Landtransport von Gütern. Im Jahr 2019 betrug die Transportleistung des Schienengüterverkehrs in der EU knapp 397 Milliarden Tonnenkilometer [1].

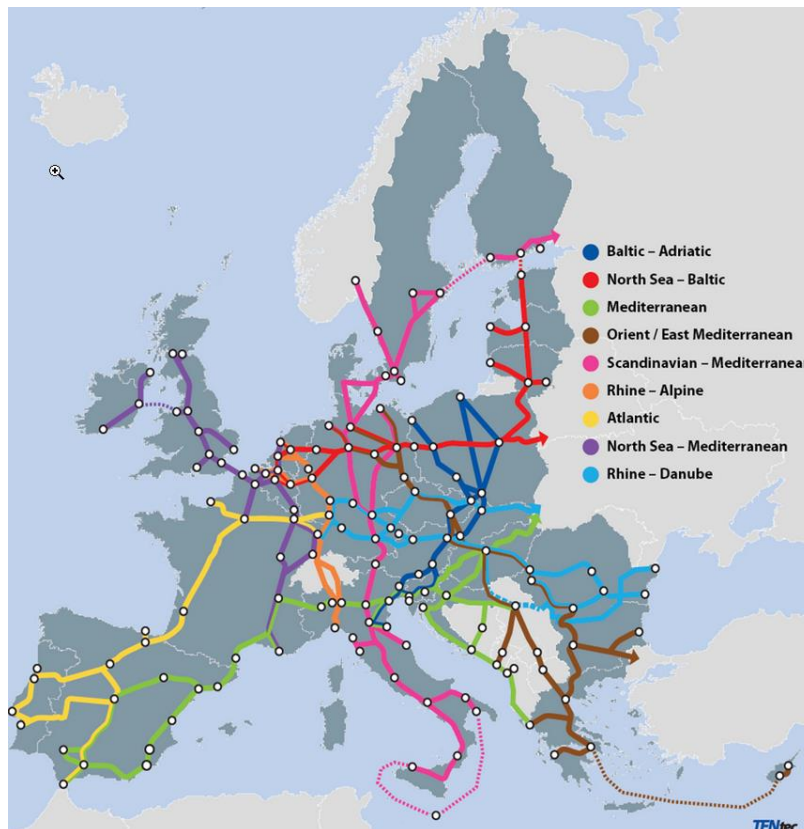


Abbildung 1: Güterverkehrskorridore in Europa [56]

Die europäische Verkehrspolitik strebt eine Steigerung dieses Anteils der auf der Schiene beförderten Güter an, was jedoch eine hinreichende Wettbewerbsfähigkeit, einen Ausbau transnationaler Eisenbahnstrecken und die Beseitigung von technischen sowie bürokratischen Hürden im grenzüberschreitenden Verkehr erfordert. Um dies zu erreichen, hat das Europäische Parlament und der EU-Rat unter anderem in der Verordnung (EU) 913/2010 zunächst neun grenzüberschreitende Schienengüterverkehrskorridore festgelegt. Zudem wurden Vorgaben für die Investitionen und das Management in den jeweiligen Korridoren festgelegt, um die Effizienz des Schienengüterverkehrs im Vergleich zu anderen Verkehrsträgern zu verbessern [2]. Später wurde eine weitgehende Harmonisierung der Korridore mit dem Transeuropäischen Verkehrsnetz (TEN-V) beschlossen (siehe Abbildung 1) [3]. Eine interaktive Karte kann auf der Webseite der Europäischen Union zur Visualisierung genutzt werden [4].

1.2 Der Güterverkehrskorridor Skandinavien–Mittelmeer

Einer dieser Korridore ist der sogenannte Skandinavien-Mittelmeer-Korridor, dessen Route unter anderem durch Stockholm, Malmö, Kopenhagen, Hamburg, Innsbruck, Rom und Palermo verläuft (siehe Abbildung 2). Dieser ist mit mehr als 9.300 km Schiene der längste Kernnetzkorridor und verbindet insbesondere wichtige Wirtschaftszonen Deutschlands mit dem Mittelmeer und Skandinavien. [5]

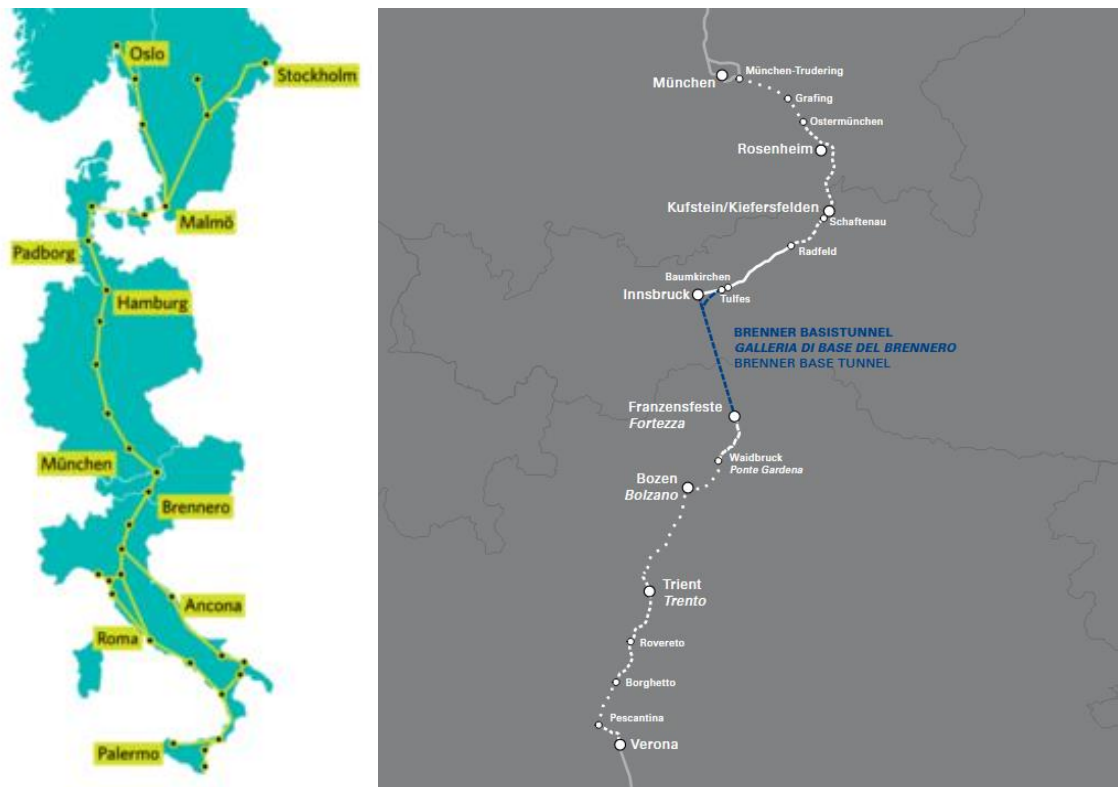


Abbildung 2: Verlauf des Güterverkehrskorridors Skandinavien–Mittelmeer [6] (links) und Verlauf des Brenner Basistunnels [7] (rechts)

Zu den wichtigsten Projekten auf diesem Korridor zählen die Fehmarnbeltquerung (eine Tunnelverbindung unter der Ostsee) im nördlichen, sowie der Brenner Basistunnel mit den entsprechenden schienengebundenen Zulaufstrecken im südlichen Abschnitt des Korridors. [5]

1.3 Der Brenner Basistunnel und Trassenfindung München-Kufstein

Der sogenannte Brenner Basistunnel ist ein geplanter Eisenbahntunnel, der Innsbruck in Tirol und Franzensfeste in Südtirol miteinander verbinden soll (siehe Abbildung 2 sowie Abschnitt 6.2.10). Zusammen mit der Umfahrung Innsbruck wird der Tunnel mit einer Gesamtlänge von 64 km die längste unterirdische Eisenbahnverbindung weltweit. [7]

Die Zulaufstrecke im Norden, der sogenannte Brenner-Nordzulauf, verläuft von München bis Innsbruck über Grafing, Rosenheim und Kufstein (siehe Abbildung 3).

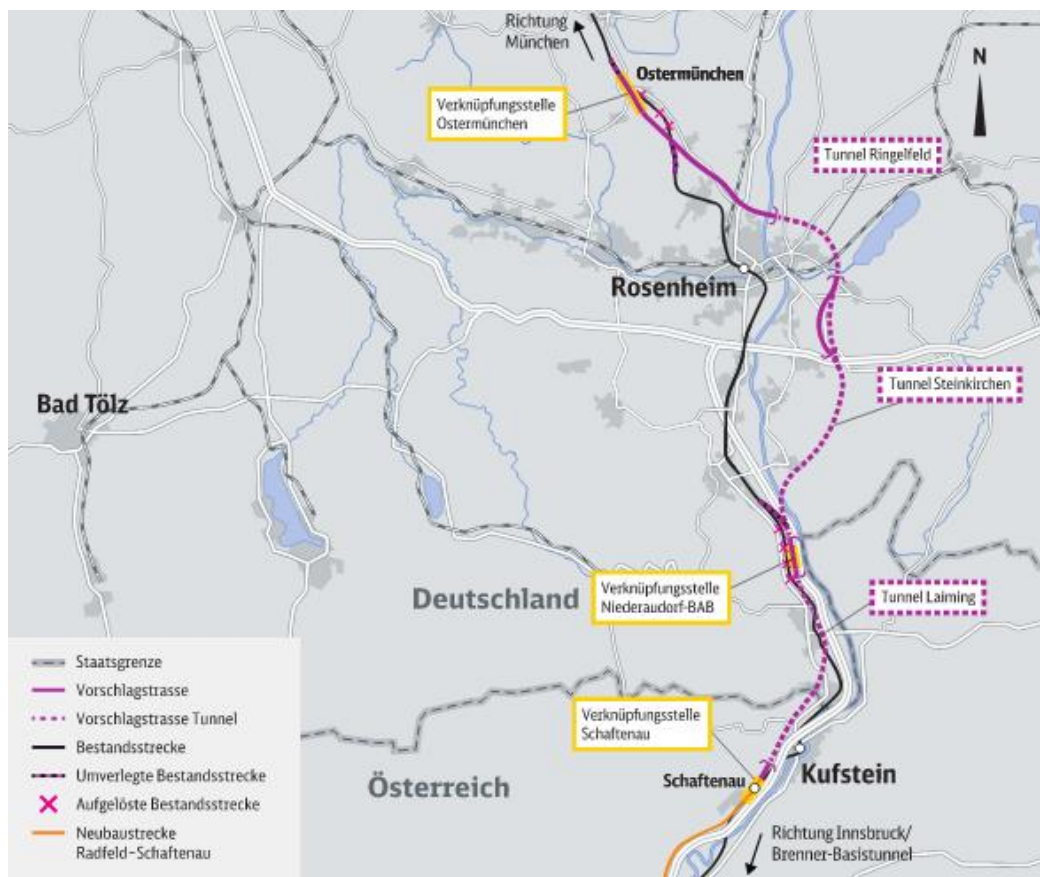


Abbildung 3: Variante Violett als festgelegter Streckenverlauf [8]

Für diesen gibt es insgesamt fünf Planungsräume, die sich aus den Lagen der Verknüpfungen zwischen den Strecken ergeben: Trudering-Grafing, Grafing-Großkarolinenfeld, der sogenannte erweiterte Planungsraum, der gemeinsame Planungsraum und Schafteuau-Knoten Radfeld. Im April 2021 wurde von fünf möglichen Trassenverläufen die sogenannte "Variante Violett" von Schafteuau über Kiefersfelden, Oberaudorf und Stephanskirchen bis Ostermünchen als Streckenführung verkündet (siehe Abbildung 3) [8]. Dabei ist es unter anderem für die Etablierung eines flexiblen Betriebes vorgesehen, mehrere sogenannte Verknüpfungsstellen im Abstand von 20 bis 25 km einzurichten, die eine Zusammenführung von Bestandsstrecke und Neubaustrecke darstellt (vergleiche Abschnitt 2.1.2). Eine dieser Verknüpfungsstellen soll dabei im Inntal bei Niederaudorf entstehen (siehe Abbildung 4).



Abbildung 4: Visualisierung der geplanten Verknüpfungsstelle bei Niederaudorf [57]

Dabei ist ersichtlich, dass die geplante oberirdische Verknüpfung in einem engen Bereich des Inntals angedacht ist und dabei sowohl mit dem Fluss, als auch mit der angrenzenden Autobahn um den begrenzten Platz konkurriert. Zudem wird die Einrichtung der Verknüpfungsstelle zu einem Verlust landwirtschaftlicher Nutzflächen sowie einer Beeinträchtigung des vorhandenen Landschaftsschutzgebietes führen. Die landwirtschaftlichen Nutzflächen können überdies aufgrund der vorhandenen Topographie nur schwer ortsnah durch Ausgleichsflächen kompensiert werden.

2 Trassierung der Brennerzulaufstrecke im Inntal

2.1 Projektierung der DB Netz AG

2.1.1 Randbedingungen für die Neubaustrecke

In diesem Abschnitt sollen die bisherigen Planungen und Randbedingungen der bisher geplanten Trassierung der Brennerzulaufstrecke im bayerischen Inntal kurz dargestellt werden. Die in Abbildung 5 angedeuteten Tunnel Steinkirchen und Laiming sind nach bisherigem Stand jeweils etwa 13 km lang. Abbildung 5 zeigt die geplante Verknüpfungsstelle Niederaudorf zwischen diesen Tunnelportalen. Hierbei ist zu beachten, dass ein durchgängiger Tunnel ohne diese oberirdische Unterbrechung demnach eine Gesamtlänge von mehr als 25 km haben würde, wodurch er gemäß des geltenden Regelwerkes als *sehr langer Tunnel*¹ gelten würde (vergleiche Kapitel 5).

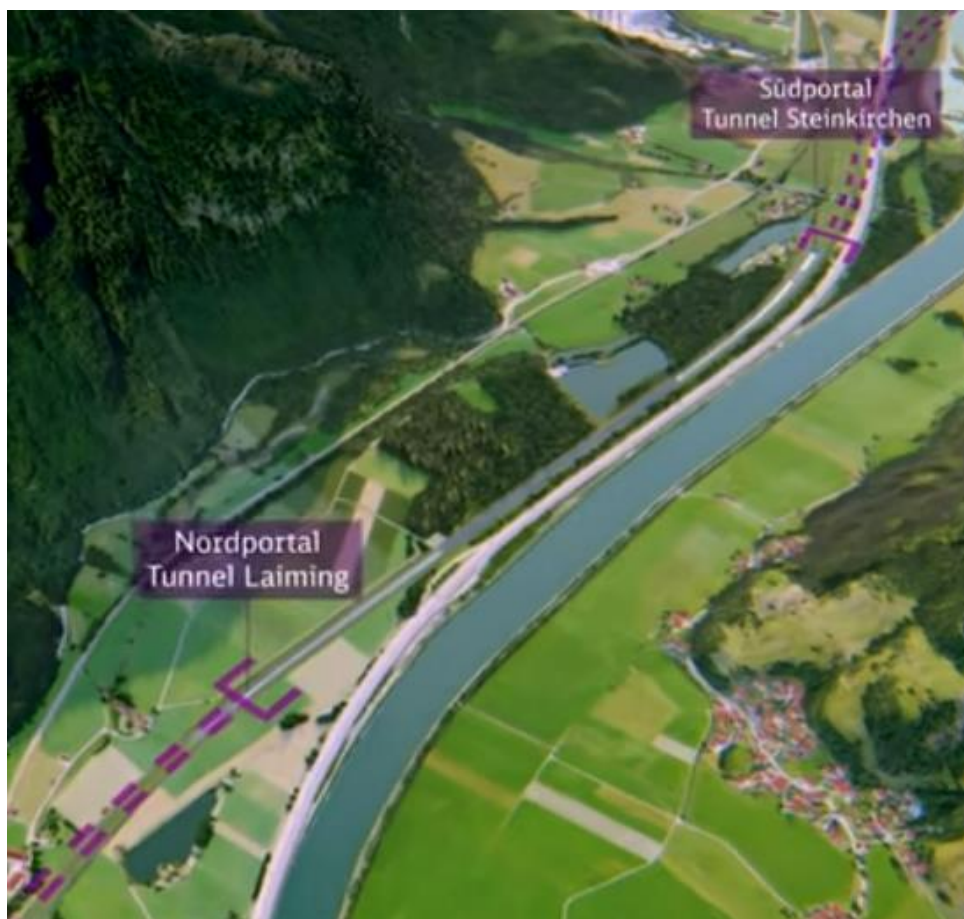


Abbildung 5: Geplante Verknüpfungsstelle Niederaudorf zwischen den Tunnelportalen (aus [57])

¹ Alle kursiv markierten Begriffe werden im Glossar am Ende der Studie erläutert.

Auf der geplanten Strecke ist ein sogenannter Mischverkehr vorgesehen, also die gleichzeitige Nutzung durch Güter- und Reisezüge. Demnach ist angedacht, auf der Neubaustrecke Fernverkehrszüge mit einer Höchstgeschwindigkeit von bis zu 230 km/h und Güterzüge (Höchstgeschwindigkeit 120 km/h) verkehren zu lassen, während die Bestandsstrecke dem Nahverkehr und weiteren Teilen von Fern- und Güterverkehr zur Verfügung stünde. Die Grundidee ist dabei eine gute Trennung zwischen Nahverkehr und den anderen Verkehrsarten, was unter anderem auch durch die Einrichtung von Verknüpfungsstellen (wie bspw. in Niederaudorf, siehe Abbildung 5) gewährleistet werden soll. Solche Verknüpfungsstellen (Definition „Verknüpfungsstelle“: siehe Abschnitt 2.1.2) stellen generell ein unverzichtbares Mittel dar, um die kapazitative Flexibilität von Strecken zu gewährleisten. Durch unterschiedliche Geschwindigkeiten von Güter- und Personenverkehr erlaubt die regelmäßige Einrichtung solcher Stellen eine hohe Leistungsfähigkeit der Strecken. Dies ist insbesondere durch vorgesehene Überholmöglichkeiten, unter anderem auch bei Störungen des normalen Betriebsablaufs, gewährleistet. Eine ausführliche Zusammenfassung, die aus Sicht der Autoren einen guten Überblick über den Nutzen von Verknüpfungsstellen liefert, hat die DB Netz AG gemeinsam mit der ÖBB-Infrastruktur AG in [9] zusammengestellt. Das Deutsche Zentrum für Schienenverkehrsforschung (DZSF) folgt der darin dargelegten Ansicht, dass die Verknüpfungsstelle zwischen Kufstein und Rosenheim nicht entfallen kann. Dies wird durch die Tatsache unterstrichen, dass die Verknüpfungsstelle die einzige Möglichkeit darstellt, um über die Neubaustrecke von Österreich nach Rosenheim zu gelangen.

Betrug die Zugzahl durch das deutsche Inntal in der ersten Jahreshälfte 2018 im Mittel noch 199 Züge pro Tag, so wird für die zukünftigen Planungen mit einer Dimensionierungsgröße von 400 Zügen täglich zusammen auf Neubau- und Bestandsstrecke ausgegangen [8].

2.1.2 Definition Verknüpfungsstelle

Verknüpfungsstellen dienen, wie es der Name bereits vermuten lässt, der Verbindung zweier Eisenbahnstrecken. Wenngleich der Begriff der Verknüpfungsstelle sehr anschaulich und eingängig ist, weist er doch aus systemtechnischer Sicht eine gewisse Unschärfe auf. Die Eisenbahnbau- und Betriebsordnung (EBO) [10] kennt Verknüpfungsstellen als Betriebsstelle der freien Strecke nicht. Bei genauerer Analyse einer Verknüpfungsstelle ist jedoch schnell erkennbar, dass es sich dabei um die Kombination von Abzweig- und Überleitstellen handelt.

Eine Abzweigstelle definiert die EBO als einen Ort, wo „Fahrten von einer Strecke auf eine andere und umgekehrt“ ermöglicht werden. Überleitstellen haben demgegenüber gemäß EBO die Funktion, Zügen die Fahrt auf ein anderes Gleis derselben Strecke zu ermöglichen (Wechsel vom *Regelgleis* auf das *Gegengleis* und umgekehrt).

Die Abbildung 6 bis Abbildung 8 illustrieren dies. Durch eine Kombination von Abzweig- und Überleitstelle ergibt sich eine Verkehrsanlage mit hoher Leistungsfähigkeit. Einerseits können Zugfahrten so von einer Strecke auf eine andere (um-)geleitet werden und andererseits ist es möglich, das Gegengleis der jeweiligen Strecken zu befahren. Obwohl dies zunächst nach einem absoluten Ausnahmefall klingen mag, bietet eine solche Anordnung in der Praxis auch im Rahmen des Regelbetriebes wertvolle dispositive Vorteile, weil sich etwa zwei in gleicher Richtung fahrende Züge „fliegend“ (d. h. während der Fahrt) überholen können. Dies kann zum Beispiel sinnvoll sein, um Zugverspätungen abzubauen und trägt im Allgemeinen zur Steigerung der Robustheit des Netzes bei.

Im Hinblick auf die politisch angestrebte Erhöhung der schienengebundenen Transportleistung stellt die in der Verknüpfungsstelle integrierte Überleitstelle ein wichtiges Instrument dar. Das heutige Eisenbahnnetz leidet an einem Mangel an Überleitstellen, sodass sich örtliche Verspätungen und Havarien rasch nachteilig auf größere Bereiche des Netzes auswirken. Bei zukünftiger Infrastruktur sollte deshalb der Fehler, auf Überleitstellen zu verzichten, nicht wiederholt werden.

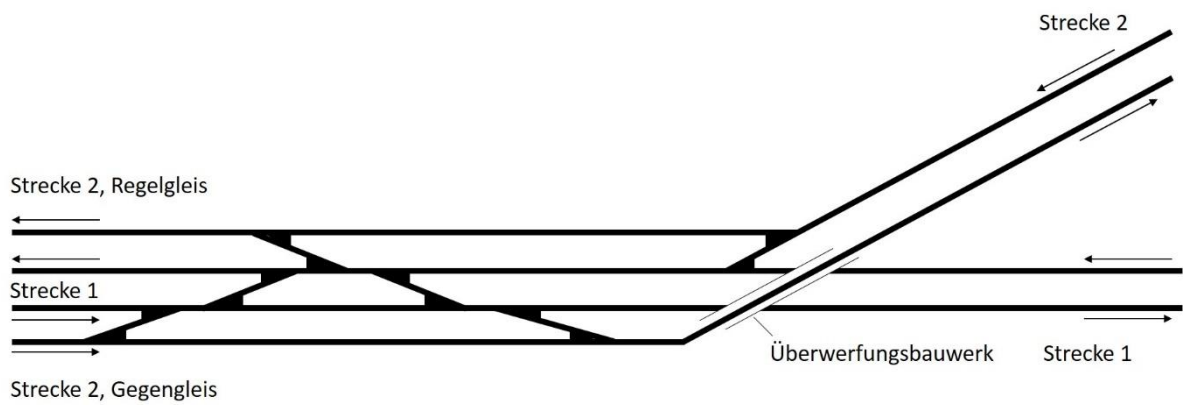


Abbildung 6: Verknüpfungsstelle von Strecke 1 und Strecke 2

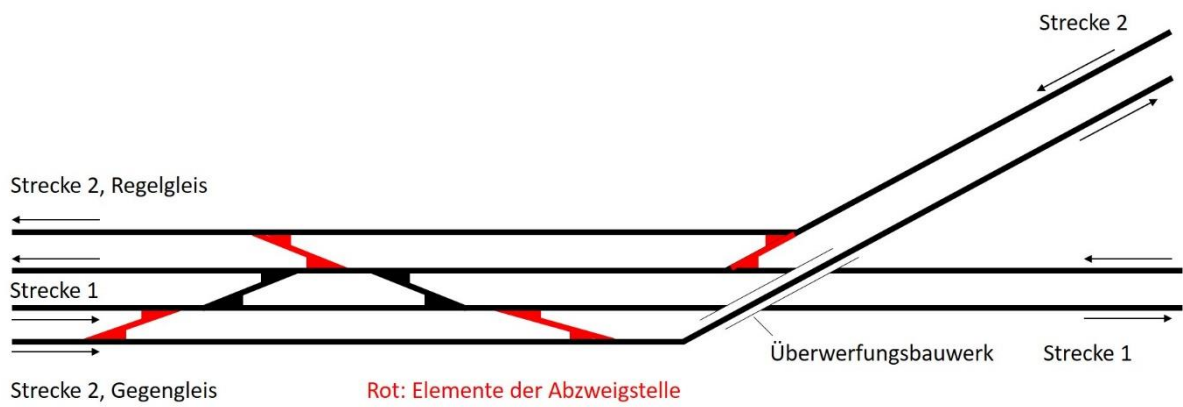


Abbildung 7: Elemente der Abzweigstelle innerhalb der Verknüpfungsstelle

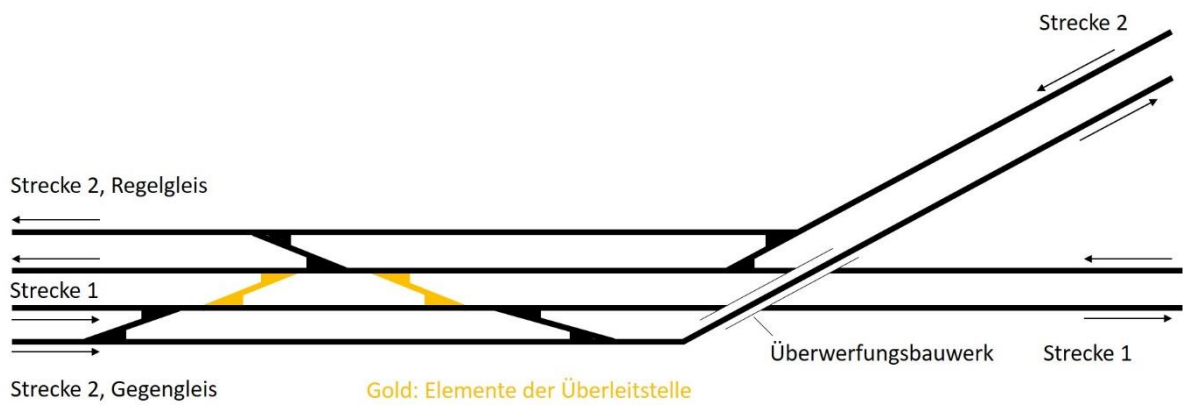


Abbildung 8: Elemente der Überleitstelle innerhalb der Verknüpfungsstelle

2.2 Alternativvorschlag der Interessengemeinschaft Inntal 2040

Die geplante Verknüpfungsstelle bei Niederaudorf ist als oberirdische Verkehrsanlage geplant, womit vielfältige Beeinträchtigungen der dortigen Bewohner und der Umwelt einhergehen würden. Um diesen entgegenzuwirken, hat eine ortsansässige Interessengemeinschaft angeregt, die Verknüpfungsstelle unterirdisch zu realisieren. Es wird vorgeschlagen, dass die Verknüpfung im Berg in einem Tunnel angelegt wird und nördlich davon in die ursprüngliche Planung mündet (siehe Abbildung 9).

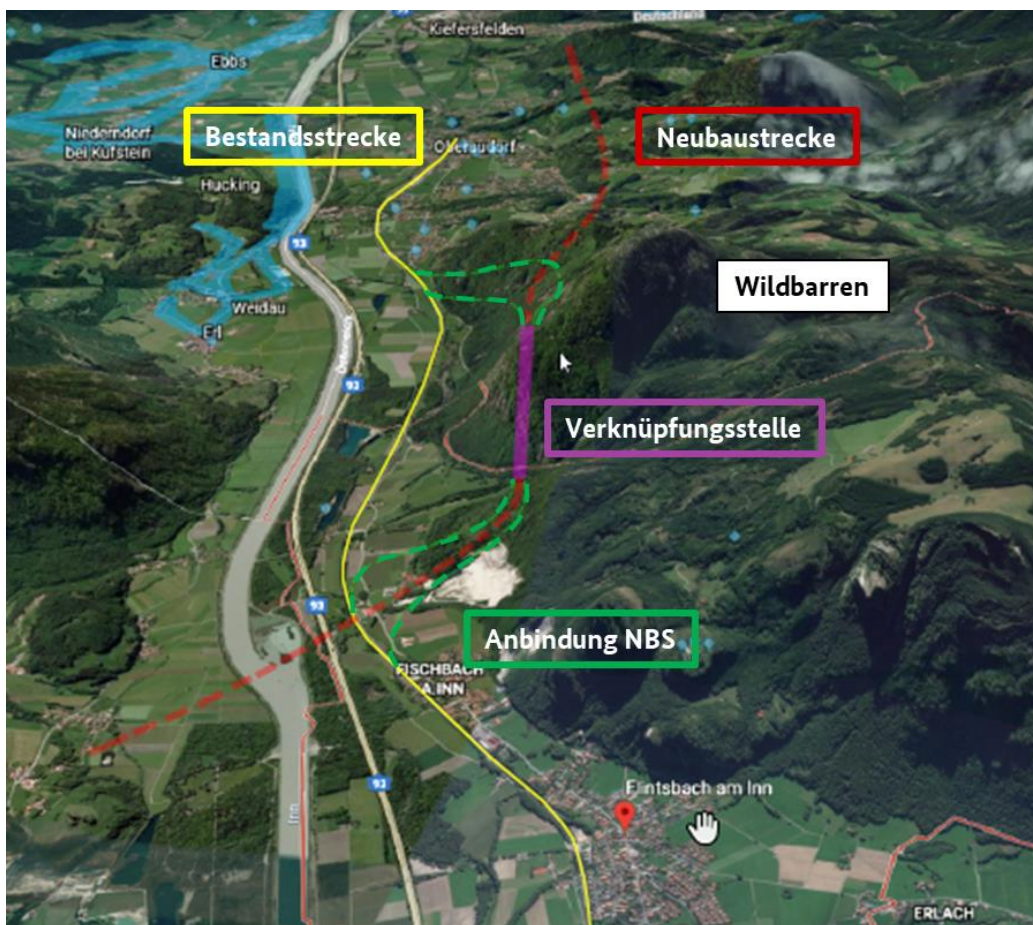


Abbildung 9: Vorschlag der Bürgerinitiative für eine unterirdische Verknüpfungsstelle (lila) [11]

Dazu wurden zwei verschiedene Trassenideen "West" und "Ost" unterbreitet, die einen Vorschlag der Realisierung der unterirdischen Verknüpfungsstelle zwischen Oberaudorf und Flintsbach am Inn skizzieren [11]. Dieser Vorschlag enthält jedoch keine genauen baulichen Konzepte für die konkrete Gestaltung der Verknüpfungsstelle.

