

Zeitschrift: Schweizer Ingenieur und Architekt
Herausgeber: Verlags-AG der akademischen technischen Vereine
Band: 112 (1994)
Heft: 44

Artikel: TBM-Vortrieb im Zugwald-Tunnel
Autor: Schmid, Hans Christian / Röthlisberger, Bruno / Krebs, Walter
DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-78549>

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: 14.01.2026

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

Die ersten Anzeichen von Bergwasser im Lockermaterial wurden während dem Erstellen der sechsten Jetting-Etappe festgestellt. Dabei wurde während dem Bohren Wasser angefahren, welches sich durch das Bohrloch seinen Weg bahnte und an der Ortsbrust austrat.

Nach Fertigstellung des Jet-Gewölbes wurden deshalb durch die armierte und gunitierte Brust PU-Injektionen vorgenommen, um beim Abbruch der Spritzbetonwand ein unkontrolliertes Nachrutschen der Ortsbrust zu verhindern. Die Injektionstiefe betrug dabei 3 m.

Diese Massnahme der Ortsbruststabilisierung erwies sich als absolut notwendig. Mit diesen Injektionen wurde auch in den weiteren wasserführenden Zonen ein sicherer Vortrieb gewährleistet. Unterstützt wurde diese Massnahme mit regelmässig angebrachten Entlastungsbohrungen, um einen eventuellen Druckanstieg durch sich anstauen des Bergwasser zu vermeiden.

Verbindung des unvollständigen Jetting-Gewölbes

Trotz der sehr guten Arbeit des Jetting-Unternehmers konnte in schwierigen geologischen Zonen teilweise kein durchgehendes Gewölbe hergestellt werden. Die Gründe hierfür waren:

- Auswaschen der Jetsäulen infolge Bergwasser
- nicht Erreichen des erforderlichen Durchmessers der Säule infolge wechselhafter Geologie
- Abweichen der Bohrrichtung infolge starkem Blockanteil im Profil.

Ein nicht geschlossenes Jetgewölbe konnte bei den Vortriebsarbeiten meist erst dann festgestellt werden, wenn die Säulen bereits freigelegt waren. Die einmetrigen Vortriebsarbeiten wurden deshalb generell von Bauführung und Bauleitung begleitet. So konnten bei plötzlich auftretenden Problemen sofort die notwendigen Massnahmen getroffen werden. Dem Firstbereich wurde dabei besondere Beachtung geschenkt, da mit jedem Tunnelmeter die Überdeckung stark zunahm.

Bei vorhandenen Lücken im Jetgewölbe wurde das PU-Material mit kurzen Lanzen direkt in den offenen Bereich injiziert, wodurch ein Gewölbeverbund wiederhergestellt werden konnte.

Gebirgsstabilisierung im Firstbereich

In den geologischen Zonen mit hohem Blockanteil war die Herstellung eines geschlossenen Jetgewölbes technisch nicht ausführbar. Die in den Profilbereich hineinragenden Blöcke stellten somit eine erhöhte Einbruchgefahr dar. Beim Anfahren einer solchen Situation wurde das dahinterliegende Lockermaterial mit einem Schutzschild aus PU-Material verfestigt. Anschliessend konnte der Block bis an den Profilrand schonend abgebaut werden. Ein sprengtechnischer Abbau der Blöcke konnte nicht verantwortet werden, da ein Versagen der unarmierten Jetpfähle oder der gunitierten Ortsbrust unter allen Umständen zu vermeiden war (Bild 7).

Bauzeiten und Belegschaft

Durch die Nähe des Bauloses T1 a zum Kurort Klosters waren die Arbeitszei-

Beteiligte Firmen

Projekt und Bauleitung:
Amberg Ingenieurbüro AG, Chur

Ausführung:
Arge Selfranga Klosters, bestehend aus:
Walo Bertschinger AG,
Kopp AG
Schafir und Mugglin AG
H.R. Schmalz AG
Theiler + Kalbermatter AG

Jetting:
GU Tiefbau AG

ten auf die Zeit zwischen 06.00–24.00 Uhr eingeschränkt. Die Jettingarbeiten und der Kalottenvortrieb wurden daher im Zweischichtbetrieb ausgeführt. Der Strossabbau hingegen konnte im Einschichtbetrieb bewältigt werden. Der Personaleinsatz variierte je nach Arbeitsvorgang und lag zwischen 14 und 18 Mann.

Im Durchschnitt wurden sieben Arbeitstage für das Horizontaljetting und zwei Arbeitstage für das Vertikaljetting benötigt. Die Vortriebsleistungen für eine Kalottenetappe waren stark abhängig von den angetroffenen geologischen Verhältnissen. Je nach Aufwand der Ausbruchs- und Sicherungsmaßnahmen lagen die erreichten Leistungen zwischen fünf und zwölf Arbeitstagen pro Etappe. Die Vortriebsleistungen beim Strossabbau lagen nicht auf dem kritischen Weg und variierten zwischen zwei bis vier m/Arbeitstag.

Adressen der Verfasser: *F. Amberg*, dipl. Ing. ETH/SIA, Amberg Ingenieurbüro AG, Trockenloostrasse 21, 8105 Regensdorf. *W. Schmid*, dipl. Ing. HTL, Amberg Ingenieurbüro AG, Ringstrasse 18, 7007 Chur. *A. Weidinger*, dipl. Bauing., ARGE Vereinatunnel Nord, 7250 Klosters

TBM-Vortrieb im Zugwald-Tunnel

Der Zugwald-Tunnel durchquert die Ostflanke des Gotschnahanges. Diese ist durchgehend von der sogenannten Gotschnarutschmasse überdeckt, welche vor allem aus Moräne, Hangschutt und Bergsturzmaterial besteht. Ihre Mächtigkeit beträgt bis 200 m, und es war deshalb nicht möglich, den Zugwald-Tunnel an einem Felsportal anzusetzen. Aus diesem Grund wurden die beiden Portalstrecken vorab im Rahmen eines separaten Bauloses (Baulos T1) erstellt.

Das Baulos T 1 umfasst die folgenden Tunnelabschnitte:

- ab Portal Klosters: 240 m Tunnel im Lockermaterial, 30 m Tunnel im Fels und den Ausbruch der 30 m langen Montagekaverne für die Tunnelbohr-

maschine (TBM) sowie der 10 m langen Startröhre für den mechanischen Vortrieb

- ab Portal Stützbach: 110 m Tunnel im Lockermaterial und 25 m Tunnel im Fels

Die obenerwähnten Arbeiten wurden Mitte 1991 in Angriff genommen und Ende 1993 fristgerecht abgeschlossen.

