

Zeitschrift: Schweizer Ingenieur und Architekt
Herausgeber: Verlags-AG der akademischen technischen Vereine
Band: 108 (1990)
Heft: 7

Artikel: Eingleisige Schmalspurbahntunnels: Sanierung unter Betrieb
Autor: Sala, Alex
DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-77364>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. [Mehr erfahren](#)

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. [En savoir plus](#)

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. [Find out more](#)

Download PDF: 07.02.2026

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>

Eingleisige Schmalspurbahntunnels

Sanierung unter Betrieb

Die Sanierung von eingleisigen Schmalspurbahntunnels unter Betrieb stellt besondere Anforderungen an Planung und Ausführung. In der Regel lassen sich Verstärkungen nur dann einbauen, wenn vorher der dafür notwendige Platz geschaffen wurde. Die Gewölbe müssen dazu vorübergehend geschwächt werden. Um das Einsturzrisiko zu vermindern, können nur sehr kleine Abschnitte bearbeitet werden. Dadurch sind auch nur relativ geringe Leistungen möglich, was sich direkt in hohen Baukosten niederschlägt. Zudem ist die zur Verfügung stehende Nettoarbeitszeit meist kurz, da während des nächtlichen Bahnunterbruches jedesmal auch die Installationen neu auf- und abgebaut werden müssen.

Die Gründe für die Sanierung eines Schmalspurbahntunnels sind mannigfaltig. In den weitaus häufigsten Fällen

VON ALEX SALA,
ZÜRICH

zwingt der schlechte bauliche Zustand der Tunnelauskleidung zu einer Instandstellung. Oft sind es aber auch gestiegene Raumbedürfnisse, welche zu einer Sanierung führen. Leistungsfähigere, grössere Loks, Panoramawagen und Huckepackverkehr erfordern die Vergrösserung des Lichtraumprofils. Höhere Ausbaugeschwindigkeiten zwingen zur Korrektur der Gleislage, zu einer Optimierung der Linienführung durch Kurvenstreckung. Zusätzliche Transit- oder Werkleitungen brauchen mehr Platz. Sehr oft werden jedoch auch zwei Fliegen mit einem Schlag erwischt, indem man bei einer ohnehin notwendigen Erneuerung der Tunnelverkleidung auch gleich das Lichtraumprofil vergrössert.

Bevor mit der Ausarbeitung eines Sanierungsprojektes begonnen werden kann, sind zwei Fragen eindeutig zu entscheiden:

- Ist ein Neubau möglich, und ist dieser allenfalls nicht billiger zu realisieren?
- Muss der Tunnel unter Betrieb saniert werden, oder lässt sich der Verkehr für eine bestimmte Zeit umleiten?

Die Klärung der ersten Frage erfordert einen seriösen Variantenvergleich und eine Gegenüberstellung der bauprogrammlichen, betrieblichen und finanziellen Konsequenzen.

Auch die zweite Frage lässt sich meist nicht einfach beantworten. Eine Sanierung unter Betrieb beschränkt die Mög-

lichkeiten der Bauausführung ganz wesentlich und erfordert von den Bahndiensten zusätzliche Arbeit, Engagement und ein hohes Mass an Flexibilität, ferner von der Bauunternehmung eine präzise Arbeitsvorbereitung und eine fast auf die Minute pünktliche Arbeitsausführung, um die meist knappen Zugspausen optimal auszunützen, und schliesslich vom Ingenieur ein ausge-reiftes Projekt, welches sich den Anforderungen des Bahnbetriebes unterzuordnen hat.

Für die Bahngesellschaft ergeben sich bei beiden Lösungen Vor- und Nachteile, die sich nicht alleine in Franken und Rappen quantifizieren lassen: Die zu bewältigende Mehrarbeit bei gleichbleibendem Personalbestand und der Aufwand für das möglicherweise nötige zusätzliche Rollmaterial für die Sanierung unter Betrieb sind den Mehraufwendungen für das Alternativ-Transportmittel sowie den Einnahmehausfällen durch Abwanderungen auf den Privatverkehr gegenüberzustellen. Und nicht zuletzt besteht die Gefahr, dass Kunden, welche auf den Individualverkehr ausweichen mussten, nicht mehr auf den öffentlichen Verkehr zurückkehren. Für Bahnen mit Güterverkehr gestaltet sich der Güterumlad als sehr kostspielig. In den häufigsten Fällen fehlen auch auf den kleineren Zwischenstationen geeignete Verladeanlagen. Aus diesen Gründen entschliessen sich die meisten Bahnen für eine Sanierung unter Betrieb, von deren Besonderheiten der folgende Aufsatz berichtet.

Untersuchung des Ist-Zustandes

Um ein Sanierungskonzept entwerfen zu können, muss der momentane Zustand des Bauwerkes bekannt sein. Je

genauer man den Ist-Zustand untersucht, um so zielsicherer kann ein Sanierungsprojekt erarbeitet und der zu seiner Durchführung notwendige Aufwand abgeschätzt werden. Zur Aufnahme des Ist-Zustandes gehören mindestens die Ermittlungen gemäss Tabelle 1.

Sanierungskonzept

Drei Randbedingungen prägen das Sanierungskonzept:

- Der Ist-Zustand des Tunnels und die Geologie
- Die Raumbedürfnisse der Bahn
- Das mögliche Baukonzept.

