

TAVETSCHER ZWISCHENMASSIV NORD: NACHWEIS DER MACHBARKEIT

Heinz Ehrbar

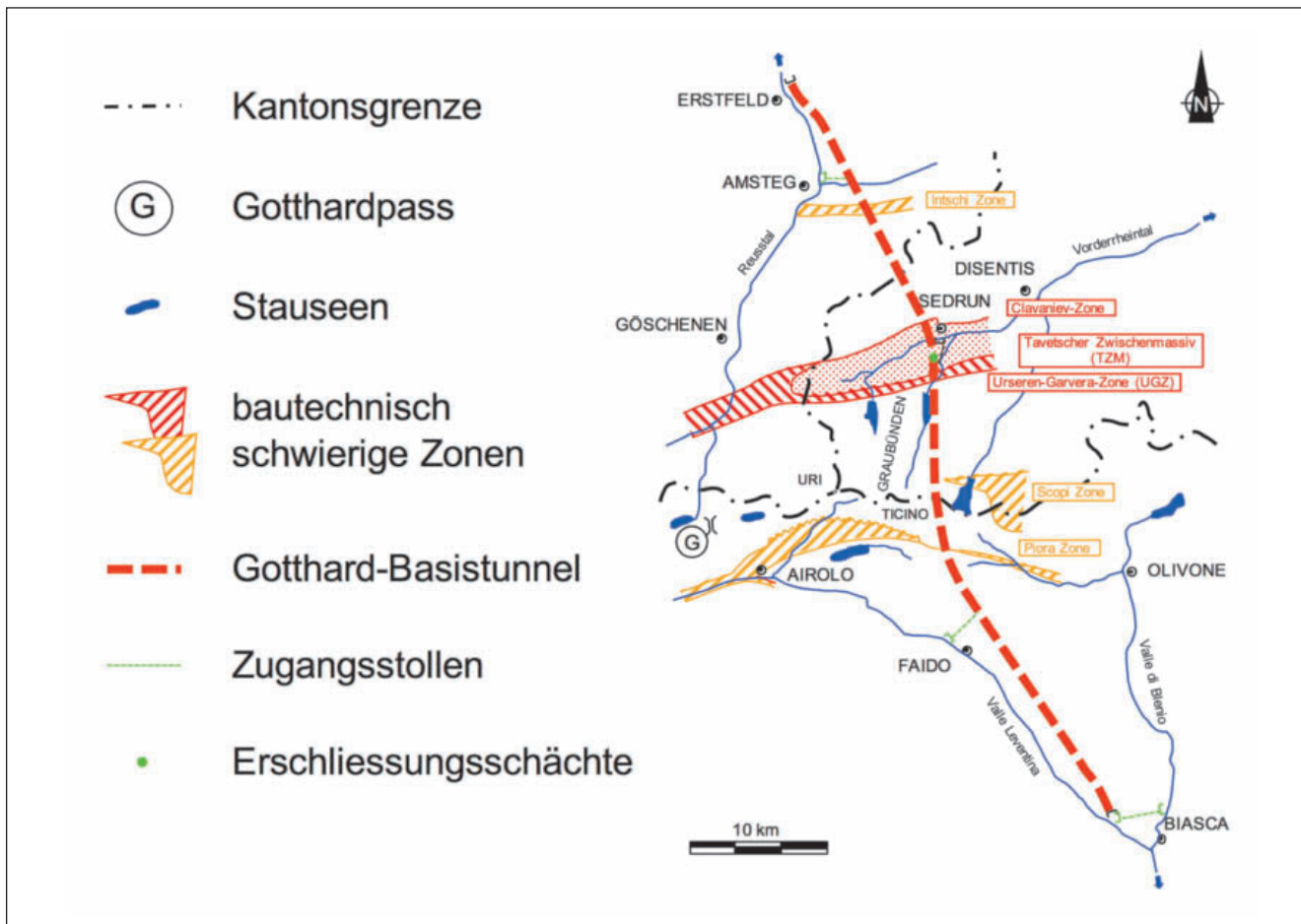
1 AUSGANGSLAGE

Mit dem Bundesbeschluss über den Bau der schweizerischen Eisenbahn-Alpentransversale vom Oktober 1991 (Alpentransit-Beschluss) war der Bau des Gotthard-Basistunnels (GBT) zwischen Erstfeld und Bodio grundsätzlich festgelegt. Angesichts der vielen Zwangspunkte ergaben sich für den gewählten Korridor des GBT nur geringe Freiheitsgrade in der Trasseeführung. Ein wesentliches Kriterium für die Trassierung des GBT war es, bautechnisch schwierige Zonen zu vermeiden oder im Falle des Antreffens solcher Zonen diese in möglichst kurzer Distanz zu queren.

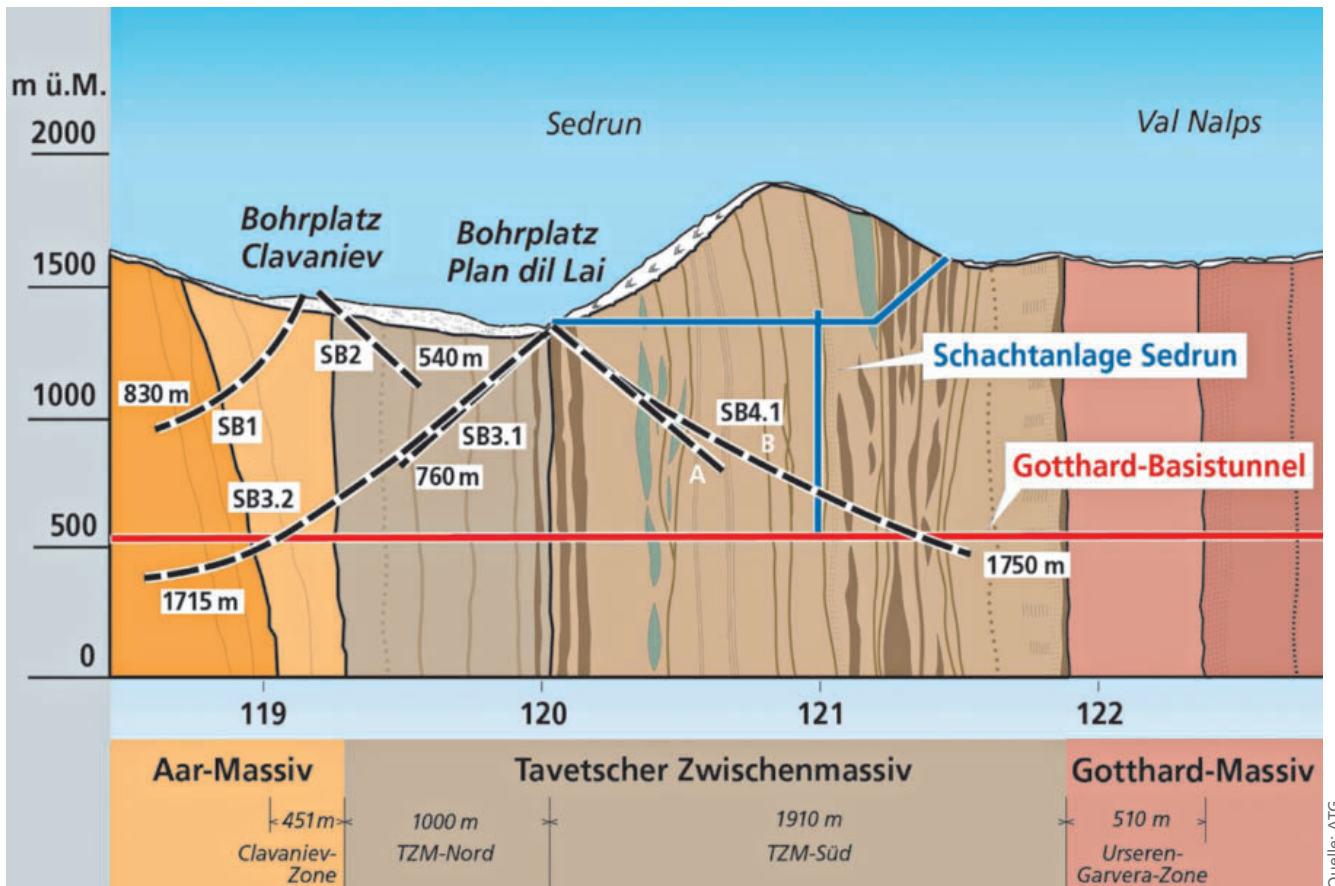
Als kritische Zonen wurden im Raum Sedrun das Tavetscher Zwischenmassiv (TZM), insbesondere dessen nördlicher Teil (TZM Nord genannt), die anschliessende Clavaniev-Zone und die vom Bau des Gotthard-Strassentunnels her bekannte Urseren-Garvera-Zone identifiziert.

Das TZM Nord wurde im Zuge der Alpenfaltung stark tektonisch beansprucht. Die ursprünglich kompakten Gesteine wurden zu einem fast lockergesteinsähnlichen Baugrund zerrieben. Bereits in den frühesten Studien des Bundes zum Bau eines Gotthard-Basistunnels wurde 1963 die Gefahr beschrieben [1], dass im TZM druckhafte Gebirgsverhältnisse auftreten könnten, welche mit einer Geschwindigkeit von ca. 1.8 m/Tag zu durchfahren wären. Das Projekt der SBB zum Bau eines Basistunnels aus dem Jahr 1975 sah dann vor, diese Strecke mit einem Doppelspurtunnel und einem täglichen Fortschritt von 3 m aufzufahren [2].

