

# Optimisation of the TBM drive at the Boßler Tunnel using the observation method and an incremental design and contract development process

## Optimierung der TVM-Fahrt am Boßlertunnel durch Anwendung der Beobachtungsmethode und eines inkrementellen Planungs- und Vertragsentwicklungsprozesses

The 8.8 km long Boßler Tunnel was tendered in 2012 as a NATM tunnel, although a variant with a tunnel boring machine (TBM) was permitted for the first 2,800 m of the tunnel from the north side. The joint venture Tunnel Alaufstieg ATA won the contract in a negotiation process with the variant TBM for the first 2,800 m. Out of the conviction that a large part of the Boßler Tunnel should be feasible for a TBM, the ATA made an optimisation proposal, according to which extensive additional investigation should be undertaken in the preceding NATM tunnel and to demonstrate the feasibility of extended TBM operation. This concept was successively implemented, with a 55 m deep investigation shaft being sunk and a 20 m long investigation tunnel excavated. The investigations brought the hoped-for improved estimation of the rock mass behaviour and finally convinced all those responsible for the project (client and the contractor) that a TBM drive along the entire length of the tunnel was feasible. This procedure demanded extreme flexibility from all parties involved since the design work mostly had to be undertaken at the last minute.

### 1 General

In February 2012, client DB Netz AG tendered the construction project Alaufstiegstunnel (Alb ascent tunnel) in plan approval procedure of section 2.2 on the new line from Wendlingen to Ulm in a negotiation procedure. The project, divided into three construction contracts, includes the two-track Boßler Tunnel, total length 8,822 m (contracts 1 and 2) and the Steinbühl Tunnel with a total length of 4,847 m. (contract 3). Two starting points were provided for the driving of the Boßler Tunnel, one at the north portal in Aichelberg for the driving of contract 1 and a second as a 950 m long access tunnel in the Umpfental for the driving of contract 2, both as an opposing drive to the north and also southward to the south portal in Buch. The client specified drill and blast tunnelling with shotcrete support. Only for 2,800 m of tunnel in contract 1 from the Aichelberg portal was an alternative proposal for TBM tunnelling permissible.

In May 2012, the Austrian joint venture Tunnel Alaufstieg (ATA), consisting of the companies Porr, Hin-

*Der 8,8 km lange Boßlertunnel wurde 2012 in Spritzbetonbauweise ausgeschrieben. Für die ersten 2.800 m Tunnel von der Nordseite war auch eine Variante mit einer Tunnelvortriebsmaschine (TVM) zugelassen. Die Arbeitsgemeinschaft Tunnel Alaufstieg ATA gewann das Projekt in einem Verhandlungsverfahren mit der Variante TVM für die ersten 2.800 m. Aus der Überzeugung heraus, dass große Teile des Boßlertunnels mit TVM machbar sein sollten, machte die ATA ein Optimierungsangebot, nach dem in den vorlaufenden Spritzbetonvortrieben umfangreiche zusätzliche Erkundungen gemacht werden sollten und damit ein Nachweis für die Machbarkeit der erweiterten TVM erbracht werden sollte. Dieses Konzept wurde sukzessive umgesetzt. Dabei wurden auch zusätzlich ein 55 m tiefer Erkundungsschacht und ein 20 m langer Erkundungsstollen abgeteuf. Die Erkundungen brachten die erhoffte bessere Einschätzung des Gebirgsverhaltens und schließlich die gemeinsame Überzeugung der Projektverantwortlichen des AG und AN, dass eine TVM-Fahrt über die gesamte Länge des Tunnels machbar ist. Diese Vorgangsweise erforderte extreme Flexibilität von allen Projektbeteiligten, da die Planungsgrundlagen meist erst in letzter Minute bereitgestellt werden konnten.*

### 1 Allgemeines

Im Februar 2012 wurde von der DB Netz AG die Baumaßnahme NBS Wendlingen-Ulm Planfeststellungsabschnitt 2.2 Alaufstiegstunnel im Verhandlungsverfahren zur Ausschreibung gebracht. Das Projekt, aufgegliedert in drei Baulose, umfasst die jeweils zweiröhriigen Tunnelbauwerke Boßlertunnel, Gesamtlänge 8.822 m (Baulos 1 und 2) und Steinbühlstunnel mit einer Gesamtlänge von 4.847 m (Baulos 3). Für das Auffahren des Boßlertunnels waren zwei Angriffspunkte vorgesehen, einer am Nordportal Aichelberg für das Auffahren des Bauloses 1 in Richtung Süden und ein zweiter als 950 m langer Zugangstollen im Umpfental für das Auffahren des Bauloses 2, sowohl als Gegenvortrieb nach Norden als auch nach Süden zum Südportal Buch. Als Vortriebssystem war vom Auftraggeber ein Sprengvortrieb in Spritzbetonbauweise vorgegeben. Lediglich für 2.800 Tunnelmeter im Baulos 1

teregger, Östu/Stettin and Swietelsky, made a bid for all three contracts. In the subsequent negotiation process, which continued into October 2012, the ATA won the contract with an alternative proposal covering all three contracts with the use of a TBM for  $2 \times 2,900$  m on contract 1 (1). The ATA was optimistic from the start that most of the Boßler Tunnel should be feasible for a TBM with the latest machine technology. The advantages from much longer apportioning of the TBM and infrastructure costs and a reduction of risk from the assignment of geological tunnelling classes would enable a win-win situation for client and contractor.

The ATA therefore made an alternative proposal in 2012 after being awarded the contract for an extended TBM drive on the contracts 1 and 2 of the Boßler Tunnel. This laid the foundation for a technically innovative, collaboratively staged, difficult and elaborate proceeding. The first great challenge was to collaboratively investigate and decide the necessary steps for the verification of the feasibility of the contractor's alternative proposal. The starting situation was difficult in that the contract was based solely on a tunnelling report for NATM tunnelling (2), and the special features of a TBM drive were not provided.

An EPB machine from the Herrenknecht AG with a diameter of 11.3 m and an installed power of 7,200 kW was used.

## 2 Geological overview

Starting from the portal at Aichelberg (Figure 1), the tunnel first passes through the strata of the Brown Jurassic, which are divided into the Aalenian 1 and 2, Bajocian 1 to 3, and Callovian (2). The strata consist mainly of clay and clay marlstone, with sandstones and marly limestone to limestone intercalated in some places. The strengths of the clayey rocks are sometimes low, i.e. 1.5 to 17.5 MPa, which applies in particular to the clayey areas between the sandstones in the Aalenian 2. Considering the overburden of up to 280 m, squeezing conditions were expected in some sections.

Above the Brown Jurassic are the strata of the White Jurassic, with the Boßler Tunnel passing through the marly-calcareous Oxfordian 1 and the Oxfordian 2 consisting of bedded limestones. The strengths of these formations are considerably higher than the Brown Jurassic at 15 to 80 MPa. However, karstification has to be expected in the limestones of the Oxfordian 2, and locally also at the top of the Oxfordian 1 (2). The regular design water table is 40 m above the tunnel, with 60 m being taken as the least favourable assumption with a reduced safety factor.

## 3 Early TBM feasibility study

In 2013, ATA produced a basic feasibility study based on the tunnelling report and also including experience of TBM drives in similar geology from Germany, Switzerland and Austria. This came to the conclusion that the central part of the tunnel should be feasible with a TBM. In order to keep all possibilities open, the early construc-

ab dem Portal Aichelberg war auch ein Sondervorschlag für ein maschinelles Auffahren (TVM-Vortrieb) zugelassen.

