

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

Alex Sala, Dipl. Bauing. FH, IG GBTS, Amberg Engineering AG, Regensdorf/CH

Raphael Wick, Dipl. Bauing. ETH/SIA, IG GBTN, Gähler und Partner AG, Ennetbaden/CH

Vortriebe am Gotthard-Basistunnel – ein Rückblick

Erfahrungen und Lehren aus Sicht des Bauherrn

Am 23. März 2011 erfolgte zwischen Faido und Sedrun der letzte Durchschlag in der Weströhre des Gotthard-Basistunnels (GBT). Eine 15-jährige Geschichte des Einsatzes von verschiedensten Vortriebsmethoden ging damit zu Ende. Zu Recht stellt sich die Frage, ob die jeweilige Wahl der Vortriebsmethoden richtig war, wie sich die Methoden bewährt haben und welche Erfahrungen und Lehren sich aus den Vortrieben am GBT für künftige Grossprojekte mitnehmen lassen.

Drives in the Gotthard Base Tunnel – a Review

Findings and lessons learned from the client's viewpoint

On 23 March 2011 the final breakthrough took place in the western drive of the Gotthard Base Tunnel (GBT) between Faido and Sedrun. As a consequence, a 15-year long period involving the application of all kinds of tunnelling methods came to an end. Quite justifiably, the issue can be raised whether the selection of the particular tunnelling methods was correct, how the methods have proved themselves and which findings and lessons can be obtained from the drives in the GBT for future major projects.

1 Grundlagen

Für das Tunnelsystem des nominell 57 km langen Gotthard-Basistunnels (GBT) mussten insgesamt 151.8 km Tunnel, Stollen, Kavernen und Schächte ausgebrochen werden. Zwecks Optimierung der Gesamtbautezeit wurde der Tunnel in die 5 Teilabschnitte Erstfeld, Amsteg, Sedrun, Faido und Bodio unterteilt (Bild 1).

Die Hohlräume des GBT befinden sich grösstenteils im Aar-massiv, im Tavetscher Zwischenmassiv, im Gotthardmassiv und in der penninischen Gneiszone und weisen unter dem Piz Vatgira Überlagerungshöhen bis 2350 m auf (Bild 2). Über 90 % der Gesteine in diesen tektonischen Einheiten waren von bautechnisch guter Qualität mit hohen Festigkeiten und geringem Verformungspotenzial. Weniger als 10 % der gesamten Tunnellänge kamen in bautechnisch ungünstigen Zonen zu liegen. Dabei ist primär der nördliche Teil des Tavetscher Zwischenmassivs zu erwähnen (TZM) mit einer rund 1.15 km langen Zone mit druckhaftem Gebirge. Aber auch in der Intschizone, in der Urseren-Garvera-Zone und in der Bergsturzmasse der Ganna di Bodio wurden bautechnisch schwierige Verhältnisse erwartet. Die in der Phase des Vorprojektes als bautechnisch äusserst schwierig beurteilte

1 Principles

Altogether 151.8 km of tunnels, headings, caverns and shafts had to be excavated for the tunnel system of the nominally 57 km long Gotthard Base Tunnel (GBT). The tunnel was split up into the 5 part-sections Erstfeld, Amsteg, Sedrun, Faido and Bodio to optimise the total construction time (Fig. 1).

The GBT's cavities are largely to be found in Aar massif, Tavetsch intermediate massif, Gotthard massif and in the Penninic gneiss zone, and possess overburden heights of up to 2350 m below the Piz Vatgira (Fig. 2). In excess of 90 % of these rocks in these tectonic units was of good quality in terms of the ground behaviour with high strengths and low deformation potential. Less than 10 % of the total tunnel length was located in zones unfavourable for tunnel construction. In this context, first and foremost the northern part of the Tavetsch intermediate massif (TZM) should be mentioned involving a roughly 1.15 km long zone with squeezing rock. However, tricky conditions in technical terms were also expected in the Intschi Zone, the Urseren Garvera Zone and in the Ganna di Bodio rockfall mass. The Piora Zone, which was assessed

Les travaux d'avancement du Tunnel de Base du Saint-Gothard: bilan

Expériences et leçons tirées par le maître d'ouvrage

Le dernier percement du Tunnel de Base du Saint-Gothard entre Faido et Sedrun a eu lieu le 23 mars 2011. Il met fin à 15 ans d'histoire pendant lesquels on a fait appel aux modes d'avancement les plus divers. On peut se demander à juste titre si le choix des méthodes d'avancement était chaque fois le bon, si les méthodes se sont montrées efficaces et quelles sont les expériences et leçons que l'on peut tirer des travaux d'avancement du tunnel du Saint-Gothard pour d'autres grands projets futurs.

Avanzamenti nella Galleria di Base del Gottardo – una retrospettiva

Esperienze e lezioni dal punto di vista dell'impresario

Il 23 marzo 2011 c'è stata l'ultima caduta di diaframma nel tunnel ovest della galleria di base del Gottardo (GBT), con la quale si è conclusa la storia quindicennale dei più svariati tipi di avanzamento. È lecito domandarsi se la scelta dei metodi di avanzamento sia stata corretta, quali siano i risultati e quali esperienze e lezioni si possano trarre dagli avanzamenti nella GBT per i futuri progetti di grandi dimensioni.

Piora-Zone erwies sich aufgrund der umfangreichen Voraussondierungen bis zum Bauprojekt 1999 schliesslich als bautechnisch günstig.

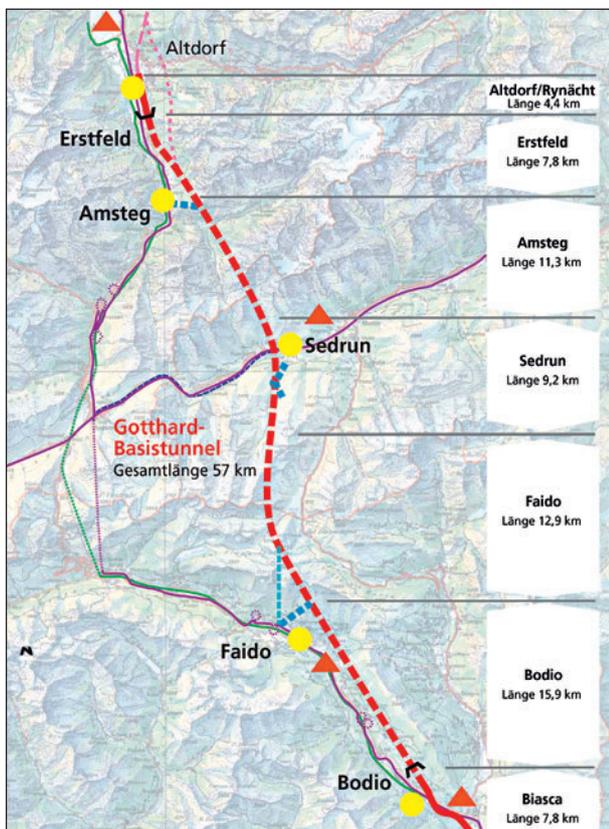
Das Baugrundmodell 1999 (Bild 2) ging für die Bereiche vom Nordportal bis zur Chièra-Synform von einer steilstehenden Lagerung aus, bei welcher die tektonischen Grenzen mit den

as being extremely tricky during the preliminary design phase, turned out to be technically favourable thanks to the extensive advance explorations undertaken before the tender design in 1999.

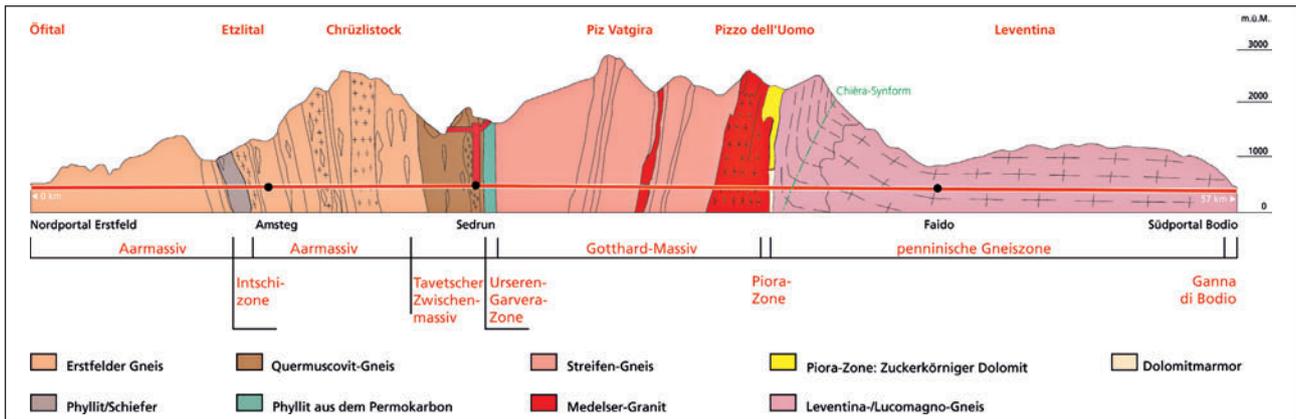
The 1999 ground model (Fig. 2) foresaw a perpendicularly standing formation for the areas from the north portal to the Chièra Synform, signifying that the drives would penetrate the tectonic limits practically at a right angle. To the south of the Chièra Synform flat-lying schistosity in the Lucomagno and Levantine gneisses were expected.

The rock's physical properties and its behaviour during excavation which, amongst others, greatly depends on the joint system, are determining the rock's workability and the required amount of support. The hazard scenarios presented in Fig. 3 were classified as dominant.

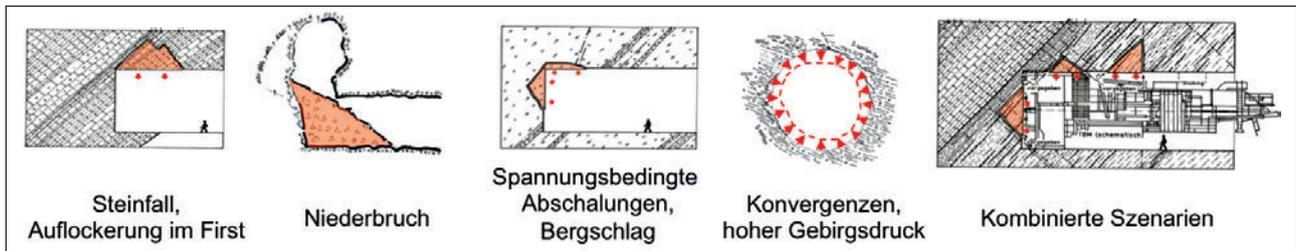
Furthermore, additional demands from the ground conditions had to be mastered, such as high original temperatures anticipated in the rock of up to 50°C. In addition, ingressing water with high initial pressures of up to 200 bar was anticipated (Figs. 4a + b).



1 Situation des GBT mit Lage der Installationsplätze und der Ausbruchdeponien
Lay-out of the GBT with position of the installation yards and the muck disposal sites



2 Geologisches Längenprofil des GBT gemäss Prognose 1999 (vereinfacht ATG)
GBT longitudinal profile in keeping with the 1999 prognosis (simplified ATG)



3 Wichtigste Gefährdungsbilder
Most important hazard scenarios

Vortrieben praktisch rechtwinklig durchörtert werden. Südlich der Chièra-Synform wurde von flachliegenden Schieferungen in den Lucomagno- und Leventina-Gneisen ausgegangen.

Die physikalischen Eigenschaften des Gebirges und dessen bautechnisches Verhalten, welches u.a. stark vom Trennflächengefüge abhängig ist, sind massgebend für die Lösbarkeit des Gebirges und den erforderlichen Sicherungsaufwand. Die in Bild 3 dargestellten Gefährdungsbilder wurden als dominant eingestuft.

Daneben waren weitere Anforderungen aus dem Baugrund zu beherrschen, wie die bis zu ca. 50°C erwarteten hohen Ursprungstemperaturen des Gebirges. Zudem war mit Wassereintritten mit hohen initialen Drücken bis zu 200 bar zu rechnen (Bild 4a + b).

