

Boßler Tunnel: Influence of Rock Mechanics on the Tunneling Concept – Tendering and Execution

Boßlertunnel: Einfluss der Felsmechanik auf das Vortriebskonzept – Ausschreibung und Ausführung

Using the example of the Boßler Tunnel, the importance of careful rock mechanical investigations for the excavation concept of a tunnel is shown. The preliminary exploration revealed that squeezing rock conditions were to be expected in the middle section of the tunnel. In another tunnel section, karstification had to be expected. Towards this background, the tunnel was tendered for construction with conventional means ("shotcrete method"). Along the first 2.8 km, the use of a TBM was permitted. By driving an exploration shaft and gallery combined with accompanying rock mechanical investigations and numerical calculations, it was possible to create the basis for a TBM-excitation in the entire formation of the Brown Jurassic. In addition, the program for karst exploration was adapted to the requirements of a TBM heading.

Am Beispiel des Boßlertunnels wird gezeigt, welche Bedeutung sorgfältige, felsmechanische Untersuchungen für das Vortriebskonzept eines Tunnels haben. Die Vorerkundungen ergaben, dass im mittleren Tunnelabschnitt mit druckhaften Verhältnissen zu rechnen war. In einem weiteren Abschnitt musste mit Verkarstungen gerechnet werden. Der Tunnel wurde daraufhin in Spritzbetonbauweise ausgeschrieben. Auf den ersten 2,8 km wurde der Einsatz einer TVM zugelassen. Durch das Auffahren eines Erkundungsschachts und -stollens und begleitende felsmechanische Untersuchungen mit Berechnungen gelang es, die Voraussetzungen für einen Einsatz der TVM in der gesamten Formation des Braunjuras zu schaffen. Außerdem wurde das Erkundungsprogramm zur Karsterkundung an die Erfordernisse eines TVM-Vortriebs angepasst.

Prof. Dr.-Ing. Walter Wittke, Managing Director/Geschäftsführer, WBI GmbH, Weinheim, Germany/Deutschland

Dipl.-Ing. Jörg Rainer Müller, Technical project manager/Projektleiter Technik PFA 2.2, DB Projekt Stuttgart-Ulm GmbH, Germany/Deutschland

Dipl.-Ing. Dieter Schmitt, Authorized officer/Prokurist, WBI GmbH, Weinheim, Germany/Deutschland

Dr.-Ing. Patricia Wittke-Gattermann, Authorized officer/Prokurist, WBI GmbH, Weinheim, Germany/Deutschland

Dipl.-Ing. Meinolf Tegelkamp, Authorized officer/Prokurist, WBI GmbH, Weinheim, Germany/Deutschland

1 Introduction

In the following, the importance of careful rock mechanical investigations for the excavation concept of a tunnel will be shown using the example of the Boßler Tunnel. On the basis of the results, it was possible to excavate a tunnel with a tunnel boring machine over its entire length, though the tender had limited TBM excavation to a minor length and predominantly foreseen conventional excavation.

2 Project

The 8.8 km long Boßler Tunnel consists of two tubes arranged at a distance of 30 m with circular cross sections and an inner diameter of approx. 10 m. The tunnel forms part of the 15 km long ascent to the Swabian Alb, which also includes the 4.8 km long Steinbühl tunnel and the bridge over the Fils valley connecting the two tunnels [1]. The tunnel also includes the 950 m long Umpfental access gallery, which meanwhile has been backfilled (Fig. 1).

1 Einleitung

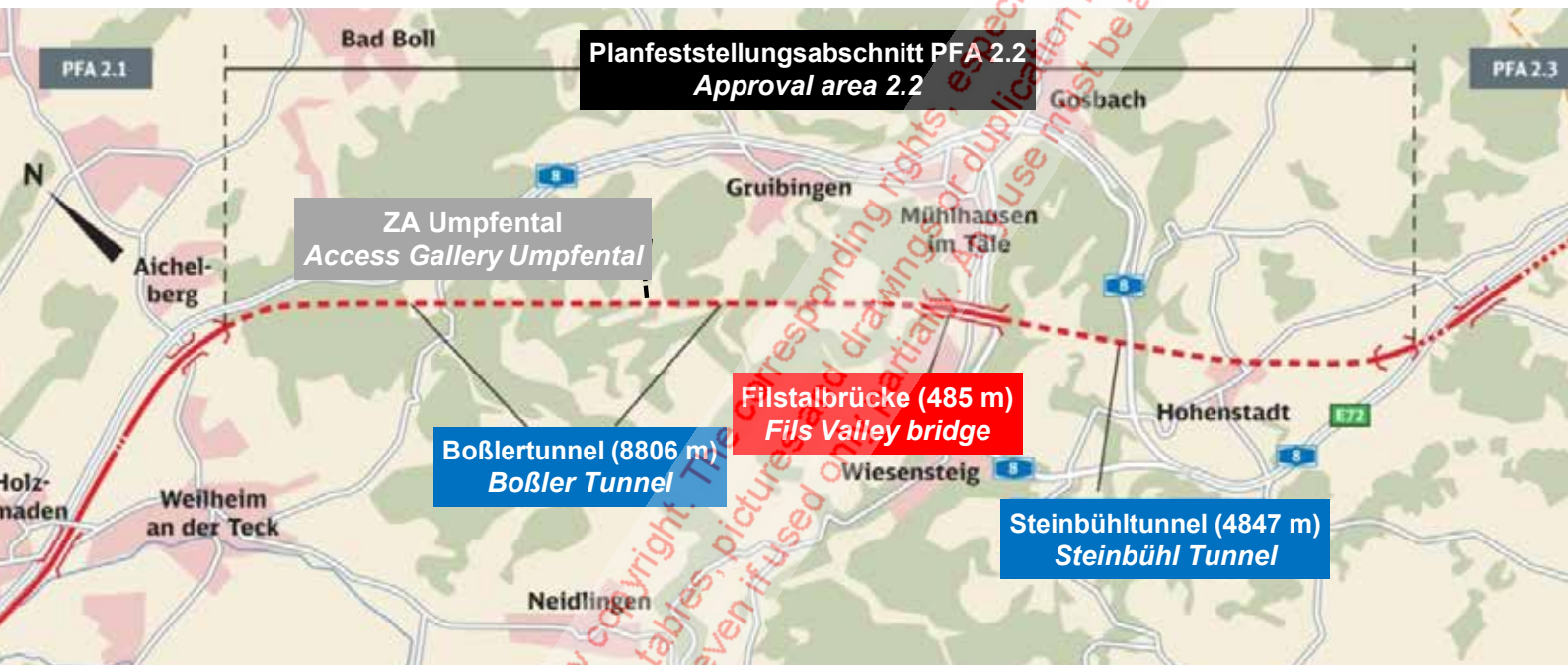
Im Folgenden soll am Beispiel des Boßlertunnels gezeigt werden, welche Bedeutung sorgfältige felsmechanische Untersuchungen für das Vortriebskonzept eines Tunnels haben. Die Ergebnisse haben dazu geführt, dass ein ursprünglich überwiegend in der konventionellen Bauweise ausgeschriebener Tunnel auf seiner gesamten Länge mit einer Tunnelvortriebsmaschine aufgefahren werden konnte.

2 Projekt

Der 8,8 km lange Boßlertunnel besteht aus zwei in einem Abstand von 30 m angeordneten Röhren mit Kreisquerschnitten und einem Innendurchmesser von ca. 10 m. Er ist Teil des 15 km langen Aufstiegs auf die Schwäbische Alb, zu dem außerdem noch der 4,8 km lange Steinbühl tunnel und die beide Tunnel verbindende Filstalbrücke gehören [1]. Zum Tunnel gehört auch der zwischenzeitlich wieder verfüllte, 950 m lange Zwischenangriffsstollen Umpfental (Bild 1).

