

# Gotthard Base Tunnel – Choice of the tunnel system from today's point of view

## Gotthard-Basistunnel – Wahl des Tunnelsystems aus heutiger Sicht

The historic rail tunnels in the Alps were consistently built in the form of single-tube twin-track tunnels, starting with the Mont Cenis Tunnel (1871). Only the 19.8 km long Simplon Tunnel at the start of the 20th century was built with two separate single-track tunnels. In 1988, the 53.8 km long Seikan Tunnel became the first tunnel more than 50 km long to go into operation – once more as a twin-track tunnel, although with additional constructional elements such as forced ventilation, emergency stations and a service tunnel. In 1994 followed the Channel Tunnel with a system of two single-track tunnels and a service or safety tunnel as well as a complex ventilation system. For the base tunnels through the Alps, the question arose in Switzerland at the start of the 1990s, what is the optimal tunnel system considering the requirements of construction, safety and operation? A cost-benefit analysis resulted in a system with two single-track tunnels and multi-function stations at the third points as the optimum. Meanwhile, various requirements have been newly formulated so that the question arises whether the same decision would be made with the knowledge available today.

### 1 System decisions in the past

The originally 12.8 km long Mont Cenis Tunnel was built in the period 1857 to 1871, the first long rail tunnel in the Alps, in the form of a single-tube twin-track tunnel. Almost all the subsequent tunnels at the Gotthard (1882, 15 km), at the Arlberg (1884, 10.6 km) and at Lötschberg (1913, 14.6 km) also used this system, although the approach lines remained single-track for a long time. One decisive consideration was the fear that there would be too little air in the small cross-section to maintain boiler fires. Long “recovery waits” for people (employees and passengers) and material at the large portal stations were also a feature of the system.

The 19.8 km long Simplon Tunnel at the start of the 20th century was built for economic reasons as a single-track tunnel with a central crossing station and opened for service in 1906 (Simplon Tunnel I). Ventilation during the construction period (rock temperature above 40° C with an overburden of more than 2,100 m), which was decisive for the success of this project. In order to provide a route largely separated from construction operations for the then innovative compressed air energy supply, a parallel tunnel was built at a spacing of 17 m, with the option of enlarging this later to a running tunnel. The enlargement

*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 Anfang des 20. Jahrhunderts mit zwei separaten Einspurtunneln 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 einem 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 Anfang der 1990er-Jahre die Frage, welches das optimale Tunnelsystem unter Berücksichtigung der Anforderungen Bau, Sicherheit und Betrieb sei. Aus einer Nutzwertanalyse resultierte das System mit zwei Einspurtunneln sowie Multifunktionsstellen in den Drittelpunkten als Optimum. Mittlerweile wurden verschiedene Anforderungen neu formuliert, so dass sich die Frage stellt, ob mit den heutigen Kenntnissen die gleiche Entscheidung getroffen würde.*

### 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 Arlberg (1884, 10,6 km) und am Lötschberg (1913, 14,6 km) verwendeten ebenfalls dieses System, obwohl die Zufahrtsstrecken noch längere Zeit einspurig waren. Maßgebend war unter anderem die Befürchtung, dass bei geringeren Querschnitten zu wenig Luft zur Aufrechterhaltung des Kesselfeuers vorhanden wäre. Mit zum System gehörten beim Dampfbetrieb die längeren „Erholungsaufenthalte“ für Mensch (Mitarbeiter und Passagiere) und Material in den großen Portalbahnhöfen.

Der 19,8 km lange Simplontunnel wurde anfangs des 20. Jahrhunderts aus ökonomischen Gründen als einspuriger Tunnel mit mittiger Kreuzungsstation gebaut und 1906 in Betrieb genommen (Simplontunnel I). Die für den Erfolg des Vorhabens entscheidende Baulüftung (Festtemperatur über 40 °C bei einer Überlagerung von über 2.100 m) zur Sicherstellung einer vom Baubetrieb weitgehend getrennten Trassierung der damals sehr jungen Energieversorgung mit Druckluft wurde im Abstand von 17 m

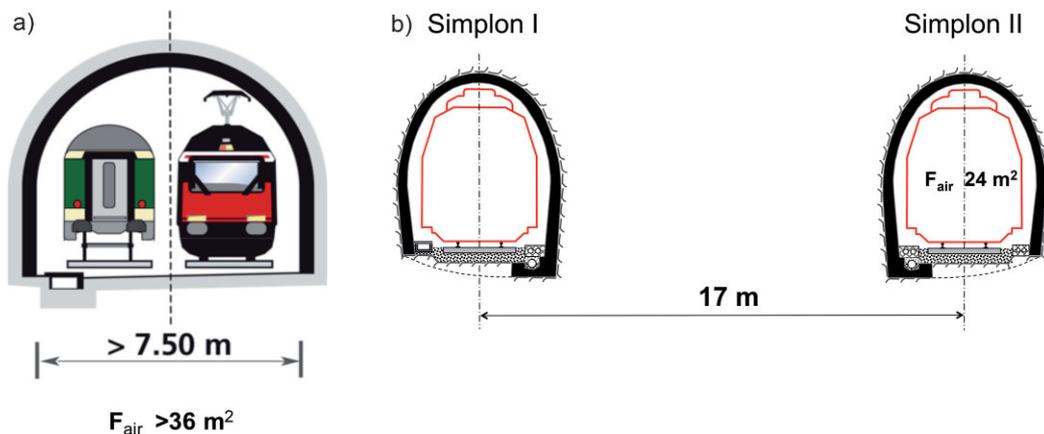


Fig. 1. Tunnel cross-sections of historic long rail tunnels in the Alps: a) Gotthard rail tunnel (1882) (Quelle; ATG), b) Simplon Tunnel (1906/1922) Bild 1. Tunnelquer-schnitte alter langer Eisenbahntunnel in den Alpen: a) Gotthard-Eisenbahntunnels (1882) (Quelle; ATG), b) Sim-plontunnel (1906/1922)

went into operation in 1922 as Simplon Tunnel II. The Simplon Tunnel was the first long Alpine tunnel to be operated electrically from the start and remained the longest rail tunnel in the world until 1982 (Fig. 1).

In 1988, the 53.8 km long Seikan Tunnel became the first rail tunnel more than 50 km long to start operation. This connects the islands of Hokkaido and Honshu under the Tsugaru Strait and was also built as a twin-track tunnel. As a new construction element, a ventilation system was installed in an electrically operated rail tunnel for the first time as well as two emergency stations at the bank before crossing below the sea (Fig. 2). The service and safety tunnel was only provided for the stretch under the sea.

ein Parallelstollen erstellt mit der Option eines späteren Ausbaus zur Fahrrohre. Dieser Ausbau wurde 1922 als Simplontunnel II 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 kommerziellen Betrieb übergeben. Dieser verbindet unter der Tsugaru Meeresstraße die Inseln Hokkaido und Honshu und wurde wiederum als Doppelspurtunnel ausgebildet. Als neue Konstruktionselemente kamen erstmalig ein Lüftungssystem in einen elektrisch betriebenen Eisen-

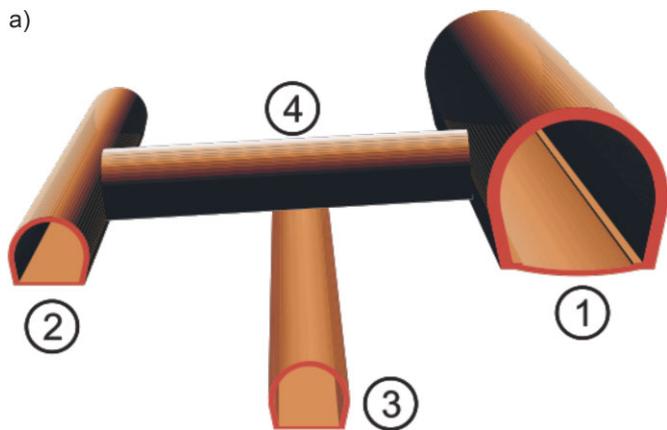
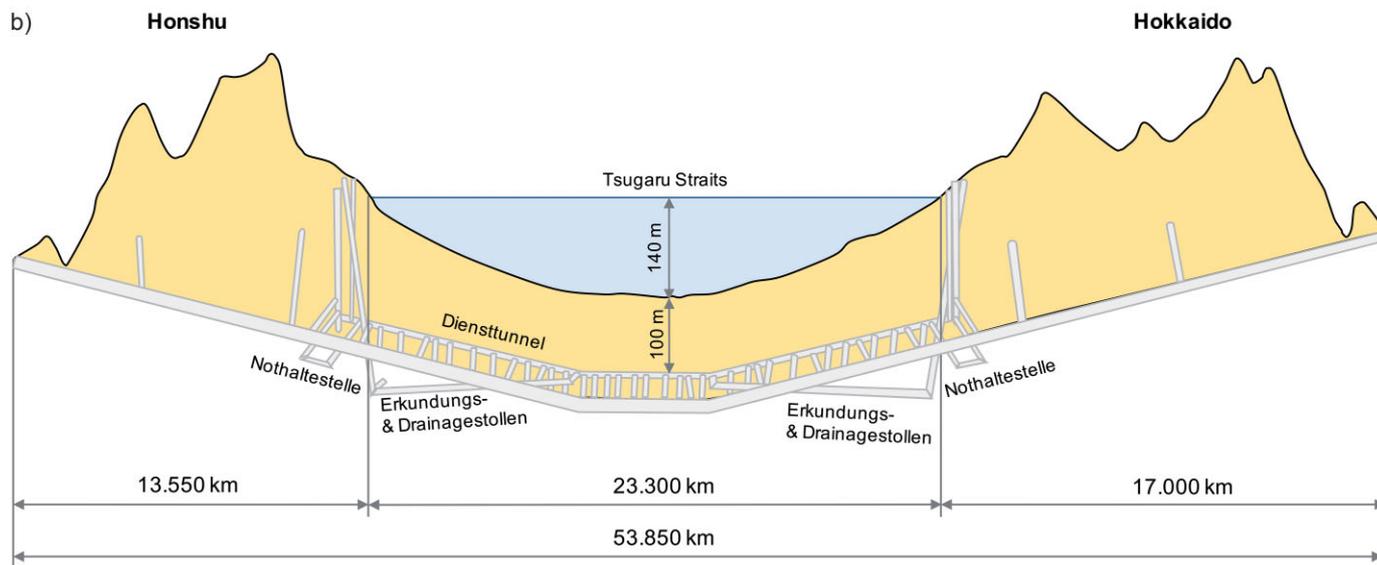