2 Wahl der Vortriebsmethoden

Die Randbedingungen des Baugrundes liessen über weite Strecken sowohl einen TBM-Vortrieb als auch einen konventionellen Vortrieb (Sprengvortrieb, in speziellen Fällen mechanischer Abbau) zu. Sowohl bei der Ausschreibung der Hauptlose als auch beim abschliessenden Vergabeentscheid waren die folgenden Projektanforderungen bei der Wahl der Vortriebsmethoden zu berücksichtigen [1]:

- der Baugrund in seiner Gesamtheit, gemäss den Erkenntnissen aus den geologischen Erkundungen (Gebirgseigenschaften und Tragverhalten, Wasser, Störzonen)

2 Selecting the driving methods

In general the ground conditions allowed for both a TBM drive as well as a conventional drive (drill and blast, mechanised extraction in some cases) over long distances. The following project requirements had to be taken into account for selecting the driving methods during the tendering and award phase of the main construction contracts [1]:

- the ground, in keeping with the findings from geological investigations (rock properties and bearing behaviour, water, fault zones)
- the excavation geometry
- the development and logistics of each individual driving point
- demands applying to occupational safety
- environmental demands (including no impermissible influencing of third parties)
- project-specific demands relating to costs/deadlines/quality
- legal marginal conditions
- risk considerations on the part of the client and contractor

The following risk policy was established by the client to select finally the driving methods contained in the tender:

1. Only driving methods which are based on known technology can be applied, i.e. no experiments are undertaken on the world's longest tunnel.
2. The client only dictates the driving methods, where compelling boundary conditions preclude the one or other method.

- die Ausbruchgeometrie
- die Erschliessung bzw. die Logistik jeder einzelnen Vortriebsstelle
- Anforderungen bezüglich der Arbeitssicherheit
- Umweltaforderungen (u.a. keine unzulässige Beeinflussung Dritter)
- projektspezifische Anforderungen bezüglich Kosten/Terminen/Qualität
- rechtliche Randbedingungen
- Risikoüberlegungen des Bauherrn und des Unternehmers

Zur Festlegung der auszuschreibenden Vortriebsmethoden wurde bauherrnseitig die folgende Risikopolitik festgelegt:

1. Es kommen nur Baumethoden zum Einsatz, welche auf bereits bekannter Technik beruhen, d.h. es werden keine Experimente am längsten Tunnel der Welt gemacht.
2. Der Bauherr gibt die Vortriebsmethode nur in jenen Fällen vor, wo zwingende Randbedingungen die eine oder die andere Methode ausschliessen.
3. In allen übrigen Fällen soll der Unternehmer in Kenntnis des umfassenden Beschriebs des Baugrundes die für ihn optimale Methode festlegen.
4. Wo der Bauherr mehrere Methoden als gleichwertig betrachtet, schreibt er diese gleichwertig aus, um direkt vergleichbare Angebote zu bekommen.

Die folgenden Restriktionen galt es zu berücksichtigen:

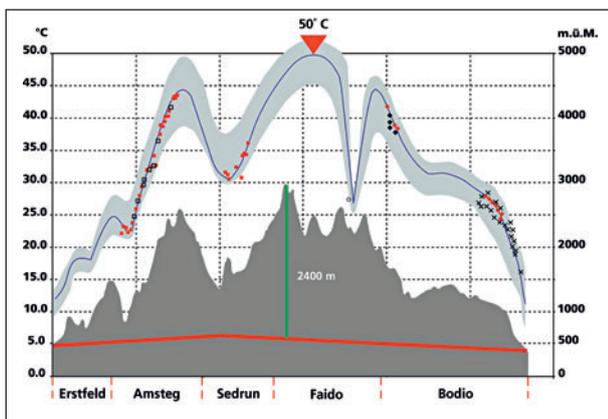
- a) Die Plangenehmigungsverfügung für den Teilabschnitt Erstfeld schloss einen Sprengvortrieb (SPV) wegen der zu erwartenden Immissionen auf die naheliegenden Wohnsiedlungen aus.
- b) Die stark variablen Querschnitte im Bereich der Multifunktionsstellen (MFS) Faido und Sedrun schlossen hier einen TBM-Vortrieb aus.
- c) Im Teilabschnitt Sedrun schlossen die Erschliessung der Vortriebsstellen über zwei 800 m tiefe Schächte und die sowohl im Nord- wie im Südvortrieb erwarteten stark druckhaften Gebirgsverhältnisse einen TBM-Vortrieb zur Gänze aus.
- d) Im Bereich der Leventina war es aus Platzgründen unmöglich, das notwendige Deponievolumen für die Ablagerung

3. In all other cases the contractor is to determine the method he finds optimal based on a comprehensive description of the ground conditions.
4. Where the client regards several methods as being equal, he tenders them on an equal level in order to obtain directly comparable offers.

The following restrictions had to be taken into consideration:

- a) The construction permit for the Erstfeld part-section precluded a drill and blast drive on account of the anticipated immissions affecting the nearby residential districts.
- b) The extremely varying cross-sections at the Faido and Sedrun multi-function stations (MFS) precluded a TBM drive.
- c) In the Sedrun part-section the development of the excavation points via two 800 m deep shafts and the pronouncedly squeezing rock conditions expected completely precluded a TBM drive.
- d) For space reasons in the Levantine Valley it was impossible to find the necessary volume to dump the entire excavated material from the Faido part-section. The excavated material from the drive for the Faido single-track tunnels had to be stored together with the material from the Bodio part-section at the Buzza di Biasca dump on the southern fringe of the project perimeter. This signified that for the first bore of the Bodio part-section the breakthrough to Faido had to be executed as quickly as possible to ensure the removal of the excavated material from the Faido part-section as alternative transportation by road was not feasible for ecological reasons. As a result, a transport tunnel from the Faido MFS and the application of a double-shield TBM with segment lining was intended to assure the quick breakthrough to Faido in the advancing eastern bore.

Table 1 displays the restrictions to the driving methods as seen by the client based on these general conditions. There were no additional restrictions with regard to costs, deadlines and quality. The demanded quality was to be guaran-



4a+b Prognostizierte Gebirgstemperaturen und Wasserzutritte mit hohem Druck
Prognosed rock temperatures and water inflows under high pressure



	Erstfeld EST	Amsteg EST	EST N	Sedrun MFS	EST S	Faido EST	MFS	Bodio EST
Baugrund			keine TBM					
Ausbruchgeometrie				keine TBM			keine TBM	
Erschliessung/Logistik/ Arbeitssicherheit			keine TBM	keine TBM	keine TBM			
Umweltanforderungen	kein SPV							
Kosten/Termine/Qualität								
Rechtliche Randbedingungen	kein SPV							
Risikoüberlegungen			keine TBM	keine TBM	keine TBM			

Table 1 Einschränkungen der Vortriebsmethoden aus Sicht des Bauherrn (EST = Einspurtunnel)

	Erstfeld EST	Amsteg EST	EST N	Sedrun MFS	EST S	Faido EST	MFS	Bodio EST
Ground			no TBM					
Excavation geometry				no TBM			no TBM	
Development/logistics/ industrial safety			no TBM	no TBM	no TBM			
Environmental demands	no D&B							
Costs/deadlines/quality								
Legal basic conditions	no D&B							
Risk considerations			no TBM	no TBM	no TBM			

Table 1 Restrictions of the driving methods seen from the client's viewpoint (EST = Single Track Tunnel)

des gesamten Ausbruchmaterials aus dem Teilabschnitt Faido zu finden. Das Ausbruchmaterial aus dem Streckenvortrieb der Einspurtunnel Faido musste zusammen mit dem Ausbruchmaterial aus dem Teilabschnitt Bodio in der Deponie Buzza di Biasca am Südrand des Projektperimeters abgelagert werden. Dies bedeutete, dass bei der ersten Röhre des Teilabschnitts Bodio möglichst rasch der Durchschlag nach Faido erfolgen musste, um den Abtransport des Ausbruchmaterials aus dem Teilabschnitt Faido zu gewährleisten, da entsprechende Strassentransporte aus Gründen des Umweltschutzes nicht infrage kamen. Ein Transportstollen ab der MFS Faido und der Einsatz einer Doppelschild-TBM mit Tübbingausbau sollte deshalb in der vorausseilenden Oströhre den raschen Durchschlag nach Faido gewährleisten.

Aus diesen Randbedingungen ergaben sich die in **Tab. 1** dargestellten Einschränkungen der Vortriebsmethoden aus Sicht des Bauherrn. Bezüglich der Anforderungen „Kosten, Termine und Qualität“ gab es keine Einschränkungen, da die geforderte Qualität ungeachtet der Vortriebsmethode zu garantieren war, die terminlichen Randbedingungen klar formuliert waren und bei den Kosten auf die regulierende Wirkung des Marktes gesetzt wurde.

Der Bauherr beurteilte einen Sprengvortrieb für die langen Vortriebe im Teilabschnitt Bodio als unwirtschaftlich. Deshalb wurde auf die Ausschreibung eines solchen als Amts-

teed regardless of the driving method. The boundary conditions for scheduling were clearly formulated and the costs were subjected to the market's regulating influence.

The client felt that a drill and blast drive would be uneconomical for the long drives in the Bodio part-section. As a result, no official variant of this kind was submitted to tender. However, corresponding contractor variants were permitted. For the Amsteg and Faido part-sections the TBM solution was entered as an official proposal and the conventional drive as an official variant on an equal basis (**Tab. 2**).

It was mandatory to offer the official solution. The provision of one or several offers for the variants was optional. The bidder reacted with corresponding offers to the tendering concept. **Fig. 5** shows the amount of offers received per part-section in percentage of the most favourable offer per part-section prior to technical adjustment. It is clearly visible that in the Faido part-section at least drill and blast was thoroughly accepted as an economically competitive solution.

The offer that the client found most economical was awarded in each case. The official solution was approved in each case for the part-sections Amsteg (TBM drive) and Sedrun (conventional drive). Contractor variants were chosen in each case for Erstfeld, Faido and Bodio. A larger TBM diameter was applied in Erstfeld (reutilisation of the Amsteg TBM) within the scope of a lump sum offer. For the Faido and

	Erstfeld	Amsteg	Sedrun	Faido	Bodio
Amtslösung	Gripper-TBM	Gripper-TBM	Konv. Vortrieb	Gripper-TBM	Ost: Doppelschild-TBM West: Gripper-TBM
Amtsvariante	keine	Sprengvortrieb	keine	Sprengvortrieb Felsicherungskonzept TBM: Anker/Stahleinbau	keine
Zugelassene Unternehmervarianten	nur auf Basis TBM-Vortrieb	„langsamer“ TBM-Vortrieb (gleiche Bauzeit wie SPV)	Kalottenvortrieb	Loskombination Bodio/Faido unter Berücksichtigung der längeren Gesamtbauteit des SPV	
					Sprengvortrieb Ost: Gripper-TBM

Table 2 Ausschreibungskonzept

	Erstfeld	Amsteg	Sedrun	Faido	Bodio
Official solution	Gripper-TBM	Gripper-TBM	Conv. drive	Gripper-TBM	East: Double shield TBM West: Gripper-TBM
Amtsvariante Official variant	none	Drill and Blast	none	Drill and Blast Rock support concept TBM: anchors/steel ribs	none
Allowed contractors variant	only on TBM drive basis	“slower” TBM drive (same construction time as D & B)	Top heading/ Bench method	Combined Bodio/Faido section taking the longer overall time for constructing the D & B into account	
					Drill and Blast East: Gripper-TBM

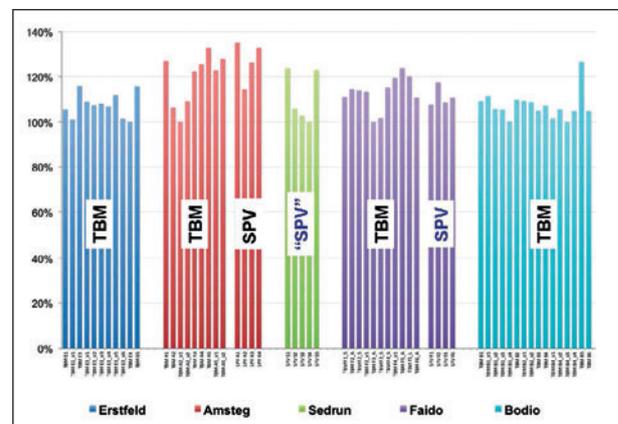
Table 2 Tendering concept

variante verzichtet. Entsprechende Unternehmervarianten wurden jedoch zugelassen. In den Teilabschnitten Amsteg und Faido wurde die TBM-Lösung als Amtsvorschlag und der konventionelle Vortrieb als Amtsvariante gleichwertig ausgeschrieben (Tab. 2).