- Neubaustrecke, offene Linienführung
New railway line, on ground surface
- ⋯ Neubaustrecke, Tunnel
New railway line, tunnel

1 Plan view of approval area (PFA) 2.2
Lageplan Planfeststellungsabschnitt 2.2



Credit/Quelle: DB Projekt Stuttgart-Ulm

3 Preliminary Exploration

Before tendering the construction, a profound geological and rock-mechanical investigation was carried out in six phases. With the aid of core drillings, the ground conditions in the project area were explored [2].

According to this exploration, the Boßlertunnel, starting from the portal Aichelberg, had to cross the strata Aalenium 1, Aalenium 2 and Bajocium to Callovium of the Brown Jurassic. In the subsequent sections, the approximately 8800 m long tunnel is located in the layers of the White Jurassic. In the area of the Brown Jurassic, the maximum overburden height above the tunnel's roof is approx. 280 m. It is reached within the layers of Aalenium 2, at the transition to Aalenium 1 (Fig. 2).

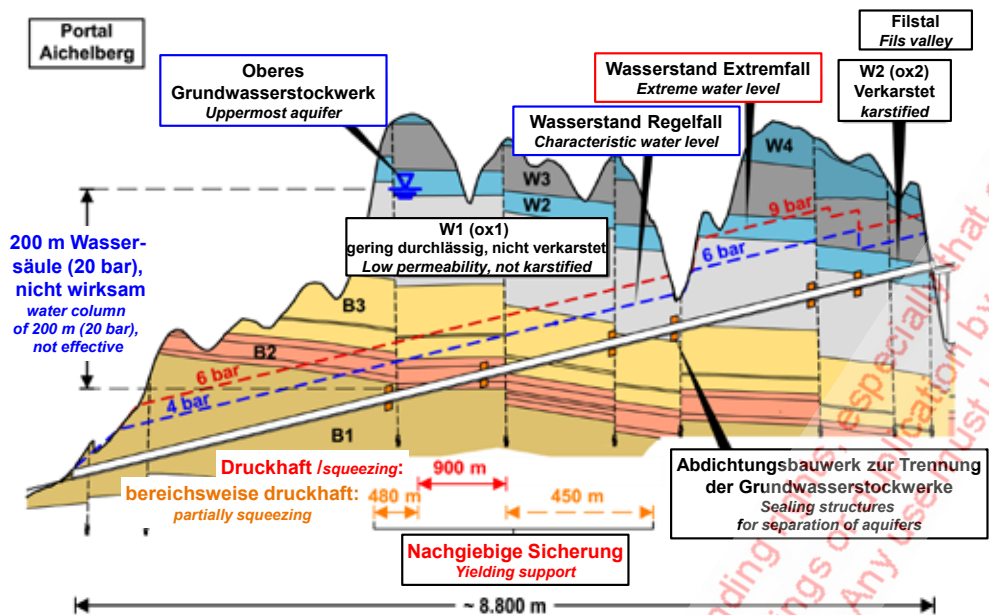
Due to the low permeability of the claystones of the Brown Jurassic, various aquifers were encountered in the exploration drillings. In order to prevent that the high water pressure resulting from the uppermost aquifer is acting along the entire tunnel length, six sealing structures were designed and constructed to prevent groundwater flowing

3 Voruntersuchungen

Der Ausschreibung der Baumaßnahme ging ein eingehendes, geologisch-felsmechanisches Untersuchungsprogramm voraus, das in sechs Phasen durchgeführt wurde. Mit Hilfe von Kernbohrungen wurden die im Projektgebiet anstehenden Schichten aufgeschlossen [2].

Danach waren beim Bau des Boßlertunnels ausgehend vom Portal Aichelberg die Schichtglieder Aalenium 1, Aalenium 2 und Bajocium bis Callovium des Braunjuras zu durchfahren. In weiterer Folge kommt der ca. 8800 m lange Tunnel in den Schichten des Weißjuras zu liegen. Im Bereich des Braunjuras beträgt die maximale Überdeckung der Tunnelfirste ca. 280 m. Sie wird in den Schichten des Aalenium 2, am Übergang zum Aalenium 1 erreicht (Bild 2).

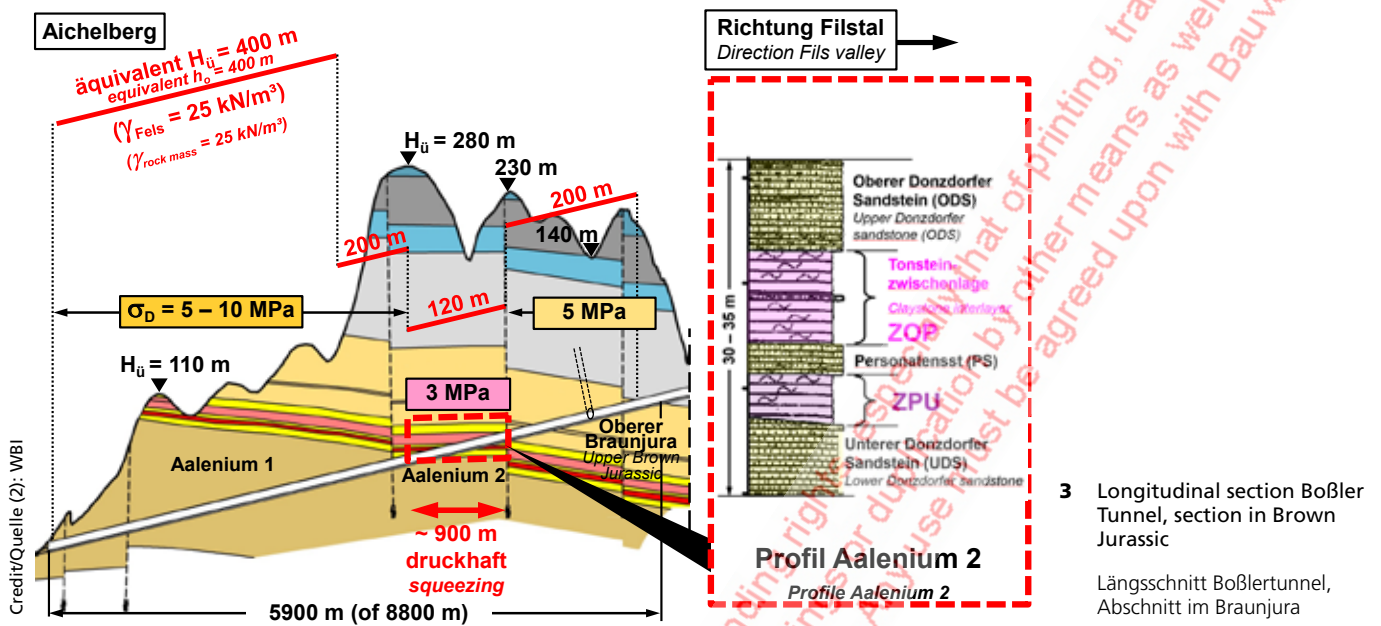
Als Folge der geringen Wasserdurchlässigkeit der Tonsteine des Braunjura wurden in den Voruntersuchungen verschiedene Grundwasserstockwerke erbohrt. Damit der aus dem oberen Grundwasserstockwerk resultierende große Wasserdruck nicht auf die gesamte Tunnellänge wirksam werden kann, wurden sechs Abdichtungsbauwerke konzipiert und ausgeführt, mit