Fig. 2. Seikan Tunnel (Japan): a) tunnel system, b) schematic longitudinal section 1 – running tunnel, 2 – service tunnel, 3 – investigation tunnel, 4 – connecting tunnels (every 600 m) (source: Wikipedia)

Bild 2. Seikan Tunnel (Japan): a) Tunnelsystem, b) schematischer Längsschnitt 1 – Fahrrohre, 2 – Diensttunnel, 3 – Erkundungsstollen, 4 – Verbindungsstollen (alle 600 m) (Quelle: Wikipedia)



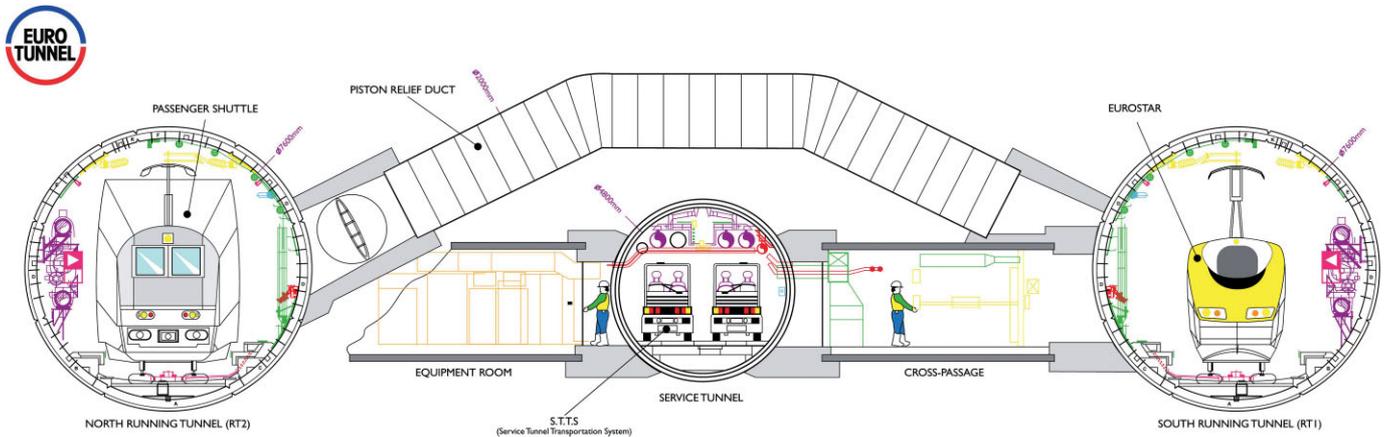


Fig. 3. Tunnel system of the Channel Tunnel (France/UK) with central service tunnel and cross passages (every 375 m) and pressure balancing connections (source: Eurotunnel)

Bild 3. Tunnelsystem Eurotunnel (Frankreich/UK) mit mittig angeordnetem Servicetunnel und Querschlägen (alle 375 m) sowie Druckausgleichsverbindungen (Quelle: Eurotunnel)

In parallel to this, construction had started in Europe on the 50.4 km long Channel Tunnel between France and England. The safety requirements for this tunnel were heavily influenced by the marine regulations of ferry operation and very challenging. Accordingly the tunnel was built as a three-tunnel system consisting of two single-track running tunnels and a service or safety tunnel, and was also provided with a complex ventilation system (Fig. 3). The Channel Tunnel opened in 1994.

## 2 The system decision of 1993

In order to answer the question of the optimal tunnel system for the transalpine tunnels in Switzerland in a comprehensible manner, an expert committee of Swiss and international experts was organised under the leadership of the Swiss federal transport office (BAV) to prepare the forthcoming decision on the basis of objective criteria. In 1992/1993, three tunnel colloquiums took place, in the course of which the appointed experts prepared an objectively comprehensible proposal for the tunnel system considering the criteria construction, operation and safety. Four investigation cases (Fig. 4) were analysed in this process [1]:

- Solution A: twin-track tunnel (DST) with service tunnel (DT), derived from the 1975 construction project of Swiss Railways (SBB) and most tunnels built until then,
- Solution B: tunnel system with two single-track tunnels (EST) and a service tunnel, similar to the Eurotunnel solution,
- Solution C: three single-track tunnels in order to be able to keep two running tunnels open during maintenance,
- Solution D: two single-track tunnels without a service tunnel but with two emergency stations (underground stops) at the third points for the evacuation of passengers (taking into account the criterion of 15 minute emergency running of a burning train).

The tunnel system used for the Channel Tunnel with a third service tunnel was not further investigated. The decision whether a service tunnel should be positioned in the middle or at the side, would have been investigated in

bahntunnel sowie zwei Nothaltestellen auf der Höhe der „Ufer“ vor Unterquerung des Meers hinzu (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 Sicherheitsanforderungen an diesen Tunnel waren stark von den maritimen Vorschriften des Fährbetriebs geprägt und höchst anspruchsvoll. Dementsprechend wurde der Tunnel mit einem Drei-Röhren-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.

## 2 Die Systementscheidung von 1993

Um die Frage nach dem optimalen Tunnelsystem für die Alpen transit-Tunnel in der Schweiz nachvollziehbar lösen zu können, wurde unter der Leitung des schweizerischen Bundesamts für Verkehr (BAV) 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 Tunnel-Kolloquien statt, anlässlich derer die bestellten Experten einen sachlich nachvollziehbaren Vorschlag zum Tunnelsystem unter Berücksichtigung der Kriterien Bau, Betrieb und Sicherheit erarbeiteten. Vier Untersuchungsfälle (Bild 4) wurden dabei analysiert [1]:

- Lösung A: Doppelspurttunnel (DST) mit Diensttunnel (DT), abgeleitet vom Bauprojekt 1975 der Schweizerischen Bundesbahnen (SBB) und den meisten bisherigen langen Tunnelbauten,
- Lösung B: Tunnelsystem mit zwei Einspurttunneln (EST) und einem Diensttunnel, ähnlich der Eurotunnel-Lösung,
- Lösung C: Drei Einspurttunnel, um während der Erhaltung immer zwei Fahrrohre zur Verfügung zu halten,
- Lösung D: Zwei Einspurttunnel ohne Diensttunnel, mit zwei Nothaltestellen (unterirdische Haltestelle) in den Drittelpunkten zur Evakuierung von Reisenden (Berücksichtigung des Kriteriums von 15 min Notlaufeschaften eines brennenden Fahrzeugs).

