Bau und Betrieb eines Basistunnels

Autor(en): **Gehriger, Willy**

Objekttyp: **Article**

Zeitschrift: **Schweizer Ingenieur und Architekt**

Band (Jahr): **107 (1989)**

Heft 43

PDF erstellt am: **29.03.2024**

Persistenter Link: https://doi.org/10.5169/seals-77190

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Inhalten der Zeitschriften. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern.
Die auf der Plattform e-periodica veröffentlichten Dokumente stehen für nicht-kommerzielle Zwecke in Lehre und Forschung sowie für die private Nutzung frei zur Verfügung. Einzelne Dateien oder Ausdrucke aus diesem Angebot können zusammen mit diesen Nutzungsbedingungen und den korrekten Herkunftsbezeichnungen weitergegeben werden.
Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Die systematische Speicherung von Teilen des elektronischen Angebots auf anderen Servern bedarf ebenfalls des schriftlichen Einverständnisses der Rechteinhaber.

Haftungsausschluss

Alle Angaben erfolgen ohne Gewähr für Vollständigkeit oder Richtigkeit. Es wird keine Haftung übernommen für Schäden durch die Verwendung von Informationen aus diesem Online-Angebot oder durch das Fehlen von Informationen. Dies gilt auch für Inhalte Dritter, die über dieses Angebot zugänglich sind.

Ein Dienst der *ETH-Bibliothek*
ETH Zürich, Rämistrasse 101, 8092 Zürich, Schweiz, www.library.ethz.ch

http://www.e-periodica.ch

NEAT-Entscheidungsgrundlagen

Bau und Betrieb eines Basistunnels

In diesem Beitrag sollen einige, insbesondere bautechnische Probleme der langen Basistunnels behandelt werden. Die Beschreibungen betreffen nicht eine bestimmte Linienführungsvariante, sondern gelten grundsätzlich für jeden der Basistunnels. Zur Konkretisierung der Aussagen werden jedoch einzelne Ergebnisse für die untersuchten Planungsfälle aufgeführt; in diesem Fall geschieht dies exemplarisch. Der Entscheid über die Linienführung der NEAT stand zum Zeitpunkt der Ausarbeitung dieser Grundlage noch bevor.

Der Basistunnel - Kernstück einer NEAT

Eine Neue Schweizerische Eisenbahn-Alpentransversale (NEAT) ist Teil der schweizerischen Verkehrspolitik (vgl.

VON WILLY GEHRIGER, ZÜRICH

Übersicht in vorstehendem Artikel, Seite 1155). Zeitlich determinierendes Element in der Realisierung einer NEAT ist der (oder die) Basistunnel(s). Der Bau eines 30 bis 50 km langen Tunnels durch die Alpen, mit Überlagerungen von 1000 m, 2000 m und mehr durch geologisch komplexe und geotechnisch teilweise heikle, zahlreiche Unsicherheiten und Risiken beinhaltende Formationen hindurch, stellt nach wie vor eine ganz besondere Herausforderung dar. Neben den technischen und organisatorischen Aspekten dürfen auch die politischen nicht vernachlässigt werden, da sich der Bau auch im täglichen Leben der betroffenen Regionen auswirkt. Während 12 - 15 Jahren müssen der Tunnelausbruch, die Baumaterialien und Betriebsausrüstungen, das eingesetzte Personal und die Maschinen durch das Nadelöhr der Portale (und der Schächte) geordnet transportiert werden.

Vor Baubeginn muss daher mit einer mindestens 3- bis 5-jährigen Vorbereitungs- und Entscheidungsphase gerechnet werden, was die Realisierungszeit einer NEAT auf 15 bis 20 Jahre anwachsen lässt. Dieser Zeithorizont zwingt die Entscheidungsträger, ungewöhnlich lange Zeiträume zu überblicken.

Überlegungen zu anderen Aspekten, wie Zufahrtslinien, Knoten- und Bahnhofausbauten, Stromversorgung usw. sowie über betriebliche, betriebswirtschaftliche und ökologische Belange bilden nicht Gegenstand des vorliegenden Berichtes.

Selbstverständlich wurden die Untersuchungen über die Basistunnels eingebettet in grossräumige, über das Gebiet der Schweiz hinausreichende Netzbetrachtungen, und zwar unter Einschluss der bestehenden Alpenübergänge (Gotthard- und Lötschberg-Simplon-Bergstrecken) sowie der in den nächsten 20 Jahren zu erwartenden Ausbauten am Schienennetz in der Schweiz (Bahn 2000) und im Ausland (Brenner, BRD, Italien usw.). Wegen der Vielfalt der Einflussfaktoren wurden die Auswirkungen verschiedener Annahmen iterativ erarbeitet und die Ergebnisse auf ihre Sensitivität überprüft. Auch diese werden nachfolgend nur mit Bezug auf den Basistunnel dargestellt.

Wichtige technische Daten einer NEAT

- Mischbetrieb (Personen- und Güterverkehr)
- Offene Güterwagen für den Huckepackverkehr
- Maximale Geschwindigkeiten:
  - Personenverkehr (IC-Züge): 200 km/h
  - Schnellgüterzüge: 140 km/h
- Lichtraumprofil: EBV IV ≅ UIC-GC
- Doppelspurtunnel statt zwei Einspurröhren (soweit geotechnisch möglich), in langen Tunneln zusätzlich ein Seitenstollen
- Gleisabstand: 4,20 m
- Minimaler Kurvenradius: (3200-)4000 m
- Maximale Steigung: 13‰
- Lichte Tunnelquerschnitte:
  - Doppelspurtunnel: etwa 70 m²
  - Einspurtunnel: etwa 44 m²
  - Seitenstollen: 20-25 m²
- Maximale Zugslängen:
  - Personenverkehr: 420 m
  - Güterverkehr: 750 m

Tabelle 1. Technische Daten einer NEAT

Angebotskonzept einer NEAT

Eine neue Eisenbahn-Alpentransversale - und mit ihr auch der Basistunnel - wird durch das Angebotskonzept wesentlich geprägt. Elemente des Angebotskonzeptes sind beispielsweise: Reisezeiten, die wiederum durch die maximale Zugsgeschwindigkeit begrenzt sind, Komfort, Takt, Anschlussmöglichkeiten, Sicherheit, Information, verbesserte Betriebsabläufe usw. Das Angebotskonzept ist grundsätzlich auf die Bedürfnisse der Kunden, d.h. des Marktes auszurichten.

Entscheidender Parameter des Angebotskonzeptes ist die maximal zulässige Zugsgeschwindigkeit (Ausbaugeschwindigkeit). In den vor allem aus Flachgebieten bestehenden Nachbarländern der Schweiz wird ein Geschwindigkeitsniveau im Schienenschnellverkehr von 250 bis 300 km/h anvisiert. Teile dieses Schnellbahnnetzes sind schon seit Jahren mit Erfolg in Betrieb, neue Strecken werden laufend angefügt. Welches sind die ällfälligen Gründe für tiefere Geschwindigkeits-Limiten in der Schweiz und was sind die Konsequenzen?

Nach vergleichenden Untersuchungen, die sich auch auf die unterschiedlichen Reaktionen des Marktes (Verkehrsprognose) erstreckten, wurden für eine schweizerische NEAT die Parameter des Angebotskonzeptes wie folgt festgelegt:

☐ Mischbetrieb, d.h. sowohl Personen- als auch Güterzüge sollen auf der alpenquerenden Strecke verkehren können, denn die Vorteile einer NEAT sollen sowohl dem Personen- als auch dem Güterverkehr zugute kommen. Diese Festlegung hat erhebliche Auswirkungen auf die zulässigen maximalen Zugsgeschwindigkeiten, Streckenneigungen usw.

☐ Verwendung offener Wagen für den Huckepackverkehr. Die aerodynamischen Einwirkungen auf die Ladungen auf offenen Güterwagen im Mischverkehr beeinflussen die maximal zulässigen Zugsgeschwindigkeiten. Geschlossene Huckepack-Güterwagen würden u.a. übermässig grosse Tunnelquerschnitte erfordern.

☐ Die aerodynamischen Wechselwirkungen vorgenannter Festlegungen lassen die folgenden maximalen Zugsgeschwindigkeiten zu:

- Personenzüge (IC): 200 km/h (= Streckenausbaugeschwindigkeit)
- Schnellgüterzüge: 140 km/h.