Als Reaktion auf diese Anregung, die Verknüpfungsstelle unterirdisch zu realisieren, hat die DB Netz AG eine Stellungnahme veröffentlicht [12]. In dieser werden zwei verschiedene Optionen zur Gestaltung der Verknüpfungsstelle im Wildbarren von der DB Netz AG selbstständig entworfen: ein sogenanntes Schema A, in dem vier eingleisige Tunnelröhren mit Verbindungstunneln im Bereich der Weichenverbindungen realisiert werden und ein Schema B, in dem eine Kaverne mit vier baulich getrennten Gleisen und Weichenverbindungen entworfen werden (siehe Abbildung 10).

Beide Möglichkeiten hätten als Konsequenz, dass eine Aufhebung der baulichen Trennung der Röhren damit einhergehen würde. Eine betriebliche Regelung zur Kompensation kommt laut der Stellungnahme nicht infrage, da die Einschränkungen der Leistungsfähigkeit inakzeptabel wären. Darüber hinaus wäre die Verrauchung im Falle eines Brandes im Tunnel aufgrund der Aufhebung der baulichen Trennung nicht kontrollierbar. Aufgrund dieser Argumentation kommt die DB Netz AG zu der Erkenntnis, dass eine bauliche Trennung trotz Verbindungsrohren zwingend erforderlich ist. Dies wäre laut aktuellem Stand ausschließlich durch ein System von Toren realisierbar, die jedoch eine Reihe von Nachteilen mit sich bringen würden. Solche Tore erlauben keinen vollständigen Verschluss (u. a. wegen der Oberleitung), ließen sich nicht schnell schließen und ein Ereignis unmittelbar in der Verbindungsrohre würde die Tore beim Schließen behindern. Zudem gäbe es keine Rückfallebene im Falle eines Defekts der Tore. Damit kommen Tore nicht infrage und schlussendlich stellt die DB Netz AG fest, dass eine unterirdische Realisierung der Verknüpfungsstelle keine Möglichkeit darstellt, da nicht alle sicherheitstechnischen Vorgaben eingehalten werden könnten und notwendige Abweichungen von bestehenden Sicherheitsrichtlinien zwar potentiell möglich sind, ein dafür nötiger Nachweis gleicher Sicherheit aber nicht gelingen kann [12]. Nähere Ausführungen zum Hintergrund eines solchen Nachweises sowie inhaltliche und formale Anforderungen sind in Kapitel 5 erläutert.

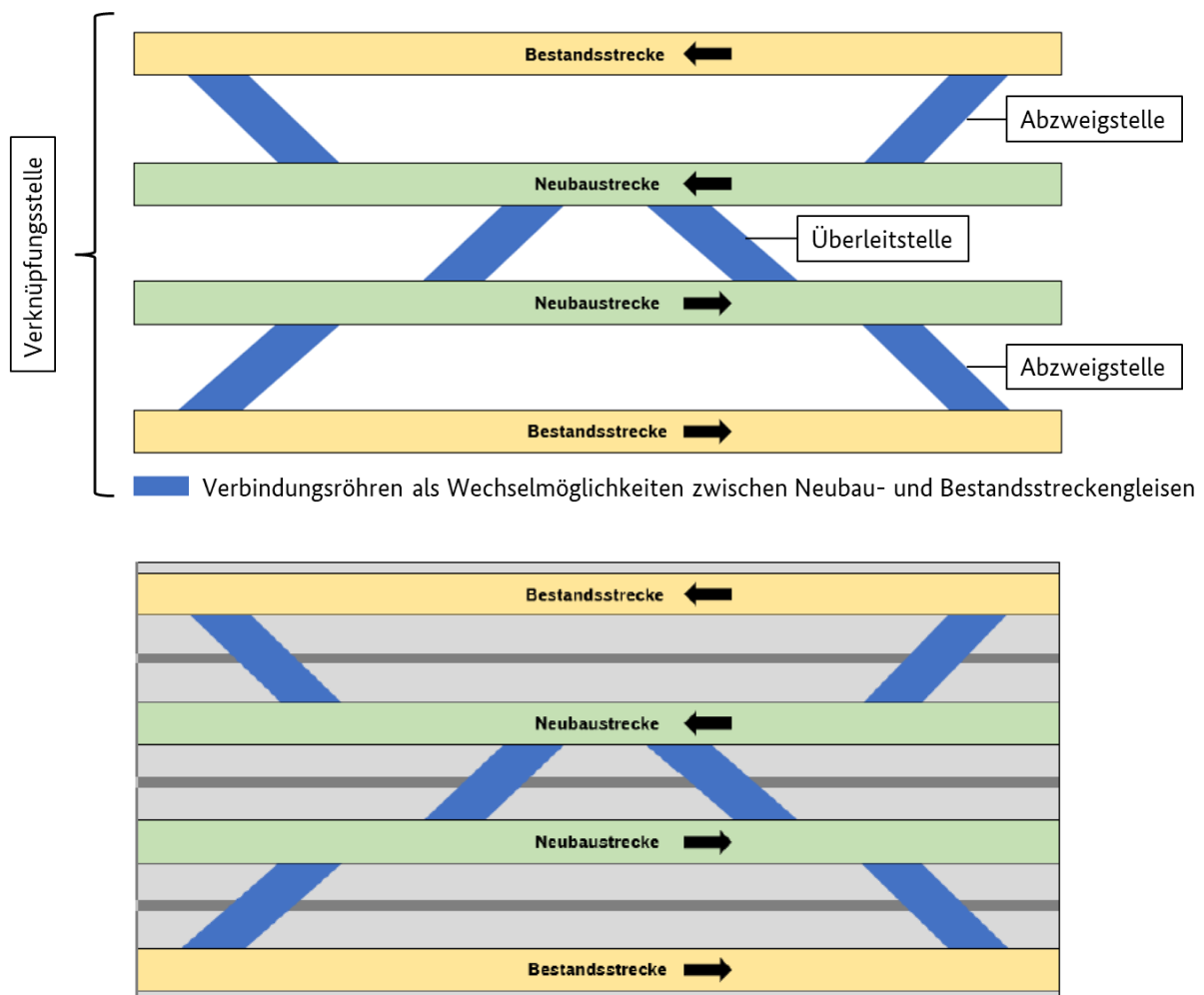


Abbildung 10: Von DB Netz AG entwickelte Gestaltungsmöglichkeiten; oben: Schema A (eingleisige Variante), unten: Schema B (Kavernenlösung) [12]

Prinzipiell gibt es unterschiedliche theoretische Gestaltungsmöglichkeiten für die Einrichtung einer unterirdischen Verknüpfungsstelle. Das Grundproblem der Aufhebung der oben beschriebenen vollständigen baulichen Trennung (Schaffung sicherer Bereich im Brandfall) stellt sich jedoch bei allen Varianten in gleicher Weise. Der Einfachheit halber und für die Übersicht dieser Studie werden die aufkommenden Problemstellungen im Folgenden ohne Einschränkung der Allgemeinheit an Variante A diskutiert, d. h. der Umsetzung in Form vier eingleisiger Varianten. Es kann jedoch festgehalten werden, dass der Argumentation bezüglich der Nichteignung von Toren der DB Netz AG im Wesentlichen gefolgt werden kann. Ob diese jedoch, wie in der Stellungnahme dargelegt, tatsächlich die einzige Möglichkeit einer Trennung der Tunnelröhren im Sinne der Tunnelsicherheit darstellen, wird im Rahmen dieser Studie erörtert.

2.3 Konsequenzen des alternativen Trassierungsvorschlages

Eine oberirdische Verknüpfungsstelle würde eine Länge von ca. 1.200 Metern aufweisen [8]. Da bei einer unterirdischen Einrichtung mit größeren Gleismittenabständen gerechnet werden muss, resultiert daraus eine Verlängerung der Längsausdehnung auf ca. 2.000 bis 3.000 Meter [12]. Zudem wäre eine Verlegung der Bestandsstrecke in die anliegende Bergflanke notwendig. Unabhängig von der konkreten baulichen und trassierungstechnischen Gestaltung einer potentiellen Umsetzung ergeben sich daraus eine Reihe komplexer Fragestellungen, beispielweise auch hinsichtlich der geologischen Eignung vor Ort, sowie betrieblicher und wirtschaftlicher Auswirkungen.

Eine wesentliche Konsequenz wäre zudem, dass eine unterirdische Realisierung der Verknüpfung durch die vor- und nachgelagerten Tunnel de facto zu einem einzigen Tunnel mit einer Gesamtlänge von mehr als 25 km führen würde (siehe Kapitel 2). Dadurch würden sich im Vergleich zu kürzeren Tunneln rechtlich weitaus höhere Anforderungen an zugrundeliegende Sicherheitsmaßnahmen ergeben (siehe auch Kapitel 5).

Es sei an dieser Stelle betont, dass nicht nur die Verlegung der Tunnelröhren selbst in den Berg betrachtet werden muss, sondern, dass damit eine umfangreiche Strategie zur Selbst- und Fremdrettung im Falle eines Brandes entwickelt werden muss. Damit wird der Tunnel zu einem sehr komplexen Bauwerk, das um zahlreiche bauliche Ergänzungen zur Schaffung von Überwachungs-, Wartungs- und Rettungsmöglichkeiten (sowohl unter- als auch oberirdisch) ergänzt werden müsste.

2.4 Auftrag an das DZSF und Abgrenzung

Durch die hohe Relevanz des Gesamtvorhabens Brenner-Nordzulauf für den gesamteuropäischen Schienengüterverkehr, aber auch wegen der betrieblichen Bedeutung der angedachten Verknüpfungsstelle im Inntal im Speziellen, hat das Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI) das DZSF mit Schreiben vom 18.03.2021 gebeten, an dem Beispiel der Verknüpfungsstelle Niederaudorf die potentielle Machbarkeit von unterirdischen Verknüpfungsstellen näher zu untersuchen und diese generell im Hinblick auf die Konformität bezüglich nationaler und europäischer Regelwerke zu bewerten. Ziel dieser Studie ist es, eine neutrale Beurteilung bezüglich der zugrundeliegenden Sicherheitsanforderungen, der Zulassungsfähigkeit und der Vereinbarkeit mit betrieblichen Randbedingungen im Rahmen dieser Fragestellung vorzunehmen. Zudem ist es ein zentrales Anliegen dieser Studie, allgemeinverständlich die komplexen Zusammenhänge zu erläutern und die Konsequenzen unterschiedlicher Lösungsansätze zu erörtern.

Ausdrücklich nicht im Fokus der Studie stehen Aspekte zu Geologie, Naturschutz und der genauen örtlichen Trassierung. Zudem ist aufgrund des vorgegebenen Zeitrahmens zur Erstellung der Studie keine detaillierte Lösungskonzeption und –skizzierung von eventuell realisierbaren Ansätzen im Fokus dieser Studie.

3 Inhalt und Methodik dieser Studie

3.1 Aufbau

Zunächst soll der Aufbau dieser Studie kurz umrissen werden. Nachdem bereits in Kapitel 2 die Ausgangslage dargelegt und eine erste grobe Beschreibung der Fragestellung sowie des Auftrags skizziert wurde, wird im folgenden Kapitel ganz allgemein auf die grundlegenden Herausforderungen beim Betrieb von Eisenbahntunneln eingegangen. Dabei soll die Entstehung und Relevanz von sicherheitsrelevanten Ereignissen in solchen Tunneln skizziert werden. Bezugnehmend auf diese potentiellen Gefährdungsszenarien (Kapitel 4) wird in Kapitel 5 das relevante Regelwerk für Eisenbahntunnel dargestellt.

Nach diesem breit gefassten Überblick listet Kapitel 6 anschließend europäische Tunnelbauwerke auf, die ähnliche Eigenschaften wie der in Kapitel 2 beschriebene alternative Trassierungsvorschlag einer unterirdischen Verknüpfungsstelle aufweisen. Derlei Referenzsysteme könnten nach geltendem Regelwerk dazu dienen, die notwendige Sicherheit nachzuweisen (siehe Kapitel 5). Deswegen werden ähnliche Bauwerke beschrieben und eine Einschätzung der jeweiligen Eignung als Referenzsystem getroffen. Hierbei werden bereits an den Beispielen konkrete Konsequenzen des alternativen Trassierungsvorschlags deutlich. Schlussendlich werden die wesentlichen Erkenntnisse in Kapitel 7 zusammengefasst und ein Fazit aus Sicht der Autoren gezogen.

Am Ende der Studie ist ein Glossar zu finden, in dem (eisenbahn-)technische Fachbegriffe erläutert werden. Der Hinweis auf diese Begriffe im Text erfolgt durch die Wahl einer *kursiven Schreibweise*.

3.2 Vorgehensweise

Das DZSF folgte zur Erstellung dieser Studie einer umfassenden Strategie, die sowohl auf interner Fachkompetenz, als auch auf der Expertise externer Spezialisten rund um die aufkommenden spezifischen Fragestellungen beruht. Ein zentraler Baustein der zugrundeliegenden Vorgehensweise waren zahlreiche Expertengespräche beispielweise mit den Projektverantwortlichen der DB Netz AG, mit international renommierten Ingenieuren im Bereich der Lüftung in Tunneln und der Tunnelsicherheit sowie mit direkt Beteiligten Experten für die Planung des Brenner Basistunnels.

Darüber hinaus hat das DZSF dank seiner Anbindung an das Eisenbahn-Bundesamt ein weitreichendes Netzwerk an Kontakten zu Eisenbahnbehörden im deutschsprachigen Raum. Es war daher möglich, auch mit Vertretern der Österreichischen Bundesbahnen (ÖBB), der Schweizerischen Bundesbahnen (SBB) sowie dem österreichischen Bundesministerium für Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie (BMK) die Problematiken und zum Teil länderspezifischen Gegebenheiten zu diskutieren. Dies trug unter anderem dazu bei, relevante Tunnelbauwerke mit Ähnlichkeit zur zu untersuchenden möglichen unterirdischen Verknüpfungsstelle zu identifizieren (siehe Kapitel 6). Zudem stand das DZSF auch mit der Interessengemeinschaft Inntal 2040 im Dialog. Die Mitglieder der Projektgruppe nahmen die Möglichkeit wahr, sich die Gegebenheiten rund um die geplante Verknüpfungsstelle Niederaudorf bei einem Vor-Ort-Besuch selbst anzusehen. Abgerundet wurde der umfassende Ansatz zur Bearbeitung der Fragestellung durch eine eingehende Literaturanalyse und eine Abfrage von für die Fragestellungen relevanten Ereignissen bei der Bundesstelle für Eisenbahnunfalluntersuchung (BEU) [13].

4 Wesentliche Herausforderungen beim Betrieb von Eisenbahntunneln

4.1 Vorbemerkungen

Sobald Züge durch Tunnel verkehren, deren Länge die Zuglänge übersteigt, sind sie von vier Seiten vollständig von einem Bauwerk umschlossen, woraus sich eine sehr stark eingeschränkte Zugänglichkeit der Fahrzeuge ergibt. Diese ist nur über den Umweg der Tunnelportale oder alternative Zugänge zu den Tunnelröhren möglich (z. B. Zugangs- oder Fensterstollen).

Ferner gilt es zu beachten, dass sich die Strömungsverhältnisse der Luft vor, hinter und um die Züge herum im Tunnel, verglichen mit der offenen Strecke, wesentlich verändern. Fahrende Züge schieben in Tunneln eine Luftsäule vor sich her (erfahrbar als wahrgenommener „Wind“, der zeitlich vor dem Eintreffen der Züge in Tunnelbahnhöfen (U-Bahn) auftritt) und erzeugen einen stärkeren Unterdruck am Zugende, da die Luft vom Eingangsportal her nachströmen muss. Ist im Tunnel keine aktive Lüftung vorhanden, kann ein Luftaustausch nur über die durch die Zugbewegung oder thermische Effekte verursachten Druckunterschiede erzeugt werden. Eine gezielte Erzeugung von Luftströmungen ist nur mit Hilfe aktiver *Lüftungssysteme* möglich.

Während Eisenbahntunnel systembedingt einen guten Schutz vor umweltbedingten Havarien (wie z. B. Erdbeben, Felschlag oder Sturmschäden) bieten, müssen bei anderen, im Eisenbahnbetrieb zwar selten auftretenden, aber doch nicht auszuschließenden, Unfall- oder Störungsszenarien besondere Maßnahmen ergriffen werden, da das Schadensausmaß sehr groß sein kann. Diese ergeben sich unmittelbar aus der mangelnden Zugänglichkeit der Fahrzeuge, den eingeschränkten Fluchtmöglichkeiten und den suboptimalen Belüftungsbedingungen in Tunneln. Die wesentlichen Szenarien werden im Folgenden diskutiert.

4.2 Zugbegegnungen

Zugbegegnungen an sich stellen im Eisenbahnbetrieb keine besondere Herausforderung dar. Sowohl Fahrzeuge, als auch Infrastruktur werden so ausgelegt, dass eine Berührung von Fahrzeugen auf parallelen Gleisen auch unter Berücksichtigung der durch die Interaktion mit dem Fahrweg induzierten, dynamischen Bewegungen ausgeschlossen werden kann. Besondere Beachtung erfahren Zugbegegnungen aus ingenieurtechnischer Sicht, wenn sie bei hohen Geschwindigkeiten (Relativgeschwindigkeit entscheidend) und/oder in Tunneln stattfinden.

Begegnen sich Züge mit hohen Geschwindigkeiten, so ist in besetzten Fahrzeuginnenräumen ein Druckausgleich bzw. Druckschutz vorzusehen, der die Insassen vor den physiologischen Schäden schützt, die die von großen Amplituden, Gradienten sowie dem schnellen Wechsel zwischen Über- und Unterdruck gekennzeichneten Druckverläufe verursachen könnten. Alle Fahrzeugöffnungen (Fenster, Türen, Luftkanäle) müssen entsprechend „druckertüchtigt“ sein und alle Anbauteile in einer Art und Weise befestigt werden, dass sie den luftdruckinduzierten Wechsellasten dauerhaft standhalten können.

Aufgrund der Strömungsverhältnisse, die sich um schnell fahrende Eisenbahnzüge herum einstellen, kann es passieren, dass entgegenkommende Fahrzeuge durch die Druckwelle vor dem Zug oder den

entstehenden Unterdruck nach Passieren der Zugspitzen in Mitleidenschaft gezogen werden. Selbstverständlich sind die auftretenden aerodynamischen Lasten Grundlage für die Auslegung der Fahrzeuge und ihrer Anbauteile. Das Unfallgeschehen der letzten Jahrzehnte zeigt jedoch, dass es insbesondere die Abweichungen vom regelkonformen Zustand sind, die hier speziell beachtet werden müssen. Aufgrund von fehlerhafter Instandhaltung oder Nachlässigkeiten bei der Wagenbehandlung (z. B. unzureichende Verriegelung von Schiebetüren) kann es dazu kommen, dass Teile der Fahrzeugausrüstung (z. B. Türen oder Klappen) bei Zugbegegnungen abgerissen oder verformt werden und dann mit entgegenkommenden Zügen kollidieren. Dies passierte beispielsweise im April 2010 als eine defekte Tür eines ICE bei voller Fahrt abgerissen wurde und Fenster eines entgegenkommenden ICE zerstörten sowie darin befindliche Passagiere verletzte [14] oder auch in Dänemark 2019 als Lkw-Auflieger auf einem Güterzug nicht richtig gesichert waren und acht Menschen ums Leben kamen [15]. Ferner spielt im Falle von Güterzügen die Ladungssicherung sowie die korrekte Befestigung von Planen und anderen beweglichen Abdeckungen eine entscheidende Rolle, um unerwünschte Kontakte mit anderen Fahrzeugen, den Tunnelwänden oder der Oberleitung zu verhindern.

Um auszuschließen, dass es in Tunneln während der Vorbeifahrt von Zügen aneinander zu Beschädigungen insbesondere von Reisezügen kommt, wurde seitens des Eisenbahn-Bundesamtes ein Begegnungsverbot von Reise- und Güterzügen in Tunneln erlassen (siehe Kapitel 5). Dieses würde im Falle von Strecken mit Mischverkehr, die zweigleisige Tunnel aufweisen, zu einer Einschränkung der Streckenkapazität führen, da Güterzüge ggf. vor dem Tunnel warten müssten, bis ein entgegenkommender Reisezug diesen durchquert hat. Soll dennoch die maximale Kapazität der Infrastruktur ausgenutzt werden, ist die Führung der Streckengleise durch separate, eingleisige Tunnelröhren die logische Konsequenz. Gemäß einschlägiger Vorschriften für den Bau und Betrieb *langer und sehr langer Eisenbahntunnel* ist die Separierung von *Regel- und Gegengleis* heute bei allen neu zu bauenden Tunneln mit einer Länge von mindestens 1000 m europäischer Standard (siehe Kapitel 5).

4.3 Kollisionen

Neben den im vorstehenden Abschnitt beschriebenen Möglichkeiten der durch Zugbegegnungen ausgelösten Kollision von Fahrzeugen mit Teilen entgegenkommender Fahrzeuge, ist die Kollision ganzer Fahrzeuge oder Züge bei der Befahrung von Tunneln als mögliches Szenario zu betrachten. Zu einer solchen Kollision kam es beispielweise im Juni 2000 im Flughafentunnel Hannover, die maßgeblich durch eine *Signalverfehlung* ausgelöst wurde [13], [16].

Zu Kollisionen kann es potentiell in folgenden Fällen kommen:

- Auffahren (Folgefahrt): Ein Fahrzeug oder Zug kollidiert mit einem im Fahrweg stehenden oder in die gleiche Richtung mit verminderter Geschwindigkeit fahrenden Fahrzeug oder Zug.
- Frontalkollision (Gegenfahrt): Ein Fahrzeug oder Zug kollidiert mit einem auf demselben Gleis entgegenkommenden Zug oder Fahrzeug.
- Flankenfahrt: Ein Fahrzeug oder Zug kollidiert an einer Weiche seitlich mit einem anderen Fahrzeug oder Zug, der in der gleichen oder auch in der Gegenrichtung verkehrt, oder dort steht.

Die Vermeidung der beschriebenen Szenarien gehört zu den Kernaufgaben der Eisenbahnsicherungstechnik. Dabei spielt es keine Rolle, ob der Zug auf offener Strecke, in Bahnhöfen oder in Tunneln verkehrt. Außerordentliche Eisenbahnunfälle mit hohen Personen- und Sachschäden (Bad Aibling, Hordorf), bei denen Züge miteinander kollidierten, sind vor allem auf die Kombination von fehlender oder lediglich punktuell vorhandener Sicherungstechnik in Kombination mit menschlichem Versagen zurückzuführen. Neu projektierte Hochleistungsstrecken entlang europäischer Korridore werden dagegen heute mit einer *ETCS*-Ausrüstung versehen, die eine kontinuierliche Überwachung der Zugfahrten sowie

in Verbindung mit moderner Stellwerkstechnik eine *Führerstandssignalisierung* erlaubt. Mit Hilfe dieser Art der linienförmigen Zugbeeinflussung können das Auffahren sowie die Frontalkollision von Zügen zuverlässig verhindert werden, unabhängig davon, ob sich die Züge in Tunneln befinden oder nicht. Flankenfahrten lassen sich ebenfalls mit Hilfe moderner Sicherungstechnik im Zuge der Einstellung von *Fahrstraßen* weitgehend ausschließen. Es bleibt jedoch die triviale Feststellung, dass sich Flankenfahrten nur dann mit absoluter Sicherheit verhindern lassen, wenn keine Gleisverbindungen mittels Weichen vorhanden sind. Die Abwägung, an welcher Stelle in einem Tunnel eine oder mehrere Weichen verbaut werden können, und ob dies überhaupt wünschenswert ist, muss deshalb immer im Kontext des gesamten Betriebs- und Sicherheitskonzeptes und einer damit verbundenen Risikobetrachtung gesehen werden.

Verlässt ein Fahrzeug oder Zug den vorgesehenen Fahrweg (Entgleisung), so ist ferner damit zu rechnen, dass es zu einer Kollision mit ortsfesten Anlagen (z. B. Signalmasten) und Bauwerken (z. B. Brückenpfeiler oder Tunnelwände) kommen kann. Unter welchen Umständen ein Fahrzeug den vorgesehenen Fahrweg verlassen kann, wird im folgenden Abschnitt diskutiert.

4.4 Entgleisungen

Eine Entgleisung tritt dann ein, wenn die Eisenbahnräder oder –radsätze den vorgesehenen *Spurkanal* verlassen, sodass keine lateralen Kräfte mehr zwischen Rad und Schiene übertragen werden können. Im Falle einer Entgleisung können die Radsätze ihrer Trag- und Führungsfunktion nicht mehr oder nur sehr eingeschränkt nachkommen. Relevante recherchierte Entgleisungen ereigneten sich beispielsweise im Leinebuschtunnel im Jahr 1999, im S-Bahnstammstreckentunnel München im Jahr 2000 sowie im Landrückentunnel 2008 [13], [17].

Die Folgen einer Entgleisung hängen stark davon ab, an welchem Ort und bei welcher Geschwindigkeit diese stattfindet und wie schnell sie detektiert werden kann. Während die Auswirkungen bei kleinen Geschwindigkeiten überschaubar bleiben können, kann eine Entgleisung bei hohen Geschwindigkeiten katastrophale Folgen haben, wie die Zugunglücke von Eschede im Juni 1998 [18], Santiago de Compostela im Juli 2013 [19] und Eckwersheim im November 2015 [20] gezeigt haben. Zudem können Entgleisungen am Anfang einer Kette von Ereignissen stehen, die letztlich zu einem schwerwiegenden Schaden oder Brand von Fahrzeugen führen, was insbesondere in Tunneln unbedingt vermieden werden sollte.

Entgleisungen lassen sich unter anderem auf folgende Ursachen zurückführen:

- schwere Gleislagefehler (z. B. Gleisverwerfungen),
- Bruch von Schienen oder anderen Fahrwegelementen (z. B. Elementen von Weichen),
- mechanisches Versagen von Rädern, Radsatzwellen, Radsatzlenkern oder Feder-/Dämpfer-Elementen,
- Defekte am Fahrwerk, die dessen Feder-Dämpferabstimmung verändern,
- instabiler Lauf der Radsätze aufgrund der Berührgeometrie zwischen Rad- und Schiene,
- Hindernisse im Gleis, die nicht mit Hilfe der Bahn- und Schienenräumer beseitigt werden können (z. B. Geröll, Erdhaufen, Schnee und Eis, Tiere, größere Objekte aus Metall, Beton oder Holz),
- unkompenzierte Radialkräfte in zu schnell befahrenen Gleisbögen (z. B. Unfälle in Santiago de Compostella, Eckwersheim),
- Umstellen von Weichen während der Überfahrt eines Fahrzeugs bzw. Zuges,
- Befahrung von Weichen, bei denen bewegliche Fahrwegelemente nicht richtig anliegen oder verriegelt sind.

Während sich ein Teil der oben aufgezeigten potentiellen Ursachen für Entgleisungen mit Hilfe technischer Möglichkeiten, engmaschiger Überwachung und einer gewissenhaften Instandhaltung weitestgehend ausschließen lässt, verbleibt ein Restrisiko, mit dem bei der Konzeption von Eisenbahnstrecken in Tunneln umgegangen werden muss. Hierbei lässt sich prinzipiell festhalten, dass jede Weiche, die in einen Tunnel geleitet wird, das Risiko einer Entgleisung erhöht.

4.5 Brandereignisse

Neben Entgleisungen, die zu den sogenannten „kalten Ereignissen“ gezählt werden und aufgrund ihrer potentiell schwerwiegenden Folgen in Tunneln, soweit es geht, vermieden werden sollen, stellen Brände („heiße Ereignisse“) in Tunneln die mit Abstand größte Gefahr für Leib und Leben dar. Brandereignisse in Tunneln (exemplarische Auflistung von Ereignissen seit 1990: siehe Tabelle 1) treten prinzipiell sehr selten auf, erregen aber nicht zuletzt aufgrund der teilweise aufwendigen Brandbekämpfungsmaßnahmen in der Öffentlichkeit häufig großes Aufsehen. In der öffentlichen Wahrnehmung ist häufig noch das Unglück von Kaprun im Jahre 2000 präsent. Dabei starben beim Brand einer Standseilbahn, die innerhalb eines Tunnels zum Halt gekommen war, 155 Menschen, vor allem an Rauchgasvergiftung. Hinsichtlich des geltenden Regelwerkes ist eine Standseilbahn jedoch nicht mit einem regulären Eisenbahnfahrzeug vergleichbar.