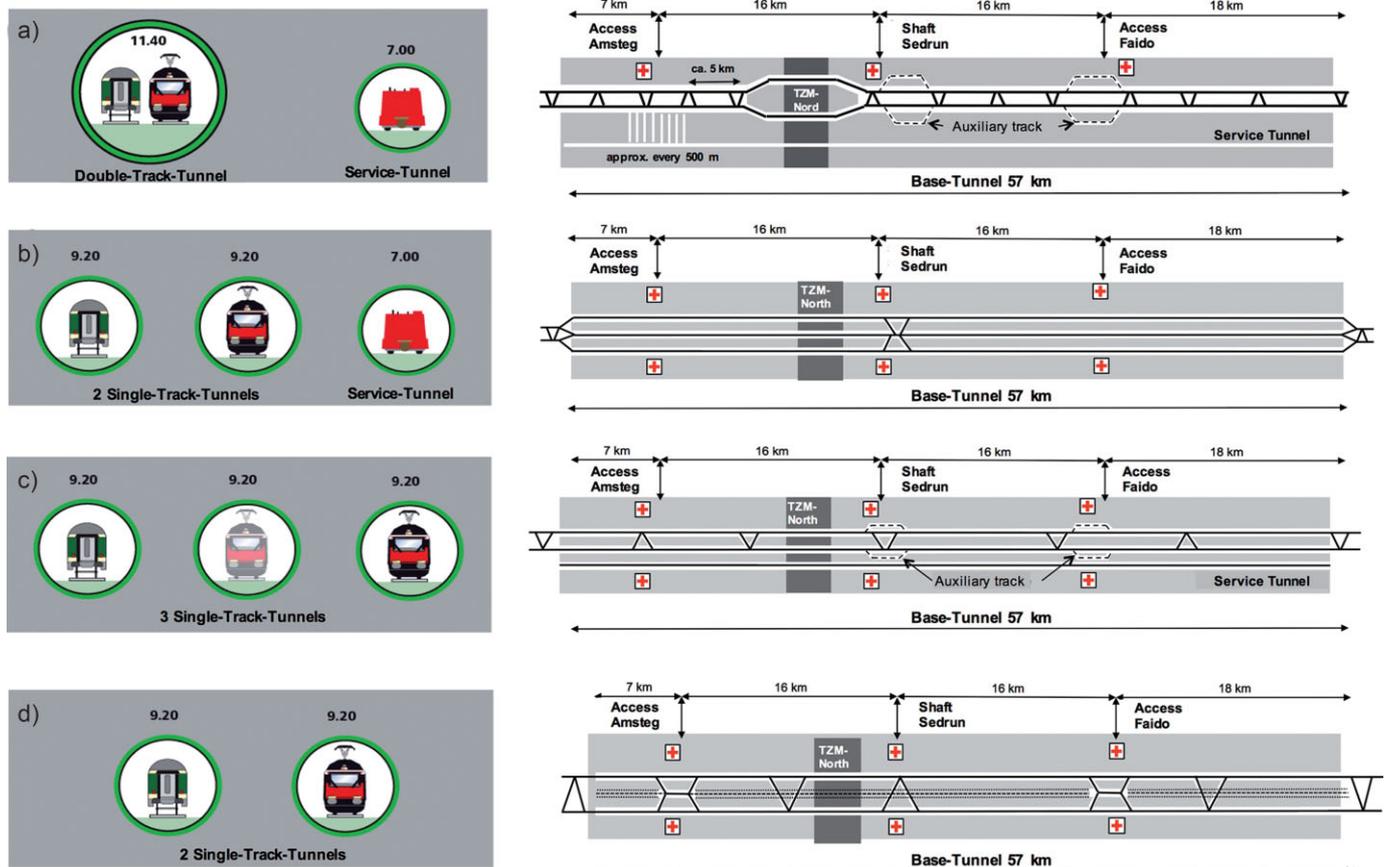


Fig. 4. Investigated system variants through the example of the Gotthard Base Tunnel [1]: a) twin-track tunnel (DST) with service tunnel (DT), b) Tunnel system with two single-track tunnels (EST) and a service tunnel, c) three single-track tunnels, d) two single-track tunnels with emergency stations but no service tunnel  
 Bild 4. Untersuchte Systemvarianten am Beispiel des Gotthard-Basistunnels [1]: a) Doppelspurtunnel (DST) mit Diensttunnel (DT), b) Tunnelsystem mit zwei Einspurtunneln (EST) und einem Diensttunnel, c) drei Einspurtunnel, d) zwei Einspurtunnel ohne Diensttunnel mit Nothaltestellen

more detail in a separate preliminary process in case of a positive decision.

Solution C with three single-track tunnels was brought into the discussion by the safety and maintenance working group of SBB due to the open issues under discussion at the conclusion of the 1975 project (Solution A). The third tunnel was intended to keep the advantages of a service tunnel but improve the not entirely satisfactory track-dependent concept for maintenance and rescue.

## 2.1 Methodology for decision making

A cost-benefit analysis was used as the methodology for decision making in the variant study. This is a quantitative, non-monetary method of analysis from decision theory (point process, scoring model). This process has advantages when the decision criteria are mostly difficult to represent financially or in other figures. A cost-benefit analysis is thus often used in the early stages of a project, when the project and consequential costs are not known with sufficient precision. This situation was the case for the AlpTransit Project at the start of the 1990s.

The advantages of this method lie in its simple handling of complex questions, rapidly achieving a direct comparability of variants. The disadvantage is the fact that the selection and weighting of the criteria in particular are

Das am Kanaltunnel verwendete System mit einem mittleren Diensttunnel wurde nicht weiter untersucht. Die Entscheidung, ob der Diensttunnel mittig oder seitlich angeordnet werden sollte, wäre im Fall einer positiven Entscheidung zugunsten eines solchen Systems in einem separaten Vorprojekt detailliert untersucht worden.

Die Lösung C mit drei Einspurtunneln wurde von der Arbeitsgruppe Sicherheit und Erhaltung der SBB aufgrund der beim Abschluss des Projekts 1975 (Lösung A) diskutierten Pendenzen eingebracht. Mit der dritten Röhre sollten die Vorteile des Diensttunnels erhalten bleiben, jedoch das nicht ganz befriedigende gleisunabhängige Konzept für Erhaltung und Rettung durch eine gleisgestützte Lösung verbessert werden.

## 2.1 Methodik zur Entscheidungsfindung

Als Methodik zur Entscheidungsfindung im Variantenstudium wurde die sogenannte Nutzwertanalyse angewendet. Diese ist eine quantitative, nicht-monetäre Analysemethode 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

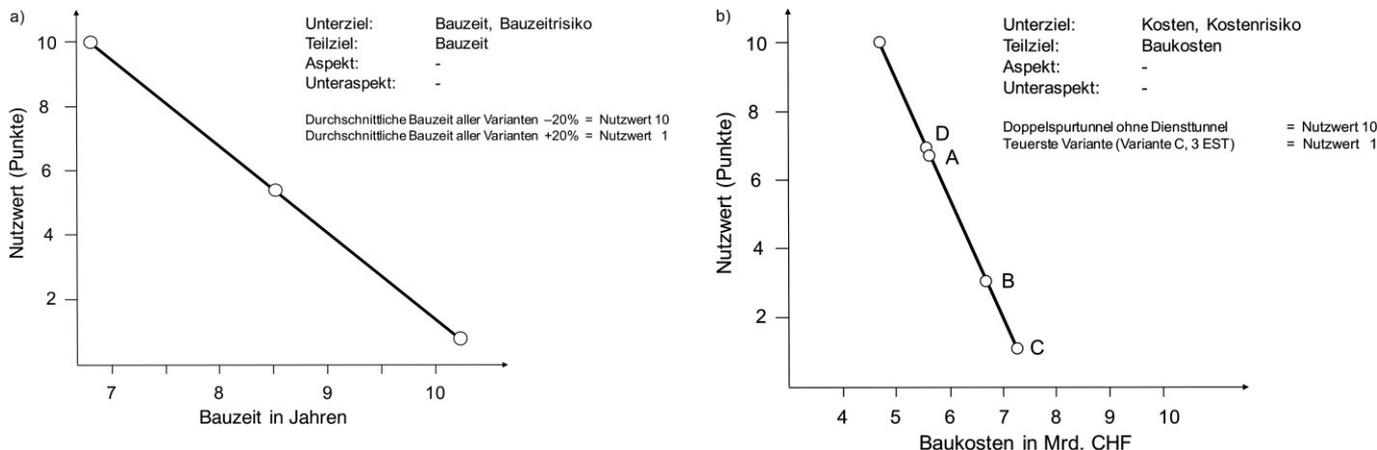


Fig. 5. Examples of linear benefit functions: a) construction time; b) construction costs [1]  
 Bild 5. Beispiele für lineare Nutzwertfunktionen: a) Bauzeit; b) Baukosten [1]

subject to strong subjective influences. The target system shown in Table 1 was used in 1992/1993 for the base tunnels in Switzerland.

A scale of 1 (worst solution) to 10 (best solution) was used for the evaluation of the individual criteria. The values were mostly interpolated linearly between the two marks. The gradient of the interpolation lines was determined for each criterion by the responsible and specialised evaluation team (Fig. 5).

**2.2 Result of the cost-benefit analysis**

Using the cost-benefit functions, this gave scores out of a theoretical maximum of 10 for each of the main aims as shown in Table 2. It is no surprise that the simple two-track variant (Variant A) scores below average for operations and safety, while the three-tube systems (Variants B and C) are at a much higher level for these criteria, particularly safety. Vice-versa the three-tube system shows worse values for the criteria construction (costs, time) regarding the main aim construction due to the higher construction volume. The “compromise variant” D only achieves the best placing for the criterion construction since it has the smallest construction volume.