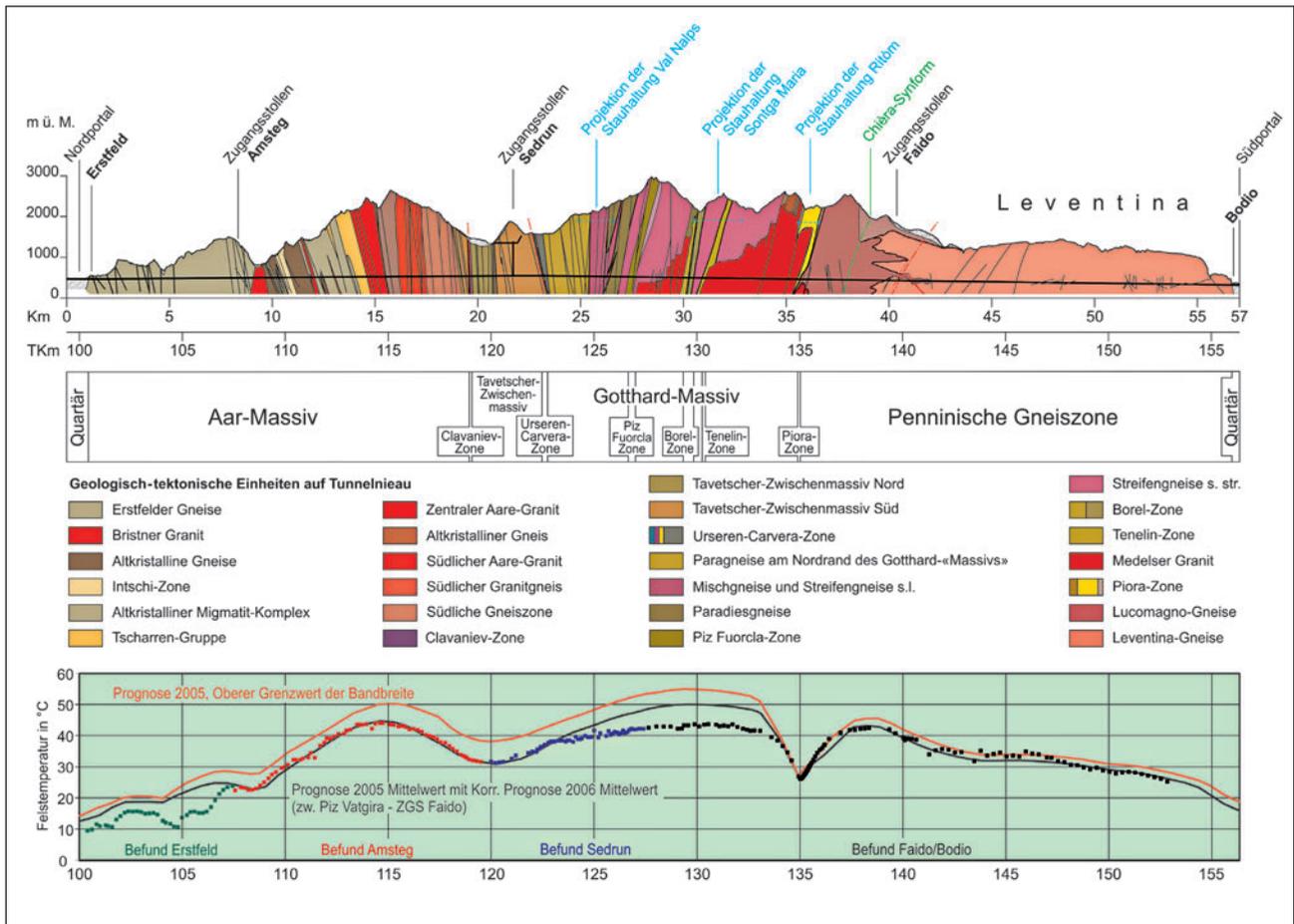
Die Amtslösung musste zwingend angeboten werden. Die Abgabe eines oder mehrerer Angebote zu Varianten war fakultativ. Die Bewerber reagierten mit entsprechenden Angeboten auf das Ausschreibungskonzept. Bild 5 zeigt die pro Teilabschnitt eingegangenen Angebote jeweils in Prozent des günstigsten Angebotes pro Teilabschnitt vor der technischen Bereinigung. Daraus ist erkennbar, dass zumindest im Teilabschnitt Faido der Sprengvortrieb durchaus als wirtschaftlich konkurrenzfähig zu bezeichnen war.

Zur Vergabe kam jeweils das für den Bauherrn wirtschaftlichste Angebot. Für die Teilabschnitte Amsteg (TBM-Vortrieb) und Sedrun (konventioneller Vortrieb) erhielt jeweils die Amtslösung den Zuschlag. Für Erstfeld, Faido und Bodio kamen jeweils Unternehmervarianten zum Zug. In Erstfeld kam ein grösserer TBM-Durchmesser (Wiederverwendung der TBM von Amsteg) im Rahmen eines Globalangebotes zum Einsatz. Für die Teilabschnitte Faido und Bodio wurde eine Loskombination mit nur 2 Gripper-TBM anstelle einer 3-Maschinenlösung (1 x Doppelschild Bodio, 1 x Gripper Bodio, 1 x Gripper Bodio/Faido) oder 4-Maschinenlösung gewählt (1 x Doppelschild Bodio, 1 x Gripper Bodio, 2 x Gripper Faido). Eine Loskombination wurde nur deshalb möglich, weil für den Vortrieb im Teilabschnitt Faido für Unternehmer-

Bodio part-sections a combination of only 2 Gripper TBMs instead of a 3-machine solution (1 x double-shield Bodio, 1 x Gripper Bodio, 1 x Gripper Bodio/Faido) or a 4-machine solution (1 x double shield Bodio, 1 x Gripper machine Bodio, 2 x Gripper Faido) was chosen. This type of combination was only possible because the construction period for driving the Faido part-section was extended by a year also for the contractor variant using a TBM drive corresponding to the extended time schedule of the drill and blast drive. Unit price contracts were applied everywhere except for the Erstfeld part-section.



5 Eingegangene Angebote jeweils in Prozent des günstigsten Angebotes pro Teilabschnitt vor Bereinigung
Offers received in each case as a percentage of the most favourable offer per part-section prior to adjustment



6 Geologisches Befundprofil mit Temperaturprofil (Dr. H. J. Ziegler)
 Geological report with temperature profile (Dr. H. J. Ziegler)

varianten mit TBM-Vortrieb eine um 1 Jahr längere Bauzeit entsprechend dem Sprengvortrieb zugestanden wurde. Abgesehen vom Teilabschnitt Erstfeld wurde überall das Modell des Einheitspreisvertrags gewählt.

3 Erfahrungen aus den Vortrieben

Zwischen Oktober 2001 und April 2002 wurden die Werkverträge für die Teilabschnitte Faido/Bodio, Amsteg und Sedrun unterschrieben. Im Teilabschnitt Erstfeld erfolgte dieser Schritt im März 2007.

Die Risikoabgrenzung zwischen Bauherrn und Unternehmer erfolgte dabei nach den Regelungen der Norm SIA 198 (1993). Diese Abgrenzung hält u. a. fest, dass der Bauherr für die Risiken des Baugrundes einstehen muss, sofern sich diese ausserhalb der vertraglich vereinbarten Grenzen befinden. Der Unternehmer seinerseits trägt das Baugrundrisiko innerhalb der vertraglich vereinbarten Grenzen und dabei insbesondere das Risiko für die eingesetzten Mittel (Geräte) und Methoden.

Nach den Vorbereitungsarbeiten starteten die Vortriebe ab dem Frühjahr 2002. Wenn nun die gewählten Vortriebsver-

3 Findings from the drives

Between October 2001 and April 2002 the works contracts for the Faido/Bodio, Amsteg and Sedrun part-sections were signed. This stage was reached for the Erstfeld part-section in March 2007.

In this context the defining of risks between the client and contractor took place in keeping with the regulations contained in the code SIA 198 (1993). According to this code, the client is responsible for ground risks outside the contractually agreed limits. The contractor bears the ground risk within the contractually agreed limits and particularly the risk for his means (equipment) and methods applied.

After completion of the access work the main drives began as from spring 2002. If the selected driving methods are now assessed regarding their suitability, the following 2 questions have to be answered:

1. Did the ground conditions correspond to the contractually agreed on ground model or rather which discrepancies were evident?
2. Did the means and methods applied fulfil the expectations set in them?

fahren bezüglich ihrer Eignung beurteilt werden sollen, gilt es folgende 2 Fragen zu beantworten:

1. Entsprach der Baugrund dem vertraglich vereinbarten Baugrundmodell bzw. welche Abweichungen gab es?
2. Haben die eingesetzten Mittel und Methoden die in sie gesteckten Erwartungen erfüllt?

3.1 Änderungen des Baugrundes und deren Auswirkungen

Das Baugrundmodell hat sich während der Vortriebsarbeiten grundsätzlich als richtig erwiesen. Trotzdem gibt es im geologischen Befundprofil (Bild 6) einige wesentliche Abweichungen gegenüber dem Prognoseprofil 1999 (Bild 2) zu vermerken.

Die wohl markantesten Änderungen sind das wesentlich längere Auftreten der Medelser Granite und das flachere Einfallen der Urseren-Garvera-Zone. In jedem Teilabschnitt ist über weitere Abweichungen zu berichten, welche nicht direkt aus dem Längenprofil erkennbar sind. Tabelle 3 gibt einen generellen Überblick über die angetroffenen Phänomene und deren Auswirkungen.

Die grössten Auswirkungen sind im Bereich der Multifunktionsstelle Faido entstanden. 27 Monate Bauzeitverlängerung und Mehraufwendungen von über 500 Mio. CHF waren nötig, um den dort unerwartet schwierigen Baugrund zu beherrschen [7].

Alle übrigen Abweichungen sind im Bereich der Prognosegenauigkeit angesiedelt. Positive und negative Kostenentwicklungen kompensieren sich dabei zum Teil. Bezogen auf die ursprüngliche Bestellsumme der Hauptlose im Betrag von 3675.5 Mio. CHF machen die baugrundbedingten Mehraufwendungen (unter Einschluss des Sonderereignisses MFS Faido) rund 20 % aus.

Die Verzögerungen bei den Vortrieben Bodio und Faido und die zu Beginn sehr günstige Entwicklung der Vortriebe von

3.1 Changes in the ground and their effects

The final ground model turned out to be essentially correct during the driving activities. Nonetheless, there are a number of basic discrepancies as opposed to the prognosis profile (Fig. 2) in the geological report assessment (Fig. 6).

The most significant changes are the considerably longer presence of the Medelser granites and the manner in which the Urseren Garvera Zone dips more flatly. There are further discrepancies to be reported on in each part-section, which are not directly discernible from the longitudinal profile. Table 3 provides a general survey of the phenomena encountered and their effects.

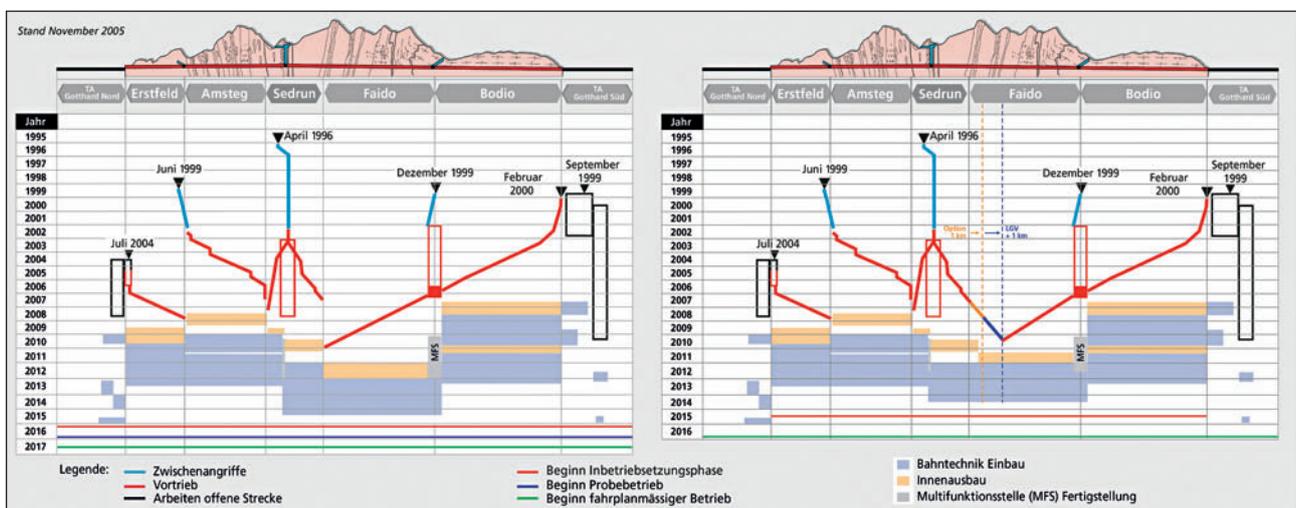
The greatest effects occurred at the Faido multi-function station. The construction period extended by 27 months and additional costs in excess of CHF 500 million were necessary to master the unexpectedly tricky subsoil there [7].

All other discrepancies are within the bounds of prognosis accuracy. Positive and negative cost developments partially compensate one another in the process. Related to the original invoice sum of CHF 3675.5 million, the added expenditure caused by the subsoil (including the Faido MFS special incident) accounts for some 20 %.