In den Tunneln werden die Höchstgeschwindigkeiten der IC-Züge etwas tiefer liegen, mindestens so lange, als nicht durchwegs modernes Rollmaterial im Einsatz steht, oder keine Gewähr für durchwegs stabile Ladungen gegeben ist. Anderseits werden die Zugsgeschwindigkeiten einander (nach unten) angeglichen, sobald sich die Streckenbelastung der Kapazitätsgrenze annähert, da sich die Kapazität dadurch etwas anheben lässt.

Beim Vergleich dieser Höchstgeschwindigkeiten mit denjenigen, die dem Schnellschienennetz in unseren Nachbarländern zugrunde liegen, ist folgendes zu berücksichtigen:

Die Alpen stellen auch heute noch ein gewaltiges natürliches Bollwerk dar. Wie gezeigt wird, bedarf es zur Realisierung jeder neuen Querverbindung eines Grosseinsatzes von optimal ausgewählten personellen, organisatorischen und grossen materiellen Mitteln. Diese Aufwendungen und die damit verbundenen Risiken sind mit dem Bau einer Neubaustrecke im Flachland nicht zu vergleichen.

Höhere Geschwindigkeiten verlangen eine gestrecktere Linienführung, deren Einbettung in die vorhandene Topographie und Besiedlung im coupierten Gelände viel mehr Mühe bereitet. Die Eingriffe in die Landschaft würden dann grösser, was in den meist engen Bergtälern schwer wiegt.

Die vorgeschlagene Ausbaugeschwindigkeit ermöglicht es, die neue Alpentransversale betrieblich mit dem bestehenden Netz zu verknüpfen und - solange deren Kapazität genügt - wesentliche Teile davon als Zufahrtslinien zu benützen. Höhere Ausbaugeschwindigkeiten erschweren die Integration ins bestehende Netz.

Die beschränkte Nord-Süd-Ausdehnung der Alpen bringt mit sich, dass die tieferen Maximalgeschwindigkeiten im Alpenraum nur unbedeutende Fahrzeiterhöhungen zur Folge haben. Auf einer Strecke von 200 km Länge bringt eine Geschwindigkeitserhöhung um 50 km/h gegenüber den für eine NEAT im Personenverkehr vorgesehenen Geschwindigkeiten - unter Berücksichtigung von Zwischenhalten - nur eine Fahrzeiteinsparung von etwa 10 Minuten. Diese relativ geringfügige Fahrzeitverbesserung ist in Relation zu setzen zu den grösseren Kosten, Risiken und Umweltauswirkungen höherer Geschwindigkeiten.

Aus den genannten Gründen wird auch im Ausland anerkannt, dass für die Querung der Alpenbarriere von den für europäische Schnellbahnnetze formulierten Richt-Höchstgeschwindigkeiten abgewichen werden darf. Die gewählten Ausbaugeschwindigkeiten liegen aber deutlich oberhalb der bisher in der Schweiz auf den alpenquerenden Strekken üblichen, so dass die Reisezeit z.B. zwischen Basel und Milano von heute rund 4½ Stunden auf knapp 3 Stunden verkürzt würde.

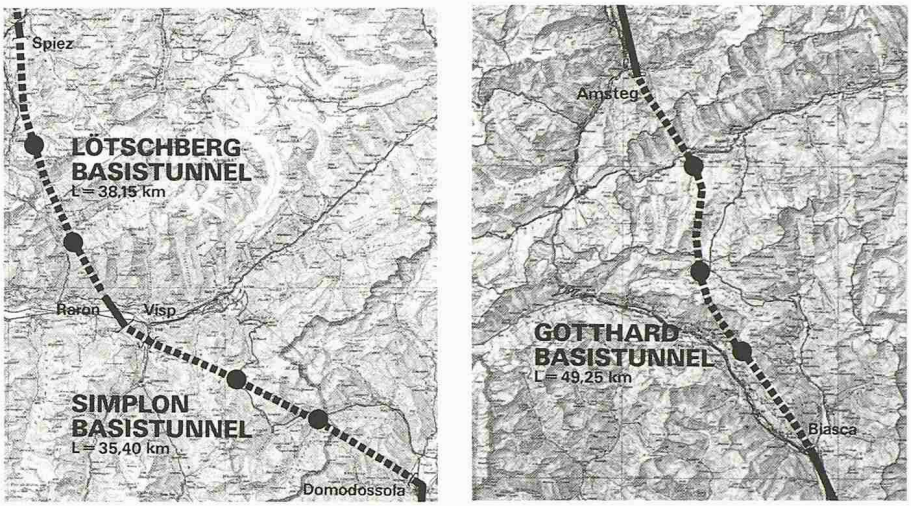


Bild 1. Situation Lötschberg-Simplon- und Gotthard-Basistunnel

☐ Doppelspurtunnel mit parallelem Seitenstollen: Der Doppelspurtunnel weist vor allem betrieblich wesentliche Vorteile auf gegenüber zwei Einspurröhren. So können die Spurwechsel häufiger angeordnet und die Unterhaltsarbeiten mit dem Betrieb besser in Einklang gebracht werden. Auch aus der Sicht der Betriebssicherheit sind Doppelspurröhren vorzuziehen. Einspurtunnels werden daher auf diejenigen Bereiche beschränkt, in denen sich der Umstand ihres kleineren Querschnitts vorteilhaft auswirkt, nämlich in bautechnisch schwierigen geologischen Zonen. Hingegen wird für Tunnels mit Längen von mehr als 15-20 km aus betrieblichen Gründen (Organisation der Unterhaltsarbeiten zur Aufnahme der zahlreichen Kabel und Leitungen usw.) und aus Sicherheitsgründen ein Seitenstollen benötigt, der auch während der Bauphase erhebliche Vorteile mit sich bringt (geologische Vorerkundung, vorbereitende Massnahmen zugunsten der Haupttunnelröhre(n).

Aus den vorgenannten Elementen des Angebotskonzeptes ergeben sich die folgenden technischen Auslegungsparameter:

☐ Lichtraumprofil (LRP): LRP IV der Schweizer Eisenbahnverordnung (EBV) bzw. Profil GC der UIC (Union International des Chemins de Fer). Diese LRP ermöglichen den Transport von Lastenzügen des Strassenverkehrs mit 4,00 m Eckhöhe auf betrieblich vertretbaren Niederflurwagen. Diese Transporte sind für die Grösse des Profiles (Tunnelnormalprofil) bestimmend. Der Doppelspurtunnel (lichter Tunnelquerschnitt rund 70 m²) ist grösser als selbst die neueren schweizerischen Eisenbahntunnels (Heitersbergtunnel: 58 m², und viel grösser als die früher gebauten Tunnels (Hauensteintunnel, 1916, 47 m²; Gotthardtunnel, 1882, 38 m². Der Grund liegt einerseits im grösseren Lichtraumprofil bzw. im zugrunde liegenden Lademass und anderseits in den grösseren Zugsgeschwindigkeiten bzw. in der Beherrschung der daraus sich ergebenden aerodynamischen Auswirkungen.