The decision between the variants was based on the total benefit determined for each variant, which was the

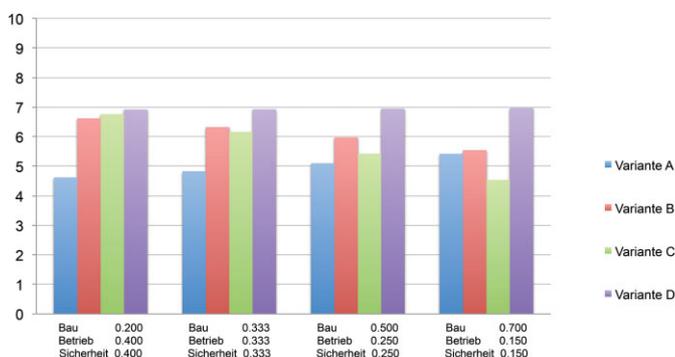


Fig. 6. Overall benefit in 1993 with different weightings of the main aims [1]  
 Bild 6. Gesamtnutzwert 1993 bei unterschiedlicher Gewichtung der Oberziele [1]

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 1 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 5).

**2.2 Resultate der Nutzwertanalyse**

Unter Anwendung der Nutzwertfunktionen ergaben sich bei einer theoretischen maximalen Punktzahl von jeweils 10 die in der Tabelle 2 dargestellten Teilnutzwerte pro Oberziel. Es erstaunt wenig, dass die reine Doppelspurvariante (Variante A) bezüglich Betrieb und Sicherheit unterdurchschnittlich abschneidet, während Drei-Röhren-Systeme (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 Bandbreite variiert, um die Sensitivität der Systementscheidung mit Bezug auf die verschiedenen Projektanforderungen zu simulieren. Bild 6 zeigt vier typische Fälle einer unterschiedlichen Gewichtung der Oberziele.

Table 1. Objective system for the cost-benefit analyses of the NEAT base tunnels [1]

| Overall Objective                    | Objective                     | Weighting                 | Detailed Objective                        | Weighting              | General Requirements                | Weighting   | Specific Requirements         | Weighting |  |  |  |  |
|--------------------------------------|-------------------------------|---------------------------|---|------------------------|-------------------------------------|-------------|-------------------------------|-----------|--|--|--|--|
| <b>Construction</b>                  | Costs, Cost risks             | 0,70                      | Construction Costs                        | 0,80                   |                                     |             |                               |           |  |  |  |  |
|                                      |                               | 0,20                      | Cost risks                                | 0,20                   |                                     |             |                               |           |  |  |  |  |
|                                      | Construction time, Time risks | 0,20                      | Construction time                         | 0,80                   |                                     |             |                               |           |  |  |  |  |
|                                      |                               | 0,10                      | Time risks                                | 0,20                   |                                     |             |                               |           |  |  |  |  |
|                                      | Min. environmental impact     | 0,10                      | Management of spoil                       | 0,80                   |                                     |             |                               |           |  |  |  |  |
|                                      |                               |                           | Intervention in landscape at portal zones | 0,10                   |                                     |             |                               |           |  |  |  |  |
|                                      |                               |                           | Material for embankments                  | 0,10                   |                                     |             |                               |           |  |  |  |  |
|                                      |                               |                           | Quality of production                     | 0,40                   | Stability of timetable              | 0,60        |                               |           |  |  |  |  |
|                                      | <b>Operation</b>              | Requirements of operation | 0,30                                      | Quantity of production | 0,40                                | Travel time | 0,20                          |           |  |  |  |  |
|                                      |                               |                           |   |                        | 0,40                                | Comfort     | 0,20                          |           |  |  |  |  |
| 0,20                                 |                               |                           |   |                        | Capacity                            | 0,90        |                               |           |  |  |  |  |
| Productivity                         |                               | 0,20                      | Quality of production                     | 0,10                   | Complete blockings                  | 0,10        |                               |           |  |  |  |  |
|                                      |                               |                           |   | 0,35                   | Energy for traction                 | 0,35        |                               |           |  |  |  |  |
|                                      |                               |                           |   | 0,25                   | Rolling stock                       | 0,25        | Damages                       | 0,20      |  |  |  |  |
|                                      |                               |                           |   |                        |                                     |             | Maintenance                   | 0,20      |  |  |  |  |
|                                      |                               |                           |   |                        |                                     |             | fast circulation              | 0,60      |  |  |  |  |
|                                      |                               |                           |   |                        |                                     |             | Complexity of installations   | 0,25      |  |  |  |  |
|                                      |                               |                           |   |                        |                                     |             | Complexity in handling        | 0,25      |  |  |  |  |
| <b>Maintenance and refurbishment</b> |                               | 0,60                      | Operating impairment Incidents            | 0,20                   | Complexity of maintenance           | 0,25        | Realability                   | 0,25      |  |  |  |  |
|                                      |                               |                           |   |                        | Switches                            | 0,50        | Switches                      | 0,50      |  |  |  |  |
|                                      |                               |                           |   |                        | Rails                               | 0,30        | Rails                         | 0,30      |  |  |  |  |
|                                      |                               |                           |   |                        | Catenary                            | 0,20        | Catenary                      | 0,20      |  |  |  |  |
|                                      |                               |                           |   |                        |                                     |             | Costs of materials (Abrasion) | 0,25      |  |  |  |  |
|                                      |                               |                           |   |                        |                                     |             | Installations                 | 0,15      |  |  |  |  |
|                                      |                               |                           |   |                        |                                     |             | Organisation of repairs       | 0,40      |  |  |  |  |
|                                      |                               |                           |   |                        |                                     |             | Accessibility of defect       | 0,40      |  |  |  |  |
|                                      |                               |                           |   |                        |                                     |             | Use of technical aids         | 0,20      |  |  |  |  |
|                                      |                               |                           |   |                        |                                     |             | Intervals for maintenance     | 1,00      |  |  |  |  |
| <b>Aero-/Thermodynamics</b>          |                               | 0,10                      | Effort for ventilation                    | 0,50                   | Minimum comfort                     | 0,40        |                               |           |  |  |  |  |
|                                      |                               |                           |   | 0,50                   | few interventions during night time | 0,30        |                               |           |  |  |  |  |
|                                      |                               |                           |   |                        | few interventions during weekends   | 0,30        |                               |           |  |  |  |  |
|                                      |                               |                           |   |                        |                                     |             |                               |           |  |  |  |  |
|                                      |                               |                           |   |                        |                                     |             |                               |           |  |  |  |  |
|                                      |                               |                           |   |                        |                                     |             |                               |           |  |  |  |  |
|                                      |                               |                           |   |                        |                                     |             |                               |           |  |  |  |  |
|                                      |                               |                           |   |                        |                                     |             |                               |           |  |  |  |  |
|                                      |                               |                           |   |                        |                                     |             |                               |           |  |  |  |  |
|                                      |                               |                           |   |                        |                                     |             |                               |           |  |  |  |  |
| <b>Acceptance</b>                    |                               | 0,30                      | Travel comfort (pressure)                 | 0,80                   |                                     |             |                               |           |  |  |  |  |
|                                      |                               |                           |   | 0,20                   | Passengers                          | 0,20        |                               |           |  |  |  |  |
|                                      |                               |                           |   | 0,80                   | Personnel                           | 0,80        |                               |           |  |  |  |  |
|                                      |                               |                           |   | 0,20                   | Train accident                      | 0,20        |                               |           |  |  |  |  |
|                                      |                               |                           |   | 0,25                   | Fire                                | 0,25        |                               |           |  |  |  |  |
|                                      |                               |                           |   | 0,30                   | Dangerous goods                     | 0,30        |                               |           |  |  |  |  |
|                                      |                               |                           |   | 0,05                   | Accidents of persons                | 0,05        |                               |           |  |  |  |  |
|                                      |                               |                           |   | 0,20                   | Accident of work                    | 0,20        |                               |           |  |  |  |  |
|                                      |                               |                           |   | <b>Risk</b>            |                                     | 0,70        | Accident of work              | 0,20      |  |  |  |  |
|                                      |                               |                           |   |                        |                                     |             |                               |           |  |  |  |  |
|                                      |                               |                           |   |                        |                                     |             |                               |           |  |  |  |  |
|                                      |                               |                           |   |                        |                                     |             |                               |           |  |  |  |  |
|                                      |                               |                           |   |                        |                                     |             |                               |           |  |  |  |  |
|                                      |                               |                           |   |                        |                                     |             |                               |           |  |  |  |  |
|                                      |                               |                           |   |                        |                                     |             |                               |           |  |  |  |  |
|                                      |                               |                           |   |                        |                                     |             |                               |           |  |  |  |  |
|                                      |                               |                           |   |                        |                                     |             |                               |           |  |  |  |  |
|                                      |                               |                           |   |                        |                                     |             |                               |           |  |  |  |  |

Tabelle 1. Zielsystem für die Nutzwertanalyse der NEAT-Basistunnel [1]

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

Table 2. Partial benefits in 1993 per main aim (in each case with a theoretical max. score of 10)

Tabelle 2. Teilnutzwerte 1993 pro Oberziel (bei einem theoretischen Maximum von jeweils 10)

|   | Main aims<br>Oberziele |                      |                      |
|---|------------------------|----------------------|----------------------|
|   | Construction<br>Bau    | Operation<br>Betrieb | Safety<br>Sicherheit |
| Variant A (DST & DT)<br>Variante A (DST & DT)       | 5.9                    | 4.3                  | 4.3                  |
| Variant B (2 EST & DT)<br>Variante B (2 EST & DT)   | 4.9                    | 6.2                  | 7.9                  |
| Variant C (3 EST)<br>Variante C (3 EST)             | 3.2                    | <b>7.0</b>           | <b>8.3</b>           |
| Variant D (2 EST & MFS)<br>Variante D (2 EST & MFS) | <b>7.0</b>             | 6.4                  | 7.4                  |

sum of the weighted partial benefits determined for each variant. The weighting of the partial benefits was varied within a certain bandwidth in order to simulate the sensitivity of the system decision with reference to various project requirements. Fig. 6 shows four typical cases of a different weighting of the main aims.