Mit der im Jahr 1992 positiv verlaufenen Volksabstimmung zum Alpentransit-Beschluss war die politische Weichenstellung zugunsten der Realisierung des AlpTransit-Projektes mit den Achsen am Gotthard und am Lötschberg definitiv gefallen. Es begann die Phase der Erarbeitung eines Vorprojektes. In dieser Phase wurde die Machbarkeit dieses Tunnelabschnitts



► Bild 1 Trassierung des Gotthard-Basistunnels in Relation zu bautechnisch schwierigen Zonen



Quelle: ATG

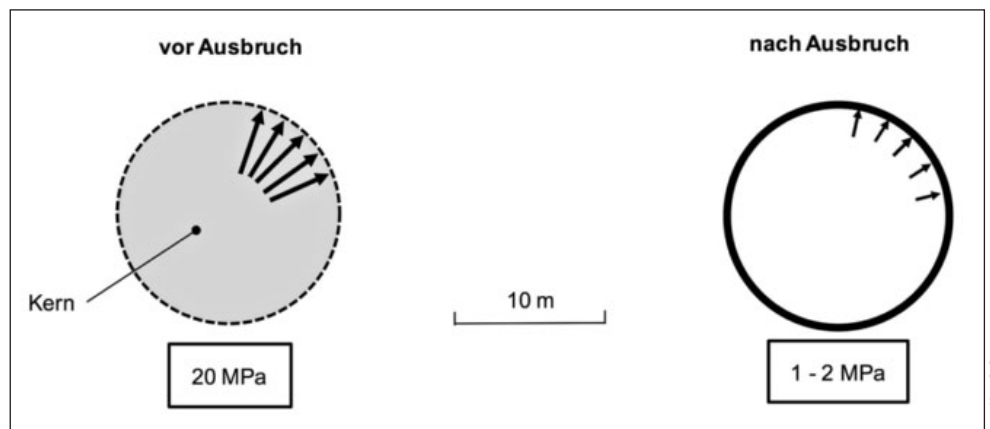
► Bild 2 Tektonische Einheiten im Raum Sedrun mit Sondierbohrungen

im TQM wegen der erwarteten schweren Druckerscheinungen von vielen als ebenso kritisch wie in der Piura-Mulde eingestuft. Den Projektverantwortlichen war von Anbeginn klar, dass hier zum einen ein Doppelspurtunnel auszuschliessen war und dass zum anderen in dieser Gegend ein Zwischenangriff erfolgen musste, um die Gesamtbauzeit wegen der erwarteten niedrigen Vortriebsgeschwindigkeiten im Rahmen halten zu können.

Mittels dreier verschiedener Sondierbohrkampagnen (1990, 1993 und 1997/98) [4] wurden die notwendigen Erkenntnisse für die ingenieurtechnische Bearbeitung der Aufgabenstellung ermittelt. Die Bohrergebnisse, die In-situ- und die Laborversuche bestätigten, dass mit stark heterogenen und bautechnisch äusserst anspruchsvollen Verhältnissen zu rechnen war. Der Anteil der stark kakiritisierten und weichen Gesteine wurde für die rund 1'150 m lange Zone des TQM Nord auf 71 % geschätzt, während es sich bei den restlichen 29 % um

harte Gneisformationen als Zwischenlagen mit einem spröden Bruchverhalten handelte. Das bautechnische Verhalten dieser «Sandwich-Struktur» war nur schwer zu prognostizieren.

Im Baugrundmodell wurde dieser Tatsache dadurch Rechnung getragen, dass verschiedene Homogenbereiche definiert wurden, welche sich durch eine unterschiedliche Intensität und Kombination der erwarteten Gefährdungsbilder «echter Gebirgsdruck» und «Ortbrustinstabilität» sowie durch den diesbezüglich möglichen Einfluss der Porenwasserdrücke unterschieden [7].



Quelle: [9]

► Bild 3 Aufgabenstellung für den Entwurf der Ausbruchsicherung

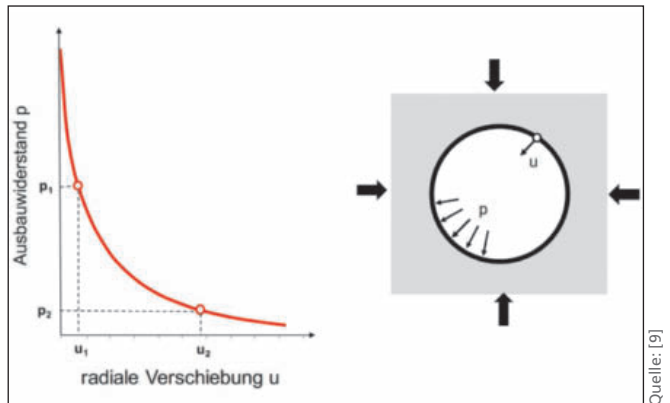
2 KLÄRUNG DER MACHBARKEIT FÜR EINE EINMALIGE AUFGABENSTELLUNG

Gestützt auf die Erfahrungen aus anderen Projekten mit vergleichbaren geotechnischen Verhältnissen, gab es Bedenken bezüglich der technischen Machbarkeit der Durchörterung des TZM Nord. Für die Vergleichsbetrachtungen wurde vor allem der Vortrieb im Mesozoikum des Gotthard-Strassentunnels beigezogen, bei welchem jedoch eine Überlagerung von nur 300 m zu bewältigen war; aber auch andere Projekte mit druckhaftem Gebirge wurden entsprechend analysiert [2].

In der Tat konnte man sich auf kein Ausbruchsicherungskonzept und keine der bis anhin bekannten Bau- und Betriebsweisen für analoge Randbedingungen stützen. In enger Abstimmung zwischen dem Projektingenieur und dem vom Bauherrn beigestellten Expertenteam «Arbeitsgruppe Bautechnik» wurden Konzepte entwickelt, welche sowohl den felsstatischen als auch den baubetrieblichen Anforderungen zu genügen hatten.

Folgende Frage war zu klären: Ist es möglich, in einem Tunnel mit bis zu 13 m Ausbruchdurchmesser unter Aufbringung eines Ausbauwiderstands von maximal ca. 2 MPa (angenommenes technisch/wirtschaftliches Maximum für die gegebenen Randbedingungen) ein neues Gleichgewicht herzustellen und dieses für eine Betriebszeit von 100 Jahren aufrechtzuerhalten, wenn im unverritzten Gebirge initiale Spannungen von rund 20 MPa vorherrschen?

In der Entwurfsphase diente primär das Kennlinienverfahren als Grundlage der tunnelstatischen Untersuchungen. Die Gebirgskennlinie stellt unter vereinfachten Annahmen die Beziehung zwischen dem Ausbauwiderstand und der Radialverschiebung am Ausbruchrand dar. Bei einem elastisch-plastischen Material ist diese Beziehung nicht linear. Die wichtigste, durch Beobachtungen eindeutig bestätigte Aussage der Kennlinie lautet, dass mit zunehmender Verschiebung der zum Gleich-



► Bild 4 Das Kennlinienverfahren

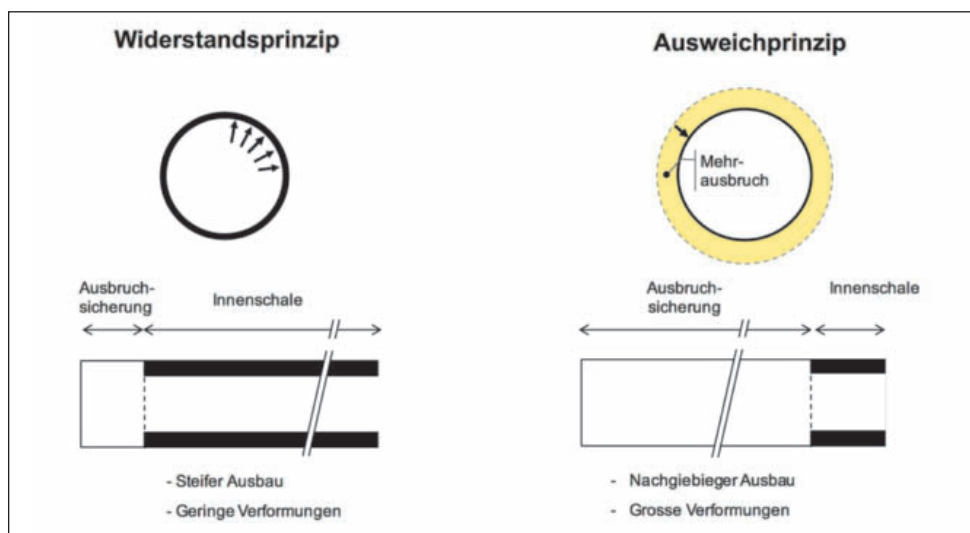
gewicht erforderliche Ausbauwiderstand abnimmt (vergleiche die Wertepaare u_1/p_1 bzw. u_2/p_2 in ►Bild 4).

Aufgrund dieser fundamentalen Gesetzmässigkeit lassen sich zwei Grenzfälle für den Entwurf und die Konstruktion in druckhaftem Gebirge formulieren [5]:

1. das Widerstandsprinzip,
2. das Ausweichprinzip.

Im ersten Fall steht eine ausreichende Stützung des Hohlraums mit steifem Ausbau bei geringstmöglichen Verformungen im Vordergrund, während im zweiten Fall ein geringerer Ausbauwiderstand zur Herstellung des Gleichgewichts benötigt wird, weil aufgrund des Mehrausbruchs Verformungen zugelassen werden, was eine nachgiebige Ausbruchsicherung erfordert.

