

Systemwahl für lange Eisenbahntunnel

Rückblick für die Zukunft

Dipl.-Ing. Heinz Ehrbar, Leiter Management Großprojekte, DB Netz AG, Frankfurt am Main, Deutschland
 CEO Hans-Peter Vetsch, Vetsch Rail Consulting GmbH, Bützberg, Schweiz
 Dipl.-Bauing., Peter Zbinden, vormals CEO AlpTransit Gotthard AG, Erlenbach, Schweiz

1 Motivation

Seit mehr als 150 Jahren werden Eisenbahntunnel mit Längen von 10 km und mehr gebaut. Zum großen Teil sind diese Bauwerke auch heute noch in Betrieb. Seit her – und vor allem in den letzten rund 20 Jahren – haben sich die Anforderungen an solche Tunnelsysteme enorm verschärft. Das lange Zeit am stärksten verbreitete System von Doppelspurtunneln ist heutzutage für Gemischtverkehrsstrecken mit Personen- und Güterverkehr nur noch mit einschneidenden Betriebseinschränkungen zulässig.

Moderne Tunnelsysteme sind heutzutage – ähnlich wie moderne Hochbauten – hochgezüchtete technische Systeme mit hohen Anforderungen an die Substanz des Rohbaus und der bahntechnischen Ausrüstung. Um im Wettbewerb der Verkehrssysteme gut bestehen zu können, muss die moderne Schieneninfrastruktur einerseits sämtliche Sicherheitsanforderungen erfüllen und andererseits eine hohe Verfügbarkeit aufweisen. Es stellt sich deshalb gerade bei sehr langen Tunneln die Frage, welches Tunnelsystem die Vielzahl der Ansprüche optimal zu erfüllen mag. Dieser Frage soll mit diesem Artikel nachgegangen werden.

2 Systementscheide in der Vergangenheit

In der Zeit von 1857 bis 1871 wurde der ursprünglich 12,8 km lange Mont Cenis Tunnel als erster langer Ei-

Die Ersteller eines langen Eisenbahntunnels müssen bei der Systemwahl zwischen der Anfangsinvestition und den künftigen Betriebs-, Unterhalts- und Erneuerungskosten abwägen. Die Wahl des Systems hat weit in die Zukunft reichende Konsequenzen. In diesem Beitrag werden die Entscheidungen zur Systemwahl der langen Schweizer Basistunnel in der Vergangenheit unter Berücksichtigung der bis heute gewonnenen Erfahrungen und der geänderten Rahmenbedingungen analysiert. Daraus werden Empfehlungen für zukünftige Systementscheidungen abgeleitet.

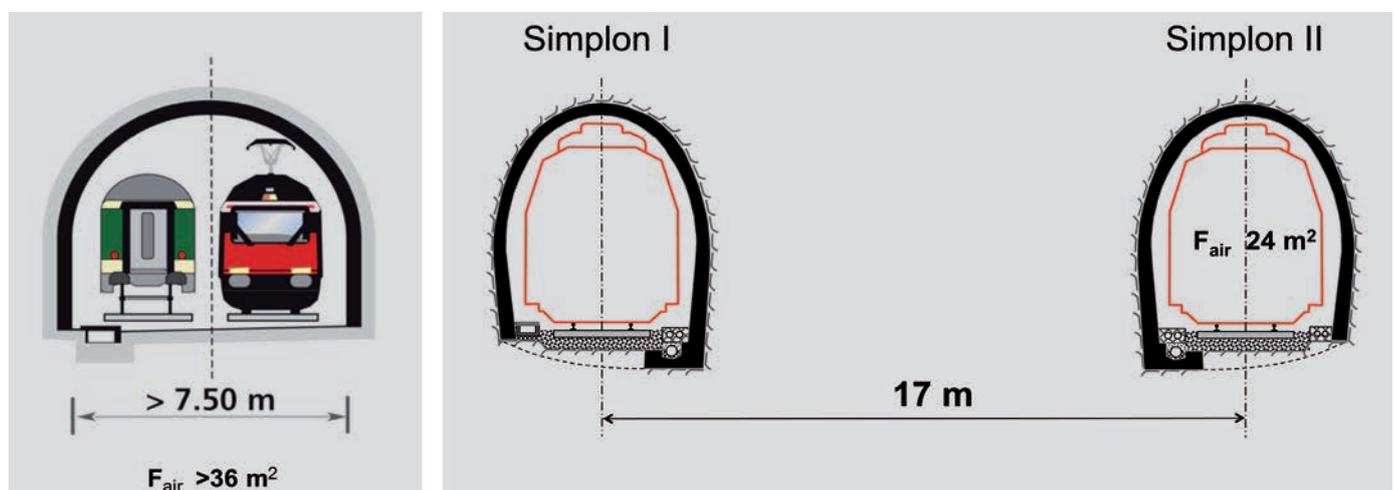
Tunnelbau • Planung • Großprojekte • Betrieb • Sicherheit • Kosten

senbahntunnel in den Alpen in Form eines einröhrigen Doppelspurtunnels gebaut. Fast alle nachfolgenden langen Alpentunnel am Gotthard (1882, 15 km), am Arlberg (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. Im Jahr 1906 ging die erste Röhre in Betrieb (Simplontunnel I). Der für den Baubetrieb notwendige 17 m danebenliegende Parallelstollen wurde in der Folge zur zweiten Fahröhre (Simplontunnel II) erweitert und im Jahr 1922 dem Betrieb übergeben (**Bild 1**). Der Simplontunnel

Bild 1: Tunnelquerschnitte: links Gotthard Eisenbahntunnel (1882) und rechts Simplontunnel (1906/1922)

