

# **AlpTransit Gotthard, Teilabschnitt Sedrun Vortriebskonzept in den druckhaften Zonen Vom Projekt zur Ausführung**

Heinz Ehrbar  
*AlpTransit Gotthard AG, Luzern, Schweiz*

**ZUSAMMENFASSUNG:** Die Tätigkeiten für den Gotthard Basistunnel (GBT) als derzeit längstem Eisenbahntunnel müssen alleine schon aufgrund der Projektdimensionen jederzeit nachvollziehbar sein. Seit die Achse des GBT feststeht, ist bekannt dass im Teilabschnitt Sedrun zwei Zonen mit stark druckhaftem Gebirge aufzufahren sind. In jeder Projektphase wurde und wird nun während der Ausführung die Aufgabe phasengerecht angegangen und ihrer Lösung zugeführt. Dabei ist auch tunnelbautechnisches Neuland zu beschreiten. Enge Kontakte zur Wissenschaft und zur Bergbautechnik liefern eine wertvolle Unterstützung bei der Lösung der Aufgabe.

## **1 GRUNDSÄTZLICHE ÜBERLEGUNGEN**

Die Schweiz hat sich mehrfach dafür entschieden, den Schwerverkehr über die Alpen auf die Schiene zu bringen. Zu diesem Zweck entsteht unter anderem mit dem 57 km langen Gotthard Basistunnel das derzeit das längste Tunnelbauwerk der Welt.

Die Dimension des Projektes, die damit verknüpften Baukosten, sowie die langen Planungs- und Realisierungszeiten von ca. 25 Jahren verlangen, dass alle Entscheide im Projekt jederzeit nachvollziehbar gefällt werden. Ein Beispiel für die Anwendung nachvollziehbarer Methoden in der Planung und bei der Ausführung sind die Projektüberlegungen zur Bewältigung der druckhaften Zonen am Gotthard Basistunnel.

Aus den Erfahrungen ergibt sich folgender genereller Ablauf für die Projektierung und Ausführung von Untertagbauten, wie er auch SIA-Normenwerk dokumentiert ist:

1. Definition eines Baugrundmodells, mittels
  - geologischer Erkundung aufgrund der Projektanforderungen und wirtschaftlicher Kriterien
  - Beschreibung des Gebirges aus Basis der Norm SIA 199
  - Beurteilung des Gebirges mit projektspezifischen Gefährdungsbildern
  
2. Definition der baulichen Massnahmen als Vorbereitung der Ausführung (Projektierung) und während der Ausführung durch
  - Festlegung der Profilgestaltung
  - Bestimmung der Art des Lösens des Gebirges
  - Definition der Ausbruchsicherung
  - Definition eines Katalogs von Bauhilfsmassnahmen
  - Definition des Bauablaufs im Querschnitt und in Längsrichtung

Dieser Prozess vollzieht sich stufengerecht in jeder Projektphase. Als Projektphasen werden in der Schweiz in der Regel Vorstudien, Vorprojekt, Auflageprojekt, Bauprojekt, Ausschreibungsprojekt, Ausführungsprojekt und die Schlussdokumentation unterschieden.

## 2 BAUGRUNDMODELL IM TEILABSCHNITT SEDRUN

### 2.1 Geologische Erkundung

Aus der Theorie zur Alpenbildung und aus den Erfahrungen mit bereits erstellten Tunnel- und Stollenbauten war bekannt, dass am GBT mit mehreren bautechnisch schwierigen Zonen zu rechnen ist. Dabei wusste man schon in der Vorstudienphase, dass sich ein grosser Teil der geologischen Risikozonen im Teilabschnitt Sedrun, dem kürzesten Teilabschnitt des GBT befindet.

Das Tavetscher Zwischenmassiv Nord (TZM-N), die Clavaniev-Zone (CZ) und die Urseren-Garvera-Zone (UGZ) wurden in Bezug auf die Bautechnik speziell herausfordernd erwartet.

