

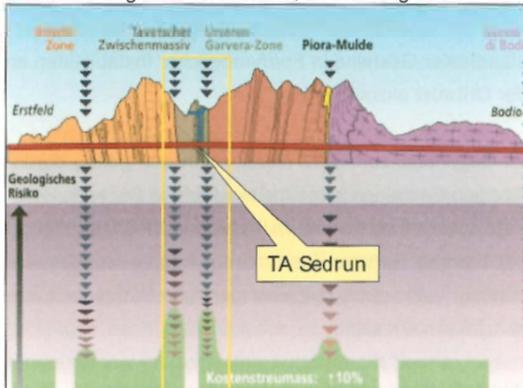
Baulos Sedrun, Bewältigung druckhafter Zonen

Heinz Ehrbar, Dipl. Bauing. ETH/SIA
AlpTransit Gotthard AG, Luzern

1. Grundsätzliche Überlegungen zu Projektierung und Ausführung

Seit die Achse des Gotthard Basistunnels (GBT) feststeht, ist bekannt, dass im Teilabschnitt Sedrun, mit dem Tavetscher Zwischenmassiv Nord (TZM Nord) und der Urseren Garvera Zone (UGZ) zwei bautechnisch anspruchsvolle Zonen zu durchfahren sind. In beiden Zonen ist mit druckhaftem Gebirge zu rechnen.

Bild 1: Geologisches Restrisiko, Beurteilung 2004



In jeder Projektphase haben sich die Projektverantwortlichen für ein Tunnelbauprojekt mit den folgenden Fragestellungen auseinanderzusetzen:

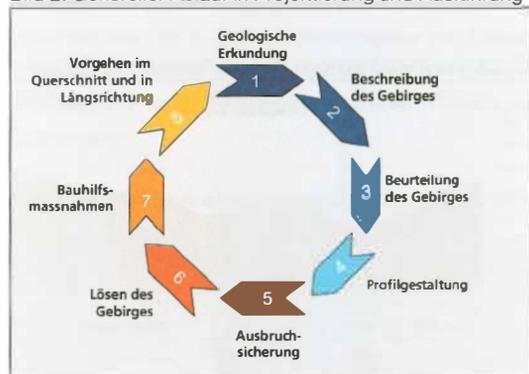
1. Welches ist der Baugrund?
2. Welche Phänomene können die erfolgreiche Erstellung eines Tunnelbauwerks hindern?
3. Mit welchen baulichen Massnahmen können diese Phänomene bewältigt werden, damit ein Tunnel mit wirtschaftlich vertretbarem Aufwand gebaut werden kann?

Zur Beantwortung dieser Fragen wurde und wird in jeder Projektphase nach dem dargestellten vereinfachten Ablaufschema vorgegangen. Die wesentlichsten Projekt-schritte sind:

- Geologische Erkundung
- Beschreibung des Gebirges mit einem geologischen Modell

- Beurteilung des Gebirges im Hinblick auf die Erstellung des untertägigen Hohlraums nach projektspezifischen Kriterien mittels Gefährdungsbildern
- Festlegung der Profilgestaltung
- Festlegung der Ausbruchsicherung
- Festlegung der Art des Lösens des Gebirges
- Festlegung allfälliger Bauhilfsmassnahmen
- Definition des Vorgehens in Quer- und Längsrichtung (Bauablauf)

Bild 2: Genereller Ablauf in Projektierung und Ausführung



Auch wenn die dargestellten Schritte trivial erscheinen, so zeigt die Praxis, dass es nicht immer einfach ist, die sich stellenden Fragen rechtzeitig und mit phasengerechtem Tiefgang zu beantworten.

2. Baugrund

2.1 Geologische Erkundung

Schon früh entschloss sich die AlpTransit Gotthard AG (ATG), die geologisch schwierigen Zonen des Tavetscher Zwischenmassivs mittels ausgedehnter Sondierkampagnen und zusätzlichen Untersuchungen zu erkunden. Die folgenden Sondierkampagnen wurden durchgeführt:

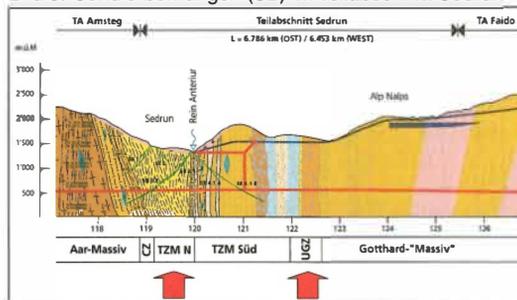
1991:	Schrägbohrung SB 1	L = 838 m	Vorprojekt
1991:	Schrägbohrung SB 2	L = 543 m	Vorprojekt
1993	Schrägbohrung SB 3.1	L = 780 m	Auflageprojekt
1997:	Schrägbohrung SB 4.1	L = 1750 m	Bauprojekt
1997/98:	Schrägbohrung SB 3.2	L = 1716 m	Bauprojekt

Die Urseren Garvera Zone wurde nicht mittels Bohrungen erkundet. Da diese tektonische Einheit jedoch beim Bau der Kraftwerkstollen der Kraftwerke Vordererhein und beim Bau des Gotthard Strassentunnels durchquert worden war, waren ausreichende Kenntnisse und Erfahrungen vorhanden.

In der Ausführungsphase werden in beiden Einspurtunnelröhren sowohl nach Norden wie auch nach Süden auf deren gesamten Länge horizontale Sondierbohrungen ausgeführt. Je nach Baugrundverhältnissen handelt es sich dabei um Schlagbohrungen oder aber um Kernbohrungen. Die Länge variiert zwischen ca. 150 m im Regelfall bis zu 400 m im Bereich der Talsperren Naipis. Je nach Einschätzung des Gefahrenpotentials durch Wassereintritte, werden Bohrungen preventergeschützt ausgeführt.

Mit diesem Voraussondierungskonzept sollen die Vorteile des konventionellen Vortriebs zur Vorausschau optimal genutzt werden.

Bild 3: Sondierbohrungen (SB) im Teilabschnitt Sedrun



2.2 Beschreibung des Gebirges

Die Bohrungen nach Norden haben ergeben, dass das TZM Nord zu ca. 70 % aus weichen, kakiritisierten Gesteinen mit duktilem Bruchverhalten besteht. Etwa 30 % der Gesteine sind hart und brechen spröde. Harte und weiche Gesteine folgen sich in engständigen Wechsellagen. Die lockermaterialähnlichen Gesteine sind wassergesättigt.

Bei den weichen Gesteinen handelt es sich um kakiritisierte, bis stark kataklastisch überprägte Schiefer. Zudem kommen Zwischenlagen von Schiefern und Phylliten vor. Bei den härteren Zwischenlagen handelt es sich vorwiegend um Quermuskovitgneise.

2.3 Beurteilung des Gebirges

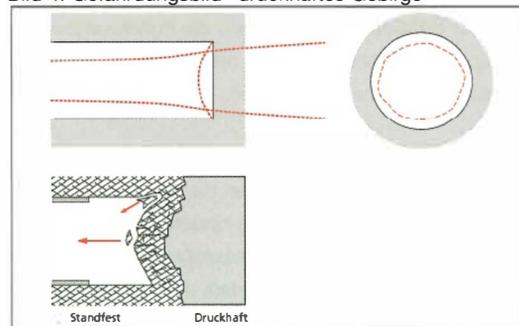
Mit der Beurteilung des Gebirges werden die Beschaffenheit und das Verhalten des Gebirges bei der Ausführung des unterirdischen Hohlraums prognostiziert. Diese Beurteilung, sowie die Beurteilung des Gebirges in Bezug auf allfällige Wassereintritte erfolgten projektspezifisch auf der Grundlage von Gefährdungsbildern.

Im TZM Nord und in der UGZ ist das Phänomen des druckhaften Gebirges das dominante Gefährdungsbild.

Das Ausmass an Druckhaftigkeit wird aufgrund der hohen Überlagerung von 900 m und mehr, und der Tatsache, dass die Gesteine wassergesättigt sind, als extrem eingestuft. Das Phänomen des druckhaften Gebirges wird sich sowohl radial, als auch an der Ortbrust mit einer Tendenz zum Schliessen des Hohlraums bemerkbar machen. In Längsrichtung wird sich das Phänomen vor allem bei den zu erwartenden Wechselfolgen unterschiedlich standfester Gesteine in Form möglicher Instabilitäten an der Ortbrust akzentuieren.