Die Raumbedürfnisse der Bahn werden hauptsächlich vom Lichtraumprofil bestimmt. Dieses soll wenn immer möglich den Vorschriften der 1984 in Kraft getretenen neuen Eisenbahnverordnung entsprechen. In dieser wird verlangt, dass auf zusammenhängenden Streckenabschnitten dasselbe Lichtraumprofil vorhanden sein muss. Es ist jedoch anzustreben, dass auch bei der Sanierung eines Einzelobjektes innerhalb eines Streckenabschnittes bereits die neuen Dimensionen berücksichtigt werden, um damit schrittweise dem obigen Ziel nahe zu kommen.

Das Lichtraumprofil muss in enger Zusammenarbeit mit der Bahngesellschaft entworfen werden. Es ist auf die Bedürfnisse der Bahn und auf das vorhandene bzw. zukünftige Rollmaterial abzustimmen. Oft erlauben es die beschränkten Platzverhältnisse nicht, die Normalmasse einzuhalten, so dass in Absprache mit dem Bundesamt für Verkehr Ausnahmeregelungen toleriert werden müssen.

Wie die Erfahrung gezeigt hat, ist die Einplanung eines ausreichenden technischen Spielraums zwischen der Begrenzung des Lichtraumprofils und der Innenlaibung der fertig sanierten Strecke ein absolutes Muss. Dieser technische Spielraum deckt die baulichen Ungenauigkeiten der Tunnelauskleidung ab. Gleichzeitig stellt er einen Reserveraum für spätere Rollmaterialvergrösserungen dar.

Sind alle Randbedingungen klar, das neue Lichtraumprofil für gerade Strecken und für Kurven genehmigt, das Entwässerungskonzept festgelegt und die neuen Werkleitungen bestimmt, kann die Projektierung des Tunnelquerschnittes beginnen. Oft gleicht diese Arbeit der Quadratur des Kreises.

	Untersuchungsgegenstand	Zielsetzung	Hilfsmittel bisher	Neuere Hilfsmittel (als Ersatz oder als Ergänzung)
Baulicher Zustand	Auskleidungsart	Wo ist der Tunnel wie ausgekleidet? Finden von alten Reparaturen	Alte Pläne Einmessen Fotos	Videoaufnahme
	Zustand und Stärke der Auskleidung Hinterfüllung	Ermittlung der momentanen Tragfähigkeit; Schwach- und Hohlstellen finden; Materialkennwerte ermitteln	Abklopfen Probenentnahme Sondierlöcher Sondierschlitz	Thermografische Aufnahmen [1] Endoskopie Felsmechanische Messungen
	Wasseraustritte Wasseranalyse	Ermittlung der Austrittsstelle sowie des Übergangs Fels/Verkleidung; Wasserchemismus	Einmessen Pendler z.T. nicht möglich Wasseranalyse im Labor	Thermografische Aufnahme Wasseranalyse an Ort
Profilverhältnisse	Bestehender Profilquerschnitt	Kenntnis der vorhandenen Profile	Profilschablone Einmessen von Hand Fotogrammetrie	Elektronische Profilmessgeräte [2] Linienmessung aus dem fahrenden Zug [3]
	Gleisanlage	Gleisführung und Querneigung	Theodolit Gleiswaage	Gleismesswagen mit elektr. Auswertung

Tabelle 1. Untersuchung des Ist-Zustandes

Manchmal ist eine Redimensionierung der Projektanforderungen aufgrund einer Kosten-Nutzen-Analyse unumgänglich.

Sobald der Ist-Zustand bekannt ist und die ersten Projektskizzen vorhanden sind, muss der Bauvorgang in die Projektierung miteinbezogen werden. Mehr noch als beim konventionellen Tunnelbau sind Projekt und Ausführung derart eng miteinander verknüpft, dass ohne Berücksichtigung der bauli-

chen Gegebenheiten kein sinnvolles Projekt zustande kommt.

Der Bauvorgang wird massgeblich von dem zur Verfügung stehenden Rollmaterial der Bahn und der täglichen Arbeitszeit bestimmt. Die Bruttozeit zwischen Durchfahrt des letzten Zuges am Abend und der Einfahrt des ersten Zuges am Morgen verringert sich um den Zeitaufwand, der abends zum Abschalten und Erden der Fahrleitung und das Schützen der Bahnanlagen und morgens zum Entfernen der Abdeckungen und dem Einschalten der Fahrleitung nötig ist. Dies kann bis zu einer Stunde erfordern. Meist verbleiben verhältnismässig kurze Netto-Arbeitszeiten. Diese optimal auszunutzen, ohne tagsüber die Sicherheit von Bahn und Bau zu gefährden, ist das Ziel jedes Sanierungskonzeptes.

Ob bahnseitige Installationen, wie beispielsweise Traktionsmittel, Rollmaterial, eingesetzt werden können oder müssen, hängt von den Kosten, der Verfügbarkeit und von der Lage der Baustelle ab. Der Einsatz dieser Mittel bestimmt den Bauvorgang ganz wesentlich, da meist nur in einer Richtung und an einer Arbeitsstelle gearbeitet werden kann. Zudem übernimmt die Bahn damit die Verantwortung für die Versorgungssicherheit der gesamten Baustelle.