VON HANS CHRISTIAN SCHMID, SARGANS, BRUNO RÖTHLISBERGER, CHUR, WALTER KREBS, BASSERSDORF

Projekt

Baulos mechanischer Vortrieb Zugwald-Tunnel

Die mechanisch aufgefahrene Felsstrecke des Zugwald-Tunnels (Baulos

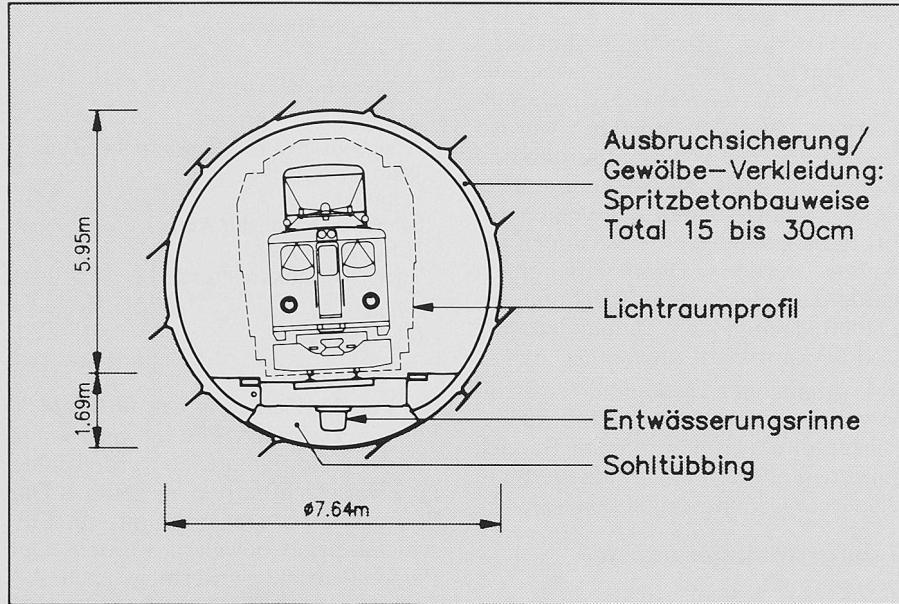


Bild 1. Normalprofil des Zugwaldtunnels (Baulos T4a)

T4a) ist 1635 m lang. Sie beginnt 310 m nach dem Portal Klosters und endet 135 m vor dem Portal Stützbach. Der Tunnel wird von Klosters aus Richtung Stützbach vorgetrieben. Der Vortrieb ist vier Prozent steigend, und der Tunnel beschreibt praktisch auf der ganzen Länge des mechanischen Vortriebs eine Linkskurve mit $R = 525$ m.

Geologie

Der Tunnel durchfährt gemäss der geologischen Prognose von unten nach oben Prättigauer Flysch, Falknis- und Sulzfluh-Decken sowie die basale Aroser Schuppenzone. Die drei letztgenannten Einheiten liegen in einer Wechsellagerung vor. Die Abfolge und Mächtigkeit der einzelnen Pakete ist nicht zuverlässig bekannt.

Schichtung und Schieferung sind meist flachliegend. Man erwartet eine engständige Klüftung. Es sind zwei steilstehende Bruchsysteme und zwei bis drei flachliegende Deckengrenzen mit vermuteter Grossüberschiebung prognostiziert. Letztere sind von mehrere Meter mächtigen Kakiritzonen begleitet. Generell wird wenig Bergwasser erwartet, grössere Wassereintritte sind nur entlang von spröd verformten Bruchstellen und Deckengrenzen zu erwarten.

Wahl der Vortriebsmethode

Damit die Baustellentransporte möglichst umweltschonend ausgeführt werden können, wird von der RhB im Bereich des späteren Autoverladebahnhofs Klosters-Selfranga ein Baubahnhof eingerichtet. Der Zugwald-Tunnel muss deshalb in möglichst kurzer Bauzeit erstellt werden, damit er während der Hauptbauzeit des Vereinatunnels

als Zubringer für Baumaterial und für den Abtransport von überschüssigem Ausbruchmaterial zur Verfügung steht. Dies ist einer der Gründe, weshalb von den Projektverfassern ein Vortrieb mittels TBM vorgeschlagen wurde, aber nicht der einzige: Die erwarteten Gebirgsverhältnisse sind eher schwierig, und der Ausgangspunkt für einen Tunnelbau mitten im Kurort Klosters ist relativ heikel. Der mechanische Vortrieb mit einer TBM ist im Vergleich zu anderen Vortriebsverfahren gebirgsschonend, emissionsarm und schnell. Der mechanische Vortrieb drängte sich auch deshalb auf, weil er vom bauprogrammlichen Ablauf her mit der gleichen TBM ausgeführt werden kann, welche nachfolgend den Vereinatunnel auffahren wird.

Tunnel-Normalprofil

Der Bohrdurchmesser und damit die Grösse des Tunnel-Normalprofils wurden aufgrund des vorgegebenen Bahnlichtraumprofils, des vereinbarten technischen Spielraums, der maximal nötigen Dicke der Sicherungs- und Ausbaumassnahmen sowie der vom Projektverfasser als zulässig erachteten maximalen Deformation des Hohlraumes ermittelt. Zusätzlich wurden die Ungenauigkeiten der Vermessung und der Bauausführung mitberücksichtigt.

Für den Zugwald- und Vereinatunnel wird, die gleiche Tunnelbohrmaschine eingesetzt. Der Bohrdurchmesser der TBM wurde aufgrund der Anforderungen des Vereinatunnels festgelegt, weil dort höhere Felsüberdeckungen und grössere Deformationen und Ausbaustärken erwartet werden.

Das Normalprofil des Zugwald-Tunnels weist einen nominellen Bohrdurchmes-

ser von 7,64 m auf. Als Ausbaukonzept wurde die einschalige Spritzbetonbauweise gewählt. Die maximal vorgesehene Verkleidungsdicke für Sicherung und Ausbau beträgt 35 cm ringsum. Zur engsten Stelle des Bahnlichtraumprofils verbleibt ein Lichtmass von 23 cm für die Aufnahme von Deformationen und Ungenauigkeiten sowie für allfällige spätere Verstärkungen. Zwischen der Tübbing-Oberseite und der Unterseite des Schotterbettes sind weitere 12 cm Toleranz für bauliche und andere Ungenauigkeiten eingeplant. Das Tunnel-Normalprofil ist auf Bild 1 dargestellt.

Ausbruchssicherung und Sohlenausbau

Die Ausbruchssicherung wird gemäss den Grundsätzen der einschaligen Bauweise bei der Bemessung des Gesamtausbaus als permanent wirksam in Rechnung gestellt. Es werden demzufolge nur qualitativ hochwertige Sicherungsmittel wie vollhaftende GFK-Felsanker, Bewehrungsnetze und Spritzbeton mit besonderen Eigenschaften (B 40/30, wasserdicht und frostbeständig) eingesetzt. Wo sofort wirksame Unterstützung nötig ist, werden Stahlbögen aus TH-Profilen in Verbindung mit Bewehrungsnetzen und Spritzbeton verwendet.

