

Lange Eisenbahntunnel: Überlegungen zur Systemwahl – Rückblick und Vorausschau

Die historischen Eisenbahntunnel in den Alpen wurden nach dem Bau des Mont Cenis Tunnels (1871) konsequent in Form von einröhrigen Doppelspurtunneln gebaut. Einzig der 19,8 km lange Simplontunnel wurde anfangs des 20. Jahrhunderts mit zwei separaten Einspurröhren erstellt. 1988 wurde mit dem 53,8 km langen Seikan-Tunnel erstmalig ein über 50 km langer Eisenbahntunnel in Betrieb genommen – wiederum als Doppelspurtunnel, allerdings mit zusätzlichen konstruktiven Elementen wie Betriebslüftung, Nothaltestellen und einen Dienststollen. 1994 folgte der Eurotunnel mit einem System aus zwei Einspurtunneln und einem Service- bzw. Sicherheitsstollen sowie einem zusätzlichen komplexen Lüftungssystem. Für die Basistunnel durch die Alpen stellte sich in der Schweiz anfangs der 1990er-Jahre die Frage, welches das optimale Tunnelsystem unter Berücksichtigung der Anforderungen Bau, Sicherheit und Betrieb wäre. Aus einer Nutzwertanalyse resultierte das System mit zwei Einspurröhren sowie Multifunktionsstellen in den Drittelpunkten als Optimum. Mittlerweile wurden verschiedene Anforderungen neu formuliert, sodass sich die Frage stellt, ob mit den heutigen Kenntnissen die gleiche Entscheidung getroffen würde. Der Beitrag geht der Beantwortung dieser Frage nach.

1 Systementscheidungen in der Vergangenheit

In der Zeit von 1857 bis 1871 wurde der ursprünglich 12,8 km lange Mont Cenis Tunnel als erster langer Eisenbahntunnel in den Alpen in Form eines einröhrigen Doppelspurtunnels gebaut. Fast alle nachfolgenden langen Alpentunnel am Gotthard (1882, 15 km), am Aarberg (1884, 10,6 km) und am Lötschberg (1913, 14,6 km) verwendeten dieses System.

Einzig der 19,8 km lange Simplontunnel wurde anfangs des 20. Jahrhunderts aus ökonomischen Gründen mit zwei separaten Einspurröhren gebaut. 1906 ging die erste Röhre in Betrieb (Simplontunnel I). Der für den Baubetrieb notwendige 17 m danebenliegende Parallelstollen wurde in der Folge zur zweiten Fahrrohre (Simplontunnel II) erweitert und 1922 dem Betrieb übergeben. Der Simplontunnel war der erste lange Alpentunnel, der von Anfang an elektrisch betrieben wurde und blieb bis 1982 der längste Eisenbahntunnel der Welt (Bild 1).

1988 wurde mit dem 53,8 km langen Seikan-Tunnel erstmalig ein über 50 km langer Eisenbahntunnel dem kommer-

Long Rail Tunnels: Appraisal of Choice of System – A Review and Preview

Following the construction of the Mont Cenis Tunnel (1871), the historic rail tunnels in the Alps were almost all built in the form of single-tube double-track tunnels. The 19.8 km long Simplon Tunnel built at the beginning of the 20th century is the only tunnel that was built with two separate single-track tubes. In 1988, the 53.8 km long Seikan Tunnel – the first rail tunnel with a length of over 50 km – was put into operation; it is also a double-track tunnel, although with additional construction elements such as forced ventilation, emergency stops and a service gallery. In 1994, this was followed by the Channel Tunnel with a system consisting of two single-track tunnels and a service/safety gallery, as well as an additional complex ventilation system.

At the beginning of the 1990s, the question was raised in Switzerland as to which is the optimum tunnel system for base tunnels through the Alps, taking into account the requirements of construction, safety and operation. A cost-benefit analysis was carried out that revealed that the optimal system is one with two single-track tubes with multi-function facilities at the third-points. In the meantime, various requirements have been re-formulated so that the question arises as to whether the same decision would be made today, bearing in mind the current state of knowledge. The article attempts to answer this question.

ziellen Betrieb übergeben. Dieser verbindet unter der Tsugaru Meeresstraße die Inseln Hokkaido und Honshu und wurde wiederum als Doppelspurtunnel ausgebildet. Die Japaner brachten als neue Konstruktionselemente erstmalig ein Lüftungssystem in einen elektrisch betriebenen Eisenbahn-Tunnel sowie zwei Nothaltestellen auf der Höhe der „Ufer“ vor Unterquerung des Meers (Bild 2). Der Dienst- und Sicherheitsstollen wurde nur auf der Länge des Abschnitts unter dem Meer gebaut.

Parallel dazu hatten in Europa die Bauarbeiten zum 50,4 km langen Eurotunnel unter dem Ärmelkanal begonnen. Die Sicherheits-Anforderungen an diesen Tunnel übertrafen das gesamte bisher Dagewesene. Dementsprechend wurde der Tunnel mit einem System, bestehend aus zwei Einspurtunneln mit einem Service- bzw. Sicherheitsstollen sowie einem zusätzlichen komplexen Lüftungssystem realisiert (Bild 3). 1994 wurde der Eurotunnel in Betrieb genommen.

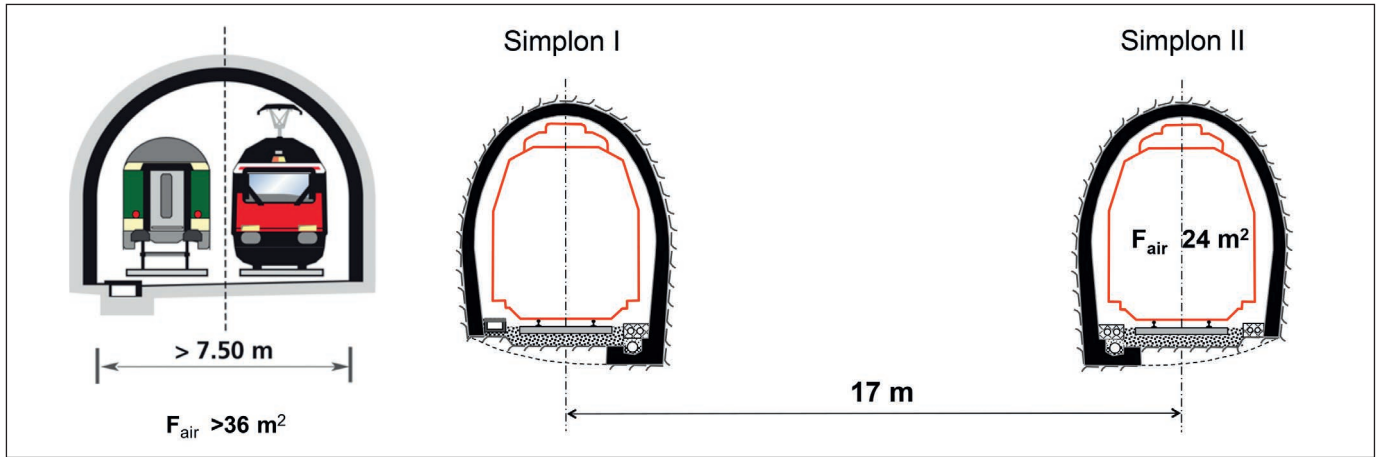


Bild 1 Tunnelquerschnitte des Gotthard Eisenbahntunnels (1882) (links, Bild ATG), Simplontunnel (1906/1922) (rechts)

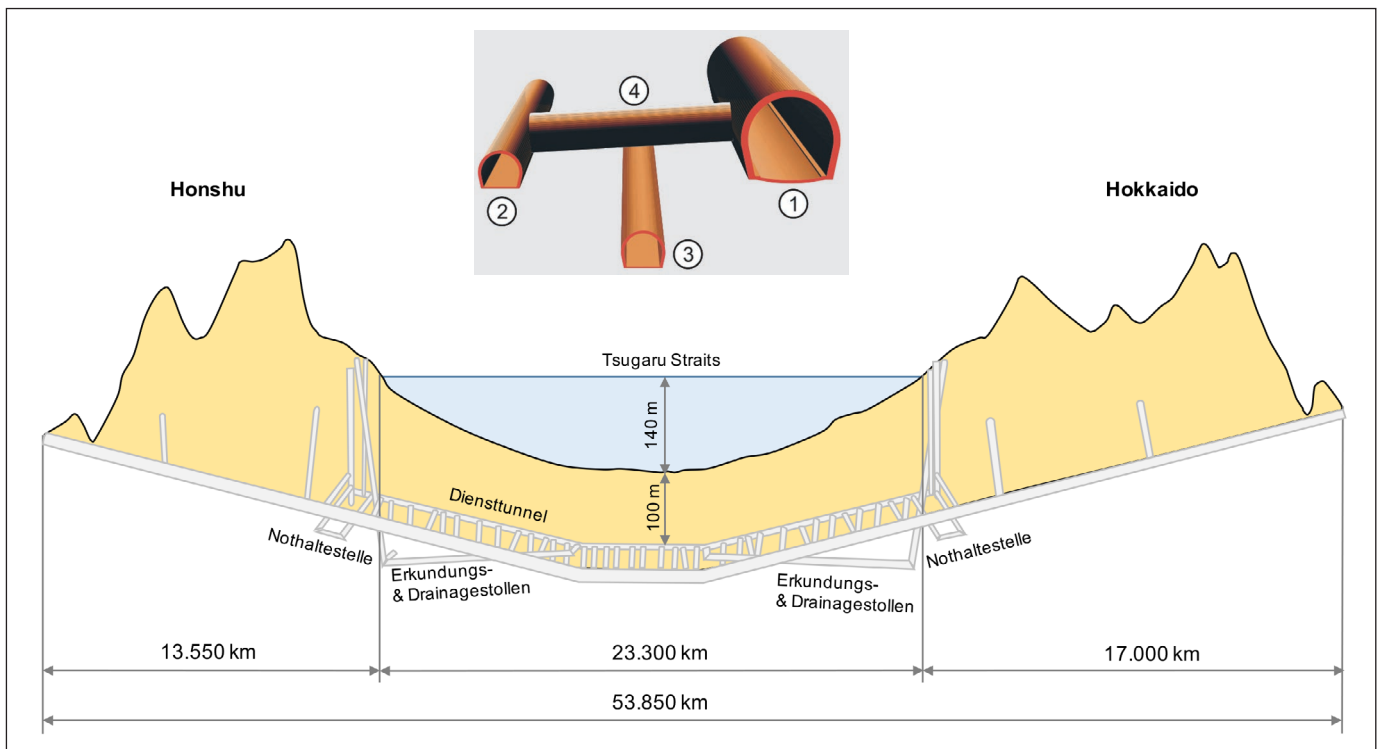


Bild 2 Tunnelsystem Seikan Tunnel (Japan), ① – Fahrrohre, ② – Diensttunnel, ③ – Erkundungsstollen, ④ – Verbindungsstollen (alle 600 m)