Bahnunabhängige Bauausführungen haben den Vorteil, dass die unternehmerische Freiheit in der Wahl der In-

stallation und des Bauvorgangs voll gewahrt ist und dass durch den Einsatz vorhandener, gewohnter Maschinen und Geräte dank höherer Leistung meist eine kostengünstigere Ausführung der Sanierung möglich ist.

Beispiel: Sanierung des Grengiols-Tunnels

Der Grengiols-Tunnel der Furka-Oberalp-Bahn (FO) liegt auf der Strecke des berühmten Glacier-Express, welcher die beiden Ferienparadiise St. Moritz und Zermatt miteinander verbindet. Der Tunnel wurde zusammen mit der Strecke Brig-Gletsch am 30. Juni 1914 eingeweiht. Rund 3000 Bauarbeiter machten es möglich, dass die dampfbetriebene Eisenbahn nach nur drei Jahren Bauzeit auf der rund 40 km langen Strecke den Bahnbetrieb aufnehmen konnte.

Der einspurige Kehrtunnel überwindet in einer Zahnradstrecke mit einer Steigung von 85‰ den geologisch schwierigen Steilhang (Urseren-Zone) vom Martisberg bei Deisch. Von der Gesamtlänge von 600 m sind lediglich die beiden insgesamt 150 m langen Portalzonen mit Natursteinen ausgemauert und befinden sich noch in einem verhältnismässig guten Zustand. Die restliche, 450 m lange Tunnelstrecke wurde mit einem 40-90 cm starken Ortsbetongewölbe verkleidet.

Wie sich bei der Sanierung herausstellte, wurde der Tunnel wegen der schlechten Gebirgseigenschaften (Quarzphyllite und Chlorit-Sericit-Phyllite, stark verformt und geschiefert) im Teilausbruch aufgefahnen (Firststollenvortrieb und Strossabbau mit Gewölbeunterfangung).

In Zonen mit schlechten Felsverhältnissen wurde der Firststollen mit Holzeinbau (Türstockprofil) gesichert, welcher zwischen Fels und Ortsbetongewölbe im Tunnel verblieb. Das hinter der Verkleidung belassene Einbauholz ist zwischenzeitlich derart verfault, dass es keine Stützwirkung mehr besass. Das Gebirge konnte daher langsam auf die Tunnelverkleidung aufschliessen, welche ihrerseits durch Frostschäden im Tragverhalten bereits geschwächt war. Dies führte zu einer raschen Verschlechterung des Bauwerkszustandes.

Die Tunnelverkleidung aus Ortsbeton wurde mit den damaligen Mitteln hergestellt und eingebracht. Die Betonqualität entspricht gemäss heutiger Terminologie jener von magerem Sickerbeton. Der Beton war an vielen Stellen im Gewölbe derart porös und durchlässig,



Bild 1. Enge Platzverhältnisse beim Portal

FO

GRENGIOLS-TUNNEL

- SANIERUNGSETAPPE 1 (1984)
- ▨ SANIERUNGSETAPPE 2 (1985)
- ▤ SANIERUNGSETAPPE 3 (1986)
- SANIERUNGSETAPPE 4 (1987)
- ▩ TUNNEL AUSGEMAUERT

