

Consistent exploration by probe drilling and TSWD through the example of the Koralm Tunnel

Konsequente Vorauserkundung mittels Bohrungen und TSWD am Beispiel des Koralmtunnels

On contract KAT2 at the 33 km long Koralm Tunnel, two hard rock double shield TBMs are currently boring a total distance of about 17 km each through the Koralm crystalline. Due to the forecast ground conditions, particularly localised fault zones and aquiferous areas, systematic exploration is being undertaken to provide continuous prediction of ground conditions. The intention is only ever to bore through already explored rock through the consistent application of the standardised method adapted to suit the tunnelling. The exploration system being used is mainly based on probe drilling (rotary hammer and core drilling) and the seismic method. With the assistance of the geophysical exploration system TSWD disturbed areas of the rock mass can be detected up to a distance of about 150 m ahead of the machine. Thereby the source of the seismic waves, which propagate into the rock mass, is the cutting process of the TBM cutterhead. The supplementary and targeted use of hammer and core drilling, which can be drilled up to about 100 m ahead, enables the direct exploration of any fault zones and aquiferous regions and the evaluation of their characteristics and the effect to be expected on tunnelling. In order to evaluate the behaviour of the system and to verify the predictions, the geologists and geotechnicians on site perform continuous analyses of the machine data [1] and the geological documentation. This has led so far to good and reliable prediction results.

1 Introduction

On contract KAT2 at the Koralm Tunnel, the mechanised driving of the two main bores is being undertaken solely in already explored rock mass. The mechanised tunnel drive is boring through crystalline rock with overburdens of up to 1,200 m. The aim of exploration is to investigate the constructionally relevant geological, hydrogeological and geotechnical properties of the rock mass up to 100 m ahead of the machine. The main aim is to detect thick fault zones with a high content of cataclasites and strongly flowing formation water under high pressures. The systematic exploration being carried out in the leading (southern) bore consists of rotary hammer probe drilling and geophysical measurements (TSWD – Tunnel Seismic While Drilling). When appropriate, supplementary core drilling is carried out.

The exploration concept originally intended the continuous application of rotary hammer probe drilling in

Beim Baulos KAT2 des 33 km langen Koralmtunnels sind derzeit zwei Hartgesteins-Doppelschild-Tunnelvortriebsmaschinen, die das Koralmkristallin auf einer Gesamtlänge von je ca. 17 km durchörtern, im Einsatz. Aufgrund der prognostizierten Gebirgsverhältnisse, insbesondere der lokal auftretenden Störungszonen und bergwasserführenden Bereiche, wird ein systematisches Vorauserkundungssystem zur laufenden Prognose der Baugrundverhältnisse eingesetzt. In jedem Fall wird angestrebt, durch eine konsequente Anwendung standardisierter und auf den Vortrieb abgestimmter Methoden nur in erkundetem Gebirge vorzutreiben. Das zum Einsatz kommende Vorauserkundungssystem stützt sich im Wesentlichen auf Bohrungen (Dreh Schlagbohrungen und Kernbohrungen) und seismische Verfahren. Mithilfe des geophysikalischen Vorauserkundungssystems TSWD, das den Fräsvorgang des TBM-Bohrkopfs und die dabei in das Gebirge übertragenen Wellen als seismische Quelle nutzt, können gestörte Gebirgsbereiche bis zu 150 m voraus prognostiziert werden. Der ergänzende und gezielte Einsatz von Dreh Schlag- und Kernbohrungen, die bis zu 100 m vorseilend abgeteuft werden, ermöglicht eine direkte Erkundung allfälliger Störungszonen und wasserführender Bereiche und somit eine Bewertung hinsichtlich deren Ausprägung und deren erwartete Auswirkung auf das Vortriebsgeschehen.

Zur Beurteilung des Systemverhaltens und zur Verifikation der Prognose erfolgen durch die Geologen und Geotechniker vor Ort laufend Analysen der TBM-Maschinendaten [1] bzw. der baugelogischen Dokumentation. Dies hat bis dato zu guten und verlässlichen Prognoseergebnissen geführt.