Der Ausbau der Sohle erfolgt mit 1,60 m langen vorfabrizierten Tübbings mit integrierter Entwässerungsrinne. Letztere wird mit Beton-Fertigelementen abgedeckt. Der Sohltübbing wird in der projektmässigen Lage versetzt und anschliessend mit Fliessmörtel untergossen.

Abdichtung, Entwässerung und Gewölbeverkleidung

Konzentrierte Wassereintritte werden mittels flexiblen Drainagerinnen gefasst, und der im Sohltübbing integrierten Mittelrinne zugeleitet. Eine eigentliche Abdichtung des Gewölbes ist nicht vorgesehen. Das verlangte tropffreie Tunnelgewölbe wird durch die Drains und durch wasserdichten, zumeist netzbewehrten Spritzbeton hergestellt.

Die definitive Gewölbeverkleidung wird durch die Ergänzung der Ausbruchssicherung erstellt. Diese beinhaltet zumeist leichte Bewehrungsnetze und 8 bis 12 cm wasserdichten und frostbeständigen Spritzbeton B 40/30. Bei Bedarf können zusätzliche Massnahmen wie GFK-Injektionsanker usw. eingesetzt werden.

Sulfatbeständiger Beton und Spritzbeton

Es wurde erwartet, und es hat sich mittlerweile auch bestätigt, dass das Berg-

wasser am Zugwald-Tunnel stark sulfathaltig und damit betonaggressiv ist (Sulfatgehalte bis 2500 mg/l). Dies, aber auch das gewählte einschalige Ausbaukonzept, erfordern für die Gewährleistung der Dauerhaftigkeit des Betons beziehungsweise Spritzbetons besondere Massnahmen. Einerseits wird sulfatbeständiger Zement eingesetzt und andererseits wurden bezüglich der Wasserdichtigkeit hohe Anforderungen gestellt. So sind für den Sohlträger und für den Spritzbeton maximal zulässige W/Z-Werte von 0.42 beziehungsweise 0.50 festgelegt worden. Dies führt in der Praxis zu maximalen Wassereindringtiefen von 15 bis 30 mm nach DIN 1048. Die Dichtigkeit wird systematisch nachgeprüft. Die hohen Anforderungen wurden bislang größtenteils mit Reserve erfüllt. Die Dauerhaftigkeit kann damit als gesichert angesehen werden.

Bauaufschreibung und Kostenkontrolle

Als «Bauaufschreibung» wird hier das planliche Festhalten aller im Tunnel eingesetzten Sicherungs- und Ausbaumittel, aber auch von grösseren Wassereintritten, geologischem Überprofil, Gebirgsseigenschaften, Penetration bei definierten Bedingungen und anderen Merkmalen und Besonderheiten verstanden. Sie wird der Bauherrschaft am Bauende als Bestandteil der Dokumentation des ausgeführten Werkes abgegeben. Die Bauaufschreibung wird aber auch als Grundlage für die Abrechnung benötigt, beispielsweise für die Ermittlung der Ausbruch-, Bohr- und Verschleissklassen. Am Vereintunnel werden die entsprechenden Pläne von der örtlichen Bauleitung mittels CAD direkt auf der Baustelle erstellt.

Eine grosse Bedeutung hat auch die laufende, baubegleitende Kostenkontrolle. Für den Vereintunnel wurden deshalb vom Projektverfasser als Hilfsmittel für die oberste Leitung der Arbeiten umfassende Mechanismen für eine effiziente Kostenkontrolle vorbereitet. Eines der Elemente ist die wöchentliche Ermittlung der Vortriebskosten auf allen Baulosen. Diese wird von der Bauleitung erstellt, und auch hiefür werden die Informationen der Bauaufschreibung verwendet. Für weitere Details zur Kostenkontrolle wird auf den Artikel «Qualitätssicherung» verwiesen.

Örtliche Randbedingungen

Baustelleneinrichtungen

Als Installationsplatz konnte bauseitig lediglich der hinterste Teil des Parkplatzes der Gotschnabahn, das heißt eine Fläche von 1500 m² respektive ein

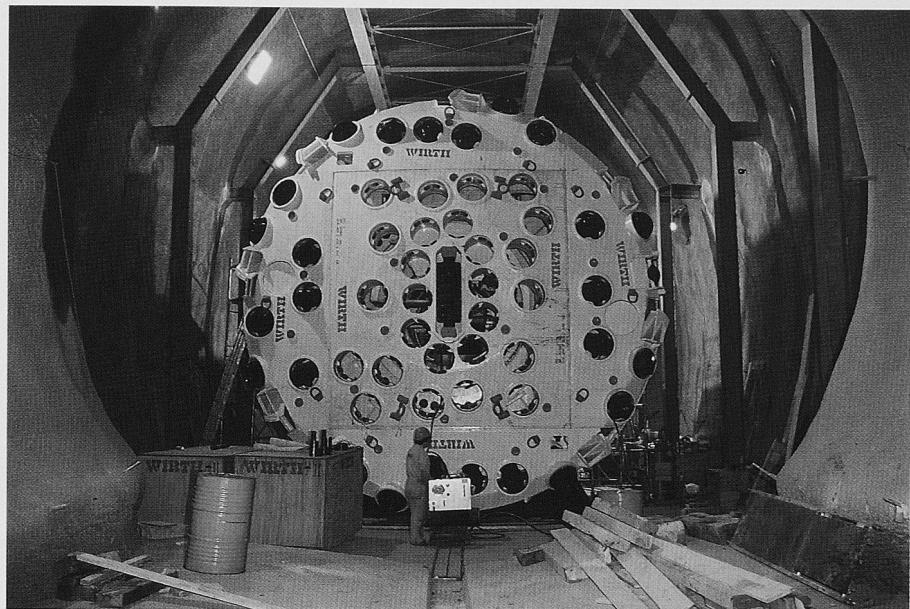


Bild 2. TBM-Bohrkopf in der Montagekaverne

Rechteck von 100 m Länge und 15 m Breite zur Verfügung gestellt werden. Auf dieser Fläche befinden sich eine Betonanlage mit einem 750 l Zwangsmischer, 2 Kiesumschlagsilos à 60 m³, 2 Zementsilos à 50 t, 1 Portalkran primär für den Tübbingumschlag sowie eine Werkstatt. Auf der gleichen Fläche müssen zudem sämtliche bahntransportierten Baumaterialien für das Baulos T2 umgeschlagen werden. Der Voreinschnitt des Zugwald-Tunnels ist ausgefüllt mit den beiden Umschlagsilos für das Ausbruchmaterial und mit 3 Materialcontainern. Er kann zu Fuss und über das RhB-Geleise erreicht werden.