Mit Angebotslegung im Mai 2012 wurden von der österreichischen Arbeitsgemeinschaft Tunnel Alaufstieg (ATA), bestehend aus den Firmen Porr, Hinteregger, Östu/Stettin und Swietelsky, alle drei Baulose angeboten. Im folgenden Verhandlungsverfahren, das sich bis in den Oktober 2012 erstreckt hat, wurde die ATA mit einem Sondervorschlag beauftragt, der alle drei Baulose mit Einsatz einer TVM im Baulos 1 für  $2 \times 2.900$  m umfasste (1). Die ATA war von Anbeginn optimistisch, dass mit der neuesten Maschinenteknik ein TVM-Vortrieb für den überwiegenden Teil des Boßlertunnels machbar sein sollte. Die Vorteile aus einer weit größeren Umlage der TVM- und Infrastrukturkosten sowie eine Reduktion des Risikos aus der geologischen Vortriebsklassenverteilung sollten eine Win-Win-Situation für AG und AN ermöglichen.

Die ATA hat daher nach Auftragsvergabe noch 2012 dem Auftraggeber ein Optimierungsangebot für einen verlängerten TVM-Vortrieb in den Baulosen 1 und 2 des Boßlertunnels vorgelegt. Damit war der Grundstein für einen technisch innovativen, in der gemeinsamen schrittweisen Umsetzung sehr schwierigen und aufwändigen, Weg gelegt. Die erste große Herausforderung lag dabei in der gemeinsamen Suche und Festlegung der notwendigen Schritte, die zum Nachweis der Machbarkeit dieses AN-Vorschlags erforderlich waren. Die Ausgangssituation war insofern schwierig, als dem Vertrag ausschließlich ein auf die Spritzbetonbauweise abgestimmtes Tunnelbautechnisches Gutachten (2) zu Grunde gelegt war, und die Besonderheiten eines TVM-Vortriebs nicht vorgesehen waren.

Zum Einsatz kam eine TVM mit Erddruckschild der Herrenknecht AG mit einem Durchmesser von 11,3 m und einer installierten Leistung von 7.200 kW.

## 2 Geologischer Überblick

Ausgehend vom Portal bei Aichelberg (Bild 1) stehen zunächst von unten nach oben die Schichten des Braunjura, die in das Aalenium 1 und 2, das Bajocium 1 bis 3, und das Callovium unterteilt werden, an (2). Die Schichten bestehen überwiegend aus Ton- und Tonmergelsteinen. Bereichsweise sind Sandsteine und Mergelkalk- bis Kalksteine eingeschaltet. Die Festigkeit der tonigen Gesteine sind teilweise gering, d.h. 1,5 bis 17,5 MPa. Dies betrifft vor allem die tonigen Bereiche zwischen den Sandsteinen im Aalenium 2. Unter Berücksichtigung der bis zu 280 m reichenden Überlagerungshöhe wurde hier abschnittsweise mit druckhaften Gebirgsverhältnissen gerechnet.

Oberhalb des Braunjura stehen die Schichten des Weißjura an. Mit dem Boßlertunnel werden hiervon das mergelig-kalkige Oxfordium 1 und das aus gebankten Kalksteinen bestehende Oxfordium 2 durchfahren. Die Festigkeiten dieser Formationen sind deutlich höher als im Braunjura, d.h. 15 bis 80 MPa. Allerdings wurde in den Kalksteinen im Oxfordium 2, örtlich auch am Top des Oxfordium 1 mit Verkarstungen gerechnet (2). Der Regelbemessungswasserstand beträgt 40 m über dem Tunnel, als ungünstigste Annahme mit reduzierter Sicherheit sind 60 m anzusetzen.

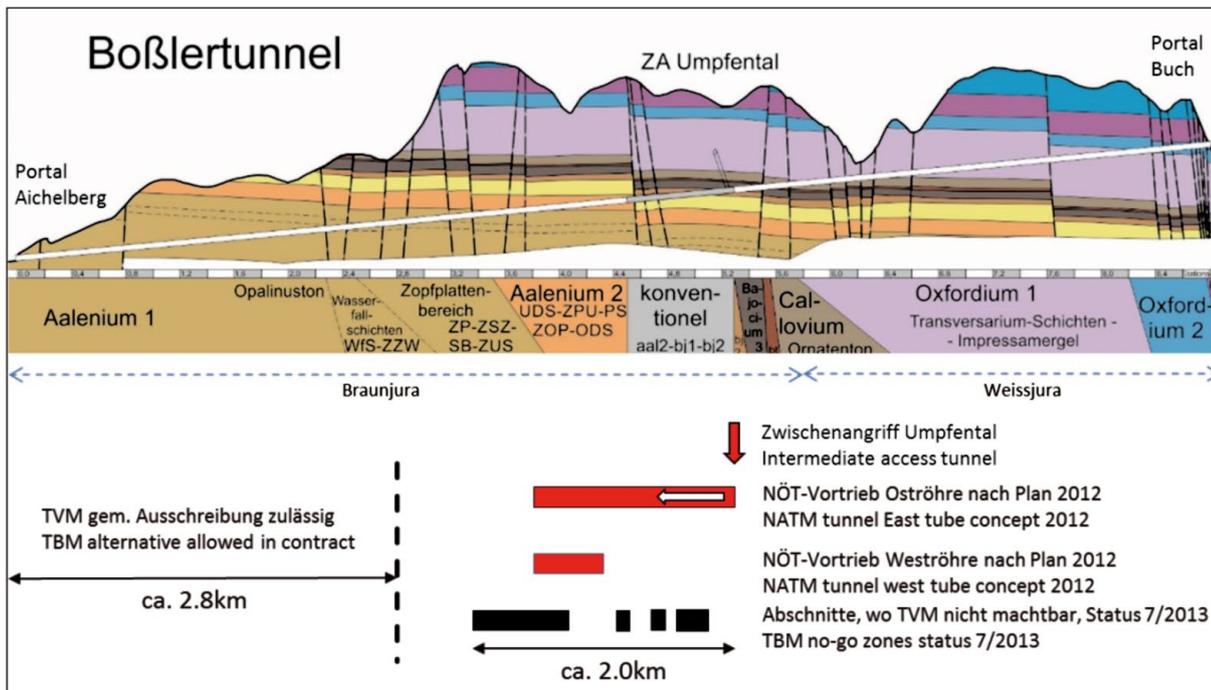


Fig. 1. Main geological formations and section with TBM and NATM section in relevant project phases  
 Bild 1. Geologische Hauptformationen und Abschnitte, TVM und Spritzbetonbauweise in jeweiligen Planungsphasen

tion concepts included two sections of tunnel lined by the NATM (Figure 1, red bar).

The consultant responsible for the tunnelling report stated in his calculations performed at the same time that the loading on the segmental lining would be too high in four sections (Figure 1, black bars), where the calculated expected normal forces in the segmental lining were more than 12,000 kN. The different results were due to different assumptions in the calculation models of the designer and the consultant. A further section 600 m long at the upper end of the tunnel in the Oxfordian 2 was ruled out from the TBM drive due to possible large karst cavities.

#### 4 Concept for project optimisation

In summer 2013, the preliminary aim of optimisation was to extend the TBM drive in the east bore by 900 m to the start of the squeezing section, then to pull the TBM through about 1.5 km of tunnel previously constructed by the shotcrete method and use it to drive the rest of the tunnel in the White Jurassic. In the west bore, the squeezing rock mass section in the Brown Jurassic with a length of 880 m was to be tunnelled if required by the NATM with access through a cross passage.

According to the foreseeable construction schedule in the middle of 2013, the Umpfental access tunnel (location see Figure 1) would reach the strata of the Brown Jurassic, for which squeezing conditions had been forecast, by the end of 2013. It was then planned to excavate the falling advance in the east bore by the NATM from the crossing of the access tunnel with the east bore up to and including the heavily squeezing section through the Bajocian and Aalenian strata of the Brown Jurassic.