1 Einleitung

Beim Baulos KAT2 des Koralmtunnels erfolgt der maschinelle Vortrieb der beiden Hauptrohre ausschließlich in vorauserkundetem Gebirge. Der maschinelle Vortrieb verläuft dabei in kristallinem Gebirge mit Überlagerungen von bis zu 1.200 m. Ziel der Vorauserkundung ist, das Gebirge bis zu 100 m voraus hinsichtlich der bautechnisch relevanten geologischen, hydrogeologischen und geotechnischen Eigenschaften zu erkunden. Dabei steht die Erkundung von mächtigen Störungszonen mit hohen Anteilen an Kataklastit sowie stark rinnenden Bergwasserzutritten mit hohen Druckniveaus im Vordergrund. Die in der vorseilenden Röhre (Südröhre) systematisch durchgeführte Vorauserkundung besteht aus Dreh Schlagbohrungen und geophysikalischen Messungen (TSWD – Tunnel

parallel with seismic imaging (TSWD) along a defined section of tunnel (about 5,000 m from the start of mechanised tunnelling) in order to test the system and the quality of its results. After the successful completion of this test phase, a decision was made to make use of the seismic system TSWD combined with only targeted use of hammer and where necessary core drilling for the entire length of contract KAT2. The following paper describes the contribution of each method of exploration to the daily predictions and how the method can be used to ensure optimal and consistent exploration.

2 Exploration by probe drilling

Holes are drilled by a rotary hammer drill from about 7 m behind the cutterhead through the ports provided in the shield of the TBM in the direction of advance with about 7° inclination upward (Fig. 1). The geologists on site assess the cuttings and observe the progress of drilling. These holes can only be drilled during the maintenance shift. The time taken for hammer drilling (diameter 76 mm) is about 6 to 8 h per 100 m drilled.

For core drilling, much more work is involved in drilling the same length and a duration of some days has to be assumed, although cores do of course provide the most reliable exploration of the geological conditions and assessment of the relevance for construction. Using rotary hammer drilling, however, a useful evaluation of the geological characteristics of weak zones in the rock mass can also be undertaken by assessing the cuttings, the flushing water and analysis of the drill data logger.

A simplified classification in the form of a traffic light system (green – yellow – red) serves as a simply understandable and comparable grading of the exploration results. Green stands for undisturbed areas, yellow for moderately to heavily fractured rock mass and red for pronounced fault zones with cataclastic content (Fig. 2).

3 Exploration by TSWD

Since the start of mechanised tunnelling in 2013, the tunnel seismic exploration process TSWD (Tunnel Seismic While Drilling) has been used as a tool for continuous geological-geotechnical exploration on the project. The essential feature of this method, which has been adapted for tunnelling and continuously further developed, is the use of the tunnel boring machine (TBM) itself as the seismic source [2] [3] [4].

The cutting process at the face radiates seismic waves into the rock mass and also excites the TBM itself to characteristic vibration [5]. Without any obstruction of tunnelling work, the vibrations of the TBM are continuously registered at the cutterhead (pilot signal) and the resulting seismic wave fields in drilled holes (geophone signal) be-



Fig. 1. Probe drill assembling
Bild 1. Bohreinrichtung für Erkundungsbohrung

Seismic While Drilling). Bei entsprechender Indikation und zur Detailerkundung werden ergänzend Kernbohrungen ausgeführt.

Das Vorauserkundungskonzept hatte für einen definierten Vortriebsabschnitt (ca. 5.000 m ab Beginn des kontinuierlichen Vortriebs) den durchgehenden Einsatz von Drehschlagbohrungen parallel zur Seismik (TSWD) vorgesehen, um damit die Systeme und deren Aussagekraft zu überprüfen. Nach erfolgreichem Abschluss dieser Testphase wurde festgelegt, das seismische System TSWD kombiniert mit nur mehr spezifisch eingesetzten Drehschlag- und ggf. erforderlichen Kernbohrungen für den gesamten Bauabschnitt KAT2 einzusetzen. Im Folgenden wird gezeigt, welchen Beitrag die jeweilige Vorauserkundungsmethode zur täglichen Prognose liefert und wie die Methoden kombiniert eingesetzt werden können, um eine optimale und konsequente Vorauserkundung sicher zu stellen.

2 Vorauserkundung mit Vorausböhrungen

Drehschlagbohrungen werden ca. 7 m hinter dem Bohrkopf in dafür vorgesehenen Bohrgassen durch das Schild der TBM in Vortriebsrichtung mit ca. 8° Steigung ange-setzt (Bild 1). Vor Ort erfolgen durch den Geologen die Begutachtungen des Bohrkleins und Beobachtungen des Bohrfortschritts. Diese Bohrungen können nur während der Wartungsschicht abgeteuft werden. Bei Drehschlagbohrungen (DN 76 mm) liegt der zeitliche Aufwand für 100 Bohrmeter bei ca. 6 bis 8 h.