In den Phasen der Vorstudien, des Vorprojektes und des Bauprojektes wurden die geologisch schwierigen Zonen mittels ausgedehnter Sondierkampagnen und geotechnischen Laboruntersuchungen erkundet. Im den Jahren 1993 und 1997/98 wurden der südliche und der nördliche Teil des TZM mittels langen, steuerbaren Schrägbohrungen erkundet.

Die Urseren-Garvera-Zone wurde nicht mittels Bohrungen ab der Oberfläche erkundet. Da diese tektonische Einheit jedoch beim Bau der Kraftwerksstollen der Kraftwerke Vorderrhein und beim Bau des Gotthard Strassentunnels durchfahren wurde, waren ausreichende Kenntnisse vorhanden.

In der Ausführungsphase werden nun in beiden Einspurtunnelröhren sowohl nach Norden wie auch nach Süden auf gesamte Tunnellänge systematische horizontale Sondierbohrungen ausgeführt. Je nach Baugrundverhältnissen handelt es sich dabei um Schlagbohrungen oder um Kernbohrungen. Die Länge variiert zwischen 36 m im Regelfall bis zu 400 m im Bereich der Talsperren Nalps. Je nach Einschätzung des Gefahrenpotentials von Wassereintrüben durch die örtliche Bauleitung, werden Bohrungen preventergeschützt ausgeführt.

### 2.2 Beschreibung des Gebirges

Die Bohrungen nach Norden haben ergeben, dass diese Zone 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 Wechseln. Die lockermaterialähnlichen Gesteine sind wassergesättigt, jedoch mit sehr geringen Durchlässigkeiten in der Matrix.

Die UGZ ist von der Entstehungsgeschichte her tektonisiert. Die Sedimentgesteine der UGZ können im Gegensatz zum TZM Nord mindestens abschnittsweise stärker wasserführend sein.

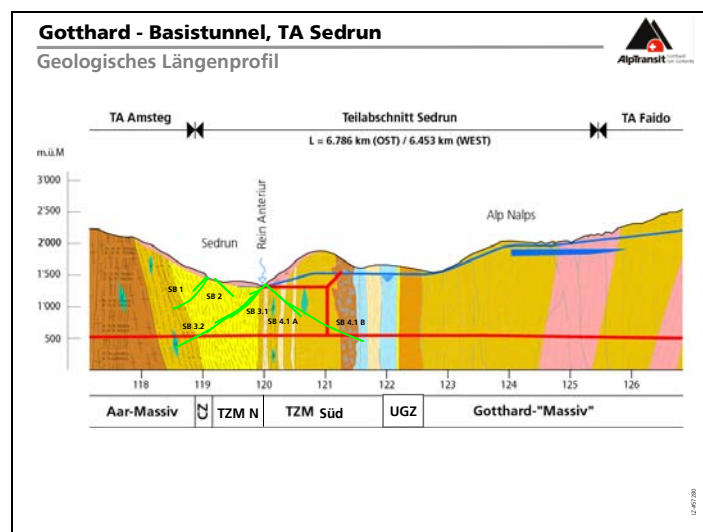


Abbildung 1: Geologisches Längenprofil TA Sedrun mit Sondierbohrungen

### 2.3 Beurteilung des Gebirges

Die Beurteilung des Gebirges in Bezug auf sein Verhalten während und nach der Erstellung des Hohlraums, sowie die Beurteilung in Bezug auf allfällige Wasser- und Gaseinflüsse erfolgt 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 starken Tendenz zum Schliessen des Hohlraums bemerkbar machen. Das Phänomen kann sich in Längsrichtung vor allem bei Wechselfolgen unterschiedlich standfester Gesteine in Form von Instabilitäten an der Ortbrust akzentuieren.

## 3 BAULICHE MASSNAHMEN

Die Erfahrung aus dem Tunnelbau lehrt uns, dass der Gebirgsdruck mit zunehmender Gebirgsdeformation abnimmt. Der Ausbauwiderstand kann somit erheblich reduziert werden, wenn ein gewisses Mass an Deformationen zugelassen wird. Bei extrem 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 starke Stützkräfte 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.