This preceding NATM construction of the access tunnel and part of the east bore enabled the development of a concept for incremental gaining of new information fol-

#### 3 Frühe Machbarkeitsstudie TVM

2013 wurde dann auf Basis des Tunnelbautechnischen Gutachtens und unter der Einbeziehung von Erfahrungen aus TVM-Vortrieben in vergleichbarer Geologie aus Deutschland, der Schweiz und Österreich von der ATA eine grundsätzliche Machbarkeitsstudie erstellt. Diese kam zum Schluss, dass der Zentralbereich des Tunnels mit der TVM machbar sein sollte. Um alle Möglichkeiten offen zu lassen, wurden in den frühen Baukonzepten zwei Bereiche aufgenommen, die mit der Spritzbetonbauweise aufgeföhren werden sollten (Bild 1, rote Balken).

Der Tunnelbautechnische Gutachter kam in seinen parallel durchgeföhrenen Berechnungen vorerst zum Schluss, dass die Belastungen der Tübbingauskleidung in vier Abschnitten (Bild 1, schwarze Balken) zu hoch seien. Die rechnerisch erwarteten Normalkräfte in der Tübbingschale betragen in diesen Abschnitten mehr als 12.000 kN. Der Unterschied der Ergebnisse war in unterschiedlichen Ansätzen in den Rechenmodellen des Planers und des Gutachters begründet. Ein weiterer Abschnitt mit 600 m Länge am oberen Ende des Tunnels im Oxfordium 2 wurde aufgrund von möglichen großen Karsthohlräumen von der TVM-Fahrt ausgeschlossen.

#### 4 Konzept der Projektoptimierung

Im Sommer 2013 war das vorläufige Ziel der Optimierung, den TVM-Vortrieb in der Oströhre um 900 m bis vor den druckhaften Bereich zu verlängern, dann die TVM über ca. 1,5 km durch die mit Spritzbetonbauweise vorweg hergestellte Oströhre durchzuziehen und den Rest des Tunnels im Weißjura mit der TVM aufzuföhren. In der Weströhre sollte bei Bedarf der druckhafte Gebirgsabschnitt im Braunjura mit 880 m Länge über einen Querschlag mit der Spritzbetonbauweise aufgeföhren werden.

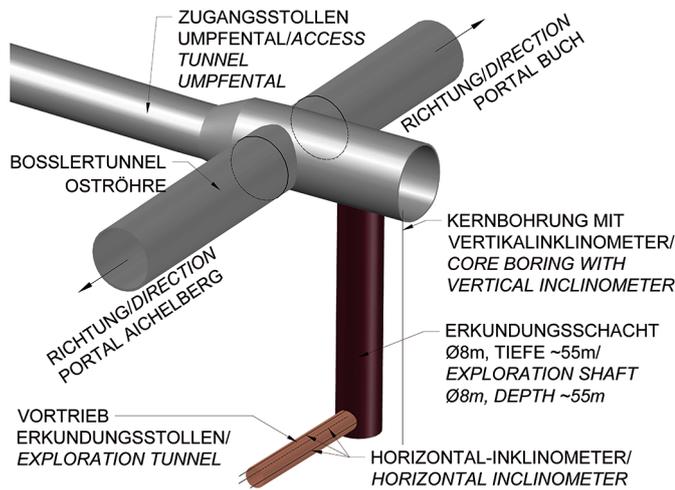


Fig. 2. Layout of the investigation shaft and tunnel  
Bild 2. Anlageverhältnisse des Erkundungsschachts und Erkundungstollens

lowed by adjustment of the rock mechanical parameters before the intended start of the TBM drive, in any case much earlier than the TBM would reach the section with forecast squeezing conditions. The design joint venture iC consulente/Laabmayr commissioned by ATA therefore proposed the application of components of the observation method based on DIN 1054:2005-1 Subsoil – Verification of the safety of earthworks and foundations (German supplementary rules to EC 7) in order to provide a successively improved basis for the evaluation of the feasibility of a TBM drive. Along this route, several exit strategies were also to be included for the excavation of certain sections by the NATM if the hoped-for geological conditions did not occur.

Under this concept, the following steps were introduced in summer 2015:

- A small high-level task force was set up (later called the “TBM-Klausur”) for a certain time, which meets regularly outside the normal design, testing and meetings process. This was intended to conceive, discuss and decide technical questions in a collaborative atmosphere.
- Production of a reference design based on characteristic parameters, in which the application limits for segment linings with a thickness of 45 cm and 65 cm were determined.
- Design and implementation of large-scale tests for the determination of the load borne by longitudinal joints (the weakest components in the lining system) and later also the shear dowels at the branch structure.
- Design and implementation of altogether four detailed investigation areas and verification levels intended to provide more precise knowledge of the ground conditions in various geological formations. The additional investigations included stress measurements in the shotcrete support layer, horizontal inclinometers above the access and investigation tunnels, back-calculation of the NATM sections, an investigation shaft about 55 m deep with a diameter of 8 m and a tunnel about 20 m long ( $\varnothing$  3.6 m) with deformation slots and yielding elements from the foot of the shaft (Figure 2), additional dilatometer measurements and laboratory tests. Next to the shaft, a vertical inclinometer was installed. The investi-

Nach dem Mitte 2013 absehbaren Bauablauf sollte der Zugangstollen Umpfental (Lage siehe Bild 1) bis etwa Jahresende 2013 die Schichten des Braunjura erreichen, für die druckhafte Verhältnisse prognostiziert wurden. Von der Kreuzung des Zugangstollens mit der Oströhre aus war geplant, in Spritzbetonbauweise den fallenden Vortrieb in der Oströhre bis einschließlich des stark druckhaften Bereichs durch die Bajocium und Aalenium Schichten der Braunjura aufzufahren.

Dieser Vorlauf der Spritzbetonvortriebe des Zugangstollens und eines Teils der Oströhre ermöglichte die Entwicklung eines Konzepts zur inkrementellen Gewinnung von neuen Erkenntnissen und folgender Nachjustierung der felsmechanischen Kennwerte, bevor der TVM-Vortrieb beginnen sollte, jedenfalls wesentlich früher als die TVM den gemäß Prognose druckhaften Bereich erreichen würde. Die von den ATA beauftragte Planungsgemeinschaft iC consulente/Laabmayr schlug deshalb vor, in Anlehnung an DIN 1045:2005-1 Sicherheitsnachweise im Erd- und Grundbau (nationale Version des EC 7) Komponenten der Beobachtungsmethode anzuwenden, um sukzessive verbesserte Grundlagen für die Machbarkeitsbeurteilung der TVM-Fahrt zu schaffen. Auf diesem Weg sollten auch mehrere Exit-Strategien eingebaut werden, nach denen bei Nicht-Eintreten der erhofften günstigen Erkenntnisse bestimmte Abschnitte mit Spritzbetonbauweise aufgefahren werden könnten.

Nach diesem Konzept wurden im Sommer 2013 folgende Schritte eingeleitet:

- Einrichten einer kleinen hochkarätig besetzten Task-Force (später „TVM-Klausur“ genannt) für einige Zeit, die abseits des normalen Planungs-, Prüf- und Besprechungsprozesses regelmäßig tagt. Hier sollten in partnerschaftlicher Atmosphäre technische Fragen konzipiert, diskutiert und abgeschlossen werden.
- Erstellen einer Referenzplanung auf der Grundlage charakteristischer Kennwerte, in der die Anwendungsgrenzen für die Tübbingausbauten mit Dicken  $d = 45$  cm und  $d = 65$  cm ermittelt wurden.
- Planung und Umsetzung von Großversuchen zur Ermittlung der Traglast der Längsfugen (die schwächste Komponente im Ausbausystem) und später auch der Schubdübel im Bereich der Verbindungsbauwerke.
- Planung und Umsetzung von insgesamt vier vertieften Erkundungsbereichen und Verifikationsebenen, die in unterschiedlichen geologischen Schichten eine genauere Kenntnis der Baugrundeigenschaften bringen sollten. Die zusätzlichen Erkundungen umfassten Spannungsmessungen in der Spritzbetonschale, Horizontalinklinometer über dem Zugangstollen und Erkundungstunnel, Rückrechnung von mit Spritzbetonbauweise aufgefahrenen Querschnitten, einen ca. 55 m tiefen Erkundungsschacht mit einem Durchmesser von 8 m und einen ca. 20 m langen Stollen ( $\varnothing$  3,6 m) mit Deformationsschlitzen und Stauchelementen am Schachtfuß (Bild 2), zusätzliche Dilatometermessungen und Laborversuche. Neben dem Schacht wurde auch ein Vertikalinklinometer eingebaut. Der Erkundungsschacht und der Stollen sollten frühzeitig die am ungünstigsten eingeschätzte Schicht des Aaleniums 2 erreichen und im Großmaßstab erkunden. Schließlich wurden einige Messquer-schnitte in der Tübbingschale (Messtübbing) konzi-

gation shaft and the tunnel were intended to reach the unfavourable forecast strata of the Aalenian 2 at an early stage and investigate them at large scale. Finally, several measurement sections were conceived in the shotcrete support layer (monitoring segments) with concrete strain gauges. In order to ensure a corresponding learning effect, all junction structures from the start until about the middle of tunnelling were equipped with such monitoring segments.