Im Gegensatz zum TZM Nord, wo in den gering durchlässigen Gesteinen keine massgebenden Bergwasserzutritte erwartet werden, ist im Südvortrieb, insbesondere in der Urseren Garvera Zone mit solchen zu rechnen. Sie können, wenn auch mit einer geringen Wahrscheinlichkeit, lokal stark sein.

Bild 4: Gefährdungsbild «druckhaftes Gebirge»



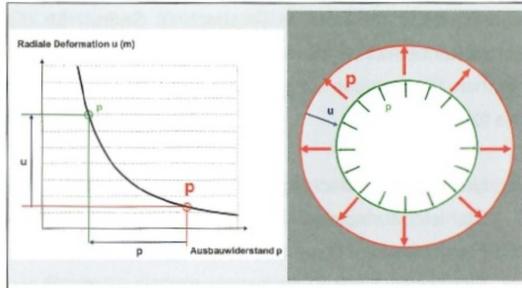
3. Bauliche Massnahmen

Die Erfahrung aus dem Tunnelbau zeigt, dass der Gebirgsdruck mit zunehmender Gebirgsdeformation abnimmt. Der Ausbauwiderstand kann somit erheblich reduziert werden, wenn ein gewisses Mass an Deformationen zugelassen wird. Bei stark druckhaftem Gebirge, wie es im Teilabschnitt Sedrun vorkommt, kann alleine

mit dem Zulassen grosser Deformationen jedoch kein stabiler Zustand erzielt werden.

Trotz dem Zulassen von Deformationen in der Grössenordnung von mehreren Dezimetern müssen massivste Stützkkräfte eingesetzt werden, um den Hohlraum offen zu halten. Ohne das Zulassen von Deformationen wäre es technisch kaum machbar, die notwendigen Kräfte für das Offenhalten des Querschnittes aufzubringen.

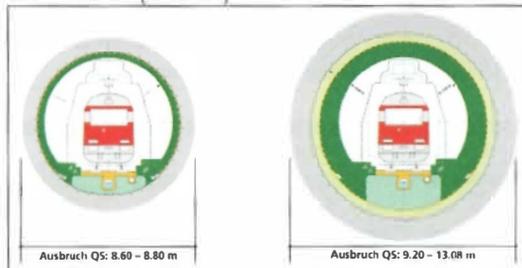
Bild 5: Erfahrung aus dem Tunnelbau



3.1 Profilgestaltung

Die Nutzungsanforderungen für die Hochgeschwindigkeitsstrecke des GBT verlangen einen minimalen freien Luftquerschnitt F_{air} von 41.0 m². Die erwarteten hohen Beanspruchungen des Ausbaus aus dem echten Gebirgsdruck verlangen nach einer statisch optimalen Form. Für die Einspurtunnel im gesamten Teilabschnitt Sedrun kommt deshalb nur das Kreisprofil zur Anwendung. In Strecken mit günstigerer Geologie wird die Sohle jedoch aus baubetrieblichen Gründen abgeflacht ausgeführt.

Bild 6: Normalprofile im Teilabschnitt Sedrun, Innenradius = 3.87 m (konstant)



3.2 Ausbruchsicherung mittels Bergbautechnik

Basierend auf den grundlegenden felsmechanischen Überlegungen wurde nach einem Ausbaukonzept gesucht, welches die «sedrun-spezifischen» Randbedingungen zu erfüllen mag, d.h. welches ein hohes Defor-

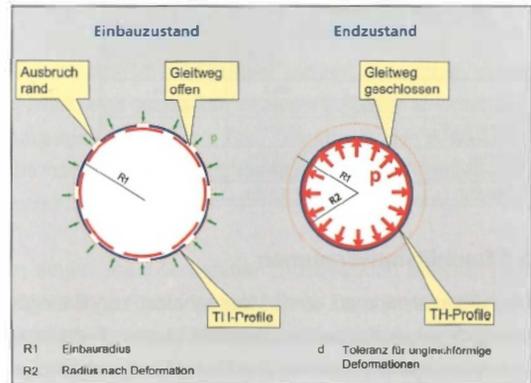
mationsvermögen bei hohem Endausbauwiderstand aufweist.

Dabei waren der Bauherr und die Projektgenieure bestrebt, sich auf bewährte Technik abzustützen. Eingehende Fallstudien, sowie Besuche auf Baustellen und in Bergwerken führten schliesslich zur Überzeugung, dass die im deutschen Steinkohlebergbau eingesetzte Technik des deformierbaren Stahleinbaus mit TH-Profilen die gestellten Anforderungen zu erfüllen vermag.