Tabelle 1: Liste mit Beispielen von Brandereignissen in Eisenbahntunneln seit 1990, zitiert nach [21]

Datum	Ort	Zugart	Tote/Verletzte	Beschreibung
16.04.1991	Zürich (Hirschengraben-tunnel)	Reisezug	0/51	Entzündung einer Sitzbank in einer S-Bahn, die durch Fahrgastnotbremsung im Tunnel zum Stehen kommt. Durch anschließenden Stromausfall im Tunnel kommt eine weitere S-Bahn auf dem Nebengleis direkt neben dem brennenden Zug zum Stehen.
26.10.1991	Standedge	Reisezug	0/0	-
21.05.1994	Gotthard-Tunnel	Reisezug	0/0	-
21.12.1995	Simplontunnel	Güterzug	0/0	-
10.05.1996	München	Reisezug	0/12	-
20.11.1996	Euro-Tunnel	Güterzug	0/8	Brand eines Shuttle-Zuges, der zur Evakuierung des Zuges (via Servicetunnel) zwingt

Tabelle 1 (Fortsetzung)

Datum	Ort	Zugart	Tote/Verletzte	Beschreibung
01.03.1999	Leinebuschtunnel	Güterzug	0/0	Entgleisung eines mit Zellstoff beladenen Güterwagens (Radsatzlagerschaden) mit anschließendem Brand
23.05.1999	Galleria Santa Lucia (Nocera/Salerno)	Reisezug	4/12	Brandstiftung und Vandalismus sogenannter Fußballfans führen zu einem Halt des Zuges, bevor dieser den Tunnel ganz verlassen hat.
08.06.1999	Schönberg-Tunnel (A)	Güterzug	0/0	-
11.11.2000	Standseilbahntunnel Kitzsteinhorn (Kaprun)	Standseilbahn	155/0	Im hinteren Führerstand des gerade bergwärts fahrenden Wagens der Standseilbahn gerät Hydrauliköl durch einen Heizlüfter in Brand. Durch den Druckverlust im hydraulischen System legen die Bremsen an und das Fahrzeug kommt im Tunnel zu stehen, wo es ausbrennt.
08/2006	Euro-Tunnel	Shuttle-Zug	0/0	Motor eines transportierten Lastkraftwagens gerät in Brand, der sich jedoch nicht ausweitet, Tunnel muss gesperrt werden
09.06.2011	Simplontunnel	Güterzug	0/0	Eine mutmaßlich durch Vandalismus/Diebstahl beschädigte Plane eines Lkw-Aufliegers wird durch den Fahrtwind im Tunnel gegen die Oberleitung geweht, sodass ein Lichtbogen entsteht, der den Sattelaufleger entzündet. Das Feuer springt auf andere Wagen über.

Die spezielle Problematik von Tunnelbränden ergibt sich aus der enormen Hitzeentwicklung in der Umgebung des Brandherdes und der Konzentration giftiger Gase und Dämpfe in Verbindung mit einer starken Rauchbildung, die die Sicht und Orientierung im Tunnel sehr stark einschränken kann.

Der Aufwand für eine zielgerichtete Ableitung von thermischer Energie sowie zur Erzeugung von Luftströmungen, die geeignet sind, giftige Gase, Dämpfe und Rauch abzuführen, ist in Tunneln ungleich aufwendiger als auf der freien Strecke.

Dem Schutz von Leib und Leben der Passagiere wird bei der Konzeption von Eisenbahntunneln ein hoher Stellenwert eingeräumt. Es müssen sichere Räume geschaffen werden, die dauerhaft gegen das Eindringen von Rauch und giftigen Dämpfen und Gasen geschützt werden können. Diese Räume müssen schnell und sicher erreicht werden können (vgl. Kapitel 5).

Eine weitere logistische Herausforderung, die in *(sehr) langen Tunneln* gelöst werden muss, ist die Löschwasserversorgung. Da eine Zuführung allein über die Tunnelportale bei *langen und sehr langen* Tunneln nicht praktikabel ist, muss Löschwasser im Tunnel verteilt vorgehalten werden.

Aufgrund der vorstehend angerissenen Brandschutzproblematik sind Eisenbahntunnel sehr komplexe Bauwerke, die neben dem eigentlichen Tunnelröhren für den Bahnverkehr eine Vielzahl weiterer Elemente wie z. B. Querschläge, Zugangstollen und Technikräume enthalten. Diese vergrößern Baukosten und –zeit der Tunnelkomplexe ggf. enorm.

4.6 Evakuierung

Ein ganz wesentliches Ziel bei dem Betrieb von Zügen in Tunneln ist es, einen Halt innerhalb der Tunnel möglichst zu vermeiden. Ist dies unvermeidlich und eine Wiederaufnahme der Fahrt nach erfolgtem Halt unmöglich, so müssen Züge notfalls im Tunnel evakuiert werden. *Sehr lange Tunnel*, die dem heute maßgeblichen Sicherheitsniveau entsprechen, enthalten deshalb definierte Nothalte/ Rettungs- und Evakuierungspunkte, die sich in der Nähe von Notausgängen befinden und eine Evakuierung der Züge ermöglichen sollen, falls eine Ausfahrt aus dem Tunnel aus eigener Kraft absehbar unmöglich ist. Generell muss es aber im Notfall an jeder beliebigen Stelle des Tunnels möglich sein, einen brennenden Zug zu verlassen und einen sicheren (d. h. vor Rauch, Gasen und extremer Hitze geschützten) Raum aufzusuchen.

Der Bau separater Tunnelröhren für jede Fahrtrichtung ermöglicht es, die jeweils nicht betroffene Röhre als sicheren Raum zu nutzen. Dazu müssen die beiden Haupttröhren in regelmäßigen Abständen über Querschläge miteinander verbunden werden. Der Abstand zwischen den Querschlägen und die Gestaltung der Rettungswege muss so gestaltet sein, dass alle betroffenen Personen die sicheren Bereiche auch bei starker Rauchentwicklung und kurzzeitiger Einwirkung giftiger Gase und Dämpfe noch aus eigener Kraft erreichen können.

Das Ziel der Evakuierung ist der Transfer der Menschen aus dem Gefahrenbereich in einen dauerhaft sicheren Bereich hinein. Angesichts der Tatsache, dass das Löschen von Bränden in Tunneln eine sehr langwierige Angelegenheit sein kann, sind die dauerhaft sicheren Bereiche außerhalb der Tunnel zu finden. Deshalb müssen Möglichkeiten geschaffen werden, größere Menschenmengen notfalls über längere Distanzen aus den Tunneln heraus zu bringen. Dies kann mit einem Ersatzzug in der zweiten Tunnelröhre erfolgen oder mittels Straßenfahrzeugen, die dafür ausgebaute Service- oder Fenstertunnel benutzen oder auch mittels Rettungstollen, durch die sich die Menschen fußläufig in Sicherheit zu Sammelplätzen außerhalb des Tunnels bringen können. Es ist zu berücksichtigen, dass an Evakuierungswege umfassende Anforderungen zu stellen sind (z. B. Mindestbreite, Mindesthöhe, max. Längsneigung, Eignung für Selbst-/Fremdrettung), wobei die Möglichkeit der Selbstrettung von Personen mit eingeschränkter Mobilität mit betrachtet werden muss.

4.7 Räumung

Die Räumung havariierter Fahrzeuge kann bei Tunneln nur über die Portale erfolgen. Die Komplexität des Räumprozesses kann je nach Schwere der Havarie (Kollision, Entgleisung, Brand) ein beachtliches Ausmaß annehmen. So muss nach schweren Kollisionen oder Bränden zunächst die bauliche Stabilität der Tunnelkonstruktion selbst geprüft und ggf. abgesichert werden. Der Einsatz von Kränen sowie hydraulischen Elementen zur Aufgleisung der Fahrzeuge ist aufgrund der beengten Platzverhältnisse erschwert oder gar unmöglich.

4.8 Instandhaltung

Bei der Projektierung und dem Bau von Tunneln ist deren regelmäßige Inspektion und Instandhaltung zu antizipieren. Auch hinsichtlich der Instandhaltbarkeit von Tunneln stellt sich die Frage der Zugänglichkeit und den Möglichkeiten der Zustandsüberwachung. Etwaige Veränderungen oder Schäden an den Gleisen, der Sicherungstechnik und dem Tunnelbauwerk selbst müssen detektiert und behoben werden, bevor eine Betriebsgefahr daraus erwächst. Da es sich bei Tunneln um sehr komplexe Bauwerke handelt, die ggf. umfangreiche technische Ausrüstungen und periphere Systeme, wie zum Beispiel die Tunnelentwässerung, umfassen, ist mit einem gegenüber der freien Strecke deutlich größeren Instandhaltungsaufwand zu rechnen.

Um die Tunnelbauwerke zu inspizieren, ist eine Sperrung der jeweiligen Röhren für den Regelverkehr vorzusehen, die sich betrieblich umso nachteiliger auswirken wird, desto weniger Möglichkeiten für einen Gleiswechsel (d. h. Ersatztrassen) vorhanden sind und desto zeitaufwändiger die Inspektionen sind. Alle technischen Einrichtungen, die bei komplexen Tunnelsystemen zusätzlich vorgesehen werden müssen, um im Falle etwa eines Brandes ein Höchstmaß an Sicherheit zu erzielen (z. B. *Lüftungssysteme*), erhöhen die Komplexität der Inspektions- und Wartungsprozesse und reduzieren damit die effektive Verfügbarkeit der Tunnel für den Verkehr.

4.9 Zwischenfazit zu tunnelspezifischen Herausforderungen

Wie die voranstehenden Ausführungen gezeigt haben, gilt es bei dem Bau und Betrieb von Eisenbahntunneln, zahlreiche Herausforderungen zu meistern. An erster Stelle steht dabei die Vermeidung von „kalten“ (Entgleisungen, Kollisionen) und „heißen“ (Brände) katastrophalen Ereignissen. Die Planung der Tunnelbauwerke umfasst deshalb nicht nur die eigentlichen Tunnelröhren selbst, sondern auch zahlreiche weitere Bauwerke und Anlagen, die der Sicherheit in Tunneln dienen und deren Inspektion beziehungsweise Wartung ermöglichen.

Die Maßnahmen, die diesbezüglich zu ergreifen sind, hängen insbesondere von der Länge und der örtlichen Lage der Tunnel sowie dem Zweck, für den sie gebaut werden, ab. Je komplexer die Gleisanlagen in einem Eisenbahntunnel sind, desto aufwendiger sind die Maßnahmen, die ergriffen werden müssen, um die Risiken beim Betrieb der Tunnel in einem akzeptablen Rahmen zu halten.

Die Komplexität der Bauwerke sowie die Erfordernisse zur Rettung und Evakuierung einer großen Anzahl von Menschen ziehen, insbesondere bei langen Tunneln, ggf. auch umfangreiche oberirdische Installationen sowie die Einrichtung von Rettungsplätzen und Zufahrtswegen nach sich.

Der nachvollziehbare Wunsch eine moderne Eisenbahn-Hochleistungsstrecke im Berg „zu verstecken“, ist aus den genannten Gründen nicht ohne Weiteres mit den tatsächlichen Erfordernissen vereinbar.

5 Regelwerk für Eisenbahntunnel

5.1 Überblick

Für Eisenbahntunnel auf dem Gebiet der Europäischen Union gilt die Verordnung (EU) Nr. 1303/2014 über die technische Spezifikation für die Interoperabilität bezüglich „Sicherheit in Eisenbahntunneln“ im Eisenbahnsystem der Europäischen Union (TSI SRT) [22] und die Änderungen aus der Durchführungsverordnung (EU) 2019/776 zur TSI SRT [23]. Das Ziel der TSI SRT ist es, Maßnahmen zur Minderung von spezifischen Tunnelrisiken festzulegen. Als generelle Risiken bei der Eisenbahn werden z. B. eine Entgleisung und Kollision mit anderen Zügen angesehen. Diese sind nicht tunnelspezifisch und gelten auch für alle Bereiche der Eisenbahn (siehe Kapitel 4).

In Deutschland gilt zusätzlich die Richtlinie „Anforderungen des Brand- und Katastrophenschutzes an den Bau und den Betrieb von Eisenbahntunneln“ des Eisenbahn-Bundesamtes (im Folgenden EBA-Tunnelrichtlinie) [24]. Die EBA-Tunnelrichtlinie entstand als Ergebnis der Bildung einer Arbeitsgruppe aus Vertretern der Innenministerien von Baden-Württemberg, Hessen, Bayern, Nordrhein-Westfalen und Rheinland-Pfalz, der Arbeitsgemeinschaft der Leiter der Berufsfeuerwehren in der Bundesrepublik Deutschland, des Eisenbahn-Bundesamtes und der Deutschen Bahn Aktiengesellschaft. Das Eisenbahn-Bundesamt ist Herausgeber der EBA-Tunnelrichtlinie, welche als Verwaltungsvorschrift gilt. Außerdem ist die EBA-Tunnelrichtlinie eine anerkannte Regel der Technik im Sinne des § 2 Abs. 1 Allgemeines Eisenbahngesetz (AEG) [25]. Durch die Richtlinie werden Maßnahmen des Brand- und Katastrophenschutzes, die für den Bau und Betrieb von Eisenbahntunneln erforderlich sind, definiert. Die Eisenbahntunnel müssen die darin definierten Anforderungen an die bauliche Gestaltung (Baustoffe, Anzahl der Röhren und Einrichtungen) erfüllen. Der Anlagenbetreiber hat zudem bestimmte organisatorische Maßnahmen sicherzustellen.

Gemäß Erwägungsgrund 5 der Richtlinie EU 2016/798 über Eisenbahnsicherheit (Eisenbahn-Sicherheitsrichtlinie) „weist das Eisenbahnsystem der Union generell ein hohes Sicherheitsniveau auf, insbesondere im Vergleich zum Straßenverkehr. Die Eisenbahnsicherheit sollte allgemein aufrechterhalten und, soweit das durchführbar ist, kontinuierlich verbessert werden, wobei der technische und wissenschaftliche Fortschritt sowie die Entwicklung des Unionsrechts und des internationalen Rechts berücksichtigt werden sollten. Die Priorität sollte der Verhütung von Unfällen eingeräumt werden. Ferner sollte den Auswirkungen des Faktors Mensch Rechnung getragen werden“ [26]. In Tabelle 2 wird der Anwendungsbereich der im wesentlichen verbindlichen Regelwerke für Tunnel in Deutschland dargestellt.

Tabelle 2: Anwendungsbereich der TSI SRT und der EBA-Tunnelrichtlinie

TSI SRT (EU-Verordnung)	EBA-Tunnelrichtlinie (Nationale Sicherheitsvorschrift für Deutschland und Verwaltungsvorschrift des Eisenbahn-Bundesamtes)
<ul style="list-style-type: none"> - Bauliche Anforderungen - Organisatorische Maßnahmen - Enthält Anforderungen aus weiteren TSI, z. B. Zugsteuerung/Zugsicherung und Signalgebung (CCS), Infrastruktur (INF), Energie (ENE), Betrieb (OPE) und Fahrzeuge (Lokomotiven und Reisezugwagen, LOC&PAS) 	<ul style="list-style-type: none"> - Bauliche Gestaltung - Betriebliche Anforderungen - Organisatorische Maßnahmen
Einordnung der Tunnellängen: <ul style="list-style-type: none"> - Tunnel: ab 100 m - Lange Tunnel: ab 1.000 m 	Einordnung der Tunnellängen: <ul style="list-style-type: none"> - Tunnel: ab 500 m - Lange Tunnel: ab 1.000 m - Sehr lange Tunnel: ab 20.000 m

5.2 Sicherheitskonzept

Nach der TSI SRT besteht das Sicherheitskonzept für Eisenbahntunnel aus den vier folgenden Ebenen, denen entsprechende Maßnahmen (nachfolgend in Klammern aufgeführt) zugeordnet werden:

1. Vorbeugung (Vorbeugungsmaßnahmen),
2. Ausmaßminderung (Ausmaßminderungsmaßnahmen),
3. Evakuierung (Evakuierungsmaßnahmen),
4. Rettung (Rettungsmaßnahmen).

Alle genannten Maßnahmen bilden gesamthaft die Sicherheitsmaßnahmen für Eisenbahntunnel. Die Evakuierungsmaßnahmen und Rettungsmaßnahmen beschreiben das Rettungskonzept innerhalb des vierstufigen Sicherheitskonzeptes. Das Zusammenwirken der vier Sicherheitslevel führt zu einem geringen Restrisiko. Als Hauptgefahr in Tunneln gilt der Brand mit Rauchentwicklung (siehe auch Kapitel 4).

Mit Vorbeugungs- oder Präventivmaßnahmen soll die Eintrittswahrscheinlichkeit eines Ereignisses so weit wie möglich reduziert werden. Ein Beispiel dafür ist die in Deutschland geltende Festlegung, dass im Mischverkehr ein Begegnungsverbot von Reise- mit Güterzügen im Tunnel gilt. Baulich wird dies durch eingleisige Röhren für *lange und sehr lange Tunnel* erreicht. Als weitere Vorbeugungsmaßnahme gilt die streckenseitige Heißläuferortungsanlage und die Festbremsortungsanlage, die einen heiß gelaufenen oder festgebremsten Radsatz detektieren können und weitere Gefahren verhindern. Schienenfahrzeuge müssen Brandschutzanforderungen sowie den Betriebsklassen nach DIN EN 45545 (Bahnanwendungen - Brandschutz in Schienenfahrzeugen) entsprechen. Das Schutzziel ist dabei eine Brandausbreitung innerhalb eines Schienenfahrzeugs zu begrenzen. Im Brandfall breitet sich dieser nicht oder nur langsam aus, sodass das Fahrzeug geräumt werden kann. Aus Sicht der Tunnelsicherheit ist dies ebenfalls eine Vorbeugungsmaßnahme.

Eine Ausmaßminderungsmaßnahme hat das Ziel, dass sich im Falle eines Ereignisses das Schadensausmaß nicht erhöht. Als Ausmaßminderungsmaßnahme gilt beispielsweise die Notbremsüberbrückung, die verhindert, dass ein Zug aufgrund einer durch Reisende eingeleiteten Notbremsung innerhalb eines Tunnels zum Halten kommt. Die Notbremsüberbrückung erlaubt es dem Triebfahrzeugführer eine eingeleitete Notbremsung aufzuheben, um so den Zug erst außerhalb des Tunnels zum Halten bringen zu können. Bei einem Halt im Tunnel könnten die erforderlichen Maßnahmen der Evakuierung und der Rettung durch die baulichen Besonderheiten eines geschlossenen Tunnels zeitlich verzögert werden und eine Beeinträchtigung in der Umsetzung des Rettungskonzeptes darstellen (siehe auch Kapitel 4).

Evakuierungsmaßnahmen sind Maßnahmen zur Selbstrettung und Rettungsmaßnahmen sind Maßnahmen zur Fremdrettung. Das Rettungskonzept greift erst dann, wenn die Vorbeugungs- und Ausmaßminderungsmaßnahmen nicht erfolgreich waren. Maßnahmen zur Selbstrettung werden vom Zugpersonal oder vom Reisenden selber getroffen, um die unmittelbare Gefahr abzuwehren. Die Evakuierung aus dem Zug in die sicheren Bereiche sind Maßnahmen zur Selbstrettung. Die Selbstrettung wird durch bauliche Einrichtungen innerhalb des Tunnels unterstützt. Dazu gehören: befestigte Fluchtwege neben jedem Gleis, Notausgänge in regelmäßigen Abständen, Notbeleuchtung, Fluchtwegkennzeichnung sowie Notruffernsprecher.

Die Rettungsmaßnahmen sind Maßnahmen zur Fremdrettung durch Feuerwehren. Bauliche Maßnahmen können Fremdrettungsmaßnahmen unterstützen durch: Rettungsplätze und Zufahrten, Transporthilfen, Löschwasserversorgung, Elektroversorgung und durch das Sicherstellen der Kommunikation.

In einigen Mitgliedstaaten der EU bestehen bereits Sicherheitsvorschriften, die ein höheres Sicherheitsniveau, als in der TSI gefordert, vorschreiben. Geltende Vorschriften dieser Art sind als nationale Vorschriften im Sinne von Artikel 8 der Eisenbahn-Sicherheitsrichtlinie [26] zu betrachten.

Da die EBA-Tunnelrichtlinie und die TSI SRT in Deutschland angewendet werden müssen, gilt es, ggf. die jeweilige strengere Anforderung zu erfüllen. Als Beispiel muss nach TSI SRT die Breite eines Fluchtwegs mindestens 0,8 m betragen und nach EBA-Tunnelrichtlinie muss die Breite des Fluchtwegs 1,2 m betragen. Daher gilt hier die höhere Anforderung eines Fluchtwegs nach EBA-Tunnelrichtlinie und muss entsprechend angewendet werden. Dieses Prinzip muss bei allen Anforderungen an einen Eisenbahntunnel geprüft werden und entsprechend Anwendung finden. Dadurch kann ein höheres Sicherheitsniveau, als in der TSI SRT gefordert, etabliert werden, von dem nachfolgend nicht mehr abgewichen werden darf.

5.3 Regelwerksanforderungen an die Verknüpfungsstelle bei Niederaudorf

5.3.1 Vorbemerkungen

Das vorgesehene Betriebsprogramm hat, wie bereits in Kapitel 2 dargelegt, einen uneingeschränkten Mischverkehr (Schienenpersonen- und Güterverkehr) vorgesehen. Nun bestehen Herausforderungen an bauliche, betriebliche und organisatorische Anforderungen für die Verknüpfungsstelle, die zu erfüllen wären. Es können nicht alle Anforderungen vollständig aufgrund der groben Darstellung des Schemas A (siehe Abbildung 10) untersucht werden. Daher wird im Weiteren auf die Anforderungen eingegangen, welche aus dem Schema erkennbar sind oder abgeleitet werden können. Aufgrund der Tunnellänge der Verknüpfungsstelle von ca. 2-3 km (ohne die benachbarten Tunnel) gelten hier Anforderungen für *lange Tunnel* (> 1.000 m).

5.3.2 Bauliche Trennung

Hiernach besteht die Anforderung aus der EBA-Tunnelrichtlinie, dass eine bauliche Trennung auf zweigleisigen Strecken bei *langen und sehr langen Tunneln* bei uneingeschränktem Mischbetrieb von Reise- und Güterzügen vorzusehen ist. In diesem Fall erfolgt die Flucht im Rahmen der Selbst- und Fremddrettung über Verbindungsstollen (sog. Querschläge) und die benachbarten Röhren. Durch die vier eingleisigen Röhren kann diese Anforderung (Begegnung von Reise- und Güterzügen) zunächst erfüllt werden, jedoch wird durch die Verbindungsstollen die vollständige bauliche Trennung aufgehoben. Das zugrundeliegende Schutzziel einer Brand- und Rauchausbreitung im Ereignisfall in die benachbarten Röhren und das Ermöglichen von sicheren Bereichen im Rettungskonzept wäre damit zunächst nicht mehr gewährleistet.

In der schematischen Darstellung (siehe Abbildung 10) wurden keine Verbindungsstollen eingezeichnet, da davon ausgegangen wird, dass durch die Verbindungsstollen (keine bauliche Trennung) ein Rauchübertritt nicht ausgeschlossen werden kann.

Hier müsste ein Nachweis gleicher Sicherheit erbracht werden, um die bauliche Trennung der eingleisigen Röhren herzustellen. Dazu ist jedoch zu beachten, dass Weichen zwar keine tunnelspezifischen Risiken darstellen, jedoch im Sinne der ersten Sicherheitsebene „Vorbeugung“ des Sicherheitskonzepts das Risiko gegenüber einer baulichen Trennung erhöhen. In der Risikobewertung und Nachweisführung müssten die Weichen ebenfalls mitberücksichtigt werden.

5.3.3 Befahrbarkeit von Tunneln für die Fremddrettung

Nach EBA-Tunnelrichtlinie ist folgende Anforderung zu beachten: „Die Fahrbahn in Tunneln muss für Straßenfahrzeuge befahrbar sein, wenn bei parallel verlaufenden Tunnelröhren eine Rettung über die jeweils benachbarte Tunnelröhre vorgesehen ist.“

Durch die Anforderung der Befahrbarkeit wird der Zusammenhang zur baulichen Trennung und der Abhängigkeit der Einsatzkonzepte der Rettungsdienste für die Fremddrettung aufgezeigt.

In der aktuellen Darstellung im Schema A (siehe Abbildung 10) wäre eine Befahrbarkeit einzelner Röhren möglich, aber im Falle einer Kollision mit Brandfolge im Verbindungsbauwerk könnten zwei betroffene Röhren sowie Rettungs- und Fluchtwege blockiert sein.

5.3.4 Evakuierungseinrichtungen „Sicherer Bereich“ im Tunnel

Die sicheren Bereiche sind für einen Eisenbahntunnel elementar und sind nach TSI SRT als „ein Ort innerhalb oder außerhalb von Tunneln, an dem die Reisenden und das Zugpersonal nach der Evakuierung aus dem Zug Schutz finden und temporär überleben können“ definiert.

Als sichere Bereiche nach EBA-Tunnelrichtlinie gelten:

- Tunnelportale,
- Rettungsstollen,
- Rettungsschächte,
- Schleusen oder Verbindungsbauwerke, die zu Rettungsschächten, zu Rettungsstollen, zu benachbarten Fahrtunneln oder zu Fahrtunneln führen, die in anderer Höhenlage verlaufen, wenn diese Bereiche den Anforderungen der TSI SRT entsprechen.

5.3.5 Zugang zum sicheren Bereich

In diesem Abschnitt werden die diesbezüglichen Anforderungen aus der TSI SRT aufgeführt, aus der im Folgenden zitiert wird. „Teilabschnitte von Anforderungen an die Zugänge zu den sicheren Bereichen entsprechend der TSI SRT werden im Folgenden dargestellt. Diese Anforderungen gelten nach TSI SRT für alle Tunnel mit einer Länge von über 1 km.

- Sichere Bereiche müssen für Personen zur Selbstrettung und für die Notfalldienste zugänglich sein.
- Um vom Zug in den sicheren Bereich zu gelangen, ist eine der folgenden Lösungen zu wählen:
 - (1) Horizontale und/oder vertikale Notausgänge ins Freie. Solche Notausgänge müssen mindestens alle 1.000 m vorhanden sein.
 - (2) Querschläge zwischen benachbarten separaten Tunnelröhren, die es ermöglichen, die angrenzende Tunnelröhre als sicheren Bereich zu verwenden. Querschläge müssen mindestens alle 500 m vorhanden sein.
 - (3) Alternative technische Lösungen für sichere Bereiche sind zulässig, sofern sie ein mindestens gleichwertiges Sicherheitsniveau gewährleisten. Das gleichwertige Sicherheitsniveau für die Reisenden und das Zugpersonal ist anhand der gemeinsamen Sicherheitsmethode für die Risikobewertung (CSM-RA) nachzuweisen.“

Des Weiteren fordert die TSI SRT folgendes:

„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.“

Anforderungen an die Zugänge zu den sicheren Bereichen entsprechend der EBA-Tunnelrichtlinie sind folgendermaßen charakterisiert:

„Das Zweiröhren-Konzept ist ein Rettungskonzept für zwei oder mehrere parallel verlaufende Tunnel, die über Verbindungsstollen (Querschläge) bzw. zu einem parallel verlaufenden Rettungsstollen verbunden sind. Die vom Ereignis nicht betroffene(n) Tunnelröhre(n) bzw. ein parallel verlaufender Rettungsstollen werden als sicherer Bereich angesehen. Sie sind gleichzeitig der Angriffsweg der Rettungsdienste. Der Zutritt zu den Tunneln erfolgt ausschließlich über ihre Portale oder über einzelne gelände-seitige Zugänge. Von jeder Stelle eines Fahrtunnels muss ein sicherer Bereich in höchstens 500 m Entfernung erreichbar sein. Das gilt nicht für Tunnel des Zweiröhren-Konzeptes. Hier gelten die Regelungen der TSI SRT.“

Hier gilt es, wie bereits zuvor erläutert, die höhere Anforderung der beiden Regelwerke an die sicheren Bereiche zu erfüllen. Falls demnach alle Röhren betrieblich miteinander verbunden werden sollen, so müssten relevante Anforderungen an die sicheren Bereiche und deren Zugänglichkeit berücksichtigt und ggf. durch eine Risikobetrachtung ergänzt werden.

5.3.6 Anforderungen an sehr lange Tunnel (>20 km)

Hierzu sind besondere und individuell für den Tunnel spezifische Maßnahmen zu treffen. Eine Abschätzung ist in dieser groben Darstellung nur schwer möglich und erfordert vertiefte Untersuchungen und ggf. Änderungen des vorgeschlagenen Schemas A (siehe Abbildung 10).