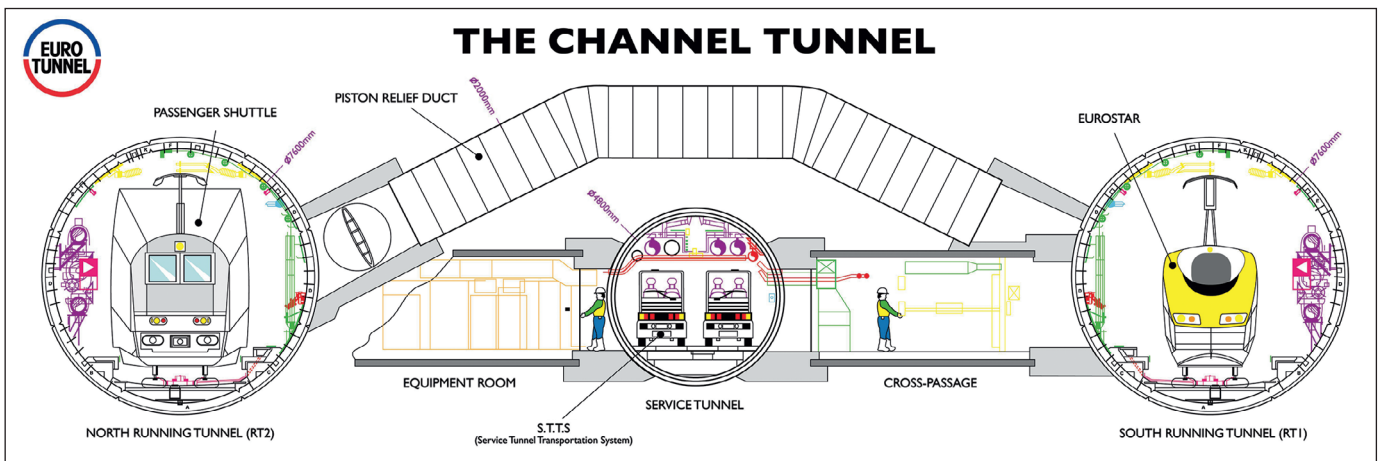


Bild 3 Tunnelsystem Euro Tunnel (Frankreich/UK) mit mittigem Servicetunnel und Querschlägen (alle 375 m) und Druckausgleichsverbindungen (Grafik: Eurotunnel)

2 Tunnelsysteme auf deutschen Neubaustrecken

Die Wahl des optimalen Tunnelsystems beschäftigte nicht nur die Ersteller sehr langer Eisenbahntunnel (> 20 km Länge), sondern auch die Verantwortlichen für die Erstellung diverser Neubaustrecken mit langen Tunneln (1 bis 20 km). So wurden und werden in Deutschland von 1973 bis heute über 140 Tunnel mit einer Gesamtlänge (Streckenlänge) von rund 320 km gebaut bzw. befinden sich teilweise noch im Bau. Die Länge der Tunnel variiert zwischen wenigen hundert Metern bis zum 10,8 km langen Landrückentunnel auf der Strecke Hannover–Würzburg (Tabelle 1).

Die am 1. Juli 1997 in Kraft getretene Richtlinie des Eisenbahnbundesamts (EBA) zu den „Anforderungen des Brand- und Katastrophenschutzes an den Bau und den Betrieb von Eisenbahntunneln“ verlangt zum Bau und Betrieb von Eisenbahntunneln [1]:

- Auf zweigleisigen Strecken sind bei langen und sehr langen Tunneln die Fahrtunnel als parallele, eingleisige Tunnel anzulegen, wenn das Betriebsprogramm einen uneingeschränkten Mischbetrieb von Reise- und Güterzügen vorsieht. In diesem Fall erfolgen die Flucht der Personen und der Einsatz der Rettungsdienste über Verbindungsstollen und die benachbarte Tunnelröhre.
- Bei zweigleisigen Tunneln dürfen fahrplanmäßige Begegnungen zwischen Reise- und Güterzügen nicht vorgesehen werden.

Für alle Tunnelsysteme gelten zudem folgende Forderungen:

- Von jeder Stelle eines Fahrtunnels muss ein sicherer Bereich in höchstens 500 m Entfernung erreichbar sein.
- Die Fahrbahn in Tunneln muss für Straßenfahrzeuge befahrbar sein, wenn bei parallel verlaufenden Tunnelröhren eine Rettung über die jeweils benachbarte Tunnelröhre vorgesehen ist.

Tabelle 1 Übersicht über die Tunnelbauten der HGV-Strecken in Deutschland

HGV-Strecke	Anzahl Tunnel	Typ	Gesamtlänge aller Tunnel	Baubeginn gesamte Strecke	Inbetriebnahme	Betriebsart
Hannover–Würzburg	62	Doppelspurtunnel	126,7 km	1984	1988	Mischverkehr mit Tunnelbegegnungsverbot
Mannheim–Stuttgart	14	Doppelspurtunnel	31,1 km	1976/1983	1991	Mischverkehr mit Tunnelbegegnungsverbot
Köln–Rhein–Main	24	Doppelspurtunnel	38,8 km	1995	2002	nur Personenfernverkehr
Ebensfeld–Erfurt (VDE 8.1)	22	Doppelspurtunnel	38,0 km	2003	2017	Mischverkehr mit Tunnelbegegnungsverbot
Erfurt–Halle/Leipzig (VDE 8.2)	3	Einspurtunnel	15,3 km	2008	2015	Mischverkehr
Wendlingen–Ulm	9	4 Einspurtunnel 5 Doppelspurtunnel	30,3 km	2013	2021	Mischverkehr
Stuttgart 21	4	Einspurtunnel	23,7 km	2013	2021	nur Personenverkehr
Karlsruhe–Basel	3	Einspurtunnel	15,6 km	...	2021	Mischverkehr

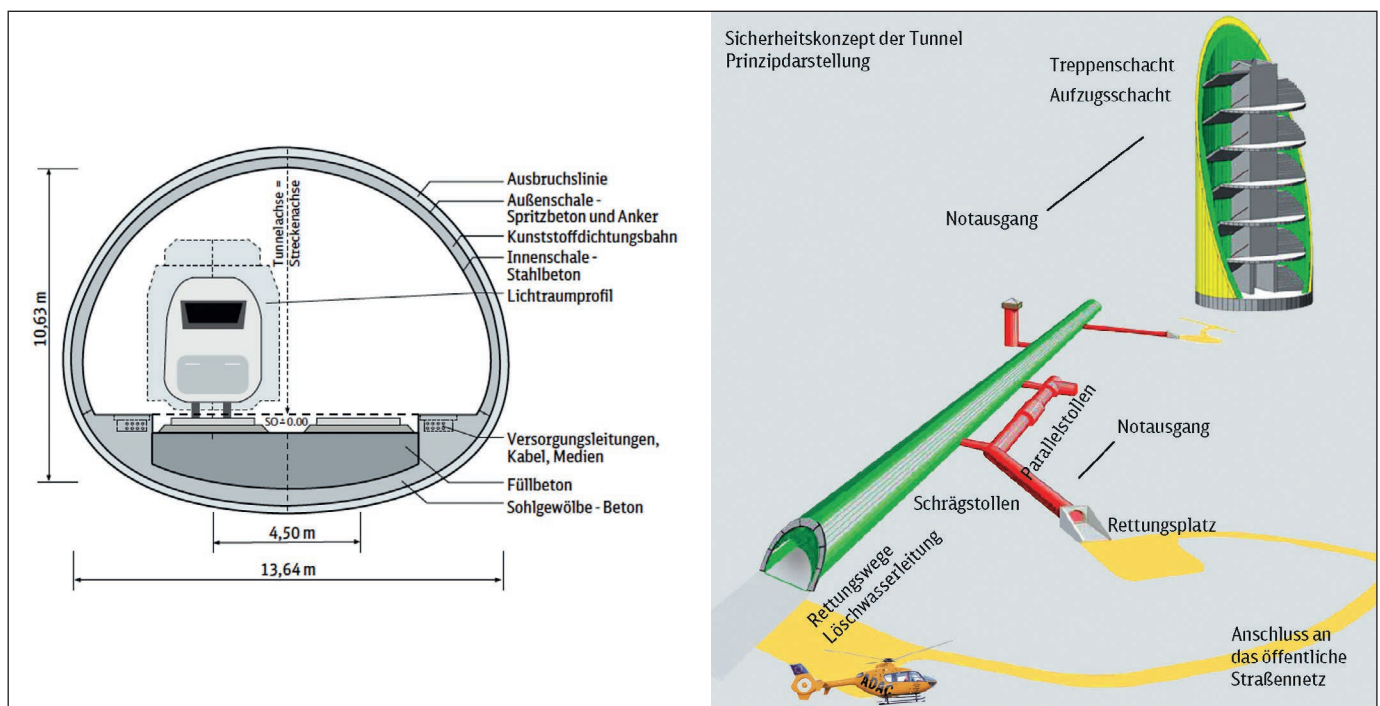


Bild 4 Tunnelsystem Tunnel Blesberg, Projekt VDE 8.1 (schematisch): Doppelspurtunnel mit acht Notausgängen einschließlich 2,5 km langem Parallelstollen für die Notausgänge 5 und 6 (Grafik: DB AG)