Quelle des linken Bilds: ATG



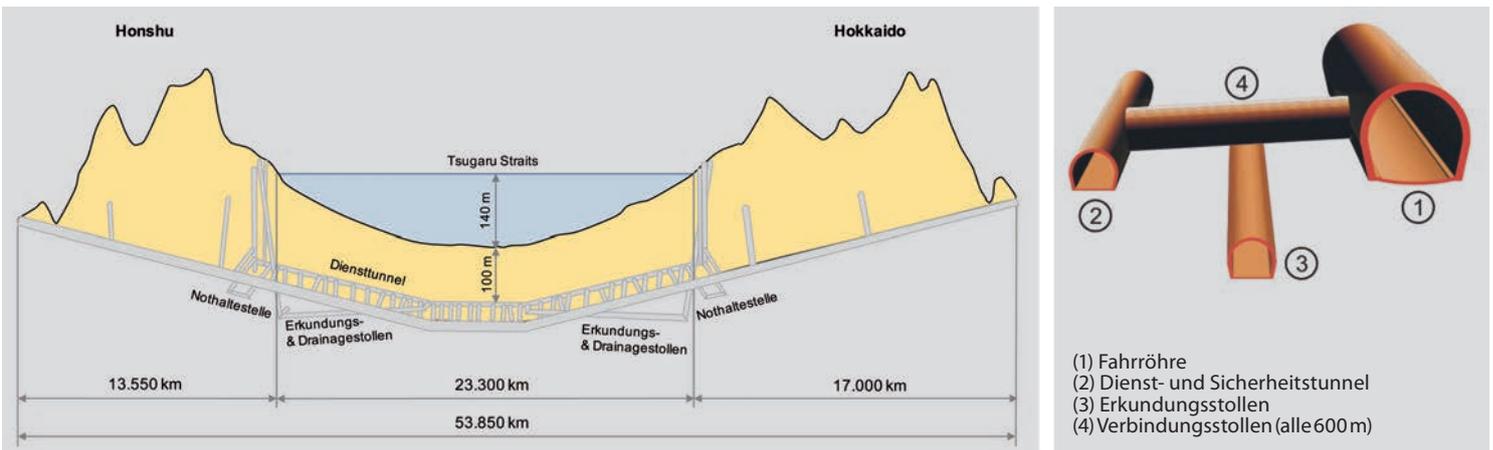


Bild 2: System des Seikan-Tunnels in Japan

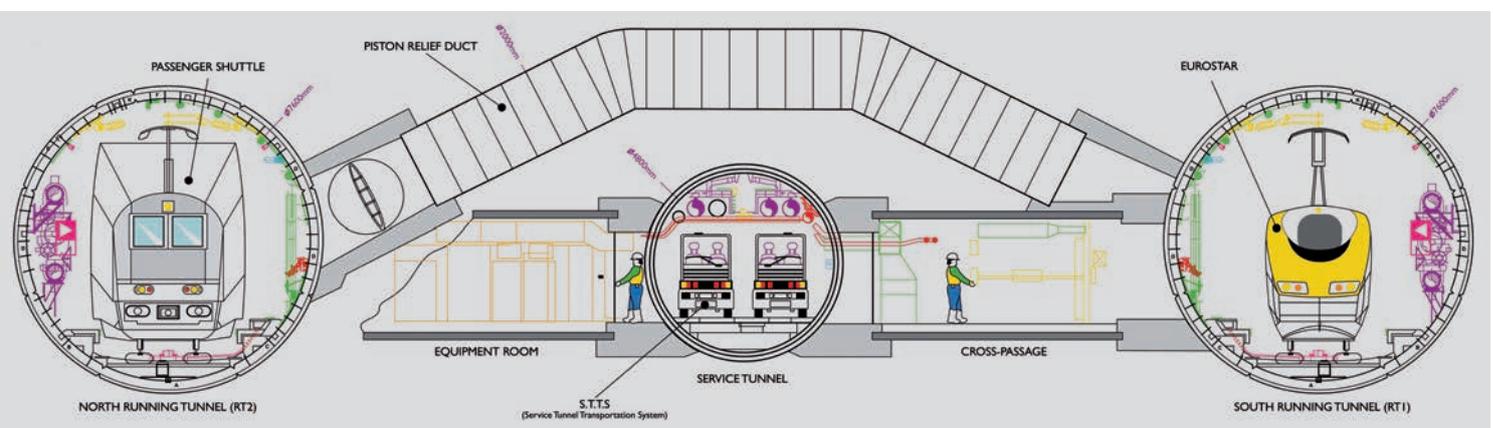


Bild 3: System des Eurotunnels (Frankreich/UK) mit mittigem Servicetunnel, Querschlägen (alle 375 m) und Druckausgleichsverbindungen
Quelle: Eurotunnel

war der erste lange Alpentunnel, welcher von Anfang an elektrisch betrieben wurde, und blieb bis 1982 der längste Eisenbahntunnel der Welt.

Im Jahr 1988 wurde mit dem 53,8 km langen Seikan-Tunnel erstmalig ein über 50 km langer Eisenbahntunnel dem kommerziellen Betrieb übergeben. Dieser verbindet unter der Tsugaru Meeresschleppstrasse die Inseln Hokkaido und Honshu und wurde als Doppelspurttunnel ausgebildet. Die Japaner brachten als neue Konstruktionselemente erstmalig ein Lüftungssystem in einen elektrisch betriebenen Eisenbahntunnel und ordneten zwei Nothaltestellen unter den Uferbereichen vor der Unterquerung des Meeres an (Bild 2). Der Dienst- und Sicherheitstunnel wurde nur im Tunnelabschnitt unter dem Meer gebaut.

Parallel dazu hatten in Europa die Bauarbeiten zum 50,4 km langen Eurotunnel unter dem Ärmelkanal begonnen. Die Sicherheitsanforderungen an diesen Tunnel übertrafen das gesamte bisher Dagewesene. Der Tunnel wurde als System aus zwei Einspurttunneln mit einem Service- bzw. Sicherheitstunnel sowie einem zusätzlichen komplexen Lüftungssystem realisiert (Bild 3). Im Jahr 1994 wurde der Eurotunnel in Betrieb genommen.

3 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 der Neubaustrecken in Deutschland. So wurden und werden in Deutschland von 1973 bis heute über 140 Tunnel mit einer Gesamtlänge (Streckenlänge) von rund 320 km gebaut (Tabelle 1). Die Länge der Tunnel variiert zwischen wenigen hundert Metern bis zum 10,8 km langen Landrückentunnel auf der Strecke Hannover-Würzburg.

Die am 1. Juli 1997 in Kraft getretene Richtlinie des Eisenbahn-Bundesamts (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 Rettungs-

Tabelle 1: Übersicht der Tunnel der Hochgeschwindigkeitsverkehrs-Strecken (HGV-Strecken) in Deutschland

HGV-Strecke	Anzahl der Tunnel	Tunneltyp	Gesamtlänge der Tunnel	Baubeginn der HGV-Strecke	Inbetriebnahme	Betriebsart
Hannover-Würzburg	62	Doppelspurtunnel	126,7 km	1984	1988	Mischverkehr mit Tunnelbegnungsverbot
Mannheim-Stuttgart	14	Doppelspurtunnel	31,1 km	1976/1983	1991	Mischverkehr mit Tunnelbegnungsverbot
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 Tunnelbegnungsverbot
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 Personenfernverkehr
Karlsruhe-Basel	3	Einspurtunnel	15,6 km	...	2021	Mischverkehr

dienste über Verbindungsstollen und die benachbarte Tunnelröhre.

- ▶ Bei zweigleisigen Tunneln dürfen fahrplanmäßige Begegnungen zwischen Reise- und Güterzügen nicht vorgesehen werden.

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 der Strecke Ebensfeld-Erfurt traf diese Forderung zu. In Abstimmung zwischen Bund, Ländern, dem Eisenbahn-Bundesamt und der Deutschen Bahn AG wurde für die Neubaustrecke ein Konzept entwickelt, mit dem auf der Strecke ein gemischter Zugbetrieb auch bei doppelspurigem 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 – das sogenannte Tunnelbegegnungsverbot für Personen- und Güterzüge – Rechnung getragen werden.