„Bei sehr langen Tunneln überschreitet die Fahrzeit eines Zuges die Dauer gesicherter Laufeigenschaften unter Vollbrandbedingungen (ca. 15 Minuten). Sehr lange Tunnel erfordern deshalb besondere Sicherheitsmaßnahmen, die im Einzelfall zu treffen sind.“ [24]

5.3.7 Evakuierungs- und Rettungspunkte Brenner-Nordzulauf

Für alle Tunnel ab 1 km Länge sind Evakuierungs- und Rettungspunkte vor jedem Tunnelportal erforderlich. Dies wäre der Fall bei der vorgeschlagenen unterirdischen Verknüpfungsstelle. Des Weiteren wird innerhalb eines Tunnels, je nach erlaubter Fahrzeugkategorie geregelt, wie die Rettungs- und Evakuierungspunkte gestaltet werden müssen. In Tabelle 3 werden Anforderungen der TSI SRT mit den geplanten bzw. vorgeschlagenen Tunneln dargestellt. Die Zeilen mit grauem Hintergrund sind zutreffend und es müssen die dort hinsichtlich der TSI SRT genannten Anforderungen erfüllt werden.

Die darin verwendeten Kategorien der Fahrzeuge sind folgendermaßen definiert.

Die Fahrzeugkategorie A beinhaltet Fahrzeuge des Personenverkehrs (einschließlich Lokomotiven für den Personenverkehr), die unter die TSI SRT fallenden Strecken, auf denen der Abstand zwischen den Brandbekämpfungsstellen oder die Länge der Tunnel höchstens 5 km beträgt, befahren dürfen. Kategorie B hingegen bezeichnet Fahrzeuge des Personenverkehrs (einschließlich Lokomotiven), die alle Tunnel der unter der TSI SRT fallenden Strecken unabhängig von der Länge der Tunnel befahren dürfen.

Tabelle 3: Anordnung von Evakuierungs- und Rettungspunkte innerhalb der geplanten und vorgeschlagenen Tunnel am Inntal

Tunnel-länge	Fahrzeugkategorie	Maximale Entfernung zwischen Tunnelportal und Evakuierungs- und Rettungspunkt sowie zwischen den Evakuierungs- und Rettungspunkten	Bezug zum Brenner-Nordzulauf	Länge
1 bis 5 km	Kategorie A oder B	Kein Evakuierungs- und Rettungspunkt erforderlich	nur unterirdische Verknüpfungsstelle	ca. 2-3 km
5 bis 20 km	Kategorie A	5 km		
5 bis 20 km	Kategorie B	Kein Evakuierungs- und Rettungspunkt erforderlich		
> 20 km	Kategorie A	5 km	Tunnel Steinkirchen (ca. 13 km) + Verknüpfungsstelle + Tunnel Laiming (ca. 13 km)	ca. 28 - 29 km
> 20 km	Kategorie B	20 km		

Nachstehend sind zwei Beispiele TSI-konformer Kombinationen von Evakuierungs- und Rettungspunkten für die unterirdische Verknüpfungsstelle (isolierte Betrachtung: *langer Tunnel*) in Kombination mit dem Tunnel Steinkirchen und Laiming (dann: *sehr langer Tunnel*) dargestellt. Hierbei wird die Kategorie A des Fahrzeugeinsatzes angenommen, da die geplante Strecke eine hohe Kapazität aufweisen und ein uneingeschränkter Mischverkehr stattfinden soll. Fahrzeuge der Kategorie A werden durch die Betriebsklasse 2 nach EN 45545 abgedeckt. Daraus ergibt sich nach kurzer Fahrzeit die Möglichkeit zur Erreichung der Rettungs- und Evakuierungspunkte auf unterirdischen Streckenabschnitten für die Fahrgäste. Diese Fahrzeuge müssen im Brandfall 4 Minuten bei einer Mindestdurchschnittsgeschwindigkeit von 80 km/h betrieben werden. Für die Fahrzeugkategorie A gilt, dass innerhalb des Tunnels aufgrund der Länge von 2-3 km keine Rettungs- und Evakuierungspunkte erforderlich sind. Für die Kombination einer Verbindung der Tunnel Steinkirchen und Laiming durch die Verknüpfungsstelle Niederaudorf ergeben sich zwei äußere und fünf innere Rettungs- und Evakuierungspunkte (siehe Tabelle 3), da bei einer Tunnellänge von über 20 km bei der Fahrzeugkategorie A, sowie bei einer maximalen Entfernung zwischen Tunnelportal und Evakuierungs- und Rettungspunkt sowie zwischen den Evakuierungs- und Rettungspunkten alle 5 km diese eingerichtet werden müssen. Für die Kategorie B gilt nach DIN EN 45545 die Betriebsklasse 3, bei der Fahrzeuge im Brandfall mindestens 15 Minuten, bei einer Mindestdurchschnittsgeschwindigkeit von 80 km/h betrieben werden können.

In Abbildung 11 sind Rettungs- und Evakuierungspunkte in der Variante einer isolierten Betrachtung (*langer Tunnel* mit 2 km bis 3 km) der vorgeschlagenen unterirdischen Verknüpfungsstelle und einer Verlängerung eines Tunnels von Laiming über Niederaudorf bis Steinkirchen (*sehr langer Tunnel*) illustriert.

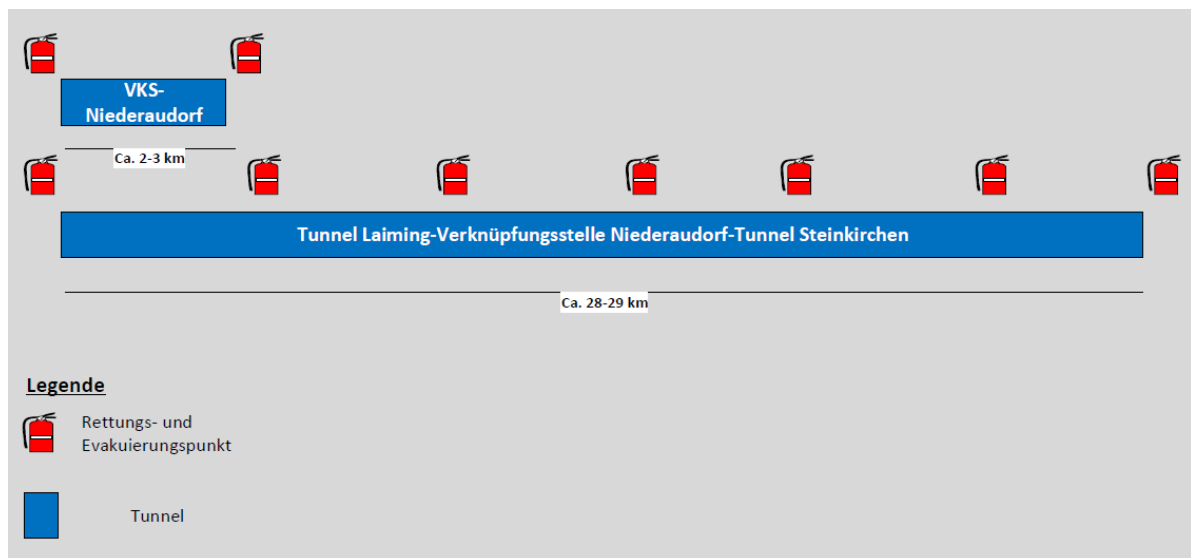


Abbildung 11: Rettungs- und Evakuierungspunkte Brenner-Nordzulauf/Verknüpfungsstelle Niederaudorf (eigene Darstellung)

Sofern die Verknüpfungsstelle mit dem Tunnel Laiming und Steinkirchen unterirdisch verbunden werden soll, wird dieser gesamte Tunnel als *sehr langer Tunnel* (Tunnelänge > 20 km) eingeordnet. Für diesen sehr langen Tunnel sind spezifische Maßnahmen zu treffen. Gemäß Eisenbahn-Sicherheitsrichtlinie ist zu beachten, dass wenn ein Mitgliedstaat ein höheres Sicherheitsniveau einführt, so sollte er sicherstellen, dass die erlassenen Vorschriften die Interoperabilität nicht beeinträchtigen oder zu Diskriminierungen führen. Höhere Anforderungen müssen auf einer Risikoanalyse beruhen und durch eine spezielle Risikosituation gerechtfertigt sein. Sie müssen das Ergebnis einer Abstimmung zwischen dem Infrastrukturbetreiber und den für die Notfalldienste zuständigen Behörden sein und auf einer Kosten-Nutzen-Bewertung basieren.

5.3.8 Betriebliche Anforderung zur Trennung der Betriebsarten

Die EBA-Tunnelrichtlinie schreibt vor, dass bei zweigleisigen Tunneln fahrplanmäßige Begegnungen zwischen Reise- und Güterzügen nicht vorgesehen werden dürfen. Nach TSI SRT gilt folgendes: „Die Sicherheit des Güter- und Personenverkehrs kann durch Betriebsvorschriften, etwa durch eine Trennung der beiden Verkehrsarten, gewährleistet werden.“ Deshalb schreibt das EBA in zweigleisigen Tunneln ein Tunnelbegegnungsverbot von Reise- und Güterzügen vor.

5.3.9 Zwischenfazit zu den Regelwerksanforderungen

Innerhalb der Verknüpfungsstelle wird keine vollständige bauliche Trennung aufgrund der Verknüpfungen einzelner Röhren möglich sein. Dies stellt eine Abweichung von der EBA-Tunnelrichtlinie dar. Daraus folgt, dass ein Nachweis gleicher Sicherheit gemäß § 2 Eisenbahnbau- und Betriebsordnung (EBO) [10] erbracht werden muss. In § 2 Abs.1 EBO besteht folgende Anforderung: „Bahnanlagen und Fahrzeuge müssen so beschaffen sein, dass sie den Anforderungen der Sicherheit und Ordnung genügen. Diese Anforderungen gelten als erfüllt, wenn die Bahnanlagen und Fahrzeuge den Vorschriften dieser Verordnung und, soweit diese keine ausdrücklichen Vorschriften enthält, anerkannten Regeln der Technik entsprechen.“

In § 2 Abs. 2 EBO gilt folgendes: „Von den anerkannten Regeln der Technik darf abgewichen werden, wenn mindestens die gleiche Sicherheit wie bei Beachtung dieser Regeln nachgewiesen ist.“

Das Sicherheitsniveau muss durch die Einführung eines Nachweises gleicher Sicherheit mindestens aufrechterhalten oder verbessert werden. Das bestehende Sicherheitsniveau darf in keinem Land herabgesetzt werden.

Einen deutschen Eisenbahntunnel mit anderen Eisenbahntunneln anderer Mitgliedsstaaten der EU zu vergleichen ist daher nur bedingt möglich, wie sich auch aus den am DZSF geführten Expertengesprächen ergab. Ferner ist das Risikomanagementverfahren nach EU VO 402/2013 anzuwenden und eine Risikobewertung durchzuführen.

Für einen entsprechenden Nachweis müssen u. a. nachfolgende Anforderungen erfüllt werden:

- Nachvollziehbare Dokumentation,
- Auflistung aller Schutzziele bzw. Sicherheitsfunktionen, die durch die vorhandenen Regeln vorgegeben sind,
- Auflistung neuer Gefährdungen und Beweisführung für die Wirksamkeit der kompensierenden Maßnahmen,
- Begründung, dass die neue Regel diese Schutzziele mindestens genauso erfüllt,
- Vieraugenprinzip der Aufstellung und Prüfung / Bewertung.

Hierbei ist es wichtig festzuhalten, dass ein solcher Nachweis gleicher Sicherheit von der Vorhabenträgerin (in diesem Fall der DB Netz AG) erbracht und im Rahmen des Risikomanagementverfahrens von einer unabhängigen Bewertungsstelle geprüft werden müsste.

6 Vergleich des alternativen Trassierungsvorschlags mit existierenden oder projektierten Tunnelbauwerken

6.1 Vorbemerkungen

Eine weitere Möglichkeit zur Bestimmung der Realisierbarkeit einer unterirdischen Verknüpfungsstelle ist der Vergleich mit bereits gebauten bzw. in Planung befindlichen Eisenbahntunneln, die (annähernd) die gleichen Eigenschaften aufweisen und somit als sogenannte Referenzsysteme herangezogen werden können. Im EU-Raum sowie der Schweiz gibt es eine Vielzahl an Eisenbahntunneln, die einen Vergleich nahelegen, jedoch müssen bestimmte technische, regulatorische und betriebliche Rahmenbedingungen erfüllt sein, um diese als ein geeignetes Referenzsystem anwenden zu können.

Zur Ermittlung eines möglichen Referenzsystems wurde eine umfangreiche Recherche zu relevanten Eisenbahntunneln durchgeführt. Entscheidend für die Auswahl war, dass die Tunnel in der EU oder der Schweiz liegen, gemäß dem geltenden europäischen Eisenbahn-Regelwerk zugelassen wurden und entweder in Betrieb, im Bau oder in einer fortgeschrittenen Planungsphase sind. Einschränkend wurde festgelegt, dass aufgrund der stetigen Fortschreibung der nationalen und europäischen Regelwerke nur Tunnel recherchiert wurden, deren Inbetriebnahme nicht länger als 30 Jahre zurückliegt. Zudem wurden nur *lange oder sehr lange Eisenbahntunnel* betrachtet (länger als 1 km). Bei Neubau- oder Hochgeschwindigkeitsstrecken, wie z. B. der Strecke Ebensfeld-Erfurt (VDE 8.1), ist es üblich, dass alle zugehörigen Tunnel in ihren Eigenschaften übereinstimmen. Aus Gründen der Übersichtlichkeit wurde daher nicht jeder einzelne Tunnel in die Liste aufgenommen, sondern nur repräsentativ ein relevanter Tunnel ausgewählt.

Insgesamt wurden 34 Tunnel entsprechend ihrer baulichen, technischen und betrieblichen Eigenschaften daraufhin untersucht, ob eine Anwendung als Referenzsystem in Frage kommt (siehe Tabelle A.1 im Anhang). Wesentliche Eigenschaften, die eine Einschätzung der Ähnlichkeit ermöglichen, sind die folgenden:

1. Tunneltyp

Je nach Lage und Anzahl der Gleise pro Tunnelröhre wird unterschieden in:

- Einspurtunnel: eingleisige Tunnelröhre,
- Doppelspurtunnel: zweigleisige Tunnelröhre.

Für die geplante unterirdische Verknüpfungsstelle sind sowohl Einspur- als auch Doppelspurtunnel relevant. Einspurtunnel sind vergleichbar mit den vier eingleisigen Tunnelröhren der geplanten unterirdischen Verknüpfungsstelle (siehe auch Abbildung 10). Durch die Verbindung der einzelnen Tunnelröhren im Bereich der Verknüpfungsstelle und der damit einhergehenden Auflösung der baulichen Trennung der Gleise, sind auch Doppelspurtunnel für die Prüfung als Referenzsystem relevant. Da bei Doppelspurtunneln in der Regel spezielle Sicherheitskonzepte oder -maßnahmen eingesetzt werden, die auch eine hohe Relevanz für die geplante Verknüpfungsstelle haben können, liegt auf diesen Tunneltypen ein besonderer Fokus.

2. Betriebsart

Unterschieden wird hierbei entweder der Betrieb nur mit Zügen des Personenverkehrs oder der Mischverkehr (gleichzeitiger Personen- und Güterverkehr). Da in der geplanten unterirdischen Verknüpfungsstelle Mischverkehr vorgesehen ist, sind Tunnel, die nur von Reisezügen befahren werden, nicht als Referenz geeignet. Bei Tunneln, die mit Mischverkehr betrieben werden, ist darauf zu achten, dass es diesbezüglich länderspezifische Regelungen gibt. So gibt es EU-weit nur in Deutschland ein Tunnelbegegnungsverbot (TBV) für Reise- und Güterzüge.

3. Ausfädelung innerhalb des Tunnels

Das Vorhandensein von Weichen in Tunneln stellt aus Sicht der Sicherheit ein besonderes Risiko dar, da dadurch die Möglichkeit einer Entgleisung oder eines Zusammenstoßes gegeben ist. Beim Vergleich mit anderen Tunneln ist darauf zu achten, in welcher Art und Weise Ausfädelungen verbaut sind. Zu unterscheiden sind:

- Abzweigstelle/Überholstelle:

In diesem Fall zweigt bei einem Einspurttunnel ein Gleis vom durchgehenden Tunnelgleis ab (vgl. Abbildung 12). Dadurch sind zwar zwei Röhren mit einer Weiche miteinander verbunden, sodass die Gefahr einer Entgleisung theoretisch erhöht ist, aber aus betrieblicher Sicht ist ein gleichzeitiges Befahren des Tunnelabschnitts und somit ein Kollisionsszenario nicht möglich. Für den Brandfall sind geeignete Sicherheitsmaßnahmen (z. B. Querschläge, Notlüftungseinrichtungen) vorzusehen, um einen sicheren Bereich zu schaffen. Diese Art der Verknüpfung kommt häufig bei unterirdischen Verzweigungsbauwerken zum Einsatz.



Abbildung 12: Schematische Darstellung einer Abzweigstelle

- Überleitstelle:

Diese Art der Gleisverbindung ermöglicht den Übergang zwischen zwei Tunnelröhren innerhalb eines Tunnelsystems (siehe Abbildung 13). In beiden Tunnelröhren kann gleichzeitig Betrieb verkehren, sodass durch die Verbindung Kollisionsszenarien nicht vollständig ausgeschlossen werden können. Im Falle eines Brandes und Rauchentwicklung kann nicht in die andere Tunnelröhre evakuiert werden, sodass ggf. ein unabhängiger sicherer Bereich geschaffen werden muss (z. B. eine zusätzliche Rettungsröhre). Überleitstellen werden häufig in sehr langen Tunnel eingebaut, um beispielsweise im Rahmen von Instandhaltungsarbeiten eine gewisse betriebliche Flexibilität zu ermöglichen.



Abbildung 13: Schematische Darstellung einer Überleitstelle

Die geplante unterirdische Verknüpfungsstelle im Inntal ist eine Kombination aus Abzweig- und Überleitstellen, die zwei bzw. mehrere Tunnelröhren baulich miteinander verbinden würden, in denen gleichzeitig Züge verkehren können.

4. Weitere Sicherheitsmaßnahmen

Hierunter fallen weitergehende betriebliche oder bauliche Maßnahmen, die die Sicherheit in den Tunneln gewährleisten sollen. Dazu zählen u. a. das in Deutschland umgesetzte TBV, verschließbare Tore im Bereich von Gleisverbindungen oder der Einsatz von *Lüftungsanlagen*.

6.2 Relevante Eisenbahntunnel in der Europäischen Union sowie der Schweiz

6.2.1 Anmerkungen zur Auswahl

Die im Anhang in Tabelle A.1 aufgelisteten Tunnel wurden auf die beschriebenen Eigenschaften überprüft. Tunnel, die in einer oder mehreren Eigenschaften mit der geplanten Verknüpfungsstelle übereinstimmen, sind grau hinterlegt und werden im Folgenden näher betrachtet, um eine qualifizierte Aussage zur Ähnlichkeit und Anwendung als Referenzsystem treffen zu können. Eigenschaften von Tunneln, die sich eindeutig von der geplanten Verknüpfungsstelle unterscheiden, werden als Ausschlusskriterien für die Relevanz angesehen und rot markiert. Für diese Tunnel werden zusätzliche Tunnelcharakteristika nicht weiter betrachtet (in Tabelle A.1 diagonal durchgestrichen).

Im Folgenden werden nun zehn Tunnelsysteme tiefergehend untersucht und die Gründe für die Relevanz sowie die eingeschränkte oder nicht vorhandene Übertragbarkeit auf die Verknüpfungsstelle im Inntal erörtert.

6.2.2 Inntaltunnel (Südumfahrung Innsbruck)

Der Inntaltunnel (ITT) ist ein rund 12,7 km langer Tunnel, durch den sich die Stadt Innsbruck südlich umfahren lässt und der seit 1994 in Betrieb ist. Der Tunnel ist als Doppelspurtunnel ausgeführt und weist etwa in Tunnelmitte die Überleitstelle Fritzens-Wattens auf (siehe Abbildung 14).

Als mögliches Vergleichsobjekt relevant ist der Inntaltunnel aufgrund seiner Ausführung als Doppelspurtunnel und dem damit einhergehenden Mischverkehr auf zwei Gleisen innerhalb einer Tunnelröhre sowie dem Vorhandensein von Überleitstellen. Hier ist jedoch darauf zu verweisen, dass aufgrund der frühen Inbetriebnahme 1994 nicht der aktuelle Stand der Vorschriften und Normen berücksichtigt wurde und das in Deutschland definierte Tunnelbegegnungsverbot in Österreich keine Anwendung findet.

Im Zusammenhang mit dem Bau des Brenner Basistunnels (BBT) gibt es nun bauliche Veränderungen am Inntaltunnel. Er wird mit einer direkten Anknüpfung an den BBT ausgestattet und es wird dafür eine Abzweigstelle errichtet. Zudem wird der Inntaltunnel in einer Länge von 9,7 Kilometern durch den neuen parallel verlaufenden Rettungstollen Tulfes ergänzt, der im Sommer 2017 fertiggestellt wurde und die Selbst- und Fremdrettung erleichtern soll (siehe Abbildung 14). [27]

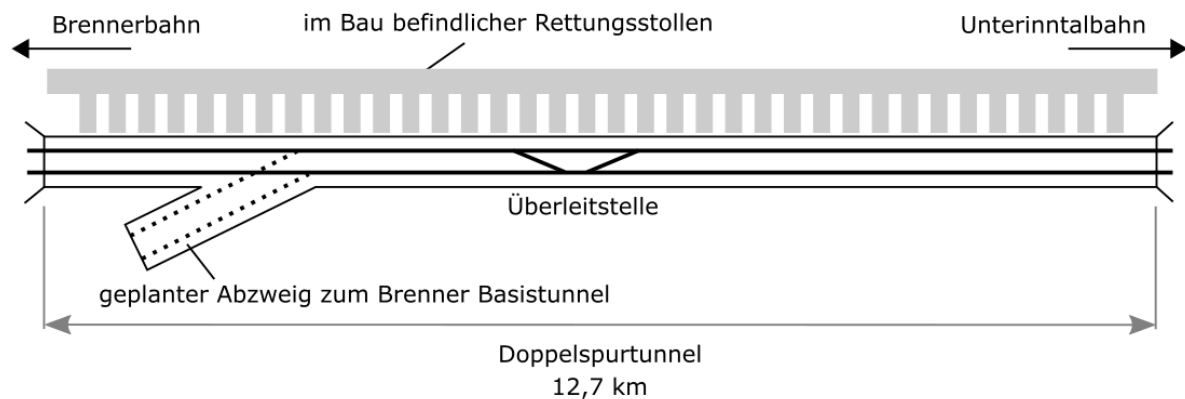


Abbildung 14: Tunnelsystem Inntaltunnel (in Anlehnung an [28])

Eine direkte Übertragbarkeit dieser Lösung auf die Verknüpfungsstelle im Inntal ist jedoch nicht vollständig gegeben. Es handelt sich hierbei nicht um den Neubau eines Tunnels, sondern um den Ausbau eines bestehenden Tunnels, mit dem Ziel der Sicherstellung der aktuell geforderten Sicherheitsvorgaben. Der zusätzliche Rettungstollen ist eine Sonderlösung, die in diesem Fall in Verbindung mit den anderen geplanten und umgesetzten Sicherheitsmaßnahmen als die geeignetste Möglichkeit angesehen und umgesetzt wurde, um parallel zur bestehenden Tunnelröhre einen sicheren Bereich herzustellen. Bei der geplanten Verknüpfungsstelle im Inntal wäre nach aktuellem Regelwerk eine Ausführung mit getrennten Tunnelröhren gefordert. Anstelle eines Rettungstunnels würde die parallele Tunnelröhre als sicherer Bereiche dienen.

Steckbrief Inntaltunnel (Südumfahrung Innsbruck)

Planung und Bau: 1989-1994

Inbetriebnahme: 1994

Tunnelkategorie: langer Tunnel (ca. 12,7 km)

Ausführung: Doppelspurtunnel mit Abzweig- und Überleitstelle, zusätzlicher Rettungstollen im Bau

Relevanz für die Verknüpfungsstelle im Inntal:

- Personen- und Güterverkehr in einer Tunnelröhre
- Vorhandensein einer Abzweig- und Überleitstelle im Bereich der Anbindung an den Brenner Basistunnel
- Zusätzlicher parallel verlaufender Rettungstollen zur Verbesserung der Selbst- und Fremdreueungsmöglichkeiten

Gründe für die eingeschränkte oder nicht vorhandene Übertragbarkeit auf die Verknüpfungsstelle im Inntal:

- Tunnel wurde nach älterem Regelwerk konzipiert (siehe Abbildung 28)
- Bau des neuen parallel verlaufenden Rettungstollens im Rahmen des Ausbaus eines bestehenden Tunnels und nicht als Neubau eines Tunnelsystems
- Der zusätzliche Rettungstollen ist eine Sonderlösung, die in Abstimmung mit den geplanten und umgesetzten Sicherheitsmaßnahmen der angrenzenden Tunnelabschnitte als geeignet angesehen wurde.

6.2.3 Löttschberg-Basistunnel (LBT)

Der 34,6 km lange Löttschberg-Basistunnel ist der erste Basistunnel der neuesten Tunnelgeneration durch die Alpen. Baubeginn war 1999, die Inbetriebnahme fand im Dezember 2007 statt. Das Tunnel-system besteht aus zwei eingleisigen Tunnelröhren mit einem gegenseitigen Abstand von 40 m. Die Röhren sind alle 333 m durch einen Querschlag miteinander verbunden. Die Querschläge dienen vor allem der Sicherheit der Tunnelbenutzer und stellen im Ereignisfall den Rettungsweg in die nicht betroffene Röhre dar [29].

Um Kosten und Bauzeit zu reduzieren, ist im nördlichen Abschnitt nur die östliche Tunnelröhre eisenbahntechnisch ausgerüstet und befahrbar. Ab der Verzweigung Ferden Nord ist auch die westliche Tunnelröhre bahntechnisch ausgebaut und die beiden Tunnelröhren über eine Schnellfahrweiche miteinander verbunden (siehe Abbildung 15). Dies stellt spezielle Herausforderungen an den Betrieb. Um die Streckenkapazität zu maximieren, werden nach Möglichkeit mehrere Züge nacheinander in derselben Richtung durch den Einspurabschnitt gelenkt [30]. Dadurch ergibt sich, dass immer nur eine Tunnelröhre durch Züge besetzt ist.

In Mitholz und Ferden befinden sich Not- bzw. Diensthaltstellen, die im Ereignisfall eine Flucht- und Evakuierungsmöglichkeit darstellen. Beide sind mit Lüftungssystemen ausgestattet, die insbesondere bei Instandhaltungsarbeiten oder in einem Ereignisfall die Frischluftzufuhr regulieren. Im Normalbetrieb ist die Durchlüftung der Bahntunnelröhren durch die durchfahrenden Züge bereits ausreichend gewährleistet. Im Bereich der Nothaltstelle Ferden gibt es ein zusätzliches Abluftsystem, das im Ereignisfall verschmutzte (z. B. mit Rauchgasen belastete) Luft ins Freie führt [30].

Im Ereignisfall wird ein sicherer Bereich mithilfe der parallelen Tunnelröhren gewährleistet. Neben der eisenbahntechnisch ausgebauten westlichen Tunnelröhre zwischen Ferden und Raron, ist auch der westliche Rohbautunnel zwischen Ferden und Mitholz als Rettungsröhre geeignet. Im Abschnitt zwischen Mitholz und Frutigen, in dem noch keine parallele Tunnelröhre errichtet wurde, wird der Dienststollen als sicherer Bereich genutzt.

Die beschriebenen Sicherheitsmaßnahmen können aufgrund der betrieblichen und technischen Besonderheit des Löttschbergbasistunnels nur eingeschränkt auf die Verknüpfungsstelle im Inntal angewendet werden. Durch das Betriebsmodell des LBT, in dem mehrere Züge nacheinander in derselben Richtung durch den Tunnel geführt werden, wird immer nur eine Tunnelröhre durch Züge belegt. Die parallele Tunnelröhre (sowohl der eisenbahntechnisch ausgebauten, als auch die Rohbau- und Diensttunnel) dient somit jederzeit als sicherer Bereich. Dadurch ist die Komplexität dieser Verzweigungen sehr viel geringer als die der geplanten unterirdischen Verknüpfungsstelle im Inntal. Darüber hinaus ist zu beachten, dass Planung und Bau noch vor der ersten TSI SRT abgeschlossen waren, womit das Bauwerk nicht dem aktuellen Stand der Vorschriften und Normen entspricht.