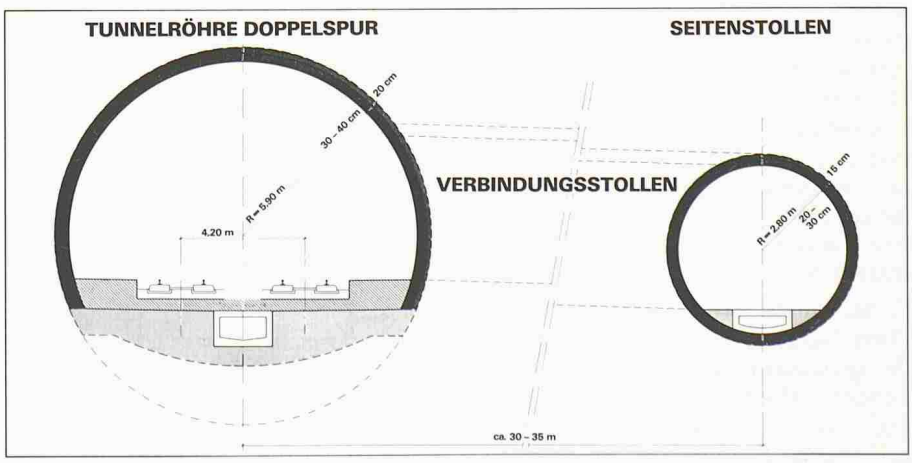


Bild 2. Vorgesehenes Lichtraumprofil

Geologische Risiken			
prognostizierbar (= lokalisierbare Risiken)		nicht prognostizierbar (= generelle Risiken)	
Geologisches Phänomen	*Folgen*	*Geologisches Phänomen*	*Folgen*
1. Tektonische Leitlinien 1. und 2. Ordnung (Massivgrenzen, Deckenüberschiebungen)	Bruchbrekzien, Kataklasite, Mylonite ⇒ starke Festigkeitsreduktion	1. Tektonische Störungen 3. und 4. Ordnung (Störungen, Verwerfungen, Brüche)	Bruchbrekzien, Kataklasite, Mylonite ⇒ starke Festigkeitsreduktion
2. Allg. Tektonisierung des Gesteins	Bruchbrekzien, Zerklüftungen ⇒ starke Festigkeitsverluste	2. Hydrogeologie	Starker Wasseranfall
3. Lithologie/ Petrographie	a priori wenig feste Serien (z.B. Tonschiefer, Kalkschiefer, Mergel, Gips, Anhydrit, zuckerkörniger Dolomit, Phyllite, Schiefer)	3. Kombinationen dieser Phänomene mit/ohne prognostizierbare Risiken	
4. Überlagerungen	plastische Verformungen wenig fester Serien		
5. Hydrogeologie	z.B. Karst, stark wasserführende Serien und Grenzflächen, wassergesättigte Serien mit starkem Porenwasserdruck (= schwimmendes Gebirge), stark wasserführende Störungen		
6. Geothermik	hohe Fels- und Wassertemperaturen		
7. Kombination der Phänomene 1–6			

Tabelle 2. Geologische Risiken

□ Gleisabstand: 4,20 m: Die Überprüfung der aerodynamischen Verhältnisse beim Kreuzen in Tunneln kann allenfalls zu einer geringfügigen Erhöhung des Gleisabstandes führen.

□ Minimaler Kurvenradius: 3200–4000 m: Wo aus raumplanerischen Gründen (Rücksicht auf bestehende Überbauungen bzw. auf Objekte des Natur- und Landschaftsschutzes) kleinere Kurvenradien angeordnet werden müssen, ist die Maximalgeschwindigkeit von 200 km/h entsprechend herunterzusetzen.

□ Maximale Streckenneigung 13‰: Diese Neigung beträgt etwa die Hälfte der maximalen Neigung auf den bestehenden Alpenübergangsrampen und ergibt sich aus einer Optimierung der zahlreichen Einflussfaktoren betrieblicher und technischer Art bei Berücksichtigung der topographischen Randbedingungen.

Die genannten Parameter stellen die Grundwerte eines schweizerischen Angebotskonzeptes für eine NEAT dar, das den hohen Ansprüchen des zukünftigen Marktes gerecht werden dürfte, aber auch die immateriellen Werte des qualitativen Wachstums nicht unberücksichtigt lässt. Im Hinblick auf eine Realisierung der NEAT müssen diese Annahmen aber nochmals sorgfältig und systematisch überprüft und optimiert werden.

Geologische und felsmechanische Grundlagen

Für Planung und Bau eines Basistunnels ist die möglichst genaue Kenntnis der zu durchfahrenden Alpenmassive von entscheidender Bedeutung. Je nach den Gebirgsverhältnissen sind grundsätzlich andere Baumethoden anzuwenden, wodurch Bauzeiten und Baukosten stark beeinflusst werden. So kann ein ausgebauter Doppelspurtunnel in gutem Gestein rund 30 000 Fr./m kosten, in schwierigen Formationen aber weit über 100 000 Fr./m. Ähnlich empfindlich reagieren auch die Vortriebsleistungen.

Es lohnt sich daher in jeder Beziehung, schon bei der Wahl der unterirdischen Linienführung und bei der Festlegung des Tunnelsystems (Lage und Anzahl der Schächte, Lage der Überholbahnhöfe usw.) schwierigen Gebirgszonen nach Möglichkeit auszuweichen und sowohl Baumethoden als auch Bausequenzen optimal an die zu erwartenden Verhältnisse anzupassen.

Der Erarbeitung geologischer Grundlagen mit ähnlichem Zuverlässigkeitsgrad für alle Basistunnels wurde daher grösste Bedeutung beigemessen. Geologen (Dr. T.R. Schneider, Ürikon, und Dr. Th. Locher, Büro für techn. Geologie, Chur), die in den betreffenden Gebieten über reiche praktische Erfahrung verfügen, erarbeiteten die geologischen Grundlagen. Die felsmechanischen Aspekte, d.h. das Verhalten der diversen Gebirgsformationen während und nach dem Ausbruch des Tunnels wurde durch einen weiteren Experten (Dr. Lombardi, Büro Lombardi, Locarno) erarbeitet.

Zu Beginn der Aufarbeitung bestand über die geologischen Verhältnisse im Bereich des Splügentunnels die grösste Unsicherheit. Dieser Kenntnisrückstand konnte infolge eines günstigen Umstandes rechtzeitig aufgeholt werden, da im Jahre 1986 eine tiefenreflexionsseismische Untersuchung für die Ost-Traverse des Nationalen Forschungsprogrammes Nr. 20 «Geologische Tiefenstrukturen der Schweiz» im Bereich des Splügenbasistunnels durchgeführt wurde. Die vorzeitige Auswertung der Messdaten ergab konkrete Informationen über den Aufbau der Dekkenstrukturen und den Verlauf geotechnisch ungünstiger Formationen (Splügener Mulde). Bei allen Basistunnels wurden ferner folgende Untersuchungen durchgeführt:

□ *Geologie:* Die Aktualisierung der geologischen Grundlagen erfolgte in erster Linie durch die Aufarbeitung der neuesten Literatur und der Aufschlüsse aus in der Zwischenzeit durchgeführten Untertagebauten. Insbesondere wurden die neuesten Interpretationen über den Aufbau der Alpen anhand des plattentektonischen Modells berücksichtigt. Als Konsequenz ergab sich, dass die

Basistunnel	Gesamtlänge km	Kulminationshöhen m.ü.M.	Max. Steigungen (%)		Einspurstrecken		
			N > S	S > N	km	in %	Anzahl
Lötschberg	38,2	772	2,5	6,0	2,5	7	2
Simplon	35,4	663	-	10,7	4,0	11	4
Gotthard	49,3	568	2,5	8,5	5,7	12	2
Y-Ast	25,7	853	-	11,3	7,1	28	1
Splügen	46,7	680	-	8,9	1,3	3	1

Tabelle 3. Charakteristische Daten der Basistunnel

Tunnel	Ausbruchquerschnitt	
	von	bis
- Doppelspurröhre	90 m²	140 m²
- Einspurröhre	60 m²	85 m²
- Seitenstollen	28 m²	35 m²

Tabelle 4. Ausbruchquerschnitte der Tunnelröhren

mesozoischen Muldenzüge zwischen den tektonischen Grosselementen wesentlich weiter in die Tiefe reichen als früher angenommen wurde.

□ *Geotechnik:* Die geotechnischen Informationen wurden, basierend auf den neuesten Tunnelbauerfahrungen, vollständig überarbeitet. Darauf aufbauend wurde die Ausbruchsklassenverteilung für die einzelnen zu erwartenden Felstypen und Prognoseabschnitte, in Abhängigkeit der Lage des Tunnels zum strukturellen Hauptelement der Gesteinsserie (im wesentlichen der Schieferung) für den konventionellen Ausbruch festgelegt.

□ *Risiken:* Der Beurteilung des geologischen Risikos wurde folgende Definition zugrunde gelegt: Als geologisches Risiko wird das Antreffen von geologisch, lithologisch, tektonisch, hydrogeologisch bedingten oder aufgrund der Überlagerung sich ergebenden Erschwernissen verstanden, die mit den normalen vorgesehenen Tunnelbauverfahren nicht überwunden werden können und deshalb ein Spezialverfahren bedingen, d.h. Verfahren erfordern, welche über die Ausbruchsklasse VI der SIA-Norm 198 für schwierigste Bauverhältnisse hinausgehen und den Einsatz grundsätzlich anderer Vortriebsverfahren zur Folge haben. Dabei wurden prognostizierbare und nicht prognostizierbare Risiken unterschieden. Was im einzelnen darunter verstanden wird, geht aus Tabelle 2 hervor. Alsdann wurde auf der Basis dieser Systematik für jeden Basistunnel das mögliche Risiko für Bauzeit- und Kostenüberschreitungen gegenüber den gemachten Annahmen (wahrscheinliche Prognose) erörtert und auf die zusätzlich bestehenden Unsicherheiten hingewiesen.