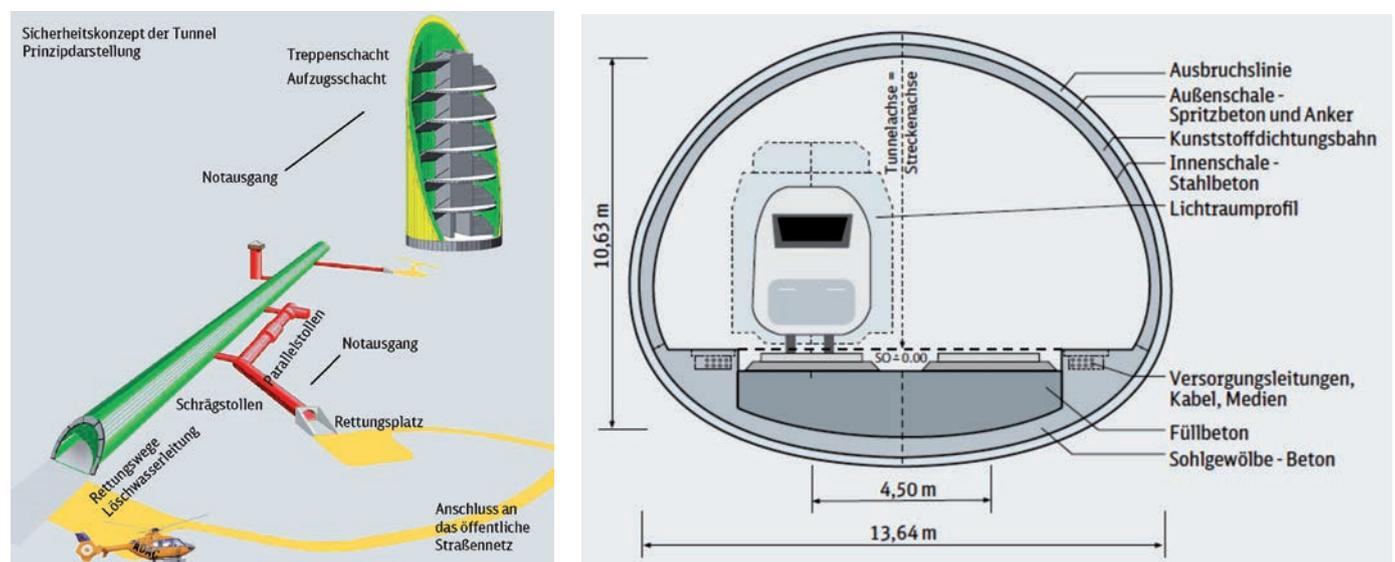
4 Basistunnel durch die Alpen: Systementscheid in der Schweiz im Jahr 1993

4.1 Ausgangssituation

Seit Mitte der 1960er-Jahre standen in der Schweiz verschiedene Projekte für lange Eisenbahnbasistunnel unter den Alpen zur Diskussion. Im Jahr 1975 stellten die Schweizerischen Bundesbahnen (SBB) 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 Eu-

Bild 4: Tunnel Blessberg im Projekt VDE 8.1 als Doppelspurtunnel mit acht Notausgängen und 2,5 km langem Parallelstollen für die Notausgänge Nr. 5 und 6: Systemskizze (links) und Querschnitt (rechts)