Dabei werden im stärksten Ausbruchsicherungstyp die konstruktiven Möglichkeiten der Baumethode bis zum Maximum ausgeschöpft, d.h. die schwersten Profile werden im engstmöglichen Abstand gestellt. Die zulässigen Deformationen des Stahlbogens werden auf 10% des Einbauradius, d.h. ca. 65 cm begrenzt, um keine unzulässig hohen Zwängungskräfte zu erzeugen.

Die Ortbrüst wird mit bis zu 18 m langen Horizontalankern gesichert, was bis zu 210 m Horizontalanker pro Tunnelmeter ergibt. Ergänzt wird das System noch mit einer systematischen Radialankerung mit bis zu 250 m²/Anker pro Tunnelmeter.

Bild 7: Prinzip der Ausbruchsicherung mittels deformierbarem Stahleinbau

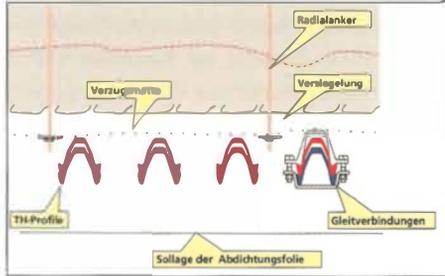


Nach dem Ausbruch des Hohlraums im Sprengvortrieb oder im maschinenunterstützten Vortrieb werden sechzehn Bogensegmente zu zwei ineinander liegenden Ringen zusammengefügt. Die Verbindungen können sich über vordefinierte Gleitwege beschränkt verschieben, was dem gesamten System eine radiale Deformation von bis zu 65 cm erlaubt. Vollständig eingeschoben erreicht das System seine maximale Traglast von ca. 1.8 MPa.

Auf dem Schema ist der Einschubvorgang idealisiert und symmetrisch dargestellt. In der Praxis wird dies kaum der Fall sein. Deshalb ist im Projekt ein Toleranzmass für un-

gleichmässige Deformationen, der Bergbau spricht vom «Schwimmen des Einbaus», vorgesehen.

Bild 8: Querschnitt durch die Ausbruchsicherung



Im extremsten Fall werden die Stahlbögen praktisch «Mann an Mann» gestellt. Nach erfolgtem Einschubvorgang werden die Stahleinbaubögen definitiv mit Spritzbeton eingespritzt.

Das gesamte Ausbruchsicherungskonzept im TA Sedrun wird modular aufgebaut, um einen möglichst optimalen Geräteeinsatz zu ermöglichen.

Bild 9: Vergleich der Ausbruchsicherungstypen im Teilabschnitt Sedrun

	SA 1	SA 2	SA 4
Ausbruch	ca. 70 m ²	ca. 80 m ²	bis 135 m ²
Mehrausbruch für Deformationen	-	bis 20 cm	bis 75 cm
Stahleinbau	-	bis 1,5 v/fm	bis 10 v/fm
Radialanker	bis 20 m/fm	bis 20 m/fm	bis 250 m/fm
Ortbrustanker	-	bis 20 m/fm	bis 210 m/fm

3.3 Bauhilfsmassnahmen

Bauhilfsmassnahmen sind Massnahmen zur Ermöglichung des Vortriebs bei ausserordentlichen Verhältnissen durch Gebirgsverbesserung (Erhöhung Festigkeit, Steifigkeit, Reduktion der Durchlässigkeit, etc.) und zur Gewährleistung der Stabilität der Ortbrust. Mit dem Auftreten solcher Verhältnisse wird im Teilabschnitt Sedrun in einem gewissen Ausmass gerechnet.