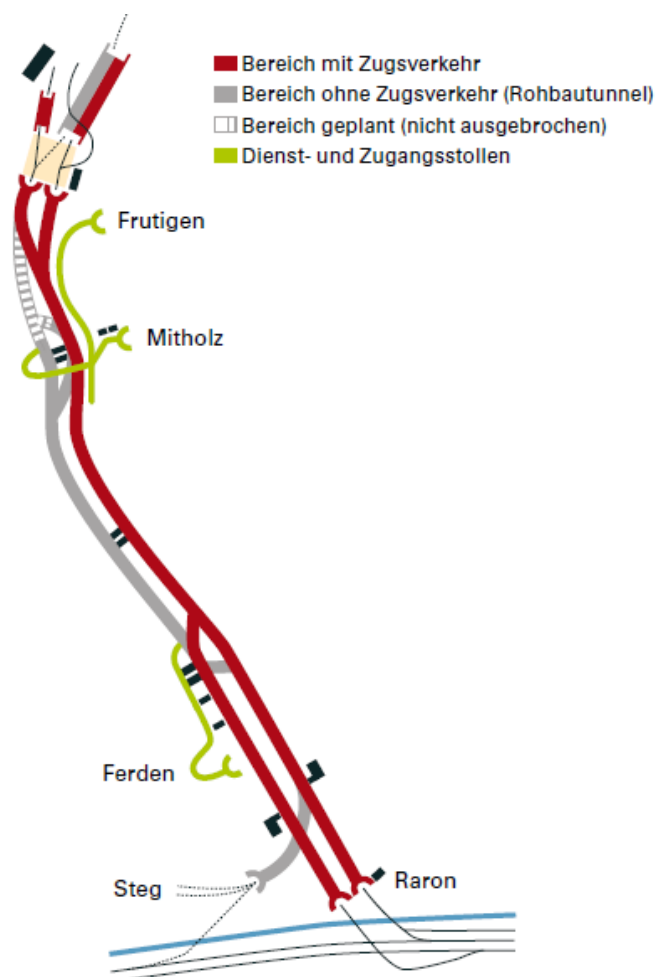


Abbildung 15: Tunnelplan Lötschberg-Basistunnel [30]

Steckbrief Lötschberg-Basistunnel (LBT)

Planung und Bau: 1994 – 2007

Inbetriebnahme: 2007

Tunnelkategorie: sehr langer Tunnel (ca. 34 km)

Ausführung: zwei Einspurttunnel mit Querschlägen (Abstand ca. 333 m), zwei Nothaltestellen und zwei Verzweigungen

Relevanz für die Verknüpfungsstelle im Inntal:

- Vorhandensein von unterirdischen Verzweigungen

Gründe für die eingeschränkte oder nicht vorhandene Übertragbarkeit auf die Verknüpfungsstelle im Inntal:

- Tunnel wurde nach älterem Regelwerk konzipiert (siehe Abbildung 28)
- Betriebliche Besonderheit: Züge werden nacheinander in derselben Richtung durch den Einspurabschnitt gelenkt, somit ist eine Tunnelbegegnung nicht möglich

6.2.4 Zimmerberg-Basistunnel (ZBT)

Der Zimmerberg Basistunnel (ZBT) ist ein Kernstück des „Bahn 2000“ genannten Großprojektes der Schweizerischen Bundesbahnen (SBB) zur Steigerung der Qualität des Schienenverkehrs durch den Ausbau des Schienennetzes und die Beschaffung neuen Rollmaterials. Er umfasste ursprünglich zwei Bauabschnitte (ZBT I und ZBT II), von denen jedoch nur der erste realisiert wurde. Die Fortsetzung des ZBT II wurde wegen zu hoher Baukosten zunächst verworfen. Allerdings startete die Projektierung mit einer anvisierten Fertigstellung 2035 im Jahre 2018 erneut [31].

Der bereits realisierte Zimmerberg Basistunnel I verläuft im Zürcher Stadtgebiet von der Wohnsiedlung Lochergut bis nach Thalwil und trägt zur Entlastung der stark befahrenen Strecke Zürich–Chur bei, die parallel auch oberirdisch verläuft und seither hauptsächlich von S-Bahn-Zügen genutzt wird. Der Tunnel weist eine Länge von 9,4 km auf und ist als Doppelspurtunnel ausgeführt. Die Auslegungsgeschwindigkeit des Tunnels beträgt 200 km/h, wobei im Bereich der Portale eine Beschränkung auf 125 km/h erfolgt. Beim Bau des ZBT I wurde die Fortsetzung des Tunnels als ZBT II bereits vorgesehen, sodass unterhalb der Gemeinde Nidelbad eine unterirdische Abzweigung inklusive eines Überwerfungsbauwerks (Einspurtunnel) entstanden ist, die einen kreuzungsfreien Anschluss an die Bestandsstrecke in Thalwil ermöglicht. [32]

Da der ZBT I als Doppelspurtunnel ausgeführt ist, wurden verschiedene Vorkehrungen getroffen, um das Risiko von Unfällen im Tunnel zu verringern. Dazu zählen Heißläuferortungsanlagen und die betriebliche Vermeidung der Begegnung von Gefahrgutgüterzügen und Reisezügen. [33]

Generell ist festzuhalten, dass der Tunnel, dessen Projektierung und Bau mehr als 20 Jahre zurückliegen, den heutigen Sicherheitsanforderungen nicht mehr entspricht. So verfügt er zwar über drei Rettungsschächte, die mit Hilfe einer leistungsstarken Belüftungsanlage durch Überdruck vor Verrauchung bewahrt werden können. Allerdings sind die drei Rettungsschächte über nach heutigen Maßstäben unzulässig lange Rettungswege (zwischen 980 m und 1490 m) erreichbar. [34]

Bezüglich des geplanten ZBT II, der in erster Linie für den Ausbau der Relation Zürich–Luzern relevant ist, sind kaum aussagekräftige Referenzen vorhanden. Es zeichnet sich allerdings ab, dass es auch in diesem Tunnel eine unterirdische Verzweigung der Strecke unterhalb der Ortschaft Murimooos geben wird, an die sich ein weiterer Tunnel (Meilibachtunnel) anschließen soll. [31]

Steckbrief Zimmerberg-Basistunnel

Planung und Bau: 1990 – 2003 (ZBT I) / 2018 – 2035 (ZBT II)

Inbetriebnahme: 2003 (ZBT I)

Tunnelkategorie: langer Tunnel (ca. 9,4 km)

Ausführung: Doppelspurtunnel mit unterirdischer Ausfädelung eines Streckenastes (Überwerfungsbauwerke in Einröhren-Ausführung)

Relevanz für die Verknüpfungsstelle im Inntal:

- Abzweigung (Ausfädelung) im Südteil des Tunnels

Gründe für die eingeschränkte oder nicht vorhandene Übertragbarkeit auf die Verknüpfungsstelle im Inntal:

- Tunnel wurde nach älterem Regelwerk konzipiert (siehe Abbildung 28)
- wesentlich geringere Komplexität der Verknüpfung

6.2.5 Wienerwaldtunnel (WWT)

Der Wienerwaldtunnel wurde in den Jahren 2004 bis 2012 gebaut und ist Teil eines Tunnelsystems (siehe Abbildung 16), das zur sogenannten Neuen Westbahn in Österreich gehört. Der Tunnel ist auf einer Länge von 11,5 km als Einspurttunnel mit zwei Röhren ausgeführt. Während die Westportale des Wienerwaldtunnels den Übergang auf die freie Strecke in Richtung St. Pölten markieren, münden die Gleise in östlicher Richtung in einen konventionellen zweispurigen Tunnel, an den sich eine „Weichenhalle“ anschließt. In dieser befindet sich die Verknüpfungsstelle Hadersdorf – Weidlingau, die den Wienerwaldtunnel mit dem Lainzer Tunnel und der alten Westbahn verknüpft [35]. Die Weichenhalle befindet sich unterhalb des Wiener Stadtgebietes und weist (in Abbildung 16 nicht dargestellte) Notausstiege auf. Durch die Nutzung von Weichen mit beweglichen Herzstücken können Reisezüge in der Weichenstraße Geschwindigkeiten bis zu 150 km/h erreichen [35]. Das Tunnelsystem ist für einen Betrieb im Mischverkehr vorgesehen, wird also sowohl von Reise- als auch von Güterzügen befahren.

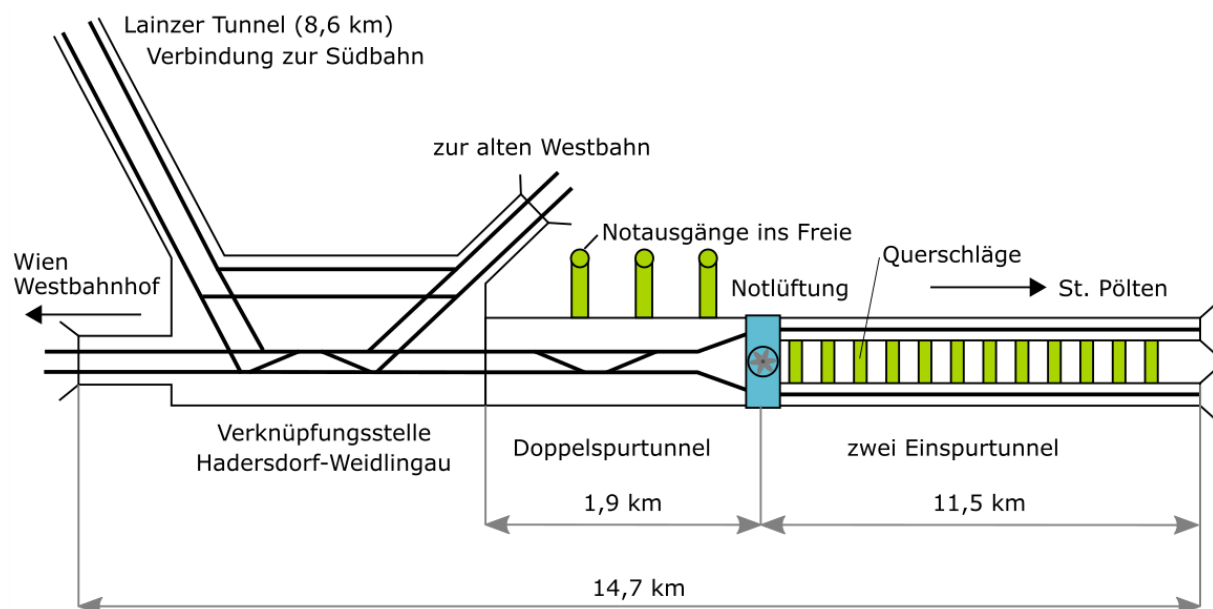


Abbildung 16: Schema Wienerwaldtunnel (zitiert nach: [36])

Der Wienerwaldtunnel ist der erste Eisenbahntunnel in Österreich, der als Komplex aus einspurigen Tunnelröhren errichtet wurde [36]. Die beiden Röhren sind durch Querschläge miteinander verbunden, die im Mittel einen Abstand von 500 Metern haben. Im Falle eines Brandes ist die Nutzung der nicht betroffenen Tunnelröhre als sicherer Bereich vorgesehen, der über die Querschläge erreicht werden kann. Tritt das Szenario eines Brandes im Bereich des Überganges der zwei Einspurttunnel in den anschließenden Doppelspurttunnel auf, könnte es ohne weitere technische Maßnahmen jedoch passieren, dass Rauch von der betroffenen Tunnelröhre über den Doppelspurttunnel und das Portal in die sichere Röhre eindringt. Um dies zu verhindern, wurde ein Notfall-Entlüftungssystem installiert (blaues Element in Abbildung 16), das die Rauchgase aus dem kritischen Bereich absaugen soll [36]. Das System besteht aus einem zentralen Belüftungsschacht, der zwischen den beiden Einspurttunnelröhren in der Nähe des Übergangsbereiches zum Doppelspurttunnel angeordnet ist. In diesem befindet sich ein Abluftventilator (Nennleistung: 900 kW), der in Kombination mit steuerbaren Klappen eine gezielte Entrauchung der einen oder der anderen Tunnelröhre bewirken kann. Im Bereich des Doppelspurttunnels sind überdies Strahlventilatoren installiert, die bei Ausfall des zentralen Abluftventilators eine Rückfallebene bilden, diesen aber auch bei Bedarf unterstützen können, falls sich sehr ungünstige Strömungsverhältnisse einstellen. [37]

Auch alle Querschläge zwischen den Einspurtunneln sind mit Strahlventilatoren ausgestattet, die eine Luftströmung von mindestens 2 m/s von der „gesunden“ zur betroffenen Röhre erzeugen können. Damit wird ein Überdruck erzeugt, der eine Verrauchung der Querschläge sowie der „gesunden“ Röhre verhindert. [36] [37]

Die Aktivierung der Notfallentlüftung erfolgt automatisiert unter Zuhilfenahme von Rauchmeldern, die in der Nähe des Übergangsbereiches zum Doppelspurtunnel installiert sind und ein drohendes Eindringen von Rauch und Brandgasen in die „gesunde“ Röhre detektieren. Sollte eine Unterstützung der Rettungskräfte durch die gezielte Erzeugung von Luftströmungen sinnvoll sein, kann die Notfallentlüftung auch über die Betriebszentrale des Tunnels gesteuert werden. [36]

Die Betrachtung des Wienerwaldtunnels ist für die vorliegende Untersuchung insofern relevant, als dass hier die Problematik der brandschutztechnischen Trennung zweier Tunnelröhren, die baulich nicht vollständig getrennt sind, auftritt und außerdem eine unterirdische Verknüpfungsstelle im Anschluss an den Tunnel existiert. Es ist hier gelungen, eine Lösung zu finden und zuzulassen, die auf der gezielten Beeinflussung der Luftströmungen mit Hilfe von Ventilatoren beruht.

Einschränkend bleibt jedoch festzuhalten, dass der Wienerwaldtunnel und die mit ihm verbundenen unterirdischen Bauten (Doppelspurtunnel, Weichenhalle, Lainzer Tunnel) einen heute veralteten Normenstand widerspiegelt (Planung: 1990-1999, Bau: 1999-2012) und aufgrund seiner geographischen Lage (Österreich) bestimmte in Deutschland geltende Regelungen, wie zum Beispiel das Tunnelbegegnungsverbot, unberücksichtigt bleiben.

Steckbrief Wienerwaldtunnel (WWT)

Planung und Bau: 1990 - 2012

Inbetriebnahme: 2012

Tunnelkategorie: langer Tunnel (ca. 15 km)

Ausführung: Zwei Einspurtunnel mit Querschlägen (Abstand ca. 500 m) und anschließendem Doppelspurtunnel sowie unterirdischer Verknüpfung in einer „Weichenhalle“

Relevanz für die Verknüpfungsstelle im Inntal:

- brandschutztechnische Trennung zweier baulich ungenügend getrennter Tunnelröhren mittels gezielter Notfallentlüftung
- Vorhandensein einer unterirdischen Verknüpfungsstelle

Gründe für die eingeschränkte oder nicht vorhandene Übertragbarkeit auf die Verknüpfungsstelle im Inntal:

- Tunnel wurde nach älterem Regelwerk konzipiert (siehe Abbildung 28)
- deutsches Regelwerk (z. B. EBA-Tunnelrichtlinie) kam nicht zur Anwendung
- kein Tunnelbegegnungsverbot von Reise- und Güterzügen in Österreich
- Verknüpfungsstelle nicht in den Tunnelröhren selbst, sondern in „Weichenhalle“, die oberflächennah in Deckelbauweise errichtet wurde
- Lage der Verknüpfungsstelle im Stadtgebiet von Wien mit entsprechender Infrastruktur und günstigen Randbedingungen für die Fremdrettung

6.2.6 Gotthard-Basistunnel (GBT)

Der Gotthard-Basistunnel ist derzeit der längste Eisenbahntunnel der Welt und besteht aus zwei Einspurtunneln mit Mischverkehr. Aufgrund seiner Länge von über 57 km ist entsprechend der TSI SRT (siehe Kapitel 5) die Einrichtung von unterirdischen Nothaltestellen vorgeschrieben. Im Gotthardbasistunnel wurden daher in Sedrun und in Faido zwei sogenannte Multifunktionsstellen (MFS) errichtet, die eine schnelle und geregelte Evakuierung der Zugreisenden ermöglichen sollen (siehe Abbildung 17) [38].

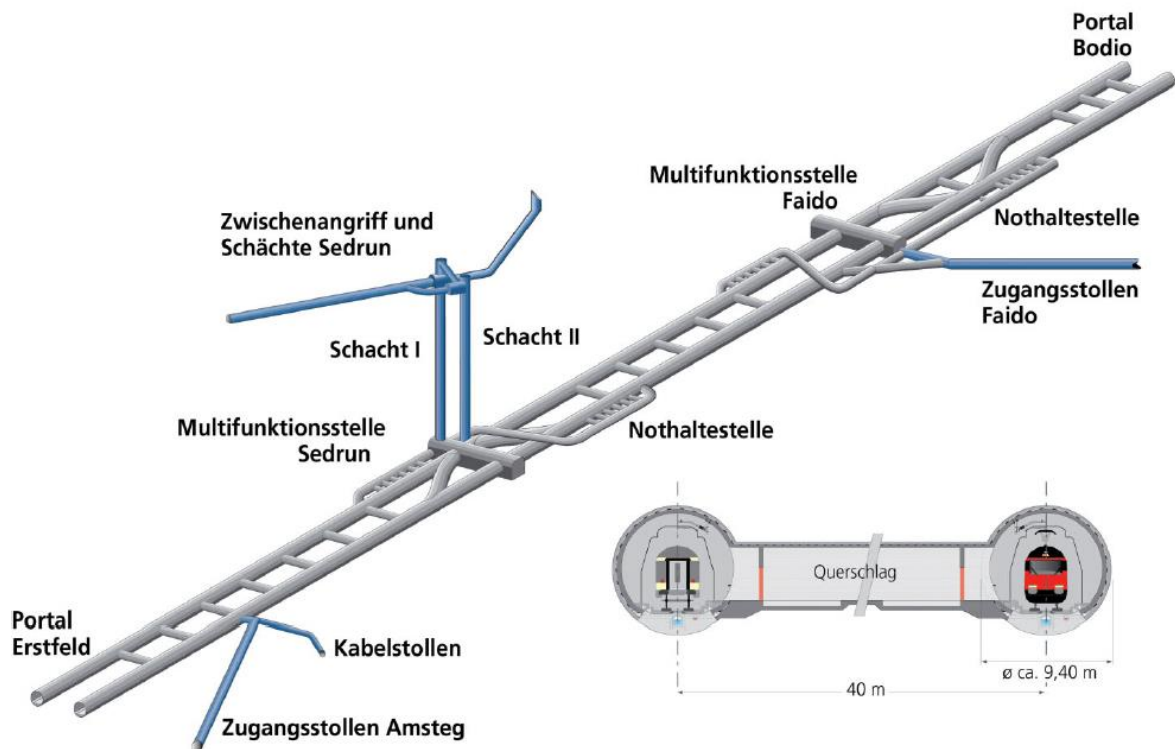


Abbildung 17: Das Tunnelsystem des Gotthard-Basistunnels [39]

In diesen beiden Bereichen sind die beiden Tunnelröhren zusätzlich über je zwei Überleitstellen miteinander verbunden. Um eine bauliche Trennung der beiden Tunnelröhren weiterhin zu gewährleisten, wurden verschließbare Spurwechseltore eingebaut (siehe Abbildung 18). Die Tore sind im Regelbetrieb immer verschlossen und werden nur in besonderen Fällen geöffnet, z. B. im Falle einer Störung zur sicheren Evakuierung oder Vorbeifahrt aller noch im Tunnel befindlicher Züge oder bei Instandhaltungsarbeiten zur Gewährleistung einer möglichst hohen Streckenverfügbarkeit. Die Tore können im Brandfall von der Leitstelle ferngesteuert geöffnet werden, um Frischluft aus den Seitenstollen in die Nothaltestelle zu blasen [39].

Die nähere Betrachtung des Gotthardbasistunnels ist für diese Untersuchung insofern relevant, als dass hier die bauliche Trennung zweier durch die Überleitstellen verbundenen Einspurtunnelröhren durch den Einsatz von Spurwechseltoren sichergestellt wird.

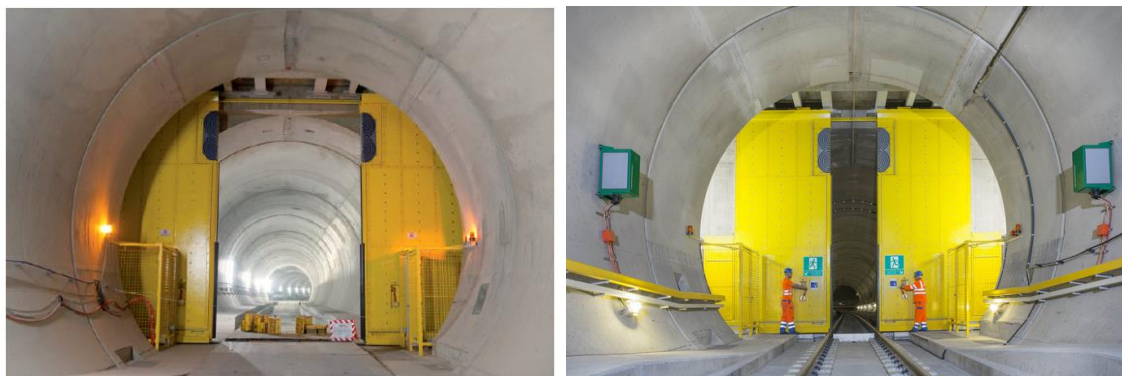


Abbildung 18: Spurwechsellor in der MFS Sedrun (Quellen: links [39], rechts [40])

Einschränkend ist jedoch anzumerken, dass ein Einsatz solcher Tore zur Abtrennung der Tunnelröhren bei der geplanten unterirdischen Verknüpfungsstelle nicht bzw. nur mit sehr hohen betrieblichen Einschränkungen möglich ist. Bei der Durchführung des geplanten Betriebsprogramms der DB mit mehreren regulären Überfahrten pro Stunde ist der Zeitbedarf des Öffnungs- und Schließprozesses der Tore zu beachten. Die Öffnungs- und Schließzeiten der Tore betragen jeweils rund 2 Minuten [40] und in Verbindung mit der zusätzlich erforderlichen Zeit für die Sicherstellung, dass das Gleis freigegeben und befahrbar ist, können Einschränkungen im Betriebsablauf eintreten. Auch im Gotthardbasistunnel ist ein regelmäßiges Öffnen und Schließen der Tore im Rahmen eines Regelbetriebs nicht vorgesehen, sondern nur im Falle einer Störung, bei der die Tore über einen längeren Zeitraum in einem Zustand verriegelt bleiben (entweder offen oder geschlossen). Weitere Argumente gegen den Einsatz solcher Tore im Regelbetrieb, wie z. B. die erforderliche Einbindung in die Leit- und Sicherungstechnik zur Gleisfreimeldung oder die Gefahr technischer Defekte der Tore, hat auch die DB Netz AG in ihrer Stellungnahme beschrieben (siehe auch [12]).

Steckbrief Gotthard-Basistunnel (GBT)

Planung und Bau: 1992 - 2016

Inbetriebnahme: 2016

Tunnelkategorie: sehr langer Tunnel (ca. 57 km)

Ausführung: Einspurtunnel mit Querschlägen (Abstand ca. 325 m), zwei Nothaltestellen und Überleitstellen

Relevanz für die Verknüpfungsstelle im Inntal:

- Vorhandensein von unterirdischen Überleitstellen
- Brandschutztechnische Trennung zweier baulich ungenügend getrennter Tunnelröhren mittels Spurwechselloren

Gründe für die eingeschränkte oder nicht vorhandene Übertragbarkeit auf die Verknüpfungsstelle im Inntal:

- Tunnel wurde nach älterem Regelwerk konzipiert (siehe Abbildung 28)
- Spurwechsellore im Bereich der Multifunktionsstelle werden nur im Störfall geöffnet, die Schließ- und Öffnungszeiten sind mit je rund zwei Minuten zu lang für einen Einsatz im Regelbetrieb

6.2.7 Neue Unterinntalbahnh (Terfnertunnel, Münsterertunnel und Angerbergtunnel)

Die österreichische Zulaufstrecke zum Brenner Basistunnel wird seit 1992 ausgebaut und ist in Teilen seit 2012 in Betrieb. Die „Neue Unterinntalbahnh“ (NUIB) ergänzt die bestehende Strecke um zwei weitere Gleise und verläuft größtenteils im Tunnel (siehe Abbildung 19). Die drei Tunnel Terfnertunnel (ca. 15 km), Münsterertunnel (ca. 15 km) und Angerbergtunnel (ca. 11 km) stellen den größten Anteil der Tunnelabschnitte dar und sind in Ihrer Charakteristik sehr ähnlich. Terfnertunnel und Münsterertunnel sind bereits 2012 in Betrieb genommen worden, der Angerbergtunnel befindet sich derzeit noch in Planung.

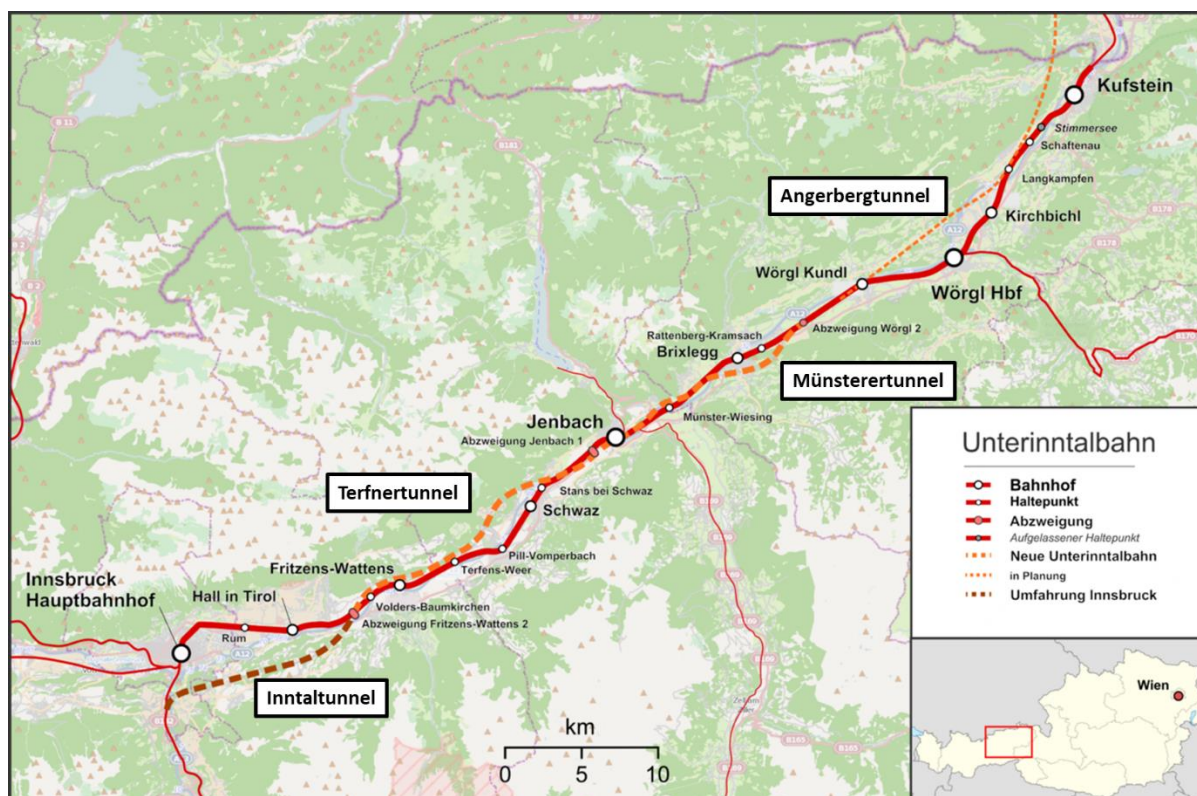


Abbildung 19: Verlauf der „Neuen Unterinntalbahnh“ (überarbeitete Darstellung nach [41])

Alle Tunnel sind als Doppelspurtunnel ausgeführt (siehe Abbildung 20). Als Sicherheitsmaßnahme gibt es alle 500 m Rettungsausgänge und Ausstiege ins Freie, inkl. Vorplatz (500 m²) für Rettungsfahrzeuge [42]. Entsprechend der jeweiligen Umgebungsbedingungen können Reisende und Bahnbedienstete die Tunnel entweder durch Seitenstollen, Schächte oder begleitende Rettungstunnel verlassen [43]. Insgesamt sind 35 Rettungsschächte, sechs Zugangsstollen und vier befahrbare Rampen verbaut [44].

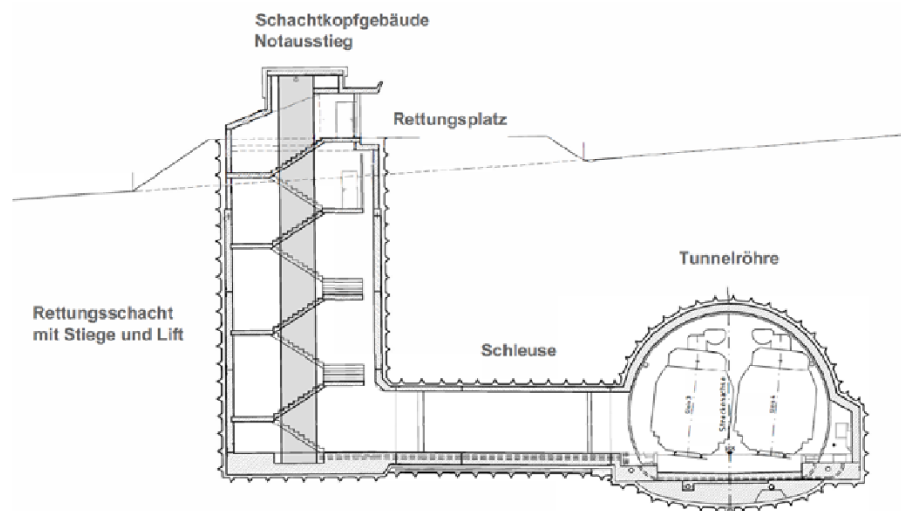


Abbildung 20: Tunnelquerschnitt der „Neuen Unterinntalbahn“ [42]

Der seit 2012 in Betrieb befindliche Terfnerntunnel weist eine Besonderheit auf. Er setzt sich zusammen aus dem 10.570 m langen Tunnel Stans–Terfens, der 1.330 m langen Galerie Terfens sowie der 3.940 m langen Unterflurstrecke Fritzens–Baumkirchen [45]. Im Tunnelabschnitt Stans–Terfens ist der Einbau von Weichen vorgesehen. Bis Ende 2024 läuft hierzu ein Auftragsverfahren zur Planung einer Tunnelaufweitung, dem sogenannten Überholbahnhof Vomp, der als Überholmöglichkeit für die Inbetriebnahme des Brenner Basistunnels als betrieblich notwendig angesehen wird und zwei weitere Gleise vorsieht [46]. Welche zusätzlichen Sicherheitsanforderungen daraus resultieren oder ob das bestehende Sicherheitskonzept ausreicht, konnte nicht abschließend eruiert werden.