Quelle: DB AG



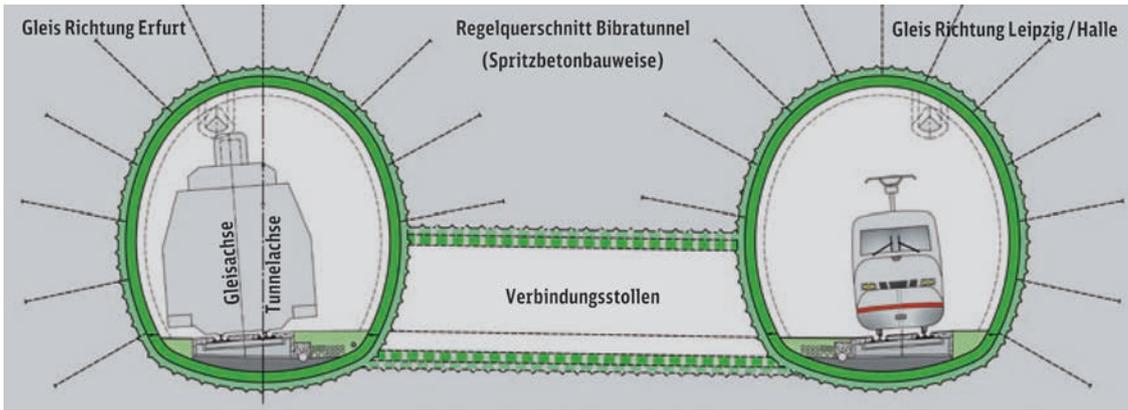


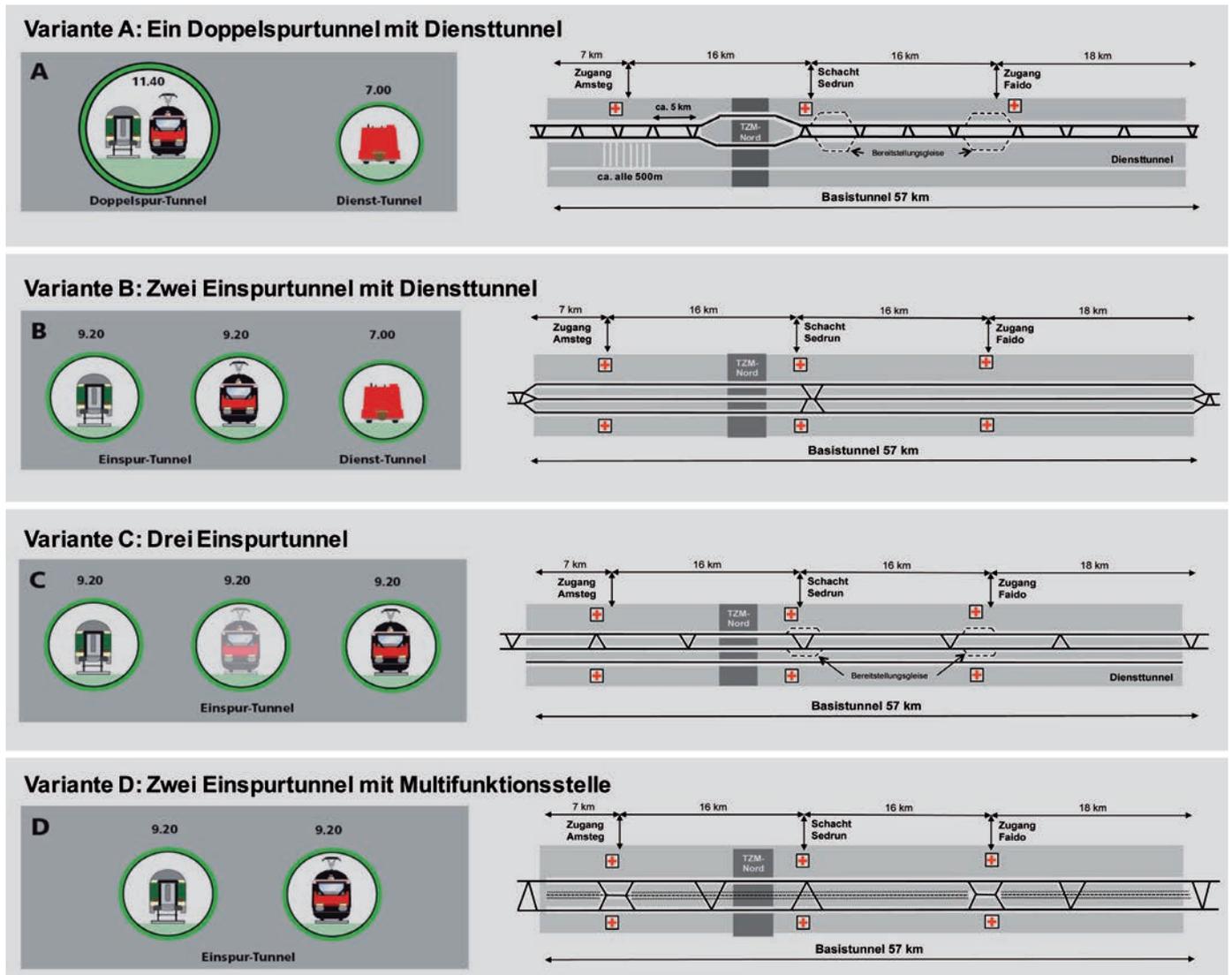
Bild 5: Bibratunnel im Projekt VDE 8.2, mit zwei Einspurtunneln
Quelle: DB AG

ropa einbrach und zu jener Zeit der Gotthard-Straßentunnel im Bau war. Die Dringlichkeit eines Basistunnels wurde seitens des Bundes daher negiert.

Nach Eröffnung des Straßentunnels wuchs der Gütertransportverkehr 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

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



Transit-Achsen mit zwei langen Basistunneln auf der Gotthard- und der Lötschberg-Achse.

Nach dem Volksentscheid 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 verschiede-

ner 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, den anstehenden Entscheid aufgrund sachlicher Kriterien vorzubereiten. 1992 und 1993 fanden drei sogenannte Tunnel-Kolloquien statt, bei denen die bestellten Experten einen sachlich nachvollziehbaren Vorschlag zum Tunnelsystem unter Berücksichtigung der Kriterien Bau, Betrieb und Sicherheit erarbeiteten. Die folgenden vier im **Bild 6** dargestellten Untersuchungsfälle wurden analysiert [2]:

- ▶ **Lösung A:** Doppelspurtunnel (DST) mit Diensttunnel (DT) (entspricht dem Bauprojekt 1975 der SBB und den meisten bisherigen langen Tunneln)
- ▶ **Lösung B:** Tunnelsystem mit zwei Einspurrohren (EST) und einem Diensttunnel (DT) (ähnlich der Eurotunnel-Lösung)
- ▶ **Lösung C:** Drei Einspurrohren (EST), um während der Erhaltung immer zwei Fahrrohre zur Verfügung zu halten

Tabelle 2: Zielsystem für das Oberziel Bau für die Nutzwertanalyse der NEAT-Basistunnel im Jahr 1993 [3]

Unterziele für Bau	Gewicht	Teilziel	Gewicht
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

Tabelle 3: Zielsystem für das Oberziel Betrieb für die Nutzwertanalyse der NEAT-Basistunnel im Jahr 1993[3]

Unterziele für Betrieb	Gewicht	Teilziel	Gewicht	Aspekt	Gewicht	Unteraspekt	Gewicht		
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				
				Rollmaterial	0,25			Schäden	0,20
								Unterhalt	0,20
								Schnellerer Umlauf	0,60
				Installationen	0,15			Komplexität Installationen	0,25
								Komplexität Handhabung	0,25
								Komplexität Unterhalt	0,25
Materialkosten (Abnutzung)	0,25	Weichen	0,50						
		Schienen	0,30						
		Fahrdraht	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						

- **Lösung D:** Zwei Einspurröhren (EST) ohne Diensttunnel, mit zwei Multifunktionsstellen (MFS) bzw. unterirdischen Nothaltestellen in den Drittelpunkten zur Evakuierung von Reisenden (Berücksichtigung des Kriteriums von 15 min Notlaufefigenschaften eines brennenden Zugs)

Das am Kanaltunnel verwendete System mit einem mitigen Diensttunnel wurde nicht weiter untersucht. Die Entscheidung, ob der Diensttunnel mittig oder seitlich angeordnet werden sollte, wäre im Falle eines positiven Entscheids zu Gunsten eines solchen Systems nachfolgend im Vorprojekt detailliert untersucht worden.

4.2 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 den **Tabellen 2 bis 4** angegebene Zielsystem – aufgeteilt in die drei Oberziele Bau, Betrieb und Sicherheit – 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

Tabelle 4: Zielsystem für das Oberziel Sicherheit für die Nutzwertanalyse der NEAT-Basistunnel im Jahr 1993 [3]

Unterziele für Sicherheit	Gewicht	Teilziel	Gewicht
Akzeptanz	0,30	Passagiere	0,20
		Personal	0,80
Risiko	0,70	Zugunfall	0,20
		Brand	0,25
		Gefährliche Straße	0,30
		Personenunfälle	0,05
		Arbeitsunfälle	0,20

für jedes Kriterium vom zuständigen und spezialisierten Bewertungsteam festgelegt (**Bild 7**).