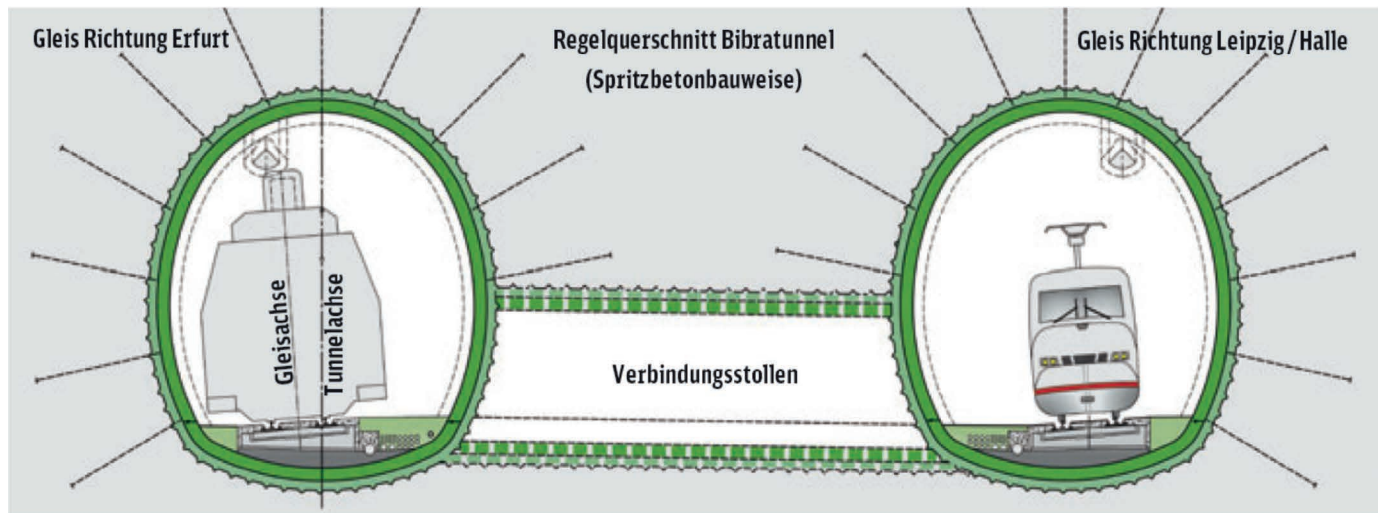


Bild 5 Tunnelsystem im Projekt VDE 8.2 (Erfurt–Halle/Leipzig) mit zwei Einspurtunneln (Grafik: DB AG)

Bei der Neubaustrecke Köln–Rhein/Main waren diese Bestimmungen erstmalig anzuwenden. Auch für die in der Planung weit fortgeschrittenen Tunnelbauten des Projekts VDE 8.1 (Ebensfeld–Erfurt) traf diese Forderung zu. In Abstimmung zwischen Bund, Ländern, dem Eisenbahn-Bundesamt und der Bahn wurde für die Neubaustrecke ein Konzept entwickelt, mit dem auf der Strecke ein gemischter Zugbetrieb auch bei doppelspurigen Tunnel durchgeführt werden kann. Dabei ist das seit 1997 geltende Tunnelbegegnungsverbot von Personen- und Güterzügen signaltechnisch sicherzustellen (Bild 4).

Bei den später in die Realisierung gekommenen langen Tunnelbauten auf der Neubaustrecke Erfurt–Halle/Leipzig (Projekt VDE 8.2) und den Tunnelbauten des Projekts Stuttgart–Ulm werden nun konsequent zwei Einspurröhren mit Verbindungsstollen gebaut (Bild 5). Den geänderten Sicherheitsanforderungen muss auf den älteren Hochgeschwindigkeitsstrecken über betriebliche Einschränkungen, dem sogenannten Tunnelbegegnungsverbot für Personen- und Güterzüge Rechnung, getragen werden.

3 Basistunnel durch die Alpen: Systementscheidung in der Schweiz (1993)

Seit Mitte der 60er-Jahre des letzten Jahrhunderts standen in der Schweiz verschiedene Projekte für lange Eisenbahnbasistunnel unter den Alpen zur Diskussion. 1975 stellten die Schweizerischen Bundesbahnen (SBB) dann ein Bauprojekt für einen 47 km langen Gotthard-Basistunnel zwischen Amsteg und Bodio vor, bestehend aus einem Doppelspurtunnel und einem seitlich liegenden Diensttunnel. Das Projekt wurde damals nicht weiter verfolgt, da der Transitverkehr infolge der wirtschaftlichen Lage in Europa zusammenbrach und sich zu jener Zeit der Gotthard-Straßentunnel im Bau befand. Die Dringlichkeit eines Basistunnels wurde seitens des Bundes daher negiert.

Nach der Eröffnung des Straßentunnels wuchs der Gütertransitverkehr durch die Schweiz stark an. Die EU verlangte gleichzeitig den Transitverkehr mit 40-t-Lastwagen zuzulassen. Die Antwort der Schweiz darauf war das Projekt der Neuen Eisenbahn-Alpentransversale. Im Herbst 1992 genehmigte das

Schweizer Volk den Alpentransit-Beschluss und damit die Schaffung zweier Transitachsen mit zwei langen Basistunneln auf der Gotthard- und der Lötschbergachse.

Im Gefolge der Volksentscheidung mussten die Projektverantwortlichen das optimale Tunnelsystem wählen. Da zu jener Zeit sowohl der Seikan-Tunnel als auch der Eurotunnel mit erheblichen wirtschaftlichen Schwierigkeiten zu kämpfen hatten, wurde für die schweizerischen Basistunnel eine Lösung gesucht, die unter Einhaltung der Betriebs- und Sicherheitsanforderungen vor allem minimale Investitionskosten sicherstellte. Das Abwägen zwischen Kosten und Nutzen verschiedenster denkbarer Varianten führte in der internationalen Fachwelt und in den nationalen Medien zu monatelangen Diskussionen.

Um die Systemfrage nachvollziehbar lösen zu können, wurde unter der Leitung des schweizerischen Bundesamts für Verkehr ein Fachgremium mit nationalen und internationalen Experten organisiert, das in der Lage war, die anstehende Entscheidung aufgrund von sachlichen Kriterien vorzubereiten. 1992/1993 fanden drei sogenannte Tunnel-Kolloquien statt, in denen die bestellten Experten einen sachlich nachvollziehbaren Vorschlag zum Tunnelsystem unter Berücksichtigung der Kriterien Bau, Betrieb und Sicherheit erarbeiteten. Die folgenden vier Untersuchungsfälle wurden dabei analysiert (Bild 6) [2]:

- Variante A: Doppelspurtunnel mit Diensttunnel (entspricht dem Bauprojekt 1975 der SBB und den meisten bisherigen langen Tunnelbauten)
- Variante B: Tunnelsystem mit zwei Einspurröhren und einem Diensttunnel (ähnlich der Eurotunnel-Lösung)
- Variante C: Drei Einspurröhren, um während der Erhaltung immer zwei Fahrrohre zur Verfügung zu halten
- Variante D: Zwei Einspurröhren ohne Diensttunnel, mit zwei Nothaltestellen (unterirdische Haltestelle) in den Drittelspunkten zur Evakuierung von Reisenden (Berücksichtigung des Kriteriums von 15 min Notlaufeigenschaften eines brennenden Zugs)

Das am Kanaltunnel verwendete System mit einem mittigen Diensttunnel wurde nicht weiter untersucht. Die Entscheidung, ob der Diensttunnel mittig oder seitlich angeordnet werden sollte, wäre erst nach der Systemfestlegung in einem Vorprojekt detailliert betrachtet worden.