Eine Besonderheit der Neuen Unterinntalbahn stellt der noch in Planung befindliche Angerbergertunnel dar, der sich aufgrund der aktuellen Planungsphase an den aktuellen europäischen Regelwerken orientieren muss, aber dennoch als Doppelspurtunnel ausgeführt werden soll. Aus diesem Grund werden wie bei den bereits in Betrieb befindlichen Tunnelabschnitten spezielle bauliche Maßnahmen geplant, die das erforderliche Sicherheitsniveau füllen sollen. Auch beim Angerbergertunnel werden alle 500 m Rettungsschächte ins Freie gebaut. Als zusätzliche Sicherheitsmaßnahme wird in der Mitte der Tunnelstrecke auf einer Länger von 2.642 m ein paralleler Rettungstunnel errichtet (siehe Abbildung 21), der die Selbst- und Fremdrettung ermöglichen soll. Dieser zusätzliche Rettungstunnel stellt einen Ersatz für die regelmäßigen Rettungsschächte dar, wenn diese aufgrund der Topographie nicht realisierbar sind.



Abbildung 21: Ausschnitt geplanter Tunnelverlauf Angerbergertunnel [42]

Die Tunnel der Neuen Unterinntalbahn sind relevant für die geplante Verknüpfungsstelle, da hier auf zwei Gleisen innerhalb einer gemeinsamen Tunnelröhre Mischverkehr durchgeführt wird.

Eine Übertragbarkeit auf die Verknüpfungsstelle im Inntal ist jedoch nicht unmittelbar gegeben, da zur Durchführung des Betriebs spezielle Sicherheitsmaßnahmen errichtet wurden. Dazu gehören zum einen auf baulicher Seite die Errichtung von Rettungsausstiegen ins Freie in einem Abstand von nur 500 m und

der Bau zusätzlicher paralleler Rettungstunnel, dort wo kein Rettungsschacht ins Freie führen kann. Dies stellt eine Sonderlösung dar, die sehr aufwendig und nur in geeigneter Topografie realisierbar ist. Zum anderen begannen die Planungen bereits 1992, sodass diese nicht mit dem aktuellen europäischen Stand vergleichbar sind. Zudem gibt es in Österreich nicht die in Deutschland vorhandene Regelung eines Tunnelbegegnungsverbots von Personen- und Güterzügen in zweigleisigen Tunneln.

**Steckbrief „Neue Unterinntalbahn“
(Terfnertunnel, Münsterertunnel, Angerbergtunnel)**

Planung und Bau: 1992 – 2012

Inbetriebnahme: 2012 (Terfnertunnel, Münsterertunnel); vsl. 2032 (Angerbergtunnel)

Tunnelkategorie: lange Tunnel (ca. 15 km, 15 km und 11 km)

Ausführung: Doppelspurtunnel, tlw. mit parallelen Rettungstunneln und Rettungsausstiegen ins Freie alle 500 m

Relevanz für die Verknüpfungsstelle im Inntal:

- Personen- und Güterverkehr in einer nicht baulich getrennten Tunnelröhre

Gründe für die eingeschränkte oder nicht vorhandene Übertragbarkeit auf die Verknüpfungsstelle im

Inntal:

- Tunnel wurde nach älterem Regelwerk konzipiert (siehe Abbildung 28)
- kein Tunnelbegegnungsverbot von Reise- und Güterzügen in Österreich
- Rettungsausstiege ins Freie alle 500 m als Sonderlösung, sehr aufwendig und nur in geeigneter Topografie realisierbar

6.2.8 Valico-Tunnel (VT)

Eines der größten und wichtigsten aktuellen Infrastrukturprojekte in Italien ist der „Terzo Valico dei Giovi“ – Komplex. Es entsteht eine Neubaustrecke für den Personen- und Güterverkehr, die den südlichen Abschluss des *TEN*-Korridors Rhein-Alpen bildet. Die Länge der Neubaustrecke beträgt 53 km, von denen 37 km in Tunneln verlaufen. Die größten Tunnelprojekte innerhalb des Gesamtkomplexes sind der Serravalle-Tunnel (in Summe ca. 7,1 km) sowie der Valico-Tunnel (VT), der mit ca. 27,1 km Länge nach seiner geplanten Fertigstellung 2024 der längste Eisenbahntunnel im italienischen Netz sowie der fünftlängste Eisenbahntunnel in Europa sein wird. [47]

Der Valico-Tunnel wird prinzipiell als ein Komplex aus zwei einspurigen Tunnelröhren gebaut, die durch Querschläge ca. alle 500 m verbunden sind. Im Falle eines Ereignisses in einer der Röhren wird die jeweils nicht betroffene Röhre als sicherer Raum genutzt (siehe Abbildung 22).

Am Süden des Tunnels schließt sich ein Tunnelkomplex zur Anbindung der Neubaustrecke an die bestehende Eisenbahninfrastruktur an (III Valico-Voltri-Verknüpfung). An beiden Enden des Valico-Tunnels erfolgt eine Zusammenführung der beiden Gleise jeweils in einen Zweispurtunnel (siehe Abbildung 22). [48]

Aufgrund seiner Länge ist der Valico-Tunnel per Definition ein *sehr langer Tunnel*. In der Mitte des Tunnels ist deshalb ein Nothalt vorgesehen, der über den Val Lemme-Fensterstollen zugänglich ist (in Abbildung 22 nicht dargestellt) und umfangreiche Möglichkeiten zur Selbst- und Fremdrettung inklusive eines komplexen Notbelüftungssystems enthält, das hier mangels Relevanz nicht beschrieben wird.

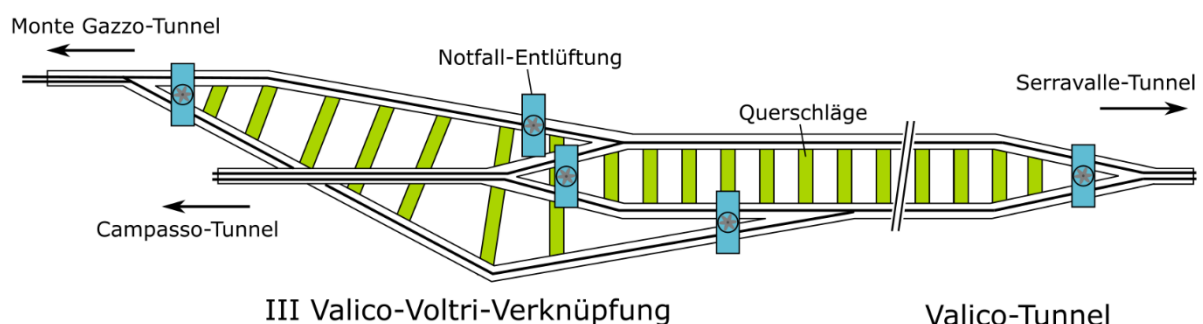


Abbildung 22: Valico-Tunnel und III Valico-Voltri-Verknüpfung (vereinfachte und schematische Darstellung, zitiert nach [48])

Für diese Studie von Bedeutung sind die Stellen des Tunnels, an denen die bauliche Trennung der Einspurröhren aufgehoben wird. Dies ist, wie oben erwähnt, an den Tunnelenden beim Übergang zu den Folgetunneln der Fall, aber auch im Bereich der III Valico-Voltri-Verknüpfung, die deshalb in Abbildung 22 schwerpunktmäßig dargestellt ist. Wie in dieser zu erkennen ist, wurden überall dort, wo ein Übertritt von Rauchgasen von einer in die andere Einspurröhre möglich ist, Entlüftungssysteme vorgesehen. Diese erzeugen mit Hilfe leistungsstarker Ventilatoren im Notfall eine gezielte Luftströmung, die die Rauchgase in eigens dafür vorgesehene Schächte mit kreisrundem Querschnitt ableitet. Die Auslegung der Notfallentlüftung erfolgte auf Basis von thermofluidodynamischen Simulationen. Es sollen auf diese Weise Luftströme von ca. 200 m³/s erzeugt werden können. [48]

Die Komplexität des projektierten Tunnelsystems erforderte umfangreiche Untersuchungen zur Risikoabschätzung, die mit dreidimensionalen Simulationen zur Branddynamik sowie Evakuierungsprozessen

von bis zu 500 Passagieren abgesichert wurden. Die Herausforderungen, die sich bezüglich der Beherrschbarkeit des Risikos aus dem Mischverkehr in Verbindung mit einem zu erwartenden hohen Güterzugaufkommen ergeben, werden von den Planern des Tunnels anerkannt und thematisiert (vgl. [48]).

Steckbrief Valico-Tunnel (VT)

Planung und Bau: 1992 - 2024

Inbetriebnahme: 2024 (geplant)

Tunnelkategorie: sehr langer Tunnel (ca. 27 km)

Ausführung: Zwei Einspurtunnel mit Querschlägen (Abstand ca. 500 m), die im Norden in einen Doppelspurtunnel und im Süden in einen Tunnelkomplex mit Verknüpfungsfunktion zu einer anderen Eisenbahnstrecke münden.

Relevanz für die Verknüpfungsstelle im Inntal:

- brandschutztechnische Trennung zweier baulich ungenügend getrennter Tunnelröhren mittels gezielter Notfallentlüftung
- Vorhandensein von unterirdischen Abzweigstellen

Gründe für die eingeschränkte oder nicht vorhandene Übertragbarkeit auf die Verknüpfungsstelle im Inntal:

- nationales Regelwerk (Italien) weicht bei gleichem Rahmen (TSI SRT) von deutschem Regelwerk ab
- kein Tunnelbegegnungsverbot von Reise- und Güterzügen in Italien
- Verknüpfung beschränkt sich auf Ein- und Ausfädeln einer anderen Strecke, kein Wechsel auf *Gegengleise*, wie im Inntal vorgesehen (geringere Komplexität)

6.2.9 Mont Cenis Basistunnel (MCBT)

Der Mont Cenis Basistunnel (MCBT) ist Teil der Neubaustrecke von Lyon nach Turin, die ihrerseits Teil des TEN-Mittelmeer-Korridors ist. In ihm werden internationale Reise- und Güterzüge mit Höchstgeschwindigkeiten bis zu 220 bzw. 120 km/h verkehren. Es handelt sich um einen *sehr langen Tunnel*, der mit einer Länge von ca. 57,1 km nach seiner Fertigstellung in etwa so lang sein wird, wie der Gotthard-Basistunnel (siehe Abschnitt 6.2.6). Annähernd vier Fünftel des Tunnels liegen auf französischem, der Rest auf italienischem Staatsgebiet, sodass es bei diesem Projekt die besondere Herausforderung gibt, die über das europäische Regelwerk hinaus geltenden nationalen Regelwerke beider Staaten anzuwenden. [49, 50]

Der Mont Cenis Basistunnel ist als Kombination zweier Einspurröhren konzipiert, die durch Querschläge alle 333 m (drei Querschläge je 1.000 m) verbunden sind. Die Nutzung der zweiten Röhre als „sicherer Bereich“ wird damit ermöglicht. Zusätzlich existieren drei dezidierte Nothaltebereiche, die jeweils 17 km, 29 km und 44 km von den Westportalen (bzw. 13 km, 28 km und 40 km von den Ostportalen) entfernt liegen. Diese werden über mit Straßenfahrzeugen befahrbare Fensterstollen erreichbar sein und im Notfall eine Evakuierung von Fahrgästen an die Oberfläche sowie einen Zugang von Rettungskräften und –geräten ermöglichen. Die Nothaltebereiche sind zusätzlich mit Notbelüftungseinrichtungen versehen, durch die sich eine gezielte Steuerung der Luftströmung im Tunnel erzielen lassen soll, für den Fall, dass ein brennender Zug im Nothalteabschnitt zum Stehen gekommen ist. [51]

In den Nothaltebereichen sind außerdem die Abstände zwischen den Querschlägen auf 50 m verkürzt und es wird jeweils ein zusätzlicher Raum (Länge: 400 m, entsprechend einer Reisezuglänge) zwischen den beiden Fahrrohren vorgesehen, der der temporären Aufnahme der Passagiere eines evakuierten Zuges dient. [49]

Unweit der französischen Stadt Modane ist die Errichtung einer unterirdischen Überleit- und Überholstelle im Zuge der Einrichtung des Nothaltes vorgesehen (siehe Abbildung 23).

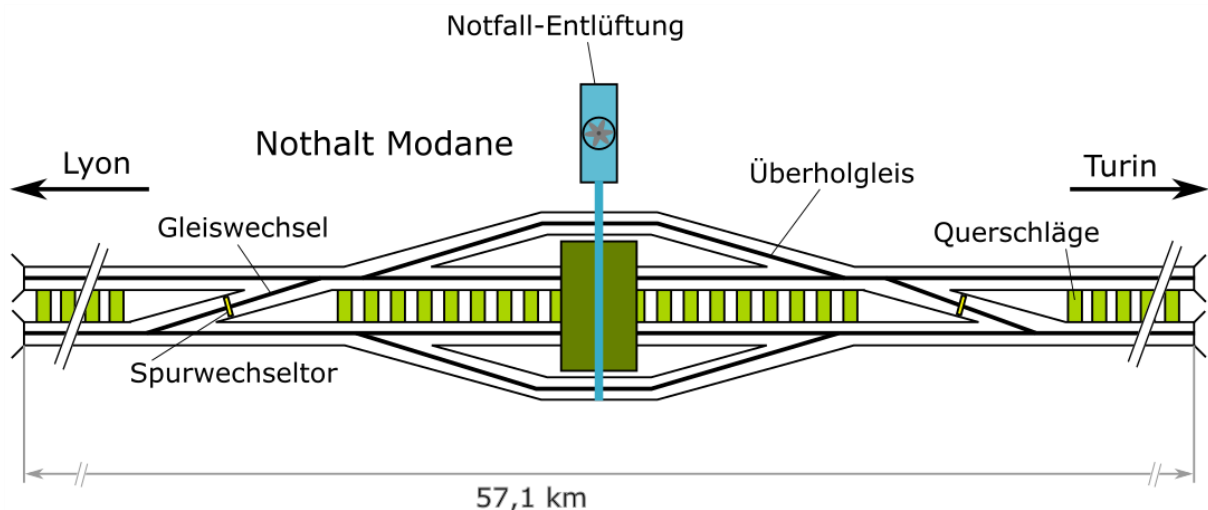


Abbildung 23: Überleit- und Überholstelle bei der Brandbekämpfungsstelle Modane im Mont Cenis Basistunnel (vereinfachte und schematische Darstellung, nach [49])

Der Gleiswechsel ins *Gegengleis* ist nur in Notfällen oder bei anstehenden Wartungsarbeiten vorgesehen und wird im Alltagsbetrieb nicht genutzt werden. Die Überholstellen sollen jedoch dazu dienen, dass langsam fahrende Güterzüge (100 km-120 km/h) von Hochgeschwindigkeitszügen (vorgesehene Geschwindigkeit im Tunnel: 220 km/h) überholt werden können. [49, 51]

Die bauliche Trennung der beiden Einspurröhren wird im Bereich der Überleitstelle aufgegeben, deshalb müssen Kompensationsmaßnahmen ergriffen werden, um im Brandfall ein Eindringen von Rauchgasen in die jeweils gesunde Tunnelröhre zu verhindern. Analog zu der im Gotthard-Basistunnel angewandten Lösung finden auch in diesem Falle Spurwechsellösungen Verwendung, die ferngesteuert geöffnet und geschlossen werden. In der Grundstellung sind die Tore geschlossen. Da die Überleitstellen im Regelbetrieb nicht befahren werden, ist dies eine praktikable Lösung.

Steckbrief Mont Cenis Basistunnel (MCBT)

Planung und Bau: 1994 – 2029 (geplant)

Inbetriebnahme: 2030 (geplant)

Tunnelkategorie: sehr langer Tunnel (ca. 57 km)

Ausführung: Zwei Einspurtunnel mit Querschlägen (Abstand ca. 300 m) und drei gleichmäßig über die Tunnellänge verteilten Nothalten, von denen einer eine Überholstelle aufweist. Zudem sind im Tunnel zwei Überleitstellen mit Spurwechsellösungen vorhanden.

Relevanz für die Verknüpfungsstelle im Inntal:

- Überleitstelle im Tunnel mit örtlicher Aufhebung der baulichen Trennung zweier Einspurröhren
- Vorhandensein einer unterirdischen Überholstelle (Weichen, angrenzende Röhren)

Gründe für die eingeschränkte oder nicht vorhandene Übertragbarkeit auf die Verknüpfungsstelle im Inntal:

- nationales Regelwerk (Italien, Frankreich) weicht bei gleichem Rahmen (TSI SRT) von deutschem Regelwerk ab
- Einbindung der Überholstelle in einen Nothalt mit aufwendiger Ausrüstung zur Evakuierung und Notbelüftung
- Überleitstellen werden nicht im Regelbetrieb befahren und weisen Spurwechsellösungen auf

6.2.10 Brenner Basistunnel (BBT)

Der Brenner Basistunnel (BBT) ist ein derzeit in Bau befindlicher Eisenbahntunnel, der auf einer Länge von 55 km zwischen Innsbruck (Österreich) und Franzensfeste (Italien) verläuft. Er besteht aus einem Erkundungsstollen, zwei eingleisigen Haupttunnelröhren und vier seitlichen Zufahrtstunneln (siehe Abbildung 24).

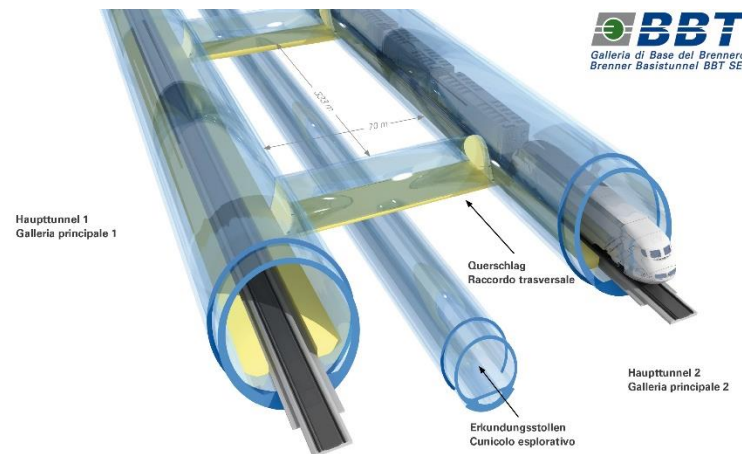


Abbildung 24: Ansicht der Tunnelröhren des BBT [7]

Die vier Zufahrtstunnel verbinden die Oberfläche mit den Tunnelröhren. In der Bauphase dienen sie logistischen Zwecken [52], nach Inbetriebnahme sind sie direkt mit den Nothaltestellen verbunden und ermöglichen einen Weg ins Freie. Die Tunnelröhren sind alle 333 m mit Querschlägen miteinander verbunden und dienen als Fluchtweg. Sobald der BBT in Betrieb ist, wird der mittig, zwölf Meter unterhalb der beiden Haupttunnelröhren verlaufende Erkundungsstollen eine wichtige Rolle für die Entwässerung spielen [27]. In Innsbruck mündet der BBT in den bestehenden Inntaltunnel (siehe Kapitel 6.2.2). Die Verbindung erfolgt über zwei Abzweigstellen und zwei eingleisige Verbindungstunnel (siehe Abbildung 25 und Abschnitt 6.2.2).

Im Bereich der Überleitstelle St. Jodok sind die beiden Tunnelröhren miteinander verbunden. Um eine bauliche Trennung der beiden Tunnelröhren weiterhin zu gewährleisten, ist der Einsatz von Spurwechsellisten geplant. Diese Spurwechsellisten bleiben im Regelbetrieb geschlossen, sodass im Brandfall kein Rauchübertritt aus der Ereignis- in die gesunde Tunnelröhre erfolgt. Für einen Einsatz im Regelbetrieb mit regelmäßigen Überfahrten sind diese Spurwechsellisten aber wie schon beim GBT und MCBT aufgrund der erforderlichen betrieblichen Prozesse sowie der Schließ- und Öffnungszeiten nicht geeignet.

Die Anbindung der Tunnelröhren des BBT an den bestehenden Inntaltunnel erfolgt über je eine Abzweigstelle. Die Abzweigstelle beschränkt sich auf das Ein- und Ausfädeln, ohne einen Wechsel auf die Gegengleise zu ermöglichen. Dadurch ergibt sich eine geringere Komplexität als bei der geplanten Verknüpfungsstelle im Inntal. Ergänzend kommt hinzu, dass es in Österreich und Italien kein Tunnelbegegnungsverbot von Reise- und Güterzügen gibt und somit eine Führung in verbundenen Tunnelröhren aus regulatorischer Sicht möglich ist.

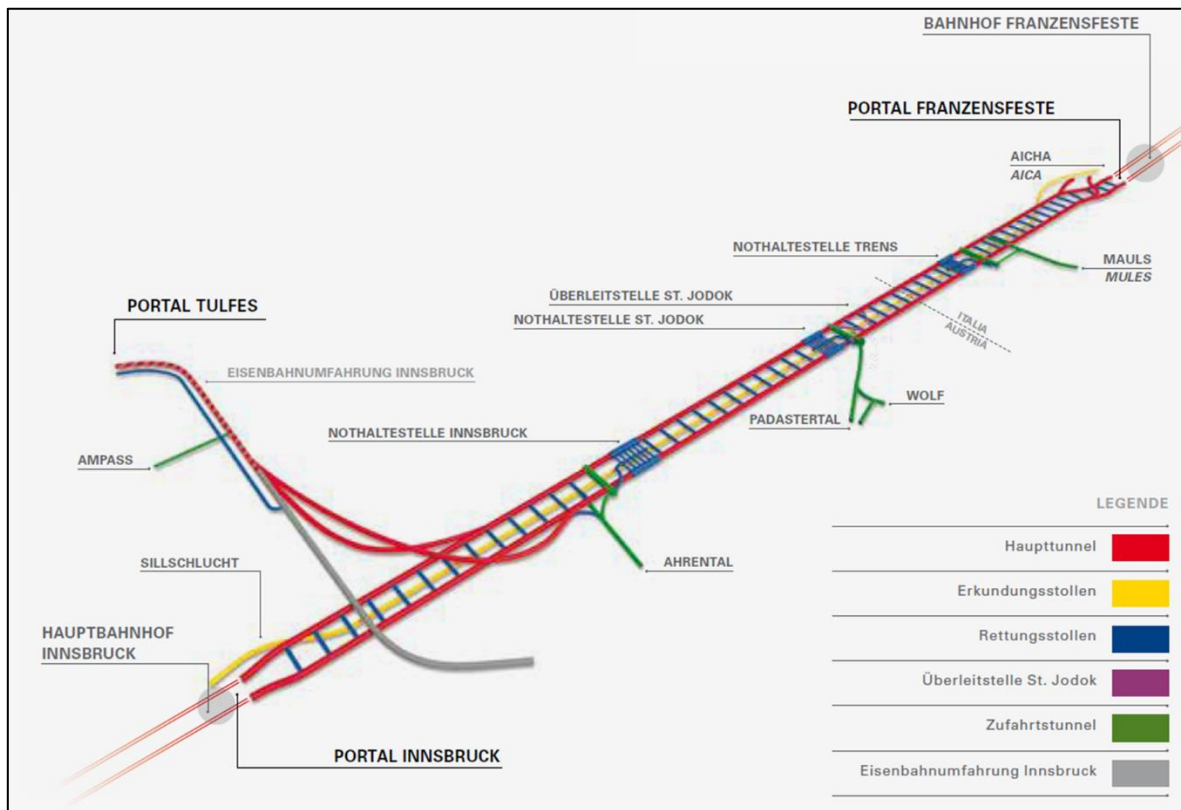


Abbildung 25: Tunnelsystem BBT [7]

Steckbrief Brenner Basistunnel (BBT)

Planung und Bau: 1994 – 2027 (im Bau)

Inbetriebnahme: 2027 (geplant)

Tunnelkategorie: sehr langer Tunnel (ca. 55 km, 64 km inkl. Umfahrung Innsbruck)

Ausführung: Einspurtunnel mit Querschlägen (Abstand ca. 333 m), drei Nothaltestellen, einer Überleitstelle und einer Abzweigstelle

Relevanz für die Verknüpfungsstelle im Inntal:

- Vorhandensein einer unterirdischen Überleitstelle und einer Abzweigstelle
- Brandschutztechnische Trennung zweier baulich ungenügend getrennter Tunnelröhren mittels Spurwechsellatoren

Gründe für die eingeschränkte oder nicht vorhandene Übertragbarkeit auf die Verknüpfungsstelle im Inntal:

- Spurwechsellatore im Bereich der Überleitstelle werden nur im Störfall geöffnet, die Schließ- und Öffnungszeiten sind mit je rund zwei Minuten zu lang für einen Einsatz im Regelbetrieb
- Abzweigstelle beschränkt sich auf Ein- und Ausfädeln einer anderen Strecke, kein Wechsel auf Gegengleise wie im Inntal vorgesehen (geringere Komplexität)
- kein Tunnelbegegnungsverbot von Reise- und Güterzügen in Österreich/Italien

6.2.11 Ceneri-Basistunnel (CBT)

Der Ceneri-Basistunnel bildet den südlichen Abschluss der sogenannten „Gotthard-Achse“ auf der Neuen Eisenbahn-Alpen-Transversale (NEAT). Diese wiederum ist Teil des *TEN*-Korridors Rhein-Alpen mit den Endpunkten Rotterdam und Genua. Aus der großen Bedeutung für den internationalen Verkehr ergibt sich die Notwendigkeit, dass sowohl Reise- als auch Güterzüge in dem Tunnel verkehren (Mischverkehr).

Die Länge des Tunnels beträgt 15,4 km und er ist als Verbund von zwei einspurigen Tunnelröhren ausgeführt, die über Querschläge mit einem durchschnittlichen Abstand von 325 m miteinander verbunden sind.

An der nördlichen Einfahrt des Tunnels weist die Tunnelkonstruktion eine abweichende Ausführung auf, da hier die Verknüpfung der Neubaustrecke mit der bestehenden Infrastruktur (Streckenweig nach Locarno) in den Tunnel hineingezogen wird (siehe Abbildung 26: „Branch-off structure“). So ist die östliche Tunnelröhre zunächst als Kaverne ausgeführt, die zwei Gleise aufnimmt. Diese werden bei Einfahrt in den Tunnel durch eine Trennwand baulich voneinander getrennt. Das mittlere Streckengleis wird dann im Folgenden verschwenkt und unter Nutzung eines Verbindungstunnels mit dem Streckengleis in der westlichen Tunnelröhre vereinigt. Von diesem Punkt an sind beide eingleisigen Röhren baulich vollständig getrennt. Im Süden des Tunnels ist eine unterirdische Abzweigung vorgesehen, die zukünftig weitergebaut werden soll.

In den verfügbaren Quellen konnte keine genauere Beschreibung der Gestaltung der Überleitstelle am nördlichen Tunnelportal gefunden werden. Nyfeler und Reinke beschreiben jedoch in [53] das Belüftungssystem des Ceneri-Basistunnels, das auf der Anordnung von Axiallüftern neben den Gleisen in den Fahrtunneln basiert (siehe Abbildung 27). Diese sind im Regelbetrieb inaktiv und kommen nur im Brandfall oder während Wartungsmaßnahmen im Tunnel zum Einsatz. Sie können im Brandfall unter anderem dazu verwendet werden, die Verrauchung der gesunden Röhre über die Tunnelportale zu verhindern [53]. Da sich die Überleitstelle unmittelbar hinter den nördlichen Tunnelportalen befindet, kann davon ausgegangen werden, dass die fehlende bauliche Trennung beider Fahrrohre in diesem Bereich mittels des beschriebenen Tunnelbelüftungssystems kompensiert werden kann.