The delays in the Bodio and Faido drives and the extremely favourable initial development of the southbound drives in Sedrun resulted in the section boundary Sedrun/Faido being shifted southwards in 2 steps by 1763 m (eastern bore) and 2282 m (western bore). This deadline-securing measure was one of the key elements which will enable the entire system to be commissioned towards the end of 2016 [12] (Fig. 7).

3.2 TBM Drives

The contractors decided independent of each other to excavate their sections with practically identical, open Gripper TBMs manufactured by Herrenknecht Ltd. (Tab. 4). The



7 Terminprognosen 2005, links ohne Verschiebung der Losgrenze Sedrun/Faido und rechts mit Verschiebung der Losgrenze
Scheduling prognoses 2005, on the left without relocating the Sedrun/Faido boundary limit and on the right after relocating the boundary

Teilabschnitt	Beschreibung der Abweichung	Objekt	km	Auswirkungen			Ref.
				generell	auf Bauzeit	auf Kosten [CHF]	
Erstfeld	erhöhte Wasserzutritte	EST Ost EST West	ab km 104 500 ab km 204 500	zweischaliger Ausbau der Verzweigungsbawerke UBLA	keine	+38 Mio	[6]
	Intschizone, geringere bautechnische Relevanz	EST Ost EST West	110 250 210 250	kein Stillstand, geringe Vortriebsbehinderung	-3 Monate	-15 Mio	
Amsteg	hydrothermal zersetztes Gebirge nach Störzone A13	EST West	215 114	Stillstand, Injektionskampagne, Gegenvortrieb	+5.5 Monate	+10 Mio	[3]
	Clavianev-Zone bautechnisch günstiger	EST Ost Nord EST West Nord	118 868 – 118 988 218 875 – 218 995	geringere Vortriebsbehinderung	-9 Monate	-5 Mio	
Sedrun	Urseren-Garvera-Zone (UGZ) kürzer (305 m statt 510 m) und bautechnisch günstiger	MFS EST Ost Süd EST West Süd	122 360 – 122 680 222 390 – 222 690	kein Antreffen Urseren-Garvera-Zone in MFS geringere Vortriebsbehinderung in EST	-12 Monate	-25 Mio	
	Wasserzutritt bei Störzone 44 im Bereich Staumauer Nalps	EST West	223 713	Stillstand mit Injektionskampagne	+3.5 Monate	+15 Mio	[4]
Faïdo	Störzone 50/51 stärker ausgeprägt (150 m lang, druckhaft) extreme plastische Deformationen, bis 1.30 m Sohlhebung	EST Ost Süd EST West Süd	125 421 225 420	starke Vortriebsbehinderungen Nachprofilierung auf ca. 70 m Länge pro Röhre	+7.5 Monate +3 Monate	+50 Mio	[5], [6]
	unerwartetes Auftreten von spitzwinklig schneidenden Störzonen mit hoher bautechnischer Relevanz: – druckhafte Erscheinungen – Bergschlag/Mikrobeben	MFS	239 500 139 300	extreme Vortriebsbehinderungen während Jahren – Nachprofilierungen auf total ca. 200 m Länge nötig – Nachsicherungen infolge Bergschlagereignissen auf mehrere 100 m	+27 Monate	> +500 Mio	[7], [8]
Faïdo	Chiera-Symform weiter nördlich druckhaftes Verhalten der Lucomagno-Gneise	EST Ost EST West	138 500 238 480	starke Vortriebsbehinderungen, jedoch nie ein Stillstand! Nachprofilierungen nötig (227 m Ostrohre, 323 m Westrohre)	+3 Monate	+49 Mio	[9]
	(harter) Medeliser Granit tritt viel länger auf als prognostiziert Störzone in Tenelinzone von hoher bautechnischer Relevanz	EST Ost EST West EST West	130 765 – 130 351 230 342 – 232 779 230 311	erhöhter Aufwand für Unterhalt und Reparaturen zusätzliche TBM-Revisionen nötig Stillstand, Injektionskampagne, Gegenvortrieb	+3 Monate +4.5 Monate	+9 Mio +13 Mio	
Bodio	unerwartetes Auftreten der langen horizontalen Störzone ab Tm 2705	EST Ost EST West	154 125 254 280	Vortriebsbehinderung	+4 Monate +1 Monat	+7 Mio	[10]
	druckhaftes Verhalten der Leventinagneise gegen Losgrenze hin	EST Ost EST West	143 370 243 240	Vortriebsbehinderung, Nachprofilieren auf 635 m Länge Vortriebsbehinderung, Nachprofilieren auf 319 m Länge	+2 Monate	+25 Mio	

Tabelle 3 Abweichungen des Baugrundes von der Prognose 1999 und deren generellen Auswirkungen (EST = Einspurttunnel, MFS = Multifunktionsstelle)

Part-section	Description of discrepancy	Object	km	Effects			Ref.
				in general	on construction time	on costs [CHF]	
Eristfeld	increased water ingresses	EST East EST West	from km 104,500 from km 204,500	2-shell support for forks UBLA	none	+38 Mio	[6]
	Intschi Zone, less construction technical relevance	EST East EST West	110,250 210,250	no standstill, driving slightly hampered	-3 months	-15 Mio	
	hydrothermal decomposed rock after fault zone A13	EST West	215,114	standstill, grouting campaign counter-drive	+5.5 months	+10 Mio	[3]
Amsteg	Clavaniev Zone better in construction technical terms	EST East North EST West North	118,868 – 118,988 218,875 – 218,995	geringere Vortriebsbehinderung	-9 months	-5 Mio	
	Urseren-Garvera Zone (UGZ) (305 m instead of 550 m) and better in construction technical terms	MFS EST East South EST West South	122,360 – 122,680 222,390 – 222,690	no Urseren-Garvera Zone encountered in MFS driving very slightly hampered	-12 months	-25 Mio	
	ingressing water at fault zone 44 at Nalps dam	EST West	223,713	standstill with grouting campaign	+3.5 months	+15 Mio	[4]
Sedrun	fault zone 50/51 more pronounced (160 m long, squeezing)	EST East South EST West South	125,421 225,420	driving seriously hampered	+7.5 months	+50 Mio	[5], [6]
	extreme plastic deformations up to 1.30 m heave in floor			reworking over ca. 70 m per bore	+3 months		
	acute-angled fault zones encountered unexpectedly with high relevance on the excavation process – squeezing phenomena – rockfall, micro seismic activity	MFS	239,500 139,300	driving extremely hampered for years – had to be reworked over a total of ca. 200 m – resecured after rockfall incidents over several 100 m	+27 months	> +500 Mio	[7], [8]
Faido	Chièra Synform further north squeezing behaviour of the Lucomagno gneisses	EST East EST West	138,500 238,480	driving seriously hampered but no standstill reworking needed (227 m in east and 323 m in west bore)	+3 months	+49 Mio	[9]
	(hard) Medelser granite occurred longer than forecast fault zone in Tenelin Zone with high construction technical relevance	EST East EST West EST West	130,765 – 130,351 230,342 – 232,779 230,311	increased need for maintenance and repair extra TBM inspections needed standstill, grouting campaign, counter-drive	+3 months +4.5 months	+9 Mio +13 Mio	
	unexpected appearance of long horizontal fault zone at Tm 2705	EST East EST West	154,125 254,280	driving hampered	+4 months +1 month	+7 Mio	[10]
Bodio	squeezing behaviour of Levantine gneisses towards section boundary	EST East EST West	143,370 243,240	driving hampered, reworked over 635 m driving hampered, reworked over 319 m	+2 months	+25 Mio	

Table 3 Discrepancies of the ground from the 1999 prognosis and their general effects (EST = single-track tunnel, MFS = Multi-Function Station)

	Bodio	Faido	Amsteg/Erstfeld
Bohrdurchmesser	8.83–8.89 m	9.43–9.53 m	9.48–9.58 m
Anzahl Meissel/Typ	57 Stk./17"	66 Stk./17"	62 Stk./17"
Bohrkopfantriebsleistung	3500 kW (10 Motoren)	3500 kW (10 Motoren)	3500 kW (10 Motoren)
Drehmoment	8517 kNm	8517 kNm	8526 kNm
Bohrkopfdrehzahl	variabel 0–6 U/min	variabel 0–6 U/min	variabel 0–6 U/min
Total installierte Leistung	7800 kVA	7800 kVA	7800 kVA
Vorschubkraft	max. 27 500 kN	max. 27 500 kN	max. 25 000 kN
Gesamtgewicht Anlage	ca. 2500 t (TBM 1300 t)	ca. 3000 t (TBM 1300 t)	3200 t (TBM 1300 t)
Gesamtlänge Anlage	402 m	450 m	433 m
Hersteller TBM	Herrenknecht AG (D)	Herrenknecht AG (D)	Herrenknecht AG (D)
Hersteller Nachläufer	Herrenknecht AG (D)	Herrenknecht AG (D)	ROWA Engineering AG (CH)

Tabelle 4 Maschinendaten TBM

	Bodio	Faido	Amsteg/Erstfeld
Bore diameter	8.83–8.89 m	9.43–9.53 m	9.48–9.58 m
No. cutter discs/type	57 Stk./17"	66 Stk./17"	62 Stk./17"
Cutterhead power	3500 kW (10 motors)	3500 kW (10 motors)	3500 kW (10 motors)
Torque	8517 kNm	8517 kNm	8526 kNm
Number of revolutions	variable 0–6 rpm	variable 0–6 rpm	variable 0–6 rpm
Total installed capacity	7800 kVA	7800 kVA	7800 kVA
Thrusting force	max. 27,500 kN	max. 27,500 kN	max. 25,000 kN
Total weight of installation	approx. 2500 t (TBM 1300 t)	approx. 3000 t (TBM 1300 t)	3200 t (TBM 1300 t)
Total length of installation	402 m	450 m	433 m
TBM manufacturer	Herrenknecht AG (D)	Herrenknecht AG (D)	Herrenknecht AG (D)
Back-up manufacturer	Herrenknecht AG (D)	Herrenknecht AG (D)	ROWA Engineering AG (CH)

Table 4 TBM machine data

Sedrun in Richtung Süden führten schliesslich dazu, dass die Losgrenze Sedrun/Faido in 2 Schritten um 1763 m (Oströhre) und 2282 m (Weströhre) nach Süden verschoben wurde. Diese terminsichernde Massnahme war eines der Schlüsselemente, welches die Inbetriebsetzung des Gesamtsystems per Ende 2016 ermöglicht [12] (Bild 7).

3.2 TBM-Vortriebe

Die Unternehmer entschieden sich unabhängig voneinander dazu, ihre Teilabschnitte mit nahezu baugleichen, offenen Gripper-TBM der Firma Herrenknecht AG aufzufahren (Tab. 4). Die Nachläuferkonstruktion für Amsteg/Erstfeld wurde von ROWA Engineering AG entwickelt, während die Konstruktion für Bodio/Faido von der Firma Herrenknecht AG stammte.

Tabelle 5 zeigt einige generelle Daten bezüglich der einzelnen TBM-Vortriebe. Dabei gilt es anzumerken, dass die ausgewiesenen Stillstandstage mehrheitlich auf die Folgen des geänderten Baugrundverhaltens zurückzuführen sind, sei es wegen Störzonen oder aber wegen erhöhtem Unterhalt wie zum Beispiel als Folge des wesentlich längeren Auftretens des Medelser-Granits im Teilabschnitt Faido. Es gab keine Stillstän-

back-up system for Amsteg/Erstfeld was designed by ROWA Engineering AG whereas the system for Bodio/Faido originated from Herrenknecht Ltd.

Table 5 displays a number of general data relating to the individual TBM drives. It should be observed in this context that the number of standstill days mainly resulted from the consequences of the changed ground conditions either owing to fault zones or to increased maintenance on account of the longer than expected presence of Medelser granite in the Faido part-section. No standstills did result on account of faulty TBM elements in this section. However, the floor shoe was damaged owing to squeezing conditions in the Bodio part-section, which resulted in a TBM standstill. Furthermore, in some cases there were flaws in the mucking system (belt conveyor cracks), which caused standstills in the range of hours.

Figure 8 presents a survey of the chronological development of the average daily rate attained per month. Here it should be taken into account that calculating the average rate since starting up involves the start of the TBM-drive with

de wegen eines Versagens von Elementen der TBM. Allerdings kam es im Teilabschnitt Bodio wegen druckhafter Verhältnisse zu einer Beschädigung des Sohlschuhs und schliesslich zu einem TBM-Stillstand. Zudem kam es fallweise zu Störungen im Abraumsystem (Förderbandrisse), welche Stillstände im Bereich von Stunden verursachten.