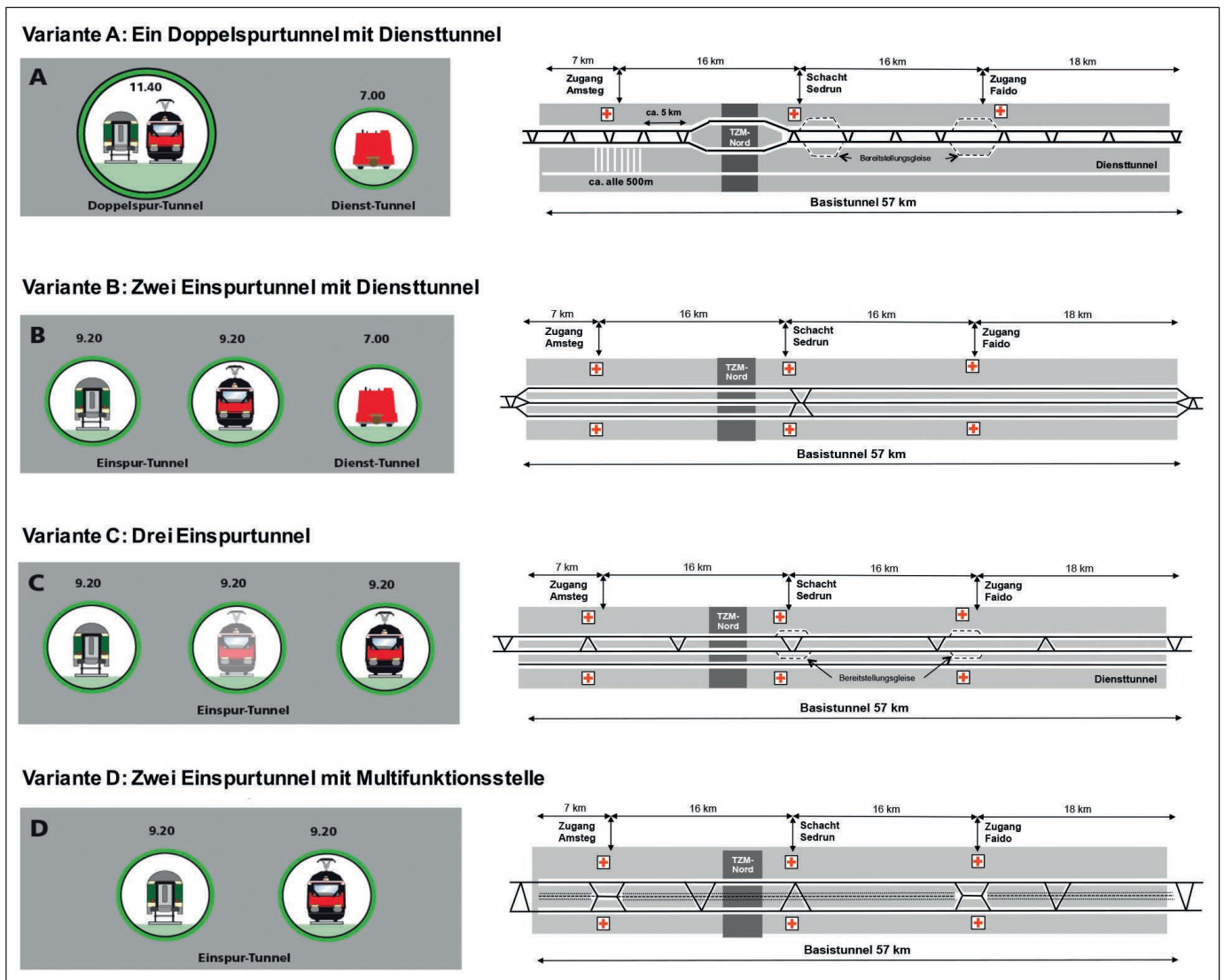


Bild 6 Untersuchte Systemvarianten am Beispiel des Gotthard-Basistunnels [2]

3.1 Methodik zur Entscheidungsfindung

Als Methodik zur Entscheidungsfindung im Variantenstudium wurde die sogenannte Nutzwertanalyse angewendet. Diese ist eine quantitative, nicht-monetäre Analyseverfahren der Entscheidungstheorie (Punkteverfahren, Scoring Modell). Dieses Verfahren hat dann Vorteile, wenn vorwiegend „weiche“ – also in Geldwert oder in sonstigen Zahlenwerten schlecht darstellbare – Entscheidungskriterien vorliegen. Die Nutzwertanalyse wird deshalb oft in den frühen Projektphasen eingesetzt, wenn die Projekt- und die Folgekosten noch wenig genau bekannt sind. Diese Situation traf zu Beginn der 1990er-Jahre für das AlpTransit-Projekt zu.

Die Vorteile dieser Methode liegen in der einfachen Behandlung komplexer Zusammenhänge, womit rasch eine direkte Vergleichbarkeit der Varianten erzielt werden kann. Nachteilig ist die Tatsache, dass insbesondere die Auswahl und Gewichtung der Kriterien starken subjektiven Einflüssen ausgesetzt sind.

Für die Basistunnel in der Schweiz wurde 1992/1993 das in der Tabelle 2 dargestellte Zielsystem verwendet. Für die Bewertung der einzelnen Kriterien wurde eine Notenskala von 1 (schlechteste Lösung) bis 10 (beste Lösung) gewählt. Zwischen den beiden Noten wurde in den meisten Fällen linear interpoliert.

Die Neigung der Interpolationsgeraden wurde für jedes Kriterium vom zuständigen und spezialisierten Bewertungsteam festgelegt (Bild 7).

3.2 Resultate der Nutzwertanalyse

Unter Anwendung der Nutzwertfunktionen ergaben sich bei einer theoretischen maximalen Punktzahl von jeweils 10 die in Tabelle 3 dargestellten Teilnutzwerte pro Oberziel. Betrachtet man die Zahlen in Tabelle 3 so erstaunt es wenig, dass die reine Doppelspurvariante (Variante A) bezüglich Betrieb und Sicherheit unterdurchschnittlich abschneidet, während Dreiröhrensysteme (Varianten B und C) bei diesen Kriterien, vor allem aber bei der Sicherheit ein signifikant höheres Niveau aufweisen.

Umgekehrt weisen die Dreiröhrensysteme bezüglich des Oberziels Bau wegen des größeren Bauvolumens schlechtere Werte beim Kriterium Bau (Kosten, Termine) auf. Die „Kompromissvariante“ D kann wegen des insgesamt geringsten Bauvolumens einzig beim Kriterium Bau obenauf schwingen.

Maßgebend für die Variantenentscheidung war der pro Variante ermittelte Gesamtnutzwert, der sich aus den entsprechend gewichteten Teilnutzwerten zusammensetzte. Die Gewichtung der Teilnutzwerte wurde innerhalb einer gewissen

Lange Eisenbahntunnel

Table 2 Zielsystem für die Nutzwertanalyse der NEAT-Basistunnel [3]

Oberziel	Unterziel	Gewicht	Teilziel	Gewicht	Aspekt	Gewicht	Unteraspekt	Gewicht						
Bau	Kosten, Kostenrisiko	0,70	Baukosten	0,80										
			Kostenrisiko	0,20										
	Bauzeit, Bauzeitrisiko	0,20	Bauzeit	0,80										
			Bauzeitrisiko	0,20										
	Minimale Umweltbeanspruchung	0,10	Bewirtschaftung Ausbruchmaterial	0,80										
			Landschaftseingriff im Portalbereich	0,10										
Einbaumaterial			0,10											
Betrieb	Betriebliche Anforderungen	0,30	Produktionsqualität	0,40	Fahrplanstabilität	0,60								
					Fahrzeit	0,20								
					Komfort	0,20								
			Produktionsquantität	0,40	Leistungsfähigkeit	0,90								
					Totalsperren	0,10								
			Produktivität	0,20	Traktionsenergie	0,35			Schäden	0,20				
									Rollmaterial	0,25	Unterhalt	0,20		
					Installationen	0,15			Komplexität der Installationen	0,25	Schnellerer Umlauf	0,60		
											Komplexität der Handhabung	0,25	Komplexität des Unterhalts	0,25
													Funktionssicherheit	0,25
					Materialkosten (Abnutzung)	0,25			Weichen	0,50	Schienen	0,30		
											Fahrdrabt	0,20		
			Erhaltung und Wartung	0,60	Betriebsbeeinträchtigung/Störfall	0,20			Organisation der Behebung	0,40				
	Erreichbarkeit der Störstelle	0,40												
	Einsatz der Hilfsmittel	0,20												
	Erhaltungsaufwand	0,50			Unterhaltsintervalle	1,00								
	Attraktive Arbeitsplätze	0,30			Mindestkomfort	0,40	Wenig Nachteinsätze	0,30						
							Wenig Wochenendeinsätze	0,30						
	Aero- und Thermodynamik	0,10			Aufwand für künstliche Lüftung	0,80								
			Reisekomfort (Druck)	0,20										
	Sicherheit	Akzeptanz	0,30	Passagiere	0,20									
				Personal	0,80									
Risiko		0,70	Zugunfall	0,20										
			Brand	0,25										
			Gefährliche Stoffe	0,30										
			Personenunfälle	0,05										
			Arbeitsunfälle	0,20										