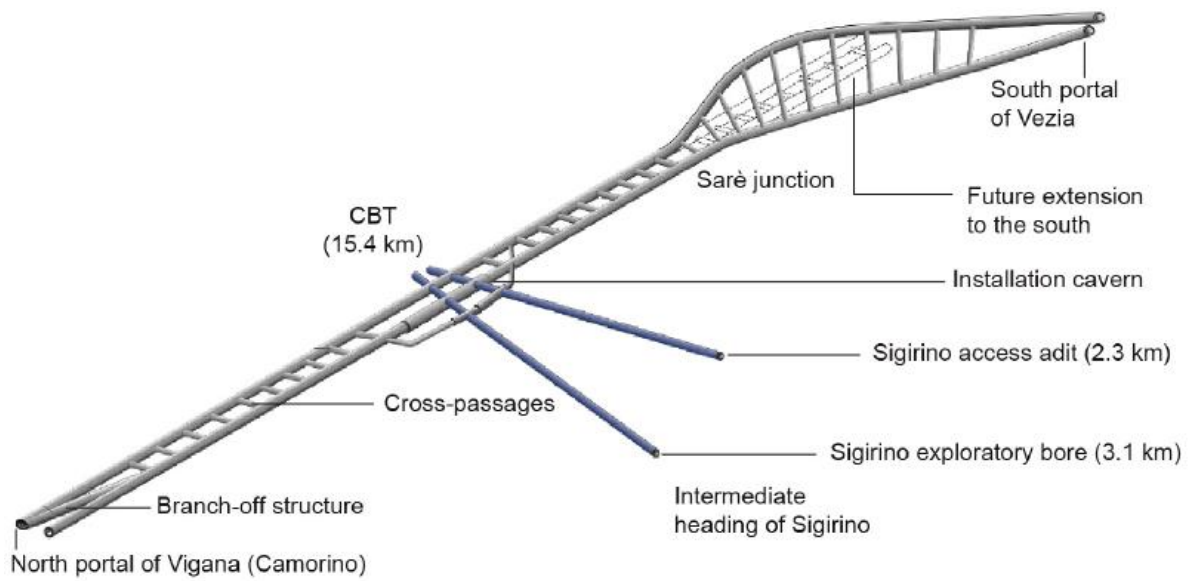


Abbildung 26: Übersichtsdarstellung des Ceneri-Basistunnel-Komplexes [54]

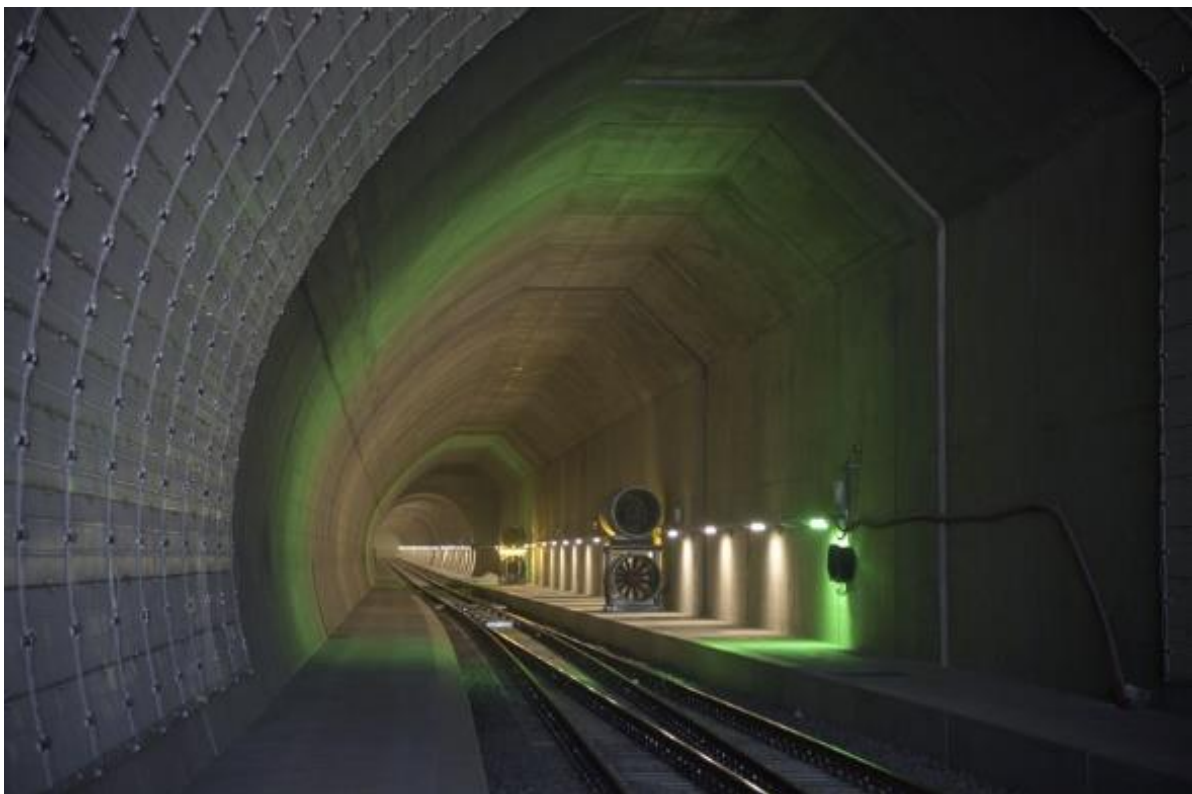


Abbildung 27: Blick in die Oströhre des Ceneri-Basistunnels an der Stelle der Verzweigung mit Axiallüftern rechts des Gleises [55]

Steckbrief Ceneri-Basistunnel (CBT)

Planung und Bau: 1997 – 2020

Inbetriebnahme: 2020

Tunnelkategorie: langer Tunnel (ca. 15,4 km)

Ausführung: Zwei Einspurtunnel mit Querschlägen (Abstand ca. 325 m), mit einer Überleitstelle direkt hinter dem Nordportal und einem zukünftig auszubauenden unterirdischen Abzweig (Ausfädelung) im Südteil des Tunnels.

Relevanz für die Verknüpfungsstelle im Inntal:

- Überleitstelle im Tunnel mit Aufhebung der baulichen Trennung zweier Einspurröhren
- geplante/vorgesehene Abzweigung (Ausfädelung) im Südteil des Tunnels

Gründe für die eingeschränkte oder nicht vorhandene Übertragbarkeit auf die Verknüpfungsstelle im Inntal:

- Überleitstelle direkt im Anschluss an das Nordportal
- wesentlich geringere Komplexität (lediglich drei Gleise und ein Gleiswechsel)

6.2.12 Zwischenfazit zu Referenzobjekten

Die Recherche von Referenzbauwerken hat gezeigt, dass es bislang weder in der EU, noch in der Schweiz ein Tunnelbauwerk gibt, das sowohl eine vollwertige Verknüpfungsstelle im Sinne der in Kapitel 2.1.2 festgehaltenen Definition enthält, als auch vollumfänglich nach dem derzeit gültigen Regelwerk (TSI SRT) gebaut ist.

Wie Abbildung 28 zeigt, liegen die Planungsphasen fast aller betrachteten Tunnel vor dem Inkrafttreten der heute gültigen TSI SRT und drei analysierte Tunnelbauwerke waren bereits fertiggestellt und in Betrieb genommen, bevor die erste Fassung der TSI SRT Gültigkeit erhielt.

Da es sich bei den betrachteten Tunneln ausschließlich um Bauwerke handelt, die außerhalb Deutschlands errichtet wurden, ist eine Aussage, ob diese auch für das Eisenbahn-Bundesamt in dieser Form genehmigungsfähig gewesen wären, nicht möglich. Bei keinem der analysierten Tunnel wurde die EBA-Tunnelrichtlinie ergänzend zur TSI SRT angewandt, sondern es galten ggf. die nationalen Regelwerke der Schweiz, Österreichs, Italiens und/oder Frankreichs². Inwieweit sich diese signifikant von den Vorgaben des EBA unterscheiden, konnte in der Kürze der für die Erstellung dieser Studie zur Verfügung stehenden Zeit nicht vollumfänglich geklärt werden.

Bei den Tunnelbauwerken mit einer Bauzeit über längere Zeiträume, während derer es zu einer Überarbeitung des Regelwerks gekommen ist (z. B. 2015: Inkrafttreten der überarbeiteten TSI SRT) konnte mit Hilfe der zur Verfügung stehenden Quellen nicht hinreichend geklärt werden, welcher konkrete Stand der Regelwerke jeweils für die Inbetriebnahmegenehmigung zugrunde gelegt wurde oder wird.

Der auf den ersten Blick der hier untersuchten Fragestellung am ehesten entsprechende Wienerwaldtunnel ist hinsichtlich seiner Konzeption aus heutiger Sicht veraltet und würde in dieser Form auch in

² Im Falle des Mont Cenis Basistunnels galt sowohl das italienische, wie auch das französische Regelwerk, weil es sich um einen grenzüberschreitenden Tunnel handelt. Es wurden stets die jeweils strengeren Regelungen zum Maßstab erhoben. [50]

Österreich nicht mehr neu gebaut werden können. Es kommt hinzu, dass sich die sogenannte Weichenhalle, die die Verknüpfungsstelle beherbergt, an einer Stelle mit geringer Überdeckung des Tunnels und innerhalb des Stadtgebietes einer Großstadt befindet, wodurch die Randbedingungen für die Selbst- und Fremdrettung vergleichsweise günstig sind.

Die Frage, ob die Anordnung von Weichen in Tunneln sowie die örtliche Aufhebung der baulichen Trennung benachbarter Tunnelröhren ingenieurtechnisch grundsätzlich beherrschbar ist, kann auf Basis der Quellenlage eingeschränkt mit „ja“ beantwortet werden. Die Einschränkung rührt daher, dass die realisierten unterirdischen Abzweigstellen im Vergleich zu der im Rahmen der Studie betrachteten Verknüpfungsstelle wesentlich weniger komplex sind (z. B. zwei statt vier verbundene Röhren oder keine separat zu betrachtenden Verbindungsrohre). Der bauliche und technische Aufwand zur Vermeidung der Verrauchung sicherer Bereiche im Falle eines Brandes ist aber auch in diesen Fällen schon sehr hoch und mit einer aufwendigen Nachweisführung verbunden.

Deutsche Tunnelbauwerke mit einer ähnlichen Komplexität wie die analysierten Referenzprojekte sind entweder nicht vorhanden oder werden nicht im Mischbetrieb befahren³, sodass bei diesen der Extremfall eines in Brand geratenen Güterzuges mit Gefahrgut im Gegensatz zu dem im Rahmen der Studie betrachteten Fall nicht relevant ist.

Die Analyse zeigt somit, dass es weder in Deutschland noch im untersuchten Gebiet (EU und Schweiz) ein mit der unterirdischen Verknüpfungsstelle vergleichbares Bauwerk gibt. Zwar existieren durchaus Tunnel, bei denen einige der relevanten Eigenschaften (z. B. örtliche Aufhebung einer baulichen Trennung benachbarter Tunnelröhren) übereinstimmen, aber in diesen Fällen weichen andere Rahmenbedingungen grundlegend von dem im Rahmen dieser Studie betrachteten Fall ab.

³ Wesentliche Beispiele wären der City-Tunnel Leipzig oder Stuttgart 21, die jedoch nur von Fahrzeugen des Schienenpersonenverkehrs befahren werden.

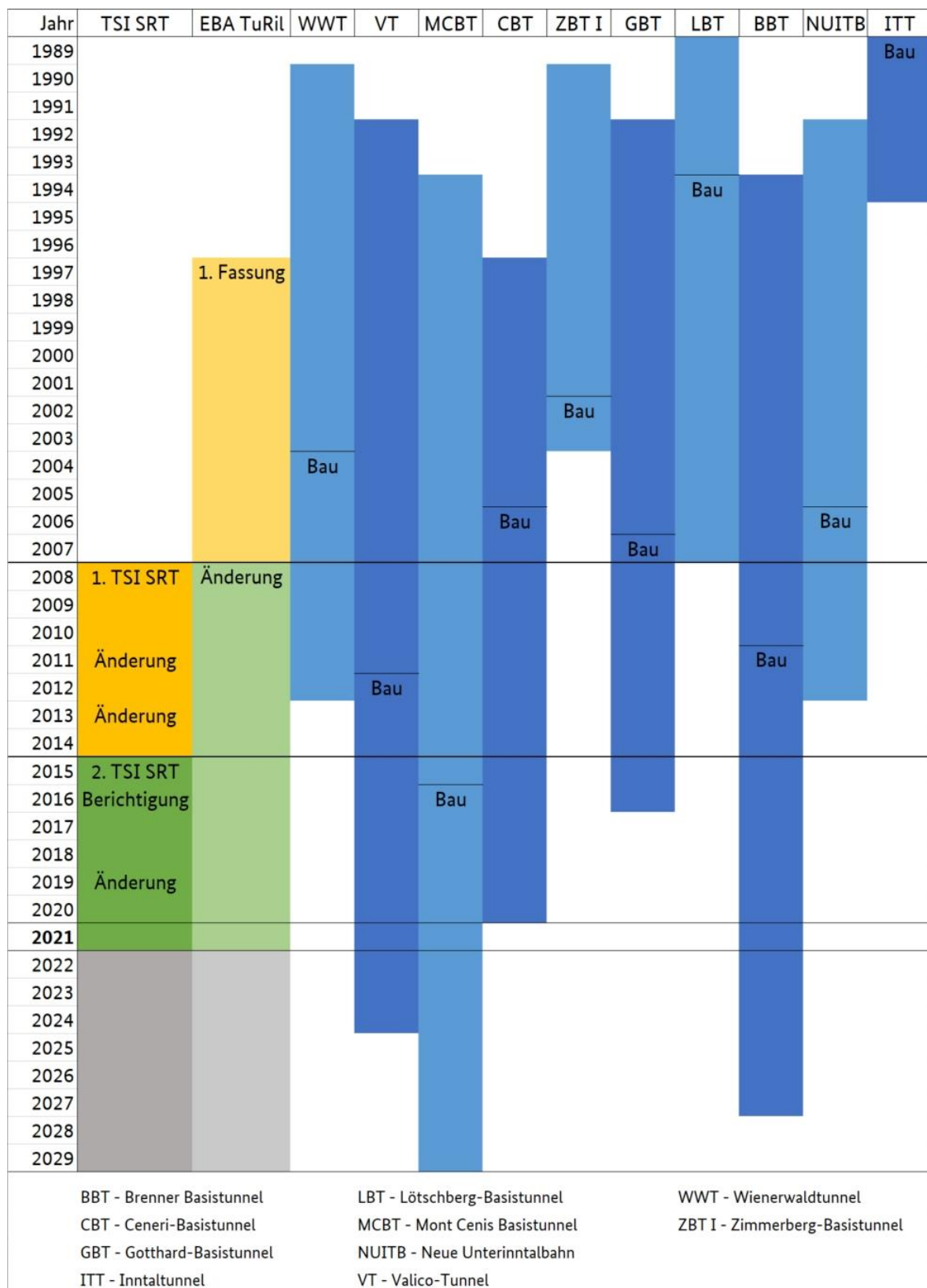


Abbildung 28: Zeitliche Einordnung der Planungs- und Bauphasen verschiedener analysierter Eisenbahntunnel (Anmerkung: die farbliche Hinterlegung dient lediglich der graphischen Abgrenzung und enthält keine weitere Information)

7 Zusammenfassung und Fazit

Das Konzept einer unterirdischen Verknüpfungsstelle ist im europäischen und deutschen Regelwerk (TSI SRT und EBA-Tunnelrichtlinie) nicht explizit vorgesehen. Die mit einer solchen Konstruktion verbundenen baulichen und betrieblichen Eigenschaften stehen im Widerspruch zu wesentlichen Anforderungen dieser Regelwerke. Insbesondere die Verrauchung benachbarter Tunnelröhren über die Verbindungsröhren der Verknüpfungsstelle im Brandfall wird als problematisch angesehen. Eine tatsächliche bauliche Trennung, wie in der EBA-Tunnelrichtlinie vorgeschrieben, kann nur mit eingleisigen Tunneln ohne Weichenbereiche gewährleistet werden. Dadurch wird die Verrauchung der parallelen, ebenfalls eingleisigen Tunnelröhre sicher verhindert. Um eine unterirdische Verknüpfungsstelle dennoch zuzulassen, müssten Maßnahmen getroffen werden, welche das gleiche, sehr hohe Sicherheitsniveau bieten. Dies erfordert gemäß §2 Absatz 2 EBO Nachweise gleicher Sicherheit unter Anwendung der Common Safety Methods (CSM). Die Nachweisführung müsste beispielsweise umfangreiche Entrauchungsstudien sowie Simulationen von Rettungsszenarien beinhalten und wäre individuell für die Verknüpfungsstelle bei Niederaudorf zu führen. Die Ergebnisse wären auf andere Tunnelprojekte nicht direkt übertragbar. Diese Nachweise können im Rahmen dieser Studie nicht erbracht werden, und sie obliegen dem Infrastrukturbetreiber, im Falle des Brenner-Nordzulaufs ist dies die DB Netz AG. Obgleich verschiedene Lösungsansätze denkbar wären, wie der Blick ins Ausland zeigt, hätte eine solche Risikoabschätzung einen ungewissen Ausgang bei gleichzeitig sehr hohem zeitlichen und finanziellen Aufwand. Der Erfolg eines Nachweises gleicher Sicherheit einer unterirdischen Verknüpfungsstelle mit Sicherheitseinrichtungen gegenüber einer baulichen Trennung ist daher anzuzweifeln.

Darüber hinaus müsste eine wie auch immer geartete Lösung ebenfalls alle betrieblichen Belange der Verknüpfungsstelle berücksichtigen und dürfte deren benötigte Leistungsfähigkeit nicht beeinträchtigen, was die Problematik zusätzlich verkompliziert. Es ist ferner zu erwähnen, dass Ersatzmaßnahmen, die der ergänzenden Tunnelsicherheit im Falle einer unterirdischen Verknüpfungsstelle dienen, Folgen an der Oberfläche nach sich ziehen würden: Entrauchungsöffnungen, Stollenausgänge, Rettungsplätze, deren Zufahrtsstraßen und technische Ausstattung könnten in Summe leicht den Umweltverbrauch einer oberirdischen Verknüpfungsstelle übersteigen. Allein aus der Tatsache, dass eine unterirdische Verknüpfungsstelle bei Niederaudorf die bisher geplanten zwei unabhängigen Tunnel (Tunnel Laiming und Tunnel Steinkirchen) zu einem sehr langen Tunnel von ca. 26 km verbinden würde, ergibt sich die Notwendigkeit einer Nothaltestelle/ Brandbekämpfungsstelle mit entsprechenden oberirdischen Anlagen. Im konkreten Fall kämen die besonderen Sicherheitsanforderungen einer unterirdischen Verknüpfungsstelle jedoch noch ergänzend hinzu.

Folgende Aussagen können nach gründlicher Recherche nach Ansicht der Autoren als gesichert angesehen werden:

- Der Grundaussage der Deutschen Bahn, dass die Verlegung der vorgesehenen Verknüpfungsstelle in einen Tunnel ohne Weiteres nicht uneingeschränkt regelwerkskonform sei, ist zuzustimmen.
- Für die Einrichtung einer komplexen unterirdischen Verknüpfungsstelle in Tunneln für den Mischbetrieb von Güter- und Reisezügen lässt sich innerhalb der EU und der Schweiz kein geeignetes Referenzobjekt identifizieren.
- Die Installation von Toren zur baulichen Trennung benachbarter Tunnelröhren ist aus betrieblichen und technischen Gründen nicht für den Regelbetrieb geeignet. Ähnliche Projekte im europäischen Ausland, bei denen eine solche Strategie verfolgt wird, sind betrieblich nicht vergleichbar, weil die Weichenverbindungen dort nicht im Regelbetrieb befahren werden.

- Der Aussage der Deutschen Bahn, dass Tore die einzige Möglichkeit darstellen, um eine unvollständige bauliche Trennung zweier Tunnelröhren zu kompensieren, kann angesichts der im europäischen Ausland vorgefundenen Lösungen zur selektiven Ent-/ Belüftung an Abzweigstellen in Tunneln nicht uneingeschränkt zugestimmt werden.
- Die Einrichtung von Abzweigstellen in Tunneln wird bei einigen derzeit in der EU (außerhalb Deutschlands) und der Schweiz geplanten bzw. im Bau befindlichen Tunneln umgesetzt. Dabei wird der Gefahr der Verrauchung verbundener Tunnelröhren in Brandfällen durch die Installation leistungsfähiger Lüftungssysteme vorgebeugt.
- Die Installation von Weichen in Tunneln wird bei einigen derzeit in der EU (außerhalb Deutschlands) und der Schweiz geplanten bzw. im Bau befindlichen Tunneln realisiert.
- Der Aufwand, der zur Kompensation einer unvollständigen baulichen Trennung zweier Tunnelröhren betrieben werden muss, ist groß. Dies betrifft sowohl die etwaige Installation einer leistungsstarken Lüftungsanlage nebst (senkrechten) Lüftungsschächten über der Abzweigstelle, als auch eine entsprechende Überwachungs- und Steuerungseinrichtung sowie den Nachweis der Wirksamkeit über thermofluidynamische Simulationen und ggf. Versuche. Hierzu wären tunnelspezifische Modellierungen und Simulationsstudien nötig, die zunächst einmal eine detailliertere bauliche Konzeption des geplanten Bauwerks notwendig machen würden. Diese könnten voraussichtlich nur von erfahrenen Spezialisten in diesem Bereich durchgeführt werden. Es ist dabei wichtig zu betonen, dass der Ausgang solch umfangreicher Studien im Vorfeld nicht feststeht, d. h., dass ein simulationsgestützter potentieller Nachweis gleicher Sicherheit auch misslingen kann.
- Eine unterirdische Verknüpfungsstelle führt zwangsläufig dazu, dass mehrere Verzweigungen in kurzen räumlichen Abständen auftreten, die jeweils gegen einen Übertritt von gefährlichen Gasen und Rauch in benachbarte Röhren gesichert werden müssten. Der vorstehend beschriebene Aufwand zum Nachweis der Wirksamkeit möglicher technischer Systeme erhöht sich damit nochmals signifikant, weil es aufgrund der individuellen Verhältnisse in den verschiedenen Tunneln keine standardisierten Lösungen für die Entrauchung gibt.
- Die isolierte Betrachtung nur der unterirdischen Verknüpfungsstelle ist nicht zielführend, da vor und nach dem erwogenen Tunnelbauwerk ebenfalls eine Streckenführung in Tunneln erfolgen soll. Eine Vereinigung mit den vor- und nachgelagerten Tunneln würde zur Entstehung eines sehr langen Tunnelbauwerkes (>20 km) führen, das gegenüber kürzeren Tunneln baulich umfangreich erweitert werden müsste, um regelwerkskonform zu sein.

Folgende Aussagen sind aus Sicht der Autoren ebenso erwähnenswert, konnten aber nicht abschließend beantwortet werden:

- Die Genehmigungsfähigkeit eines komplexen Tunnelbauwerkes mit einer Verknüpfungsstelle, das für das deutsche Netz bisher nicht übliche Sicherheitskonzepte (z. B. Lüftungsanlagen) enthält, erscheint fraglich. Um die Genehmigungsfähigkeit alternativer Lösungen zur Verhinderung der Verrauchung verbundener Tunnelröhren im Falle eines Brandes erörtern zu können, bedürfte es sehr umfangreicher und detaillierter Planungen und Daten, die in Vorleistung und ohne Garantie auf Erfolg erstellt werden müssten.
- Eine „Entzerrung“ der Verknüpfungsstelle (räumliche Trennung und Verteilung von Abzweig- und Überleitstellen über eine größere Streckenlänge) in Kombination mit der Projektierung großzügiger Überwerfungsbauwerke im Tunnel könnte die Komplexität der Absicherung gegen Rauchübertritt zwischen den Röhren reduzieren, würde aber den baulichen und ökonomischen Aufwand nochmals stark erhöhen und überdies die Anzahl der zu verbauenden Weichen vergrößern. Der Inspektions- und Instandhaltungsaufwand einer solchen Anlage wäre überdies sehr groß.

Neben den Aspekten der Tunnelsicherheit wäre eine unterirdische Verknüpfungsstelle mit weiteren komplexen Herausforderungen verbunden: Untersuchungen beispielsweise hinsichtlich der Geologie

und Statik vor Ort wären nötig und erheblich gesteigerte Planungs- und Baukosten würden die Folge sein. Zudem würden die notwendigen Anpassungen und Untersuchungen deutliche zeitliche Verzögerungen bei Planung und Bau mit sich bringen.

Mit einer unterirdischen Verknüpfungsstelle im neuen Brenner-Nordzulauf würde in Deutschland eindeutig Neuland bei der Gestaltung von Eisenbahntunneln betreten. Es gibt in dieser Komplexität auch im europäischen Ausland kein vergleichbares Referenzprojekt. Es ist daher sinnvoll abzuwägen, ob der Aufwand den erwartbaren Nutzen rechtfertigt.

Literaturverzeichnis

- [1] STATISTA GMBH, 2021. *Transportleistung des Schienengüterverkehrs in der EU-27 bis 2020* [online]. Hamburg: Statista GmbH [Zugriff am: 10.11.2021]. Verfügbar unter: <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/282306/umfrage/transportleistung-des-schienengueterverkehrs-in-der-eu/>

- [2] EUROPÄISCHES PARLAMENT & RAT DER EUROPÄISCHEN UNION, 2010. *Verordnung (EU) Nr. 913/2010 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 22. September 2010 zur Schaffung eines europäischen Schienennetzes für einen wettbewerbsfähigen Güterverkehr* [online]. Straßburg & Brüssel: Europäisches Parlament & Rat der Europäischen Union [Zugriff am 20.12.2021]. Verfügbar unter: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/ALL/?uri=CELEX%3A32010R0913>

- [3] EUROPÄISCHES PARLAMENT & RAT DER EUROPÄISCHEN UNION, 2013. *Verordnung (EU) Nr. 1316/2013 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 11. Dezember 2013 zur Schaffung der Fazilität „Connecting Europe“* [online]. Straßburg & Brüssel: Europäisches Parlament & Rat der Europäischen Union [Zugriff am 21.12.2021]. Verfügbar unter: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/ALL/?uri=CELEX:32013R1316>

- [4] EUROPÄISCHE UNION, 2021. *TENtec Interactive Map Viewer* [online]. Brüssel: Europäische Union [Zugriff am: 10.11.2021]. Verfügbar unter: <https://ec.europa.eu/transport/infrastructure/tentec/tentec-portal/map/maps.html>

- [5] BUNDESMINISTERIUM FÜR DIGITALES UND VERKEHR, 2021. *Korridormanagement* [online]. Berlin: Bundesministerium für Digitales und Verkehr [Zugriff am: 10.11.2021]. Verfügbar unter: <https://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Artikel/G/transeuropaeische-verkehrsnetze-korridormanagement.html>

- [6] VEREIN FÜR DEN GÜTERVERKEHRSKORRIDOR SKANDINAVIEN-MITTELMEER, 2021. *Scandinavian-Mediterranean Rail Freight Corridor* [online]. Wien: Verein für den Güterverkehrskorridor Skandinavien-Mittelmeer [Zugriff am: 10.11.2021]. Verfügbar unter: <https://www.scanmedfreight.eu/>

- [7] BRENNER BASISTUNNEL BBT SE, 2021. *Der Brenner Basistunnel* [online]. *Ein neuer Verbindungsweg durch die Alpen*. Innsbruck: Brenner Basistunnel BBT SE [Zugriff am: 10.11.2021]. Verfügbar unter: <https://www.bbt-se.com/fileadmin/broschueren/2021/allgemeine-broschuere-2/index.html>

- [8] DB NETZ AG & ÖBB-INFRASTRUKTUR AG, 2021. *Bahnprojekt Brenner-Nordzulauf* [online]. Frankfurt & Wien: DB Netz AG & ÖBB-Infrastruktur AG [Zugriff am: 24.11.2021]. Verfügbar unter: <https://www.brennernordzulauf.eu>

- [9] DB NETZ AG & ÖBB-INFRASTRUKTUR AG, 2021. *Notwendigkeit von Verknüpfungsstellen am Brenner-Nordzulauf* [online]. Frankfurt & Wien: DB Netz AG & ÖBB-Infrastruktur AG [Zugriff am: 24.11.2021]. Verfügbar unter: <https://www.brennernordzulauf.eu/verknuepfungsstellen.html>
- [10] EISENBAHN-BAU und BETRIEBSORDNUNG (EBO) vom 8. Mai 1967 (BGBl. 1967 II S. 1563), die zuletzt durch Artikel 2 der Verordnung vom 5. April 2019 (BGBl. I S. 479) geändert worden ist [online]. Berlin: Bundesministerium der Justiz und für Verbraucherschutz [Zugriff am 17.12.2021]. Verfügbar unter: <https://www.gesetze-im-internet.de/ebo/BJNR215630967.html>
- [11] INTERESSENGEMEINSCHAFT INNTAL 2040, 2020. *Verknüpfungsstelle im Tunnel*
- [12] DB NETZ AG, 2020. *Stellungnahme zur Trassenidee „Verknüpfungsstelle im Tunnel“ der Interessengemeinschaft Inntal 2040* [online]. Frankfurt: DB Netz AG [Zugriff am: 24.11.2021]. Verfügbar unter: https://www.brennernordzulauf.eu/publikationen.html?file=files/mediathek/publikationen/2020-10-06-Stellungnahme_zur_Trassenidee_Verknuepfungsstelle_im_Tunnel.pdf&cid=1268
- [13] BUNDESSTELLE FÜR EISENBAHNUNFALLUNTERSUCHUNG, 2021. *Abfrage relevanter Ereignisse im Schienenverkehr*. Bonn: Bundesstelle für Eisenbahnunfalluntersuchung. Internes Dokument
- [14] RP DIGITAL GMBH, 2010. *ICE verliert Tür in voller Fahrt* [online]. *Experten haben Fehler gefunden*. Düsseldorf: RP Digital GmbH [Zugriff am: 07.12.2021]. Verfügbar unter: https://rp-online.de/panorama/deutschland/experten-haben-fehler-gefunden_aid-12880675
- [15] DVV MEDIA GROUP GMBH, 2019. *Mehrere Auflieger waren bei Zugunglück in Dänemark lose* [online]. Hamburg: DVV Media Group GmbH [Zugriff am: 07.12.2021]. Verfügbar unter: <https://www.dvz.de/rubriken/land/schiene/detail/news/untersuchungsbericht-mehrere-auflieger-waren-bei-zugunglueck-in-daenemark-lose.html>
- [16] BUNDESSTELLE FÜR EISENBAHNUNFALLUNTERSUCHUNG, 2000. *Hannover-Langenhagen*. [online] *Zugkollision*. Bonn: Bundesstelle für Eisenbahnunfalluntersuchung. [Zugriff am: 07.12.2021]. Verfügbar unter: https://www.eisenbahn-unfalluntersuchung.de/EUB/DE/Service/Impressum/impressum_node.html;jsessionid=161252DD6D3CDC1B172C0E811B26BE5E.live21304
- [17] BUNDESSTELLE FÜR EISENBAHNUNFALLUNTERSUCHUNG, 2010. *Landrückentunnel*. [online] *Zugkollision*. Bonn: Bundesstelle für Eisenbahnunfalluntersuchung. [Zugriff am: 07.12.2021]. Verfügbar unter: https://www.eisenbahn-unfalluntersuchung.de/SharedDocs/Downloads/EUB/Untersuchungsberichte/2008/014_LandruECKentunnel.html
- [18] NORDDEUTSCHER RUNDFUNK, 2020. *ICE-Unglück in Eschede: Eine Katastrophe und ihre Folgen*. [online] Hamburg: Norddeutscher Rundfunk. [Zugriff am: 07.12.2021]. Verfügbar unter:

<https://www.ndr.de/geschichte/schauplaetze/Zugunglueck-in-Eschede-Katastrophe-mit-101-Toten,eschede18.html>

- [19] VERLAG DER TAGESSPIEGEL GMBH, 2013. *Zugunglück in Spanien*. [online] *Lokführer gibt Tempoüberschreitung zu*. Berlin: Verlag Der Tagesspiegel GmbH. [Zugriff am: 07.12.2021]. Verfügbar unter: <https://www.tagesspiegel.de/gesellschaft/panorama/zugunglueck-in-spanien-lokfuehrer-gibt-tempoueberschreitung-zu/8544776.html>
- [20] SÜDDEUTSCHE ZEITUNG GMBH, 2015. *Mindestens zehn Tote bei TGV-Unglück im Elsass*. [online] München: Süddeutsche Zeitung GmbH. [Zugriff am: 07.12.2021]. Verfügbar unter: <https://www.sueddeutsche.de/panorama/unfall-mindestens-zehn-tote-bei-tgv-unglueck-im-elsass-1.2737584>
- [21] SCHNEIDER, Ulrich und HORVATH, Johannes, 2006. *Brandschutz-Praxis in Tunnelbauten: Brandverhalten, Brandschutzmaßnahmen, Sanierung*. 1. Auflage. Berlin: Bauwerk Verlag. ISBN 3-89932-037-9
- [22] EUROPÄISCHE KOMMISSION, 2014. *Verordnung (EU) Nr. 1303/2014 der Kommission vom 18. November 2014 über die technische Spezifikation für die Interoperabilität bezüglich der „Sicherheit in Eisenbahntunneln“ im Eisenbahnsystem der Europäischen Union* [online]. Brüssel: Europäische Kommission [Zugriff am 21.12.2021]. Verfügbar unter: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/de/TXT/?uri=CELEX%3A32014R1303>
- [23] EUROPÄISCHE KOMMISSION & GENERALDIREKTION MOBILITÄT UND VERKEHR, 2019. *Durchführungsverordnung (EU) 2019/776 der Kommission vom 16. Mai 2019* [online]. Brüssel: Europäische Kommission & Generaldirektion Mobilität und Verkehr [Zugriff am 21.12.2021]. Verfügbar unter: https://eur-lex.europa.eu/eli/reg_impl/2019/776/oj/deu
- [24] EISENBAHN-BUNDESAMT (EBA), 2008. *Richtlinie Anforderungen des Brand- und Katastrophenschutzes an den Bau und den Betrieb von Eisenbahntunneln (EBA-Tunnelrichtlinie), Stand 01.07.2008* [online]. Bonn: Eisenbahn-Bundesamt [Zugriff am 07.12.2021]. Verfügbar unter: https://www.eba.bund.de/SharedDocs/Downloads/DE/Infrastruktur/Tunnelbau/21_rl_tunnelbau.html
- [25] ALLGEMEINES EISENBAHNGESETZ (AEG) vom 27. Dezember 1993 (BGBl. I S. 2378, 2396; 1994 I S. 2439), das zuletzt durch Artikel 10 des Gesetzes vom 10. September 2021 (BGBl. I S. 4147) geändert worden ist [online]. Berlin: Bundesministerium der Justiz und für Verbraucherschutz [Zugriff am 17.12.2021]. Verfügbar unter: https://www.gesetze-im-internet.de/aeg_1994/
- [26] EUROPÄISCHES PARLAMENT & RAT DER EUROPÄISCHEN UNION, 2016. *Richtlinie (EU) 2016/798 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 11. Mai 2016 über Eisenbahnsicherheit* [online]. Straßburg & Brüssel: Europäisches Parlament & Rat der Europäischen Union [Zugriff am 21.12.2021]. Verfügbar unter: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/ALL/?uri=CELEX%3A32016L0798>

- [27] BRENNER BASISTUNNEL BBT SE, 2021. *BBT Brenner Basistunnel* [online]. Innsbruck: Brenner Basistunnel BBT SE [Zugriff am: 15.12.2021]. Verfügbar unter: <https://www.bbt-se.com/>
- [28] WIKIMEDIA FOUNDATION INC., 2021. *Bahnanlagen im Raum Innsbruck* [online]. San Francisco: Wikimedia Foundation Inc. [Zugriff am: 15.12.2021]. Verfügbar unter: https://de.wikipedia.org/wiki/Umfahrung_Innsbruck#/media/Datei:Bahnanlagen_im_Raum_Innsbruck.jpg
- [29] TEUSCHER, P. und AESCHBACH, M., 2013. Lötschberg Basistunnel. In: *Beton- und Stahlbau Spezial 2013 - Europas Lange Tunnel*. **108**, S. 3-14. Verfügbar unter: DOI: 10.1002/best.201380003
- [30] BLS AG, 2011. *NEAT Lötschberg - Bauwerk, Betrieb und Verkehrsangebot*. Bern: BLS AG
- [31] CH REGIONALMEDIEN AG, 2018. *ÖV: SBB schaffen Grundlagen für Zimmerberg*. [online] Luzern: CH Regionalmedien AG [Zugriff am: 29.11.2021]. Verfügbar unter: <https://www.luzernerzeitung.ch/zentralschweiz/zug/oev-sbb-schaffen-grundlagen-fuer-zimmerberg-ld.123637>
- [32] BRUX, G., 2000. Bahn 2000: 2. Doppelspur Zürich - Thalwil. In: *EI - Der Eisenbahningenieur*. **51**(11), S. 67-72. ISSN 0013-2810
- [33] MÜLLER, C. und BÄCHLI, K., 2003. 2. Doppelspur Zürich - Thalwil. In: *EI - Der Eisenbahningenieur*. **54**(8), S. 73-76. ISSN 0013-2810
- [34] FILIPPINI, Raffaele, 2004. Notausstiege (Baulos 9.01) - Vom Entwurf bis zum Ausführungsprojekt. In: Projektmanagement Zimmerberg, SBB, Hrsg. *Der Zimmerberg-Basistunnel*. Zürich: Basler & Hofmann, Ingenieure und Planer AG. S. 222-227. ISBN 3-033-00226-9
- [35] PECHHACKER, Andreas, 2009. Teilinbetriebnahme der "Verknüpfung Westbahn" im Lainzer Tunnel. In: *ETR - Eisenbahntechnische Rundschau*. **58**(3), S. 130-133. ISSN 0013-2845
- [36] VAVROVSKY, Georg M., KOHL, Bernhard und NEUMANN, Christoph, 2003. Self Rescue in the Wienerwald Tunnel. In: *Proceedings of the Fifth International Conference on Safety in Road and Rail Tunnels*. Marseille, 2003. S. 523-535. Verfügbar unter: https://www.ilf.com/?jsonp_callback=jQuery111002538204339058837_1636983002935&download-id=11147
- [37] OBERMEIER, Oskar und ZWITTNIG, Gerald, 2010. Neubaustrecke Wien - St. Pölten; Projektmanagement vom Rohbau zur Inbetriebsetzung. In: *ETR - Eisenbahntechnische Rundschau*. **59**(9), S. 47-55. ISSN 0013-2845
- [38] VETSCH, Hans-Peter, 2012. Betrieb und Sicherheitsmaßnahmen im Gotthard-Basistunnel. In: *EI - Der Eisenbahningenieur*. **62**(8), S. 68-70. ISSN 0013-2810

- [39] SIMONI, Renzo, 2013. Gotthard-Basistunnel - Der längste Tunnel der Welt. In: *Beton- und Stahlbetonbau Spezial* 2013. **108**, S. 15-24. Verfügbar unter: <https://doi.org/10.1002/best.201380002>
- [40] LUDWIG ELKUCH AKTIENGESELLSCHAFT, 2021. *Sonderkonstruktionen für aussergewöhnliche Situationen* [online]. *Spurwechseltor für Bahntunnel*. Bendorf: Ludwig Elkuch Aktiengesellschaft. [Zugriff am: 15.12.2021]. Verfügbar unter: <http://www.elkuch.com/home/Tunnel-Kraftwerk/Sonderkonstruktionen.htm>
- [41] WIKIMEDIA FOUNDATION INC., 2021. *Bahnstrecke Kufstein–Innsbruck* [online]. San Francisco: Wikimedia Foundation Inc. [Zugriff am: 15.12.2021]. Verfügbar unter: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Bahnstrecke_Kufstein%E2%80%93Innsbruck.png
- [42] DB NETZ AG & ÖBB-INFRASTRUKTUR AG, 2019. *Brenner-Nordzulauf Projektvorstellung und aktueller Stand* [online]. Frankfurt & Wien: DB Netz AG & ÖBB-Infrastruktur AG [Zugriff am: 15.12.2021]. Verfügbar unter: https://www.bahnjournalisten.ch/files/anlaesse/referate/20190605_BNZ_Projektvorstellung_V3%5b2851%5d.pdf
- [43] SAISCHEK, Michael, 2007. Die neue Unterinntalbahn - Eisenbahntechnik auf höchstem Niveau, Kundl-Baumkirchen. Innsbruck: Brenner Eisenbahn GmbH. Bericht
- [44] ÖBB, 2012. *Neue Unterinntalbahn: Zahlen - Daten - Fakten*. Wien: ÖBB
- [45] PELLIZZARI, Martin, 2013. *Der Brennerbasistunnel und die österreichischen Zulaufstrecken. Projektstand und Öffentlichkeitsarbeit*[PowerPoint-Präsentation]. ÖBB Infrastruktur AG, 12.04.2013
- [46] FORUM INFORMATIONSFREIHEIT, 2020. *Überholbahnhof Vomp, Ausbau - Planung Fahrbahn* [online]. Wien: Forum Informationsfreiheit [Zugriff am: 15.12.2021]. Verfügbar unter: <https://offenevergaben.at/auftr%C3%A4ge/55937>
- [47] LUNARDI, P., CASSANI, G. und MEISTRO, N., 2019. Milan to Genoa high speed/capacity railway: The Italian section of the Rhine-Alpine corridor. In: Peila, Viaggiani & Celestino Hrsg. *Tunnels and Underground Cities: Engineering and Innovation meet Archeology, Architecture and Art*. London, Taylor & Francis Group, S. 3968-3978. ISBN 978-1-138-38865-9
- [48] FOCARACCI, A. und MEISTRO, N., 2019. "Terzo Valico dei Giovi, Italy": Safety and equipment innovative measures. In: *Tunnels and Underground Cities: Engineering and Innovation meet Archeology, Architecture and Art*, London, Taylor & Francis Group, S. 4821-4830. ISBN 978-1-138-38865-9

- [49] BUFALINI, Maurizio, DATI, Gianluca, ROCCA, Manuela und SCEVAROLI, Riccardo, 2017. The Mont Cenis Base Tunnel. In: *Geomechanic and Tunnelling*. **10**(3), S. 246-255. Verfügbar unter: <https://doi.org/10.1002/geot.201700009>
- [50] POTI, P. und CHABERT, A., 2019. Regulatory framework and railway safety approval procedures in a binational context - the example of the Montcenis base tunnel. In: Peila, Viaggiani & Celestino Hrsg. *Tunnels and Underground Cities: Engineering and Innovation meet Archeology, Architecture and Art*. London, Taylor & Francis Group, S. 4538-4546. ISBN 978-1-138-38865-9
- [51] BRINO, Lorenzo, LUCHETTI, Elena, CHABERT, Alain und RETTIGHIERI, Marco, 2013. Der Basistunnel Lyon-Turin: Technische Aspekte eines großen grenzüberschreitenden Projekts. In: *Beton- und Stahlbetonbau Spezial 2013*. **108**, S. 43-49. Verfügbar unter: <https://doi.org/10.1002/best.201380001>
- [52] KONSORTIUM BEOBACHTUNGSSTELLE, 2021. *Beobachtungsstelle Brenner Basistunnel - BBT-Infopoint*. Franzensfeste: Konsortium Beobachtungsstelle. [Zugriff am: 15.12.2021]. Verfügbar unter: <https://www.bbtinfo.eu/brenner-basistunnel/>
- [53] NYFELER, S. und REINKE, P., 2019. Ventilation of tunnels and cross-passages of the Ceneri Base Tunnel and similar projects. In: Peila, Viaggiani & Celestino Hrsg. *Tunnels and Underground Cities: Engineering and Innovation meet Archeology, Architecture and Art*. London, Taylor & Francis Group, S. 4942-4951. ISBN 978-1-138-38865-9
- [54] MERLINI, Davide, STOCKER, Daniele, FALANESCA, Matteo und SCHUERCH, Roberto, 2018. The Ceneri Base Tunnel: Construction Experience with the Southern Portion of the Flat Railway Line Crossing the Swiss Alps. In: *Engineering*. **4**(2), S. 235-248. Verfügbar unter: <https://doi.org/10.1016/j.eng.2017.09.004>
- [55] ALPTRANSIT GOTTHARD AG, 2021. *AlpTransit* [online]. Luzern: AlpTransit Gotthard AG [Zugriff am: 24.11.2021]. Verfügbar unter: <https://www.alptransit.ch/de/home/>
- [56] EUROPÄISCHE KOMMISSION, 2021. *Trans-European Transport Network TENtec* [online]. Brüssel: Europäische Kommission [Zugriff am: 23.11.2021]. Verfügbar unter: https://ec.europa.eu/transport/infrastructure/tentec/tentec-portal/site/index_en.htm
- [57] DB NETZ AG, 2021. Brenner-Nordzulauf - Visualisierung Ostermünchen – Schafteu. In: *YouTube* [online]. 13.04.2021 [Zugriff am: 24.11.2021]. Verfügbar unter: https://www.youtube.com/watch?v=_FDljRyhaDU

Glossar

ETCS

ETCS steht für „European Train Control System“. Dabei handelt es sich um ein europäisches Zugsicherungssystem, welches langfristig die nationalen Zugbeeinflussungssysteme in Europa ablösen soll zum Zwecke der umfassenden Interoperabilität.

Fahrstraße

Als Fahrstraße wird bei der Eisenbahn ein mittels technischer Vorrichtungen abgesicherter Weg entlang von Gleisen bezeichnet, der auf Grundlage eines Fahrbefehls/einer Fahrerlaubnis befahren werden darf. Bei der Einstellung des Fahrweges wird eine geeignete Schienenverbindung zwischen zwei Punkten (z. B. Signalen) ausgewählt und nach dem Stellen aller Weichen verschlossen (gesichert), damit es nicht zu einer unbeabsichtigten Betätigung von Weichen unter fahrenden Fahrzeugen/Zügen kommen kann. Die Einstellung und Sicherung einer Fahrstraße ist eine wesentliche Voraussetzung dafür, dass Signale vom Halt- auf einen Fahrbegriff wechseln können. Die Einstellung von Fahrwegen umfasst auch den Ausschluss von Fahrten, die den eingestellten Fahrweg kreuzen könnten (Flankensicherung).

Führerstandssignalisierung

Unter „Führerstandssignalisierung“ wird von den Autoren die displaybasierte, kontinuierliche Anzeige von zulässiger Geschwindigkeit und Länge des freien vorausliegenden Streckenabschnittes verstanden, die durch die permanente Fahrzustandsüberwachung mittels geeigneter Sicherungstechnik (z. B. LZB oder ETCS Level 2 oder höher) ermöglicht wird.

Gegengleis

Als „Gegengleis“ wird auf zweigleisigen Strecken das Gleis bezeichnet, auf dem jeweils die entgegengerichteten Züge verkehren. In Deutschland ist dies das in Fahrtrichtung linke Gleis. Bei einem Wechsel der Fahrtrichtung wird das Gegengleis zum →Regelgleis. In Ausnahmefällen verkehren Züge unter Beibehaltung ihrer Fahrtrichtung auf dem Gegengleis. Dazu sind Überleitstellen und eine entsprechende Signalisierung nötig.

Lüftungssystem/Lüftungsanlage

Die Begriffe „Lüftungsanlage“ und „Lüftungssystem“ werden in dieser Studie synonymisch verwendet. Beide bezeichnen ein System von Ventilatoren (Lüftern), Lüftungskanälen bzw. -schächten, Klappen und Vorrichtungen zur Leitung bzw. Lenkung von Luftströmungen sowie die dazugehörigen Überwachungs- und Steuereinrichtungen. Lüftungsanlagen dienen dazu, durch den gezielten Aufbau von Unterdruck (Entlüftung) oder Überdruck (Belüftung) eine Luftströmung zu erzeugen und somit einen Luftaustausch zu erzwingen. Rauch, Dämpfe und Gase können so ab- und weggeleitet werden.

Tunnel

Tunnel sind Ingenieurbauwerke, die Gleise in Längsrichtung auf vier Seiten (links, rechts, oben, unten) umschließen und damit eine feste Röhre bilden, die mehr als 500 Meter lang sein muss, um als Tunnel zu gelten [24].

Lange Tunnel

Alle Eisenbahntunnel mit einer **Länge größer als 1.000 Meter und kleiner als 20.000 Meter** gelten gemäß der EBA-Tunnelrichtlinie („Anforderungen des Brand- und Katastrophenschutzes an den Bau und den Betrieb von Eisenbahntunneln“, Stand: 01.07.2008) als „lange Tunnel“ [24].

Sehr lange Tunnel

Alle Eisenbahntunnel **ab einer Länge von 20.000 Metern** gelten nach EBA-Tunnelrichtlinie („Anforderungen des Brand- und Katastrophenschutzes an den Bau und den Betrieb von Eisenbahntunneln“, Stand: 01.07.2008) als „sehr lange Tunnel“. Für diese gelten wegen der vergleichsweise langen unterirdischen Fahrdauer der Züge besondere Sicherheitsmaßnahmen.

Regelgleis

Als „Regelgleis“ wird auf zweigleisigen Eisenbahnstrecken das Gleis bezeichnet, das in der Regel von den Zügen einer bestimmten Fahrtrichtung befahren wird. In Deutschland herrscht bei der Eisenbahn Rechtsverkehr, weshalb das Regelgleis das in Fahrtrichtung rechte Gleis ist. In anderen europäischen Ländern, wie zum Beispiel Frankreich (mit Ausnahme des Elsass) oder der Schweiz ist auf Eisenbahngleisen Linksverkehr üblich, sodass in diesen Fällen das in Fahrtrichtung linke Gleis als „Regelgleis“ bezeichnet werden müsste.

Signalverfehlung

Von einer „Signalverfehlung“ wird gesprochen, wenn ein Fahrzeug oder ein Zug ohne Erlaubnis ein „Halt!“-zeigendes Signal passiert. Ob dies seitens der Triebfahrzeugpersonale willentlich oder unwillentlich bzw. fahrzeugseitig fahrend (rollende Räder) oder rutschend (blockierte Räder, rutschige Schienenköpfe) passiert, ist dabei unerheblich.

Spurkanal

Die Spurweite der Gleise und das Spurmaß der Radsätze weichen um einige Millimeter voneinander ab, sodass eine gewisse Querverschiebbarkeit des Radsatzes im Gleis möglich ist. Diese ist für eine sichere und verschleißarme Spurführung unabdingbar. Der Bereich, innerhalb dessen sich der Radsatz im Gleis während der Fahrt quer zur Fahrtrichtung bewegen kann, ohne dass es zu einer Entgleisung (eingeleitet durch das „Aufklettern“ der Spurkränze an der Schienenkopfflanke) kommt, wird „Spurkanal“ genannt.

TEN

Die Abkürzung „TEN“ steht für Trans-European Networks. Dieses Transeuropäische Netzwerk umfasst verschiedene Infrastrukturen, die einer verbesserten Integration der Europäischen Union dienen sollen. Im Schienenverkehr werden damit Eisenbahnstrecken bezeichnet, die eine besondere Bedeutung für den Schienenverkehr in der Europäischen Union haben. Sie verlaufen in einem von insgesamt neun Korridoren, innerhalb derer Straßen, Schienenwege und Wasserstraßen prioritär ausgebaut werden sollen.

Anhang

Tabelle A.1: Übersicht der untersuchten europäischen Tunnelbauwerke und ihrer Eigenschaften

Nr	Tunnel	Strecke	Land	Länge [m]	Tunneltyp	Gleise	Tunnel röhren	Inbetriebnahme	Betriebsart	Ausfädelung (Weichen): Abzweigstelle/Überleitstelle	weitere Sicherheitsmaßnahmen	Abst. Notausgänge/ Querstellen	Verweis
1	Albabbstiegstunnel	NBS Wendlingen-Ulm	DE	5.940	Einspurtunnel	2	2	im Bau (2022)	Mischverkehr	nein			
2	Angerbergstunnel	Neue Unterinntalbahn	AT	11.500	Doppelspurtunnel	2	1	in Planung (2032)	Mischverkehr	nein	Alle 500m Ausstiege ins Freie; dort wo nicht möglich, parallel verlaufender Rettungstunnel	500 m	siehe Kap. 6.2.7
3	Bleßbergstunnel	Ebensfeld-Erfurt (VDE 8.1)	DE	8.325	Doppelspurtunnel	2	1	2014	Mischverkehr mit TBV	nein	Tunnelbegegnungsverbot		
4	Brenner Basistunnel	Innsbruck-Verona	AT/IT	55.000	Einspurtunnel	2	2	im Bau (2027)	Mischverkehr	Überleitstelle	Spurwechsellore im Bereich der Überleitstellen	333 m	siehe Kap. 6.2.10
5	Ceneri-Basistunnel	Neue Eisenbahn-Alpentransversale (NEAT)	CH	15.450	Einspurtunnel	2	2	2020	Mischverkehr	Abzweig- und Überleitstellen	Lüftungssystem	325 m	siehe Kap. 6.2.11
6	City-Tunnel Leipzig	Leipzig	DE	3.187	Einspurtunnel	2	2	2013	Nur Personenverkehr	Abzweig- und Überleitstellen			
7	Euro-Tunnel	Calais-Folkstone	UK/FR	50.450	Einspurtunnel	3	3	1993	Mischverkehr	nein			
8	Fehmarnbeltstunnel	Hamburg-Kopenhagen	DE/DK	17.600	Einspurtunnel	2	2	in Planung (2029)	Mischverkehr	nein			
9	Fildertunnel	Stuttgart 21	DE	9.468	Einspurtunnel	2	2	im Bau (2026)	Nur Personenverkehr	im Bahnhofsvorfeld			
10	Firenze-Tunnel	Bologna-Florenz	IT	15.285	Einspurtunnel	2	2	2009	Mischverkehr	nein			
11	Gotthard-Basistunnel	Neue Eisenbahn-Alpentransversale (NEAT)	CH/IT	57.104	Einspurtunnel	2	2	2016	Mischverkehr	Überleitstellen	Spurwechsellore im Bereich der Überleitstellen	300 m	siehe Kap. 6.2.6
12	Guadarrama-Tunnel	Madrid-Valladolid	ES	28.413	Einspurtunnel	2	2	2007	Nur Personenverkehr	nein			
13	Hallandsas Tunnel	Västskustbana	SE	8.722	Einspurtunnel	2	2	2015	Mischverkehr	nein			
14	Inntaltunnel	Südfahrt Innsbruck	AT	12.696	Doppelspurtunnel	2	1	1994	Mischverkehr	Abzweig- und Überleitstellen	paralleler Rettungstunnel	333 m	siehe Kap. 6.2.2
15	Katzenbergstunnel	Karlsruhe-Basel	DE	9.385	Einspurtunnel	2	2	2012	Mischverkehr	nein			
16	Koralmtunnel	Graz-Klagenfurt	AT	32.893	Einspurtunnel	2	2	im Bau (2026)	Mischverkehr	nein			
17	Lainzer Tunnel	Wien	AT	9.434	Doppelspurtunnel	2	1	2012	Mischverkehr	Abzweig- und Überleitstellen (Weichenhalle Hadersdorf)	Lüftungssystem	Notausstiege ins Freie im Bereich der Weichenhalle	siehe Wienerwaldtunnel, siehe Kap. 6.2.5
18	Landrückentunnel	Hannover-Würzburg	DE	10.779	Doppelspurtunnel	2	1	1986	Mischverkehr mit TBV	nein	Tunnelbegegnungsverbot		
19	Antigoontunnel	Antwerpen	BE	6.750	Einspurtunnel	2	1	2014	Güterverkehr	nein			
20	Lötschberg-Basistunnel	Neue Eisenbahn-Alpentransversale (NEAT)	CH	34.576	Einspurtunnel	1 (2)	1 (2)	2007	Mischverkehr	Überleitstellen	-	333 m	siehe Kap. 6.2.3
21	Madrid AVE Tunnel	Madrid (Stadtgebiet)	ES	7.310	Doppelspurtunnel	2	1	2019	Nur Personenverkehr	nein			
22	Mont Cenis Basistunnel	Lyon-Turin	FR/IT	57.500	Einspurtunnel	2	2	im Bau (2030)	Mischverkehr	Abzweig-, Überleit und Überholstellen	Lüftungssystem	333 m	siehe Kap. 6.2.9
23	Münsterertunnel	Neue Unterinntalbahn	AT	15.990	Doppelspurtunnel	2	1	2012	Mischverkehr	nein	Alle 500m Ausstiege ins Freie; dort wo nicht möglich, parallel verlaufender Rettungstunnel	500 m	siehe Kap. 6.2.7
24	Obertürkheim Tunnel	Stuttgart 21	DE	5.730	Einspurtunnel	2	1	im Bau (2025)	Nur Personenverkehr	im Bahnhofsvorfeld			
25	Provenca Tunnel	Barcelona	ES	5.780	Doppelspurtunnel	2	1	2013	Nur Personenverkehr				
26	Schlernstunnel	Brennerbahn Südtirol	IT	13.159	Doppelspurtunnel	2	1	1994	Mischverkehr	Überleitstellen			
27	Semmering-Basistunnel	Südbahn (Wien-Graz)	AT	27.300	Einspurtunnel	1	2	im Bau (2028)	Mischverkehr	nein			
28	Siebergstunnel	Westbahn (Wien-Linz)	AT	6.480	Doppelspurtunnel	2	1	2001	Mischverkehr	nein			
29	Terfnerstunnel	Neue Unterinntalbahn	AT	15.840	Doppelspurtunnel	2	1	2012	Mischverkehr	aktuell Planung des Überholbahnhofs Vomp	Alle 500m Ausstiege ins Freie; dort wo nicht möglich, parallel verlaufender Rettungstunnel	500 m	siehe Kap. 6.2.7
30	Tunnel de Marseille	Marseille	FR	7.834	Doppelspurtunnel	2	1	2001	Nur Personenverkehr				
31	Vaglia-Tunnel	Bologna-Florenz	IT	18.713	Einspurtunnel	2	2	2009	Mischverkehr	nein			
32	Valico-Tunnel	Genova-Mailand	IT	27.250	Einspurtunnel	2	2	im Bau (2024)	Mischverkehr	Abzweigstellen	Lüftungssystem	500 m	siehe Kap. 6.2.8
33	Wienerwaldtunnel	Wien	AT	13.350	Doppelspurtunnel mit Übergang in Einspurtunnel	2	1 (2)	2012	Mischverkehr	Abzweig- und Überleitstellen (Weichenhalle Hadersdorf)	Lüftungssystem	Querstellen alle 500 m; Notausstiege ins Freie im Bereich der Weichenhalle	siehe Kap. 6.2.5
34	Zimmerberg-Basistunnel I	Zürich-Thalwil	CH	9.400	Doppelspurtunnel	2	1	2003	Mischverkehr	Abzweigstelle	Begegnungsvermeidung von PV und GV	980 m - 1.490 m	siehe Kap. 6.2.4

Legende	
	tiefergehende Untersuchung
	Ausschlusskriterium für Relevanz
	wegen Ausschluss nicht weiter untersucht