Bild 8 gibt eine Übersicht über die zeitliche Entwicklung der mittleren Tagesleistung pro Monat. Dabei ist zu berücksichtigen, dass auf der Nordseite die mittlere Leistung ab Drehbeginn mit der Rumpfmachine gerechnet wird, d.h. der Stillstand wegen des Einbaus des Nachläufers wirkt sich negativ auf die rechnerische Vortriebsleistung aus.

Als Gesamtbilanz darf gefolgert werden, dass die eingesetzte TBM-Technik bei vergleichbaren Baugrundverhältnissen direkt vergleichbare Vortriebsleistungen ergab. Meistens waren die Bohrgeschwindigkeit und der Zeitbedarf für den Einbau der Felssicherung leistungsbestimmend. Beide Konsortien, die AGN (auf der Nordseite) und die Arge TAT (auf der Südseite) haben ihre enormen logistischen Herausforderungen zur Ver- und Entsorgung der Hochleistungsvortriebe bei teilweise sehr langen Transportdistanzen (TA Amsteg: bis 13 km Förderbandschutterung, TA Faido: bis 28 km Schienentransport) sehr gut gemeistert.

the incomplete machine on the north side, i.e. the standstill on account of installing the back-up system exerts a negative effect on the calculated rate of advance.

All in all it can be assumed that the applied TBM technology resulted in directly comparable driving rates for comparable ground conditions. In most cases, the boring speed and the time needed to install the rock support governed performance. Both joint ventures, the AGN (on the north side) and the TAT JV (on the south side), mastered their enormous logistical challenges relating to supply and disposal of the high-performance drives given in some cases extremely lengthy transport distances (Amsteg part-section: up to 13 km belt conveyor mucking, Faido part-section: up to 28 km rail transport) extremely well.

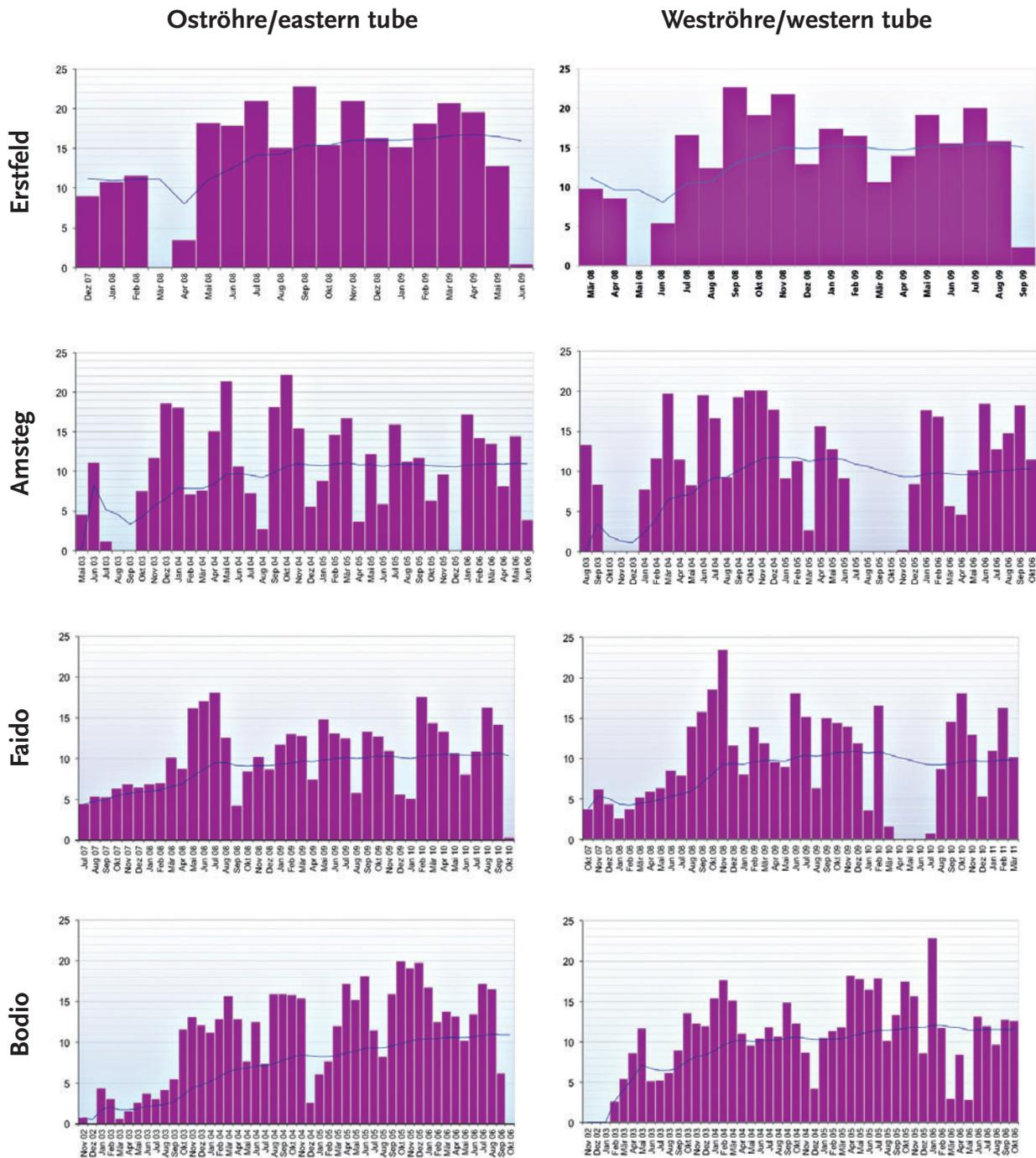
The installations and the operation of the driving sites absolutely justified the high expectations set in them by the client and the project compilers during the tender design phase. The high availability of the applied machines represented a positive experience for all those involved in the project. Considering the significant residual risks arising from the tender design phase, this statement is to be weighted accordingly high.

Teilabschnitt	Röhre	Länge [m]	Vortrieb				Mittlere Leistung		
			Beginn	Ende	Vortriebs-tage	Stillstands-tage	nur Vortrieb [m/AT]	Total [m/AT]	Δ [%]
Erstfeld	Ost	7150	04.12.2007	16.06.2009	392	168	18.24	12.77	70.0 %
	West	7116	16.03.2008	16.09.2009	400	149	17.79	12.96	72.9 %
Amsteg	Ost	10 723	22.05.2003	05.06.2006	749	361	14.32	9.66	67.5 %
	West	10 703	08.08.2003	09.10.2006	676	482	15.83	9.24	58.4 %
Faido	Ost	11 134	07.07.2007	15.10.2010	910	286	12.24	9.31	76.1 %
	West	11 088	15.10.2007	23.03.2011	894	361	12.40	8.83	71.2 %
Bodio	Ost	13 450	01.11.2002	06.09.2006	1149	256	11.71	9.57	81.8 %
	West	14 113	01.02.2003	26.10.2006	1114	249	12.67	10.35	81.7 %

Table 5 Charakteristische Daten TBM-Vortriebe

Part-section	Tube	Length [m]	Drive				Average rate		
			Start	Finish	Driving days	Standstill days	Only drive [m/WD]	Total [m/WD]	Δ [%]
Erstfeld	Ost	7150	04.12.2007	16.06.2009	392	168	18.24	12.77	70.0 %
	West	7116	16.03.2008	16.09.2009	400	149	17.79	12.96	72.9 %
Amsteg	Ost	10 723	22.05.2003	05.06.2006	749	361	14.32	9.66	67.5 %
	West	10 703	08.08.2003	09.10.2006	676	482	15.83	9.24	58.4 %
Faido	Ost	11 134	07.07.2007	15.10.2010	910	286	12.24	9.31	76.1 %
	West	11 088	15.10.2007	23.03.2011	894	361	12.40	8.83	71.2 %
Bodio	Ost	13 450	01.11.2002	06.09.2006	1149	256	11.71	9.57	81.8 %
	West	14 113	01.02.2003	26.10.2006	1114	249	12.67	10.35	81.7 %

Table 5 Characteristic data for TBM drives



8 Vergleich der mittleren Tagesleistungen pro Monat (m/AT) für die TBM-Vortriebe (blaue Linie: gleitendes Mittel)
 Comparison of the average rates of advance per month (m/working day) for the TBM drives (blue line: moving average)

Die Installationen und der Betrieb der Vortriebsbaustellen wurden den hohen Erwartungen des Bauherrn und der Projektverfasser aus der Phase des Bauprojektes absolut gerecht. Die hohe Verfügbarkeit der eingesetzten Maschinen war für alle am Projekt Beteiligten eine positive Erfahrung. In Anbetracht der nicht unerheblichen Restrisiken aus der Bauprojektphase ist diese Aussage entsprechend hoch zu gewichten.

3.3 Conventional drives

The conventional drives were applied particularly for the access tunnels, within the entire Sedrun part-section (including MFS), in the portal zones and in the Faido MFS.

3.3.1 Sedrun and Faido multi-function stations

The 2 multi-function stations in Sedrun and Faido show a largely similar layout – with a centrally arranged cross cavern

3.3 Konventionelle Vortriebe

Die konventionellen Vortriebe kamen vor allem im Bereich der Zugangsstollen, im gesamten Teilabschnitt Sedrun (inkl. MFS), in den Portalbereichen und in der MFS Faido zum Einsatz.

3.3.1 Multifunktionsstellen Sedrun und Faido

Die beiden Multifunktionsstellen in Sedrun und in Faido weisen ein weitgehend ähnliches Layout auf, mit einer zentral angeordneten Querkaverne zur Aufnahme der bahntechnischen Installationen. Nördlich und südlich dieser Querkavernen sind die Verbindungstunnel zur Überleitung von der West- in die Oströhre und umgekehrt angeordnet (Spurwechsel genannt). Im Bereich der Abzweigung der Verbindungstunnel waren die grössten Querschnitte mit über 320 m² (MFS Faido) aufzufahren.

Das System der Multifunktionsstelle enthält je 1 Nothaltestelle pro Einspurstunnelröhre, bestehend aus je 6 Verbindungsstollen und dem Seitenstollen als Fluchtweg. Ergänzt wird das System mit einem Brandabluftsystem, bestehend aus Abluftstollen und 7 Brandabluftschächten pro Nothaltestelle.

Die MFS Sedrun mit einer Systemlänge von 8460 m und einem Ausbruchvolumen von 393 000 m³ (fest) wurde problemlos zwischen November 2002 und Januar 2007 aufgeföhren. Mit teilweise bis zu 9 parallel betriebenen Arbeitsstellen wurden von der Arbeitsgemeinschaft Transco Sedrun im Jahr 2004 regelmässig Monatsleistungen von 500 bis 700 m Ausbruch erreicht.

Ganz anders präsentierte sich die Situation in der MFS Faido mit einer ursprünglich bestellten Systemlänge von 5700 m. Praktisch vom ersten bis zum letzten Vortriebstag mussten erhebliche und unerwartete Schwierigkeiten gemeistert werden. Der vorgängig schon dreimal problemlos durchhörterte Übergang von den Leventinagneisen zu den Lucomagnagneisen erwies sich im Fall der MFS Faido als äusserst schwierig und war geprägt von 2 den Grundriss der MFS spitzwinklig schneidenden ausgedehnten Störzonen. Das Gebirge erwies sich nicht wie erwartet als standfest, sondern als äusserst druckhaft. In einzelnen Zonen war ein hohes Geföhrdungspotenzial für Bergschlag vorhanden. Vereinzelt traten auch Mikrobeben auf [8].

Das Layout der MFS Faido musste bei laufendem Baubetrieb angepasst werden. Die Spurwechsel und die südliche Nothaltestelle wurden 610 m in Richtung Süden verschoben, was zu einer Vergrösserung des Ausbruchvolumens auf ca. 500 000 m³ (fest) führte.

Mit dieser Umdisposition wurde verhindert, dass die grössten Querschnitte in den Störzonenbereich zu liegen kommen. Die Projektanpassungen mussten parallel zu den bereits laufenden Vortriebsarbeiten vorgenommen werden und konnten zeitgerecht abgeschlossen werden [7] (Bild 9).

Auf einer Gesamtlänge von ca. 200 m musste der ausgebrochene Querschnitt wegen der starken Druckhaftigkeit

to accommodate the railway infrastructure. To the north and south of these cross caverns there are the connecting tunnels to pass from the western to the eastern bore, and vice versa (crossovers). The biggest cross-sections in excess of 320 m² (Faido MFS) had to be driven where the connecting tunnels forked.

The MFS system consists of an emergency station per single-track bore, each comprising 6 connecting tunnels and the side tunnel as an escapeway. The system is completed by a fire exhaust system, comprising exhaust tunnels and 7 exhaust air shafts per emergency halt.