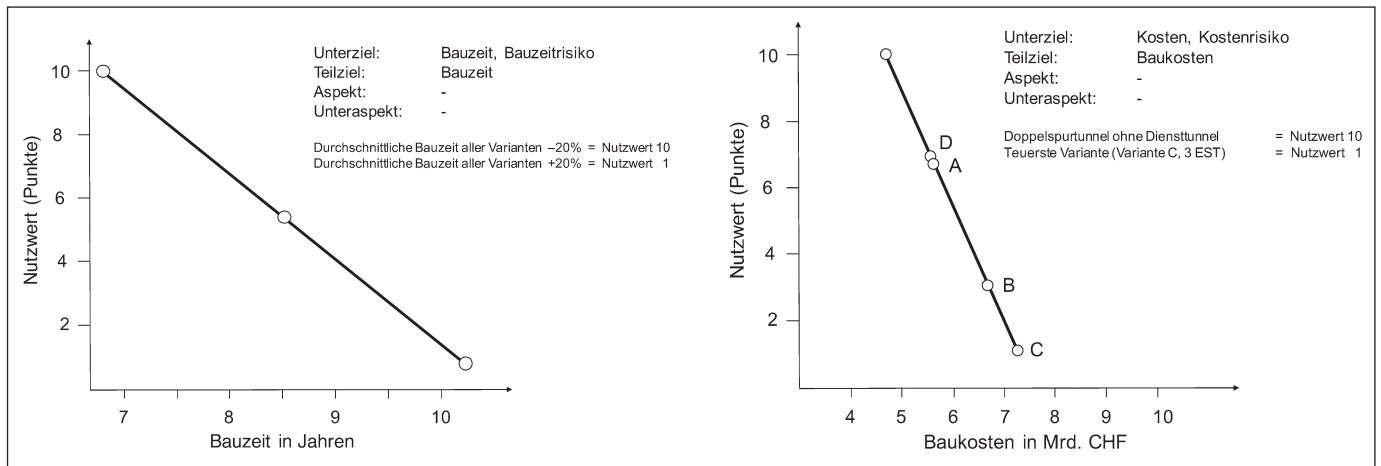


Bild 7 Beispiele für lineare Nutzwertfunktionen Bauzeit (links) und Baukosten (rechts) [3]

Tabelle 3 Teilnutzwerte 1993 pro Oberziel (bei einem theoretischen Maximum von jeweils 10); DST – Doppelspurtunnel, DT – Dienstunnel, EST – Einspurtunnel, MFS – Multifunktionsstelle.

Variante	Oberziele		
	Bau	Betrieb	Sicherheit
A (DST & DT)	5,9	4,3	4,3
B (2 EST & DT)	4,9	6,2	7,9
C (3 EST)	3,2	7,0	8,3
D (2 EST & MFS)	7,0	6,4	7,4

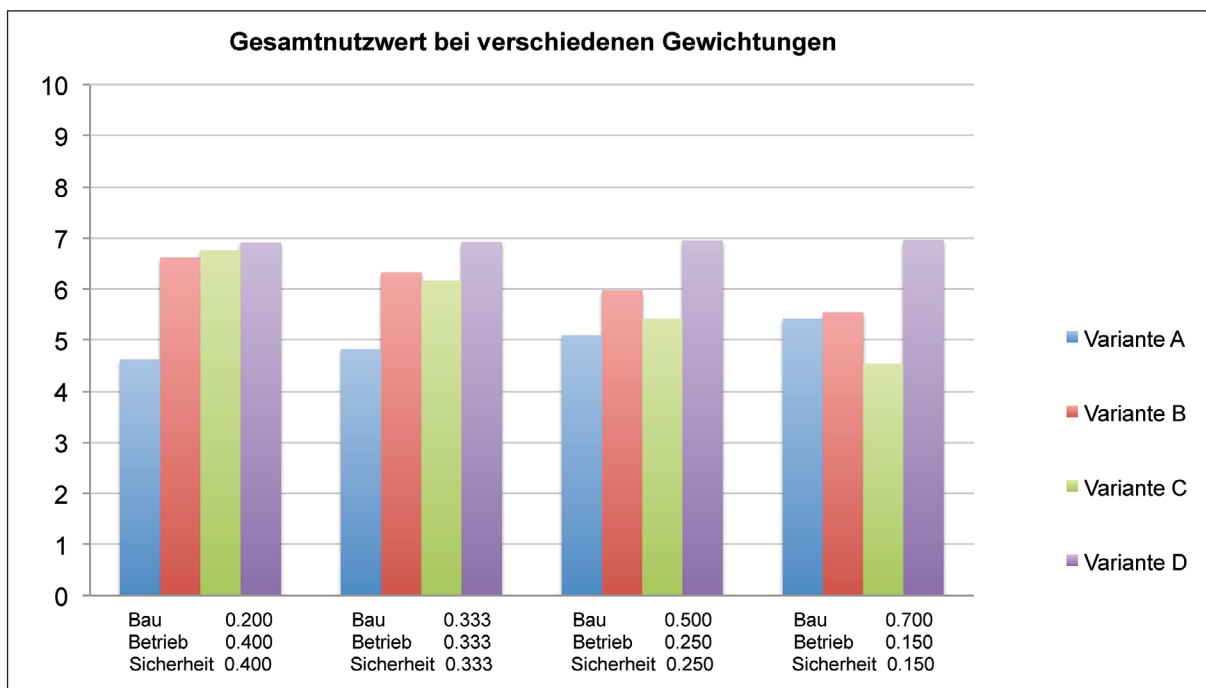


Bild 8 Gesamtnutzwert bei unterschiedlicher Gewichtung der Oberziele, Stand 1993

Bandbreite variiert, um die Sensitivität der Systemscheidung mit Bezug auf die verschiedenen Projektanforderungen zu simulieren. Bild 8 zeigt vier typische Fälle einer unterschiedlichen Gewichtung der Oberziele.

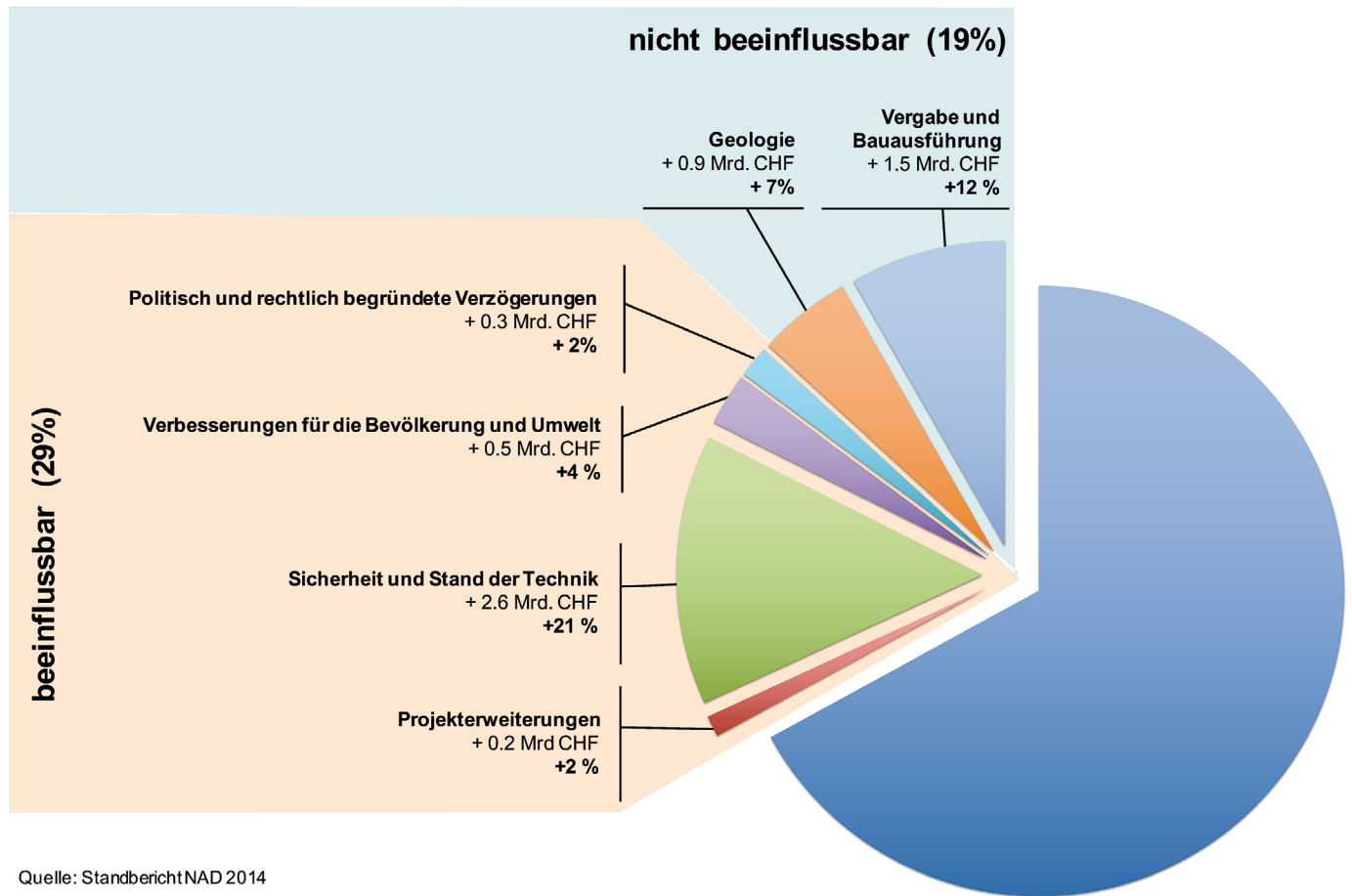
Bild 8 zeigt, dass die Variante D bei jeder Variation der Gewichte stets den höchsten Gesamtnutzwert und einen insgesamt nur wenig variierenden Gesamtnutzwert aufweist. Dieser Effekt lässt sich dadurch erklären, dass die Variante D bei den drei Oberzielen jeweils auf recht nahe beieinanderliegende Teilnutzwerte kommt (Bau 7,0, Betrieb 6,4, Sicherheit 7,4). Auf-

grund der Tatsache, dass die Variante D stabil stets den höchsten Gesamtnutzwert aufwies, wurde im Jahr 1993 die Variantenentscheidung zu Gunsten der Variante D gefällt.

3.3 Feststellungen zu den Resultaten der Analyse 1993

Analysiert man die Detailangaben der Nutzwertanalyse von 1993, so sind die folgenden Feststellungen zu machen:

- Die Variante B (zwei EST mit Dienstunnel) wurde ca. 17 % teurer als Variante D (zwei EST mit Nothaltestelle) angenommen.