Für Kernbohrungen sind für gleiche Bohrlängen un-gleich größere Aufwendungen und eine Dauer von einigen Tagen zu veranschlagen, wobei jedoch Kernbohrungen mit Sicherheit die verlässlichste Erkundung der geologischen

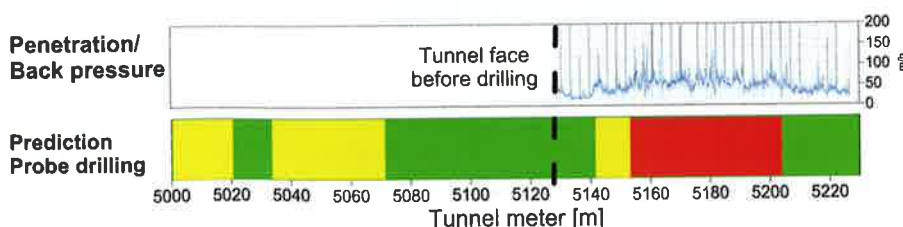


Fig. 2. Drill log und classification from a probe drilling
Bild 2. Penetration und Klassifizierung aus einer Vorausböhrung

side the backup. This data is converted to conventional seismic traces, analogous to blasting. TSWD is intended to detect and evaluate the seismic signals reflected from significant geological structures up to 150 m ahead of the cutterhead.

3.1 Acquisition and evaluation of the data

The pilot signal is recorded by accelerometers (pilot sensors) mounted directly on the rotating main bearing of the TBM (in the present case about 3 m behind the face). The sensors are arranged axially and radially at two positions (Fig. 3). In order to determine the optimal position for the pilot sensors and thus to ensure the quality of the pilot signal, a simple hammer blow test is undertaken during the installation of the system on site. The vicinity of the discs on the cutterhead is "excited" with a simple blow from a sledgehammer and the resulting signals are recorded and analysed at various positions on the main bearing. The optimal mounting position for the accelerometers is decided from the signal form and the frequency characteristics.

The borehole geophones, which consist of three individual components (arranged axially, radially and tangentially), are positioned in holes about 6 m long drilled into the tunnel sides from the backup (Fig. 4). Two opposing geophones form a seismic measurement cross-section, and two to three cross-sections are simultaneously fitted and in use. The measurement cross-sections advance with the TBM and are rebuilt at a spacing of 100 to 200 m, normally in the maintenance shift. No further construction work is necessary apart from drilling the holes for the measurement cross-sections.

The data from all measurement cross-sections is transmitted through appropriate data cables to a central

Verhältnisse und Abschätzung der bautechnischen Relevanz ermöglichen. Mit Drehschlagbohrungen können aber durch die Begutachtung des Bohrkleins, des Spülwassers und der Analyse des Bohrdatenschreibers wichtige Einschätzungen der geologischen Ausprägungen von Schwäche zonen im Gebirge vorgenommen werden.

Eine vereinfachte Kategorisierung im Sinne einer Ampelklassifikation (grün – gelb – rot) dient einer leicht verständlichen und vergleichbaren Einstufung der Erkundungsergebnisse. Dabei steht grün für ungestörte Bereiche, gelb für mäßig bis stark zerlegte Gebirgsbereiche und rot für ausgeprägte Störungsbereiche mit kataklastischen Anteilen (Bild 2).

3 Vorauserkundung mit TSWD

Seit Beginn des kontinuierlichen Vortriebs im Januar 2013 wird das tunnelseismische Vorauserkundungsverfahren TSWD (Tunnel Seismic While Drilling) als Hilfsmittel zur begleitenden geologisch-geotechnischen Vorauserkundung im Projekt eingesetzt. Das wesentliche Merkmal dieser für den Tunnelbau adaptierten und ständig weiter entwickelten Methode ist die Verwendung der Tunnelbohrmaschine (TBM) selbst als seismische Quelle [2] [3] [4].

Durch den Schneidprozess an der Ortsbrust werden seismische Wellen ins Gebirge abgestrahlt und auch die TBM selbst zu charakteristischen Vibrationen angeregt [5]. Ohne den Vortrieb zu beeinträchtigen erfolgt eine kontinuierliche Registrierung der Vibrationen der TBM am Bohrkopf (Pilotsignal) und des resultierenden seismischen Wellenfelds in Bohrlöchern (Geophonsignal) im Bereich des Nachläufers. Diese Daten werden zu konventionellen seismischen Spuren, analog zu Sprengungen, konvertiert. TSWD zielt auf die Detektion und Bewertung