Der Werkvertrag Los 360, Tunnel Sedrun enthält deshalb den folgenden Massnahmenkatalog:

- Injektionen (Einzelinjektion, Injektionsschirme, Injektionskörper)
- Verstärkung Ortbrustankerung und Spiesse
- Lange Vorausdrainagen
- Notfalls Nachprofilieren

3.4 Bauablauf

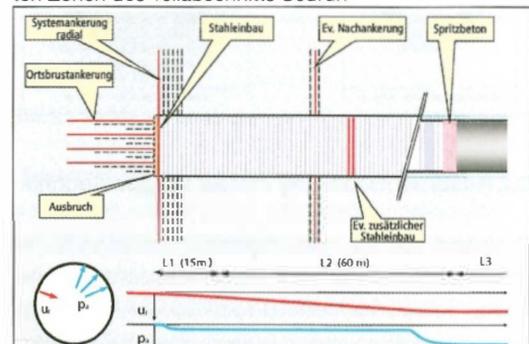
Die Abläufe zur Erstellung des Profils gehen von folgenden Überlegungen aus:

Die ausgeführten Sondierbohrungen im TZM Nord und die zugehörigen Laborversuche zeigen, dass für das TZM-Nord ein extremes Ausmass an Druckhaftigkeit zu erwarten ist. Der rasche Ringschluss ist für das Offenhalten der Querschnitte von entscheidender Bedeutung.

Konsequenterweise ist im Teilabschnitt Sedrun für die Einspurtunnelröhren alleine der Vollausbuch mit einem raschen Ringschluss vorgesehen. Der Ringschluss wird wie folgt erzielt:

- Nach jedem Abschlag von 1.0m Länge werden die Stahleinbauringe gestellt (TH 44, engster Bauabstand 33 cm)
- Einbringen einer Systemankerung mit 12 m langen Radialankern
- Einbringen von 18 m langen Ortbrustankern nach jeweils 6 m Vortrieb
- Nach dem Erschöpfen der Gleitwege im Stahl nimmt die Ringkraft im Stahleinbau und damit die Gefahr des Ausknickens zu. Zur einwandfreien Bettung und damit zur Gewährleistung der vollen Tragkapazität werden die Stahlringe nun vollständig eingespritzt. Im Projekt geht man davon aus, dass die Einschubphase 75 m hinter der Ortbrust abgeschlossen ist.
- Über diese Distanz von 75 m wird gefordert, dass im gesamten Querschnitt zusätzliche Sicherungsarbeiten möglich sein müssen, wie
 - das Stellen zusätzlicher Stahlbögen
 - das Nachankern während des Deformationsvorgangs
 - das Einbringen einer Spritzbetonschale nach Abschluss des Deformationsvorgangs

Bild 10: Einbausequenz der Stützmittel in den druckhaften Zonen des Teilabschnitts Sedrun



Um diesen Bauablauf zu ermöglichen, sind vom Unternehmer (Arbeitsgemeinschaft Transco Sedrun) erhebliche logistische Herausforderungen zu meistern. Die Vortriebsvorrichtungen müssen in der Lage sein, enorm unterschiedliche Grössen (z.B. Ausbrüche von 65 m² bis 135 m²) zu bewältigen. Die Platzverhältnisse auf der provisorischen Sohle erlauben das Kreuzen grosser Geräte nur bedingt. Ein grosser Teil der Installationen wird deshalb auf einer nachlaufenden Hängbühne platziert.

Zur Montage der Stahlbögen und für diverse Arbeiten im Ortbrustbereich kommen dabei erstmalig im Tunnelbau sogenannte Streckenausbaumaschinen zum Einsatz.

Diese Maschinen dienen

- dem Stellen des Stahleinbaus mittels 2 Arbeitsplattformen und einem Manipulatorarm
- dem Einbringen der Ortbrustversiegelung mittels Spritzdüse ab der Arbeitsplattform
- und dem Ablängen der Ortbrustankerung mittels hydraulischen Zangen.

Im Bergbau sind solche Streckenausbaumaschinen für den Stahleinbau im Einsatz. Als Mehrzweckgerät in den Sedruner Dimensionen mit 50 t Gewicht, welche an Hänneschienen aufzuhängen ist, jedoch nicht.

Ergänzt wird die Streckenausbaumaschine mit einer nachlaufenden Hängebühne der Firma ROWA.

Bild 11: Streckenausbaumaschine GTA 7500



4. Neuartige Baustellenversuche für den Stahleinbau

Das geschilderte Konzept basiert wohl auf bereits bekannter Technik. In Sedrun müssen aber Tunnelquerschnitte mit bis zu 13 m Durchmesser aufgeföhren werden. In diesen Dimensionen fehlt die praktische Erfahrung. Das kritische Hinterfragen wesentlicher Annahmen vor der Ausführung, wie z.B. zum Einschubvorgang und zur angenommenen Traglast der Stahleinbaubögen war deshalb angezeigt.