### 5 Findings from the additional investigations

The designer assumed that the uncertainty of the forecast would rapidly decline with increasingly gained knowledge, and the rock mass loading and time-dependent deformation behaviour of the rock mass could be more precisely delineated in steps before the TBM would reach the critical section.

The results of all these additional investigations can be summarised as follows:

- The tangential stress measurements in the shotcrete support layer were very valuable and mostly plausible (Figure 3). Together with the displacement measurements, the parameters for a back-calculation (primarily of the stiffness) could be largely restricted and it was also demonstrated that the horizontal primary stress had to be approximately of the same magnitude as the overburden pressure ( $k_0 = 1.0$ ). With this assumption, the displacement pattern and the distribution of the normal forces could be conclusively understood.

piert. Die Messung erfolgte mit Betondehnungsgebern. Um einen entsprechenden Lerneffekt sicherzustellen, wurden alle Verbindungsbauwerke vom Vortriebsbeginn bis etwa Tunnelmitte mit solchen Messtübbingen ausgestattet.

### 5 Erkenntnisse aus den zusätzlichen Erkundungen

Der Planer ging davon aus, dass die Unsicherheit der Prognose mit zunehmendem Kenntnissgewinn durch die laufenden Untersuchungen rasch abnimmt, die Gebirgsauslastung und das zeitabhängige Verformungsverhalten des Gebirges schrittweise genauer eingegrenzt werden können, bevor der TVM-Vortrieb einen kritischen Vortriebsabschnitt erreichen würde.

Die Ergebnisse all dieser zusätzlichen Erkundungsmaßnahmen können wie folgt zusammengefasst werden:

- Die Tangentialspannungsmessungen in der Spritzbetonschale waren sehr wertvoll und überwiegend plausibel (Bild 3). Gemeinsam mit den Verschiebungsmessungen konnten so die Parameter für eine Rückrechnung (in erster Linie die Steifigkeit) weitgehend eingeschränkt werden und auch gezeigt werden, dass die horizontale Primärspannung etwa in gleicher Höhe wie der Überlagerungsdruck vorliegen muss ( $k_0 = 1,0$ ). Mit dieser Annahme können das Verschiebungsbild und die Verteilung der Normalkräfte schlüssig nachvollzogen werden.
- Die Dilatometermessungen brachten sehr gute Ergebnisse, wenn es gelang, das Bohrloch trocken zu halten. Die so gemessenen Erstbelastungsmoduli im Span-






**G. HINTEREGGER**  
& SÖHNE  
Baugesellschaft m.b.H.

## Ihr Partner in allen Sparten der Bauwirtschaft

BERGERBRÄUHOFS-  
STRASSE 27  
A-5020 SALZBURG

TELEFON: +43 / 662 / 88 9 80 - 0  
TELEFAX: +43 / 662 / 88 9 80 - 30

ghs@hinteregger.co.at  
www.hinteregger.co.at

QUALITY SYSTEM  
CERTIFIED  
ISO 9001  
REG. NR. ÖQS 794

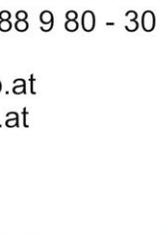


















- The dilatometer measurements brought very good results as long as the borehole was dry. The initial loading moduli in the stress level of the overburden pressure measured in this way could be used for the structural design of the tunnel without further multiplication due to a scaling effect, with very good agreement with the sum of the observations and back-calculations from the NATM advances in the Umpfental access tunnel and the first falling section of the east bore excavated from the Umpfental access tunnel. In wet boreholes, the measured values were evidently too low and implausible due to the immediate softening of the Tonstein.
- The investigation tunnel in the Aalenian 2 (Figure 4), which was provided with a very low support resistance in the deformation slots (200 kN), only showed very small displacements in the range of 1 cm. The deformation elements showed a maximum contraction of about 2 cm, and the face stood up without visible deformation.
- The large-scale tests of the load-bearing capacities of segment longitudinal joints were carried out at the TU Munich (3). The former showed a potential of up to 20 % more load-bearing capacity compared to the regulations. Unfortunately, these results could not be used until now due to the laborious approval process. The tests on shear dowels enabled the specification of the load capacity taking into account the plastic potential of a dowel group in the area of the cross passage opening.

These findings justified an increase of the stiffness parameters of the Tonstein and marlstone of the Brown Jura by a factor of about 2 compared to the original assumption of a level of  $E = 2,000$  to  $3,000$  MPa. Above all for the weakest layer – the intermediate Tonstein layer in the Aalenian 2 – the stiffness could be approximately tripled ( $E = 1,000$  to  $2,500$  MPa) and the compressive strength could be increased from 3 to 5 MPa (Table 1). There were difficulties with the horizontal and vertical inclinometers, which each became defective at an early time, presumably due to the displacements in the rock mass. The rock mass parameters that were finally agreed in early 2015 are shown in Table 1. It should be noted that these are harmonised with the calculation model required in the specification, i.e. a “ubiquitous joint model” with smeared effects of interfaces.

nungsniveau des Überlagerungsdrucks konnten ohne weitere Skalierung aufgrund eines möglichen Maßstabs-effekts in die Tunnelstatik einfließen, mit sehr guter Übereinstimmung mit der Summe der Beobachtungen und Rückrechnungen aus den Spritzbetonvortrieben im Zugangsstollen Umpfental und den ersten Abschnitten der vom Zugangsstollen Umpfental nach unten aufzufahrenden Oströhre. In nassen Bohrlöchern waren die Messwerte offensichtlich durch sofortige Aufweichung des Tonsteins zu niedrig und unplausibel.

- Der Erkundungsstollen im Aalenium 2 (Bild 4), der mit einem sehr geringen Ausbauwiderstand in den Deformationsschlitzen (200 kN) versehen war, zeigte nur sehr geringe Verschiebungen im 1 cm-Bereich. Die Deformationselemente zeigten eine maximale Kontraktion von etwa 2 cm. Die Ortsbrust stand ohne sichtbare Deformationen.
- Die Großversuche zur Tragfähigkeit der Tübbing-Längsfugen und Schubdübel wurden an der TU München durchgeführt (3). Erstere zeigten ein Potenzial von bis zu 20% mehr Tragfähigkeit gegenüber den gültigen Regelwerken. Leider konnten diese Ergebnisse wegen langwieriger Genehmigungsverfahren bis dato nicht genutzt werden. Die Versuche zu den Schubdübeln ermöglichten die Festlegung einer Traglast unter Berücksichtigung des plastischen Potenzials einer Dübelgruppe im Bereich über der Querschlagöffnung.