Quelle: Standbericht NAD 2014

Bild 9 Gesamtprojekt Neat: Leistungs- und Kostensteigerungen seit 1998 (+48%) [4]

men. Die Benotung der Kriterien Baukosten/Baukostenrisiken Kosten ergibt jedoch eine Differenz von 60 % zu Gunsten der Variante D.

- Für die Installation der Ausrüstung (Rohbau und Bahntechnik) galten allgemein die folgenden Grundsätze:
 - einfach und robust; nur so viel Ausrüstung wie nötig (z. B. keine aktive Lüftung)
 - nur das absolut Notwendigste wird im Fahrraum des Tunnels eingebaut
- Das Unterziel „Erhaltung und Wartung“ wurde für die Varianten B und D praktisch gleich bewertet. Dabei wurde bei der Variante D für den Erhaltungsaufwand die folgende Annahme zu Grunde gelegt [4]: „Wenn im Bereich der Baustelle¹ vorgängig die dritte Röhre zwischen den beiden Haupttunneln erstellt werden kann, entstehen bei Variante D nur minimale betriebliche Auswirkungen.... Falls dies nicht möglich ist, sind große betriebliche Auswirkungen unumgänglich.“ Voraussetzung für die beschriebene Bewertung war also die Annahme, dass bei Bedarf mindestens streckenweise ein dritter Tunnel nachträglich gebaut werden könnte.

4 Änderungen der Randbedingungen in den letzten 20 Jahren

Die Basistunnelprojekte am Lötschberg und am Gotthard sind mittlerweile gemäß der Systemscheidung von 1993 realisiert.

1 mit dem Begriff Baustelle sind in diesem Kontext Baustellen für die Erneuerung (z.B. Fahrbahn) bei laufendem Betrieb gemeint

Beim Lötschberg-Basistunnel liegen rund acht Jahre Betriebserfahrung vor, während der Gotthard-Basistunnel kurz vor der Inbetriebnahme steht. Die Schlussabrechnungen für die Hauptlose des Tunnelrohbaus sind seit 2014 genehmigt, womit sich ein klares Bild über die tatsächlichen Investitionskosten ergibt.

Gemäß dem Jahresbericht der NEAT-Aufsichtsdelegation der eidgenössischen Räte für das Jahr 2014 [5] stiegen die Kosten für das gesamte NEAT-Projekt (Lötschberg-Achse und Gotthard-Achse) von ursprünglich geschätzten 12,2 Mrd. CHF auf 18,2 Mrd. CHF (Preisbasis 1998) was einer Steigerung von 48 % entspricht. Etwa die Hälfte dieser Mehrkosten verteilen sich auf die Rubriken „Sicherheit und Stand der Technik“ (+21 %) und „Verbesserungen für Bevölkerung und Umwelt“ (+4%) (Bild 9).

Auslösendes Moment für diese Kostensteigerungen waren primär Folgen aus den schweren Brandereignissen in den Straßentunneln Mont-Blanc (1998) und Tauern (1999), in der Gletscherbahn Kaprun (2000) und im Gotthard-Straßentunnel (2001). Die Sicherheitsanforderungen für die NEAT-Basistunnel wurden massiv erhöht, was zur Folge hatte, dass der 15 km lange Ceneri-Basistunnel der NEAT-Achse am Gotthard neu zweiröhrig anstelle einer einzigen Doppelspurröhre auszuführen war (analog [1]) und massive Veränderungen am Lüftungssystem des Gotthard-Basistunnels vorgenommen werden mussten. So wurden neu 28 Abluftöffnungen samt zugehöriger elektromechanischer Ausrüstung erstellt anstelle der nachträglich in der Planung vorgesehenen vier Öffnungen. Dazu kamen entsprechend längere Abluftstollensysteme [6]. Zusätzlich musste ein Lüftungssystem in die Querschläge eingebaut werden, um die korrekte Betriebstemperatur der bahntechnischen Ausrüstung

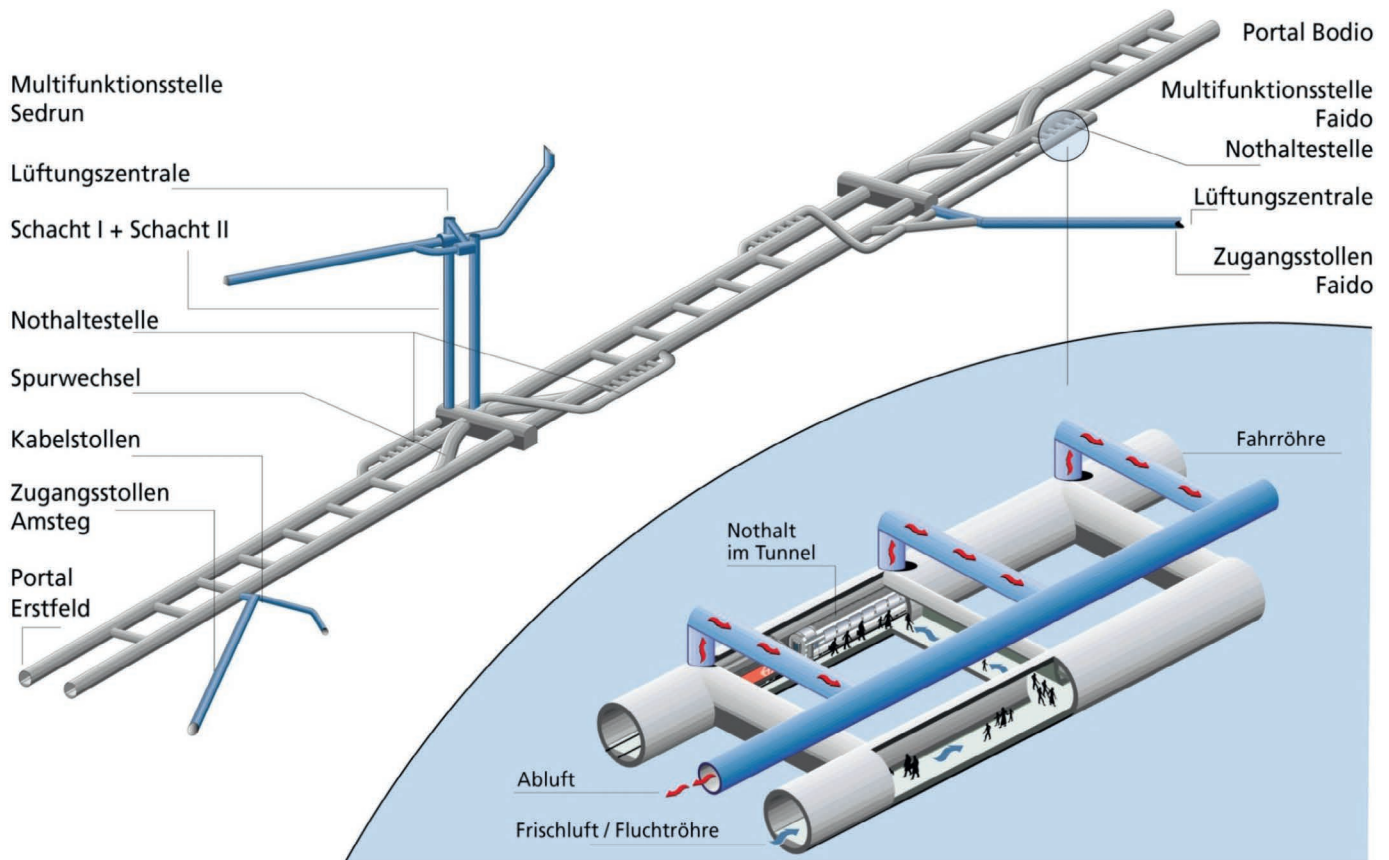


Bild 10 Tunnelsystem am Gotthard-Basistunnel (Bild AlpTransit Gotthard)

zu gewährleisten (Bild 10). Die weitergehenden Redundanzüberlegungen, hatten zur Folge, dass sich das Prinzip „einfach und robust; nur so viel Ausrüstung wie nötig“ nicht mehr aufrecht erhalten ließ.

Ein weiterer wichtiger Kostentreiber waren die baugrundbedingten Mehrkosten und deren Folgen für die Bauausführung. Äußerst schwierige Verhältnisse im Bereich der Multifunktionsstelle Faido verlangten nach baulichen Umplanungen und nach einer Neudefinition des Bauablaufs (vermehrte Parallelaktivitäten). Die Tatsache, dass sowohl im Teilabschnitt Faido als auch in Sedrun verschiedentlich baugestaltliche Querstollen erstellt werden mussten, um die geplanten Bauabläufe zu ermöglichen, sind ein klares Indiz, dass eine zusätzliche dritte Röhre, die auch in der Bauphase in der Logistik eine entscheidende Rolle gespielt hätte, von Vorteil gewesen wäre. Das Unterziel Bau dürfte nach heutigem Kenntnisstand für die Varianten B und D aus den genannten Gründen kaum mehr fast gleich bewertet werden.

5 Simulationsrechnungen 2015

Unter Berücksichtigung der geänderten Randbedingungen haben die Autoren 2014/2015 die Nutzwertanalyse von 1993 genauer analysiert und entsprechend aktualisiert. Dabei wurden die folgenden zusätzlichen Annahmen getroffen:

- Da die Variante A (Doppelspurtunnel mit Dienststollen heute nicht mehr genehmigungsfähig wäre (vgl. [1]), wird diese Variante nicht mehr berücksichtigt, was eine generelle Anpassung der Nutzwertfunktionen zur Folge hat.