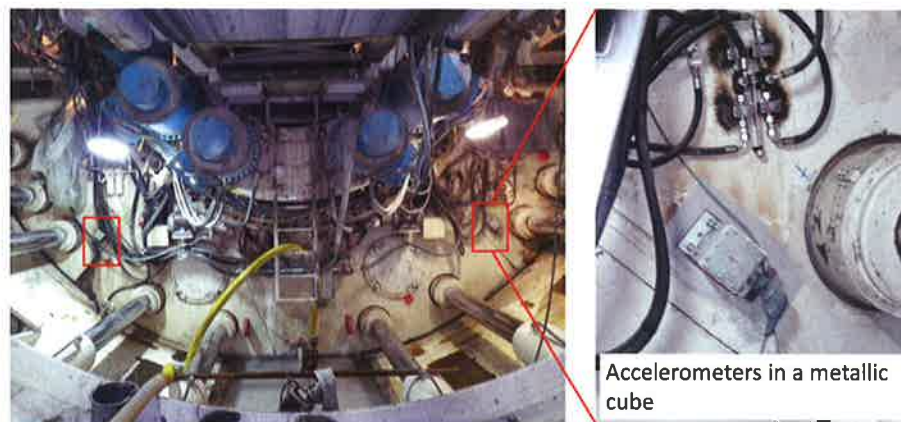


Fig. 3. Location of the accelerators at the cutting head of the TBM, observing for the pilot signal

Bild 3. Positionen der Beschleunigungsaufnehmer am Bohrkopf der TBM zur Registrierung des Pilotsignals

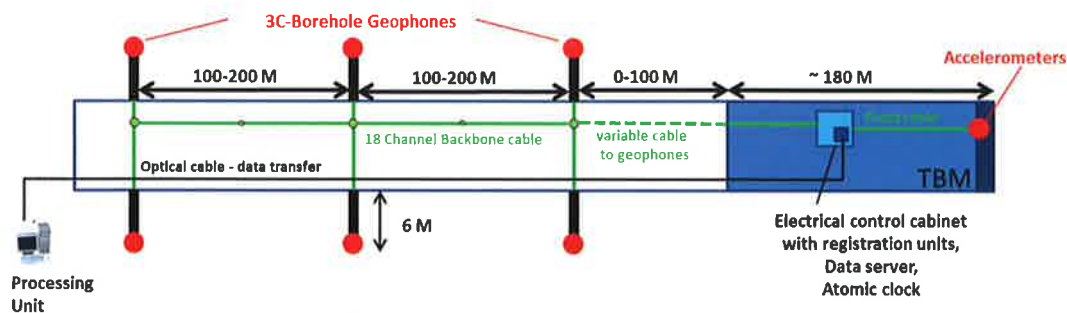


Fig. 4. TSWD layout at the southern tube TBM Koralm tunnel KAT2

Bild 4. TSWD Messschema auf der TBM in der Süd röhre Koralm tunnel Baulos KAT2

PC on the TBM. The PC is connected to the site network, so the data is available online to enable rugged and high-quality control. The sampling interval of the receiver units is 1,000 Hz. This is adequate since the principal frequency of the TBM as a seismic source is normally about 120 Hz in the present case. The time is synchronised by an atomic clock, which is connected to all receiver units and thus enables precise timing of the measurement system. If required, the TSWD data can also be correlated with measurements at the surface by using a GPS signal. The TSWD data is positioned from the available TBM datasets.

The data is evaluated by a geophysicist of the site who is part of the geology documentation team. This is essentially done by correlating the pilot signal with the geophone signals in a suitable manner and subjecting the result to standardised data processing [6]. The results are typical sections or wave images, which show reflections caused by structures in front of the face (Fig. 5). With TSWD, reliable detection of larger fault zones up to 150 m in front of the TBM is technically feasible.

3.2 Display and interpretation of results

The results (sections) from the individual measurement sections (separated into left- and right-hand geophones or sides) are displayed on a plan view of the tunnel. In these sections, significant reflections (reflection horizons) are imaged in accordance with the physical basics when geological structures with the appropriate impedance contrast are present in the rock mass in front of the face. In the present case, the axial geophone components are often preferred for the assessment since these deliver the most reliable results for steeply dipping fault zones. An essential part of the prediction is the assessment of the intersection of the reflection with the tunnel axis and thus the question how far from the face a fault zone is located. A classification of the relevance for tunnelling and thus the decision whether any hammer or core drilling is necessary is made in discussion with the geologists and geotechnicians on site. Assessment and interpretation are carried out daily on site and this leads to continuous extension and updating of the results while tunnelling continues.

Fig. 6 shows an example of a TSWD prediction result and the associated interpretation. This shows the seismic section of the right-hand geophone from MQ19 at chainage 4,600 m. The result shows the typical appearance of a seismic section as a wiggle trace, in which reflection horizons or reflection elements are shown according to the rock mass characteristics and can be appropriately interpreted by an expert. A transition into a fault zone and thus the change from relatively undisturbed to disturbed rock mass causes significant seismic reflections. The intersection with the advance shows that this fault zone will cross the tunnel axis at chainage 5,120 m (see Fig. 6). In order to simplify and standardise the assessment of the results, "summed up" or common assessments are made for each measurement section. The result is called the seismic tunnel band.