Die Betonanlage sowie die Kiesumschlagsilos und Zementsilos konnten mit vertraglich geregelten Positionen von der vorherigen Arbeitsgemeinschaft übernommen werden. Sie werden erst nach Abschluss des Bauloses T2 abgebrochen. Wie im Planauflageverfahren vorgeschrieben und auch in den Werkverträgen festgehalten, müssen sämtliche Baumaterialien per Bahn zugeführt und somit auch auf diesem Areal umgeschlagen werden. Für diese Umschlagsarbeiten stehen im Bahnhof Klosters zwei Rangiergleise zur Verfügung.

Bis zur Inbetriebnahme des Zugwald-Tunnels für den Baubetrieb werden die Baumaterialien per Lastwagen vom Bahnhof Klosters nach Salfanga transportiert.

Abtransport des Ausbruchmaterials

Die Plangenehmigung von 1987 beinhaltete die Auflage, das Ausbruchmaterial aus dem Zugwald-Tunnel (rund 140 000 m³ lose) mit der RhB nach Untervaz in eine Enddeponie zu führen.

Gemäss Ausschreibung bestand die Absicht, mit RhB-Blockzügen in den Tunnel einzufahren und das Ausbruchmaterial während dem Fräsen bei der Übergabestelle unter der Nachlaufkonstruktion abzuholen. Die Blockzüge hätten sich in den Fahrplan der RhB einbinden müssen, weil die Zufahrt zum Zugwald-Tunnel nur durch Überqueren der bestehenden RhB-Linie Klosters-Davos möglich ist.

Nach der detaillierten Analyse des Ablaufs und der Berechnung der erforderlichen Bahntransporte für Ausbruch, Tübbings, Spritzbeton usw. und nach der Analyse des Fahrplans und der verfügbaren Zugspausen kamen RhB, Unternehmung und Bauleitung zum Schluss, dass dies zu unlösbarer Fiktionen oder zu unakzeptablen Leistungsbeschränkungen für die Unternehmung führen würde. Diese Erkenntnis führte zur Überprüfung des Transportkonzeptes, und schliesslich zur heutigen Lösung für den Abtransport des Ausbruchmaterials. Dieses wird nun mit einem längslaufenden Förderband – dem sogenannten Streckenband – von der Übergabestelle im Tunnel bis zum Portal transportiert. Dort wird es von einem Elevator übernommen, welcher es in die zwei Umschlagsilos im Voreinschnitt bringt. Die Silos haben ein Volumen von 800 m³, was einem Vortrieb von 8 m Tunnel entspricht. Die RhB kann das Ausbruchmaterial bei dieser Lösung praktisch ohne Beeinträchtigung des übrigen Bahnverkehrs abholen, und die tägliche Transportkapazität ist mindestens doppelt so hoch wie bei der ursprünglichen Variante.

Nach Abschluss der ersten Hälfte des Vortriebes im Zugwald-Tunnel darf die

gewählte Variante mit Förderband und Silobunkerung als die einzige richtige beurteilt werden.

Störung ab Tm 511

Am 3. März 1994 wurde im Vortriebsbereich eine seismische Vorauserkundung (TSP) ausgeführt. Diese lokalisierte im Vorfeld der Tunnelbohrmaschine ausgeprägte Wechsel von weichen und harten Gesteinsschichten. Der Vortrieb wurde deshalb mit besonderer Umsicht und Sorgfalt weitergeführt. Bei Tm 511 fiel der Anpressdruck des Bohrkopfes plötzlich ab und auf dem Förderband fanden sich teilweise gerundete Steine und Blöcke von bis zu 50 cm Durchmesser. Der Vortrieb wurde sofort eingestellt und der Bohrkopf zur Inspektion der Verhältnisse an der Vortriebsbrust etwas zurückgezogen. Die Begehung des Bohrkopfes bestätigte den Verdacht, dass man eine mit Lockermaterial gefüllte Störung angefahren hatte. Die aufgefahrene Strecke wurde vom Bohrkopf aus mit schnellhärrendem Spritzmörtel gesichert.

Das vorausliegende Lockermaterial wurde danach mit PU-Injektionen ver-

festigt. Zur genaueren Erkundung der Baugrundverhältnisse wurden zwei Voraus-Sondierbohrungen ausgeführt. Die 15 und 25 m langen Kernbohrungen zeigten Lockermaterial mit eingebetteten brekziösen Dolomiten, gerundete Kalksteine aber auch kristallines Geröll auf.

Im Firstbereich des Tunnels wurden aus dem Bereich hinter dem Bohrkopf mit der fest installierten längsverschiebbaren Sondierbohrausrüstung Injektionslanzen von 8 - 14 m Länge vorgetrieben. Das Lockermaterial wurde mit PU-Injektionsharz verfestigt. Im Schutze dieses Injektionsschirmes erfolgte dann der Gebirgsabbau mit kleinem Anpressdruck und kleiner Drehzahl des Bohrkopfes so schonend als möglich. Es wurde jeweils ein halber Hub, das heißt eine Länge von 80 cm, aufgefahren. Dann wurde der Bohrkopf zurückgezogen, und aus dem Bohrkopf wurde das anstehende Gebirge beziehungsweise Lockermaterial mittels Spritzmörtel abgedeckt. Hinter dem Bohrkopf erfolgte die Sicherung mittels Spritzmörtel, TH-Stahlprofilen 36/58 im Abstand von 80 cm und Armierungsnetzen. Ab Tm 550 konnte auf die

zeitaufwendigen vorauselenden Injektionsschirme verzichtet werden.

Ab Tm 630 wurde der stark tektonisierte, fein gefältelte Flysch zunehmend ton- und lehmhaltiger. Dies führte dazu, dass der 400 Tonnen schwere Bohrkopf vorübergehend unter die Sollkote absackte. Dank dem vertikal verstellbaren Fusssegment des Bohrkopfmantels war es möglich, den Bohrkopf anzuheben und wieder in die Sollage zu bringen. Der zwischen Tm 630 und Tm 700 aufgefahrene Flyschschiefer erwies sich zudem als sehr druckhaft. Der weiche Tonschiefer presste sich zwischen den hinter dem Bohrkopf eingebauten TH-Profilen in den Hohlraum hinein. Es wurden deshalb nach einer gewissen Zeit Einschubbremsen in die Bogensegmente eingebaut. Diese lassen ab 50 t Druck pro Bogen, das heißt kurz vor dem Ausbeulen des Profils, ein Einschieben der einzelnen Bogensegmente zu. Diese Massnahmen und andere Hilfsmittel haben dazu beigetragen, dass die Konvergenzen innerhalb von zwei Monaten abgeklungen sind.