It can be seen that Variant D always shows the highest benefit for each variation of weighting and shows a total benefit that only varies slightly. This effect can be explained because Variant D has relatively close partial benefit scores (construction 7.0, operation 6.4, safety 7.4). Due to the fact that variant D always showed the highest total benefit score, the decision was made in favour of Variant D in 1993.

### 2.3 Statements about the results of the analysis of 1993

The following statements can be made about the details of the cost-benefit analysis of 1993:

- Variant B (2 EST & DT) was assumed to be about 17 % more expensive than Variant D (2 EST with emergency station). The scoring of the criteria construction costs/construction cost risks, however, gives a difference of 60 % in favour of Variant D.
- For the installation of the equipment (structure and railway equipment), the following basic rules applied:
  - simple and robust, only as much equipment as necessary (for example no forced ventilation),
  - only absolutely necessities are installed in the running tunnel.
- The sub-category “maintenance and repair” was evaluated practically equally for Variants B and D. For Variant D, the maintenance expense was based on the following assumption [2]: *“If the third tube can be constructed between the two main tubes in advance in the area of the site<sup>1</sup>, this only has minimal operational effects for Variant D [...]. In case this is not possible, significant operational effects are unavoidable.”* The precondition for

<sup>1</sup> the term site in this case denotes refurbishment sites (for example track replacement) with continued operation.

Es ist zu erkennen, 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). Aufgrund der Tatsache, dass die Variante D stabil stets den höchsten Gesamtnutzwert aufwies, wurde im Jahre 1993 die Variantenentscheidung zugunsten der Variante D gefällt.

### 2.3 Feststellungen zu den Resultaten der Analyse 1993

Zu den Detailangaben der Nutzwertanalyse von 1993 sind die folgenden Feststellungen zu machen:

- Die Variante B (2 EST & DT) wurde ca. 17 % teurer als Variante D (2 EST mit Nothaltestelle) angenommen. Die Benotung der Kriterien Baukosten/Baukostenrisiken-Kosten ergibt jedoch eine Differenz von 60 % zugunsten 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 (zum Beispiel keine aktive Lüftung),
  - Nur das absolut Notwendige 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 zugrunde gelegt [2]: *„Wenn im Bereich der Baustelle<sup>1</sup> 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.

### 3 Änderungen der Randbedingungen in den letzten 20 Jahren

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

Gemäß dem Jahresbericht der Aufsichtsdelegation der Neuen Eisenbahn Alpentransversale (NEAT) der eidgenössischen Räte für das Jahr 2014 [3] stiegen die Kosten für das gesamte NEAT-Projekt (Lötschberg-Achse und Gotthard-Achse) von ursprünglich geschätzten 12,2 auf 18,2 Mrd. CHF (Preisbasis 1998), was einer Steigerung von 48 % entspricht. Etwa die Hälfte dieser Mehrkosten ver-

<sup>1</sup> Mit dem Begriff Baustelle sind in diesem Kontext Baustellen für die Erneuerung (zum Beispiel Fahrbahn) bei laufendem Betrieb gemeint.

# 15.

Auslobung 2017  
durch den Verlag Ernst & Sohn

## ULRICH FINSTERWALDER INGENIEURBAUPREIS



Der Verlag zeichnet seit 1988 alle zwei Jahre herausragende Ingenieurleistungen im Konstruktiven Ingenieurbau aus. Mit der Auslobung zum Ulrich Finsterwalder Ingenieurbaupreis 2017 geschieht dies bereits zum 15. Mal, um das Wirken von Bauingenieuren und ihr Engagement für Baukultur ins öffentliche Bewusstsein zu rücken.

### Teilnahmebedingungen

- Die Ingenieurleistung muss innerhalb Deutschlands, Österreichs oder der Schweiz erbracht worden sein. Der Standort des zu prämierenden Bauwerks ist regional nicht eingeschränkt und kann sich weltweit befinden. Zugelassen sind auch Bauprojekte, die von ausländischen Ingenieuren in Deutschland gebaut wurden.
- Das Bauwerk muss zwischen August 2014 und August 2016 fertiggestellt worden sein.
- Berechtig zur Einreichung sind Bauingenieure, die für den Entwurf und/oder die Ausführung maßgeblich verantwortlich waren.

### Bewertungskriterien

Die gesamte Baumaßnahme wird nach funktionalen, technischen, wirtschaftlichen und gestalterischen Gesichtspunkten bewertet, wobei eine besondere Ingenieurleistung erkennbar sein muss. Zur Bewertung der eingereichten Objekte werden folgende Kriterien herangezogen:

- Konstruktion
- Innovation
- Interdisziplinarität
- Ästhetik
- Nachhaltigkeit

### Jury

Die Jurysitzung findet im November 2016 in Berlin statt. Die Mitglieder der Jury sind:

Dipl.-Ing. (FH) Stefan Adam  
Dipl.-Ing. Volkhard Angelmaier  
Dipl.-Ing. Gerhard Breitschaft  
Prof. Cengiz Dicleli  
Prof. Irmgard Lochner-Aldinger  
Prof. Martin Mensinger  
Dipl.-Ing. (FH) Jens Müller  
Prof. Jürgen Schnell  
Prof. Much Untertrifaller  
Dr.-Ing. Markus Wetzel  
Dr.-Ing. Klaus Stiglat (Ehrenmitglied)  
Dr.-Ing. Dirk Jesse  
Dr.-Ing. Karl-Eugen Kurrer

### Nehmen Sie teil und nutzen Sie die Gelegenheit, auf eine herausragende Leistung im Konstruktiven Ingenieurbau aufmerksam zu machen.

Über das ausgezeichnete Bauwerk wird ausführlich in allen Fachzeitschriften des Verlags Ernst & Sohn berichtet. Mit unseren nationalen und internationalen Zeitschriften werden mehr als 30.000 fachkundige Leser über die Projekte, die beteiligten Ingenieurbüros und ausführenden Baufirmen informiert.

Der Ulrich Finsterwalder Ingenieurbaupreis von Ernst & Sohn wird an ein Projektteam für das ausgezeichnete Bauwerk vergeben. Die Gewinner erhalten eine repräsentative Plakette. Darüber hinaus dokumentiert und publiziert der Verlag alle Wettbewerbsbeiträge in seinen Print- und Online-Angeboten.

### Preisverleihung

Die Preisverleihung findet im Rahmen einer Festveranstaltung im Februar 2017 in München statt.

### Einsendeschluss

Die Unterlagen sind per Post bis Freitag, den 16. September 2016, einzureichen. Es gilt das Datum des Poststempels. Spätere Einreichungen können nicht berücksichtigt werden.



Wilhelm Ernst & Sohn  
Verlag für Architektur und technische  
Wissenschaften GmbH & Co. KG  
Rotherstraße 21  
10245 Berlin  
Deutschland

### Kennwort: Ulrich Finsterwalder Ingenieurbaupreis 2017

Dr.-Ing. Dirk Jesse  
Tel. +49 (0) 30 47031 275  
ingenieurbaupreis@ernst-und-sohn.de

Anmeldeunterlagen sowie eine Dokumentation zum Preis erhalten Sie beim Verlag oder unter: [www.ingenieurbaupreis.de](http://www.ingenieurbaupreis.de)

Auslober



Mit freundlicher Unterstützung von:



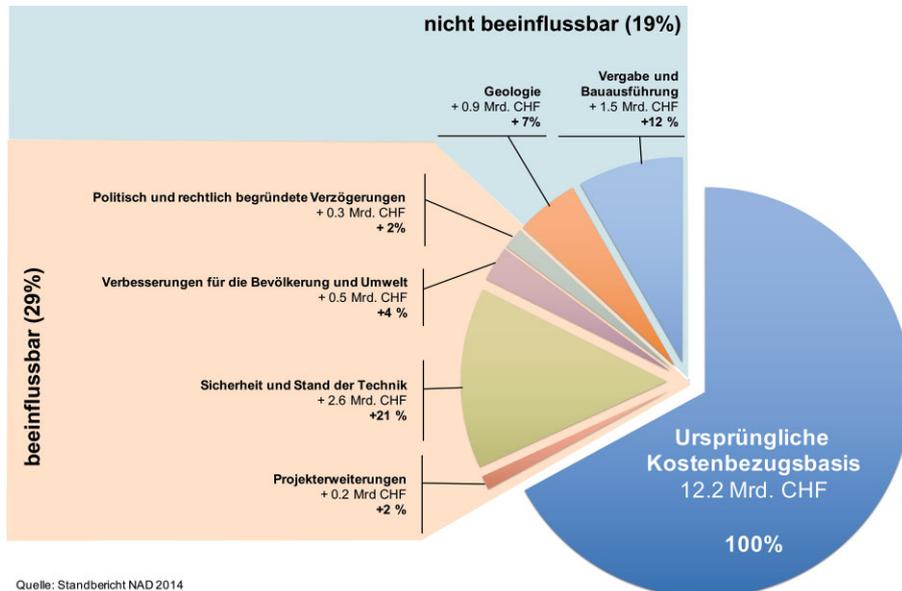


Fig. 7. Overall NEAT project: output and cost increases since 1998 (+48 %) [4]  
 Bild 7. Gesamtprojekt NEAT: Leistungs- und Kostensteigerungen seit 1998 (+48 %) [4]

the stated evaluation was thus the assumption that if required, at least sections of the third tunnel could be built subsequently.

### 3 Changes to the constraints in the last 20 years

The base tunnel projects at the Lötschberg and at the Gotthard have now been implemented in accordance with the system decision made in 1993. The Lötschberg Base Tunnel can now show eight years of operational experience, while the Gotthard Base Tunnel will open soon. The final invoices for the main tunnelling contracts have been approved since 2014, resulting in a clear picture of the actual investment costs.

According to the annual report of the supervisory delegation for the new railway link through the Alps (*German NEAT*) of the Swiss council for 2014 [3], the costs for the entire NEAT project (Lötschberg corridor and Gotthard corridor) increased from the original estimate of 12.2 to 18.2 billion CHF (price basis 1998), corresponding to an increase of 48 %. About half of these extra costs can be categorised under “Safety and the state of the technology” (+21 %) and “Improvements for the population and environment” (+4 %) (Fig. 7).

This raises the question, which project requirements changed so massively in the last 20 years to result in the cost increase shown in Fig. 7. The largest cost increase can be assigned to the category “Safety and the state of the technology”. The primary triggers for these cost increases were the serious fire incidents in the Mont Blanc (1998) and Tauern (1999) road tunnels, in the Kaprun glacier railway (2000) and in the Gotthard Road Tunnel (2001). The safety requirements for the NEAT base tunnels were made much more stringent, which had the result that the 15 km long Ceneri Base Tunnel on the NEAT corridor New Gotthard had to be built with two tunnels instead of one and massive changes had to be undertaken to the ventilation system of the Gotthard Base Tunnel. Extract openings were provided including their associated electrical equipment instead of the four openings originally intended in the design, and the extract tunnels became longer [6]. A

teilen sich auf die Rubriken „Sicherheit und Stand der Technik“ (+21 %) sowie „Verbesserungen für Bevölkerung und Umwelt“ (+4 %) (Bild 7).

Es stellt sich die Frage, welche Projektanforderungen sich in den letzten 20 Jahren so massiv geändert haben, dass die Kostensteigerung gemäß Bild 7 zustande kam. Der größte Kostensteigerungsblock ist der Rubrik „Sicherheit und Stand der Technik“ zuzuordnen. 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 eines einzigen Doppelspurtunnels auszuführen war und massive Veränderungen am Lüftungssystem des Gotthard-Basistunnels vorgenommen werden mussten. So wurden 28 Abluftöffnungen samt zugehöriger elektromechanischer Ausrüstung neu 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 zu gewährleisten. Die weitergehenden Redundanzüberlegungen hatten zur Folge, dass sich das Prinzip „einfach und robust, nur so viel Ausrüstung wie nötig“ leider nicht mehr aufrechterhalten ließ.

Weitere wichtige 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 (vermehrte Parallelaktivitäten) (Bild 8) [4]. Die Tatsache, dass sowohl im Teilabschnitt Faido als auch in Sedrun verschiedentlich baugestaltliche Querstellen erstellt werden mussten, um die geplanten Bauabläufe zu ermöglichen, ist 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

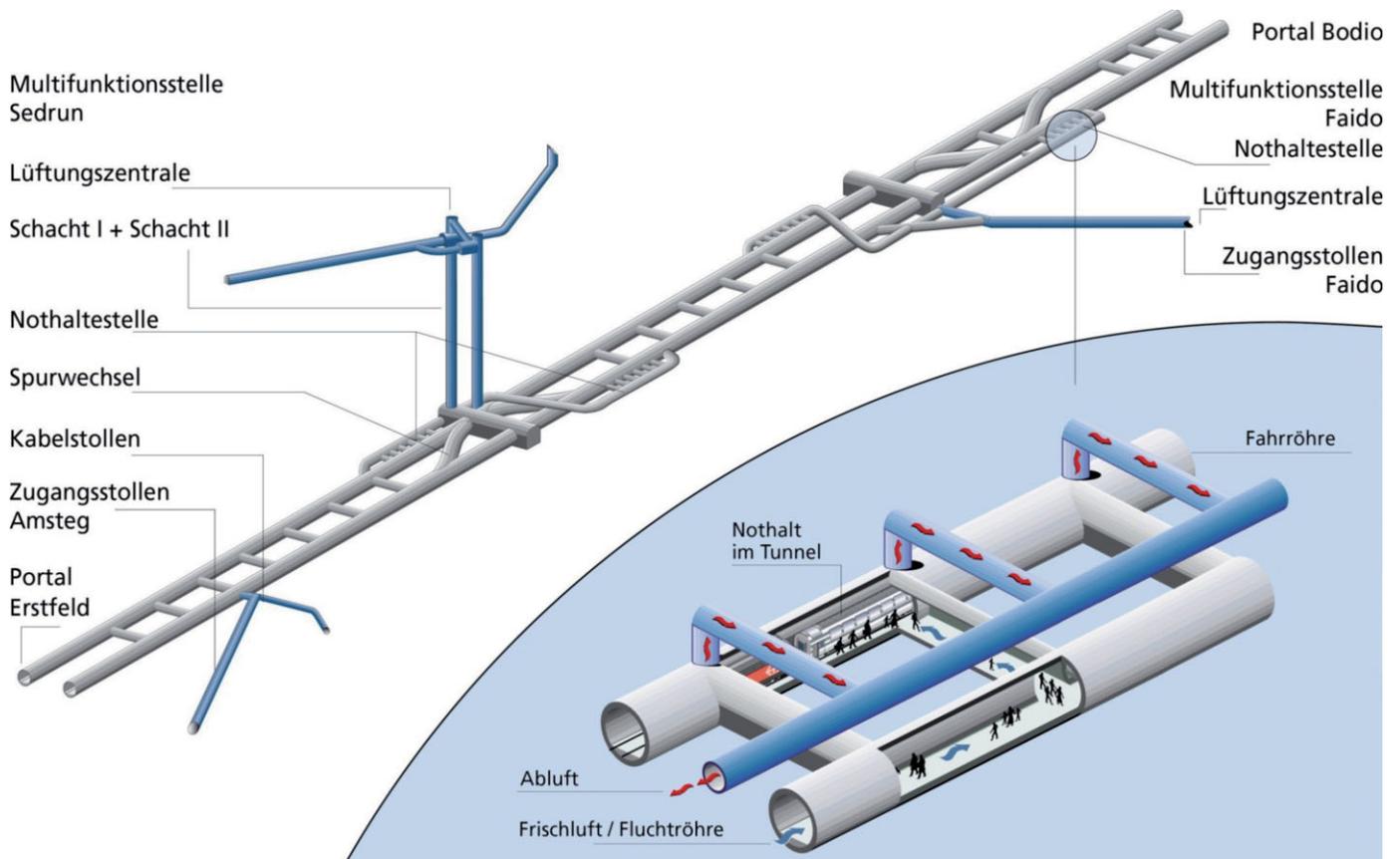


Fig. 8. Tunnel system at the Gotthard Base Tunnel (source: ATG)  
 Bild 8. Tunnelsystem am Gotthard-Basistunnel (Quelle: ATG)

ventilation system also had to be installed in the cross passages in order to provide the correct operating temperature for the railway equipment. The further redundancy considerations had the result that the principle “simple but robust, only as much equipment as necessary” could unfortunately no longer be maintained.

Further significant cost drivers were the geologically caused extra costs and their consequences for construction. Extremely difficult conditions at the Faido multifunction station demanded a reorganisation of construction and a new definition of the construction schedule (more parallel activities) (Fig. 8) [4]. The fact that both in the Faido section and in the Sedrun section, various cross passages had to be constructed for the purpose of construction logistics in order to achieve the planned schedule is a clear indication that an additional third tube would have been advantageous. With hindsight, the sub-category construction can thus no longer be evaluated almost equally for Variants B and D.