2 Longitudinal section Boßler Tunnel
Längsschnitt Boßlertunnel

along the tunnel from one aquifer to the next (Fig. 2). In the context of the preliminary explorations, the uniaxial compressive strengths of the intact rocks were determined, among other things. If these values are divided by the unit weight of the rock mass, then the overburden height is obtained at which the weight of the overlying rock mass corresponds exactly to the uniaxial compressive strength of the intact rock. The overburden heights determined in this way are entered in red in Fig. 3. A value of 120 m was determined for the Aalenium 2. The existing overburden height in the area in which the tunnel passes through the layers of Aalenium 2 is, however, considerably larger with 280 m max. Therefore, squeezing rock conditions had to be expected in this zone. The decisive layers regarding this aspect are the claystone interlayers ZOP and ZPU, which are intercalated between the sandstone layers ODS, PS and UDS in the Aalenium 2 (Fig. 3). In Fig. 4 exemplary photos of the cores from the ZOP and ZPU are shown, which were obtained in the course of the reconnaissance. They indicate a comparatively low strength of the claystone interlayers. Against this background, the approx. 900 m long tunnel section in Aalenium 2 was described as squeezing in the tender (Fig. 3). When cavities are constructed in squeezing rock condition, the exceeding of the intact rock strength leads to stress redistributions and deformations in the subsoil, which may result in heavy loading of the supporting means. Usually, a stiff lining cannot be economically dimensioned under such conditions. On the other hand, inadequately dimensioned support may lead to a loss of stability of the cavity (Fig. 5, left).

denen die Längsläufigkeit an den Stockwerksgrenzen unterbunden wurde (Bild 2). Im Rahmen der Vorerkundung wurden u. a. die einaxialen Druckfestigkeiten der Gesteine ermittelt. Dividiert man diese Werte durch die Wichte des Felses, so erhält man die Überlagerungshöhe, bei der das Gewicht des überlagernden Gebirges gerade der einaxialen Druckfestigkeit entspricht. Die so ermittelten Überlagerungshöhen sind in Bild 3 in Rot eingetragen. Für das Aalenium 2 wurde ein Wert von 120 m ermittelt. Die vorhandene Überlagerung in dem Bereich, in dem der Tunnel die Schichten des Aalenium 2 durchfährt, ist jedoch mit max. 280 m deutlich größer. Es war deshalb hier mit druckhaften Verhältnissen zu rechnen. Maßgebend sind dabei die Tonsteinzwischenlagen ZOP und ZPU, die zwischen den Sandsteinschichten ODS, PS und UDS im Aalenium 2 eingelagert sind (Bild 3). Die in Bild 4 exemplarisch dargestellten Fotos der Kerne aus dem ZOP und ZPU, die im Zuge der Vorerkundung gewonnen wurden, lassen auf eine vergleichsweise geringe Festigkeit der Tonsteinzwischenlagen schließen. Vor diesem Hintergrund wurde der ca. 900 m lange Tunnelabschnitt im Aalenium 2 in der Ausschreibung als druckhaft beschrieben (Bild 3). Beim Hohlraumbau in druckhaften Gebirgsverhältnissen treten infolge des Überschreitens der Gesteinsfestigkeit Spannungslagerungen und Verformungen im Baugrund auf, die zu einer starken Beanspruchung der Sicherungsmittel führen können. Ein steifer Ausbau lässt sich unter solchen Verhältnissen i. d. R. nicht wirtschaftlich bemessen. Eine unzureichend dimensionierte Sicherung kann andererseits zum Verlust der Standsicherheit des Hohlraums führen (Bild 5, links). In der Praxis wird daher im druckhaften Gebirge ein nachgiebiger Ausbau verwendet, der kontrolliert radiale Verschiebungen der Ausbruchlaibung vor dem Ringschluss der Schale



In practice, a yielding support is therefore used in squeezing rock conditions, which allows for controlled radial displacements of the excavation contour before the shotcrete membrane is closed. This way, a load-bearing arch can develop in the subsoil. After the ring is closed, the remaining loads still acting on the support can be taken over without damage. Such a yielding support with longitudinal slots, in which compression elements are installed, was planned for the excavation of the tunnel section in Aalenium 2 (Fig. 5, right).

In the White Jurassic, the tunnel crosses the layers of Oxfordium 1 as well as Oxfordium 2 near the portal Buch. In Oxford 2, karstification phenomena had to be expected, whereas the marlstones and marly limestones of Oxford 1 are generally not karstified (Fig. 2).

4 Tender Design

Due to the squeezing rock conditions to be expected in the Aalenium layers and the karstification phenomena to be expected above all in Oxford 2, the Boßler Tunnel was put out to tender for conventional construction. As already mentioned, a yielding support with compressible elements in longitudinal slots was planned for in the tunnel section in Aalenium 2. For the tunnel sections in Oxford 2 and at the top of Oxford 1, the following measures were planned: exploratory drillings advancing the excavation and behind the temporary face, careful geological mapping of the rock formations exposed in the area of the temporary face and geophysical measurements. These measures were planned to detect, and then backfill, karstification, which could hinder tunnel heading and impair the load-bearing capacity of the internal lining.

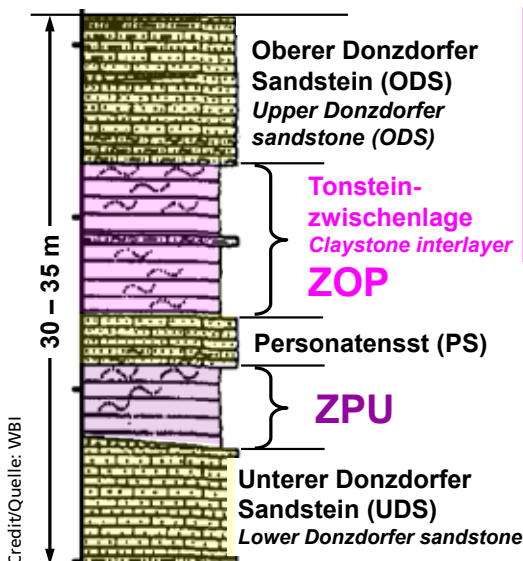
zulässt und dadurch zur Ausbildung eines tragenden Gewölbes im Untergrund führt. Nach dem Ringschluss können die dann noch auf den Ausbau einwirkenden Lasten schadlos aufgenommen werden. Ein solcher nachgiebiger Ausbau mit Längsschlitzten, in denen Stauchelemente vorgesehen sind, wurde für das Auffahren des Tunnelabschnitts im Aalenium 2 geplant (Bild 5, rechts).

Im Weißjura wurden die Schichten des Oxfordiums 1 sowie in der Nähe des Portals Buch das Oxfordium 2 durchfahren. Beim Oxford 2 musste mit Verkarstungserscheinungen gerechnet werden. Dagegen sind die Mergel- und Mergelkalksteine des Oxford 1 i. d. R. unverkarstet (Bild 2).

4 Ausschreibungsentwurf

Aufgrund der in den Schichten des Aalenium zu erwartenden druckhaften Verhältnisse und wegen der vor allem im Oxford 2 zu erwartenden Verkarstungserscheinungen wurde der Boßlertunnel in Spritzbetonbauweise ausgeschrieben. Dabei wurde – wie erwähnt – für den Streckenabschnitt im Aalenium 2 ein nachgiebiger Ausbau mit Stauchelementen in Längsschlitzten vorgesehen.