Die zwei Prinzipien unterscheiden sich auch im Vorgehen in Tunnellängsrichtung: Beim Widerstandsprinzip mit Vollausbau erfolgt die Ausbruchsicherung mit schweren Stahlbögen. Die Gebirgsverformungen bleiben verhältnismässig gering. Die Innenschale von hoher Tragfähigkeit wird bei Anwendung des Widerstandsprinzips üblicherweise bis nahe an die Ortbrust herangeführt.



► Bild 5 Grundsätzliche Prinzipien zur Ausbruchsicherung

Beim Ausweichprinzip wird mit einem Mehrausbruch Raum für die erwarteten Konvergenzen geschaffen. Die Ausbruchsicherung muss entsprechend nachgiebig sein. Der Einbau der starren Innenschale kann in grossem räumlichem und zeitlichem Abstand von der Ortbrust und sogar nach Monaten oder Jahren erfolgen, wenn die Verformungen abgeklungen sind.

Das Widerstandsprinzip wurde in druckhaftem Gebirge bei den Tunnelbauten der



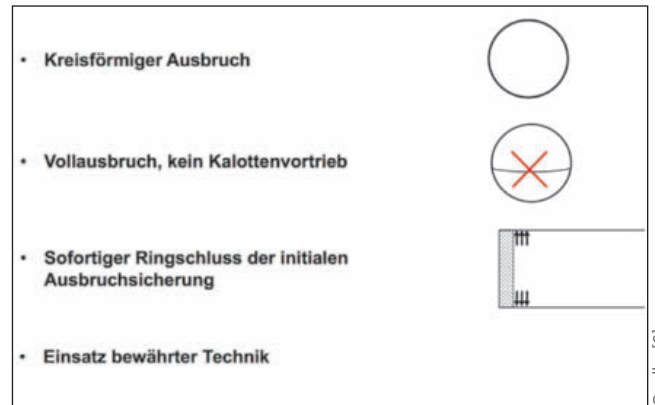
Quelle: structurae.net

► **Bild 6** Beispiel für einen Vortrieb nach Widerstandsprinzip

Eisenbahnverbindung «Altà Velocità» zwischen Bologna und Florenz in den 1990er-Jahren erfolgreich angewendet [6]. Dabei kam der Vollassbruch mit Ausbruchflächen von 100 bis 120 m² mit den typischen Ortsbrustankern zum Einsatz. Diese Tunnelbaumethode bedeutete damals eine zukunftsweisende Entwicklung.

Bei der Projektierung des Tunnelabschnitts TSM Nord stellte sich für den Projekt-Ingenieur und für die am Projekt intensiv mitwirkende Arbeitsgruppe Bautechnik die Frage, ob die in Italien bestens bewährte Methode des Vollassbruchs mit dem Widerstandsprinzip übernommen werden könne. Es galt dabei zu berücksichtigen, dass dort unter ähnlichen geotechnischen Verhältnissen wie im TSM Nord die Gebirgsüberlagerung nur 200 bis 300 m und nur mit wenigen Ausnahmen 500 m erreicht hat.

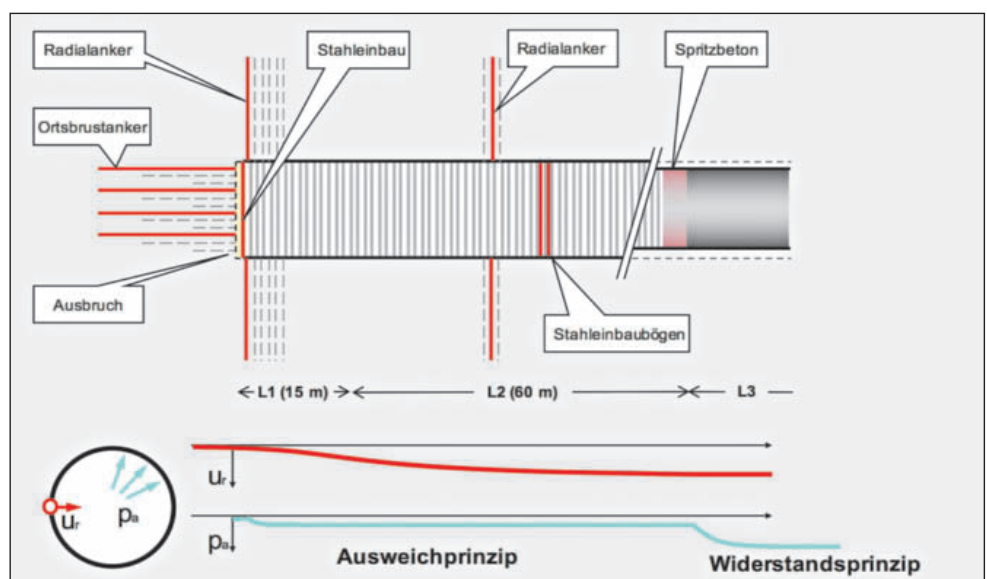
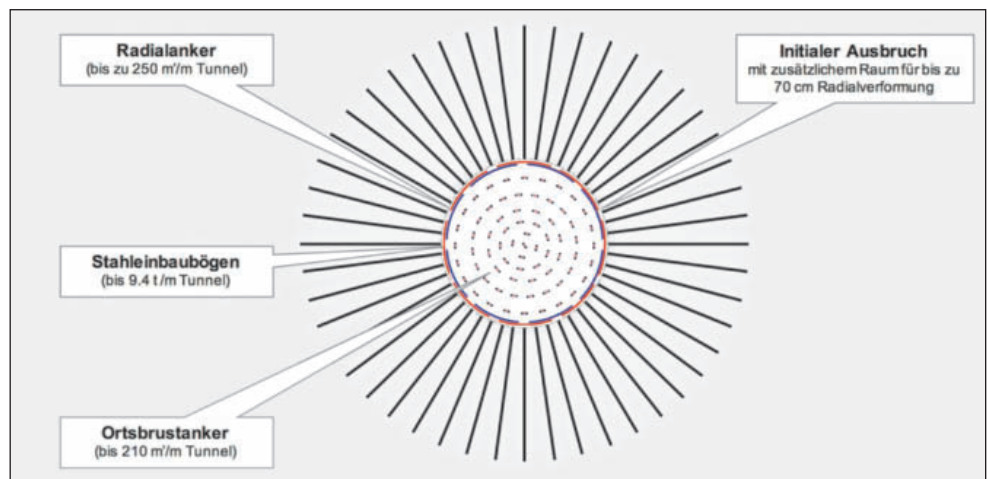
Das alternative Ausweichprinzip unter Anwendung von TH-Stahlprofilen mit Gleitverbindungen ist ein im Bergbau seit Jahrzehnten übliches Verfahren. Seit den 1930er-Jahren wurden dabei Förderstrecken mit Durchmessern von 6 bis 8 m bei hohen Überlagerungen von 1000 m und mehr aufgefahren. Grössere Durchmesser waren selten.



Quelle: [9]

► **Bild 7** Randbedingungen für den Entwurf der Ausbruchsicherung

Für den Nordvortrieb im Teilabschnitt Sedrun war bald klar, dass die grosse Überlagerungshöhe von 800 m im TSM Nord, gepaart mit dem erforderlichen grossen Ausbruchdurchmesser von maximal 13 m, die entscheidenden Faktoren für die Ent-



Quelle: H. Ehrbar

► **Bilder 8a und b** Grundprinzip der Ausbruchsicherung für das druckhafte Gebirge des TSM Nord

Vorauserkundung	Kernbohrungen, 31–196 m lang
Profilform	Kreisform
Ausbruchquerschnitt	81 m ² bis 134 m ²
Zusatzausbruch für Deformationen	bis zu 75 cm radiale Deformation
Ausbruchsicherung	systematische Radialankerung: Selbstbohrinjektionsanker, Länge 8–12 m, Bruchlast 320 kN, 96 m bis 288 m/Anker pro Tunnelmeter
Stabilisierung der Ortbrust	Selbstbohrinjektionsanker, Länge 12–18 m, Bruchlast 320 kN, ca. alle 6 m eingebracht, bis zu 210 m/Anker pro Tunnelmeter; Versiegelung der Ortbrust mittels Spritzbeton nach dem Abschlag
Firstsicherung	Selbstbohranker als Spiesse, Länge 6 m, Bruchlast 320 kN, bis zu 100 m/Anker pro Tunnelmeter
Maximaler Einbauwiderstand	theoretisch ca. 2.0 MPa (ohne Spritzbeton), effektiv ca. 1.0 MPa
Spritzbeton	35–50 cm im rückwärtigen Bereich, nach dem Abklingen der Deformationen eingebracht

► **Tabelle 1** Vortriebskonzept TZM Nord [10]

wicklung eines geeigneten neuartigen Baukonzeptes darstellten. Mittels umfangreicher tunnelstatistischer Untersuchungen, aber auch dank dem Erfahrungsaustausch mit den italienischen Projekten (Prof. Pietro Lunardi) und dem deutschen Kohlebergbau gelang es, eine vielversprechende Lösung zu entwickeln. Diese beruhte grundsätzlich auf dem Einsatz bewährter Technik und auf den folgenden elementaren Annahmen:

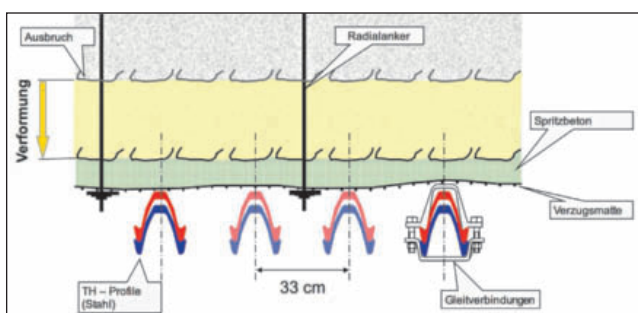
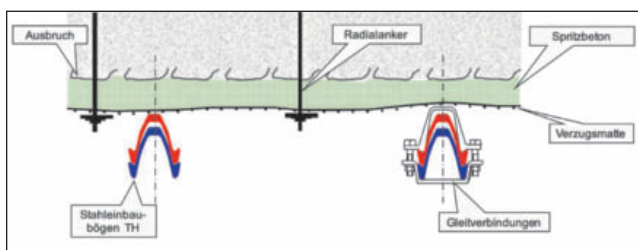
1. Wahl eines kreisrunden Ausbruchprofils, welches die angenommenen hydrostatischen Drücke am besten aufnehmen kann;
2. Wahl eines geeigneten Masses an Zusatzausbruch, um kontrollierte Verformungen zuzulassen und damit eine Reduktion des erforderlichen Ausbauwiderstandes auf ein technisch und wirtschaftlich tragbares Mass zu erwirken;
3. Vortrieb ausschliesslich im Vollausbuch; dabei konnte von der in Italien gerade zu dieser Zeit zur Perfektion entwickelten Vorgehensweise des Vollaushubs in Kombination mit einer Ortbrustsicherung mit langen Ankern [6] profitiert werden;

4. klare Zuweisung des Einsatzes von Stützmitteln mit hohem Verformungsvermögen (Stahleinbau und Anker) in der «Deformationsphase» und solchen mit niedrigem Verformungsvermögen (Spritzbeton, Beton) in der «Widerstandsphase»; als verformbare Stützmittel wurden die aus dem Bergbau bekannten TH-Stahleinbaubögen in Kombination mit langen Felsankern zum Einsatz gebracht.

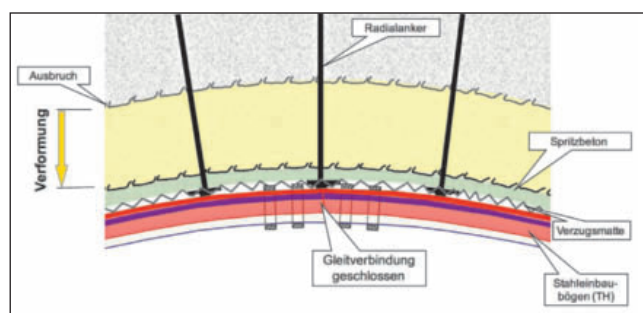
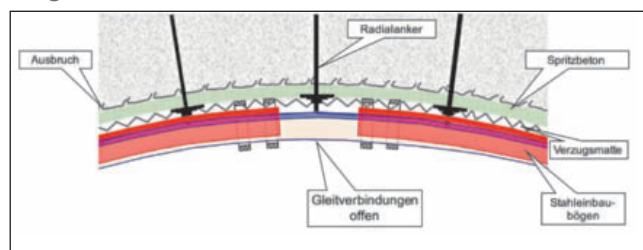
► **Bilder 8a und b** zeigen das gewählte Ausbaukonzept für das TZM Nord. Es beinhaltet den systematischen Mehrausbruch von bis zu 0.7 m für die Aufnahme der Konvergenz, die Ankerung der Ortbrust mit Überlappung, die Versiegelung der Ausbruchfläche durch Spritzbeton und Netze, die TH-Profile und eine Radialankerung. Um die hohe erforderliche Konvergenz zu gewährleisten, wurden zwei vollständige Ringe von TH-Profilen mit jeweils acht Einzelsegmenten ineinandergelegt.

Als schwersten Ausbautyp sah das Projekt den Einbau von maximal drei TH-Bögen je Tunnelmeter, einen Mehrausbruch von

Querschnitt



Längsschnitt



Quelle: H. Ehrbar

► **Bilder 9a–d** Fels sicherungskonzept für das TZM Nord; oben Einbaustand, unten Zustand nach Verformungen

0.7 m und eine Gesamtlänge der Radialanker von ca. 288 m je Tunnelmeter vor [8]. Das effektive Tragverhalten der Radialanker bei den prognostizierten grossen Gebirgsverschiebungen konnte in der Projektierungsphase nicht restlos geklärt werden.

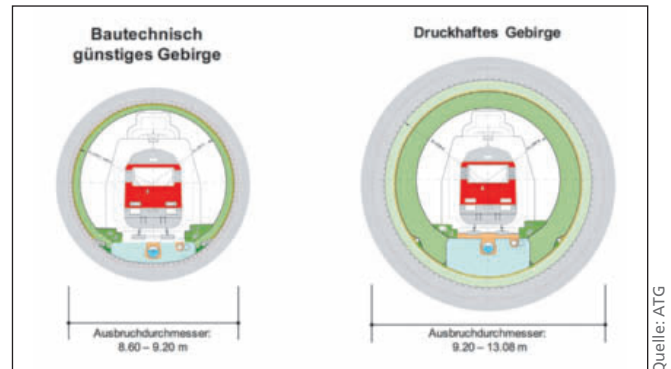
Nach dem Eintreten der dem Mehrausbruch entsprechenden Konvergenz stossen die Segmente der inneren und äusseren Stahlbögen aufeinander und erhöhen so den Tragwiderstand. Um weitere Konvergenz zu verhindern, war eine 0.6 m dicke Spritzbetonschale in einem Abstand von rund 75 m hinter der Ortbrust vorgesehen [8].

Die maximale Stärke der mit grosser zeitlicher Verzögerung einzubringenden Innenschale betrug im Projekt 1.2 m. Während des Baus musste diese aber nirgends eingesetzt werden, stattdessen betrug die maximal eingebaute Stärke 90 cm.

3 VORBEREITUNG DER AUSFÜHRUNG – BAUBETRIEBLICHE MACHBARKEIT

Nebst den felsstatischen Nachweisen war auch der Nachweis der baubetrieblichen Machbarkeit eine zentrale Anforderung in den frühen Projektphasen. Der Vergleich zwischen dem Profil beim schwersten Ausbautyp und jenem in einem stabilen Fels zeigt klar, mit welchem ungewöhnlichen Problem man sich in Bezug auf die baubetriebliche Machbarkeit auseinandersetzen musste, nämlich der Beherrschung eines Ausbruchprofils von 13 m Durchmesser in extrem druckhaftem Gebirge.

Ein theoretisch sicheres Ausbruchsicherungskonzept, welches sich mit wirtschaftlich vernünftigem Aufwand jedoch nicht hätte realisieren lassen, wäre keine brauchbare Lösung gewesen. Diese Gefahr eines sicheren, aber letztlich unwirtschaftlichen Ausbruchskonzepts war kein Phantasiegebilde, wie die folgende Plausibilitätsüberlegung zeigt: Umfassende Analysen der Zykluszeiten durch den Projektgenieur führten zur

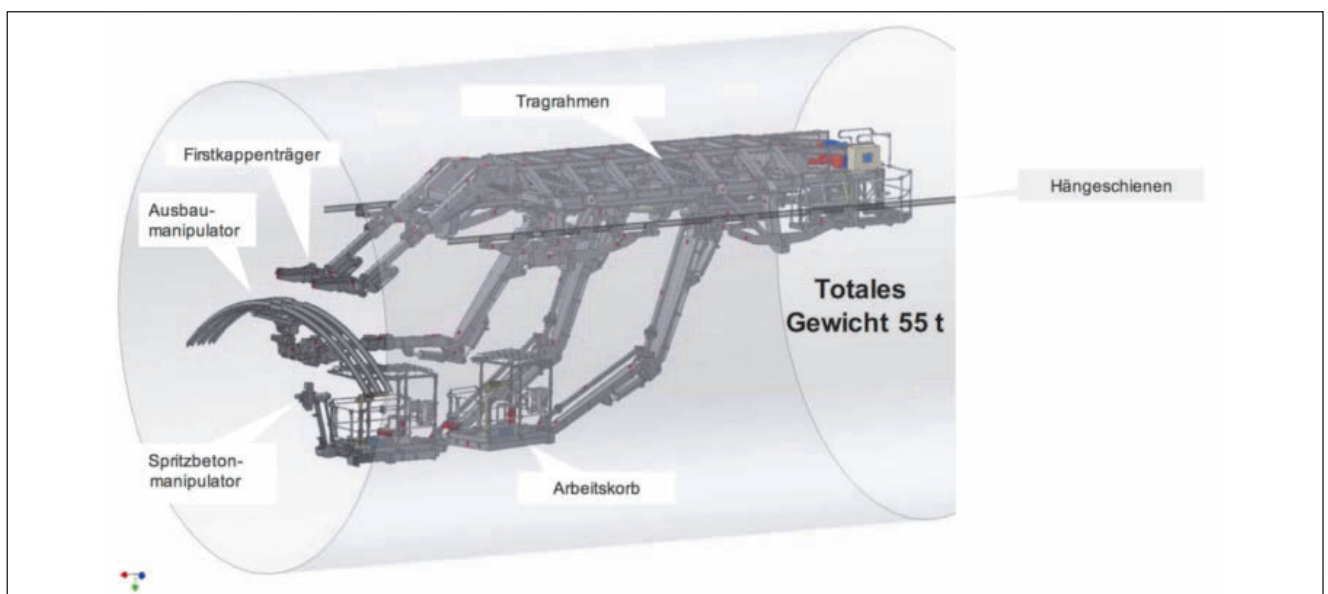


► Bild 10 Vergleich der Normalprofile für bautechnisch günstiges und für druckhaftes Gebirge