□ *Felsmechanik:* Die früher durchgeführten umfangreichen felsmechanischen Berechnungen wurden unter Berücksichtigung neuerer felsmechanischer Erkenntnisse und neuerer Erfahrungen im Bau tiefliegender Tunnels überprüft und auf alle Basistunnels wie folgt angewendet:

- Festlegung von «homogenen Prognoseabschnitten» in Zusammenarbeit mit den Geologen und Zuordnung möglichst repräsentativer felsmechanischer Kennziffern für diese Bereiche. Jedem Prognoseabschnitt wurde ein Felstyp zugeordnet, der der mittleren Felsqualität entspricht. Mit insgesamt 9 verschiedenen Felstypen wurden die in den Alpen vorkommenden Gebirgsformationen stellvertretend dargestellt.
- Durchführung felsmechanischer Untersuchungen und Berechnungen mit den gewählten Felskennziffern für den Doppel- und, wo aus felsmechanischen Gründen erforderlich, für den Einspurtunnel unter Berücksichtigung der Überlagerungsverhältnisse.
- Die Auswertung der Berechnungen erfolgte mit dem Ziel: - Die Stabilitätsverhältnisse längs der Tunnels zu beschreiben, d.h. die Schwierigkeiten während des Vortriebes zu erfassen; - aufzuzeigen, wo der Bau eines zweispurigen Tunnels noch möglich ist und wo zwei Einspurröhren vorgesehen werden müssen; - die erforderlichen Stabilisierungsmassnahmen für den Vortrieb und für den Endzustand zu definieren und - geeignete Profiltypen vorzuschlagen.

Die durchgeführten Arbeiten genügen zwar für den Vergleich der Planungsfälle und - zusammen mit anderen Kriterien - für einen Linienführungsentscheid, aber keinesfalls, um bereits ein detailliertes Bauprojekt erarbeiten zu können. Es sind dazu vorgängig noch umfangreiche zusätzliche Untersuchungen und Bewertungen notwendig:

□ Im Bereich besonderer Problemzonen ist die Durchführung von Sondierbohrungen bis auf das vorgesehene Tunnelniveau erforderlich (pro Basistunnel 6–12 Tiefenbohrungen)

□ Vertiefung der Geologie des ausgewählten Projektes aufgrund der Informationen, die sich aus Sondierbohrungen und detaillierter Oberflächengeologie ergeben; eventuelle Anpassung des Tunneltrassees.

□ Genaueres Studium der Hydrogeologie

□ Neubearbeitung und Vertiefung der felsmechanischen Untersuchungen und Ausdehnung auf die Neben- und Sonderbauwerke

□ Durchführung von Sonderuntersuchungen wie: - Ausarbeiten von Vorschlägen zur Durchörterung speziell schwieriger Tunnelstrecken; - Möglichkeit des Einsatzes von Tunnelbohrmaschinen (TBM); - Gegenseitige Beeinflussung von Einspurtunnelabschnitten; - Einfluss der Gebirgsabkühlung auf das Stabilitätsverhalten des Tunnels.

□ Verfeinerte Untersuchungen bezüglich der Gefährdung der zu unterfahrenden Talsperren.

Die Bauobjekte des Basistunnels

Der Basistunnel gliedert sich in die Hauptobjekte Tunnelröhre, Seitenstollen und Schächte und in die Sonderbauwerke, die ausserhalb des Normalprofiles eines Hauptobjektes angeordnet sind.

Der *Tunnel* wird, solange bautechnisch mit vernünftigem Aufwand vertretbar, als Doppelspurröhre ausgeführt. Dies ist auf dem grössten Teil der Strecke möglich. Für die restlichen Abschnitte muss auf die kleineren Einspurprofile gewechselt werden. Das hat eine 250 m lange Übergangsstrecke zur Folge, die sich aus dem erforderlichen Achsabstand der Einspurröhren von mindestens 40 m ergibt. Dadurch wird jeder Einspurstreckenbereich 500 m länger als aufgrund der Geologie erforderlich. Die Übersicht (vgl. Tabelle 3) zeigt, dass in allen Basistunnels geologisch bedingte Einspurstrecken nötig sein werden.

Die Ausbruchquerschnitte der Tunnels variieren in weiten Grenzen, je nach Profiltyp. Diese unterscheiden sich vorallem durch Art und Stärke der Auskleidung.

Die Sonderbauwerke der Tunnelröhre sind:

- Überholstationen: eine doppelspurige Röhre pro Fahrtrichtung für das Aufstellen von maximal 750 m langen zu überholenden Zügen (1 bis 2 Überholstationen pro Basistunnel)
- Zentralenkavernen an den Schachtfüssen: in der Regel zwischen Tunnel und Seitenstollen achsparallel an-

Basistunnel	Schächte			
	Name	Lage ab N-Portal	Tiefe	Schachtkopfhöhe m.ü.M.
Lötschberg	Kandersteg	14,3 km	660 m	1430
	Ferden	26,4 km	670 m	1390
Simplon	Alte Spittel	14,3 km	1300 m	1850
	Zwischbergental	26,4 km	620 m	1040
Gotthard	Rueras	13,2 km	810 m	1360
	Lukmanier	25,5 km	1410 m	1940
	Chiggiogna	36,7 km	250 m	690
Y-Ast Splügen	Pardatsch	18,5 km	920 m	1560
	Andeer	12,3 km	430 m	1000
	Splügensee	25,2 km	1470 m	1920
	Prestone	36,5 km	730 m	1080

Tabelle 5. Vorgesehene Schächte der Basistunnels

geordnet.
- Apparatekavernen: drei verschiedene Typen
- Verbindungsstollen zum Seitenstollen, etwa alle 500 m
- Sicherheitsnischen: es gibt fünf verschiedene Typen in unterschiedlichem Abstand
- Baudienstkammern: Schutzraum und Gerätedepot bei Spurwechselstellen, rund alle 6000 m.

Der *Seitenstollen* weist einen lichten Durchmesser von 5,5 bis 6,5 m auf. Grösse, Form und relative Höhenlage sowie die Nebenbauwerke des Seitenstollens sind für ein Bauprojekt im Detail festzulegen. Dabei sind neben den Überlegungen für die Bauphase auch die betrieblichen Anforderungen zu optimieren und auf den neuesten Stand zu bringen.

Die *Schächte* sind während des Baus für sogenannte Zwischenangriffe zugunsten der Tunnelröhre und des Seitenstollens für die Ausbruch- und Verkleidungsarbeiten und während des Bahnbetriebs für die Lüftung der Tunnelröhre und des Seitenstollens nötig. Auch Anzahl und Lage der Schächte (vgl. Tabelle 5) sind im Hinblick auf ein Bauprojekt – vor allem auch aufgrund ergänzender geologischer Untersuchungen – noch zu optimieren.

Bauausführung

Annahmen und Grundlagen: Die zugrundegelegten Annahmen in bezug auf die Bauausführungen basieren auf dem heutigen Stand der Technik. Demzufolge werden im jetzigen Planungsstadium Verfahren für den Bau der Basistunnel angenommen, die sich unter vergleichbaren Verhältnissen bewährt und durchgesetzt haben. Zukünftige Entwicklungen, insbesondere im Bereich des vollmechanisierten Vortriebes, können wohl Änderungen am Projekt in bezug auf Risiken, Termine, Loseinteilung, Gestaltung der einzelnen Bauteile und eventuell auch der Kosten mit sich bringen. Die Abweichungen gegenüber den heutigen Aussagen, insbesondere in bezug auf Kosten und Termine, dürften jedoch vergleichsweise gering sein.

Mechanischer Vortrieb: Der mechanische Vortrieb erobert sich laufend neue Anwendungsgebiete und wird auch in den zahlreichen Tunnels einer NEAT eine wichtige Rolle spielen, vor allem in Gesteinen mittlerer Härte (Molassefels). Infolge der hohen erforderlichen Anpressdrücke sind der Grösse der Tunnelbohrmaschinen (TBM) nach oben Grenzen gesetzt, vor allem in sehr hartem, quarzhaltigem Gestein mit hohen Festigkeiten. Die stetige Entwicklung im konstruktiven Maschinenbau und in der Herstellung von Rollenmeisseln, die gegen hohe Beanspruchung resistenter geworden sind, lässt jedoch erwarten, dass in angemessener Zukunft vermehrt Tunnelbohrmaschinen grosser Durchmesser (8–12 m) auch in hartem Gestein zum Einsatz kommen können. Zurzeit fehlen jedoch übertragbare Referenzfälle (Querschnitt, Gesteinshärte, Länge des Tunnels, Überlagerung, Temperaturen usw.), um zuverlässige Annahmen treffen zu können. Realistischerweise kommen Tunnelbohrmaschinen aufgrund der heutigen Erfahrungen am ehesten in kleineren und mittleren Tunnelquerschnitten, d.h. im Seitenstollen und in Einspurtunnels, weniger in Doppelspurtunnels zur Anwendung.