Für die Tunnelabschnitte im Oxford 2 und im Top des Oxford 1 wurden dem Vortrieb vorausseilende und nachteilende Erkundungsbohrungen, sorgfältige, geologische Kartierungen des im Bereich der temporären Ortsbrust aufgeschlossenen Gebirges und geophysikalische Messungen vorgesehen. Damit sollten Verkarstungen, die zu einer Behinderung des Vortriebs führen können und die Tragfähigkeit der Innenschale beeinträchtigen können, erkannt und durch Verfüllung saniert werden. Für den an das Portal Aichelberg anschließenden 2,8 km langen Tunnelabschnitt bis km 42,1 wurde in der Ausschreibung auch ein TVM-Vortrieb zugelassen.



Bohrung BK 22/6 GM
Drilling BK 22/6 GM



◀ 4 Preliminary exploration, core photos of claystone interlayers of the Aalenium 2
Vorerkundung, Kernfotos aus den Tonsteinzwischenlagen des Aalenium 2

5 ▶ Squeezing rock mass and yielding support
Druckhaftes Gebirge und nachgiebiger Ausbau

For the 2.8 km long tunnel section from the portal Aichelberg up to km 42.1, the tender also allowed for TBM heading.

In order to permit the use of a TBM over the entire tunnel length, it was proposed in the course of the preliminary exploration to excavate the intermediate access gallery Umpfental as an advanced construction measure and to drive an exploration gallery from there into the Aalenium 2. The aim was to investigate the rock mechanical properties of this formation more reliably than it is possible with vertical core drilling. However, this proposal was rejected for cost reasons.

5 Explorations during the Construction Phase

5.1 Exploratory Structure in squeezing Rock

Location

Starting the detailed design and construction, it became clear that the joint venture for construction "ARGE Tunnel Albaufstieg (ATA)" intended to extend the tunnel section to be excavated by TBM as far as possible beyond chainage km 42.1. Therefore, the client, who was represented by Dipl.-Ing. Breidenstein, took the initiative and agreed with the ATA joint venture and with the tunneling expert to construct an exploratory structure [3, 4] in order to investigate the rock mechanical properties of the layers of Aalenium 2 in more detail and, if possible, to arrive at a more favourable assessment of the rock mass conditions, which allows to execute the TBM solution. The exploratory structure was arranged at the end of the conventionally excavated Umpfental access gallery. From the bottom of an approx. 49 m deep shaft, a 25 m long exploration gallery was excavated in the claystone interlayers ZOP. The

Um den Einsatz einer TVM auf der gesamten Tunnellänge zuzulassen, wurde im Rahmen der Voruntersuchungen vorgeschlagen, den Zwischenangriff Umpfental als vorgezogene Baumaßnahme aufzufahren und von dort einen Erkundungsstollen in das Aalenium 2 vorzutreiben. Damit sollten die felsmechanischen Eigenschaften dieser Formation zuverlässiger untersucht werden, als dies mit vertikalen Kernbohrungen möglich ist. Dieser Vorschlag wurde jedoch aus Kostengründen verworfen.

5 Erkundungen während der Bauzeit

5.1 Erkundungsbauwerk im druckhaften Gebirge

Lage

Mit dem Beginn der Ausführungsplanung und dem Bau wurde das Bestreben der ausführenden ARGE Tunnel Albaufstieg (ATA) deutlich, den maschinell aufzufahrenden Tunnelabschnitt möglichst über den Bau-km 42,1 hinaus zu verlängern. Es wurde daher auf Veranlassung des Bauherrn, der durch Herrn Dipl.-Ing. Breidenstein vertreten war, gemeinsam mit der Arge ATA und dem Tunnelbautechnischen Gutachter die Ausführung eines Erkundungsbauwerkes vereinbart [3, 4], um die felsmechanischen Eigenschaften der Schichten des Aalenium 2 vertieft zu untersuchen und nach Möglichkeit zu einer günstigeren Einschätzung der Gebirgsverhältnisse und damit zur Machbarkeit der TVM-Lösung zu gelangen. Das Erkundungsbauwerk wurde am Ende des konventionell aufgefahrenen Zwischenangriffstollens Umpfental angeordnet. Vom Fuß eines ca. 49 m tiefen Schachtes wurde hier ein 25 m langer Erkundungsstollen in den Tonsteinzwischenlagen ZOP aufgefahren. Die Überdeckung des Stollens beträgt ca. 200 m und ist damit etwas geringer als die Überdeckung des Tunnelabschnitts, der in ca. 700 m Entfernung in den Schichten ZOP aufzufahren war (Bild 6).

Credit/Quelle: WBI; Bochumer Eisenhütte Heintzmann



**Längsschlitz
mit Stauchelementen**
*Longitudinal slots with
compression elements*

overburden height above the gallery amounts to approx. 200 m and is thus somewhat lower than the overburden height above the tunnel section, which was to be excavated in the ZOP layers at a distance of approx. 700 m (Fig. 6).

Mapping

During the shaft and tunnel construction, the rock mass was systematically mapped. The ZOP layers of Aalenium 2 are characterized by an alternation of dark claystones and intercalated thin sandstone banks and lenses. The bedding is approximately horizontal, at small scale bending of layers may be observed. In the course of the explorations and their interpretation it was found that the thin sandstone banks have a reinforcing effect on the claystones.

Deformability

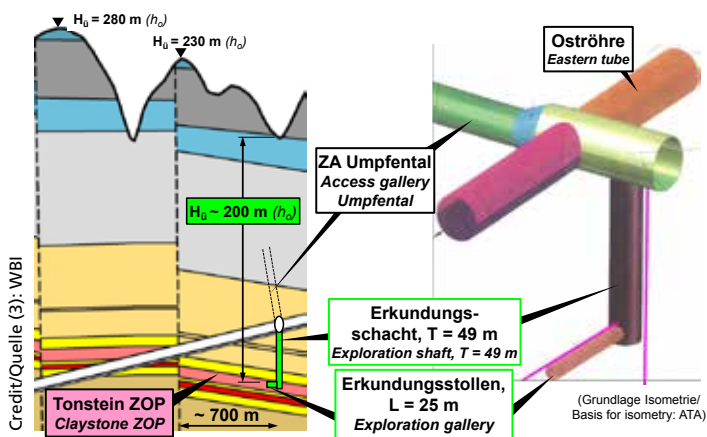
The deformability of the claystone interlayers ZOP and ZPU was measured in dilatometer tests. In the ZOP, values between Ehorz. = 2000 and 4000 MPa were determined for the horizontal direction in 4 tests. In the ZPU, values of Ehorz. = 100 to 2500 MPa were measured in five tests. For the vertical direction, a value of approx. Evert. = 3000 MPa was determined in one test in the ZOP.

Kartierung

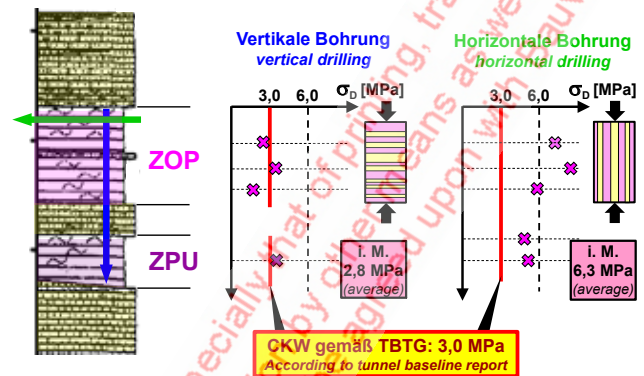
Beim Herstellen der Hohlräume wurde das Gebirge systematisch kartiert. Die Schichten ZOP des Aalenium 2 sind gekennzeichnet durch einen Wechsel von dunklen Tonsteinen und eingelagerten dünnen Sandsteinbänkchen und -linsen. Die Schichtung ist näherungsweise horizontal ausgebildet, kleinräumig sind auch Schichtverbiegungen vorhanden. Im Zuge der Erkundungen und deren Interpretation konnte festgestellt werden, dass die Sandsteinbänkchen eine bewehrende und verstärkende Wirkung für die Tonsteine haben.