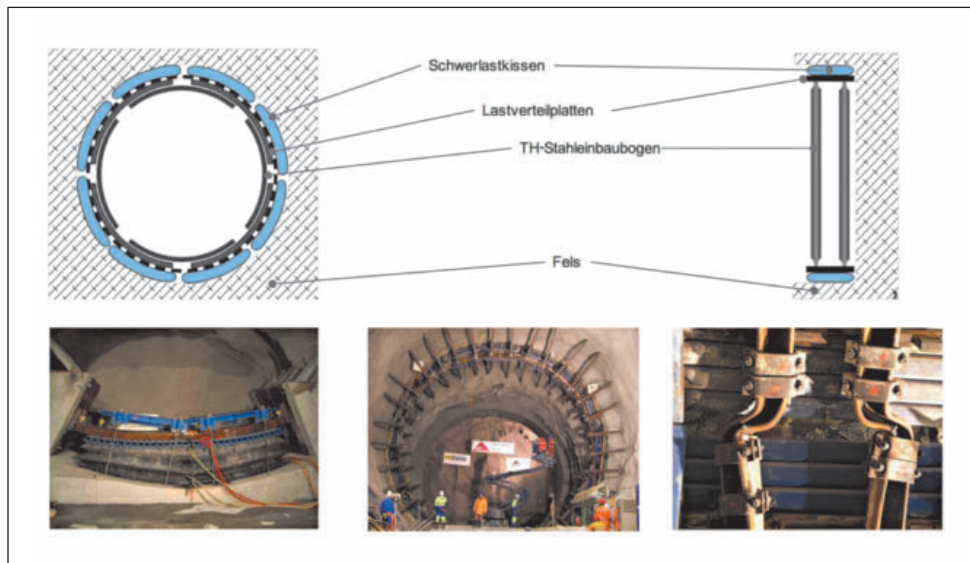
Schlussfolgerung, dass die in früheren Studien angenommene Leistung von 1.8 m/AT (AT = Arbeitstag) [1] mit einer mittleren Vortriebsgeschwindigkeit von ca. 1 m/AT nur knapp zur Hälfte erreicht wird. Eine weitere Reduktion der mittleren Vortriebsleistung auf 0.8 m/AT hätte rund ein Jahr zusätzliche Bauzeit bedeutet. Solche und noch geringere Vortriebsleistungen wurden bei verschiedenen Tunnelbauten in druckhaftem Gebirge auch ausgewiesen [3]. Das Sicherstellen eines leistungsfähigen «industrialisierten» Stahlbogeneinbaus war deshalb eine weitere grundlegende Prämisse für den Nachweis der technischen Machbarkeit der gewählten Lösung.

Dank des in der Arbeitsgruppe Bautechnik breit abgestützten Expertenwissens wurden auch die baubetrieblichen Aspekte entsprechend vertieft analysiert. Zur Beherrschung der stark variablen Gebirgsverhältnisse wurde für die Ausbruchsicherung schliesslich ein Baukastensystem mit einem kleinsten Rastermass von 33 cm definiert (siehe ► Bilder 9a–d).

Nebst dem Wissensaustausch mit Tunnelbaustellen mit ähnlichen Aufgabenstellungen in Italien und Frankreich wurde



► Bild 11 Streckenausbaumaschine gemäss Vorstudien



Quelle: IG GBT Süd

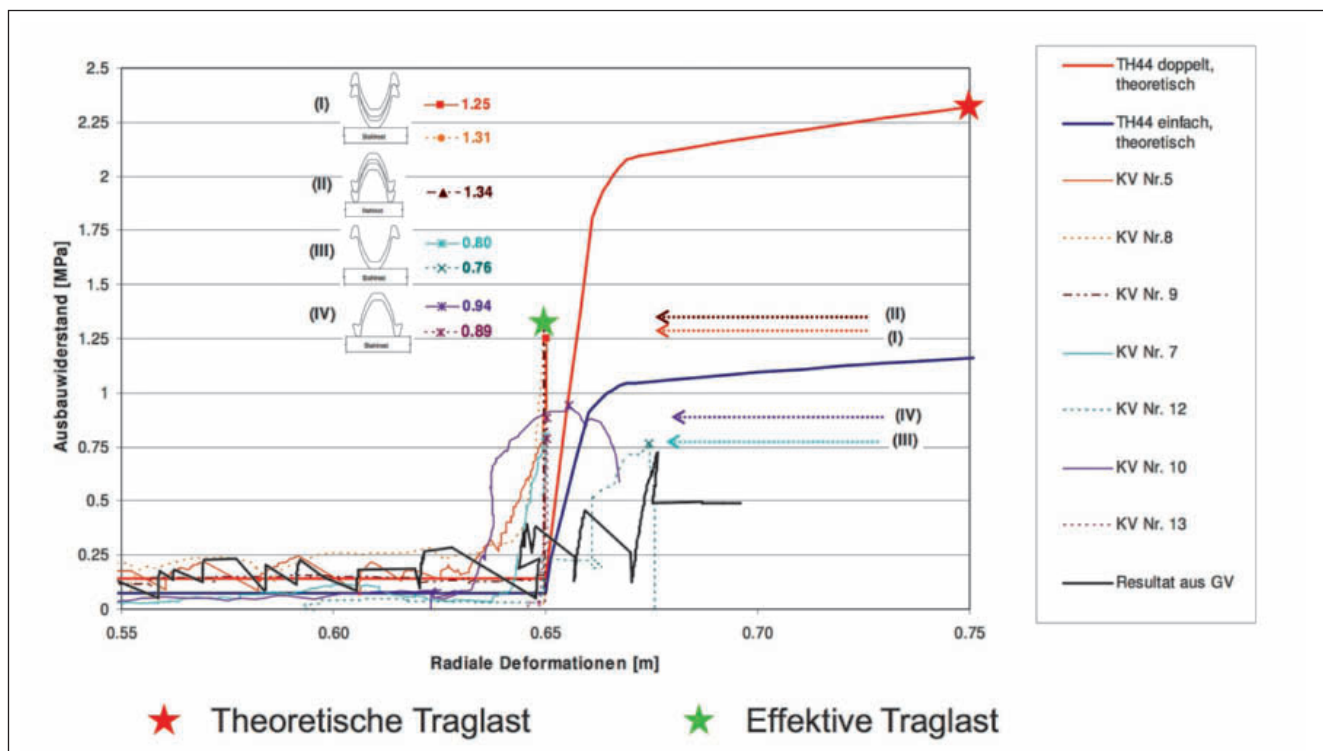
► Bild 12 In-situ-Versuche zum Stahleinbau

insbesondere auch der Wissenstransfer mit dem deutschen Steinkohlebergbau bewusst gepflegt. Besuche in verschiedenen Kohlebergwerken zeigten die Wichtigkeit des Zusammenspiels von Ausbruchssicherung und Gerätepark auf. Der Park an Spezialgeräten aus dem Bergbau war durchaus geeignet, auch im Tunnelbau Verwendung zu finden. Allerdings hatten die Bergbaugeräte wesentlich kleinere Ausbruchquerschnitte zu bedienen. Um keine Risiken einzugehen, wurde vom Projektingenieur vor der Erstellung der Ausschreibungsunterlagen bei einer auf die Entwicklung und Konstruktion von Bergbaugeräten spezialisierten Maschinenfabrik eine Machbarkeits-

studie für eine sogenannte «Streckenausbaumaschine» in Auftrag gegeben. Die Machbarkeit konnte unter Einhaltung der im deutschen Bergbau üblichen hohen Sicherheitsstandards nachgewiesen werden, wenn auch die Maschinenabmessungen alles, was bisher im Bergbau bekannt war, bei weitem sprengten. Die vorgesehene Streckenausbaumaschine erlaubte es, einen grossen Teil der Installationen an Hängeschienen aufzuhängen, um die engen Platzverhältnisse auf der Sohle zu entlasten und

optimal zu nutzen. Damit wurden wesentlich verbesserte Verkehrsflächen geschaffen, welche sich zum einen günstig auf die Vortriebsleistungen auswirkten, zum anderen aber auch insbesondere in Bezug auf die Arbeitssicherheit günstige Verhältnisse schufen.

Die Projektverantwortlichen waren sich bewusst, dass mit der gewählten Lösung Neuland betreten wurde, da auf keine direkten Vorbilder im internationalen Tunnelbau zurückgegriffen werden konnte. Deshalb war ein äusserst umsichtiges Vorgehen angezeigt. So wurde unter anderem beschlossen, das



Quelle: IG GBT Süd

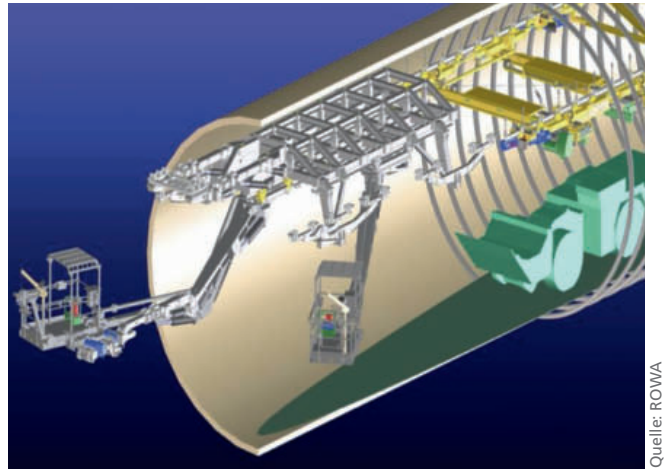
► Bild 13 Resultate der In-situ-Versuche zum Stahleinbau [8, 11]

Verhalten der Stahlbögen bei dem aussergewöhnlich grossen Profil und den grossen Belastungen durch Versuche zu überprüfen. Dabei wurde beschlossen, die Belastungsversuche statt in einer Versuchshalle in situ in einer Felsnische durchzuführen. Mit Wasser gefüllte Schwerlast-Druckkissen dienten dem Erzwngen der Deformationen bzw. der Simulation des Gebirgsdrucks. Die ausgeführte schematische Versuchsanordnung mit einer Radialbelastung von bis zu 3 MPa und einer maximalen Konvergenz von 0.7 m ist in ► **Bild 12** ersichtlich [9, 11].