Diese Erkenntnisse rechtfertigten, die Steifigkeitsparameter der Ton- und Mergelsteine der Braunjura etwa um einen Faktor 2 gegenüber den ursprünglichen Annahmen auf ein Niveau von  $E = 2.000$  bis  $3.000$  MPa zu erhöhen. Vor allem aber die schwächste Schicht – die Tonsteinzwischenlage Aalenium 2 – konnte in Bezug auf die Steifigkeit auf ca. das dreifache ( $E = 1.000$  bis  $2.500$  MPa) und in Bezug auf die Druckfestigkeit von 3 auf 5 MPa angehoben werden (Tabelle 1). Schwierigkeiten gab es bei den Horizontal- und Vertikalinklinometern, die jeweils frühzeitig offenbar durch Verschiebungen im Gebirge defekt wurden. Die im Frühjahr 2015 schließlich abgestimmten Gebirgskennwerte sind in Tabelle 1 enthalten. Dabei ist zu beachten, dass diese auf das in der Ausschreibung verlangte Rechenmodell abgestimmt sind, d.h. ein „ubiquitous joint model“ mit verschmierten Auswirkungen von Trennflächen.

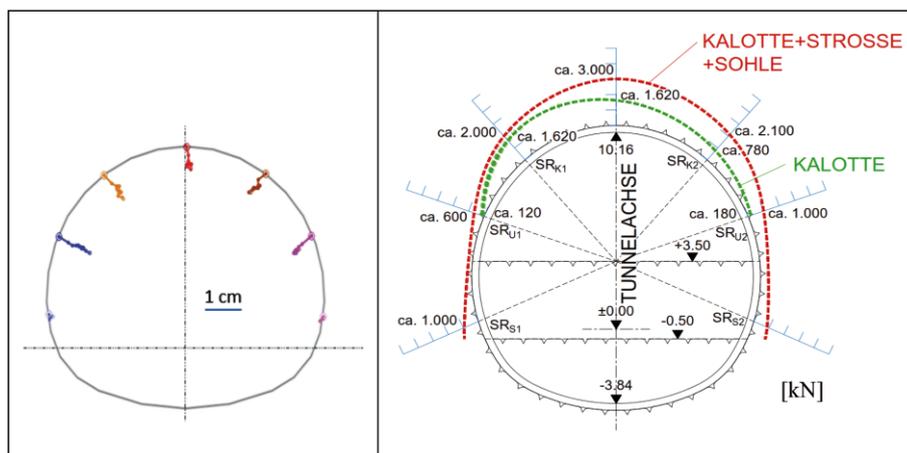


Fig. 3. Results from monitoring at the Umpfental access tunnel, left displacements (crown settlement 8 mm), right normal forces calculated from stress measurements [kN]

Bild 3. Messergebnisse aus dem Zugangsstollen Umpfental, links Verschiebungsbild (Firstsetzung ca. 8 mm), rechts aus Spannungsmessungen berechnete Normalkräfte [kN]

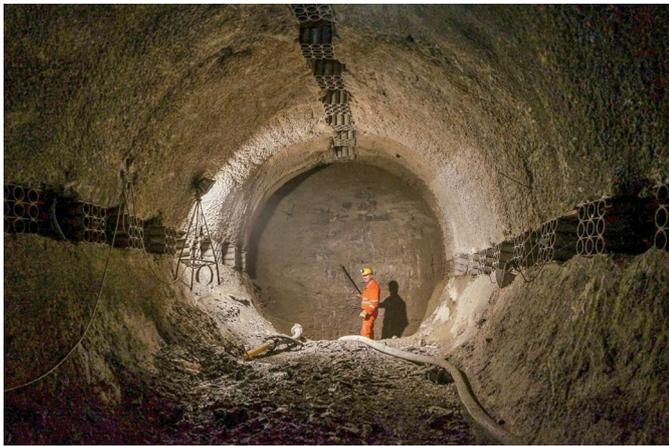


Fig. 4. Horizontal investigation tunnel at the foot of the shaft, support with yielding elements  
 Bild 4. Horizontaler Erkundungsstollen am Schachtfuß in Aalenium 2 Schicht; Ausbau mit Deformationselementen

The monitoring segments in the area of the junction structures are difficult to interpret because the influences of mechanised tunnelling, annular gap filling, ground and water pressure superimpose and are difficult to separate. The total loading after construction of the east bore and

Die Messtübbinge im Bereich der Verbindungsbauwerke sind schwierig zu interpretieren, weil sich die Einflüsse vom Maschinenvortrieb, Ringspaltvermörtelung, Gebirgs- und Wasserdruck überlagern und schwer zu trennen sind. Die Gesamtbelastung nach Herstellen der Oströhre und vor dem Öffnen der Verbindungsbauwerke (Stand der Arbeiten zum Veröffentlichungsdatum) sind in Tabelle 2 dargelegt. Diese Messungen bestätigen auch das grundsätzlich günstigere Baugrundverhalten in der Realität als ursprünglich prognostiziert (max. 8.000 kN Normalkraft gemäß Messung gegenüber ca. 12.000 kN in der Prognose).

Die Fortschreibung der Kennwerte ermöglichte schließlich im März 2015 im Rahmen einer TVM-Klausur eine positive Beurteilung der Machbarkeit der TVM-Durchfahrt im Zentralabschnitt des Boßlertunnels (vgl. Bild 1).

### 6 Erkundungsmaßnahmen für die potenzielle Karststrecke

Aus den Ausschreibungsunterlagen für die Spritzbetonbauweise war zu entnehmen, dass Verkarstungserscheinungen in den Schichten des Weißjura auftreten können. Die Karstproblematik beschränkt sich auf den südlichsten ca. 600 bis 700 m langen Tunnelabschnitt. In diesem Ab-

Table 1. Final rock mass parameters after additional investigations, values in brackets ( ) mean lower values,  $E_{hor}$ ,  $E_{vert}$  – E-modulus in horizontal and vertical directions;  $\sigma_D$  – compressive strength of intact rock,  $c_g$  and  $\phi_g$  – cohesion and friction angle of intact rock,  $c_s$  and  $\phi_s$  – cohesion and friction angle at bedding planes,  $c_k$  and  $\phi_k$  – cohesion and friction angle at joints

Tabelle 1. Abgestimmte Gebirgskennwerte nach Erkundungsphase, Zahlen in Klammer ( ) bedeuten untere Kennwerte,  $E_{hor}$ ,  $E_{vert}$  – E-Modul in horizontaler und vertikaler Richtung,  $\sigma_D$  – Druckfestigkeit des Gesteins,  $c_g$  und  $\phi_g$  – Kohäsion und Reibungswinkel des Gesteins,  $c_s$  und  $\phi_s$  – Kohäsion und Reibungswinkel auf Schichtflächen,  $c_k$  und  $\phi_k$  – Kohäsion und Reibungswinkel auf Klüften

Schicht	$E_{hor}$ Rock mass Gebirge MN/m <sup>2</sup>	$E_{vert}$ Rock mass Gebirge MN/m <sup>2</sup>	$\sigma_D$ MN/m <sup>2</sup>	$c_g$ Rock Gestein MN/m <sup>2</sup>	$\phi_g$ Rock Gestein °	$c_s$ Stratum Schicht MN/m <sup>2</sup>	$\phi_s$ Stratum Schicht °	$c_k$ Fissure Kluft MN/m <sup>2</sup>	$\phi_k$ Fissure Kluft °
Clay and clay marlstone Ton- und Tonmergelsteine Callovium, Bathonium, Bajocium 1-3.	3,000	2,000	5.0	1.60	25	1.0	20	–	–
Marly limestones and limestone Mergelige Kalksteine und Kalksteine im Bajocium 2.	2,000	2,000	17.5	4.55	35	0.10	25	0.5	35
Sandstones Sandsteine im Bajocium 1, Aalenium 2.	3,000	3,000	17.5	4.55	35	0.10	25	0.5	35
Tonstein intercalations Tonstein-Zwischenlagen, Aalenium 2.	2,500	1,000	5.0 (2.5)	1.75 (0.875)	20	0.2 (0.1)	17.5	–	–
Tonstein and clay-marlstone Tonstein und Tonmergelstein im oberen Aalenium 1 (Zopfplatten).	1,500	1,000	5.0	1.60	25	0.1	20	–	–
Tonstein and clay-marlstone Tonstein und Tonmergelstein im unteren Aalenium 1 (Opalinuston).	2,000	1,300	10.0	3.19	25	0.1	20	–	–