The prediction shown could be made when the face was still about 100 m away from the fault zone (see the

von seismischen Signalen ab, die von relevanten geologischen Strukturen bis zu 150 m vor der Ortsbrust reflektiert werden.

3.1 Erfassung der Daten und Auswertung

Die Erfassung des Pilotsignals erfolgt durch Beschleunigungsaufnehmer (Pilotsensoren) direkt am nicht rotierenden Hauptlager der TBM (im vorliegenden Fall ca. 3 m hinter der Ortsbrust). Die Aufnehmer sind axial und radial an zwei Positionen angeordnet (Bild 3). Zur Evaluierung der optimalen Position der Pilotsensoren und damit zur Sicherung der Qualität des Pilotsignals dient ein einfacher Hammerschlagtest im Zuge der Systeminstallation vor Ort. Dabei wird im Bereich der Meißel am Bohrkopf mit einem herkömmlichen Vorschlaghammer „angeregt“ und die resultierenden Signale werden an unterschiedlichen Positionen am Hauptlager aufgezeichnet und analysiert. Auf Basis von Signalfrequenz und Frequenzinhalt wird die optimale Montageposition für die Beschleunigungsaufnehmer festgelegt.

Die Bohrlochgeophone, die aus drei (axial, radial und tangential) angeordneten Einzelkomponenten bestehen, sind in ulmenseitigen, ca. 6 m tiefen Bohrlöchern im Nachläuferbereich platziert (Bild 4). Zwei gegenüberliegende Bohrlochgeophone bilden einen seismischen Messquerschnitt (MQ), wobei in der Regel zwei bis drei Messquerschnitte gleichzeitig bestückt und im Einsatz sind. Die Messquerschnitte wandern mit dem Vortrieb mit und werden in Abständen von 100 bis 200 m, in der Regel in der Wartungsschicht, umgebaut. Abgesehen von den Bohrungen für die Messquerschnitte sind keine weiteren bauseitigen Leistungen erforderlich.

Die Daten aller Messquerschnitte laufen über entsprechende Kabelverbindungen auf einen zentralen PC auf der TBM zusammen. Der PC ist im Baustellenetzwerk integriert, sodass die Daten online verfügbar sind und eine stabile und hochwertige Qualitätskontrolle möglich ist. Die Abtastrate (Samplingintervall) der Registereinheiten beträgt 1.000 Hz. Dies ist ausreichend, da die Hauptfrequenz der TBM als seismische Quelle für den vorliegenden Fall größtenteils im Bereich von 120 Hz

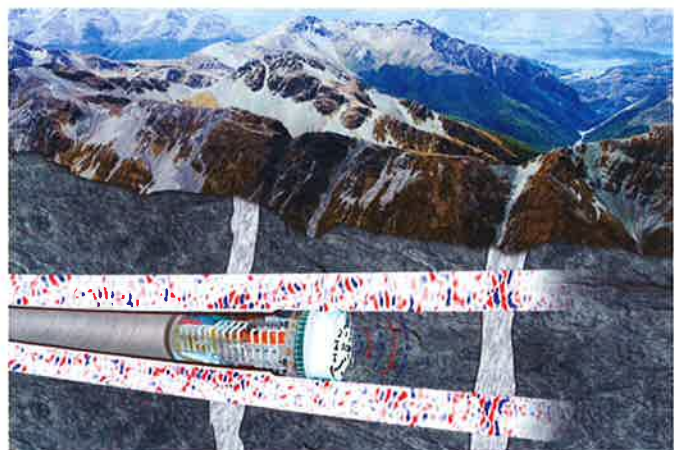


Fig. 5. Result of a seismic exploration (TSWD) up to 150 m ahead the tunnel face/TBM

Bild 5. Ergebnis einer seismischen Vorauserkundung (TSWD) bis zu 150 m vor die Ortsbrust bzw. vor die TBM