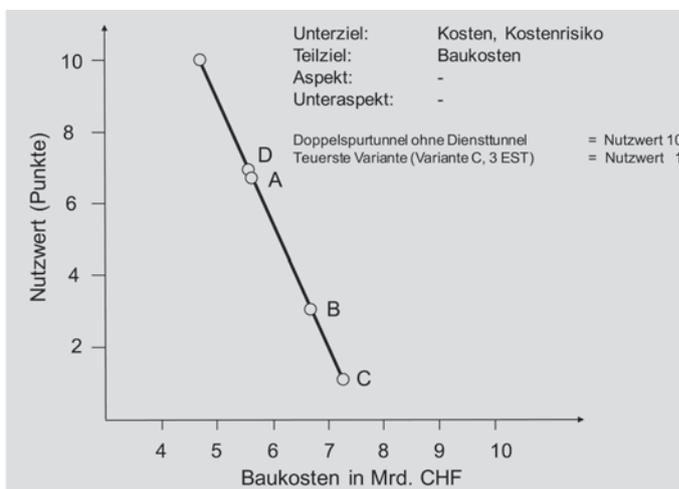
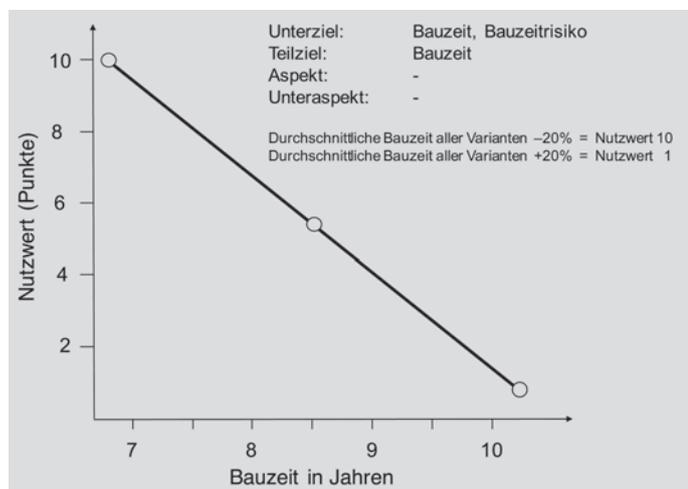
4.3 Resultate der Nutzwertanalyse

Unter Anwendung der Nutzwertfunktionen ergaben sich bei einer theoretischen maximalen Punktzahl von jeweils 10 die in **Tabelle 5** angegebenen Teilnutzwerte pro Oberziel. Betrachtet man die Zahlen in **Tabelle 5**, 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

Tabelle 5: Für die untersuchten Varianten A bis D im Jahr 1993 ermittelte Teilnutzwerte der drei Oberziele (Notenskala von 1 als schlechteste bis 10 als beste Lösung)

Variante	Teilnutzwerte für Oberziel		
	Bau	Betrieb	Sicherheit
A (DST & DT)	5,9	4,3	4,3
B (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 7: Beispiele für lineare Nutzwertfunktionen: links Bauzeit und rechts Baukosten [3]



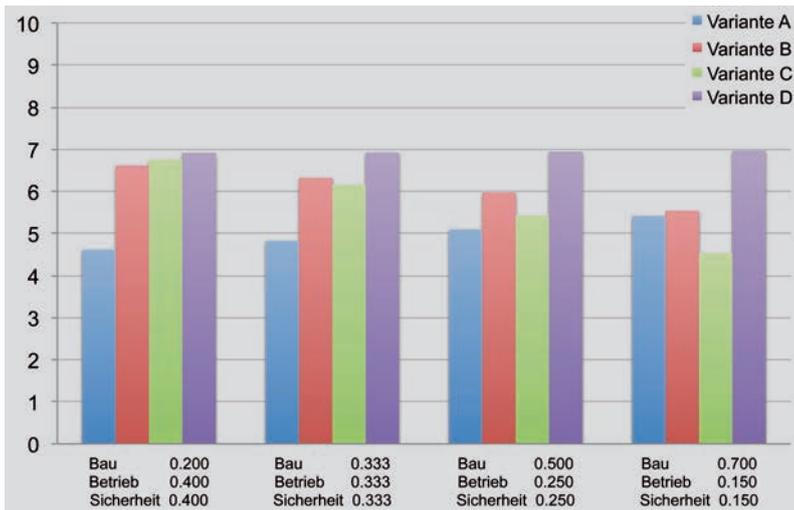


Bild 8: Gesamtnutzwert bei unterschiedlicher Gewichtung der Oberziele (ermittelt im Jahr 1993)

(Kosten, Termine) auf. Die „Kompromissvariante“ D erzielt wegen des insgesamt geringsten Bauvolumens einzig beim Kriterium Bau die höchsten Teilnutzwerte.

Maßgebend für den Variantenentscheid war der pro Variante ermittelte Gesamtnutzwert, welcher sich aus den entsprechend gewichteten Teilnutzwerten zusammensetzte. Die Gewichtung der Teilnutzwerte wurde innerhalb einer gewissen Bandbreite variiert, um die Sensitivität des Systemscheids mit Bezug auf die verschiedenen Projektanforderungen zu simulieren.

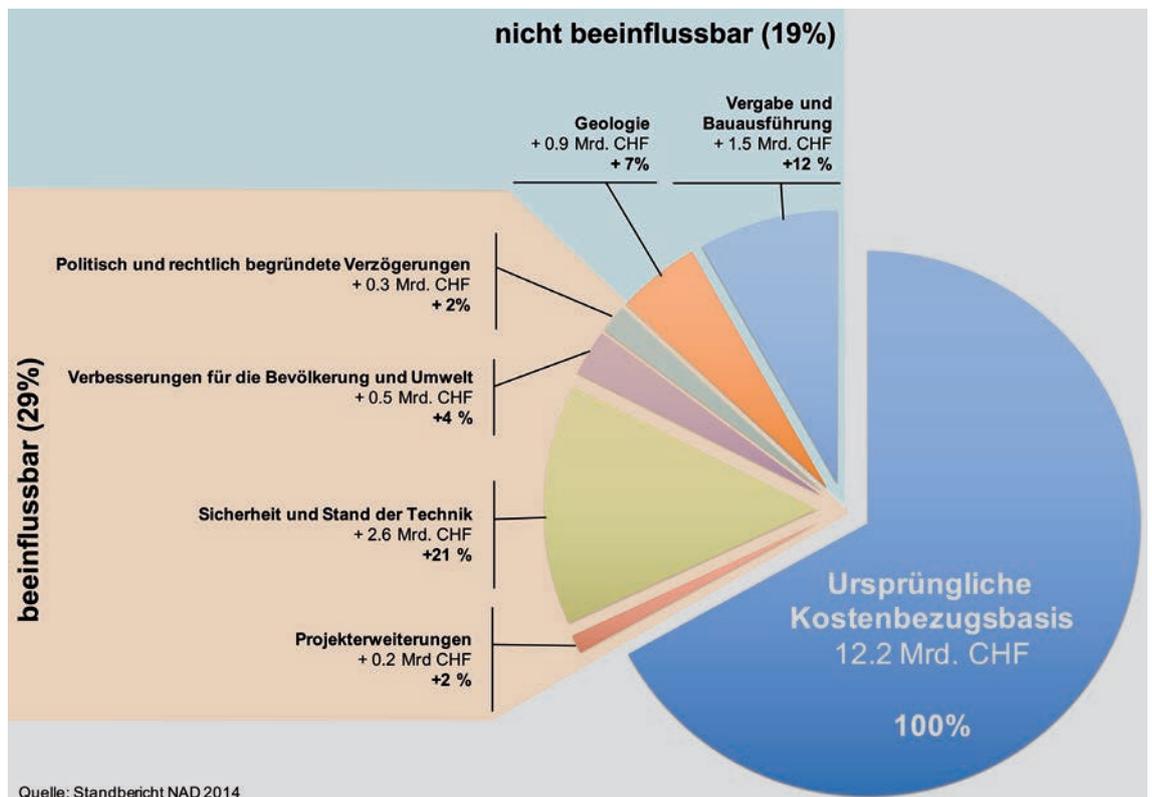
Bild 8 zeigt vier typische Fälle einer unterschiedlichen Gewichtung der Oberziele. Die Variante D weist darin bei jeder Variation der Gewichte stets den höchsten Gesamtnutzwert und einen insgesamt nur wenig variierenden Gesamtnutzwert auf. Dieser Effekt erklärt sich dadurch, dass die Variante D bei den drei Oberzielen jeweils auf recht nahe beieinanderliegende Teilnutzwerte kommt (Bau 7,0, Betrieb 6,4, Sicherheit 7,4). Aufgrund der Tatsache, dass die Variante D stabil stets den höchsten Gesamtnutzwert aufwies, wurde im Jahr 1993 der Variantenentscheid zugunsten der Variante D gefällt.