Der wirtschaftliche und technisch sinnvolle Einsatz von Tunnelbohrmaschinen ist aber nicht nur durch sehr hartes Gestein, sondern auch durch schlechtes, z.B. feines, kohäsionsloses, unter grossem Wasserdruck stehendes «Gebirge» begrenzt.

Der genannten Unsicherheiten wegen fussen die ermittelten Bauzeiten (vgl. Tabelle 7) auf konventionellem Vortrieb für Haupt- und Seitenstollen. Der Einsatz von TBM für den Ausbruch des Seitenstollens führt kaum zu einer Bauzeitverkürzung der Gesamtanlage, jedoch zu einem grösseren Vorlauf des Seitenstollenvortriebes gegenüber demjenigen des Haupttunnels. Das hat vorallem zwei Vorteile: Stabilisierungsmassnahmen können in kritischen Zonen zugunsten des Haupttunnels früher begonnen werden, und der natürliche Abfluss von Gebirgswasser aus den innenliegenden, von den Schachtfüssen aus vorgetriebenen Stollen und Tunnels wird früher ermöglicht. Beide Vorteile führen zu einer Verminderung des Risikos für Bauzeitverzögerungen.

Konventioneller Vortrieb: Konventioneller Vortrieb ist Sprengvortrieb im Voll- oder Teilausbruch. Er zeichnet sich durch eine grosse Anpassungsfähigkeit an die oft stark wechselnden geotechnischen und hydrologischen Verhältnisse aus. So können Profilform und Profilgrösse optimal variiert werden (Beispiel: Hufeisenprofil). Für die dargestellten Bauprogramme wurde von einem gut organisierten, konventionellem Vortrieb modernsten Zuschnitts ausgegangen.

Schachtbaustellen: In langen Tunnels werden in Abständen von 10–14 km (je nach den topographischen und geologischen Verhältnissen) Schächte angeordnet. Diese sind sowohl während des Betriebes zur Belüftung des Tunnels als auch während der Bauzeit erforderlich. Von jedem Schachtfuss aus können je 2 Arbeitsstellen für den Seitenstollen und den Haupttunnel eingerichtet werden, sogenannte Zwischenangriffe. Die Zahl der Angriffsstellen kann folglich mittels Schächten stark erhöht werden. Das hat einerseits eine wesentliche Verkürzung der Bauzeit zur Folge, da der Ausbruch des Tunnels nur von den Portalen aus bei konventionellem Vortrieb viel zu lange dauern und die Versorgung und Entsorgung sehr langer Baulose grosse Probleme bereiten würde. Mittels Schächten kann auch die Fertigstellung der Tunnels (Verkleidung, bautechnische Ausrüstung) beschleunigt werden, da diese die Staffelung der Arbeiten ermöglichen. Anderseits stellen die Zwischenangriffe ab Schächten unabhängige Baustellen dar, die die Flexibilität für ergänzende Massnahmen oder für Umdispositionen bei unvorhersehbaren Ereignissen und Schwierigkeiten erhöhen und damit das Risiko für Bauzeitüberschreitungen stark vermindern.

Um all diesen Aufgaben gerecht zu werden, müssen im Schacht leistungsfähige Ver- und Entsorgungsanlagen installiert werden. Ausserdem muss auch am Schachtkopf ein Ganzjahresbetrieb möglich sein. In den Fällen, da diese nicht an ausgebauten Passstrassen lie-

gen, sind entsprechende Zusatzmassnahmen für einen sicheren Winterbetrieb nötig.

Baurisiken

Bau und Betrieb eines Basistunnels implizieren eine Reihe unterschiedlichster Risiken. Im folgenden interessiert in erster Linie, wie gross das Risiko ist, dass die prognostizierten Bauzeiten überschritten werden. Lange Bauzeiten ziehen in der Regel auch hohe Baukosten nach sich; stärker ins Gewicht fallen aber die höheren Bauzinsen, die entgangenen Einnahmen und der entfallene Nutzen infolge verspäteter Inbetriebnahme des Werkes. Für den Bauherrn einer NEAT ist es daher wichtig zu wissen, wie gross sein Risiko ist, dass erhebliche Bauprobleme im Basistunnel zu einer Bauzeitverzögerung führen. Einen ersten Hinweis geben die im folgenden Kapitel aufgeführten Bandbreiten der Bauzeiten.

In den 35 bis 50 km langen Basistunnels können nun aber in problematischen Zonen unter ungünstigen Umständen Situationen eintreten, die zu nochmals stark verminderten Vortriebsleistungen oder gar zum vorübergehenden Stillstand der Vortriebe und zu entsprechend verlängerten Bauzeiten führen können. Solche Bauzeitverzögerungen können sich als Folge einer Kombination z.B. der folgenden Ursachen ergeben:

- Grosse Gebirgsüberlagerung (1000 m, 2000 m und mehr, die zu grossen Spannungen im Gebirge, zu grossen Wasserdrücken und zu grosser Gebirgswärme von bis zu 60 °C, führen können)
- Wassereinbruch (z.B. infolge des Anfahrens einer stark wasserführenden Kluft)
- Fallender Tunnelvortrieb (das anfallende Gebirgswasser fliesst – solange kein Durchschlag erzielt worden ist – nicht auf natürlichem Weg von der Arbeitsstelle, der Vortriebsbrust, weg. Am heikelsten ist die Situation, solange das anfallende Wasser über Schächte abgepumpt werden muss)
- Durchörterung sehr schlechter Gebirgszonen, z.B. bestehend aus kohäsionslosen Gesteinen (z.B. zuckerkörniger Dolomit) oder aus Zonen stark verminderter Festigkeiten infolge Tektonisierung des Gesteins.

Ein mehrmonatiger Vortriebsstillstand kann nötig werden, weil aufwendige Stabilisierungsmassnahmen (z.B. Injektionen, Drainagen und Sondierstollen auszuführen sind, bevor der Vortrieb im Teilausbruchverfahren wieder aufgenommen werden kann. Unter ungünstigen Verhältnissen oder bei nicht optimaler Annäherung (unerwartete oder falsch eingeschätzte hydrologische Verhältnisse) kann durch Einbrüche die Arbeit von Monaten (bis Jahren) verloren gehen.

Daher muss danach getrachtet werden, solche Risikokombinationen soweit möglich zu vermeiden. Dazu bestehen mehrere Möglichkeiten: Erstens ist die unterirdische Linienführung so zu optimieren, dass den bekannt schlechten Gesteinsbereichen möglichst ausgewichen wird bzw. nur relativ schmale Zonen durchfahren werden müssen. Zweitens muss der Tunnel – insbesondere in schlechten wasserführenden Gebirgszonen – wenn immer möglich steigend vorgetrieben werden. Schliesslich ist ein flexibles Baukonzept zu wählen, damit bei sich abzeichnender Bauverzögerung in einem Vortriebsabschnitt eine Intensivierung der Arbeiten im benachbarten Los oder ein zusätzlicher Zwischenangriff eingeleitet werden kann, so dass die Folgen mindestens teilweise aufgefangen werden können. Die in Abständen von 10 bis 14 km mit Schächten versehenen Basistunnels aller Linienführungsvarianten weisen die erforderliche Flexibilität für solche Fälle auf.

In jedem Planungsfall sind kritische Zonen vorhanden, aber in stark unterschiedlichem Ausmass. Am günstigsten sind die Verhältnisse beim Gotthard. Beim System Lötschberg-Simplon weist vor allem der Simplon mit seinem einseitigen Längsgefälle grosse Risiken auf. Die grössten Risiken für Bauzeitverlängerungen weist der Planungsfall Splügen auf.