Verformbarkeit

In Dilatometerversuchen wurde die Verformbarkeit der Tonsteinzwischenlagen ZOP und ZPU gemessen. Im ZOP wurden dabei für die horizontale Richtung in vier Versuchen Werte zwischen Ehorz. = 2000 und 4000 MPa bestimmt. Im ZPU wurden in fünf Versuchen Werte von Ehorz. = 100 bis 2500 MPa gemessen. Für die vertikale Richtung wurde im ZOP in einem Versuch ein Wert von ca. Evert. = 3000 MPa ermittelt. Die charakteristischen Werte des E-Moduls betragen nach den Ergebnissen der Vorerkundung Ehorz. = 600 MPa und Evert. = 300 MPa. In den Feldversuchen aus dem Erkundungsschacht wurde somit im Vergleich zur Vorerkundung eine geringere Verformbarkeit des Gebirges bestimmt.



6 Location of exploratory shaft and gallery
Lage Erkundungsschacht und -stollen



7 Results of the uniaxial compressive tests on samples from ZOP/ ZPU
Ergebnisse der einaxialen Druckversuche an Proben aus dem ZOP/ ZPU

According to the results of the preliminary exploration, the characteristic values of the Young's modulus are $E_{horz.} = 600 \text{ MPa}$ and $E_{vert.} = 300 \text{ MPa}$. Thus, the field tests, which were carried out from the exploratory shaft, resulted in a smaller deformability of the rock than that determined in the preliminary explorations.

Compressive Strength

The uniaxial compressive strength was measured on rock samples from the clay interlayers ZOP and ZPU. The uniaxial compressive strength of 3 MPa, determined in the preliminary explorations, was confirmed on cores obtained from vertical boreholes (Fig. 7, left diagram). Additional core samples were taken from horizontal drillings and tested in the laboratory. In these samples, the layers were oriented in parallel with the direction of loading. It was shown that the thin sandstone banks intercalated along the bedding led to an increase in the strength of the samples resulting in somewhat higher values of about 6 MPa on the average (Fig. 7, right diagram). The strengthening effect of the sandstones could be plausibly reproduced in 3D FE analyses, in which the proportions and orientation of the clay- and sandstones were varied. In addition to the uniaxial compression tests, triaxial compression tests were also carried out on rock samples from the claystone interlayers ZOP and ZPU. In these tests, the strengths measured in the uniaxial compression tests could be confirmed. In addition, the residual strength of the intact rocks was investigated in these tests. According to the test results, the residual strength is about 30 to 50 % of the initial strength.

Bedding Planes

Besides the deformability of the rock mass and the strength of the intact rock, the discontinuity planes have

Festigkeit

An Gesteinsproben aus den Tonsteinzwischenlagen ZOP und ZPU wurde die einaxiale Druckfestigkeit gemessen. Dabei konnte an Kernen, die aus vertikalen Bohrungen gewonnen wurden, die im Zuge der Vorerkundung ermittelte einaxiale Druckfestigkeit von 3 MPa bestätigt werden (Bild 7, linkes Diagramm).

Aus horizontalen Bohrungen wurden zusätzliche Kernproben entnommen und im Laborversuch untersucht. Die Schichten verliefen in diesen Proben parallel zur Belastungsrichtung. Es zeigte sich, dass die entlang der Schichtung eingelagerten Sandsteinbänkchen zu einer Erhöhung der Festigkeit der Proben führten und dadurch etwas größere Werte von i. M. ca. 6 MPa gemessen werden konnten (Bild 7, rechtes Diagramm). Die verstärkende Wirkung der Sandsteine konnte im Rahmen von 3D FE-Berechnungen, in denen die Anteile und die Orientierung der Ton- und Sandsteine variiert wurden, plausibel nachvollzogen werden.

Neben den einaxialen Druckversuchen wurden auch dreiaxiale Druckversuche an Gesteinsproben aus den Tonsteinzwischenlagen ZOP und ZPU durchgeführt. Die in den einaxialen Versuchen gemessenen Festigkeiten konnten dadurch bestätigt werden. Darüber hinaus wurde mit Hilfe dieser Versuche die Restfestigkeit der Gesteine untersucht. Nach den Versuchsergebnissen beträgt diese etwa 30 bis 50 % der Ausgangsfestigkeit.

Schichtung

Neben der Verformbarkeit des Gebirges und der Festigkeit des Gesteins haben die Trennflächen einen wesentlichen Einfluss auf das Spannungs- und Verformungsverhalten des Felses. Daher wurden die Eigenschaften der Trennflächen im Rahmen der Erkundungen ebenfalls untersucht. Anhand der gewonnenen Bohrkern und der Kartierungen konnte festgestellt werden, dass in den Tonsteinen horizontale ebene und

a significant influence on the stress and deformation behaviour of the rock mass. Therefore, the properties of the discontinuity planes were also investigated within the framework of the explorations. The drill cores as well as the mappings of the rock mass during excavation revealed that the claystones have horizontal, flat and smooth bedding parallel planes, which significantly reduce the shear strength of the rock mass in parallel with bedding (**Fig. 8**). Due to the comparatively small spacing of the bedding parallel planes, they have an important impact on the load-bearing behaviour of the rock mass when excavating the tunnel.

Back-Analysis of Exploratory Structure

Taking into account the results of the field and laboratory tests, the displacements and stresses measured during the sinking of the shaft and the excavation of the exploration gallery were interpreted with the aid of analyses. For this purpose, a 3D FE mesh was generated. By using the vertical symmetry plane, both the shaft and the exploration gallery could be reproduced with their actual dimensions. On the first 5 m length, the exploration gallery was simulated with a 30 cm thick stiff shotcrete membrane in accordance with the support installed in situ.

The subsequent 20 m long section was simulated with a 20 cm thick slotted shotcrete membrane. In the longitudinal joints, which were arranged in the invert, the

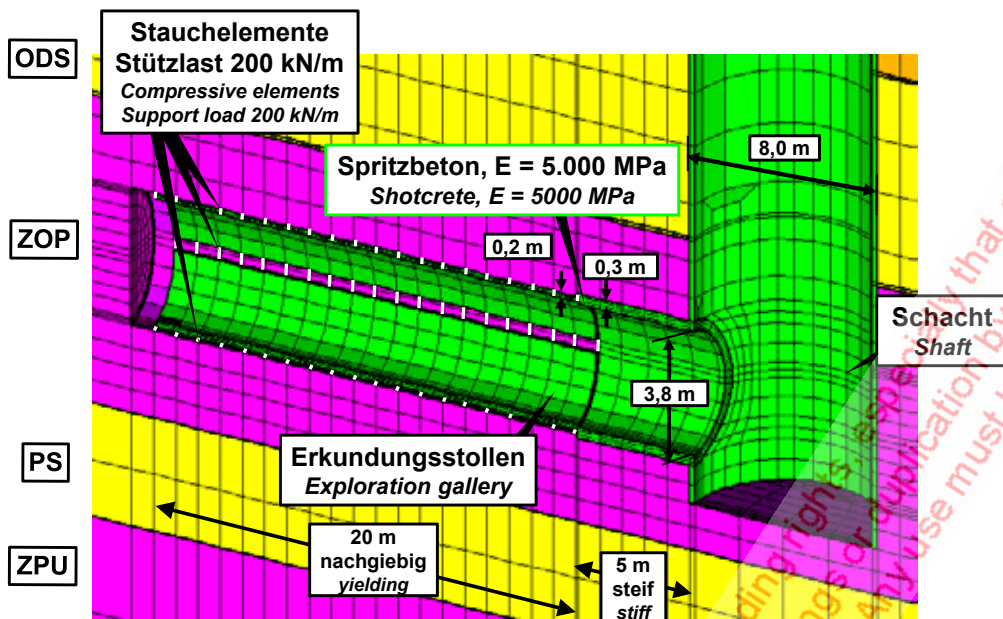
glatte Schichtfugen ausgebildet sind, die die Scherfestigkeit des Gebirges parallel zur Schichtung signifikant herabsetzen (**Bild 8**). Aufgrund des vergleichsweise geringen gegenseitigen Abstandes dieser Trennflächen sind sie für das Tragverhalten des Felses beim Auffahren des Tunnels wichtig.