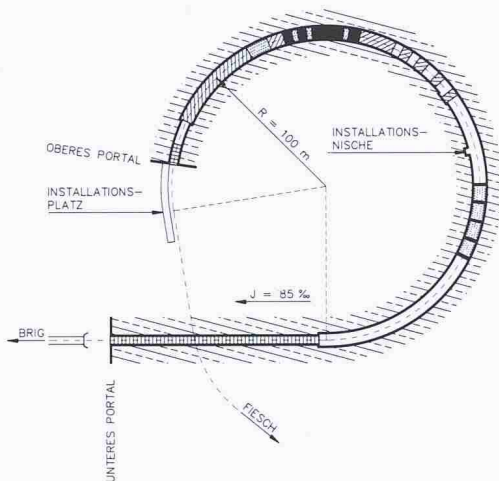


Bild 2. Übersicht

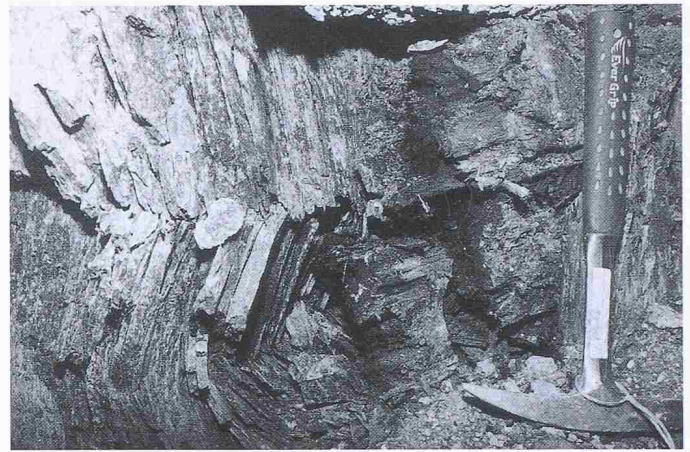


Bild 3. Lokale Knickzone hinter der alten Betonverkleidung

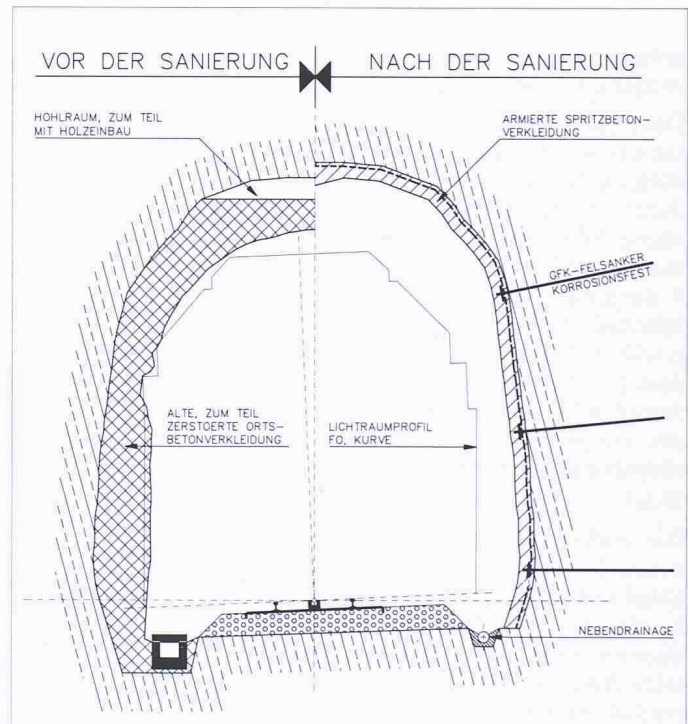


Bild 4. Normalprofil vor/nach der Sanierung

dass der hinter der Verkleidung anstehende Fels vom Russ der Dampflokomotiven schwarz beschichtet war.

Die Gründe für das vielerorts gerissene, deformierte und oberflächlich bis tiefgründig zerstörte Gewölbe können wie folgt zusammengefasst werden:

- schlechte bis sehr schlechte Gebirgsqualität in Kombination mit ungünstiger Schichtlage (Hauptschieferung steil nach SE einfallend; schleifend zur gekrümmten Tunnelachse verlaufend [4])
- mangelnde Kohäsion des Gebirges durch schmierige Schieferungsflächen, besonders bei Wasserzutritten (Sericit-, Glimmer- und Chlorit-Einregelungen)
- lokale Faltungen und Runzelschieferung, lokale Knickzonen
- verfallter Holzeinbau, welcher dem aufschliessenden Gebirge keinen Widerstand leisten konnte. Dadurch kam es zu weiteren Auflockerungen

des Gebirgsverbandes, was wiederum zu einer Belastungszunahme führte

- schlechte Betonqualität (grober Kies, wenig Feinanteile)
- Frostschäden (Abplatzungen, welche zur Verminderung des Betonquerschnittes beitrugen). Das in den Tunnel eindringende Gebirgswasser führte im Winter zu starken Eisbildungen, welche den Bahnbetrieb zusätzlich beeinträchtigten und periodisch durch den Baudienst der Bahn entfernt werden musste. Während der Tauperiode lösten sich immer wieder Gewölbeteile und stürzten auf das Bahntrasse.

So wurde im Juli 1984 die Sanierung des engen Kehrtunnels in Angriff genommen. Gleichzeitig sollte das Profil derart vergrößert werden, dass in Zukunft die neuen Lichtraumprofilvorschriften der Eisenbahnverordnung erfüllt werden konnten. Diese Ausgangslage und die Forderung der Bahn nach der unbe-

dingten Aufrechterhaltung des Betriebes führten zum nachfolgend beschriebenen Sanierungskonzept, wobei folgende wichtige Randbedingungen zu berücksichtigen waren:

- Es standen keine Traktionsmittel der Bahn zur Verfügung.
- Die Bauzufahrt musste über das Bahntrasse erfolgen. Die einzige Zufahrt war nur etwa 200 m oberhalb des oberen Portals möglich.
- Für die ersten beiden Baujahre stand nur ein beschränkter Baukredit zur Verfügung.
- Das rauhe Bergklima beschränkte die Bausaison auf April bis Oktober.

Die limitierten Mittel erforderten einen nach Prioritäten geordneten Sanierungsablauf. In den ersten beiden Baujahren wurden daher diejenigen Strecken mit dem höchsten Sicherheitsrisiko saniert, d.h. jene Strecken, in welchen die steil stehenden Schichten tangential den Tunnel berührten bzw.

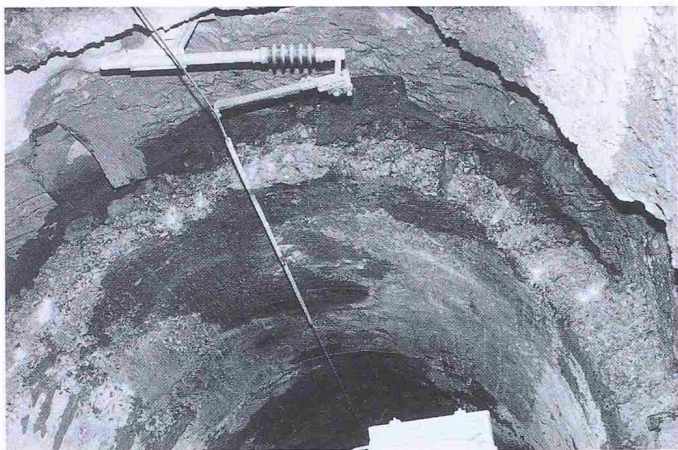


Bild 5. Neue Fahrleitung in einem ausgebrochenen Ring



Bild 6. Hydraulischer Abbauhammer auf Bagger (Vordergrund)

grössere Wassereintritte die Gebirgsverhältnisse verschlechterten.