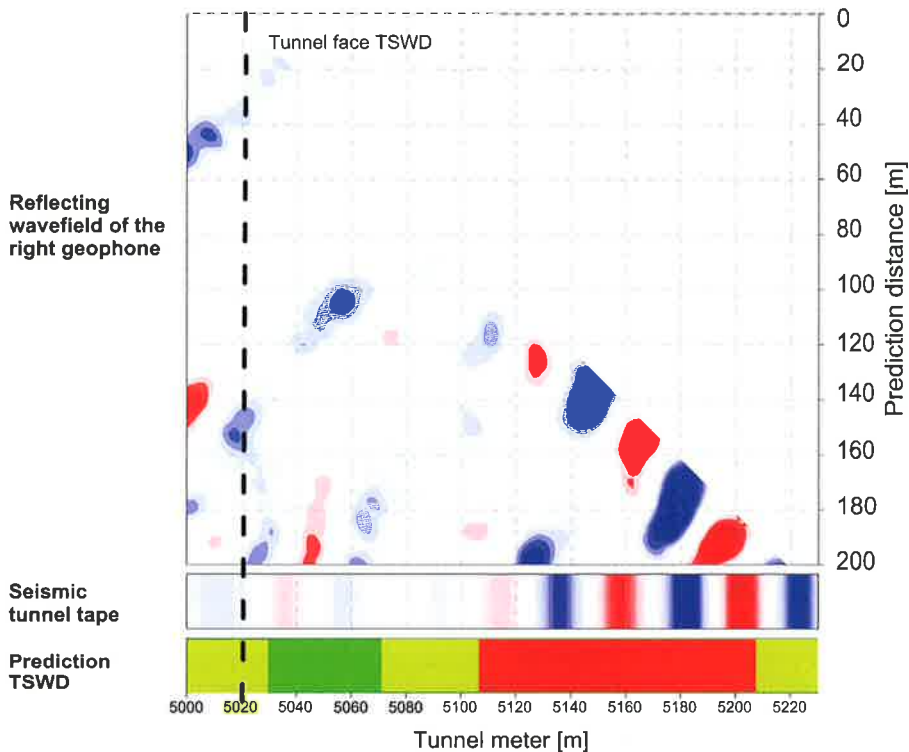


Fig. 6. Example of a TSWD prediction result Koralmtunnel KAT2, representing the result of the seismic cross section 19 (chainage 4,600 m), the seismic tunnel tape and the prediction classification (from top down)

Bild 6. Beispiel eines TSWD Prognoseergebnisses Koralmtunnel KAT2. Dargestellt ist das Ergebnis des Messquerschnitts 19 (Station 4.600 m) sowie das seismische Tunnelband und die Prognoseklassifizierung (von oben nach unten)

tunnel position in Fig. 6). The character and formation of the reflections enable the conclusion that the fault zone is mostly running at right angles to the tunnel axis. In the distance from chainage 5,000 to 5,100 m, a relatively insignificant wave field with little seismic definition forms. Only isolated reflection elements are shown, indicating a competent and only slightly disturbed rock mass.

4 Construction geological interpretation of the exploration methods – practical experience

Depending on the advance rate, predictions are produced about every three days by the geologists, geophysicists and geotechnicians on site, which are then used as a decision-making basis for the selection of suitable construction measures for safe and economic tunnelling. Decisive for the quality and correctness of the predictions is continuous and critical consideration of the predictions. The complete analysis of all tunnel data and the evaluation of system behaviour in collaboration with the geotechnician are most important since visual assessment of the rock mass on a shield machine drive with daily advance rates of about 30 m can only occur sporadically.

4.1 Hammer drilling

Rotary hammer probe drilling enables an initial estimation of the rock mass quality through the assessment and observation of the progress of drilling. The prompt assessment of the recorded drilling data with the interpretation of penetration, thrust force, torque and hammer mechanism pressure can deliver further reliable indications for the prediction (see Fig. 2). Direct statements about formation water can also be made from hammer drilling and predictions of the suitability of the muck for recycling can be produced. The process-related prediction distance on

liegt. Die Zeitsynchronisation erfolgt über eine Atomuhr, die mit allen Erfassungseinheiten verbunden ist und so eine hochpräzise Taktung des Messsystems erlaubt. Mittels GPS-Signal können die TSWD-Daten bei Bedarf auch mit Messungen an der Oberfläche korreliert werden. Die Stationierung der TSWD-Daten erfolgt auf Basis der beigeestellten TBM-Datensätze.

Die Auswertung der Daten erfolgt durch einen Geophysiker im Dokumentationsteam Geologie täglich auf der Baustelle. Im Wesentlichen wird dabei das Pilotsignal in geeigneter Weise mit den Geophonsignalen korreliert und einem standardisierten Datenprozessing unterzogen [6]. Das Ergebnis sind typische seismische Sektionen bzw. Wellenbilder, in denen sich Reflexionen, verursacht von Strukturen vor der Ortsbrust, abbilden (Bild 5). Mit TSWD ist eine verlässliche Vorauserkundung von größeren Störungszonen bis zu 150 m vor die TBM technisch machbar.