Rückrechnung Erkundungsbauwerk

Unter Berücksichtigung der Ergebnisse der Feld- und Laborversuche wurden die beim Abteufen des Schachtes und beim Auffahren des Erkundungsstollens gemessenen Verschiebungen und Spannungen rechnerisch interpretiert. Dazu wurde zunächst ein räumliches FE-Netz generiert, in dem – unter Ausnutzung der vertikalen Symmetrieebene – sowohl der Schacht als auch der Erkundungsstollen mit ihren tatsächlichen Abmessungen nachgebildet wurden. Der Erkundungsstollen wurde, entsprechend den in situ eingebauten Sicherungsmitteln, auf den ersten 5 m Länge mit einer 30 cm dicken steifen Spritzbetonschale simuliert. Der anschließende 20 m lange Abschnitt wurde mit einem geschlitzten Ausbau und 20 cm dicker Spritzbetonschale nachgebildet. In den Längsfugen, die in der Sohle, der Firste und den beiden Ulmen angeordnet wurden, wurde entsprechend der Arbeitslinie der verwendeten Stauchelemente eine Stützlast

- 8 Horizontal bedding parallel discontinuity in the ZOP
Horizontale Schichtfuge im ZOP





9 Exploratory shaft and gallery, detail of FE mesh
Erkundungsschacht und -stollen, Detail des FE-Netzes

roof and the sidewalls on either side, a support load of 200 kN/m was taken into account according to the working line of the compressive elements used. The Young's modulus of the shotcrete was assumed to $E = 5000 \text{ MPa}$ (Fig. 9), [4, 5, 6].

In the analyses, the deformability of the rock mass, the strength of the intact rock, the shear parameters of the discontinuity planes and the primary state of stresses were varied. The calculated displacements of the excavation contour and the stresses in the shotcrete membrane were compared to the values measured in situ. Finally, a parameter combination was determined with which a good fit with the measurement results can be achieved.

Updating the Structural Model as well as the Rock Mechanical Parameters

On the basis of the monitoring in the exploratory structure and of the back-analysis of the measured values, the structural model as well as the rock mechanical parameters of Aalenium 2, which had been described in the tunneling baseline report, were reviewed and updated. As a result, it is possible to dispense with the use of lower bound parameters for the claystone interlayers of Aalenium 2. The Young's modulus of the rock mass can be assumed to be somewhat higher. The increased horizontal in situ stresses described in the tunneling baseline report are effective in the claystones of Aalenium 2. For the sandstones, the omission of the lower bound parameters also results in a certain shift towards more favourable conditions (Fig. 10).

Verification of the Parameters on Tunnel Scale

The Eastern tunnel tube was excavated from the access gallery downwards sloping to the portal Aichelberg. It had

von 200 kN/m berücksichtigt. Der E-Modul des Spritzbetons wurde mit einem Wert von $E = 5000 \text{ MPa}$ angenommen (Bild 9), [4, 5, 6].

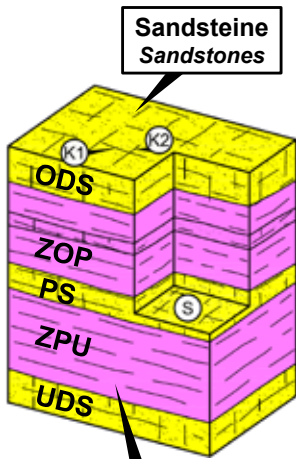
In den Berechnungen wurden die Verformbarkeit des Gebirges, die Festigkeit des Gesteins, die Scherparameter der Trennflächen und der Primärspannungszustand variiert. Die errechneten Verschiebungen der Ausbruchlaibung und die Spannungen in der Spritzbetonschale wurden jeweils den in situ gemessenen Werten gegenübergestellt. Es wurde schließlich eine Parameterkombination ermittelt, mit der die Messergebnisse rechnerisch gut nachvollzogen werden können.

Fortschreibung Gefügemodell und felsmechanische Kennwerte

Auf der Grundlage des Monitorings im Erkundungsbauwerk und der Rückrechnung der Messwerte wurden das im Tunnelbautechnischen Gutachten beschriebene Gefügemodell und die felsmechanischen Kennwerte für das Aalenium 2 überprüft und fortgeschrieben. Danach kann für die Tonsteinschichten des Aalenium 2 auf den Ansatz von unteren Kennwerten verzichtet werden. Der E-Modul des Gebirges kann etwas größer angenommen werden. Die im Tunnelbautechnischen Gutachten beschriebenen erhöhten horizontalen Primärspannungen sind in den Tonsteinen des Aalenium 2 wirksam. Für die Sandsteine ergibt sich durch den Entfall der unteren Kennwerte ebenfalls eine gewisse Verschiebung in Richtung günstigerer Verhältnisse (Bild 10).

Überprüfung der Kennwerte im Tunnelmaßstab

Der fallende Vortrieb der Oströhre vom Zwischenangriff Umpfental in Richtung Aichelberg, hatte Ende November/Anfang Dezember 2014 nach Durchfahren einer Störung bei TM 695, die Schichten des Aalenium 2 erreicht. Die untere Hälfte des



Tonsteine
Claystones

Schicht layer	Verformbarkeit Gebirge Deformability rock mass		Festigkeit Gestein Strength intact rock		Schерparameter Trennflächen Shear parameters discontinuity planes			
	E ₁ [MN/m ²]	E ₂ [MN/m ²]	σ _p /σ _{pRest} [MN/m ²]	Φ _G [°]	c _s /c _{sRest} [MN/m ²]	φ _s [°]	c _k [MN/m ²]	φ _k [°]
Sandsteine Sandstones • ODS • PS • UDS	E = 3000 2000 (1000)		17,5 (5,0)	35 (30)	0,10 (0,05)	25 (20)	0,5 (0,2)	35 (30)
Tonsteine* Claystones • ZOP • ZPU	2500 600 (400)	1000 300 (200)	5/2,5 3,0 (1,5)	20 (15)	0,2/0,1 0,05 (0)	17,5 (15)	---	---

Fortgeschriebene Kennwerte/updated parameters:

- (Untere Kennwerte) entfallen/(lower bound parameters) not applicable
- E-Modul etwas größer/E-modulus slightly higher
- Horizontalspannungen: $\sigma_{horz.} = \sigma_{vert.}$ gemäß Prognose/horizontal stresses: $\sigma_{horz.} = \sigma_{vert.}$ acc. to prediction

10 Structural model of the Aalenium 2 and rock mechanical parameters

Gefügemodell des Aalenium 2 und felsmechanische Kennwerte

Sandvik 1/2 S

© Bauverlag: This publication is protected by copyright. Any use must be agreed upon with Bauverlag. Especially not of printing, translation, presentation and publication, the use of figures, tables, pictures and drawings or duplication by other means as well as saving the documents in electronic format are reserved, even if used only partially.