Für die Durchörterung der 160 m langen Störzone wurden im Zweischichtbetrieb vier Monate benötigt. Die mitt-

Felsklasse	direkt hinter dem Bohrkopfmantel der TBM	im L1* Brust bis hintere Verspannung	im L1 Maschinenbereich	im L2* Nachläuferbereich bis 45 m ab Maschinenheck	L2 Nachläuferbereich (bis 180 m ab Maschinenheck)	L3* bis 300 m ab Heck NLK
I 18 %	Kopfschutz aus UNP 160-Segmenten im Scheitel mit Armierungsnetz und 2 GFK-Ankern pro 1.60 m'	—	Sohltübbing verlegen als definitiver Sohlenausbau	8 cm Spritzbeton im Scheitelbereich	keine Felssicherungsarbeiten	Dritter Sicherungsbereich (mögliche Nachsicherung; im Maschinen- u. Nachläuferkonzept nicht berücksichtigt)
II 50 %	wie I	2 - 4 Zusatzanker GFK pro 1.60 m' im Scheitelbereich		6 cm Spritzbeton in der oberen Profilhälfte		
III 18 %	wie I jedoch mit TH 36 Bogen in der oberen Profilhälfte	4 Zusatzanker GFK pro 1.60 m' in der oberen Profilhälfte; ev. Netzergänzung bis Profilmitte		10 cm Spritzbeton ringsum resp. bis zum Sohltübbing		
IV + V 10 %	TH Profil 36 umlaufend, Abstand 1.60 resp. 0.80 m' mit Armierungsnetz 2 GFK-Anker pro 1.80 m' resp. 0.80 m'	4 - 6 GFK-Injektionsanker pro 1.60 m' über das Profil verteilt		10 resp. 13 cm Spritzbeton ringsum resp. bis zum Sohltübbing		
VI + VII 4 %	TH Profil 36 umlaufend. Abstand 0.60 resp. 0.50 m' mit Verzugsblech resp. Armierungsnetz 2 GFK-Anker pro 0.80 m' resp. 0.50 m'	1 resp. 2 GFK-Anker pro 0.80 resp. 0.50 m'		25 bis 27 cm Spritz- und Hinterfüllbeton bis zum Sohltübbing		

Tabelle 1

lere Tagesleistung beträgt zwei Meter, wobei alle Stillstandstage für Sondierbohrungen, Injektionen und andere aussergewöhnlichen Massnahmen eingeschlossen sind. Dies ist eine sehr gute Leistung, welche der Belegschaft und der Ausrüstung ein gutes Zeugnis ausstellt. Der Vortrieb dieser Strecke hat gezeigt, dass die als Hartgesteinmaschine mit umfangreichen Zusatzausrüstungen für die Ausbruchssicherung konzipierte Tunnelbohrmaschine auch lockergesteinsähnliche Felsverhältnisse bewältigen kann. Die Durchquerung erfolgte sogar mit einer höheren Geschwindigkeit, als dies beispielsweise mit einer speziell für Lockermaterial ausgelegten Jetting-Ausrüstung möglich gewesen wäre.

Vortriebsausrüstung Zugwald- und Vereinatunnel

Allgemeine Überlegungen

Mechanische Vortriebsinstallationen bestehen im wesentlichen aus einem Abbaugerät (Tunnelbohrmaschine, TBM) und aus einem Infrastruktur- und Sicherungsgerät (Nachlaufkonstruktion, NLK). Während über viele Jahre das Hauptaugenmerk fast ausschliesslich auf der Entwicklung der TBM lag, wurde in den letzten Jahren die Bedeutung von leistungsfähigen NLK erkannt. Es ist deshalb nicht erstaunlich, dass auf diesem Gebiet beachtliche Fortschritte erzielt wurden. Spezialisten haben zusammen mit den Unternehmen massgeschneiderte und objektspezifische Einrichtungen entwickelt, gebaut und mit Erfolg eingesetzt.

Die Anforderungen an die Vortriebsausrüstung für ein bestimmtes Bauprojekt sind vielfältig. Dass für die Unternehmer bei der Planung wirtschaftliche Überlegungen im Vordergrund stehen, versteht sich von selbst. Gleichzeitig ist aber der Einbezug des Projektverfassers beziehungsweise seiner Projekt- und Sicherungskonzeption notwendig, ja zwingend. Möglicherweise ergeben sich aus diesen beiden Auffassungen wesentliche Differenzen bei der Planung des Vortriebssystems. Diese Differenzen sind in einem Bereinigungsverfahren durch beidseitige Kompromissbereitschaft auszuräumen.

Konzept des Vortriebssystems

Die Anforderungen an das Vortriebssystem sind vielfältig. Wesentliche, zu berücksichtigende Gegebenheiten sind etwa:

- Geologie und Geotechnik (Gebirgsverhalten)

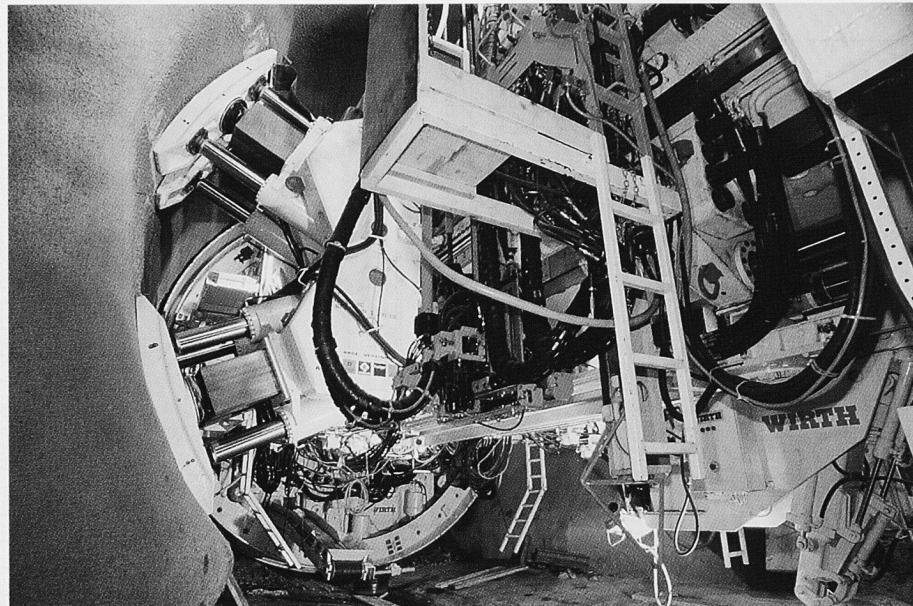


Bild 3. TBM in der Startröhre

- Bauprojekt (Sicherungs- und Ausbaukonzept)
- Objektbezogene Bedingungen und Normen
- Abförderungs- und Versorgungskonzept
- Ventilationskonzept
- Mess- und Vermessungskonzept
- Sicherheitskonzept
- Qualitätssicherungskonzept

Dabei können auch Fragen bezüglich der Wiederverwendbarkeit oder möglicher Verwendung vorhandener Geräte nicht ausser acht gelassen werden. Nur bei Grossprojekten sind solche Überlegungen unbedeutend. Dort hat eine objektgebundene Optimierung in allen Belangen absoluten Vorrang.