### 3.1 Profilgestaltung und Abbaumethode

Die Nutzungsanforderungen für die Hochgeschwindigkeitsstrecke des GBT verlangen einen minimalen freien Luftquerschnitt  $F_{air}$  von  $41.0 \text{ m}^2$ . Die erwarteten hohen Beanspruchungen des Ausbaus aus dem echten Gebirgsdruck verlangen nach einer statisch optimalen Form. Für die Einspurtunnel kommt deshalb im Teilabschnitt Sedrun nur das Kreisprofil zur Anwendung. In Strecken mit günstigerer Geologie wird die Sohle jedoch aus baubetrieblichen Gründen abgeflacht ausgeführt.

Das Gestein wird im Sprengverfahren oder maschinenunterstützt gelöst, z.B. mit dem Abbaumhammer.

### 3.2 Ausbruchsicherung mittels Bergbautechnik

Basierend auf den grundlegenden felsmechanischen Überlegungen wurde nach einem Ausbau-Konzept gesucht, welches die „Sedrun-spezifischen“ Randbedingungen zu erfüllen mag, d.h. welches anfänglich ein hohes Deformationsvermögen aufweist und dann zu einem hohen Ausbauwiderstand übergeht.

Dabei waren Bauherr und Projektingenieur bestrebt, sich auf eine bewährte Technik abzustützen. Die aus dem deutschen Steinkohlebergbau stammende Technik des deformierbaren Stahleinbaus mit TH-Profilen erlaubt es, hohe Widerstandskräfte bei gleichzeitig hohem Deformationsvermögen aufzubringen.

In Sedrun kommen achteilige Ringe zur Anwendung, welche unter Anwendung von begrenzt nachgiebigen Verbindungen zusammengefügt werden. Durch den Gebirgsdruck schieben sich die Ringe zusammen, bis sie ihr maximales Tragvermögen von ca. 1 MPa Erreichen. Nach erfolgtem Einschubvorgang werden die Stahleinbaubögen definitiv mit Spritzbeton eingespritzt. Im Projekt ist vorgesehen, die Stahlringe doppelagig auszuführen.

In der Realität wird der Einschubvorgang nicht zentrisch erfolgen und es ist davon auszugehen, dass einzelne Bögen nicht vollständig einschieben. Das Projekt sieht für solche Phänomene ein Toleranzmass für das so genannte „Schwimmen des Einbaus“ vor. Wird dieses überschritten muss nachprofiliert werden.

Im extremsten Fall werden die Stahlbögen praktisch „Mann an Mann“ gestellt. Nebst dem Stahleinbau wird das System noch mit einer systematischen Radialankerung mit bis zu 250 m<sup>2</sup>/Anker pro Tunnelmeter verstärkt. Dazu kommt eine ähnliche starke Ortbrustankerung.