3.2 Ergebnisdarstellung und Interpretation

Die Ergebnisse (Sektionen) der einzelnen Messquerschnitte (getrennt in linke und rechte Geophone bzw. Ulme) werden in einer Tunnel Draufsicht dargestellt. In diesen Sektionen bilden sich gemäß den physikalischen Grundlagen signifikante Reflexionen (Reflexionshorizonte) dann ab, wenn im Gebirge vor der Ortsbrust geologische Strukturen mit entsprechenden Impedanzkontrasten vorhanden sind. Im vorliegenden Fall wird häufig der axialen Geophonkomponente bei der Beurteilung der Vorzug gegeben, da diese hinsichtlich steil stehender Störungsbereiche die verlässlichsten Ergebnisse liefert. Wesentlicher Teil der Prognose ist die Beurteilung des Verschnitts von Reflexionen mit der Tunnelachse und damit die Frage, in welcher Entfernung von der Ortsbrust Störungsbereiche auftreten. Eine Klassifizierung bezüglich der Vortriebsrelevanz

the current project is up to 100 m. One disadvantage of probing by hammer drilling is the considerable time taken. In addition, the drilling of just one hole cannot solve the problem of the orientation of a geological structure. This can have a negative effect on the accuracy of predictions, above all for faults striking at an acute angle to the tunnel axis or faults that are only dipping gently. Possible supplementary measures and particularly the special constraints of drilling cores are not discussed in further detail here since they are only used very seldom on the project under discussion.

4.2 Geophysical exploration (TSWD)

TSWD, like all seismic methods, is suitable for detecting heavily faulted or fractured areas in the rock mass. The prediction distance of up to 150 m is noticeably farther than for any hammer drilling that has been used. A prediction of the geological characteristics of any geologically

und damit die Festlegung einer ggf. erforderlichen Dreh-schlag- und Kernbohrung erfolgt in Abstimmung mit den Geologen und Geotechnikern vor Ort. Die Auswertung und Interpretation wird täglich auf der Baustelle durchgeführt und führt damit zu einer kontinuierlichen Erweiterung und Fortschreibung der Ergebnisse bei laufendem Vortrieb.

Bild 6 zeigt exemplarisch ein TSWD-Prognoseergebnis und die zugehörige Interpretation. Dargestellt ist die seismische Sektion des rechten Geophons vom MQ19 bei Station 4.600 m. Das Ergebnis weist das typische Erscheinungsbild einer seismischen Sektion in Flächenschrift auf, in dem sich je nach Gebirgsverhältnissen Reflexionshorizonte bzw. Reflexionselemente abbilden, die vom Fachmann entsprechend interpretiert werden können. So verursachen der Übergang in einen Störungsbereich und damit der Wechsel von weitgehend ungestörtem zu gestörtem Gebirge, signifikante seismische Reflexionen. Beim Verschnitt mit dem Vortrieb zeigt sich, dass dieser Stö-

LET'S GO AHEAD

3G
GRUPPE
GEOTECHNIK
GRAZ

3G
PRAGUE
CONSULTING
ENGINEERS

THE CRUCIAL STEP AHEAD

To take our clients projects that decisive step forward. For that we are determined to do the best job possible. Covering all relevant aspects in the fields of earth-sciences and civil engineering. With a method of operation based on organised flexibility and technological creativity. And competent teams at work in Austria and Czech Republic. Ready for local and global tunnelling markets.

AUSTRIA:

3G Gruppe Geotechnik Graz ZT GmbH • Triester Str. 478a • A-8055 Graz • Austria • Tel.: +43/316/337799 • Fax: +43/316/337799-11 • e-mail: office@3-g.at • web: www.3-g.at

CZECH REPUBLIC:

3G Consulting Engineers s.r.o. • Na usedlosti 16 • CZ-147 00 Praha • Czech Republic • Tel.: +420/2/41443411 • e-mail: info@3-g.cz • web: www.3-g.cz

GRAZ • PRAGUE

weak zones by interpreting the geophysical evaluation is, however, only possible by including consideration of probe drilling results. For example, a fault about 0.5 m thick with a steep or obtuse angle to the tunnel axis and a marked boundary to the undisturbed rock mass can form a clear seismic reflector. In contrast, a fault zone some metres thick with a changeable internal structure, wavy course and a blurred transition from undisturbed rock mass to fractured borders and a cataclastic core may only cause an indistinct image. Statements about formation water and the important question on this contract of the suitability of the muck for recycling are limited with the tunnel seismic method and are only possible with supplementary use of direct exploration methods. As with hammer drilling, tunnel seismic is also of limited use for the detection of structures that dip gently or strike at an acute angle to the tunnel axis.

The decisive advantage of the TSWD system, however, is the small expense and the continuous exploration as the tunnel advances, without obstructing the progress of tunnelling. It becomes possible to make generalised statements about the geological conditions to be expected. Rock mass sections with very low and very high impedance contrasts and thus relevant fault zones can be predicted with adequate certainty. Detailed exploration and the assessment of the relevance for tunnelling of the predicted anomalies or faults, however, require supplementary and targeted exploration by hammer drilling or drilling a core.