Bei den vorliegenden Projekten Zugwald- und Vereinatunnel Nord waren folgende Randbedingungen zu berücksichtigen:

- Geologie und Geotechnik Zugwald- und Vereinatunnel
- Rund vier Prozent der Vortriebsstrecke in sehr gebrächem Material (insbesondere Aroser Schuppenzone und andere Störzonen). Ausbruchklassen VI und VII.
- Rund zehn Prozent der Vortriebsstrecke in gebrächem Material (insbesondere Flysch, Kalk, Mergel, Tonschiefer, Gneisen usw.), Ausbruchklassen IV und V.

- Rund 86 Prozent der Vortriebsstrecke im Amphibolit mit Festigkeiten zwischen 100 und 250 N/mm², Ausbruchklassen I, II, III.
- Gebirgsüberlagerungen 800-1200 m, mit zu erwartenden plastischen Deformationen.

- Die objektbezogenen Bedingungen sind in Tabelle 1 zusammengestellt:
- Abförderung und Versorgung
- Gleisbetrieb mit Doppelspur 2 x 900 mm Spurbreite im ganzen Tunnel, Gleise auf Sohltübbing im Vereinatunnel. Einspuriger Gleisbetrieb, Spur 1000 mm und Streckenförderband im Zugwald-Tunnel.

- Ventilation: Ventilation und Entstaubung gemäss SUVA-Vorschriften (Einhaltung der MAK-Werte). Speziell zu berücksichtigen: Diesellokbetrieb, Gebirgstemperatur, nachgeschaltete Baustellen. Luttenaufhängung exzentrisch wegen Ausbau im L3.

- Mess- und Vermessungskonzept: Freiräume für Messquerschnitte und Lasergassen, laufende Einmessung der Bohrkopflage (Vergleich Soll-/Ist-Lage) in bezug auf die Tunnelachse mit laufender Darstellung auf dem Bildschirm. Einmessung der Sohltübbing (Vergleich Soll-/Ist-Vergleich).

- Sicherheitskonzept: Gaswarnanlage mit TBM-Abschaltung, Brandbekämpfungs- und Rettungsgeräte.

Die Berücksichtigung dieser Bedingungen führte schliesslich zu dem auf Bild 4 dargestellten Vortriebssystem.

Antransport und Montage der Vortriebsinstallation

Gemäss Bauprojekt ist mit dieser Vortriebsausrüstung vor dem Vereinatunnel vorerst der Mittelbereich des Zugwald-Tunnels (1635 m) aufzufahren. Nachdem die Anfangs- und Endbereiche des Zugwald-Tunnels im Locker-

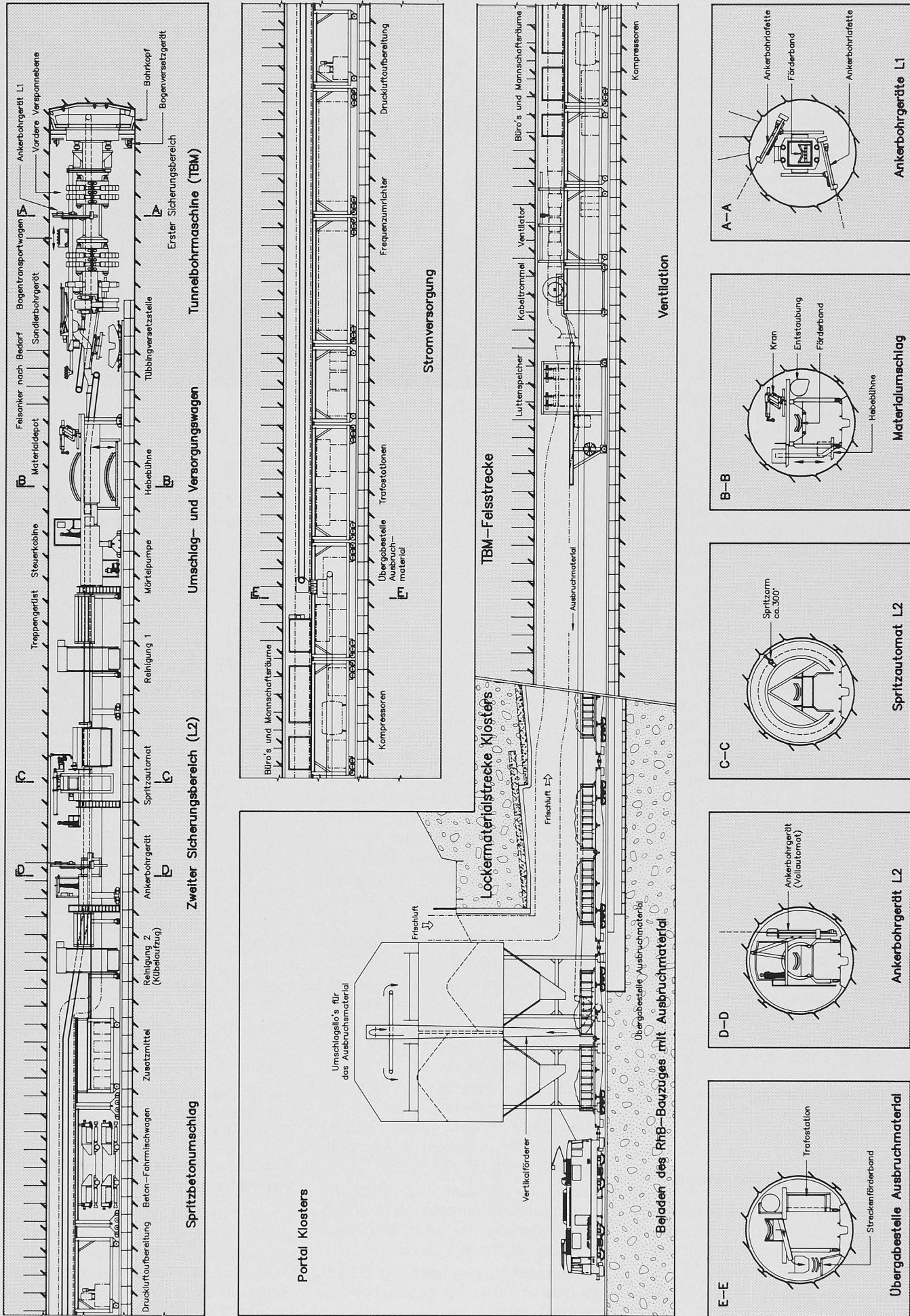


Bild 4. Bauvorgang der TBm-Strecke: Schematische Darstellung Vortrieb, Sicherung, technische Installationen und Abtransport des Ausbruchmaterials

material liegen und vorgängig bereits erstellt wurden, musste die ganze Vortriebsinstallation untertägig montiert werden. Für die TBM wurde vorgängig am Ende der Lockermaterialstrecke eine Montagekaverne mit Kran-ausrüstung erstellt und mit einem RhB-Geleise erschlossen (Bild 2). Die TBM-Teile konnten somit weitgehend per Bahn nach Klosters transportiert und vom Bahnhof direkt in die Montagekammer befördert werden. Der Zusammenbau der schweren Teile war nicht ganz einfach, verlief aber dank guter Planung reibungslos. (Bild 2)

Im Anschluss an die TBM-Montage wurden die einzelnen vor dem Tunnelportal zusammengebauten «Wagen» der Nachlaufkonstruktion in den Tunnel gezogen und zusammengekuppelt. Das Montageprogramm sah für die rund 250 m lange Einheit aus Tunnelbohrmaschine und Nachlaufkonstruktion einen Zeitbedarf von 15 Wochen vor. Mit Beginn im September 1993 war bis Mitte Dezember die Montage abgeschlossen. Anschliessend erfolgten die Probeläufe. Der eigentliche Vortrieb begann im Januar 1994. Die Montagearbeiten wurden im Zweischichtbetrieb ausgeführt.