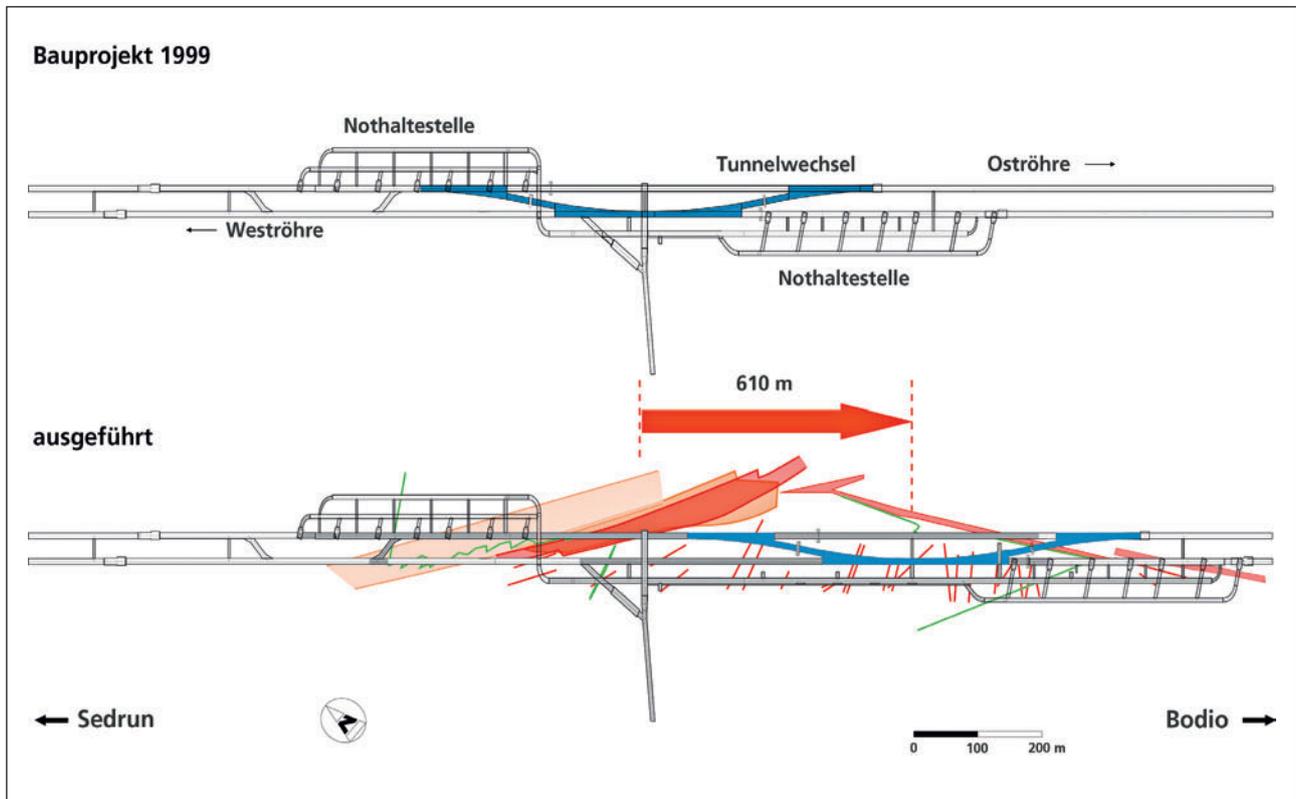
The Sedrun MFS with a system length of 8460 m and an excavated volume of 393,000 m³ (solid) was driven without any problem between November 2002 and January 2007. With in some cases up to 9 parallel operational working points, regular monthly rates of 500 to 700 m were excavated in 2004 by the Transco Sedrun JV.

The situation in the Faido MFS with an originally projected system length of 5700 m turned out to be a quite different one. Practically from the first to the last day of driving, substantial and unexpected difficulties had to be mastered. The transition from the Leventina gneisses to the Lucomagno gneisses, which had been achieved without any problem 3 times before, turned out to be extremely tricky in the case of the Faido MFS and was characterised by 2 extensive fault zones cutting the layout of the MFS at an acute angle. Unlike the prediction, the rock did not emerge to be stable but extremely squeezing. In certain zones there was a high potential of rockfall. Sporadic micro seismic activity also occurred [8].

The Faido MFS layout had to be adapted during ongoing construction activities. The crossover and the southern emergency station were relocated 610 m towards the south, resulting in increasing the excavated volume to approximately 500,000 m³ (solid).

This change of plan meant that the biggest cross-sections were prevented from being located in the fault zone area. These design changes had to be carried out by the engineer parallel to the ongoing driving activities and were finally completed on time [7] (Fig. 9).

Over a total length of roughly 200 m the excavated cross-section had to be reworked on account of the pronounced degree of squeezing rock. In addition, the damage caused by rockfall phenomena over several hundred metres had to be repaired. As a result, instead of 3 driving points 7 were called for in order to ensure that the start of the Faido TBM drives were not delayed. All these difficulties resulted in a 27-month-long delay in construction time and additional financial outlay of more than CHF 500 million (Tab. 6).



9 MFS Faido, angepasstes Layout und Lage der Störzonen
Faido MFS, adapted lay-out and location of the fault zones

nachprofiliert werden. Zudem mussten die Schäden aus den Bergschlagerscheinungen über mehrere 100 m behoben werden. Anstelle von geplanten 3 Vortriebsstellen waren deren 7 erforderlich, um die TBM-Vortriebe Faido terminlich nicht zu verzögern. Alle diese Schwierigkeiten hatten eine Bauzeitverlängerung von 27 Monaten und einen zusätzlichen finanziellen Aufwand von mehr als 500 Mio. CHF zur Folge (Tab. 6).

3.3.2 Sedrun North heading

Penetrating the 1.15 km long Tavetsch Intermediate Massif (TZM) North emerged to be a special challenge for the overall scheme. Given overburdens of up to 900 m, highly squeezing rock had to be penetrated, a task for which no directly comparable experiences could be made use of.

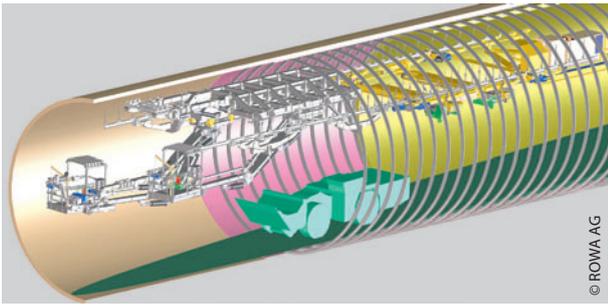
A promising, novel solution was developed based on the full excavation method with face anchoring devised in Italy

Multifunktionsstelle		Gesamtlänge [m]	Beginn	Ende	Vortriebsmonate		
					effektiv	geplant	Abweichung
Sedrun	Werkvertrag effektiv	7700	01.10.2002	30.06.2006		45	
		8460	14.10.2002	28.02.2007	52		+ 7
Faido	Werkvertrag effektiv	5700	04.03.2002	25.11.2004		33	
		9500	04.03.2002	29.03.2007	61		+ 27

Tabelle 6 Vortriebsdaten Multifunktionsstellen

Multi-function station		Total length [m]	Start	Finish	Driving months		
					effective	planned	deviation
Sedrun	works contract effective	7700	01.10.2002	30.06.2006		45	
		8460	14.10.2002	28.02.2007	52		+ 7
Faido	works contract effective	5700	04.03.2002	25.11.2004		33	
		9500	04.03.2002	29.03.2007	61		+ 27

Table 6 Driving data for the multi-function stations



10a+b Installationskonzept/Vortrieb Sedrun Nord [10]
Installation concept/Sedrun North drive [10]

3.3.2 Streckenvortrieb Sedrun Nord

Eine spezielle Herausforderung für das Gesamtprojekt stellte die Durchörterung des 1.15 km langen Tavetscher Zwischenmassivs Nord dar. Bei Überlagerungen bis 900 m musste stark druckhaftes Gebirge durchfahren werden, eine Aufgabenstellung, bei welcher auf keine direkt vergleichbaren Erfahrungen zurückgegriffen werden konnte.

Ausgehend von der in Italien entwickelten Vorgehensweise des Vollausschlags mit Ortbrustankerung in Kombination mit dem Einsatz von Mitteln des Bergbaus (deformierbare TH-Stahlbogenelemente) wurde eine vielversprechende, neuartige Lösung entwickelt [10]. Für den Vortrieb im TZM Nord wurde keine vollständig ausgearbeitete Unternehmensvariante eingereicht. Während mehr als 3 Jahren wurde das im Zuge der Ausschreibung vom Unternehmer übernommene Konzept im täglichen Vortrieb mit Erfolg eingesetzt. Dabei wurde die vertraglich vereinbarte Vortriebsleistung von 1.1 m/AT mit hoher Regelmässigkeit erreicht. Die Erfüllung der Termin-, Kosten- und Qualitätsziele bestätigen die in der Planung getroffenen Annahmen und es kann dazu folgende Bilanz gezogen werden:

- Das Terminziel wurde mit einem um 9 Monate früheren Durchschlag übertroffen.
- Das Kostenziel wurde erreicht.
- Die Vortriebsleistungen wiesen nur geringe Schwankungen auf.
- Nachprofilierungen wurden auf den insgesamt 2 km langen Tunnelvortrieben nirgends notwendig. Dies ist als starkes

combined with applying tools used in mining (deformable TH steel arch elements) [10]. No complete contractor's variant was presented for driving in the TZM North. For over 3 years the concept taken over by the contractor within the course of the tendering process was applied successfully on a daily basis. In this context the contractually agreed rate of advance amounting to 1.1 m/WD was achieved regularly. The fulfilment of the scheduling, cost and quality goals confirm the assumptions made at the planning stage thus enabling the following balance to be drawn:

- The deadline target was more than met with the breakthrough taking place 9 months earlier than scheduled.
- The cost target was attained.
- The rates of advance revealed only slight deviations.
- Reworking operations were unnecessary along the altogether 2 km long tunnel drives. This can be evaluated as a strong indication of the conceptual soundness of the technical approach to tunnelling (Figs. 10a + b).

3.3.3 Sedrun South heading

For the Sedrun South heading it was believed that the steeply inclined Urseren Garvera Zone (UGZ) known from the Gotthard Road Tunnel would be encountered with a thickness of 600 m. In actual fact, the UGZ possesses a smaller incline and tapers out the deeper it becomes. This meant that the UGZ was encountered later and over a shorter distance. Furthermore, the expected squeezing behaviour did not occur so that the special driving installation made available here in similar fashion to the northern drive was never applied. The zone was penetrated at a rate of 3 to 4 m per working day instead of 1 m – something resulting in an advantage of several months. This time advantage was subsequently largely to disappear, however, when the fault zones 44 (western bore) and 50/50b were penetrated. Fault zone 44 was a water-bearing fissured zone, in the case of which the ingressing water in the influence zone of the nearby Nalps dam had to be reduced to a predefined amount by means of extensive grouting measures (Tab. 7).

Fault zone 50/50b emerged to be extremely sophisticated, with the prognosed sequence of 3 to 5 m thick fault zones revealing itself at tunnel level over a 120 m long route with rock behaviour resembling the TZM North, albeit with twice the overburden height [6]. Major profile deformations and floor heaves resulted so that this zone had to be reworked, emerging as the only part of the Sedrun part-section that had to be subjected to this treatment (Fig. 11).