Ausbruchklasse bzw. Triaszonen	Haupttunnel Zweispurröhre m¹/AT	Haupttunnel Einspurröhre m¹/AT	Seitenstollen m¹/AT
I	10,0	12,0	14,0
III	8,0	10,0	10,0
V	2,0	2,5	4,0
VIS	0,3	0,4	1,0
Triaszonen	–	0,18–0,35	0,22–0,60

Tabelle 6. Durchschnittliche Vortriebsleistungen (konventioneller Vortrieb im Dreischichtbetrieb, Auszug)

Basistunnel	Bauzeiten (Jahre/Monate) «minimal» (1)	normal (2)	«maximal» (3)	Differenz (3)-(2)
Lötschberg	10/6	13/2	16/8	27%
Simplon	10/8	11/9	14/3	21%
Gotthard	12/1	13/8	15/7	14%
Ypsilon	14/10	17/4	19/8	13%
Splügen	12/11	14/2	17/6	24%

Tabelle 7. Bauzeiten ab Baubeginn an Schächten und Portalen bis zur Inbetriebnahme des Basistunnels

Bauprogramme und Bauzeiten

Vorbereitungszeit: Die Bauzeit für den Basistunnel ist massgebend für die Eröffnung der Alpentransversale. Deshalb ist ein früher Baubeginn wichtig. Entsprechend wird die Zeitspanne nach dem Grundsatzentscheid bis zum Baubeginn der ersten Lose auf nur drei Jahre festgelegt. In dieser Zeitspanne müssen für die ersten Lose die allgemeinen Bauprojekte ausgearbeitet, die Baubewilligungen eingeholt sowie die Arbeiten ausgeschrieben und vergeben werden.

Gleichzeitig sind eine ganze Reihe von Fragen abzuklären und die Ergebnisse laufend in die Projektierung einfliessen zu lassen. Dazu gehören auch die Sondierbohrungen. Vorgenannte Zeitspanne ist knapp gewählt. Sie ist nur bei entsprechender Unterstützung sämtlicher betroffener Instanzen einzuhalten.

Arbeitsschichten und -tage: Die Bauzeiten sind direkt abhängig von der möglichen Anzahl der Angriffe und der geleisteten Arbeitszeit vor Ort. In der Schweiz wird in längeren Tunnels in der Regel während fünf Tagen zu drei Schichten gearbeitet. Die Normalbauzeit der Bauprogramme (vgl. Tabelle 7, Kol. 2) basiert deshalb in der Regel auf 210 Arbeitstagen pro Jahr zu drei Schichten. Nur in den bautechnisch schwierigsten Bereichen wird das Maximum ausgeschöpft durch Annahme eines Durchlaufbetriebes (das sind 7 Arbeitstage zu 3 Schichten pro Woche, d.h. 315 Arbeitstage pro Jahr), wodurch

die Vortriebsleistungen um durchschnittlich 25% grösser werden.

In den dargestellten Bauprogrammen (vgl. Bild 3 und 4), ist noch ein Potential an Bauzeiteinsparung enthalten, das durch einen Durchlaufbetrieb auf die ganze Tunnellänge ausgeschöpft werden könnte. Dies ist in der Regel mit etwas höheren Baukosten verbunden. Ob und in welchem Ausmass vom Einsparungspotential Gebrauch gemacht werden soll, muss vor der Bauvergabe entschieden werden.

Vortriebsleistungen: Aufgrund neuerer Erfahrungen wurden mittlere Leistungen für den konventionellen Vortrieb je für Haupttunnels (Zweispur- und Einspurtunnels) und Seitenstollen sowie für die einzelnen Ausbruchklassen ermittelt und darauf aufbauend die Bauprogramme konstruiert. Für die Fertigstellung des Innenausbaus und der bahntechnischen Einrichtungen kann mit einer einheitlichen Bauzeit von zwei Jahren ab Durchschlag gerechnet werden, eine genügende Staffelung der diversen Lose vorausgesetzt. Einige ausgewählte durchschnittliche Vortriebs-Leistungen pro Ausbruchklasse sind in der Tabelle 6 enthalten.

In besonders schlechten Zonen (Triaszonen) sind z.T. aufwendige Stabilisierungsmassnahmen erforderlich. Die mittleren Vortriebsleistungen in solchen Zonen sind entsprechend tief. Für das Abteufen der Schächte wurden abgestufte Leistungen von 35–50 m pro Monat, je nach den geologischen Verhältnissen, angenommen.

Bauzeiten: Die Bauzeit beginnt mit dem Baubeginn an den Schächten und Portalen und endet mit der Inbetriebsetzung. Sie setzt sich aus der Vortriebsdauer und der Dauer für die Fertigstellungsarbeiten zusammen. Die Vortriebsdauer wurde auf der Grundlage der oben erwähnten Vortriebsleistungen ermittelt.

Die errechneten Bauzeiten sind als Normalbauzeiten zu verstehen, die auf den Prognosen für die Geologie sowie den erwähnten Leistungsannahmen basieren. Bei von der Prognose abweichenden Verhältnissen sind sowohl Bauzeitverkürzungen als auch -verlängerungen möglich. Von Interesse war dabei insbesondere die Frage, innerhalb welcher Bandbreiten die Bauzeiten variieren können. Für die Bestimmung der möglichen Bandbreite der Bauzeit wurden die folgenden Fälle kombiniert:

- «Kürzeste» Bauzeit: möglichst günstige geologische Prognose (kurze schlechte Zonen) und Durchlaufbetrieb auf die ganze Länge der Tunnel angenommen
- «Längste» Bauzeit: Ungünstige geotechnische Prognose und Normalbetrieb (210 Arbeitstage zu 3 Schichten), in schlechten Zonen Durchlaufbetrieb angenommen.

Bei Eintreten nicht prognostizierbarer geologischer Risiken kann je nach der tatsächlich auftretenden Problematik auch die «längste» Bauzeit überschritten werden. Die Übersicht (vgl. Tabelle 7) zeigt die ermittelten Normalbauzeiten und die zugehörigen Bandbreiten.

Die abgebildeten Bauprogramme (vgl. Bild 3 und 4) für die Normalbauzeit des Lötschberg- und Gotthardbasistunnels illustrieren die Arbeitssequenzen und die Bedeutung der Schächte zur Begrenzung der Bauzeit. Sie stehen stellvertretend auch für die Bauprogramme des Splügenbasis- und des Simplontunnels. Diese Bauprogramme gehen davon aus, dass die Tunnelvortriebe ab den Schachtfüssen begonnen werden, sobald die Schächte entsprechend eingerichtet sind, allenfalls bevor die Entwässerung über den Seitenstollen ermöglicht wird. Zur Eingrenzung des Risikos möglicher Wassereinbrüche sind entsprechende Massnahmen (leistungsfähige Pumpeninstallationen) vorzusehen.

Bau- und Betriebslüftung

Betriebslüftung

In Eisenbahntunnels fehlt die Abgasbelastung von Strassenfahrzeugen. Eisenbahntunnels müssen daher in der Regel nicht künstlich belüftet werden, da die vorhandenen Druck- und Temperaturunterschiede sowie die durchfahrenden Züge für eine genügende Durchlüftung mit der Aussenluft sorgen. Bei den Basistunnels der Eisenbahn-Alpentransversalen kommt man aber in keinem Fall ohne künstliche Belüftung und Klimatisierung aus. Der Grund liegt in der hohen thermischen Belastung der Luft, die sich aus der Abwärme des Traktionsbetriebes und dem bis zu 60 °C warmen Umgebungsgestein ergibt.

Der Komfortanspruch der Fahrgäste wird allerdings durch die zugseigenen Klimaanlagen befriedigt. Ohne aktive Wärmeabfuhr ergäbe sich aber für das im Tunnel sich aufhaltende bzw. arbeitende Betriebs- und Unterhaltspersonal eine unzulässig hohe Lufttemperatur – wodurch auch die Wahrung der Sicherheit in Frage gestellt wäre. Gemäss den in der Schweiz geltenden Richtlinien (der SUVA) für Arbeiten unter feuchtwarmen Klimabedingungen unter Tag darf die Luftfeuchtigkeit bis zur Sättigung ansteigen, die Lufttemperatur muss dann aber unter 28 °C liegen, ansonst bei dauernder Schwerarbeit Wärmestauungen auftreten können (Ohnmacht, Hitzeschläge usw.).