#### 4 Simulation calculations in 2015

Considering the changed constraints described above, the authors analysed and correspondingly updated the cost-benefit analysis of 1993 in more detail in 2014/2015 [5]. The following additional assumptions were made:

- Since Variant A (DST & DT) would no longer be suitable for approval today, this variant was no longer considered, leading to a general adaptation of the cost-benefit functions.

Unterziel Bau dürfte nach heutigem Kenntnisstand für die Varianten B und D aus den genannten Gründen kaum mehr fast gleich bewertet werden.

#### 4 Simulationsrechnungen 2015

Unter Berücksichtigung der beschriebenen geänderten Randbedingungen haben die Autoren 2014/2015 die Nutzwertanalyse von 1993 genauer analysiert und entsprechend aktualisiert [5]. Dabei wurden die folgenden zusätzlichen Annahmen getroffen:

- Da die Variante A (DST & DT) heute nicht mehr genehmigungsfähig wäre, 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 [6] ging von einem solchen Verhältnis aus, so dass dieses für die aktualisierten Überlegungen berücksichtigt wurde (Bild 9).
- Die Annahme, dass für künftige Erneuerungen mindestens abschnittsweise eine dritte Röhre gebaut werden kann, ist heute nicht mehr haltbar und wird nicht mehr berücksichtigt.
- Der Aufwand für die künstliche Lüftung ist bei einem Drei-Röhren-System (Variante B) mit einfacher gestalte-

- The ratio between cost estimate and risk cost share is not 0.8 : 0.2, but rather more precisely 0.7 : 0.3, which was demonstrated by the cost development for the Lötschberg and the Gotthard corridors. The *Botschaft über den Bau der schweizerischen Eisenbahn-Alpen-transversale* (Alptransit decision) from 1990 [6] also assumed such a ratio, so this was used for the updated deliberations (Fig. 9).
- The assumption that a third tunnel can be built for future replacements, at least in sections, is no longer tenable and is no longer considered.
- The expense for artificial ventilation for a three-tunnel system (Variant B) with simply featured emergency stations is to be more favourably regarded from the point of view today than for Variant D.
- With a three-tunnel system, a considerable part of the equipment could be maintained independent of the railway line, which could lead to a reduction of installed elements (less redundant systems). Operational experience at the Lötschberg Base Tunnel suggests that even with constant quantities, a saving of maintenance costs in the order of 20 % would be possible, with the availability of the system being improved at the same time.

The rough evaluation performed on this basis produced the partial benefits for each main aim listed in Table 3. Table 3 shows that even under the current state of knowledge, Variant D with two single-track tunnels and emergency stops still achieves the highest partial benefit under the main aim “construction” (investment cost, risks and construction time), although with less difference. For the criterion operation, however, the comparison is overturned.

This effect is on the one hand due to the considerably higher cost of tunnel fittings (doors, ventilation systems), and on the other hand the systems that have now been installed no longer permit certain assumptions today concerning the future replacement of the system (e.g. construction of a third bore in sections).

The sensitivity analysis with greatly varied weighting of the three main aims shows that Variant B (2 EST & DT) mostly wins against Variant D (2 EST & emergency station). Only if the main aim “construction” is weighted with 70 % is Variant D still the best variant, if only with a marginal difference. Such a high weighting of the criterion construction is however only justified if the uppermost aim is to reduce the initial investment (Fig. 10).

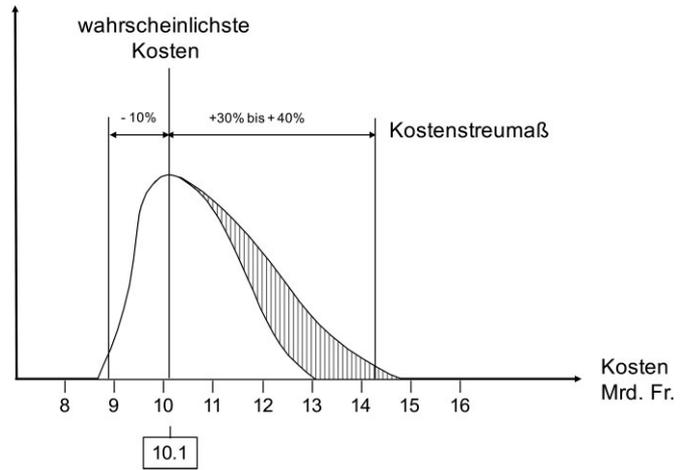


Fig. 9. Forecast cost spread according to NEAT decision of 1990 for the Lötschberg and Gotthard corridors (price basis 1989) [6]

Bild 9. Prognose Kostenstreumaß gemäß NEAT-Botschaft 1990 für die Lötschberg- und Gotthardachse (Preisbasis 1989) [6]

- Bei einem Drei-Röhren-System 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 der Tabelle 3 dargestellten Teilnutzwerte pro Oberziel. Tabelle 3 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

Table 3. Partial benefits in 2015 per main aim (in each case with a theoretical max. score of 10)  
Tabelle 3. Teilnutzwerte 2015 pro Oberziel (bei einem theoretischen Maximum von jeweils 10)

|   | Main aims<br>Oberziele |             |                      |             |                      |      |
|---|------------------------|-------------|----------------------|-------------|----------------------|------|
|   | Construction<br>Bau    |             | Operation<br>Betrieb |             | Safety<br>Sicherheit |      |
|   | 1993                   | 2015        | 1993                 | 2015        | 1993                 | 2015 |
| Variant B (2 EST & DT)<br>Variante B (2 EST & DT)   | 4.92                   | <b>6.30</b> | 6.14                 | <b>7.11</b> | 7.94                 | 7.9  |
| Variant D (2 EST & MFS)<br>Variante D (2 EST & MFS) | 6.97                   | <b>7.25</b> | 6.40                 | <b>4.60</b> | 7.43                 | 7.4  |

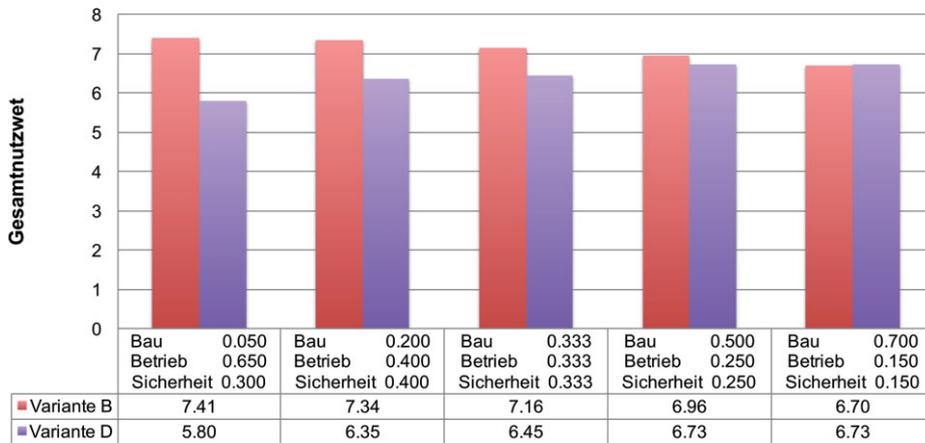


Fig. 10. Overall benefit in 2014 with different weightings of the main aims

Bild 10. Gesamtnutzwert 2014 bei unterschiedlicher Gewichtung der Oberziele

From a lifecycle perspective, the criterion operation would have to be weighted higher than just 15 %. According to experience, the operational costs, maintenance and investment in replacements are of the same order as the original investment. Considering the safety requirements, the weighting of the main aims (construction, operation, safety) with a third each is justified. Such a weighting would have shown higher benefit for a three-tunnel solution than the two-tunnel solution according to the state of knowledge today. It remains however to be said that this statement is less stable than the opinion of 1993 in favour of Variant D.

Like the 1993 analysis, the 2015 cost-benefit analysis is also influenced by the subjective judgement of the people making the assessment. If the opinion could be made as objective as possible, than a complete cost-benefit analysis would be carried out using a comprehensive lifecycle treatment. Considering that two further long tunnels have been built in Switzerland and operational experience is already available from the first, a data basis must soon be available, which would enable such a treatment (in contrast to 1993).

## 5 Conclusion

For the implementation of the Gotthard and Lötschberg Base Tunnels, much pioneer work had to be undertaken in the challenging process of selecting the optimal tunnel system for very long tunnels. The variant decision of 1993 was made under complete consideration of the constraints at that time and using generally recognised methods and techniques of decision making and turned out to be extremely stable. This stability is largely founded in the high weighting of the criterion of initial investment. The playing field at that time did not allow any scope for further, more expensive variants.