3.4 Fault zones

Over the entire length of the GBT more than 160 fault zones from surface investigations and other underground structures were identified and accordingly also suspected of being at tunnel level. Roughly 30 % of the identified fault zones were seen as relevant for the excavation, i.e. either causing a considerable reduction in the rates of advance or standstills. In all part-sections the works contract foresaw at least one standstill period lasting several weeks to overcome

Teilabschnitt	Amsteg	Sedrun	Faido
Beschrieb der Störzone	hydrothermal zersetztes Gebirge bei Tkm 215.114	Störzone 44, ca. 15 m dicke wasserführende Kluffzone bei Tkm 223 713	Niederbruch Tenelinzone bei Tkm 230.311, 6 m dicke steilstehende Störzone aus Kakeriten und Kataklastiten
Generelle Bauhilfsmassnahme	– gebirgsverbessernde Injektionen – Gegenvortrieb ab Oströhre	– Kontaktinjektionen – abdichtende Injektionen	– gebirgsverbessernde Injektionen – Gegenvortrieb ab Oströhre
Erkundungsbohrungen – Schlagbohrungen – Kernbohrungen	545 m 365 m	keine 174 m	1495 m 198 m
Injektionsbohrungen	2844 m	– Kontaktinjektionen 3900 m – abdichtende Injektionen 8900 m	3820 m
Gel-Injektionen	73 100 kg	keine	113 000 kg
Zement-Injektionen	93 500 kg	– Kontaktinjektionen 70 700 kg – abdichtende Injektionen 103 600 kg	72 000 kg
Vortriebsstillstand	160 AT	105 AT	141 AT
geschätzte Kostenfolgen	10 Mio. CHF	15 Mio. CHF	13 Mio. CHF

Table 7 Ausgeführte Bauhilfsmassnahmen in Störzonen

Part-section	Amsteg	Sedrun	Faido
Description of fault zone	hydrothermal decomposed rock at Tkm 215,114	fault zone 44 , approx. 15 m thick zone of decomposed waterbearing jointed rock at Tkm 223,713	down break in Tenelin Zone at Tkm 230,311, 6 m thick steep-standing fault zone of kakarites and cataclastites
General construction measure	– ground-improving grouting – counter-drive from east bore	– contact grouting – sealing grouting	– ground-improving grouting – counter-drive from east bore
Exploratory drilling – percussion drilling – core drilling	545 m 365 m	none 174 m	1495 m 198 m
grout drill holes	2844 m	– contact grouting 3900 m – sealing grouting 8900 m	3820 m
Gel injections	73,100 kg	none	113,000 kg
Cement injections	93,500 kg	– contact grouting 70 700 kg – sealing grouting 103 600 kg	72,000 kg
Driving standstill (WD)	160 WD	105 WD	141 WD
approx. resultant costs	10 Mio. CHF	15 Mio. CHF	13 Mio. CHF

Table 7 Ancillary construction measures undertaken in fault zones

Zeichen der konzeptionellen Geschlossenheit des tunnelbautechnischen Konzepts zu werten (Bild 10a + b).

3.3.3 Streckenvortrieb Sedrun Süd

Für den Südvortrieb Sedrun wurde damit gerechnet, dass die vom Gotthard-Strassentunnel her bekannte Urseren-Garvera-Zone (UGZ) mit einer Mächtigkeit von 600 m steilstehend auftreten werde. Tatsächlich fällt die UGZ flacher ein und keilt gegen die Tiefe aus. Dies hatte zur Folge, dass die UGZ später und auf einer kürzeren Strecke angetroffen wurde. Zudem blieb das erwartete druckhafte Verhalten aus, sodass die für diesen Bereich analog zum Nordvortrieb vorgesehene und auf dem Platz vorhandene Spezial-Vortriebsinstallation nie zum Einsatz kam. Anstelle von 1 m Vortrieb pro Tag wurde die Zone mit 3 bis 4 m/AT durchfahren, was rasch einen mehrmonatigen Vorsprung brachte. Für die Durchörterung der

fault zones. Altogether the fault zones actually prevailed to a higher degree in all part-sections regarding both their awaited extent and effective route length (Fig. 12).

The expected standstills in fault zones actually occurred on 3 occasions. It is remarkable that in all 3 cases (2005: Amsteg, 2006: Sedrun, 2010: Faido) the follow-up western tube was affected. In each case, in fact, the eastern tube penetrated the affected zone without major difficulties in a horizontal distance of 40 m in advance.

In Amsteg the TBM was held up 10 m after the fault zone A13 in so-called hydrothermal decomposed rock. In Faido the problem was a steep kakarite/cataclastic fault zone, causing the standstill. In Sedrun in autumn 2006 the drive in the western bore had to be held up owing to water flowing into

später auftretenden Störzonen 44 (Weströhre) und 50/50b wurde der Vorsprung zum grossen Teil wieder aufgebraucht. Bei der Störzone 44 handelte es sich um eine wasserführende Kluftzone, bei welcher die Wasserzutritte wegen der Nähe zur Staumauer Nalps durch umfangreiche Injektionsmassnahmen (Tab. 7) auf ein vordefiniertes Mass reduziert werden mussten.

Als äusserst anspruchsvoll erwies sich die Störzone 50/50b, wo sich die prognostizierte Abfolge von 3 bis zu 5 m mächtigen Störzonen auf Tunnelniveau als eine 120 m lange Störzone präsentierte, mit einem Gebirgstragverhalten ähnlich dem TZM Nord, jedoch mit doppelter Überlagerungshöhe [6]. Es kam zu grossen Profildeformationen und Sohlhebungen, sodass schliesslich in dieser Zone als einzigem Ort im Teilabschnitt Sedrun nachprofiliert werden musste (Bild 11).

3.4 Störzonen

Über die gesamte Länge waren am GBT über 160 Störzonen aus den Oberflächenaufschlüssen und anderen Untertagbauwerken erkannt und dementsprechend auch auf Tunnelniveau vermutet worden. Als bautechnisch relevant, d.h. es ist mit einer erheblichen Reduktion der Vortriebsleistungen oder gar Stillständen zu rechnen, wurden anzahlmässig rund 30 % der erkannten Störzonen klassifiziert. In allen Teilabschnitten

the tunnel from a jointed rock mass in the zone of influence of the Nalps dam. Sealing injections had to be executed to reduce the ingressing water.

Figure 13 displays the applied ancillary construction measures for penetrating the fault zone in the Faido part-section's Tenelin Zone. Prior to this, a similar procedure was applied to tackle the hydrothermal decomposed rock at fault zone A13 in Amsteg.

4 Overall balance

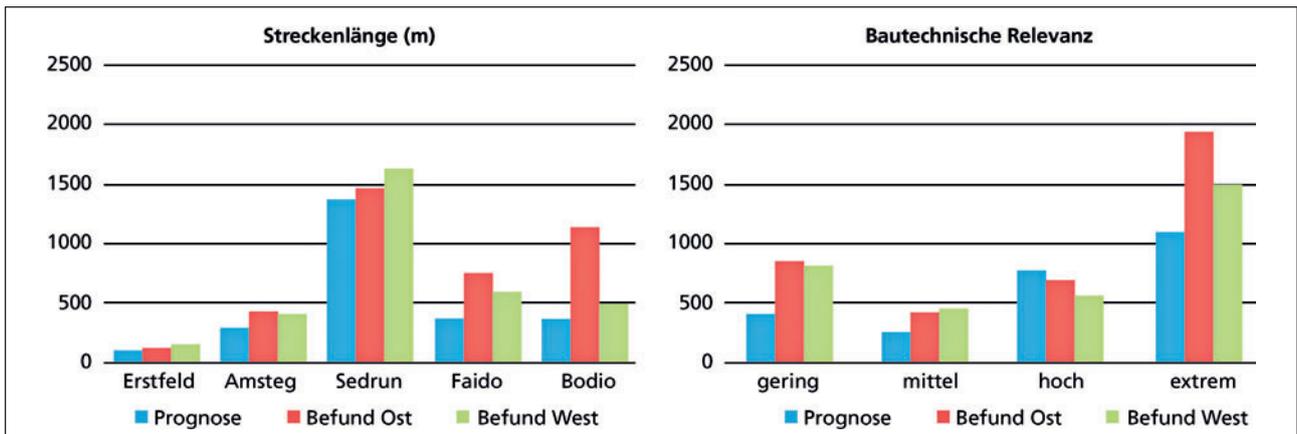
The circumstances described in the previous chapters influenced the drives. Fig. 14 contains the scheduling programme for 2002 (contract signed) and as of late 2010 (main breakthrough).

The cumulative curves in Fig. 15 present the comparison between the client's intention according to the 1999 construction programme, tender design and the effective production of the tunnel system.

The roughly 1-year delay in construction in all part-sections results from the course of events and lay within the client's



11 Nachprofilierungsarbeiten Störzone 50/50b im Vortrieb Sedrun Süd bei km 125.475
Reworking operations for fault zone 50/50b in the Sedrun South drive at km 125.475



12 Soll-Ist-Vergleich der angetroffenen Störzonen
Target-actual comparison for the encountered fault zones

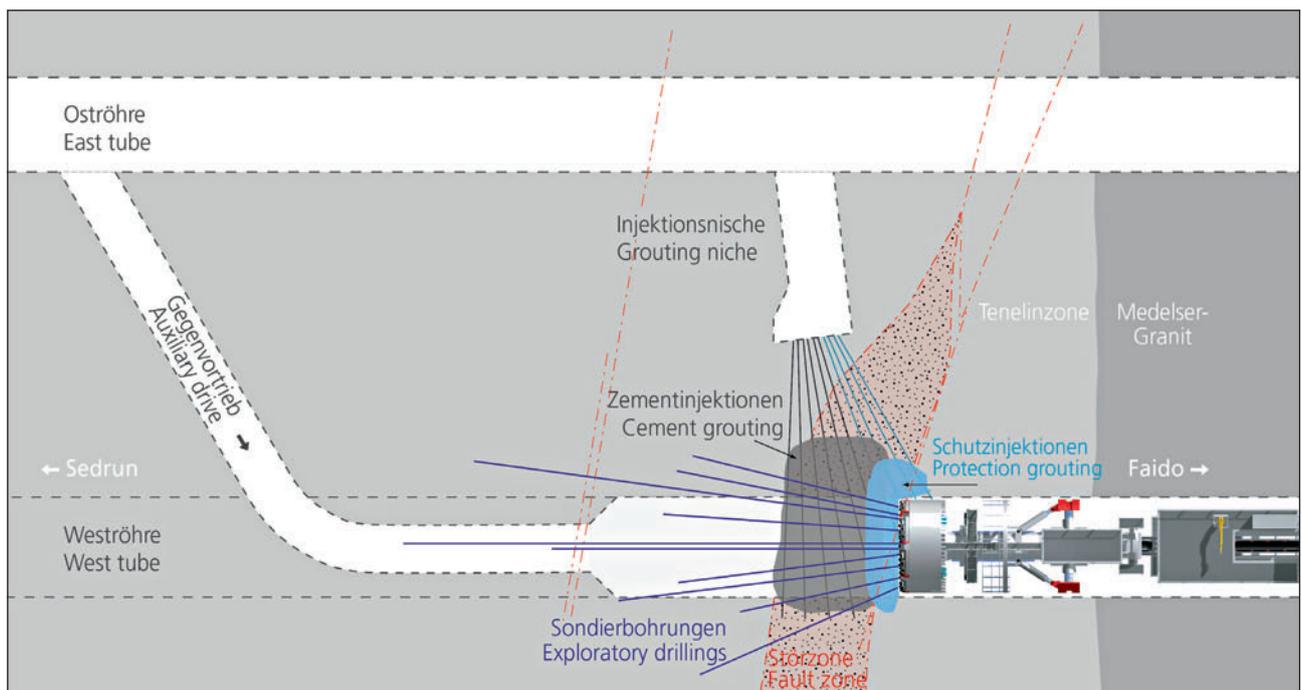
wurde im Werkvertrag mindestens ein einmaliger mehrwöchiger Stillstand zur Überwindung von Störzonen vertraglich geregelt. Insgesamt sind die Störzonen in allen Teilabschnitten bezüglich Anzahl im erwarteten Mass und bezüglich effektiver Streckenlänge sogar etwas stärker aufgetreten (Bild 12).

Die als möglich betrachteten Stillstände in Störzonen traten dann auch dreimal auf. Bemerkenswert ist, dass in allen 3 Fällen (2005: Amsteg, 2006: Sedrun, 2010: Faido) jeweils die nachlaufende Weströhre betroffen war. In jedem der Ereignisse hatte die Oströhre die betroffene Zone in 40 m Distanz jeweils ohne grössere Schwierigkeiten vorgängig passiert.

In Amsteg wurde die TBM 10 m nach der Störzone A13 in sogenannt hydrothermal zersetztem Gebirge blockiert. In Faido

sphere of risk. Further major discrepancies are registered for the Erstfeld, Sedrun and Faido part-sections. The greatest difference between the scheduled and effective start of execution in Erstfeld can be attributed to difficulties with planning permission and the awarding procedure. The speedy start and the effect of relocating the section boundary to Faido show their effect in the Sedrun part-section.

In Faido the long delay owing to difficulties with the MFS drive is discernible whereas production in Bodio roughly corresponded to the expectations for the tender design in spite of the described difficulties. The cause for delays in scheduling can, as the example of Faido shows, be attributable to the ground. But construction permission and



13 TA Faido: Durchquerung der Störzone bei km 230.311
Faido part-section: penetrating the fault zone at km 230.311

handelte es sich um eine steilstehende, kakiritisch/kataklastische Störzone, welche den Stillstand verursachte. In Sedrun musste im Herbst 2006 der Vortrieb in der Weströhre wegen Wasserzutritten zum Tunnel aus einer Kluffzone im direkten Einflussbereich der Staumauer Nalps gestoppt werden. Zur Reduktion des Wasserzutritts mussten Abdichtungsinjektionen ausgeführt werden.