Erste Erfahrungen im Vortrieb Zugwald-Tunnel

Vortrieb Tm 310 bis Tm 511

Bild 3 zeigt die Tunnelbohrmaschine in der Starttröhre. Auf den ersten 200 m erfolgte der Vortrieb im recht standfesten Prättigauer Flysch. Hinter dem Bohrkopf wurden alle 1,6 m ein U-Profil-Segment mit Netzunterlage und zwei senkrecht nach oben gerichteten Ankern als Kopfschutz eingebaut. Eine erste Spritzbetonlage wurde mit dem auf der NLK aufgebauten Spritzbetonautomaten (60 m ab Brust) aufgebracht. Erfahrungen:

- Felsabbau: Gute Abbaubarkeit bei maximaler Penetration; Materialförderung in der TBM und auf der NLK: problemlos
- TBM-Steuerung: In Seiten- und Höhenlagen: problemlos
- Streckenförderband in der Kurve: schwieriges Einregulieren der seitlichen Bandführung für die verschiedenen Betriebszustände (voll – leer – trocken – nass), (Kurvenradius 525 m)
- Spritzbetonautomat: Anfänglich Schwierigkeiten mit Betonantransport (Winter), Pumpenleitung und Düsenführung (unregelmässiges Spritzbild)
- Vortriebsleistung: Unter Berücksichtigung der Anlernphase auf allen Stufen: ordentlich

Tabelle 2

Technische Daten der TBM

Bohrkopfantriebsleitung	10 x 300 = 3000 kW
Antriebsart	Elektr. Frequenzumrichter mit manueller Bypass
Drehzahl	0 bis 7,5 U/Min. stufenlos
Bohrkopfbestückung	51 Schneidrollen Ø 490 mm 6 Zentrumssrollen Ø 416 mm
Vorschubkraft	max. 20 000 kN
Gewicht	700 t
Länge	18 m
Förderungsleistung	500 m ³ /h lose
Hub	1,80 m

Vortrieb Tm 511–Tm 590

Bei Tm 511 wurde eine Störzone angefahren, die im wesentlichen aus Lockermaterial besteht und mit grösseren Findlingen und Steinen durchsetzt war. Die Durchörterung erforderte das Erstellen eines umlaufenden PU-Injektionschirms im Firstbereich, Sika-Shot-Auftrag vor, über und hinter dem Bohrkopf; Stahlbögeneinbau im Abstand von 80 cm mit Netzen und Spritzbeton hinter dem Bohrkopf. Erfahrungen:

- Obwohl die Vortriebsinstallation für solche Verhältnisse nicht speziell konzipiert war, war es möglich, diese Zone im Zweischichtbetrieb mit rund 2,5 m mittlerer Tagesleistung zu durchörtern.
- Fels- beziehungsweise Materialabbau: Problematischer «Abbau» der wahllos über den ganzen Querschnitt verteilten Findlinge und Steine (Schäden an Rollenmeisseln, Schöpfbechern und am Maschinenband). Grundsätzlich wurden die meisten Steine «als Ganzes» von der TBM abgebaut und gefördert. Dies hatte zur Folge, dass das Nachläuferband häufig direkt abgestellt und manuell von den Steinen geräumt werden musste. Eine Übergabe auf das Längsband, den Senkrechtförderer und die Siloanlage war unmöglich.

– TBM-Steuerung: Das über die ganze Strecke dicht gelagerte Material im Sohlbereich bot eine genügend tragfähige Unterlage für den Kopf der Maschine; Steuerprobleme traten nicht auf.

– Streckenförderband in der Kurve: Nach wie vor Probleme mit Einregulierung

– Spritzbetonautomat: Nicht in Betrieb (aller Spritzbeton direkt hinter dem Bohrkopf)

Tm 590 bis 850

Ab Tm 590 erfolgte ein Übergang von Lockermaterial in vorerst gebräches Felsmaterial mit geologisch bedingten Niederbrüchen und ab Tm 630 in druckhaften und äusserst weichen Schieferton. Als Ausbau musste alle 80 cm ein Stahlbogen mit Netzen eingebaut und sofort, das heisst unmittelbar hinter dem Bohrkopf mit Nassspritzbeton ge-

sichert werden, was sich sehr einschneidend auf die Vortriebsleistung auswirkt. Erfahrungen:

- Felsabbau: zeitweiliges Verkleben der Schneidwerkzeuge und Schöpfbecher am Abbaurand; erschwerte Silierung im Verladesilo (Kaminbildung).
- TBM-Steuerung: Probleme mit der Einhaltung der Höhenlage der TBM (der weiche Schieferton hatte zur Folge, dass die Maschine innert weniger Meter Vortrieb über 30 cm absank und auch eine seitliche Abweichung von der Sollachse in Kauf genommen werden musste).
- Streckenförderband in der Kurve: Nach wie vor schwierige Einregulierung.
- Spritzbetonautomat: Nicht in Betrieb (aller Spritzbeton direkt hinter dem Bohrkopf)

Tm 850 und folgende

Ab Tm 850 folgte eine langsame, aber stetige Besserung der Felsverhältnisse, die es schliesslich bei Tm 875 gestattete, vom Stahlbögeneinbau hinter dem Bohrkopf auf Kopfschutz aus UNP-Profil-Segmenten mit Netzunterlage (analog Tm 310–511) überzugehen. Der Vortrieb lag offensichtlich in der Kontaktzone zwischen dem Prättigauer Flysch und der Falknisdecke. Erfahrungen:

– Felsabbau: Gute Abbaubarkeit unter Ausnutzung von lediglich rund 30 Prozent der möglichen Vorschubkraft, das heisst von rund 10–12 t pro Meisselrole:

– TBM-Steuerung: In Seiten- und Höhenlage problemlos

– Streckenförderband in der Kurve: Mit zunehmender Bandlänge erwartungsgemäss Zunahme des Überwachungs- und Wartungsaufwandes; nach wie vor schwierige Einregulierung.