Dem Sanierungsprojekt lag das Lichtraumprofil A der neuen Eisenbahnverordnung zugrunde (vgl. Tabelle 2). Mit diesem Lichtraumprofil und unter Berücksichtigung eines technischen Spielraums von 10 cm ergab sich das in Bild 4 dargestellte Tunnelprofil bei einer Scheitelhöhe von 4,80 m ab SOK. Gegenüber dem vorhandenen Profil bedeutete dies eine durchschnittliche theoretische Ausweitung von rund 20 cm, entsprechend einer Querschnittsvergrösserung von 18 m² um 5 m² auf 23 m².

Die vorhandene einseitige Rigole, bestehend aus einem rechteckigen Betonkanal mit massiven Betondeckeln, war in einem guten Zustand und konnte weiter verwendet werden. Um eine direkte Ableitung des Gebirgswassers zu ermöglichen und um Gleisquerungen zu vermeiden, wurde auf der Gegenseite eine zusätzliche Sickerleitung eingepflanzt. Bahnseitig wurde eine neue Fahrleitung vorgesehen (vgl. Bild 5).

Das Sanierungsprojekt sah einen einschaligen Spritzbetonausbau des Tunnelquerschnittes, verstärkt durch Armierungsnetze und Felsanker, vor. Man rechnete damit, dass an besonders

kritischen Stellen Stahleinbau nötig werden könnte.

Damit war das Ziel der Sanierung definiert, und es galt nun, einen auf die durch den Bahnbetrieb definierten Randbedingungen abgestimmten Bauvorgang zu finden. Es war von Anfang an klar, dass der Gewölbeabbruch nur schrittweise erfolgen konnte, da die Eigentragfähigkeit des Gebirges aufgrund von Sondierlöchern und der festgestellten Schäden als gering erachtet wurde. Dies sollte sich während den Sanierungsarbeiten dann auch bewahrheiten.

Da keine Traktionsmittel der Bahn zur Verfügung standen, musste ein Baubetrieb mit Pneufahrzeugen vorgesehen werden. Dafür mussten aber zunächst die Voraussetzungen geschaffen werden, indem auf dem Bahntrasse beidseitig des Geleises je ein rund 70 cm breiter Fahrstreifen aus Heissmischtragsschicht (HMT) eingebaut wurde. Zum Schutz des Schotterbettes diente eine Vliesmatte. Diese HMT-Piste (vgl. Bild 1 im Vordergrund) bewährte sich über die gesamte Bauzeit hervorragend und konnte am Schluss der Bauarbeiten ohne wesentliche Schotterverschmutzung auf einfache Art wieder entfernt werden. Allerdings war ein Nachkramen während der Bauzeit nicht mehr möglich. Dieser Tatsache wurde dadurch Rechnung getragen, dass vor Inangriffnahme der Bauarbeiten das Geleise nochmals gerichtet und gekrampft wurde. Die Fahrstreifen ermöglichten den Einsatz branchenüblicher Baumaschinen, was sich positiv auf die Baukosten ausgewirkt hat.

Der Abbruch des alten Betongewölbes erfolgte problemlos mit einem hydraulischen Abbauhammer (120 kg), welcher auf einem für die Profilgrösse des Grenchiols-Tunnels optimal abgestimmten Hydraulikbagger montiert war. Dieser wurde nach Abbruch eines Ausweitungsschlitzes für den Materialauf-

lad zu einem Tieflöffelbagger umgerüstet. Der Abtransport des Materials erfolgte mit Dumper oder Pneulader.

Die Felssicherung bestand meist aus einer sofort nach dem Ausbruch aufgetragenen, wenige Zentimeter starken Schicht von schnellbindendem Fertigmörtel sowie mehreren Schichten Spritzbeton mit einer äusseren und einer inneren Netzarmierung, wo nötig verstärkt mit vollvermörtelten, korrosionsfesten Felsankern. Im Durchschnitt wurden pro Tunnelmeter etwa neun Kubikmeter Spritzbeton-Trockengemisch aufgebracht, was einer durchschnittlichen Fertigstärke von immerhin 35 cm entspricht.

Die Standfestigkeit des Gebirges war stellenweise so schlecht, dass die einzelnen 0,60 m bis 1,00 m langen Ringe in bis zu sechs Teiletappen ausgebrochen werden mussten. Die alte Betonauskleidung musste gar örtlich vor dem Abbruch mit Spritzbeton provisorisch gesichert werden, damit nicht die Gefahr bestand, dass durch die Erschütterungen des Abbauhammers das Gewölbe zusammenbrach.

In kritischen Felspartien wurden Stahleinbaubögen als Unterstützungselemente eingebaut. Durch die vor allem in diesen Zonen ausgeprägten Nachbrüche entstand grosses Überprofil, welches aufgefüllt werden musste, damit die Stahleinbaubögen satt hinterfüllt werden konnten. Obwohl zwischen den einzelnen Stahleinbauten das Überprofil nicht vollständig ausgeglichen wurde, war ein enormer Spritzbetonverbrauch nicht zu vermeiden. Aufgrund dieser Tatsache wurde für die folgenden Sanierungsetappen ein Stahleinbauträger in Form eines Gitterträgers entwickelt, welcher sich durch kraftschlüssige, jedoch im Dezimeter-Bereich verstellbare Stösse an die stark ändernde Profilform anpassen lässt.