Table 2. Section forces from monitoring segments before opening of cross passages  
Tabelle 2. Schnittkräfte in den Messtübbingen vor Öffnen der Verbindungsbauwerke

Junction structure <i>Verbindungsbauwerk</i>	Geological stratum <i>Geologische Schicht</i>	N [kN/lfm]	M [kNm/lfm]	Utilisation <i>Auslastung</i> [%]
VB 05	Aalenium 1	-2,200	-130	19
VB 07	A11 Zopfplatten – A12	-8,000	-373	49
VB 08	Aalenium 2	-5,150	-566	39
VB 09	Aalenium 2	-4,550	199	28
VB 11	Bajocium	-2,150	-190	21
VB 12	Bajocium	-1,500	-84	13

before excavating the junction structures (state of the works at date of publication) are shown in Table 2. These measurements also confirm generally more favourable ground behaviour in reality than had originally been forecast (max. 8.000 kN normal force measured compared to about 12.000 kN in the forecast).

The updating of the parameters finally enabled a positive assessment of the feasibility of TBM tunnelling in the central section of the Boßler Tunnel at a TBM-Klausur in March 2015 (see Figure 1).

## 6 Investigation measures for the possible karst section

It was stated in the tender documents for the shotcrete tunnelling that karst phenomena could occur in the White Jurassic. The karst problem is limited to a section of tunnel about 600 to 700 m long, passing through above all the Oxfordian 2 strata. In the tunnelling report (2), karst structures were divided using an overall classification scheme (Table 3). The classification scheme takes into account the type of karstification and the size of the karst structure and its location related to the tunnel:

It can be seen in Table 3 that the cavities defined in this way could have a significant effect on the TBM drive and the structural safety of the segment lining in the completed state. In the previously constructed Steinbühl Tunnel, however, no relevant karst structures were encountered.

At the end of 2015, conditions for a possible TBM drive through the karst area were contractually agreed and the following measures were agreed and carried out:

- Evaluation of the results of tunnelling and karst investigation in the Oxfordian 2 (ox2) of the Steinbühl Tunnel.
- Two 350 and 370 m long horizontal boreholes from the portal at Buch, combined with geophysical measurements (reflection seismic, cross-hole seismic).
- Structural investigation and preliminary sizing of the segment lining in the karst area of the Oxfordian 2 (ox2) for various scenarios (Figure 5), with simplified quadratic cavity forms being agreed between consultant and designer.
- Recommendations for investigation during the TBM drive.

schnitt werden vor allem die Schichten des Oxfordium 2 durchfahren. Im Tunnelbautechnischen Gutachten (2) wurden die Verkarstungsstrukturen anhand eines übergeordneten Klassifizierungsschemas unterteilt (Tabelle 3). Das Klassifizierungsschema berücksichtigt den Verkarstungstyp sowie die Größe der Karststruktur und die Lage in Bezug auf die Tunnelröhren:

Aus der Tabelle 3 wird ersichtlich, dass die so definierten Hohlräume einen wesentlichen Einfluss auf den TVM-Vortrieb sowie auf die Standsicherheit der Tübbingschale im Endzustand haben können. Beim vorausseilenden Steinbühl-Tunnel waren allerdings keine relevanten Karsthohlräume angetroffen worden.

Ende 2015 wurden die Randbedingungen für eine potenzielle TVM-Fahrt im Karstbereich vertraglich vereinbart und u.a. folgende Erkundungsmaßnahmen beschlossen und durchgeführt:

- Bewertung der Ergebnisse Vortrieb und Karsterkundung im Oxfordium 2 (ox2) des Steinbühl-Tunnels.
- Zwei 350 bzw. 370 m lange Horizontalbohrungen vom Portal Buch aus, kombiniert mit geophysikalischen Messungen (Reflexionsseismik, Crossholeseismik).
- Statische Untersuchung und Vorbemessung der Tübbingschale im Karstbereich des Oxfordium 2 (ox2) für verschiedene Szenarien (Bild 5). Dabei wurden vereinfachend quadratische Hohlraumformen zwischen Gutachter und Planer vereinbart.
- Empfehlungen zur begleitenden Erkundung des TVM-Vortriebs.

## 7 Inkrementelle Fortschreibung der Planung

Die Tatsache, dass sich die Planungsgrundlagen über einen Zeitraum von ca. 3 Jahren in einem ständigen Fluss befanden, behinderte naturgemäß massiv einen frühzeitigen und geordneten Planungsablauf. Mit den laufend einfließenden neuen Erkenntnissen musste

- Die Machbarkeit der Tübbingsauskleidung mit 45 und 65 cm Dicke laufend überprüft und nachjustiert werden.
- Die Einsatzgrenzen zwischen 45 und 65 cm Tübbingsstärke bestimmt werden.
- Machbarkeit und allfällige Sonderlösungen im Bereich der Verbindungsbauwerke (allfällige Unterstützungsstrukturen) geprüft und konzipiert werden.

## 7 Incremental updating of the design

The fact that the design basis had been in constant flux for a period of about 3 years naturally massively hindered an early and regular design process. With the continuous reception of new findings,

- the feasibility of the segment lining 45 und 65 cm thick had to be continuously checked and adjusted.
- The application boundaries between the use of 45 and 65 cm thick segments had to be determined.
- The feasibility and any special solutions in the area of the junction structures (any support construction) had to be checked and designed.
- Design work had to be continued for some NATM sections although these were later bored by the TBM.
- The general overview design for the running tunnels and junction structures had to be adjusted continuously,

and much more. In addition; segment production has to be planned a long time in advance in order to be able to work economically. The design suffered with permanent reworking under these conditions and could mostly only be approved with the last copy.

## 8 Adaptation of the construction contract from NATM to TBM

In addition to the technical challenges of the extended EPB drive in the Boßler Tunnel, the contract preconditions and agreements also had to be created, but the contract was essentially based on NATM tunnelling. Although

- Die Planung für die Spritzbetonbauweise für einige Bereiche vorangetrieben werden, die de facto später mit der TVM aufgefahren wurden.
- Die allgemeinen Übersichtsplanungen für die Streckenröhren und Verbindungsbauwerke laufend nachjustiert werden,

und vieles mehr. Dazu kommt, dass die Tübbingproduktion einen sehr langen Vorlauf benötigt, um wirtschaftlich arbeiten zu können. Die Planung litt unter diesen Randbedingungen unter permanenter Mehrfachbearbeitung und konnte meist nur im letzten Abdruck zur Freigabe gebracht werden.

## 8 Anpassung des Bauvertrags von der Spritzbetonbauweise zum TVM-Tunnel

Neben der technischen Herausforderung einer erweiternden Schildfahrt im Boßlertunnel galt es hierfür auch die bauvertraglichen Voraussetzungen und Vereinbarungen zu schaffen, basierte doch der Auftrag im Wesentlichen auf dem vorgesehenen Tunnelvortrieb in Spritzbetonbauweise. Obwohl Auftraggeber und Auftragnehmer bemüht waren, bauvertraglich für eine „best case“ TVM-Fahrt und eine „worst case“ TVM-Fahrt vorzusorgen, waren dazu lange Verhandlungen nötig, bedingt durch die beschriebene ständige Weiterentwicklung der wahrscheinlich machbaren TVM-Strecken mit daraus unmittelbar resultierenden bauvertraglichen Auswirkungen. Trotz zahlreicher technischer und vertraglicher Rückschläge konnten die



# BAUSTOFF LEBEN

Weil uns die Begeisterung und Leidenschaft für unsere Produkte Zement und Beton antreibt.