For example, the corridor Arth Goldau-Lugano including the base tunnels at Gotthard and Ceneri was not permitted to exceed the fixed financial limit of 9.7 billion CHF in 1993. The money for a third tunnel (which even in 1993 won the cost-benefit analysis in various categories) was simply not available at that time. Still higher costs in the political climate of the time would have meant the end of the entire AlpTransit Project (Gotthard and Lötschberg corridor). Under those constraints, the method used at the time defined a safe structure with the minimum construction costs.

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 (2 EST & DT) gegenüber Variante D (2 EST & Nothaltestelle) 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 gerechtfertigt, wenn das oberste Ziel die Minimierung der Anfangsinvestition ist (Bild 10).

Bei einer Lebenszyklusbetrachtung 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 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 aus dem Jahr 1993 zugunsten der Variante D.

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

## 5 Fazit

Mit der Realisierung des Gotthard- und des Lötschberg-Basistunnels musste für den anspruchsvollen Prozess zur Wahl des optimalen Tunnelsystems bei sehr langen Tunnelbauten viel Pionierarbeit geleistet werden. Die Variantenentscheidung von 1993 wurde unter vollständiger Berücksichtigung der damaligen Randbedingungen und unter Anwendung allgemein anerkannter Methoden und



Fig. 11. Equipment of a cross passage in the GBT (photo: IGBT Süd)  
 Bild 11. Ausrüstung eines Querschlags am GBT (Foto: IGBT Süd)

As a result of more stringent safety requirements, the cost of tunnel fittings and railway equipment have increased remarkably in the past 20 years compared to the original assumptions. The elements that were added later such as the cross passage ventilation and the considerably more elaborate ventilation installation in the multifunction stations could not be envisaged in 1993 (Fig. 11).

For an assessment today, the clear prioritisation of investment costs against operational, maintenance and replacement costs at that time is to be scrutinised, although capitalised maintenance and replacement costs often amount to a similar magnitude as the investment costs. An updated cost-benefit analysis carried out under these aspects shows that a three-tunnel system scores rather better under the constraints that apply today and with hindsight would be a quite suitable alternative for very long tunnels.

In this case, a third tunnel could not be designed as a simple investigation and drainage tunnel but would also have to serve as a safety and service tunnel, so that a large part of the equipment could be maintained and replaced

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 inklusive der Basistunnel am Gotthard und Ceneri der abgesteckte finanzielle Rahmen von 9,7 Mrd. CHF nicht überschritten werden. Das Geld für eine dritte 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 (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 und die erheblich anspruchsvolleren Lüftungsinstallationen in den Multifunktionsstellen, konnten 1993 noch nicht erkannt werden (Bild 11).

Für eine heutige Beurteilung ist die damalige deutliche Priorisierung der Investitionskosten gegenüber den Betriebs-, Unterhalts- und Erneuerungskosten zu hinterfragen, bewegen sich doch die kapitalisierten Unterhalts- und Erneuerungskosten oft in der gleichen Größenordnung wie die Investitionskosten. Eine unter diesen Gesichtspunkten aktualisierte Nutzwertanalyse zeigt, dass ein Drei-Röhren-System unter den heutigen Randbedingungen einiges 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 wer-

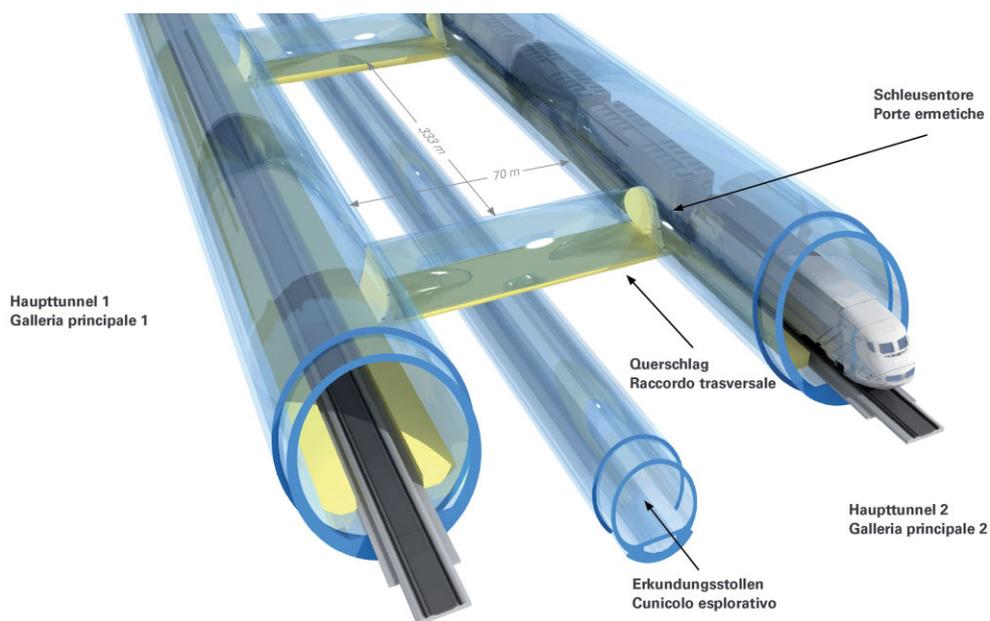


Fig. 12. Currently intended tunnel system for the Brenner Base Tunnel [7]  
 Bild 12. Aktuell vorgesehene Tunnelsystem am Brenner-Basistunnel [7]

without disturbing railway operations. The objective would have to be to noticeably reduce the maintenance and replacement costs and at the same time improve system availability, permitting operations to be organised more economically.

It is therefore little surprise that a system similar to Variant B (with service tunnel) is now being built at the Brenner Base Tunnel [7]. In order that this tunnel, which is defined as an investigation tunnel (Fig. 12), can have favourable effects on operations in the long term, it would have to be used appropriately during the operational period.

In the course of further generalised investigations into the selection of a system for very long tunnels, Variant C (3 EST) could be well worth including in the considerations. Solutions are conceivable with railway equipment not initially being installed in the third (central) tunnel but only when needed later in the course of large-scale refurbishment. Until then, the tunnel could serve as a service tunnel.

Quite apart from the method used to reach decisions and any preferred variants, one thing is however clear: the construction generation has to appreciate its heavy responsibility to the operational generation. This manifests itself particularly in weighing up initial investment costs against future operational, maintenance and replacement costs. Particularly the example of the system decision for long tunnels demonstrates this responsibility emphatically. This fact should be well known to all client organisations with the current demands to “design to cost”.

## References

- [1] Ernst Basler und Partner: Systemwahl Gotthard-Basistunnel – Vergleich der Tunnelsystemvarianten: Nutzwertanalyse. Unveröffentlichter Bericht. Zollikon, 1993.
- [2] Bericht IG GGRC vom 17. Dezember 1992 (unveröffentlicht).
- [3] NEAT Aufsichtsdelegation der eidgenössischen Räte, Oberaufsicht über den Bau der NEAT im Jahre 2014. Bern, 2015.
- [4] Ehrbar, H.; Sala, A.; Wick, R.: Vortriebe am Gotthard-Basistunnel – ein Rückblick, Erfahrungen und Lehren aus Sicht des Bauherrn. Swiss Tunnel Kongress 2012. Luzern, 2012.
- [5] Ehrbar, H.; Vetsch, H.-P.; Zbinden, P.: Long Eisenbahntunnel, Zur Systemwahl – Rückblick und Vorausschau. Stuva-Tagung 2015, Internationales Forum für Tunnel und Infrastruktur. Forschung + Praxis 46, S. 51–62. Berlin: Ernst & Sohn, 2015.
- [6] Botschaft über den Bau der schweizerischen Eisenbahn-Alpentransversale (Alpentransit-Beschluss) vom 23. Mai 1990.
- [7] Bergmeister, K.: Brenner Basistunnel; Lebenszyklusorientierte Planung und innovative Bautechnik. Swiss Tunnel Congress 2015. Luzern, 2015.



Hans-Peter Vetsch  
Vetsch Rail Consulting GmbH  
Südstrasse 5  
4922 Bützberg  
Switzerland  
Hans-peter.vetsch@bluewin.ch

den, 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 abzusinken und gleichzeitig die Systemverfügbarkeit zu steigern, womit der Betrieb insgesamt wirtschaftlicher gestaltet werden könnte.

Es ist deshalb wenig erstaunlich, dass beim Brenner-Basistunnel [7] aktuell ein System analog Variante B (mit Dienststollen) zur Ausführung kommen soll. Damit dieser als Erkundungsstollen definierte Stollen (Bild 12) 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 (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 Systemscheidung 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.



Peter Zbinden, Dipl. Ing. HTL  
Freihofstrasse 11  
8703 Erlenbach ZH  
Switzerland  
a.p.zbinden@bluewin.ch



Ernst Märki, dipl. Ing. ETH  
Burgackerweg 13  
3047 Bremgarten  
Switzerland  
ernst.maerki@bluewin.ch



Dipl.-Ing. Heinz Ehrbar  
Heinz Ehrbar Partners GmbH  
Holzwiesstrasse 12  
8704 Herrliberg  
Switzerland  
Heinz.ehrbar@heinzehrbarnpartners.com