5 Änderungen der Randbedingungen in den vergangenen 20 Jahren

Die Basistunnelprojekte am Lötschberg und am Gotthard sind mittlerweile gemäß dem Systemscheid von 1993 realisiert worden. Beim Lötschberg-Basistunnel liegen mittlerweile 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.

Wie **Bild 9** zeigt, stiegen gemäß dem Jahresbericht der NEAT-Aufsichtsdelegation der eidgenössischen Räte für das Jahr 2014 [5] die Kosten für das gesamte NEAT-Projekt (Lötschberg- und Gotthard-Achse) von ursprünglich geschätzten 12,2 Mrd. CHF auf 18,2 Mrd. CHF (Preisbasis 1998), was einer Steigerung von

Bild 9: Gesamtprojekt NEAT: Leistungs- und Kostensteigerungen seit dem Jahr 1998 in Höhe von +48 % [4]



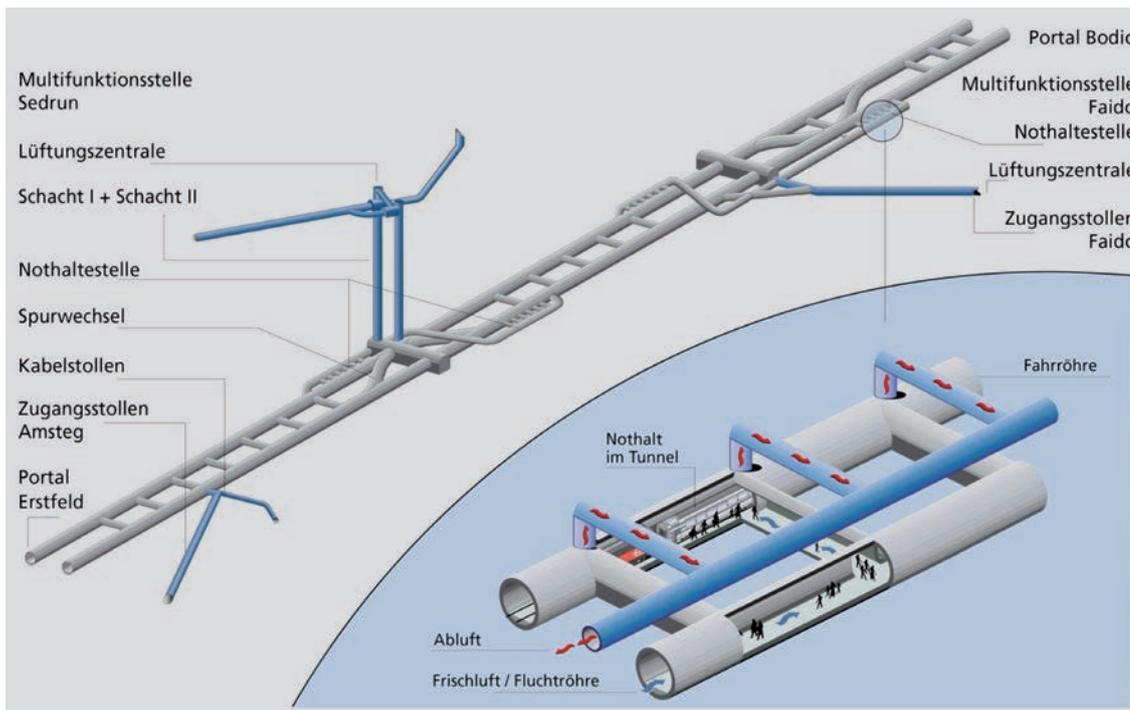


Bild 10: Tunnelsystem am Gotthard-Basistunnel

Quelle: AlpTransit Gotthard AG

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 %).

Auslösendes Moment für die 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 wurden, was zur Folge hatte, dass der 15 km lange Ceneri-Basistunnel der NEAT-Achse am Gotthard neu analog zu [1] zweiröhrig anstelle einer einzigen Doppelspurröhre auszuführen war und massive Veränderungen am Lüftungssystem des Gotthard-Basistunnels vorgenommen werden mussten. So wurden neu 28 Abluftöffnungen samt zugehöriger elektromechanischer Ausrüstung anstelle der nachträglich in der Planung vorgesehenen vier Öffnungen erstellt. Dazu kamen entsprechend längere Abluftstollensysteme [6]. Zusätzlich musste ein Lüftungssystem in die Querschläge eingebaut werden, um die korrekte Betriebstemperatur der bahntechnischen Ausrüstung 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 UmDispositionen und nach einer Neudefinition des Bauablaufs mit vermehrten Parallelaktivitäten.

Die Tatsache, dass sowohl im Teilabschnitt Faido als auch in Sedrun verschiedentlich baugelastische Querstollen erstellt werden mussten, um die geplanten Bauabläufe zu ermöglichen, sind ein klares Indiz, dass eine zusätzliche dritte Röhre, welche 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.