In den *Einspurtunnels* induziert die Kolbenwirkung eines Zuges Luftgeschwindigkeiten, die bei reinem Richtungsbetrieb eine hinsichtlich der Klimadaten ausreichende Wärmeabfuhr in den maximal 16 bis 20 km langen Lüftungsabschnitten (zwischen Schächten bzw. Portalen) gewährleisten. In langen Tunneln müssen jedoch häufig Unterhalts- und Sanierungsarbeiten durchgeführt werden. Falls dann in einzelnen Tunnelabschnitten der Betrieb eingestellt werden muss, ist im parallelen Einspurtunnel ein Gegenbetrieb erforderlich. In diesen Bereichen und in den Lüftungsabschnitten mit Überholstationen, wo die Luft rezirkuliert, ist eine künstliche Belüftung nötig. Vermutlich kommt man daher auch in Einspurtunnelsystemen ohne aufwendige Belüftungsanlagen nicht aus.

In den *Doppelspurtunnels* sind aufgrund der Tunnellänge (35 bis 49 km) meist 2 bis 3 Züge gleichzeitig unterwegs. Deren Kolbenwirkung neutralisiert sich paarweise, und es entsteht allenfalls eine abschnittsweise hin und her pendelnde Luftbewegung. Zudem erzeugt die Kolbenwirkung in den doppelröhrig geführten Zwischenstrecken rezirkulierende Luftströme. Die Wärmeabfuhr ist daher künstlich sicherzustellen. Dazu wird Aussenluft verwendet, die nach dem System der Längslüftung durch den Tunnel strömt. Zusätzlich wird die Tunnelluft mittels Verdunstung von Wasser gekühlt. Zu diesem Zwecke werden geringe Wassermengen (z.B. 0,1 l/s pro Düse) mittels Pressluftdüsen zerstäubt. Das Wasser verdampft sofort, wobei die Lufttemperatur sinkt und die Luftfeuchtigkeit steigt. Trotz der Feuchtigkeitszunahme wird die Temperaturabnahme als angenehm empfunden.

Die alle 10 bis 14 km vorhandenen Lüftungsschächte führen alternierend entweder Zuluft oder Abluft. Die Luftbewegung erfolgt zwangsweise durch Ventilatoren, welche in den unterirdischen Zentralen bei den Schachtfüssen montiert sind. Der Seitenstollen wird künstlich so belüftet, dass er überall und jederzeit einen höheren Luftdruck hat als der danebenliegende Tunnel. So wird ausgeschlossen, dass bei Brand im Fahrraum Rauch durch die als Schleusen ausgebildeten, alle 400–500 m disponierten Querverbindungen in den Seitenstollen eindringen kann.

Die Frischluft wird in gleichbleibender Menge zugeführt und nicht etwa der wechselnden thermischen Last angeglichen. Die notwendige Ausgleichswir-