► **Bild 12** gewährt einen Blick in die Versuchsnische mit 13 m Durchmesser. Der umgebende Fels musste dabei die Reaktion aus der Belastung aufnehmen. Der Versagensmechanismus der Ausbruchsicherung war durch das Ausknicken der Bögen gekennzeichnet.

Die wichtigste Erkenntnis der Versuche bestand darin, dass die Bögen vor dem vollständigen Erschöpfen des Einschubweges bereits ausgeknickt waren, also ihre volle theoretische Tragfähigkeit nicht erreicht hatten. Zum Ausgleich dieses Mangels wurde für den Bedarfsfall das Einbringen zusätzlicher Bögen oder einer tragenden Spritzbetonschale (nach erfolgten Verformungen) in Erwägung gezogen.

Die für den Vortrieb durch das TZM Nord definierte Lösung entstand auf wissenschaftlicher Grundlage, wobei die Erkenntnisse der Tunnelstatik den Beweis der technischen Machbarkeit geliefert haben. Es war hingegen nicht möglich, die Machbarkeit eines auf einem Kalottenvortrieb basierenden Vortriebskonzeptes nachzuweisen, da mit den angenommenen Randbedingungen für die Kalottenfüsse kein Gleichgewicht ermittelt werden konnte. Trotzdem beschloss der Bauherr, in der Angebotsphase auch Kalottenvortriebe zuzulassen. Der Anbieter einer solchen Alternative hätte dabei die entsprechenden felsstatistischen Nachweise liefern müssen. Trotz der Bestrebungen einzelner Anbieter, eine Alternative zu finden, wurden in der Angebotsphase keine vollständigen Unternehmensvarianten eingereicht.



Quelle: ROWA

► **Bild 14** Installationskonzept des Unternehmers

4 BAUAUSFÜHRUNG

Zu Beginn des Jahres 2004 waren die stark druckhaften Gesteine des TZM Nord erreicht. Das Vortriebssystem wurde rasch derart optimiert, dass pro Tag anstelle von 1.00 m konstant ein Zyklus von 1.34 m aufgefahen werden konnte. Diese Leistung wurde auch in den Zonen mit sehr starken Deformationen aufrechterhalten. Zur Erreichung dieser Leistungen setzte der Unternehmer pro Röhre die folgenden Geräte ein:

- » einen Hydraulikbagger mit Spezialausleger, Rotationskopf und Abbauhammer zum Lösen und Abbauen des Gebirges;
- » einen Vortriebsjumbo Tamrock Axera T12, 4-armig, zum Bohren und Versetzen der Ortbrust- und zur Radialankerung;
- » einen knickgelenkten Fahrlader mit 21 t Gesamtgewicht zum Abtransport des Ausbruchmaterials;
- » eine Streckenausbaumaschine GTA mit 56 t Gesamtgewicht, aufgehängt an Hängeschienen, zum Einbringen der Stahlbögen und zum Ablängen der Ortbrustanker;
- » ein Spritzgerät zum Einbringen der Spritzbetonsicherung;
- » einen aufgehängten Flächenkran mit einer Tragkraft von 20 t für den Materialumschlag.



Quelle: ATG

► **Bilder 15a und b** Ausbruch mit sofortiger Versiegelung der Ortbrust (links), Einbau der Ortbrustanker mit dem Jumbo Axera T12 (rechts)



Quelle: ATG

► **Bilder 16a und b** Streckenausbaumaschine im Einsatz (links); Ablängen der Ortbrustanker (rechts)

Der Hängekran und die Streckenausbaumaschine für den Stahleinbau waren Schlüsselgeräte im Vortriebszyklus, die schliesslich eine industrielle Fertigung der Ausbruchsicherung ermöglichten.

Während des Vortriebs wurden die folgenden Erfahrungen gemacht: Der mechanische Abbau des stark kakiritisierten Materials verursachte in der Regel keine Probleme, auch wenn der Ausbruch stellenweise sehr kleinteilig erfolgte (siehe ► **Bild 15a**).

Auch das Einbringen der Stahleinbausegmente und der Selbstbohranker konnte plangemäss erfolgen. Da sich der Unternehmer für den Einbau von Stahlankern zur Ortbrustsicherung entschied (GFK-Anker wären auch zugelassen gewesen), mussten diese jeweils bei jeder Vortriebsrunde abgelängt werden.

► **Bild 16a** zeigt den Einsatz der aufgehängten Streckenausbaumaschine der Firma GTA für den Stahleinbau.

Mit den Durchschlägen am 17. Oktober 2007 in der Weströhre und am 29. November 2007 in der Oströhre zum benachbar-



Quelle: ATG

► **Bild 17** 17. Oktober 2007: Durchschlag in der Weströhre

ten Teilabschnitt Amsteg wurden die Ausbrucharbeiten abgeschlossen.

Die aufgefahrenden mittleren Tagesleistungen pro Monat in den Tunnelröhren Ost und West sind in ► **Bild 18** ersichtlich. Nach einer anfänglichen Lernphase zu Beginn des Jahres 2005 wurden bald kontinuierliche Arbeitszyklen erreicht, die zu annähernd konstanten Vortriebsleistungen führten. Die werkvertraglich vereinbarte durchschnittliche Leistung betrug 1.1 m/AT. Diese wurde mit einem Mittel von 1.04 m/AT beinahe erreicht.

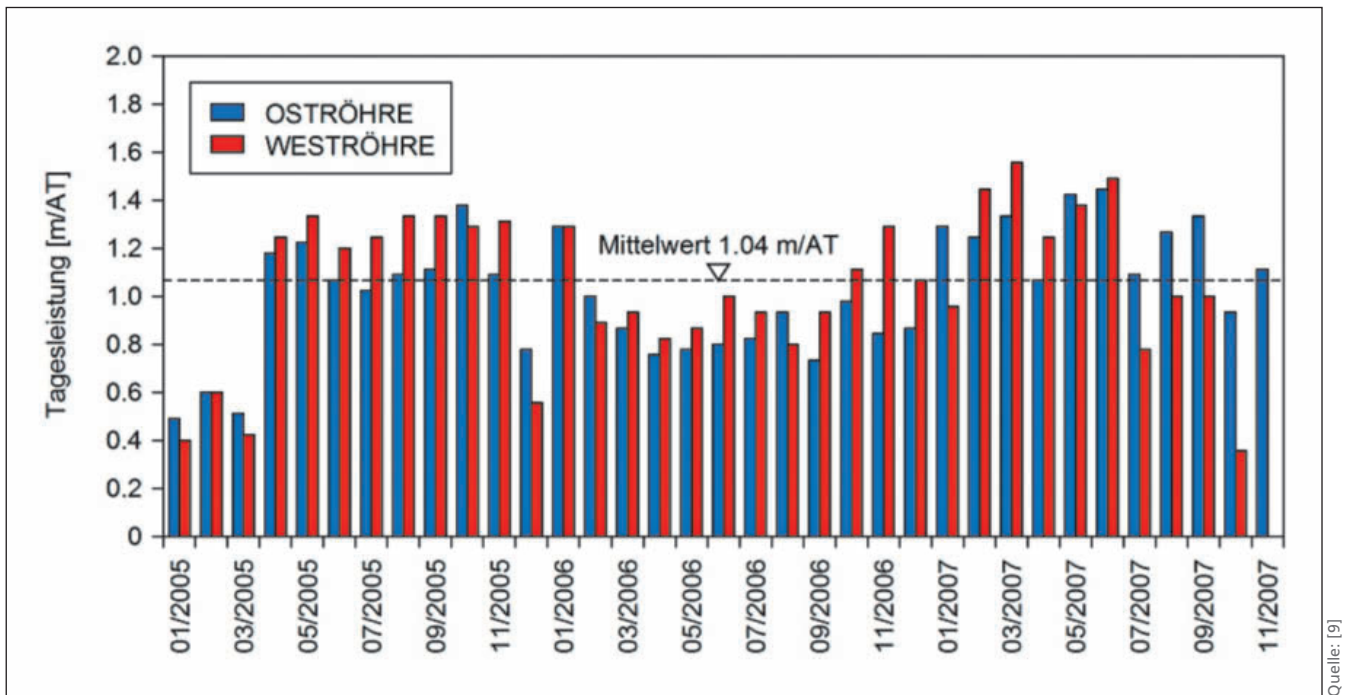
Mit der gewählten Baumethode und dank des günstigeren bautechnischen Verhaltens der Clavaniev-Zone war es trotzdem möglich, die Ausbrucharbeiten mit erheblichem Vorsprung auf das werkvertragliche Bauprogramm und mit geringeren Kosten als vorgesehen abzuschliessen. Teures und in der vertraglichen Regelung vorgesehenes Nachprofilieren konnte trotz Konvergenzen von bis zu 80 cm vermieden werden.