6 Simulationsrechnungen im Jahr 2015

Unter Berücksichtigung der geänderten Randbedingungen haben die Autoren dieses Beitrags im Zeitraum 2014 bis 2015 die Nutzwertanalyse aus dem Jahr 1993 genauer analysiert und 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 [7]. Auch die Botschaft über den Bau der schweizerischen Eisenbahn-Alpentransversale aus dem Jahr 1990 [2] ging von einem solchen Verhältnis aus, sodass dieses für die aktualisierten Überlegungen berücksichtigt wurde (Bild 11).
- ▶ Die Annahme aus dem Jahr 1993, dass für künftige Erneuerungen mindestens abschnittsweise eine drit-

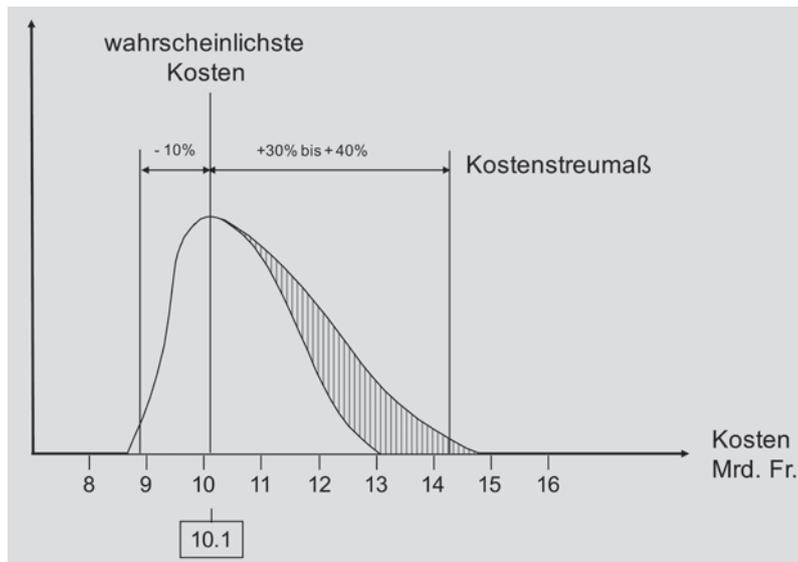


Bild 11: Prognose Kostenstreumaß gemäß NEAT Botschaft 1990 [2]

Tabelle 6: Für die untersuchten Varianten B und D aus dem Jahr 1993 in 1993 und 2015 ermittelte Teilnutzwerte der drei Oberziele (Notenskala von 1 als schlechteste bis 10 als beste Lösung)

Variante	Teilnutzwerte für Oberziel					
	Bau		Betrieb		Sicherheit	
	1993	2015	1993	2015	1993	2015
B (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

te Röhre gebaut werden kann, ist heute nicht mehr haltbar und wird nicht mehr berücksichtigt.

- ▶ Der Aufwand für die künstliche Lüftung ist bei einem Dreiröhrensystem (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 schienenumabhängig 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.

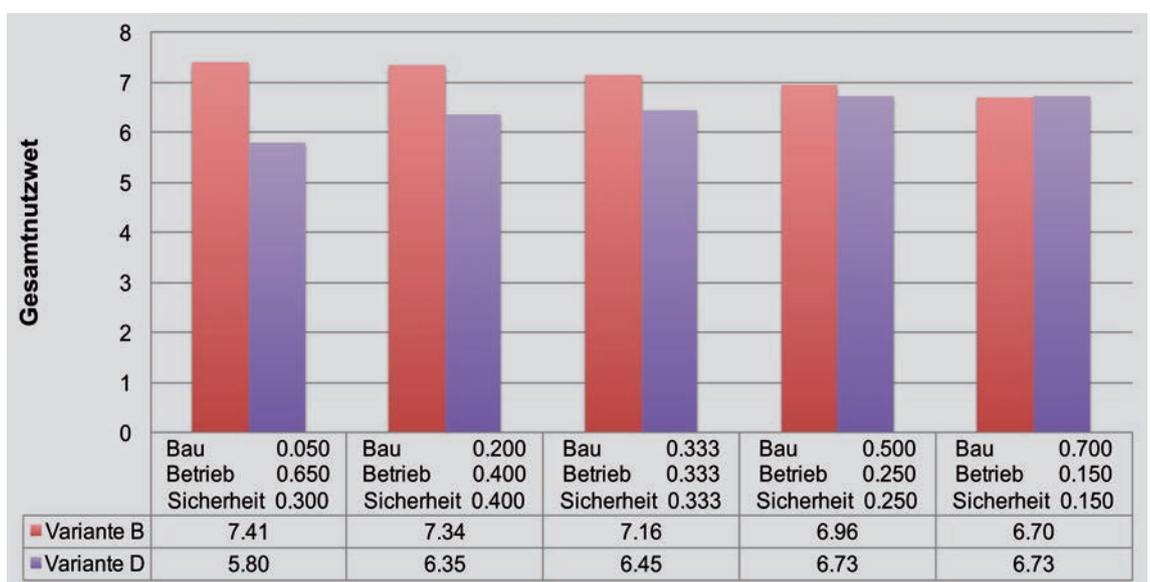
Für die auf dieser Basis vorgenommene Grobbewertung ergaben sich die in **Tabelle 6** dargestellten Teilnutzwerte pro Oberziel. Ein Blick in die **Tabelle 6** zeigt, dass auch nach heutigem Kenntnisstand die Variante D mit zwei Einspurtunneln und Nothaltestellen bei dem Oberziel Bau (Investitionskosten, 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 Rohbauausrüstung (Türen, Tore, Lüftungssysteme etc.) 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 im **Bild 12** dargestellten Ergebnisse der Sensitivitätsanalyse mit stark variierenden Gewichtungen der drei Oberziele zeigen, dass die Variante B (zwei Einspurtunnel und Diensttunnel) gegenüber Variante D (zwei Einspurtunnel und Nothaltestellen) meistens besser abschneidet.

Nur bei einer Gewichtung des Oberziels Bau mit 70 % ist die Variante D weiterhin die Bestvariante, wenn auch mit marginaler Differenz. Eine solch hohe Gewichtung des Kriteriums Bau ist aber nur dann ge-

Bild 12: Gesamtnutzwert bei unterschiedlicher Gewichtung der Oberziele (ermittelt im Jahr 2015)



rechtfertigt, wenn das oberste Ziel die Minimierung der Anfangsinvestition ist.

Folgt man dem Gedanken einer Lebenszyklusbetrachtung, so müsste das Kriterium Betrieb höher gewichtet werden als nur mit 15 %. Erfahrungsgemäß bewegen sich die Betriebskosten sowie die Unterhalts- und Ersatzinvestitionen in der gleichen Größenordnung wie die Anfangsinvestitionen. Unter Berücksichtigung der Sicherheitsanforderungen ist deshalb eine Wertung der drei Oberziele Bau, Betrieb und Sicherheit mit je einem Drittel 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 zu Gunsten der Variante D aus dem Jahr 1993.

Wie die Analyse im Jahr 1993 ist auch die Nutzwertanalyse im Jahr 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 Lebenszyklus-Kosten-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 vorliegen, welcher anders als im Jahr 1993 eine solche Betrachtung ermöglicht.

7 Schlussfolgerungen und Empfehlungen

Der Systemscheid 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. Der Variantenentscheid 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 Milliarden Schweizer Franken nicht überschreiten. Das Geld für die Variante mit einer dritten Röhre, die auch 1993 in verschiedenen Kriterien der Nutzwertanalyse am Besten abschnitt, war zu jenem Zeitpunkt nicht vorhanden. Noch höhere Kosten hätten im damaligen politischen Umfeld ein Scheitern des gesamten AlpTransit-Projekts aus 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 Rohbauausrüstung und die bahntechnische Ausrüstung gegenüber den ursprünglichen Annahmen markant gestiegen [8, 9]. Die später dazu gekommenen Elemente, wie die Querschlaglüftung (**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 doch 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.