11 Eastern tube, photograph of the temporary face at tunnel meter 709.4

Orströhre, Foto der Ortsbrust bei TM 709,4

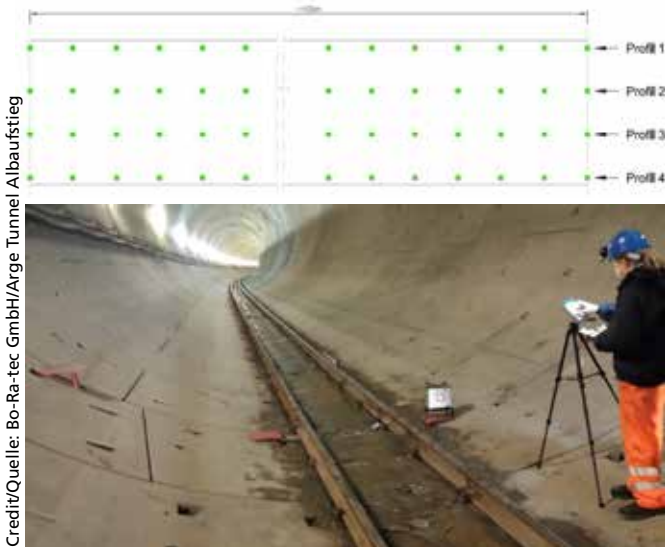
reached the layers of Aalenium 2 at the end of November/ beginning of December 2014 after passing through a fault zone at tunnel meter 695. Here, the lower half of the vault is located in the claystone interlayers ZOP. In the upper vault, the sandstones of the Upper Donzdorf Sandstone are located (Fig. 11). In view of the importance of the Aalenium 2 for the optional extension of the TBM heading, the parties involved decided to continue the vault heading for about 40 m into the Aalenium 2 and to additionally evaluate the data of the geotechnical monitoring in order to review and confirm the results of the exploratory structure. This approach became possible because the layers of a12 were encountered about 100 m earlier beyond the fault zone than predicted by the geological model. The vault cross-section in a12 was supported with a 40 cm thick shotcrete membrane with two layers of reinforcement and without temporary vault invert. In addition, spiles and face anchors were installed.

The vault heading was interpreted with the aid of a 3D FE model [4, 7, 8]. This was based on the updated rock mechanical parameters of the Aalenium 2 as shown in Fig. 10. In three measuring cross-sections, roof subsidences of 12 to 32 mm were measured until 14.12.2014. Up to this moment, displacements of 24 to 48 mm occurred at the sidewalls. These displacements could be very well reproduced with the FE model calibrated on the basis of the exploratory structure.

The back-analyses lead to stress resultants in the 40 cm thick shotcrete membrane, which indicate high stresses. The maximum stresses approximately correspond with the calculative strength of the shotcrete. A dimensioning of the membrane according to DIN 1045-1 therefore leads to large required reinforcement degrees of up to 44 cm²/m per side

Kalottenquerschnitts kommt hier in den Tonsteinzwischenlagen ZOP zu liegen. Im oberen Querschnittsteil stehen die Sandsteine des Oberen Donzdorfer Sandsteins an (Bild 11). Vor dem Hintergrund der Bedeutung des Aalenium 2 für die optionale Verlängerung des maschinellen Vortriebs wurde von den Beteiligten entschieden, den Kalottenvortrieb etwa 40 m in das Aalenium 2 fortzusetzen und die Daten des geotechnischen Monitorings zur Absicherung der Ergebnisse des Erkundungsbauwerks zusätzlich auszuwerten. Dieses Vorgehen wurde möglich, da die Schichten des a12 jenseits der Störungzone etwa 100 m früher angetroffen wurden als nach dem geologischen Modell prognostiziert. Die Sicherung des Kalottenquerschnitts im a12 erfolgte mit einer 40 cm dicken zweilagig bewehrten Spritzbetonschale ohne temporäres Sohlgewölbe. Zusätzlich wurden Spieße und Ortsbrustanker eingebaut.

Der Vortrieb des Kalottenquerschnitts wurde mit Hilfe eines räumlichen FE-Modells interpretiert [4, 7, 8]. Diesem wurden die fortgeschriebenen felsmechanischen Kennwerte des Aalenium 2 gemäß Bild 10 zugrunde gelegt. In 3 Messquerschnitten wurden bis zum 14. 12. 2014 Firstsenkungen von 12 bis 32 mm gemessen. An den Ulmen traten bis zu diesem Zeitpunkt Verschiebungen von 24 bis 48 mm auf. Diese Verschiebungen konnten mit dem auf Basis des Erkundungsbauwerks kalibrierten Rechenmodell sehr gut nachvollzogen werden. Die Schnittgrößen, die für die 40 cm dicke Spritzbetonschale bei der Nachrechnung ermittelt wurden, weisen eine hohe Beanspruchung der Schale aus. Die maximalen Spannungen entsprechen etwa der Rechenfestigkeit des Spritzbetons. Eine Bemessung der Schale nach DIN 1045-1 führt daher zu großen erforderlichen Bewehrungsgehalten bis maximal 44 cm²/m je Seite. Die in situ nur mit einer zweilagigen leichten Mattenbewehrung ausgeführte Spritzbetonschale, war rechnerisch somit deutlich überbeansprucht.



Credit/Quelle: Bo-Ra-tec GmbH/Arge Tunnel Almbaufstieg

13 Microgravimetric measurements at tunnel invert, measuring grid and execution

Mikrogravimetrische Messungen an der Tunnelsohle – Messraster und Ausführung

first 2.8 km only, could be extended to the entire length of both tunnel tubes. In the layers of Aalenium 2, 65 cm thick segments were used. In the other tunnel sections, the segmental lining had a thickness of 45 cm. A segment division of 6 + 1 was selected (Fig. 15). In the area of the sealing structures to separate the different aquifers, special segments were used, which enabled grouting for sealing via five rows of circumferential grouting nozzles (Fig. 16). In this way, both tubes have been successfully excavated.

7 Summary

The preliminary exploration for the 8.8 km long Boßlertunnel revealed that squeezing rock mass condition was to be expected in the layers of Aalenium 2 belonging to the Brown Jurassic. In the area of the Buch portal, where the tunnel tubes lie in the layers of Oxford 2, karstification had to be expected.

Therefore, the call for tender foresaw the construction of the tunnel with conventional means ("shotcrete method"). For the first 2.8 km, which connect to the Portal Aichelberg, the use of a TBM was permitted.

6 TVM-Lösung

Auf dieser Grundlage wurde der für die ersten 2,8 km vorgesehene Vortrieb mit einer Hartgesteinsmaschine und einschligem Tübbingausbau auf die gesamte Länge beider Röhren ausgedehnt.

In den Schichten des Aalenium 2 kamen 65 cm dicke Tübbinge zum Einsatz. In den übrigen Tunnelabschnitten betrug die Tübbingstärke 45 cm. Es wurde eine Tübbingteilung von 6 + 1 gewählt (Bild 15). Im Bereich der Dammringe zur Trennung der Grundwasserstockwerke kamen Sondertübbinge zum Einsatz, die Abdichtungsinjektionen über fünf Reihen umlaufender Injektionsstutzen ermöglichten (Bild 16). Auf diesem Wege wurden zwischenzeitlich beide Röhren erfolgreich aufgeföhren.