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

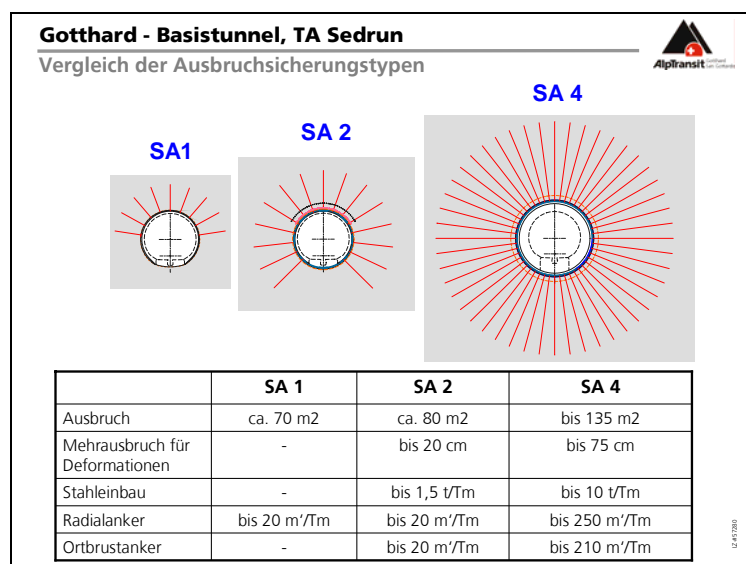


Abbildung 2: Vergleich der Ausbruchsicherungstypen im Teilabschnitt Sedrun

### 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. Im Werkvertrag sind die folgenden Massnahmen vorgesehen:

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

### 3.4 Bauablauf im Querschnitt und in Längsrichtung

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 die Offenhaltung der Querschnitte von grösster Bedeutung. Konsequenterweise ist im Teilabschnitt Sedrun für die Einspurtunnelröhren der Vollausschlag mit einem raschen Ringschluss vorgesehen. Der Ringschluss wird nach jedem Abschlag von 1m Länge wie folgt erzielt:

- Stellen der Stahleinbauringe (2x TH 44, engster Bauabstand 33 cm)
- Einbringen einer Systemankerung mit bis zu 12 m langen Radialankern
- Einbringen von 18 m langen Ortbrustankern nach jeweils 6 m Vortrieb, welche laufend abzulängen sind.
- Einspritzen der Stahleinbaubogen nach dem Erschöpfen der Gleitwege zur Gewährleistung der maximalen Tragkapazität der Stahlringe. Im Projekt geht man davon aus, dass die Einschubphase 75 m hinter der Ortbrust abgeschlossen ist.
- Über die Distanz von 75 m wird gefordert, dass im gesamten Querschnitt zusätzliche Arbeiten zur fallweisen Verstärkung der Ausbruchsicherung möglich sein müssen, nämlich

- das Stellen zusätzlicher Stahlbögen
- das Nachankern während des Deformationsvorgangs
- das Einbringen einer Spritzbetonschale nach Abschluss des Deformationsvorgangs

Um diesen Bauablauf zu ermöglichen sind erhebliche logistische Herausforderungen zu meistern. Die Vortriebeinrichtungen müssen in der Lage sein enorm unterschiedliche Ausbruchquerschnitte von  $65 \text{ m}^2$  bis  $135 \text{ m}^2$  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 kommt erstmalig im Tunnelbau eine so genannte Streckenausbaumaschine zum Einsatz. Diese Mehrzweckmaschine dient dem Versetzen der Stahleinbauringe, dem Einbringen der Ortbrustversiegelung mit Spritzbeton und dem Ablängen der Ortbrustankerung. Im Bergbau sind solche Installationen zum Versetzen von Stahleinbau im Einsatz. In den Sedruner Dimensionen mit einem aufzuhängenden Gewicht von 50 t jedoch nicht.

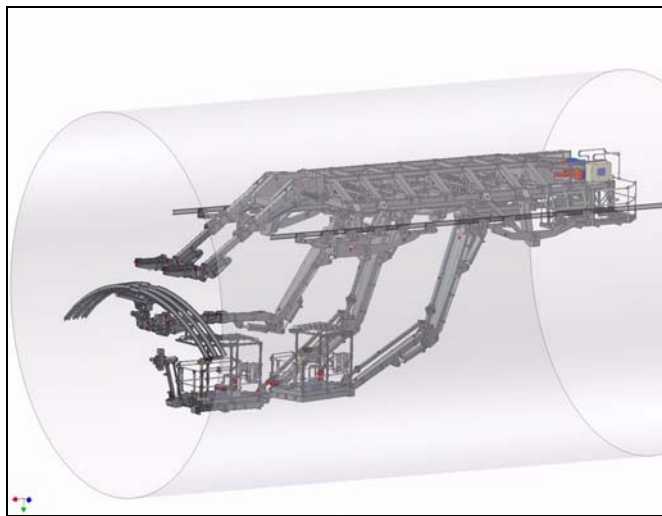


Abbildung 3: Streckenausbaumaschine GTA 7500 für die druckhaften Zonen

#### 4 NEUARTIGE IN SITU VERSUCHE

Das Ausbaukonzept mittels Stahleinbau basiert auf bekannter Technik. In Sedrun müssen jedoch Tunnelquerschnitte mit bis zu 13 m Durchmesser aufgeföhren werden. In diesen Dimensionen fehlt die praktische Erfahrung. Das kritische Hinterfragen wesentlicher Annahmen, wie z.B. zum Einschiebevorgang und zur Traglast der Stahleinbaubögen war deshalb angezeigt.