- Das Verhältnis zwischen Kostenschätzung und Risikokostenanteil liegt nicht bei 0,8 : 0,2, sondern viel näher bei 0,7 : 0,3, was die Kostenentwicklung sowohl an der Lötschberg- als auch an der Gotthard-Achse zeigte. Auch die Botschaft über den Bau der schweizerischen Eisenbahn-Alpentransversale aus dem Jahr 1990 [1] ging von einem solchen Verhältnis aus, sodass dieses für die aktualisierten Überlegungen berücksichtigt wurde (Bild 11).
- Die Annahme, dass für künftige Erneuerungen mindestens abschnittsweise eine dritte Röhre gebaut werden kann, ist heute nicht mehr haltbar und wird nicht mehr berücksichtigt.

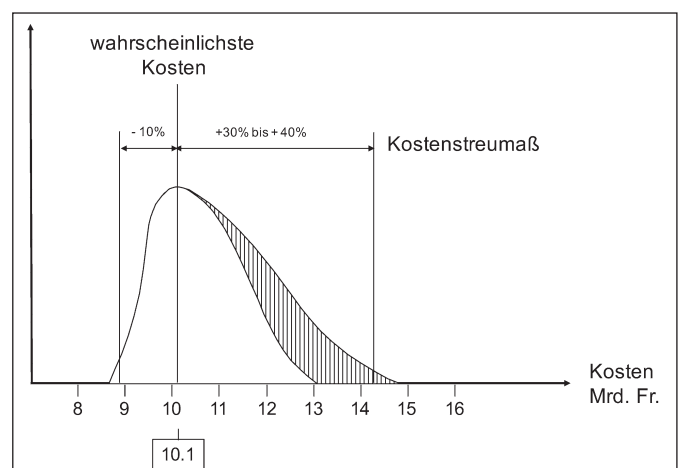


Bild 11 Prognose Kostenstreumaß gemäß NEAT Botschaft 1990 [1]

Tabelle 4 Teilnutzwerte 2015 pro Oberziel (bei einem theoretischen Maximum von jeweils 10)

Variante	Oberziele					
	Bau		Betrieb		Sicherheit	
	1993	2015	1993	2015	1993	2015
B (2 EST & DT)	4,92	6,30	6,14	7,11	7,94	7,9
D (2 EST & MFS)	6,97	7,25	6,40	4,60	7,43	7,4

- Der Aufwand für die künstliche Lüftung ist bei einem Drei-Röhrensystem (Variante B) mit einfacher gestalteten Nothaltestellen aus heutiger Sicht günstiger zu bewerten als bei der Variante D.
- Bei einem Dreiröhrensystem könnte ein erheblicher Teil der Ausrüstung schienenunabhängig gewartet werden, was zu einer Reduktion der Einbauteile führen könnte (weniger redundante Systeme). Die Betriebserfahrungen am Lötschberg-Basistunnel legen nahe, dass selbst bei einem gleichbleibenden Mengengerüst eine Ersparnis in der Größenordnung von 20 % in den Unterhaltsaufwendungen ermöglicht würde, wobei gleichzeitig die Verfügbarkeit des Systems gesteigert würde.

Für die auf dieser Basis vorgenommene Grobbewertung ergaben sich die in Tabelle 4 dargestellten Teilnutzwerte pro Oberziel. Ein Blick auf die Tabelle 4 zeigt, dass auch nach heutigem Kenntnisstand die Variante D mit zwei Einspurtunneln und Nothaltestellen bei dem Oberziel „Bau“ (Investitionskosten, Risiken und Termine) weiterhin den höchsten Teilnutzwert erzielt, allerdings bei einer geringeren Differenz. Beim Kriterium Betrieb kippen die Verhältnisse jedoch. Dieser Effekt ist einerseits durch den wesentlich höheren Aufwand bei der Rohbau Ausrüstung (Türen, Tore, Lüftungssysteme) begründet, andererseits lassen sich mit dem heute realisierten System gewisse Annahmen bezüglich der künftigen Erneuerung des Systems (z. B. stellenweiser Bau einer dritten Röhre) nicht mehr realisieren.

Die Sensitivitätsanalyse unter Berücksichtigung stark variierender Gewichtungen der drei Oberziele zeigt, dass die Variante B

(zwei Einspurtunnel und Diensttunnel) gegenüber Variante D (zwei Einspurtunnel und Nothaltestelle) meistens besser abschneidet. Nur bei einer Gewichtung des Oberziels „Bau“ mit 70 % ist die Variante B weiterhin die Bestvariante, wenn auch mit marginaler Differenz. Eine solch hohe Gewichtung des Kriteriums Bau ist aber nur dann gerechtfertigt, wenn das oberste Ziel die Minimierung der Anfangsinvestition ist (Bild 12).

Folgt man dem Gedanken einer Lebenszyklusbetrachtung, so müsste das Kriterium Betrieb höher gewichtet werden als nur mit 15 %. Erfahrungsgemäß bewegen sich die Betriebskosten, die Unterhalts- und Ersatzinvestitionen in der gleichen Größenordnung wie die Anfangsinvestitionen. Unter Berücksichtigung der Sicherheitsanforderungen ist deshalb eine Wertung jedes Oberziels (Bau, Betrieb, Sicherheit) mit je 1/3 gerechtfertigt. Bei einer solchen Wertung hätte die Dreiröhrenlösung nach heutigem Kenntnisstand einen höheren Nutzwert als die Zweiröhrenlösung. Es bleibt aber festzuhalten, dass diese Aussage weniger stabil ist als die Betrachtung aus dem Jahr 1993 zu Gunsten der Variante D.

Wie die Analyse 1993 ist auch die Nutzwertanalyse 2015 von der subjektiven Beurteilung der beurteilenden Personen geprägt. Wollte man die Betrachtung möglichst weitgehend versachlichen, so wäre eine vollständige Kosten-Nutzen-Analyse unter Einbezug einer umfassenden LifeCycle-Cost-Betrachtung durchzuführen. Auf der Tatsache basierend, dass zwei weitere lange Tunnel in der Schweiz gebaut wurden und vom ersten schon Betriebserfahrungen vorliegen, müsste bald ein Datenbestand vorhanden sein, der eine solche Betrachtung (im Gegensatz zu 1993) möglich machen würde.

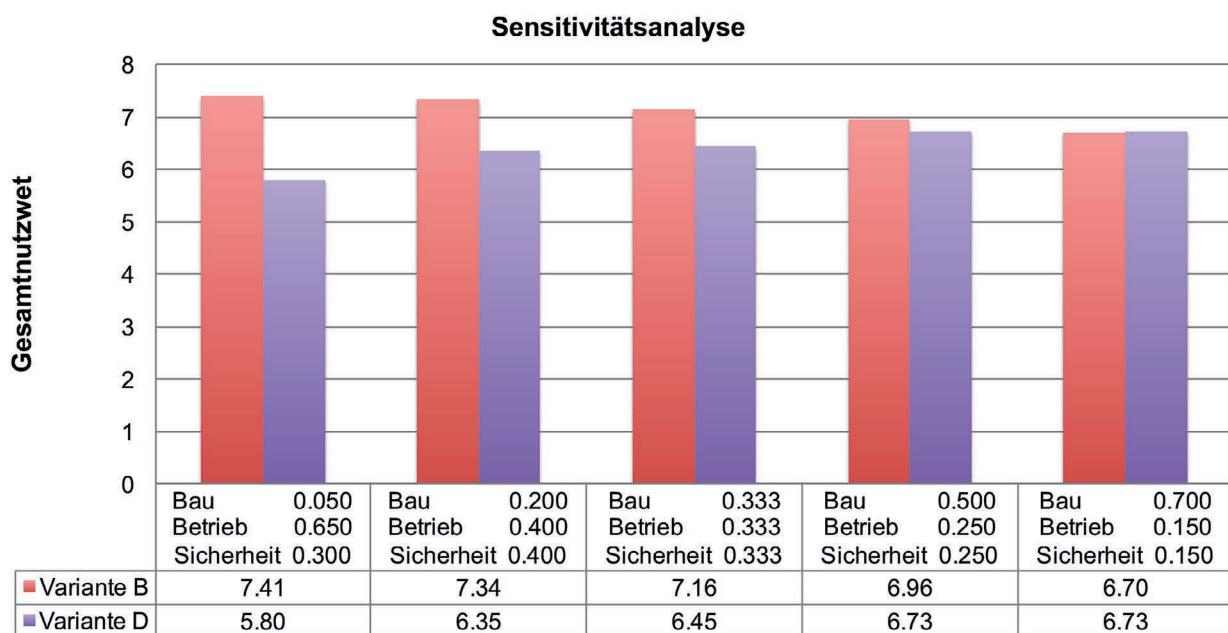


Bild 12 Gesamtnutzwert 2014 bei unterschiedlicher Gewichtung der Oberziele

6 Schlussfolgerungen und Empfehlungen

Die Systemscheidung bei langen und sehr langen Eisenbahntunneln hat wesentliche Auswirkungen auf den künftigen Betrieb einer Eisenbahnanlage. Mit der Realisierung des Gotthard- und des Lötschberg-Basistunnels wurde für den anspruchsvollen Prozess zur Wahl des optimalen Tunnelsystems bei sehr langen Tunnelbauten viel Pionierarbeit geleistet. Die Variantenentscheidung von 1993 wurde unter vollständiger Berücksichtigung der damaligen Randbedingungen und unter Anwendung allgemein anerkannter Methoden und Techniken zur Entscheidungsfindung gefällt und erwies sich als äußerst stabil. Diese Stabilität ist stark in der hohen Gewichtung des Kriteriums der Anfangsinvestitionen begründet. Das damalige Umfeld ließ keinen Spielraum für weitere, teurere Varianten zu.