– Spritzbetonautomat: Nach Verkleinerung der Pumpenleistung und des Förderrohrdurchmessers sowie der Anwendung der Zusatzmittelzuführung konnten ein befriedigendes Spritzbild und ausreichende Festigkeiten erreicht werden.

– Vortriebsleistung: Steigerung der Vortriebsleistung auf rund 12 m pro Tag (Spitzenleistung 25 m).

Schlussfolgerungen

Die gewählte Vortriebsinstallation hat sich im wesentlichen bewährt, obwohl es sich gezeigt hat, dass sie für das Auffahren des Zugwald-Tunnels (1635 m Kurve mit $R = 525$ m und 4 Prozent Steigung) von ihrem Konzept her (Gesamtlänge, Ausrüstung, Lichtraumprofil), die Grenze der Durchführbarkeit des Vortriebs fast erreicht hat. Es wird

immer schwierig bleiben, für zwei ganz verschiedene geartete Tunnelprojekte eine für beide Fälle optimale Vortriebsausrüstung zu konzipieren. Weiter hat es sich gezeigt, dass längere Bandförderanlagen mit engen Radien (1800 m mit $R = 525$ m) sehr betriebsempfindlich und wartungsaufwendig sind.

Adressen der Autoren: *H.C. Schmid*, dipl. Ing. HTL, Amberg Ingenieurbüro AG, 7320 Sargans; *B. Röthlisberger*, dipl. Ing. HTL, Amberg Ingenieurbüro AG, 7000 Chur; *W. Krebs*, dipl. Ing. ETH, Direktor Stuag Konzernbereich Tunnel und Felsbau, Grindelstrasse 6, 8303 Bassersdorf

Die Arbeiten dieses Bauloses werden von den Firmen Stuag Tunnel AG, Chur, Ed. Züblin & Cie. AG, Zürich, Frutiger Bauunternehmung AG, Thun, Jäger Baugesellschaft mbH, A-Schruns, A. Vetsch Bauunternehmung, Klosters, und M. Bordoli Baugesellschaft, Jenaz, ausgeführt. Die Tunnelbohrmaschine wurde durch die Firma Wirth, D-Erkelenz, hergestellt, und die Nachlaufkonstruktion wurde durch die Firma Rowa Engineering AG, Wangen, entworfen und geliefert.

Drei- und Zweispurstrecken im Vereinatunnel Nord

Projekt und Bauausführung

Kernstück der neuen Vereinalinie ist der 19 km lange Vereinatunnel. Er verbindet Klosters-Selfranga im Prättigau mit Sagliains im Unterengadin. Der Tunnel ist grundsätzlich für einen einspurigen Bahnbetrieb ausgelegt. Bei beiden Portalzonen werden jedoch rund 2 km lange Doppelspurstrecken eingerichtet. In Tunnelmitte ist ferner eine 2,1 km lange Kreuzungsstation vorgesehen. Weil die Gleisanlagen beim Autoverladebahnhof Klosters-Selfranga aus Platzgründen in den Tunnel eindringen, ist die 300 m lange Portalstrecke hier für dreigleisigen Betrieb ausgelegt.

Gesamtübersicht Vereinatunnel

Im Grundriss folgt der Tunnel auf dem grössten Teil seiner Länge einer Geraden. In der Vertikalen steigt er von bei-

VON HANS CHRISTIAN SCHMID, SARGANS, UND BRUNO RÖTHLISBERGER, CHUR

den Portalen gegen den Scheitelpunkt hin an. Dieser liegt 12,5 km ab Portal Selfranga auf einer Höhe von 1463 m ü. M. In Selfranga beträgt die Schienenhöhe 1281 und in Sagliains 1431 m ü. M. Die Steigungen betragen 1,5 Prozent ab Portal Selfranga und 0,5 Prozent ab Portal Sagliains. 400 m vor dem Portal Sagliains zweigt ein einspuriger Ast Richtung Susch–Oberengadin ab. Dieser knapp 300 m lange Verbindungstunnel ist ebenfalls Bestandteil des Vereinaprojektes.

Die Bauausführung ist in drei Hauptbaulose unterteilt (Bild 2): Zwei hintereinander gestaffelte Vortriebslose von

Klosters-Selfranga nach Süden und ein Gegenvortrieb von Sagliains nach Norden. Die Loseinteilung wurde unter Berücksichtigung der Gebirgsverhältnisse, der Steigungen, der Vortriebsmethoden und der Tunnelprofile festgelegt. Daneben wurden auch wirtschaftliche und bauprogrammatische Aspekte in die Überlegungen miteinbezogen. Die wichtigsten Merkmale der drei Hauptbaulose sind:

Baulos T2:

km 0 (Portal Selfranga) bis km 2,1: Drei- und Zweispurstrecken Vereinatunnel Nord (Sprengtechnischer Vortrieb)

Baulos T4b:

km 2,1 bis km 12,5: Einspurstrecke Vereinatunnel Nord (mechanischer Vortrieb) und Kreuzungsstation Tunnelmitte (sprengtechnische Ausweitung).

Baulos T5:

km 19 (Portal Sagliains) bis km 12,5: Zwei- und Einspurstrecken Vereinatunnel Süd und Verbindungstunnel Susch (sprengtechnische Vortriebe).

Die Losgrenze bei km 12,5 ist im Werkvertrag mit den Unternehmern flexibel geregelt: je nach Baufortschritt wird die Arbeitsgemeinschaft Baulos T4b oder jene von Baulos T5 den Vortrieb über die theoretische Losgrenze hinausführen. Zurzeit sind die Baulose T2 und T5 in Arbeit. Ende August 1994 lag der Vortriebsstand bei km 1,6 ab Portal Selfranga (Baulos T2) und bei km 3,2 ab Portal Sagliains (Baulos T5). Das Baulos T4b wird nach der Fertigstellung von Baulos T2 in Angriff genommen, voraussichtlich im April 1995.

Das Projekt der Drei- und Zweispurstrecken Vereinatunnel Nord

Baulos T2

Der Vereinatunnel Nord weist ab Portal Selfranga eine 0,3 km lange Dreispurstrecke auf. Anschliessend folgen 1,8 km Zweispurrtunnel. Diese beiden Abschnitte (Baulos T2) sind in diesem Artikel beschrieben. Die Fortsetzung des Tunnels ist einspurig. Es handelt sich um das Baulos T4b, auf welches hier nicht eingegangen wird.

Geologie

Das Baulos T2 durchquert die Aroser Schuppenzone, das Dorfberg-Kristallin und eventuell den Schaflägerzug. Vor der Losgrenze wird der Tunnel voraussichtlich noch in die Basiszone der Silvretta-Decke eindringen.

Die Dreispurstrecke durchquert Dolomit, Tonschiefer mit Gips, sowie Verrucanoschiefer; alles mehrheitlich wenig standfeste Gebirge. Die Überdeckung beträgt maximal 100 Meter.