5 BEOBACHTETES BAUGRUNDVERHALTEN

In den druckhaften Zonen betrugen die mittleren radialen Deformationen ca. 30–40 cm, lokal bis zu 80 cm. Wie erwartet, traten die Deformationen nicht symmetrisch, sondern stark asymmetrisch auf. In allen Fällen konnten sie jedoch innerhalb der zulässigen Grenzwerte gestoppt werden.

Die erfolgreiche Vortriebssteuerung hatte die günstige Auswirkung, dass das im Werkvertrag vorgesehene Nachprofilieren nie zum Einsatz kommen musste. Diese Tatsache stellt den verantwortlichen Geologen und Bauleitern ein ausgezeichnetes Zeugnis aus, haben sie doch innerhalb kurzer Zeit den Umgang mit dem Gebirge gelernt und zeitgerecht die richtigen Massnahmen bezüglich Ausbruchdurchmesser und Ausbruchsicherung angeordnet.

Am Beispiel des Tunnelmeters 1'174 in der Weströhre soll das typische beobachtete Bauwerksverhalten illustriert werden.



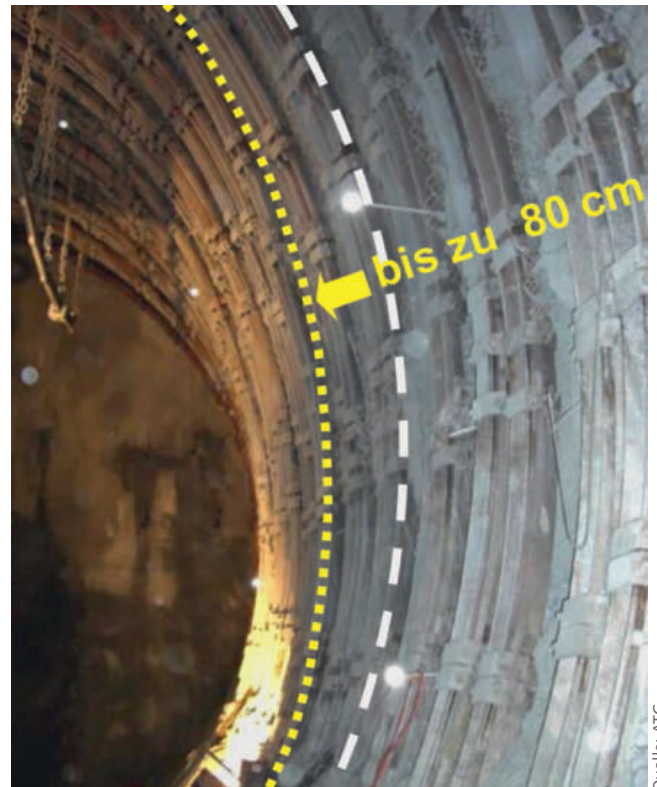
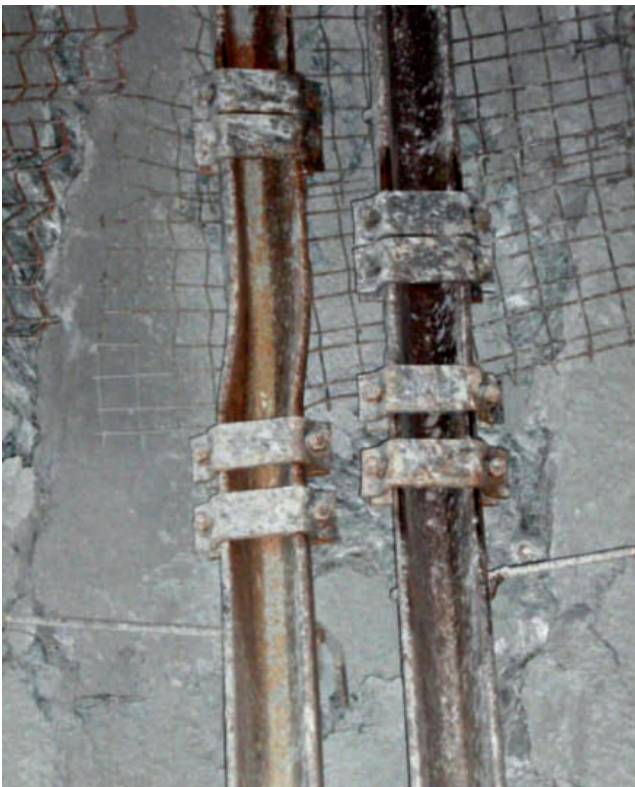
Quelle: [9]

► Bild 18 Mittlere Tagesleistungen pro Monat in den Tunnelröhren Ost und West [9]

Der Mehrausbruch betrug an dieser Stelle 0.7 m. Die Länge der Ortbrustanker betrug 12 m bei einer Überlappung von 6 m. Die Gesamtlänge der eingebauten Radialanker betrug 120 m Anker pro Tunnelmeter und je Tunnelmeter wurde ein TH-Stahleinbaubogen gestellt. Es handelte sich somit um einen verhältnismässig bescheidenen Ausbauwiderstand, aber um ei-

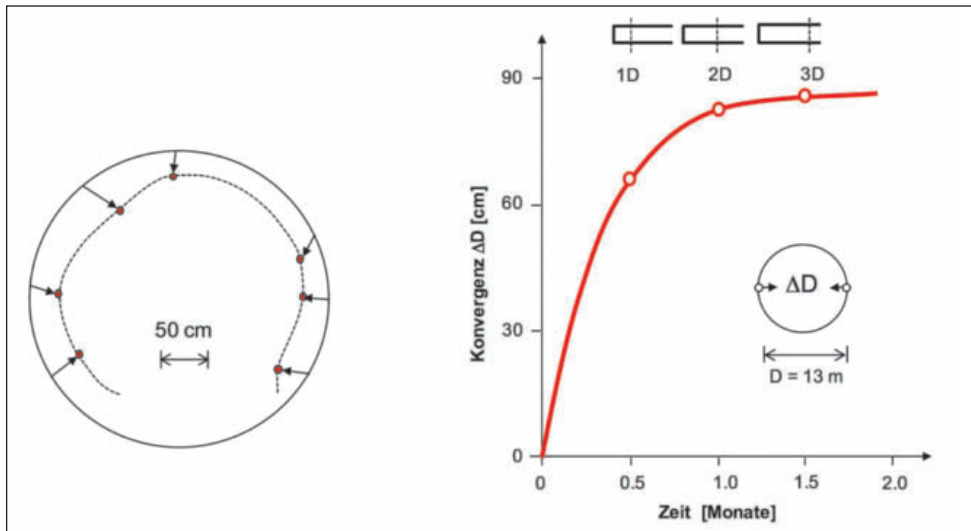
nen grossen Mehrausbruch für die Aufnahme der Gebirgsverformungen.

Bei den annähernd gleichmässig aufgetretenen Konvergenzen wurden radiale Deformationen bis zu 0.75 m gemessen. Bemerkenswert ist der für das gesamte TZM Nord typische



Quelle: ATG

► Bilder 19a und b Verformungen des Stahleinbaus



► Bild 20 Typischer Verformungsverlauf, Tm 1'174

Verlauf der Konvergenz in Funktion des Abstandes von der Ortbrüst. Man sieht, dass in einer Entfernung von einem Tunneldurchmesser über 80 % der Konvergenz stattgefunden haben und damit die in diesem Material befürchteten grösseren Langzeitverformungen ausblieben.

Die Anschlüsse der TH-Bögen zeigten denn auch ein mehr oder weniger regelmässiges Schliessen. Es ist nicht verwunderlich, dass bei solchen Verformungen die Versiegelung durch Spritzbeton je nach der Schichtung und Schieferung örtlich versagt hat. Deshalb

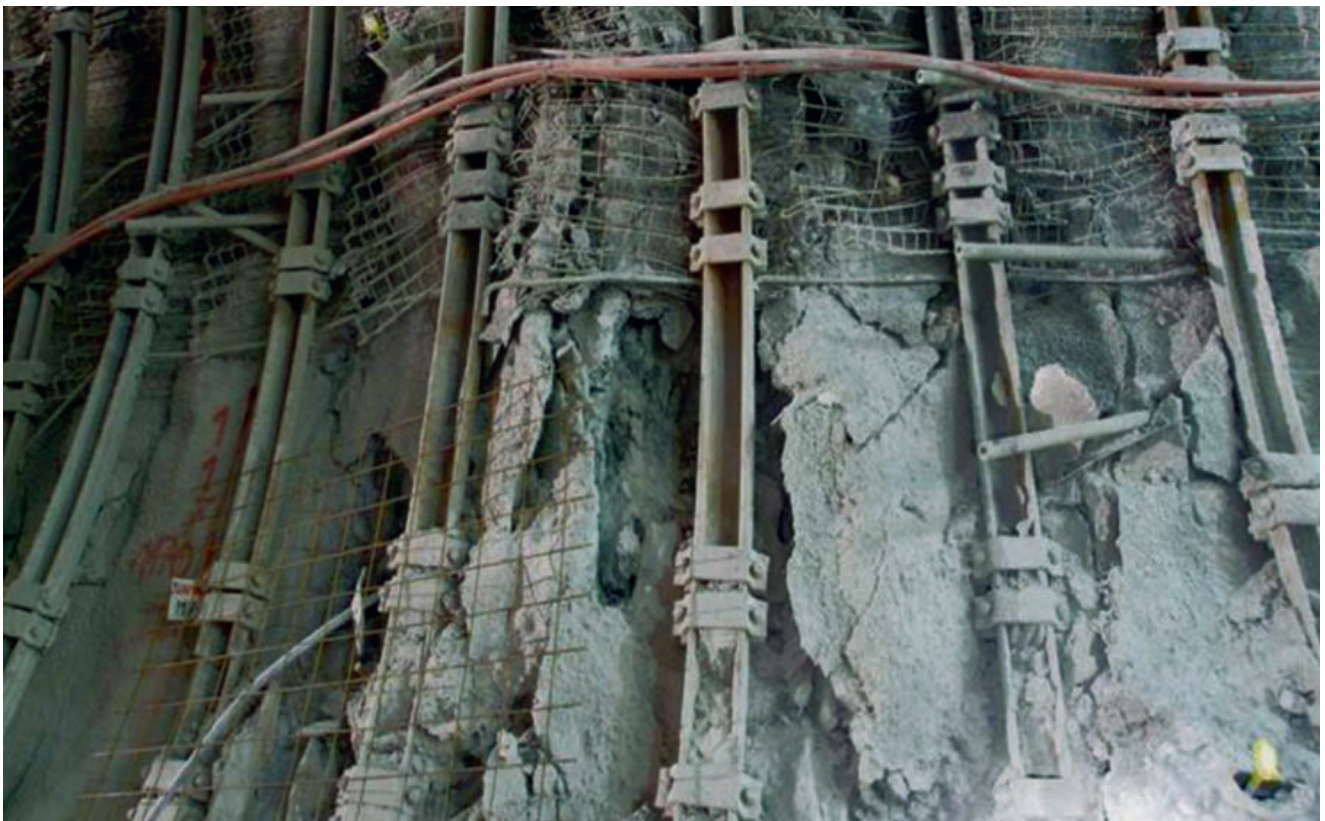
waren spezielle starke Netze (sogenannte Verbundmatten) als Kopfschutz unverzichtbar (siehe ► Bild 21).