Eine vollständige Kosten-Nutzen-Rechnung unter Berücksichtigung heutiger Erfahrungswerte bezüglich Betriebs- und Unterhaltskosten langer Eisenbahntunnel dürfte diese Aussage noch untermauern, wie erste überschlägliche Berechnungen gezeigt haben. Die dritte Röhre dürfte dabei aber nicht nur als reiner Erkundungs- und Entwässerungstunnel ausgebildet werden, sondern müsste primär als Dienstunnel 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 würde.

Es ist deshalb wenig erstaunlich, dass beim Brenner-Basistunnel aktuell ein System mit Dienststollen analog zu Variante B zur Ausführung kommen soll. Damit dieser als Erkundungsstollen definierte Stollen (**Bild 14**)

Bild 13: Ausrüstung eines Querschlags am Gotthard-Basistunnel
Quelle: T. Jesel, Ingenieurgemeinschaft GBT Süd



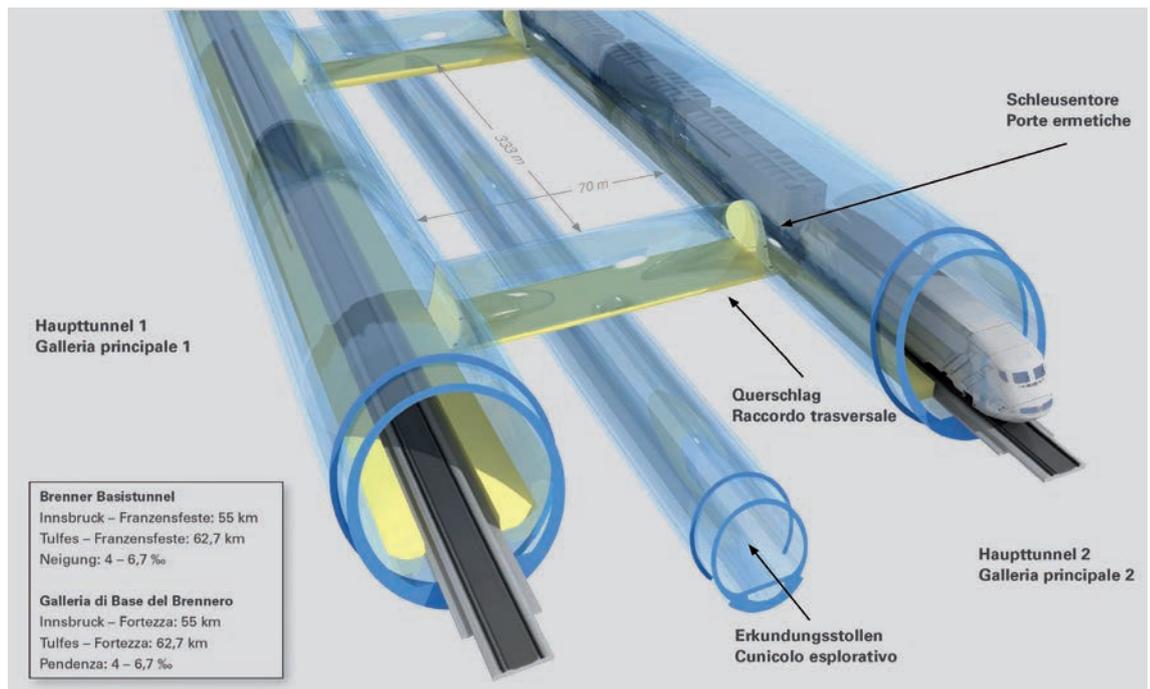


Bild 14: Aktuell vorgesehene Tunnelssystem am Brenner-Basistunnel [10]

seine langfristig günstige betriebliche Wirkung entfalten kann, müsste dieser auch im Betrieb entsprechend genutzt werden können.

Bei weitergehenden generellen Untersuchungen zur Systemwahl sehr langer Tunnel wäre wohl auch die Variante C mit drei Einspurtunneln 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 Dienststunnel zu nutzen.

Ungeachtet der eingesetzten Methode zur Entscheidungsfindung und der tatsächlich bevorzugten Variante ist 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 des Systementscheidens 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.

8 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 bereits bei der STUVA-Tagung präsentierten Beitrags [11].

9 Referenzen

- [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-Alpentransversale (Alpentransit-Beschluss) vom 23. Mai 1990
- [3] Ernst Basler und Partner: Systemwahl Gotthard-Basistunnel – Vergleich der Tunnelssystemvarianten: Nutzwertanalyse. 1993 (unveröffentlicht)
- [4] Bericht IG GGRC vom 17.12.1992, (unveröffentlicht)
- [5] NEAT Aufsichtsdelegation der eidgenössischen Räte, Oberaufsicht über den 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] Simoni, R.: Planung und Wirklichkeit beim Kosten- und Zeitplan des Gotthard-Basistunnels. STUVA Tagung, Stuttgart, 2013
- [8] AWK Group: Leittechnik und Telekommunikation im Gotthard-Basistunnel. Fokus AWK, Dezember 2010
- [9] Vetsch, H.-P.: Gotthard-Basistunnel: Risiken erfassen, Sicherheitsmaßnahmen ergreifen und Restrisiko akzeptieren. GeoResources Zeitschrift 1 | 2014, S. 14-22
- [10] Bergmeister, K.: Brenner Basistunnel; Lebenszyklusorientierte Planung und innovative Bautechnik. Swiss Tunnel Congress, Luzern, 2015
- [11] Ehrbar, H.; Vetsch, H.-P.; Zbinden, P.: Lange Eisenbahntunnel: Zur Systemwahl – Rückblick und Vorausschau. STUVA-Tagung 2015, Forschung + Praxis 46, S. 51-62

Dipl.-Ing. Heinz Ehrbar

ist Leiter Management Großprojekte bei der DB Netz AG in Frankfurt am Main in Deutschland. Er war vormals Leiter Tunnel und Trassebau bei der AlpTransit Gotthard AG.



Kontakt: heinz.ehrbar@mac.com

Hans-Peter Vetsch

ist Geschäftsführer der Vetsch Rail Consulting GmbH in Bützberg in der Schweiz. Er war ehemals Leiter Betrieb und Sicherheit der AlpTransit Gotthard AG.



Kontakt: hpvetsch.vetsch@bluewin.ch

Dipl.-Bauing. Peter Zbinden

in Erlenbach ZH in der Schweiz. Er war von 1992 bis 1997 stv. Delegierter SBB Alptransit Gotthard und von 1998 bis 2007 Vorsitzender der Geschäftsleitung AlpTransit Gotthard AG.