Die neu entwickelten Gitterträger erfüllten die Erwartungen bezüglich Ein-

Lichtraumprofil A der neuen Eisenbahnverordnung

- Fahrdrahthöhe angehoben: 4,25 m über Schienenoberkante (SOK)
- reduzierter Fensterraum: 20 cm
- Schlupfweg: 20 cm
- Kurvenverbreiterung $e = 25$ cm bei $R = 100$ m
- Höhe bzw. Breite der Fahrleitungskonstruktion: 12 bzw. 95 cm (einseitig)
- elektrischer Sicherheitsabstand: 12 cm
- Gleisüberhöhung $u = 45$ mm

Tabelle 2. Lichtraumprofil A der neuen Eisenbahnverordnung

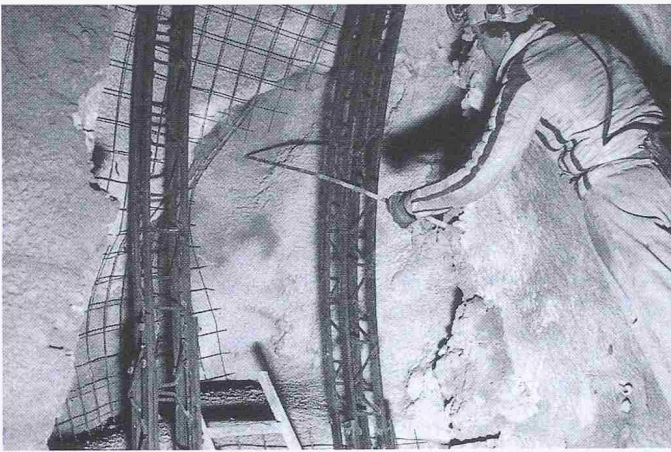


Bild 7. Neu entwickelter Gitterträger (der Profilform anpassbar)



Bild 9. Stahlschutzschild im Bereich eines frisch ausgeweiteten Abschnitts

sparung von Spritzbeton-Trockengemisch für die Hinterfüllung der Bögen vollauf. Aufgrund der Tatsache, dass alle Gitterträger mindestens um eine, meistens zwei Stufen ausgezogen werden konnten, wurde eine durchschnittliche Spritzbetoneinsparung von rund einem Viertel erzielt: Man hat also etwa drei bis vier Kubikmeter Trockengemisch pro Laufmeter Stahleinbaustreke eingespart. Die geringfügigen Mehrkosten der Spezialgitterträger wurden dadurch mehr als nur aufgewogen. Zudem resultierte daraus eine Bauzeitverkürzung.

Für die Sanierung des Grengiols-Tunnels hat man eine einschalige Bauweise gewählt, welche auf ein zusätzliches In-

nengewölbe verzichtet. Daher musste der Wahl der Sicherungsmittel erhöhte Beachtung geschenkt werden. Sie alle weisen eine permanente Tragfunktion auf [5]. Aus diesem Grund kam nur ein vollständig korrosionsfester Felsanker in Frage, dessen Tragfähigkeit auch nach Jahren garantiert werden kann. Je nach Gebirgseigenschaften wurden pro Schlitz zwischen vier und acht Stück GFK-Felsanker von drei Meter Länge verwendet, welche auf der gesamten Ankerlänge mit Kunstharzpatronen verklebt wurden. Die systematisch in den Paramenten versetzten Felsanker bringen dank des Verdübelungseffektes eine Erhöhung des Scherwiderstandes in den Schichtflächen mit sich und ver-

hindern wirksam, dass die steilgestellten Schichten gegen den freien Querschnitt ausknicken. Dadurch konnte die Eigentragfähigkeit des Gebirges verbessert werden.

Um die Wirksamkeit der eingebauten Felssicherungsmassnahmen kontrollieren zu können, wurden bei allen kritischen Strecken Distometerquerschnitte zur Konvergenzmessung eingerichtet. Einige der insgesamt 30 Messquerschnitte zeigten während der Bauarbeiten kein Abklingen der Deformationen, so dass in diesen Bereichen gezielt eine Felssicherungsverstärkung eingebaut werden musste. Dieses Vorgehen erlaubte einen optimalen Einsatz der Felssicherungsmittel und hat insgesamt