Die stark wechselhafte Kakeritisierung des Gebirges und das Vorhandensein fester Gesteinspakete wirkten sich auf das Gesamtbild der Konvergenz entlang der Tunnelachse sehr stark aus. ► Bild 22 zeigt einen ausgewählten Tunnelabschnitt von rund 200 m Länge, für den die Korrelation zwischen dem Grad der Kakeritisierung des Gesteins und der gemessenen Konvergenz dargestellt wurde. Es handelt

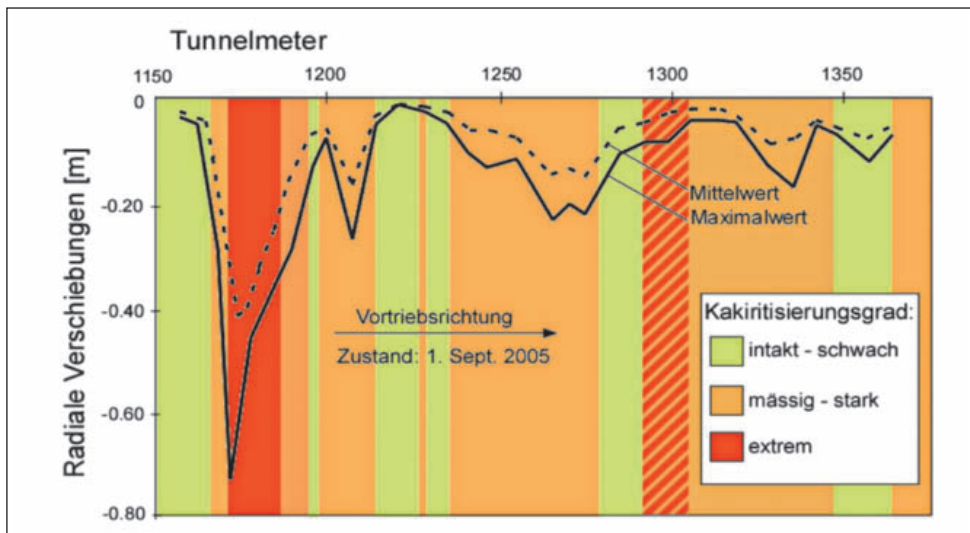
sich hier um den Verlauf der im Tunnelprofil gemittelten Werte und um jenen der Spitzenwerte. Während die mittleren Werte der radialen Konvergenz zwischen 10 cm und 40 cm variierten, ergaben sich im betrachteten Tunnelabschnitt lokale Konvergenzen bis zu 75 cm.

6 SCHLUSSFOLGERUNGEN

Der Tunnelvortrieb im TZM Nord wurde entgegen vielen Befürchtungen seitens verschiedener Experten schliesslich erfolgr-



► Bild 21 Stark verformtes Parament mit Stahl-Verzugsnetzen als Kopfschutz



Quelle: [9]

► Bild 22 Gebirgstragverhalten von Tm 1'150 bis Tm 1'350 [9]

reich durchgeführt und abgeschlossen. Woran lässt sich dieser stipulierte Erfolg messen? Massgebend ist primär sicher die Erfüllung der Qualitäts-, Termin- und Kostenziele. Dazu lässt sich folgende Bilanz ziehen:

- » Das Terminziel wurde erreicht und mit einem um neun Monate früheren Durchschlag dank günstigerer Verhältnisse beim Übergang zum Aarmassiv sogar übertroffen.
- » Die Vortriebsleistungen wiesen trotz stark variabler Baugrundverhältnisse nur geringe Schwankungen auf.
- » Das Kostenziel wurde erreicht. Der Bauherr profitierte dabei für den Vortrieb im TZM Nord sogar vom vertraglich vereinbarten kürzeren Vorhalten der Installationen.
- » Nachprofilierungen wurden auf den insgesamt 2 km langen Tunnelvortrieben in druckhaftem Gebirge nirgends notwendig.
- » Trotz schwierigster Baugrundverhältnisse blieben die Nordvortriebe Sedrun von schweren Unfällen verschont.

Die folgenden Faktoren machten diesen Erfolg überhaupt möglich:

1. Als primärer Erfolgsfaktor ist das in sich konsistente tunnelstatische Konzept zu nennen.
2. Von grösster Bedeutung ist aber auch die Tatsache, dass sich der Unternehmer der Herausforderung einer völlig neuen Baumethode stellte. Mit einem hohen Grad an Mechanisierung stellte er kontinuierliche Leistungen sicher.
3. Die Projektgeologen lieferten aufgrund systematischer Voraussondierungen und der laufenden Beobachtung und Interpretation des aktuellen Baugrundverhaltens stets zutreffende, praxisgerechte Prognosen des künftigen Baugrundverhaltens.
4. Die Begleitung des Ingenieurs, die von ihm definierten differenzierten Gefährdungsbilder, das ausgewogene Messwesen sowie die Bauleitung und die Expertenunterstützung trugen auf ihre Weise zum Erfolg bei.

Ein wesentliches Element, welches zum Erfolg im Nordvortrieb Sedrun geführt hat, dürfte aber auch die Tatsache sein,

dass es gelungen ist, in einem langjährigen Prozess eine den örtlichen Verhältnissen angemessene Baumethode zu entwickeln, die von allen Projektbeteiligten (Projektingenieure, Geologen, örtliche Bauleitung, Kader und Mitarbeiter des Unternehmers, Bauherr und Experten) immer mitgetragen und optimal umgesetzt wurde. Allfällige Diskussionen über die Vergütung blockierten zu keinem Zeitpunkt die anstehenden technischen Entscheide.

In diesem Sinne darf die Überwindung der druckhaften Strecke im TZM Nord auch als Muster für eine vor Ort gelebte partnerschaftliche Zusammenarbeit bei einer aussergewöhnlich schwierigen Aufgabe gelten. +

Literatur

- [1] Schweizerische Eidgenossenschaft: Wintersichere Strassenverbindung durch den Gotthard, 1963
- [2] Rutschmann, W.: Neue Eisenbahn-Alpentransversale Gotthard-Basislinie, Von ersten Studien zum Bauprojekt 1975, SBB Historic, 2004
- [3] Kovári, K.; Staus, J.: AlpTransit Schlüsselproblem – Tunnelbau in druckhaftem Gebirge – Falldarstellungen
- [4] Schneider, T.: Gotthard-Basistunnel: Neue geologische Erkenntnisse im Bereich des Tavetscher Zwischenmassivs und der Piora-Mulde, 1997
- [5] Kovári, K.: Tunnelbau in druckhaftem Gebirge, Tunnel 5/98; Bauverlag Gütersloh, München, 1998
- [6] Lunardi, P.: Storia del collegamento ferroviario tra Bologna e Firenze. Gallerie e grandi opere sotterranee, No. 54, 1998
- [7] Ehrbar, H.; Pfenninger, I.: Umsetzung der Geologie in technische Massnahmen im Tavetscher Zwischenmassiv Nord, Tagungsband GEAT 99, ETH Zürich, Balkema, Rotterdam, 1999
- [8] Ehrbar, H.: Bewältigung druckhafter Zonen, Tagungsband AlpTransit-Tagung 2004, SIA-Dokumentation 0202
- [9] Kovári, K.; Ehrbar, H.: Die druckhaften Strecken im TZM Nord – Projektierung und Realisierung, Tagungsband Swiss Tunnel Congress 2008, SIA-Dokumentation 0229
- [10] Ehrbar, H.; Kovári, K.: Der Vortrieb im druckhaften Gebirge, Ein Jahrhundertbauwerk entsteht, AlpTransit Gotthard AG, 2010
- [11] Theiler, A.; Beeler, P.; Baumann-Heidenreich, B.: Gotthard Base Tunnel, sector Sedrun – real scale testing of gliding steel ring beams, 2013