Die ausgeführten Bauhilfsmassnahmen sind in **Tabelle 7** dargestellt.

Bild 13 zeigt die angewendeten Bauhilfsmassnahmen zur Durchörterung der Störzone in der Tenelinzone des Teilschnitts Faido. Ein analoges Vorgehen wurde zuvor zur Bewältigung des hydrothermal zersetzten Gebirges im Bereich der Störzone A13 in Amsteg gewählt.

4 Gesamtbilanz

Die in den vorherigen Kapiteln beschriebenen Umstände hatten Einflüsse auf die Vortriebe. In **Bild 14** sind die Terminprogramme per 2002 (Vertragsunterzeichnung) und per Ende 2010 (Hauptdurchschlag) dargestellt.

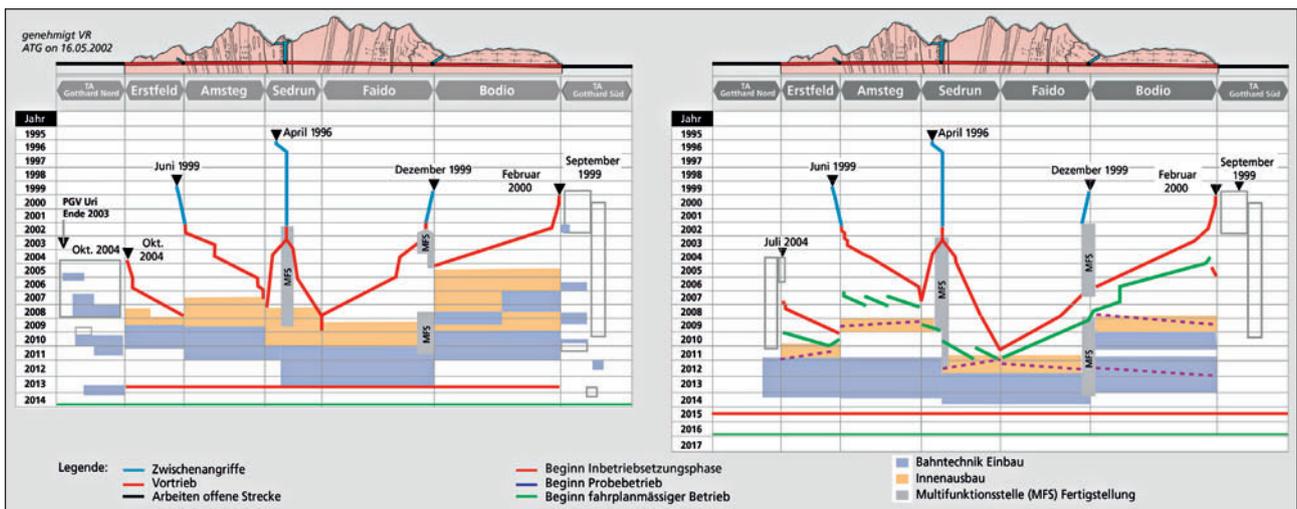
awarding proceedings can also lead to delays, as was the case in Erstfeld, for example.

In the case of the Gotthard Base Tunnel, both causes for delays resulted in deadlines being postponed for several years. Clients of future schemes must take notice of this. Delays in planning processes must be countered with the same resolve as surprises brought on by changes of the ground. Regarding the increase in costs, the consequences are after all similar regardless of the causes.

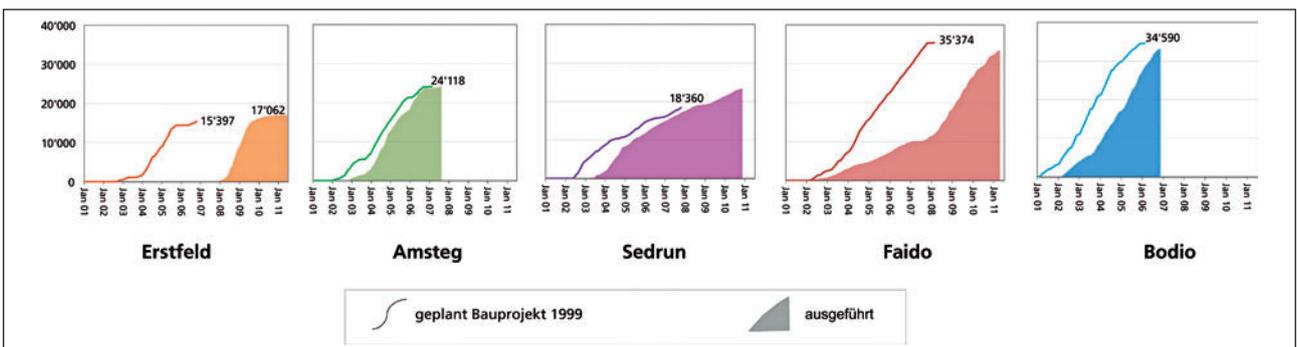
5 Conclusions

The following final balance can be drawn from the client's viewpoint:

- The applied method to select the driving method turned out to be correct. The proper method was applied in every part-section.
- The decision not to apply a double-shield machine in the Bodio part-section was correct in view of the combined section and the ground conditions encountered in Faido. If the conditions in Faido had been more favourable, this decision would have had a delaying effect.



14 Vergleich Terminprogramm 2002 und Terminprogramm Ende 2010
Comparing the 2002 time schedule and the late-2010 one



15 Soll-Ist-Vergleich Summenkurve Vortriebe (Soll = Linie (Bauprojekt 1999), Ist = Fläche)
Target-actual comparison cumulative curve for drives (target = line (1999 construction project), actual = area)

Der Vergleich zwischen der Absicht des Bauherrn gemäss Bauprojekt 1999 und der effektiven Produktion des Tunnel-systems ist in den Summenkurven von **Bild 15** dargestellt.

Die Verspätung im Baubeginn von ca. 1 Jahr in allen Teilabschnitten ist durch den Projektablauf bedingt und lag im Risikobereich des Bauherrn. Weitere grössere Abweichungen sind in den Teilabschnitten Erstfeld, Sedrun und Faido zu vermerken. Die grosse Differenz zwischen geplantem und effektivem Ausführungsbeginn ist in Erstfeld auf Schwierigkeiten im Plangenehmigungs- und Vergabeverfahren zurückzuführen. Im Teilabschnitt Sedrun sind der rasche Start und der Effekt der Losgrenzenverschiebung erkennbar.

In Faido ist die grosse Verzögerung als Folge der Schwierigkeiten im MFS Vortrieb erkennbar, während die Produktion in Bodio trotz der beschriebenen Schwierigkeiten etwa den Erwartungen aus dem Bauprojekt entsprachen. Die Ursache von Terminverzögerungen kann, wie im Beispiel Faido gezeigt, baugrundbedingt sein. Aber auch die Plangenehmigungs- und Beschaffungsverfahren können zu Verzögerungen führen, wie dies z.B. in Erstfeld der Fall war.

Im Fall des Gotthard-Basistunnels hatten beide Ursachen für Verzögerungen Terminverschiebungen im Bereich von Jahren zur Folge. Dessen müssen sich die Bauherren künftiger Projekte bewusst sein. Verzögerungen bei den Verfahren müssen mit der gleichen Entschiedenheit angegangen werden wie die Überraschungen infolge Baugrundänderungen. In Bezug auf die Erhöhung der zeitabhängigen Kosten sind die Folgen unabhängig von den Ursachen nämlich ähnlich.

5 Schlussfolgerungen

Aus der Sicht des Bauherrn kann die folgende übergeordnete Schlussbilanz gezogen werden:

- Das eingesetzte Verfahren zur Auswahl der Vortriebsmethode hat sich als richtig erwiesen. In jedem Teilabschnitt kam die richtige Vortriebsmethode zum Einsatz.
- Der Verzicht auf den Einsatz einer Doppelschildmaschine im Teilabschnitt Bodio war angesichts der Loskombination und der angetroffenen Baugrundverhältnisse in Faido richtig. Bei günstigeren Verhältnissen in Faido hätte dieser Entscheid verzögernd gewirkt.
- Die generelle Risikoabgrenzung zwischen dem Bauherrn und dem Unternehmer war von Anfang an klar. Im Tagesgeschäft der einzelnen Baustellen kam es trotzdem, bedingt durch unterschiedliche kommerzielle Interessen, zu unterschiedlichen Interpretationen und teilweise langdauernden Diskussionen.
- Die gewählten Einheitspreisverträge ermöglichten es, auch bei ausserordentlich schwierigen Verhältnissen Lösungen auf der Basis der Werkvertragsgrundlage zu finden.
- Das sachliche, lösungsorientierte und vertrauensvolle Gespräch blieb bei Problemen unterschiedlichster Art auf allen Stufen immer erhalten. Von der ersten Stunde der Projektentwicklung bis zum Durchschlag wurde von allen Projekt-

- The general break-down of risks between the client and the contractor was clear from the very outset. Nonetheless, there were varying interpretations, and in part lengthy discussions ensued in everyday business at the individual construction sites owing to different commercial interests.
- The selected unit price contracts made it possible to find solutions on the basis of the works contract even given extremely tricky conditions.
- It was always possible to conduct objective, solution-oriented and trustful talks to solve all kinds of problems at all stages. From the very beginning when developing the project right up to the breakthrough, all those involved in the scheme displayed a great deal of responsibility in placing its completion first. Accordingly, everyone involved was keen to come up with acceptable solutions.
- The huge success with the drives at the Gotthard Base Tunnel would not have been possible without this solution-oriented approach among the partners to the contract.
- This manner of dealing with each other makes underground construction so special, particularly in Switzerland. Something that should not readily be abandoned!

Literatur/References

- [1] Ehrbar, H., Sala, A., Wick, R. (2011): Wahl der Vortriebsmethoden am Gotthard-Basistunnel, Geomechanics and Tunneling, Volume 4, Oktober 2010, S. 517–526
- [2] Ziegler, H.J. (2011), 150 km Vortrieb durch die Alpen, Ingenieurgeologische Erfahrungen, Tagungsband Swisstunnel Congress 2011, S. 29–37
- [3] Wildbolz, A. (2006): Amsteg – TBM Stillstand in der Weströhre, Kleiner geologischer Unterschied – grosse Wirkung, Tagungsband Swisstunnel Congress 2006, S. 43–48
- [4] Theiler, A. (2007): Gotthard-Basistunnel – Injektion einer wasserführenden Störzone – Konzept und Ausführung, Tagungsband Swisstunnel Congress 2007, S. 51–60
- [5] Meier, R. (2009): Südvortrieb Sedrun – Durchörterung einer unerwartet angefahrenen, ausgedehnten Störzone – Herausforderungen bleiben, Tagungsband Swisstunnel Congress 2009, S. 39–50
- [6] Keller, F., Ziegler, H.J. (2009): Geologie Gotthard-Basistunnel, aktueller Befund und Rückblicke, Tagungsband Swisstunnel Congress 2009, S. 23–30
- [7] Röthlisberger, B., Sala, A. (2005): Faido, Bewältigung schwieriger Gebirgsverhältnisse, Rückblick und Ausblick, Tagungsband Swisstunnel Congress 2005, S. 89–96
- [8] Kissling, E. (2007): Gotthard-Basistunnel – Bergschläge und Microbeben in der MFS Faido, Tagungsband Swisstunnel Congress 2007, S. 45–50
- [9] Sala, A. (2010): Erfahrungen mit Nachprofilierungen in der druckhaften Strecke des TBM-Vortriebs Faido, Tagungsband Swisstunnel Congress 2010, S. 106–119
- [10] Neuenschwander, M. (2004): Baulos Bodio, Erfahrungen mit den mechanischen Vortrieben im Leventinagneis, Tagungsband Swisstunnel Congress 2004, S. 39–45

beteiligten mit einem hohen Mass an Verantwortung die Vollendung des Werks in den Vordergrund gestellt. Dementsprechend wurde stets nach allseits tragbaren Lösungen gesucht.

- Ohne den lösungsorientierten Umgang unter den Vertragspartnern wäre der grosse Erfolg mit den Vortrieben am Gotthard-Basistunnel nicht möglich gewesen.
- Diese Umgangsformen machen den Untertagbau insbesondere in der Schweiz so speziell. Ein Gut, das nicht leichtfertig aufgegeben werden sollte!

[11] Kovári, K., Ehrbar, H. (2008): Gotthard-Basistunnel, Teilabschnitt Sedrun, Die druckhaften Strecken im TZM Nord, Projektierung und Realisierung, Tagungsband Swisstunnel Congress 2008, S. 39–47

[12] Ehrbar, H., Beeler, P., Neuenschwander, M., Bianchi, M. (2010): Tough decisions for mega-projects, A methodology for decision making on time-relevant measures at the Gotthard Base Tunnel, Proceedings World Tunnel Congress 2010, Vancouver