Die AlpTransit Gotthard AG (ATG) als Bauherr entschloss sich deshalb die wesentlichen Annahmen aus dem Bauprojekt vorgängig der Leistungsvortriebe mittels Versuchen testen zu lassen. In Absprache mit der ARGE TRANSCO als Unternehmer wurden die ausgesetzten 1 : 1 – Laborversuche in Baustellenversuche umgewandelt. Das Versuchskonzept in Klein- und Grossversuchen den Gebirgsdruck mittels aufpumpbaren Gummikissen zu simulieren, basiert auf einem Vorschlag des Experten Herr Prof. Dr. Kovári

Ab dem Herbst 2003 erlaubte es eine grosse Zahl an Kleinversuchen an Bogensegmenten den Beteiligten die notwendigen Systemanpassungen mit kleinem Aufwand zu testen. Schliesslich wurde im Frühjahr 2004 der Grossversuch mit einem Ringdurchmesser von 13.0 m und aufgezogenen Deformationen von 60 cm geföhren.

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 die Grenzen der Tragfähigkeit des Systems.

Weitere Erkenntnisse als Handlungsspielraum für den Fall unerwarteter Verhältnisse und für mögliche Projektoptimierungen konnten gewonnen werden. So zeigte sich z.B., dass die Einbaurichtung der Bögen nur einen minimalen Einfluss hat. In der Praxis wird vor allem das System der Einzelbogen mit engerem Bogenabstand gegenüber dem Doppelbogen zu optimieren sein, da sich das Resttragvermögen des Doppelbogens ohne weitere Massnahmen nicht signifikant vom Einzelbogen unterscheidet.



Abbildung 4. Grossversuchsstand Stahleinbau nach Versuchsende

Die ATG ist überzeugt, in jeder Projektphase das Notwendige getan zu haben um die kommenden schwierigen Vortriebe sicher ausführen zu können. Im Mai 2004 wurde die Übergangszone zum druckhaften Gebirge erstmals erkundet. Es ist den Projektbeteiligten klar, dass bei den einmaligen Randbedingungen wie sie Sedrun herrschen, auch in der Ausführungsphase noch verschiedenste Optimierungsschritte getätigt werden müssen. Der gesamte Zyklus von der Vorauserkundung bis zur Festlegung der Abläufe im Querschnitt und in Längsrichtung ist wieder zu durchlaufen.

Eindeutige, vordefinierte Informations- und Entscheidungsabläufe, in Sedrun „Vortriebssteuerungskonzept“ genannt, ermöglichen rechtzeitige, stufengerechte und nachvollziehbare Entscheide. Die bisherigen Erfahrungen mit dem gewählten Vorgehen sind durchwegs positiv.

## LITERATUR

- Ehrbar H., Pfenninger I., 1999, “Umsetzung der Geologie in technische Massnahmen im Tavetscher Zwischenmassiv Nord“, *Tagungsband GEAT99*, ETH Zürich
- Ehrbar H. 2002, “Felssicherung in druckhaftem Gebirge am Beispiel des Gotthard-Basistunnels“, *Tunnel, Sonderausgabe IUT Sargans 09/2002*
- Kovári, K. 1998. Tunnelbau in druckhaftem Gebirge, *Tunnel 5/98*: 12-31, München.
- Kovári K., Amberg F., Ehrbar H.: “Mastering of squeezing Rock in the Gotthard Base Tunnel“, *World Tunnelling*, June 2000
- Lombardi, G. 1971. Zur Bemessung der Tunnelauskleidung mit Berücksichtigung des Bauvorganges, *Schweizerische Bauzeitung*, 89. Jhg., Heft Nr. 32
- Sala, A. 1998. “Erfassen des Gebirges im Untertagbau, AlpTransit Gotthard“, *Einführungstagung zur Empfehlung SIA 199*, 26. November 1998, Fribourg