Die ATG entschied sich deshalb, den Unternehmer werkvertraglich zu verpflichten, eine Eignungsprüfung des vorgesehenen Systems durchzuführen. Die von der ATG ausgesetzten Versuche wurden schliesslich im Massstab 1:1 auf der Baustelle durchgeführt. Das Versuchskonzept basiert auf einem Vorschlag des Experten Herr Prof. Dr. Kovári und wurde im Detail vom Unternehmer und von der Ingenieurgesellschaft Gotthard Basistunnel Süd umgesetzt. Die durchgeführten Versuche können als einmalig für den Tunnelbau bezeichnet werden.

Bild12: Stahleinbauversuche, Kleinversuch Nr. 3, Oktober 2003



Das Prinzip der Versuche besteht darin, dass der Gebirgsdruck mittels aufpumpbaren Gummikissen simuliert wird. Solche Kissen sind aus der Hebetchnik, zum Heben schwerer Lasten bekannt.

Um mit dem System besser vertraut zu werden, wurde deshalb eine grosse Zahl an Kleinversuchen an einem Bogensegment geföhren. Dies erlaubte es den Beteiligten, die notwendigen Systemanpassungen mit kleinem Aufwand zu testen.

In einem abschliessenden Grossversuch wurden zwei vollständige Stahlringe mit 12.4 m Durchmesser bis zum Versagen belastet. Mit einem Einschubweg von 60 cm konnten die im Kleinversuch ermittelten Erkenntnisse in Bezug auf das Einschubverhalten und die Traglast bestätigt werden.

Die Versuche liefen ab dem Herbst 2003 und wurden im Frühjahr 2004 abgeschlossen.

Bild 13: Stahleinbauversuche, Grossversuch vom 24.03.2004



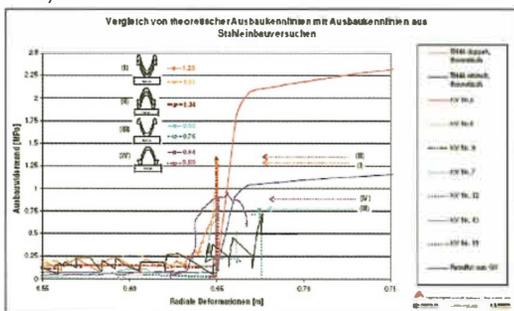
Aus den Versuchergebnissen kann geschlossen werden, dass die theoretischen Überlegungen im Rahmen der Prognosegenauigkeit bestätigt wurden. Das gewählte Konzept kann als geeignet beurteilt werden. Die Versuche zeigten aber auch, wo mögliche Grenzen des Systems liegen.

Gleichzeitig wurde auch ein gewisser Handlungsspielraum für den Fall unerwarteter Verhältnisse und für mögliches Optimierungspotential ersichtlich. Es zeigte sich z.B., dass die Einbaurichtung der Bögen nur einen minimalen Einfluss auf die Traglast des Systems hat. In der Praxis wird vor allem das System Einzelbogen mit engerem Bogenabstand weiter zu optimieren sein, da sich das Resttragvermögen des Doppelbogens nicht signifikant von jenem des Einzelbogens unterscheidet (vgl. Bild 14).

Alle am Projekt Beteiligten sind sich bewusst, dass trotz sorgfältigster Vorbereitung weitere Systemoptimierungen getätigt werden müssen. Zu diesem Zweck wurde eine permanente Arbeitsgruppe mit Vertretern des Unternehmers, des Projektingenieurs, der örtlichen Bauleitung, des Bauherrn und Fachexperten gegründet, um rasch reagieren zu können.

Es war sicher richtig, die Versuche nicht unter Laborbedingungen, sondern auf der Baustelle durchzuführen. Damit konnten sich die Vortriebsmannschaften bereits ein erstes Mal mit der anzuwendenden Technik und den enorm wirkenden Kräften, vertraut machen. Dieser Aspekt darf in keiner Art und Weise unterschätzt werden, schieben die Stahlleinbaubögen doch mit lauten, im Tunnelbau unüblichen Geräuschen ein.