So durfte 1993 die Achse Arth Goldau–Lugano einschließlich der Basistunnel am Gotthard und Ceneri den abgesteckten finanziellen Rahmen von 9,7 Mrd. CHF nicht überschreiten. Das Geld für eine dritte Röhre (die auch 1993 in verschiedenen Kriterien der Nutzwertanalyse am besten abschnitt) war zu jenem



Bild 13 Ausrüstung eines Querschlags am GBT (Bild T. Jesel, Ingenieurgesellschaft GBT Süd)

Zeitpunkt nicht vorhanden. Noch höhere Kosten hätten im damaligen politischen Umfeld ein Scheitern des gesamten AlpTransit Projekts (Gotthard- und Lötschberg Achse) zur Folge gehabt. Unter diesen Randbedingungen ist mit den damaligen Methoden ein sicheres Bauwerk mit den minimalen baulichen Aufwendungen definiert worden.

Im Gefolge erhöhter Sicherheitsanforderungen ist in den letzten 20 Jahren der Aufwand für die Rohbau Ausrüstung und die bahntechnische Ausrüstung gegenüber den ursprünglichen Annahmen markant gestiegen. Die später dazu gekommenen Elemente wie die Querschlagslüftung (Bild 13) und die erheblich anspruchsvolleren Lüftungsinstallationen in den Multifunktionsstellen konnten 1993 noch nicht erkannt werden.

Für eine heutige Beurteilung ist die damalige deutliche Priorisierung der Investitionskosten gegenüber den Betriebs-, Unterhalts- und Erneuerungskosten zu hinterfragen, bewegen sich die kapitalisierten Unterhalts- und Erneuerungskosten oft in der gleichen Größenordnung wie die Investitionskosten.

Eine unter diesen Gesichtspunkten aktualisierte Nutzwertanalyse zeigt, dass ein Dreiröhrensystem unter den heutigen Randbedingungen besser abschneiden würde und aus heutiger Sicht für sehr lange Tunnel wohl eine geeignete Alternative wäre.

Dabei dürfte die dritte Röhre aber nicht nur als reiner Erkundungs- und Entwässerungstunnel ausgebildet werden, sondern müsste als Sicherheitsstollen und Diensttunnel auch dazu dienen, dass große Teile der Ausrüstung schienenunabhängig gewartet und erneuert werden können. Es müsste das Ziel sein, die Unterhalts- und Erneuerungskosten spürbar abzusenken und gleichzeitig die Systemverfügbarkeit zu steigern, womit der Betrieb insgesamt wirtschaftlicher gestaltet werden könnte.

Es ist deshalb wenig erstaunlich, dass beim Brenner-Basistunnel ein System analog Variante B (mit Dienststollen) zur Ausführung kommen soll. Damit dieser als Erkundungsstollen definierte Stollen (Bild 14) seine langfristig günstige betriebliche Wirkung entfalten kann, müsste dieser auch im Betrieb entsprechend genutzt werden können.

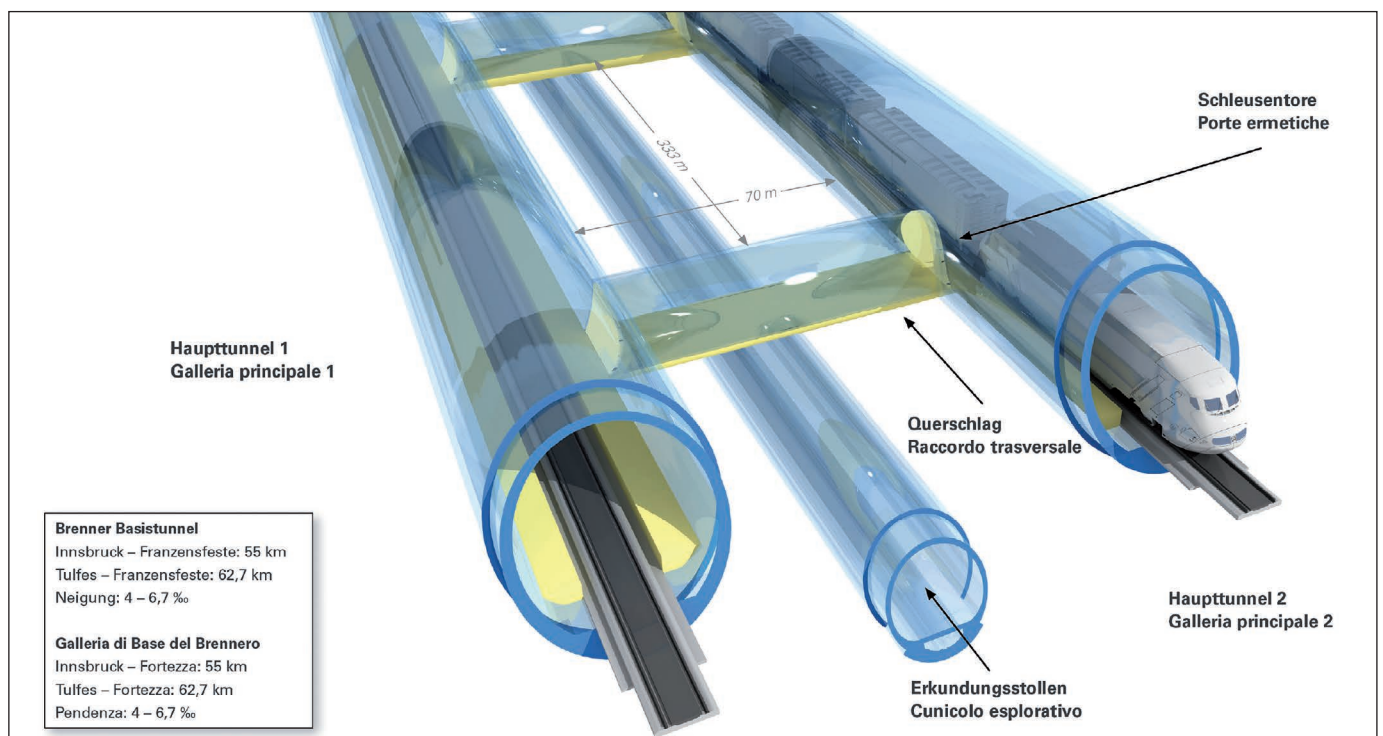


Bild 14 Aktuell vorgesehenes Tunnelsystem am Brenner-Basistunnel [7]

Lange Eisenbahntunnel

Bei weitergehenden generellen Untersuchungen zur Systemwahl sehr langer Tunnel wäre wohl auch die Variante C (3 EST) wieder in die Überlegungen aufzunehmen. Dabei sind Lösungen denkbar, bei denen die dritte (mittlere Röhre) vorerst noch nicht mit der bahntechnischen Ausrüstung versehen würde, sondern erst dann, wenn später im Rahmen grosser Gesamterneuerungen der Bedarf dazu bestehen würde. Zwischenzeitlich wäre die Röhre als Dienststollen zu nutzen.

Ungeachtet der eingesetzten Methode zur Entscheidungsfindung und der allfällig bevorzugten Variante ist Eines jedoch klar: Die Erstellergeneration hat gegenüber den zukünftigen Betreibergenerationen eine hohe Verantwortung wahrzunehmen. Diese manifestiert sich insbesondere bei der Abwägung zwischen Anfangsinvestitionen und künftigen Betriebs-, Unterhalts- und Erneuerungskosten. Gerade am Beispiel der Systementscheidung zu langen Tunnelbauten kann diese Verantwortlichkeit eindrücklich aufgezeigt werden. Dieser Tatsache sollten sich alle Erstellerorganisationen bei den heute aktuellen Forderungen nach „design to cost“ bewusst sein.

Danksagung

Die Autoren bedanken sich bei der AlpTransit Gotthard AG, bei der BLS AG, bei Eurotunnel und bei der Brenner Basistunnel SE

für das Überlassen von Informationen und Bildmaterial und für die Unterstützung des Beitrags.

Literatur

- [1] Eisenbahn Bundesamt (EBA): Richtlinie Anforderungen des Brand- und Katastrophenschutzes an den Bau und den Betrieb von Eisenbahntunneln vom 01.07.1997 (Anpassung per 01.07.2008).
- [2] Botschaft über den Bau der schweizerischen Eisenbahn-Alpen-transversale (Alpentransit-Beschluss) vom 23. Mai 1990.
- [3] N.N.: Systemwahl Gotthard-Basistunnel – Vergleich der Tunnel-systemvarianten: Nutzwertanalyse. Ernst Basler und Partner, 1993 (unveröffentlicht).
- [4] Bericht IG GGRC vom 17.12.1992, (unveröffentlicht).
- [5] NEAT Aufsichtsdelegation der eidgenössischen Räte, Oberaufsicht der Bau der NEAT im Jahre 2014, Bern, 2015.
- [6] *Ehrbar, H., Sala, A.; Wick, R.*: Vortriebe am Gotthard-Basistunnel – ein Rückblick, Erfahrungen und Lehren aus Sicht des Bauherrn. Swiss Tunnel Kongress, Luzern, 2012.
- [7] *Bergmeister, K.*: Brenner Basistunnel; Lebenszyklusorientierte Planung und innovative Bautechnik. Swiss Tunnel Congress, Luzern, 2015.