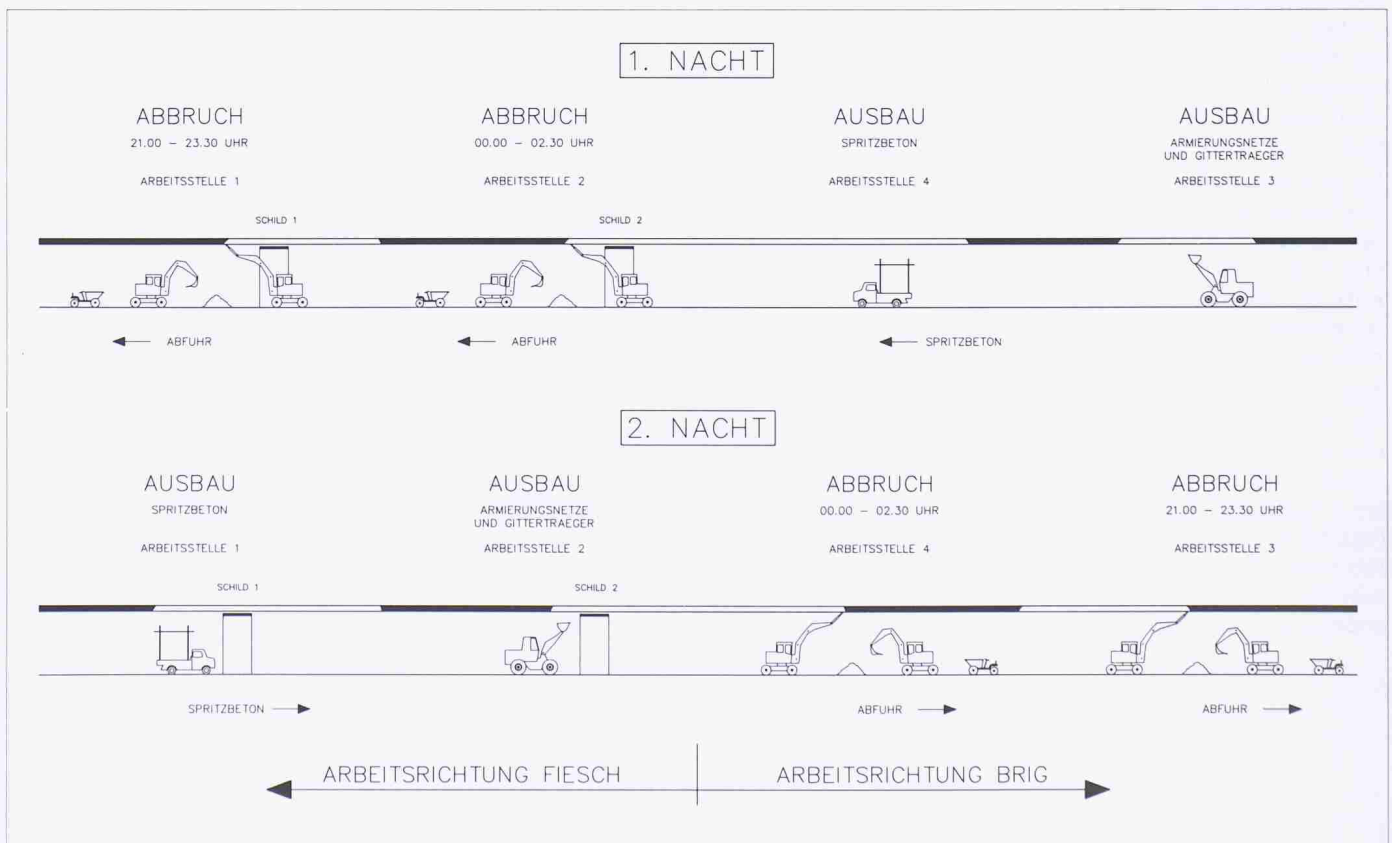


Bild 8. Bauvorgang

Literatur

- [1] R. Amberg: «Thermographische Aufnahmeverfahren zur Erkennung des Zustandes von Tunnelauskleidungen», Vortrag gehalten am Symposium «Sanierung von Tunnelbauwerken», München, 12./13. März 1987
- [2] H. Hagedorn: «Electronic Profile Measuring System for Tunnels and Slopes», Technical Note in «Rock Mechanics and Rock Engineering» 19, 89-97 (1986)
- [3] R. Amberg: «Entwicklungen auf dem Gebiet der Tunnelmesstechnik», Vortrag an der Technischen Akademie Esslingen, Lehrgang Nr. 11049/84.080 «Tunnelbau», 15. Dezember 1988
- [4] Dr. R. Wyss: «Die Urseren-Zone - Lithostratigraphie und Tektonik», *Eclogae Geologicae Helvetiae*, Vol. 79, No. 3, 1986
- [5] A. Sala und P. Teichert: «Spritzbeton als Auskleidung des Furka-Basistunnels», *Schweizer Ingenieur und Architekt*, Heft 24/1982

zu Kosteneinsparungen geführt. In der Zwischenzeit sind die Deformationen bei allen Messquerschnitten abgeklungen.

Während der ersten beiden Baujahre wurde pro Nacht ein Ring von wenigstens 80 cm und höchstens 2 m Länge ausgebrochen und gesichert. Im Durchschnitt wurden pro Laufmeter Tunnel 5,3 m³ Beton abgebrochen. Die Qualität des freigelegten Felses war derart schlecht, dass ein Nachbrechen von losen Felspartien und Hinterfüllmaterial unvermeidbar war (im Durchschnitt rund vier Kubikmeter pro Tunnelmeter).

Im ersten Baujahr wurden 47,50 m im zweiten 66,50 m, total also 114 m Tunnel saniert. Die verbleibende Länge von 334 m wurde mit dem Ziel in Angriff genommen, die restlichen Sanierungsarbeiten in zwei weiteren Baujahren abschliessen zu können.