7 Zusammenfassung

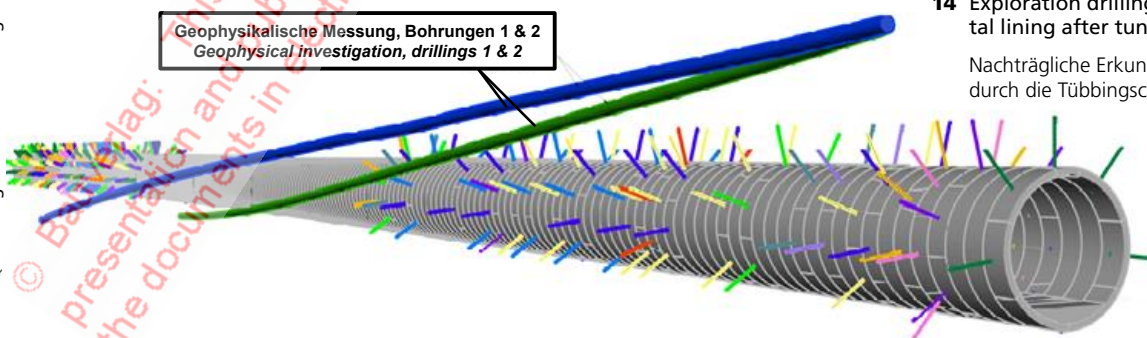
Die Vorerkundungen für den 8,8 km langen Boßlertunnel ergaben, dass in den zum Braunjura gehörenden Schichten des Aalenium 2 mit druckhaften Verhältnissen zu rechnen war. Im Bereich des Portals Buch, in dem die Tunnelröhren in den Schichten des Oxford 2 zu liegen kommen, musste mit Verkarstungen gerechnet werden.

Daraufhin wurde der Tunnel in Spritzbetonbauweise ausgeschrieben. Auf den ersten 2,8 km, die an das Portal Aichelberg anschließen, wurde der Einsatz einer TVM zugelassen.

Durch das Aufföhren eines Erkundungsschachts und -stollens und begleitende felsmechanische Untersuchungen mit Berechnungen gelang es, die Voraussetzungen für einen Einsatz der TVM in der gesamten Formation des Braunjuras zu schaffen. Außerdem gelang es, dass Erkundungsprogramm zur Karsterkundung an die Erfordernisse eines TVM-Vortriebs anzupassen.

Zwischenzeitlich wurden beide Röhren erfolgreich aufgeföhren. Die Tübbingstärke wurde in den zunächst als druckhaft eingestuften Gebirgsabschnitten mit 65 cm gewählt. In den anderen Abschnitten wurden Tübbinge mit 45 cm Dicke ausgeföhrt.

Das vorliegende Beispiel des Boßlertunnels zeigt, welche Bedeutung die Erkundung der Gebirgsverhältnisse für die Planung und Ausführung von Tunnelbaumaßnahmen hat. Die Ausführung eines Erkundungsbauwerkes in der Vorerkundungsphase kann nach Meinung der Autoren dabei ein wert-



14 Exploration drilling through segmental lining after tunnel heading

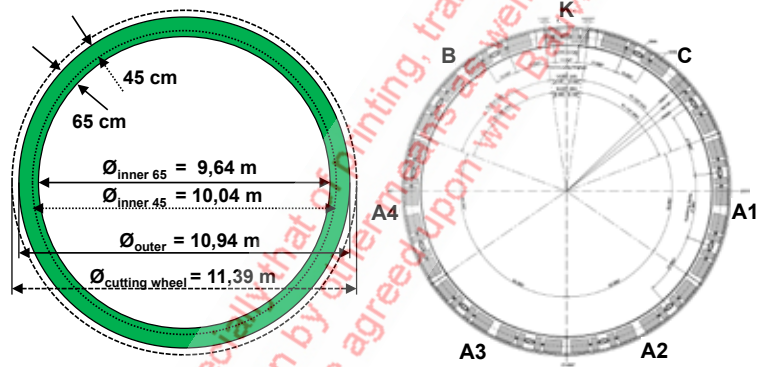
Nachträgliche Erkundungsbohrungen durch die Tübbingschale

Credit/Quelle: Arge Tunnel Almbaufstieg

By driving an exploration shaft and gallery combined with accompanying rock mechanical investigations and numerical calculations, it was possible to create the basis for allowing for a TBM excavation in the entire formation of the Brown Jurassic. In addition, it was achieved to adapt the program for karst exploration to the requirements of a TBM heading.

Meanwhile, both tunnel tubes have been successfully excavated. In the tunnel sections, along which squeezing rock had originally been expected, 65 cm thick segments were installed. In all other tunnel sections, a 45 cm thick segmental lining was foreseen.

This example of the Boßler Tunnel very clearly shows the importance of exploration of the rock mass for the design and construction of tunnel structures. According to the authors, the construction of an exploratory structure already during the phase of preliminary exploration can represent a valuable element in order to significantly reduce uncertainties for planning and construction and pave the way for an economic solution. Against the background of the corresponding costs, the construction of such an exploratory structure can come into consideration especially in case of difficult ground conditions and large construction volumes.



Credit/Quelle: WBI/Arge Tunnel Alaufstieg

15 Cross-section with segmental lining division
Querschnitt mit Tübbingteilung

volles Element darstellen, um Unsicherheiten für die Planung und den Bau signifikant zu reduzieren und den Weg für eine wirtschaftliche Lösung zu bereiten. Vor dem Hintergrund der Kosten kommt die Ausführung eines solchen Erkundungsbauwerkes insbesondere bei schwierigen Baugrundverhältnissen und großem Bauvolumen in Betracht.

16 Special segments with grouting nozzles for sealing structures

Sondertübbinge für die Dammring mit Injektionsstutzen

References/Literatur

- [1] Müller, J. R.; Lahres, A.: Bahnprojekt Stuttgart-Ulm. NBS Wendlingen-Ulm – Bau des Alaufstiegs. Vortrag anlässlich des Tunnelbausymposiums an der Bundeswehruniversität München am 8.6.2018.
- [2] WBI: NBS Wendlingen-Ulm, PFA 2.2, Alaufstieg, Boßlertunnel, Tunnelbautechnisches Gutachten, Oktober 2010.
- [3] Breidenstein, M.; Bauer, M.: Der Boßler-Tunnel - Baubegleitende Anpassung der Vortriebskonzepte nach Vertragsabschluss. Geotechnik in Forschung und Praxis. WBI-PRINT 18. Weinheim WBI GmbH, 2015.
- [4] Schmitt, D.; Wittke-Gattermann, P.: Erkundungsbauwerk im Bereich des Zwischenangriffs Umpfental; Auswertung und Interpretation. Geotechnik in Forschung und Praxis. WBI-PRINT 18. Weinheim WBI GmbH, 2015.
- [5] ATA: PA 2.2, Los 2: Ergebnisse der baubegleitend durchgeführten geotechnischen Messungen in Tunnel, ZA-Stollen, Erkundungsschacht und Erkundungstollen: Verschiedene Daten und geotechnische Wochenberichte. Eingang bis Dezember 2014.
- [6] IGF, Institut für Gebirgsmechanik Leipzig GmbH: Gesteinsmechanische Untersuchungen – Projekt Alaufstieg, verschiedene Berichte und Zwischenberichte 2014. Eingang bis Dezember 2014.
- [7] Wittke, W.; Schmitt, D.; Wittke-Schmitt, B.; Wittke, M.: Tragverhalten eines nachgiebigen Ausbaus im druckhaften Gebirge. Taschenbuch für den Tunnelbau 2012. Essen: VGE Verlag GmbH, 2012.
- [8] Wittke, W.: Rock Mechanics based on an Anisotropic Jointed Rock Model (AJRM), Verlag Ernst & Sohn GmbH & Co. KG, Berlin 2014.
- [9] ARGE Tunnel Alaufstieg: Nacherkundung ox2, 2018.