Table 3. Classification of karst cavities, V – volume of the karst cavity; A – cross section of the karst cavity  
 Tabelle 3. Klassifizierung Karsthohlräume, V – Volumen des Karsthohlraums, A – Querschnittsfläche des Karsthohlraums

Classification Klassifizierung	Untergruppe A1 Fissures, pipes, extended fissure and bedding joints <i>Spalten, Schläuche, Röhren, erweiterte Kluft- und Schichtfugen</i>	Untergruppe A2 Gaps, pipes, shaft- and cavern-like cavities <i>Spalten, Schläuche, schacht- und höhlenartige Hohlräume</i>	Untergruppe A3 Caves, shafts <i>Höhlen, Schächte</i>
Dimensions Abmessungen	V < 1 m <sup>3</sup> A < 1 m <sup>2</sup> b < 1 m	V = 1 m <sup>3</sup> to 125 m <sup>3</sup> A = 1 m <sup>2</sup> to 25 m <sup>2</sup> b = 1 m to 5 m	V > 125 m <sup>3</sup> A > 25 m <sup>2</sup> b > 5 m

client and contractor attempted to agree a contract covering a best case and a worst case TBM drive, long negotiations were necessary due to the already described constant further development of the probably feasible TBM distance with the directly resulting contractual difficulties. Despite numerous technical and contractual setbacks, the feasible TBM section could nonetheless be divided into altogether eleven development stages until the TBM finally reached the south portal of the Boßler Tunnel in November 2016 (Figure 6).

Altogether three contract variations were produced for the general implementation of the extended TBM drive from 2012 to 2016 and could as last be finalised with the breakthrough of the TBM at the Buch portal in November 2016. During this long period, ATA had to take on a great technical, contractual and economic risk and was, despite the ever declared will of the client backed up by action was exposed to the risk of an unsecured end result of the still open provision of evidence.

### 9 Experience with the TBM drive in the east bore

Looking back on the now completed TBM drive of the east bore with a length of 8,753 m, it can be stated that implementation was not determined by construction but by the necessary preceding technical and design process, which was laborious and incremental. Advance rates of more than 30 m per working day often overtook the contractual and design preconditions.

machbaren TVM-Strecken trotzdem in insgesamt elf Entwicklungsschritten erweitert werden, bis die TVM letztendlich im November 2016 das Südportal des Boßlertunnels erreicht hatte (Bild 6).

Insgesamt wurden drei bauvertragliche Vereinbarungen zur grundsätzlichen Umsetzung der erweiterten TVM-Fahrt von 2012 bis 2016 erstellt und konnten schlussendlich erst mit dem TVM-Durchschlag am Portal Buch im November 2016 finalisiert werden. In diesem langen Zeitraum musste die ATA ein sehr großes technisches, vertragliches und wirtschaftliches Risiko eingehen und war trotz des jederzeit deklarierten, und tatkräftig gelebten Wollens des Auftraggebers dem Risiko des nicht gesicherten Ausgangs der noch offenen Nachweisführungen ausgesetzt.

### 9 Erfahrung mit der TVM-Fahrt in der Oströhre

Mit der nunmehr bereits umgesetzten TVM-Fahrt in der Oströhre mit 8.753 m Vortrieb kann rückblickend festgestellt werden, dass die Umsetzung nicht durch die Bauausführung bestimmt war, sondern durch die notwendigen vorlaufenden technisch und planerisch zeitaufwendigen und inkrementellen Umsetzungsvorgänge. Tagesleistung von mehr als 30 m pro Arbeitstag haben die bauvertraglichen und planerischen Vorleistungen oftmals eingeholt.

Vorsorgemaßnahmen für das Durchfahren der kritischen Strecken mit unterschiedlichen Tübbingtypen waren für die Tübbingproduktion und Lagerlogistik eine

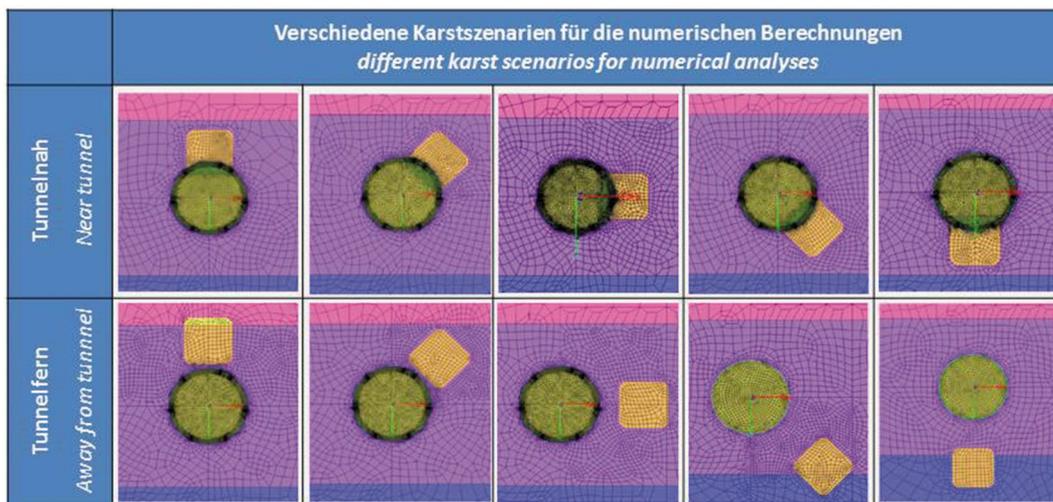


Fig. 5. Location and shape of karst structures analyzed in FE  
 Bild 5. Lage und Form der im FE Modell untersuchten Verkarstungsstrukturen