Nebst installativen Verstärkungen, welche ein wechselseitiges Arbeiten von unten und von oben her ermöglichten, wurden zur Beschleunigung der Arbeiten zwei Stahlschutzschilder eingesetzt (vgl. Bild 8). Diese bauseits beschafften, rund vier Meter langen Stahlschutzschilder wurden jeweils am Schichtende unter die frisch ausgebrochenen

Partien geschoben. Somit konnte die provisorische Sofortsicherung pro Ausbruchsetappe auf ein Minimum beschränkt werden, denn die Schilder hätten ein Herunterfallen von Gewölbe- bzw. Felsteilen auf das Bahntrasse verhindert. Damit hat man eine zeitliche Verlängerung der Ausbruchphase und eine Verkürzung der anschliessend notwendigen Felssicherungsphase erzielt, was - ohne zusätzliches Sicherheitsrisiko - zu einer deutlichen Arbeitsbeschleunigung führte. Alle diese Massnahmen brachten die erhoffte Leistungssteigerung von bisher im Durchschnitt 0,5 m pro Arbeitstag um 100% auf 1,00 m. Im letzten Baujahr erreichte man gar eine Durchschnittsleistung von 1,15 m pro Arbeitstag.

Im Bereich des oberen Portals war die Felsüberdeckung nur noch sehr gering, so dass ein vollständiges Abtragen der Betonverkleidung nicht mehr möglich war. Es musste ein Bauvorgang gewählt werden, welcher garantierte, dass eine minimale Betongewölbestärke erhalten blieb. Zur Verbesserung der Qualität des alten Betons sowie zur Verfestigung der Kontaktzone Beton/Fels und des umliegenden Gebirges wurden durch verschieden tiefe Injektionslanzen insgesamt rund 8000 kg Polyurethan (PU) injiziert. Durch die Anordnung von etwa 25 cm tiefen Sägeschnitten jeden halben Meter konnte die Ausbruchtiefe sehr genau definiert und eingehalten werden, so dass überall ein durch Polyurethan-Injektionen verfestigtes Betontraggewölbe von 20 bis 40 cm Stärke verblieb, welches ein Einstürzen des Tunnels verhinderte.

Bevor jedoch auf diesen Bauvorgang umgestellt wurde, ereignete sich eines Nachts während den Abbrucharbeiten ein Tagbruch, welcher einen dreitägigen Unterbruch des Bahnverkehrs zur Folge hatte. Durch eine lediglich etwa 40×40 cm grosse Öffnung - es wurde eben mit dem Abbruch des Gewölbes in einem neuen Schlitz begonnen - rieselte Lockermaterial in den Tunnel, welches nicht mehr aufzuhalten war und den Tunnelquerschnitt vollständig ausfüllte. Offenbar wurde eine mit völlig trockenem Riesel aufgefüllte Kluft angefahren, die sich wie eine Sanduhr in den Tunnel entleerte. Der Tagbruch verursachte an der Geländeoberfläche einen Trichter von etwa fünf Meter Durchmesser und einer Tiefe von rund

vier Meter. Er führte in der steilen Felswand zu Stabilitätsproblemen an der Oberfläche. Gleichzeitig mit der Bewältigung des Niederbruchs im Tunnel musste der instabile Felswandbereich konsolidiert werden.

Der Qualitätssicherung des Spritzbetons wurde spezielle Beachtung geschenkt. Aufgrund von Vorversuchen wurde die optimale Rezeptur des Trokengemisches festgelegt. Laufende Qualitätskontrollen während der Arbeitsausführung zeigten, ob die gestellten Minimalanforderungen eingehalten wurden. Der aufgrund von 60 Probekörpern festgestellte Mittelwert beträgt 40,6 N/mm² bei einer Standardabweichung von 4,8 N/mm². Die geforderte Druckfestigkeit von 35 N/mm² ist somit eingehalten worden.

Besonderes Augenmerk galt der Profilkontrolle. Sie wurde mit einem automatischen Profilmessgerät ausgeführt. Vor Inangriffnahme der Arbeiten wurden alle drei Meter Querprofile des bestehenden Tunnels aufgenommen. Anhand dieser teilweise exzentrisch zur Gleisachse liegenden Profile konnte an Ort und Stelle das Mass der Ausweitung festgelegt werden. Profilaufnahmen am Ende der Bauarbeiten brachten den Nachweis, dass die theoretischen Minimalprofile überall eingehalten wurden. Sie dienten gleichzeitig als Abrechnungsbasis für die Ausweitarbeiten.

Die Sanierungs- und Ausweitungsarbeiten konnten innerhalb der budgetierten Baukosten abgerechnet werden. Der Kostenvoranschlag wurde um 9,2% unterschritten. Die Baukosten bewegten sich je nach Felsverhältnissen zwischen Fr./Tm 7090.- (ohne Stahleinbau) und Fr./Tm 15 330.- (mit Stahleinbau). Der mittlere Laufmeterpreis betrug Fr. 8665.-.

Dieses erfreuliche Resultat konnte nur dank permanenter Betreuung der Arbeiten durch einen fachlich ausgewiesenen Bauleiter realisiert werden, welcher mit einer qualifizierten Unternehmung und einer eingespielten Equipe zusammenarbeitete.

Adresse des Verfassers: Alex Sala, Ing. HTL, Amberg Ingenieurbüro AG, Postfach 3141, 8031 Zürich.