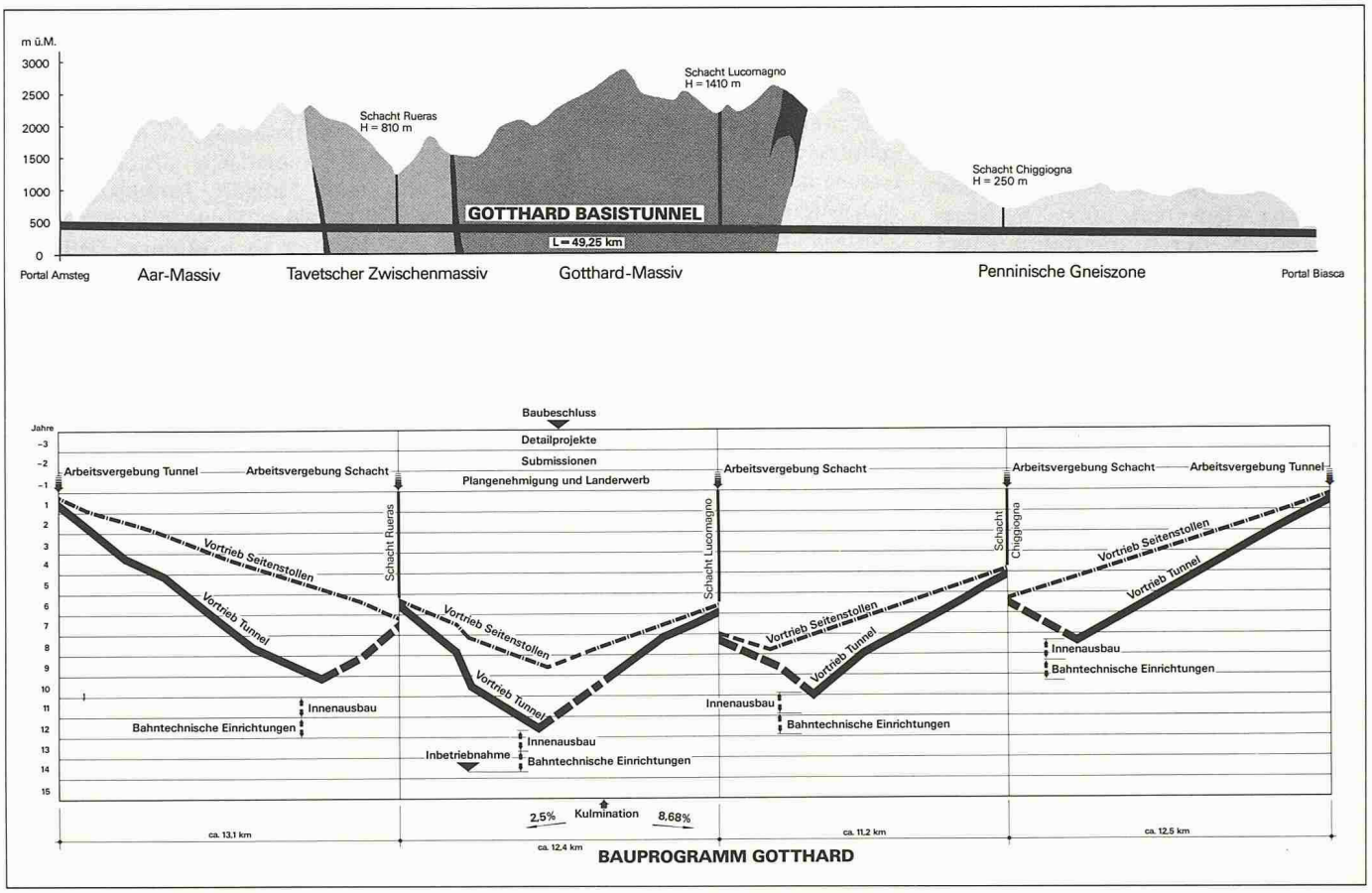


Bild 3. Bauprogramm Gotthard-Basistunnel

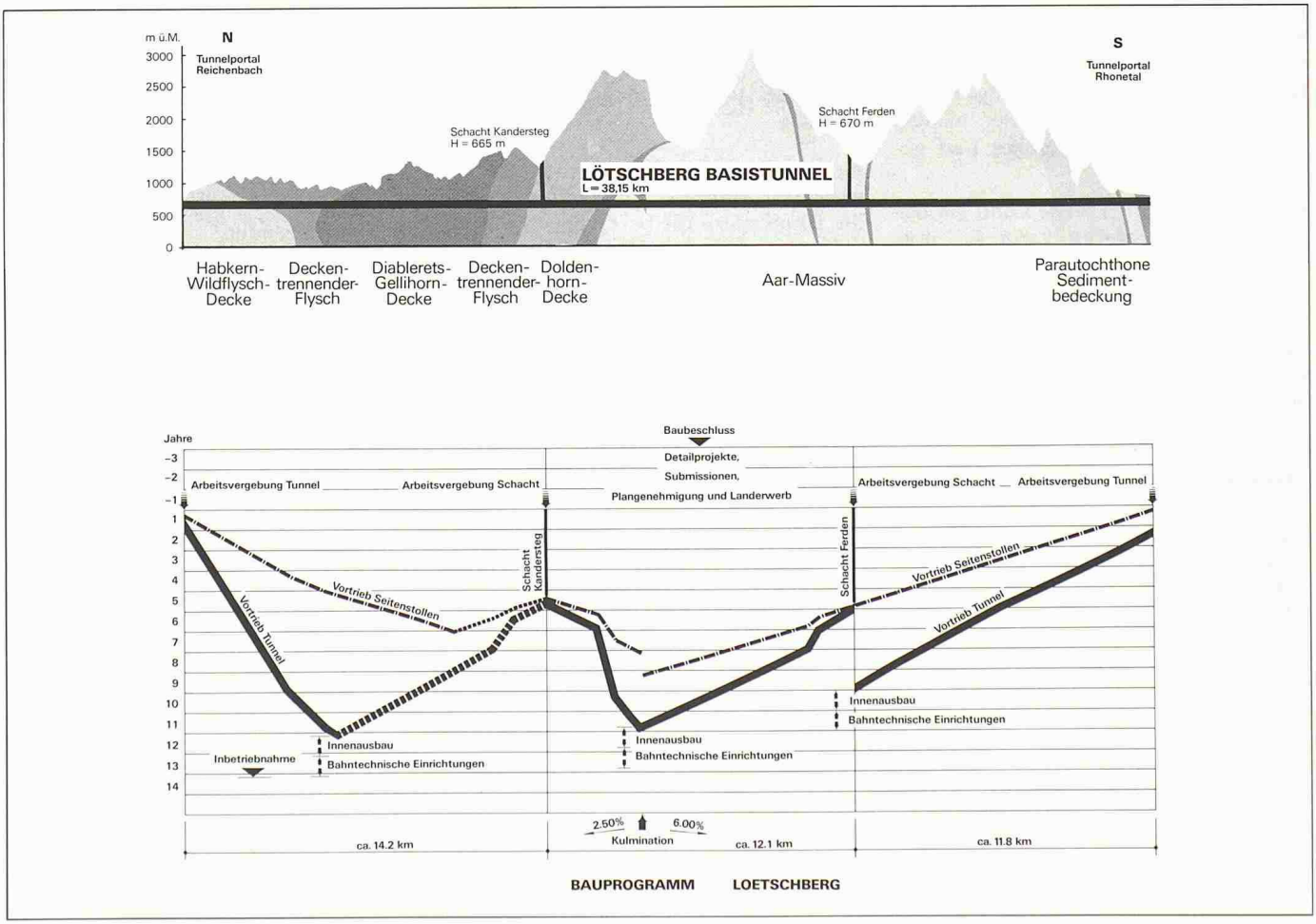


Bild 4. Bauprogramm Lötschberg-Basistunnel

kung haben die Tunnellaibung und das Gebirge durch kurz- und langfristige Speicherung von Wärmespitzen und entsprechende Auskühlung während Zeiten mit geringerem Wärmeanfall. Die Befeuchtungskühlung wird derart geregelt, dass sich die relative Feuchte in Grenzen hält (max. 80%). Die Regelung erfolgt durch intermittierendes Zuschalten der Pressluft zu den Düsen.

Baulüftung

Während der Ausbrucharbeiten sind die Luftverhältnisse kritischer als während des Betriebes, da die Luft durch Abgase, Staub, nitrose Gase, Berggase u.a.m. zusätzlich belastet wird und die Luft einen vergleichsweise hohen Feuchtigkeitsgehalt aufweist. Einer sorgfältig geplanten und ausgeführten Baulüftung ist daher besondere Beachtung zu schenken.

Für die Wärmeabfuhr während der Bauzeit sind zwangsbelüftete Kühler vorgesehen, die mit Kaltwasser gespiesen werden. Diese sind in der Nähe der Brust, wo der Fels noch nicht ausgekühlt ist, dichter zu setzen. Bei maschinellem Ausbruch ist die Kühlleistung der elektrischen Leistungsaufnahme der TBM anzupassen, unter Berücksichtigung der mit dem warmen Ausbruchsmaterial abgeführten Wärme. Zur Speisung der Kühler dient ein Frischwasservorlauf. Das erwärmte Abwasser wird entweder in die Rigolen abgeleitet oder an einen geschlossenen Kühlwasserkreislauf angeschlossen, bei welchem das Rücklaufwasser ausserhalb des Tunnels aufbereitet und gekühlt wird.

Bei maschinellem Vortrieb und bei hohen Felstemperaturen kann die notwendige Kühlleistung innerhalb der vordersten, 200 m langen Arbeitsstrekke 0,5–1 MW betragen. Diese Kälteleistung könnte von vier bis fünf Kühlern zu 200 kW Kälteleistung erbracht werden.

Projekt-Team

An dieser umfangreichen Arbeit waren u.a.folgende Fachleute der Elektrowatt Ingenieurunternehmung AG beteiligt: *Willy Gehriger (Projektleiter), Peider Könz, Elmar Blank, Marco Berner* und *Gottlieb Eppinger.*

Aerodynamik

Bei der Planung von Tunnels ist der Aerodynamik schnellfahrender Züge Beachtung zu schenken. Dabei ist zu unterscheiden zwischen dem erhöhten Luftwiderstand entlang des ganzen Tunnels und den an singularen Stellen auftretenden Druckstössen. Der *Luftwiderstand,* welcher proportional zum Quadrat der Geschwindigkeitsdifferenz zwischen Zug und Luft anwächst, ist während der Tunnelfahrt bedeutend grösser als auf der offenen Strecke und kann damit hinsichtlich der Zugkraft und des Energieverbrauchs zum begrenzenden Faktor der Zugsgeschwindigkeit werden.

Im Tunnel muss die vom Zug verdrängte Luft in der zwischen Zug- und Tunnelprofil verbleibenden freien Fläche zurückfliessen. Der Luftwiderstand im Tunnel wächst daher proportional zur dritten bis fünften Potenz der unversperrten Tunnelfläche an. Der Luftwiderstand ist ferner von der Mantelfläche des Zuges und von der Oberflächenglätte abhängig. Gegenüber konventionellem Rollwagenmaterial hat ein Zug mit glatter Oberfläche, besonders im Übergangsstück zwischen den einzelnen Wagen, etwa ⅔ des Luftreibungswiderstandes. Die Formgebung des Zugkopfes ist von minderer Bedeutung für den Luftwiderstand. Die heute üblichen Kopfformen tragen zum Gesamtwiderstand des Zuges weniger als 10% bei.

Kritisch bezüglich Komfort (für Passagiere) und Stabilität von Ladungen sind die *Druckstösse,* die bei Querschnittsänderungen, d.h. bei der Ein- und Ausfahrt in die Tunnel und beim Kreuzen von Zügen auftreten. Bei schnellfahrenden Zügen werden sowohl Druckgradient als auch Drucksprung gross. Zeitliche Druckänderungen von 750 bis 1000 Pa/s sind tolerierbar, werden aber auf die Dauer als unkomfortabel empfunden. Der Drucksprung sollte 3000 Pa nicht übersteigen. Die Kopfform der Lokomotive ist ein wichtiger Parameter des Druckproblems. Eine günstige Kopfform verdrängt die Luft nach oben, wodurch der Druckschlag auf die vorbeifahrenden Wagen auf Fensterhöhe abnimmt.

Ein wichtiger Parameter für den Druckstoss ist die Veränderung des Versperrungsmasses Zugfläche zur freien Luftfläche. Bei der Zugseinfahrt in den Tunnel ist diesbezüglich der Einspurtunnel problematischer als der Doppelspurtunnel. Längere Tunnelvorbauten (z.B. 200–600 m lange gelochte Galerien) könnten auch in engen Tunneln schnelle Zugseinfahrten erlauben, andernfalls ist die Einfahrtsgeschwindigkeit zu senken. Für den Druckstoss bei Zugskreuzungen ist die Tunnelgrösse nur indirekt massgebend. Hier ist vor allem ein genügender Gleisabstand wichtig.

Beurteilung und Ausblick

Die vorgängigen Ausführungen beschränken sich auf die Beschreibung einiger ausgewählter Aspekte der Projektierung und Ausführung langer Eisenbahn-Basistunnels. Sie zeigen, dass die Probleme der gegenüber den heutigen Alpentunnels bis mehr als dreimal so langen Tunnels nicht nur in gleichem Masse grösser und zahlreicher geworden sind, sondern dass dabei zahlreiche neue Fragen und neue Grössenordnungen der Probleme auftauchen. Die grösseren Tunnelquerschnitte, verbunden mit der Kumulation kritischer Verhältnisse wie die bis über 2000 m hohen Gebirgsüberlagerungen (die hohe Gebirgsspannungen und Wasserdrücke zur Folge haben), das Auftreten geotechnisch schwieriger Zonen usw., geben trotz den Fortschritten im Tunnelbauverfahren noch manche harte Knacknuss auf. Auch nach noch durchzuführenden Untersuchungen (z.B. Sondierbohrungen bis auf Tunnelkote) wird der Berg noch manche Überraschung (lies: Risiken) bereit halten, die höchste Anforderungen an alle Beteiligten stellen.

Adresse des Verfassers: *W. Gehriger,* dipl. Bauing. ETH/SIA, c/o Elektrowatt Ingenieurunternehmung AG, Postfach, 8022 Zürich.