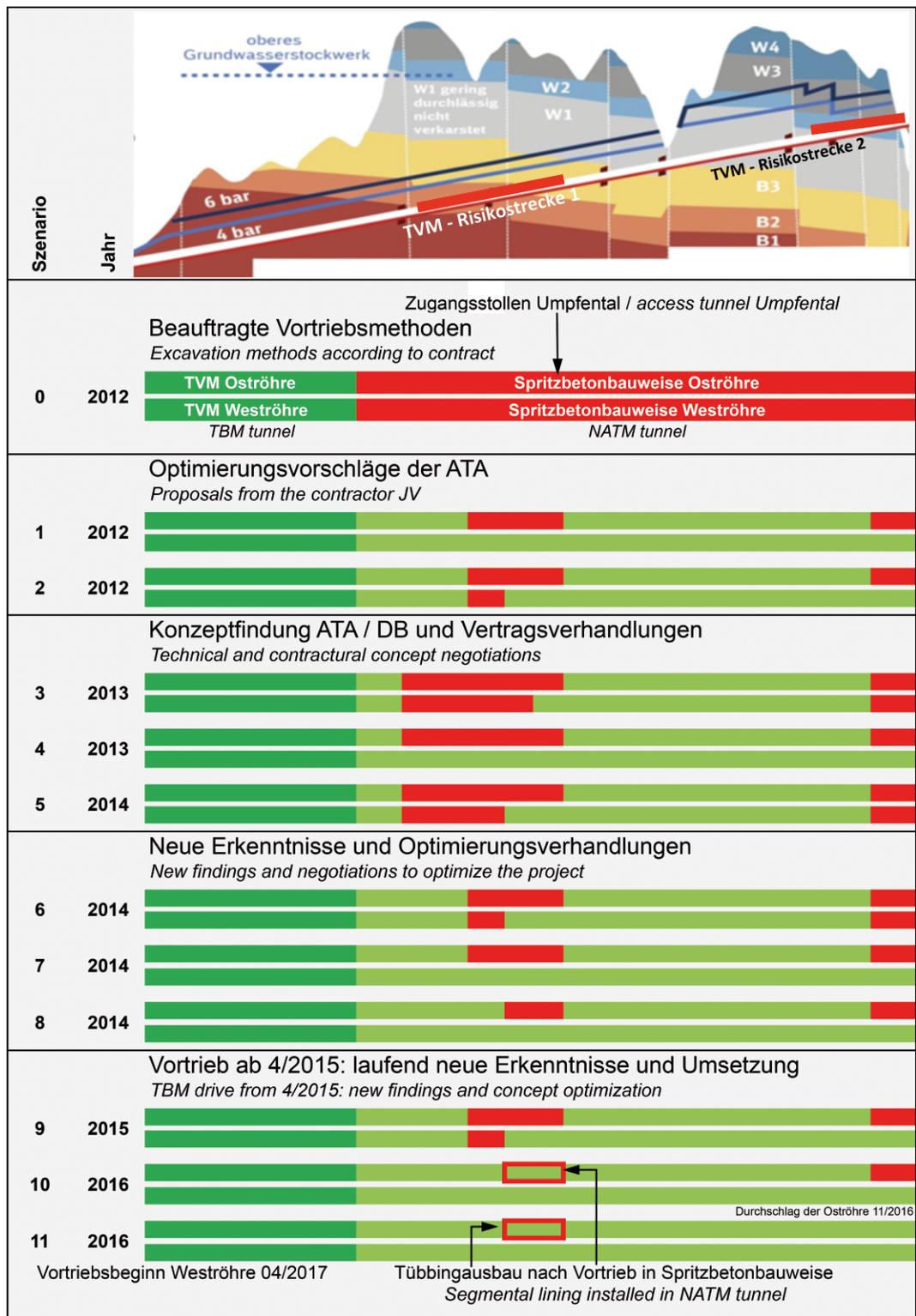


Fig. 6. Development steps for the TBM drive sections  
 Bild 6. Entwicklungsschritte für die Verlängerung der TVM-Fahrt

Precautionary measures for the passage through the critical sections with different types of segments and storage logistics was a great challenge. Eight formwork sets for segments were used with a thickness of 45 cm and four sets for segments with a thickness of 65 cm. The regular average daily production was more than 100 segments.

In contrast to the apprehensions, the installed TBM power of 127,000 kN was never fully exploited in the squeezing tunnel sections. Even TBM stoppages of several

große Herausforderung. Acht Schalsätze für Tübbinge mit einer Dicke  $d = 45$  cm und vier Schalsätze für Tübbinge mit einer Dicke  $d = 65$  cm kamen zum Einsatz. Mittlere Tagesstückzahlen von mehr als 100 Tübbingen sind die Regelproduktion.

Entgegen der Befürchtung mussten in den druckhaften Tunnelstrecken die vorsorglich installierten TVM-Leistungsressourcen von 127.000 kN Vorschubkraft nicht ausgeschöpft werden. Auch Stillstände der TVM über

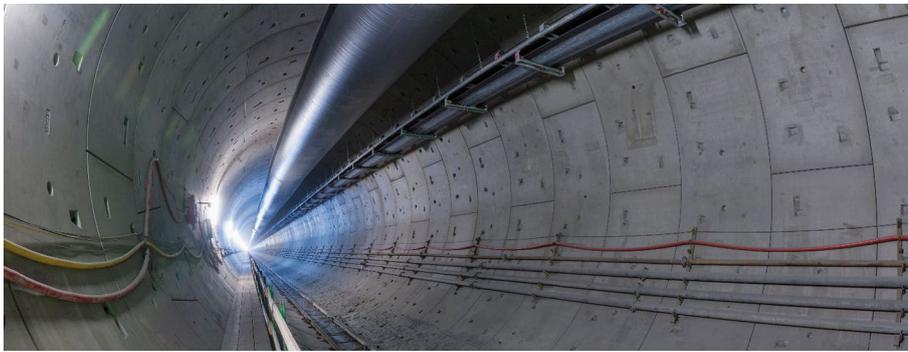


Fig. 7. Very good quality of tunnel lining thanks to use of bi-component annular grout  
Bild 7. Sehr hohe Ausbaugqualität durch Bi-Komponenten Ringspaltmörtel

days in these zones did not have any adverse effects on the restarting of the TBM. The maximum thrust force needed was 70,000 kN. For the first time on a TBM drive in Germany, so-called bi-component grout was used, cement grout with accelerator, which excellently stabilised the segment lining (Figure 7). The maximum ring displacements were less than 2 cm, ensuring a high-quality segment lining. Detailed experience of the TBM drive through the Brown Jurassic is reported in the article from *Voringer et al.* [4] in this issue.

The TBM broke through in the east bore after 18 months of work in November 2016. After rebuilding, the TBM will drive the 8,739 m long west bore from April 2017 with planned completion in May 2018. It can now be assumed that the elaborate technical and design measures for the implementation of TBM tunnelling in the east bore and the experience gained will have a particularly positive effect.

Starting from a brave decision in 2012 and the intermediate result in 2016, the optimisation of the TBM drive at the Boßler Tunnel can be described as a full success for all parties.

## References

- (1) *Breidenstein M.*: Bahnprojekt Stuttgart-Ulm: Der Alaufstieg – Partnerschaftliche Anpassung eines komplexen Bauvertrags nach Vertragsabschluss. Taschenbuch für den Tunnelbau 2016, pp. 285–306. Berlin: Ernst & Sohn 2015.
- (2) WBI Beratende Ingenieure: Boßler Tunnel. Tunnelbautechnisches Gutachten. Oktober 2010.
- (3) *Fischer O., Schmidt-Thrö G.*: Bemessung und Konstruktion von Längsfugen beim Tübbingausbau, Taschenbuch für den Tunnelbau 2016, pp. 81–134. Berlin: Ernst & Sohn, 2015.
- (4) *Voringer, J., Zenz, R., Meyer, A., Strauss, A., Hofmann, A.*: Experience with the TBM drive through weak claystones at the Boßler Tunnel/Erfahrungen mit der TVM-Fahrt durch Tongesteine mit geringen Festigkeiten im Boßler Tunnel. Geomechanics and Tunnelling 10 (2017), No 2., pp. 135–144.



Dipl.-Ing. Dr. mont. Peter Schubert  
iC consulenten Ziviltechniker GesmbH  
Zollhausweg 1  
5101 Bergheim, Austria  
p.schubert@ic-group.org



Ing. Kurt Joham  
PORR Bau GmbH  
Absberggasse 47  
1100 Vienna, Austria  
kurt.joham@porr.at



Dipl.-Ing. Manfred Bauer  
G. Hinteregger & Söhne GmbH  
Bergerbrauuhofstrasse 27  
5020 Salzburg, Austria  
m.bauer@hinteregger.co.at

mehrere Tage in diesen Zonen sind ohne Auswirkungen auf ein Wiederanfahren der TVM geblieben. Die maximal benötigte Vorschubkraft betrug 70.000 kN. Mit dem in Deutschland erstmals bei einem TVM-Vortrieb zur Ausführung gelangten so genannten Bi-Komponenten-Mörtel, d.h. Zementmörtel mit Beschleuniger, konnte der Tübbingausbau ausnehmend gut stabilisiert werden (Bild 7). Dabei kam es zu maximalen Ringverschiebungen von kleiner als 2 cm, wodurch ein qualitativ hochwertiger Tübbingausbau sichergestellt werden konnte. Über die detaillierten Erfahrungen mit der TVM-Fahrt im Braunjura wird im Beitrag von *Voringer et al.* [4] in diesem Heft berichtet.

Der TVM-Durchschlag in der Oströhre erfolgte nach 18 Monaten Vortrieb im November 2016. Nach der Umbauphase wird die TVM ab April 2017 bis voraussichtlich Mai 2018 die 8.739 m lange Weströhre auffahren. Dabei kann davon ausgegangen werden, dass sich die aufwändigen technischen und planerischen Maßnahmen zur Umsetzung der TVM-Fahrt in der Oströhre und die Vortriebs-erfahrung besonders positiv auswirken werden.

Ausgehend von einer mutigen Entscheidung 2012 und dem Zwischenergebnis 2016 kann die Optimierung der TVM-Fahrt am Boßlertunnel für alle Beteiligten als voller Erfolg bezeichnet werden.