Bild 14: Auswertung der Stahlleinbauversuche mittels Ausbaukennlinien (KV = Kleinversuch, GV = Grossversuch)



5. Stand der Arbeiten und Ausblick

Seit der Vertragsunterzeichnung im April 2002 wurde von der Arbeitsgemeinschaft Transco ein grosses Arbeitspen-

sum bewältigt. Umfangreiche Installationsarbeiten über- und untertag mussten zuerst getätigt werden, damit ein geregelter Baubetrieb überhaupt ermöglicht werden konnte. Parallel dazu wurde der Schacht 2 abgeteuft, mit einer brandfesten Spritzbetonauskleidung versehen und somit im Sommer 2003 als erstes untertägliches Objekt im Teilabschnitt Sedrun im Rohbau fertig gestellt.

Seit dem November 2003 laufen die Vortriebe auf Tunnelniveau an bis zu neun Arbeitsstellen praktisch unbehindert von den Installationstätigkeiten. In den Monaten Februar und März 2004 wurden jeweils mehr als 500 m, im Mai 2004 sogar beinahe 700 m Tunnelsystem in mehr als 1.5 km Tiefe unter dem Berg Tgom erstellt.

Mitte Mai 2004 wurde im Nordvortrieb die Übergangszone zum druckhaften Gebirge erreicht. In wenigen Wochen sollten erste Erfahrungen mit dem gewählten System vorliegen.

Jeder m³ Ausbruchmaterial aus dem Berg und jeder Liter Bergwasser aus den Vortrieben müssen über eine Höhendifferenz von 800 m nach oben auf den Installationsplatz «Las Rueras» transportiert werden, während alles Baumaterial wie Zement, Zuschlagstoffe, Anker und Stahlleinbaubögen sowie alle Betriebsmittel den umgekehrten Weg nach unten machen.

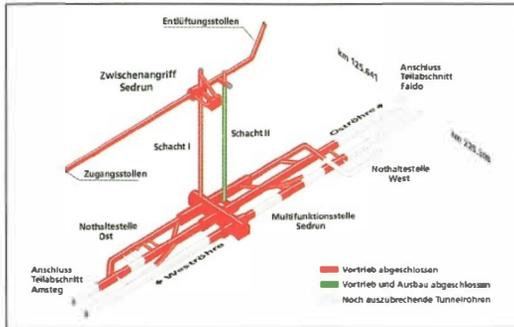
Das gewählte Installationskonzept mit im Bergbau erprobten Systemen (Schachtfördereinrichtung, Leitungssysteme) hat sich bisher bewährt.

Die Vortriebsleistungen sind stark von den Baugrundverhältnissen anhängig. Während in günstiger Geologie Leistungen von mehr als 7 m Tunnelausbruch pro Arbeitstag und Röhre möglich sind, reduziert sich diese Leistung in den druckhaften Zonen auf weniger als 1.0 m pro Arbeitstag.

Diese Fakten führen zu folgenden Eckdaten im Bauprogramm des Loses 360:

Baubeginn:	April 2002
Schacht II abgeteuft:	Ende Mai 2003
Vortriebsbeginn Nord:	01. Juli 2003
Vortriebsbeginn Süd:	01. August 2003
Beginn Vortrieb druckhafte Zonen:	ca. Juli 2004
Durchschlag nach Norden:	Juli 2008
Durchschlag nach Süden:	Oktober 2008

Bild 15: Stand der Arbeiten im Teilabschnitt Sedrun per Ende Mai 2004



6. Schlussbemerkung

Nebst den druckhaften Zonen gäbe es im Teilabschnitt Sedrun noch viele andere Themen, welche ebenso vertieft zu behandeln wären. Als Stichworte seien genannt:

- Die Erschliessung über 800 m tiefe Schächte
- Die Logistik zur Gewährleistung sicherer und leistungsfähiger Vortriebe ab dem Schachtfuss, mit bis zu 9 Vortriebsstellen und diversen rückwärtigen Arbeitsstellen
- Die Fragen der Arbeitssicherheit insbesondere bei den gefangenen, fallenden Vortrieben
- Der Tunnelbau im Bereich der Talsperren der KVR

Viel Neuland muss auch bei diesen Themen besritten werden, damit das Ziel bis Ende 2008 im Teilabschnitt Sedrun die Durchschläge zu erzielen, erreicht werden kann.

Allen am Projekt Beteiligten ergibt sich daraus aber die Chance zum Gewinn einmaliger Erfahrungen und Erkenntnisse.