5 Geological short-term programme and comparison with the rock mass conditions encountered

All information gained from drilling and geophysics is regularly made available to all parties involved in the project in the form of short-term geological predictions. These consider the data and the geophysical results as a whole and produce a classification or description of the predicted geological conditions in the form of prediction data sheets (Fig. 7).

The methods used are evaluated by comparing the predictions (exploration) with the ground model and the ground conditions actually encountered (documentation) – above all with respect to the relevance for tunnelling. The findings and experience gained in this way are fed into the continuous predictions and help to improve them or their accuracy (Fig. 8). By now it is possible to refer back to almost 7 km of tunnelling with systematic and consistent probing in the south bore of contract KAT 2 as a data basis.

Fig. 8 shows the exploration data from seismic measurements (TSWD), the geological documentation and selected machine data for a representative section. For this exploration and tunnel section, it can be seen that significantly lower seismic velocities were measured from chainage 5,145 m. The subsequently analysed P- and S-wave velocities correlate to a high degree with the fault zone that had been predicted in advance (Fig. 9). This area was denoted in the site geological documentation as a fault with relevance for tunnelling.

Continuous evaluation of the predictions shows the following picture of the prediction certainty:

rungsbereich bei Station 5.120 m auf die Tunnelachse trifft (vgl. Bild 6). Zur Vereinfachung und Standardisierung der Ergebnisbeurteilung werden „aufsummierte“ bzw. gemeinsame Auswertungen je Messquerschnitt vorgenommen. Ergebnis ist das sogenannte seismische Tunnelband.

Die vorliegende Prognose konnte zu einem Zeitpunkt gemacht werden, als die Ortsbrust ca. 100 m vom Störungsbereich entfernt war (siehe Vortriebsstand in Bild 6). Charakter und Ausprägung der Reflexionen lassen in diesem Fall darauf schließen, dass der Störungsbereich weitgehend orthogonal auf die Tunnelachse verläuft. Im Bereich Station 5.000 bis 5.100 m bildet sich ein wenig signifikantes und seismisch wenig ausgeprägtes Wellenfeld ab. Es zeigen sich nur einzelne Reflexionselemente, was in Summe auf weitgehend kompetentes und gering gestörtes Gebirge hinweist.

4 Baugeologische Interpretation der Vorauserkundungsmethoden – praktische Erfahrungen

In Abhängigkeit der Vortriebsleistung werden im Abstand von ca. drei Tagen durch die Geologen, Geophysiker und Geotechniker vor Ort Prognosen erstellt, die als Entscheidungsgrundlage für die Wahl der jeweiligen bautechnischen Maßnahmen für einen sicheren und wirtschaftlichen Vortrieb dient. Entscheidend für die Qualität und Richtigkeit der Prognosen ist die laufende kritische Betrachtung der Prognosen. Hierbei steht die lückenlose Analyse sämtlicher Vortriebsdaten und Beurteilungen des Systemverhaltens in Zusammenarbeit mit dem Geotechniker im Vordergrund, da die visuelle Begutachtung des Gebirges bei einem Schildvortrieb mit Tagesvortriebsleistungen von ca. 30 m ja nur sporadisch erfolgen kann.

4.1 Drehschlagbohrungen

Drehschlagbohrungen lassen eine erste Einschätzung der Gebirgsqualität durch die Begutachtung und die Beobachtung des Bohrfortschritts zu. Durch die zeitnahe Auswertung der aufgezeichneten Bohrdaten können über Interpretationen von Bohrgeschwindigkeit, Vorschubkraft, Drehmoment und Schlagwerkdruck weitere aussagekräftige Indizien für die Prognose gewonnen werden (vgl. Bild 2). Mittels Drehschlagbohrungen können auch direkte Aussagen zum Thema Bergwasser getätigt und Prognosen für die Wiederverwertbarkeit des Ausbruchmaterials erstellt werden. Die Prognosedistanz liegt im gegenständlichen Bauvorhaben prozessbedingt bei bis zu 100 m. Ein Nachteil der Vorauserkundung mittels Drehschlagbohrung ist der erhebliche Zeitaufwand. Ebenso kann bei der Ausführung von nur einer Bohrung das geometrische Problem der Orientierung von geologischen Strukturen nicht gelöst werden. Dies wirkt sich vor allem bei schleichend zur Tunnelachse streichenden Störungen bzw. flach einfallenden Störungen negativ auf die Prognosegenauigkeit aus. Auf die ergänzenden Möglichkeiten aber auch auf die besonderen Randbedingungen mit Kernbohrungen wird hier nicht eingegangen, da sie im gegenständlichen Bauvorhaben bisher nur äußerst selten zur Anwendung kommen mussten.

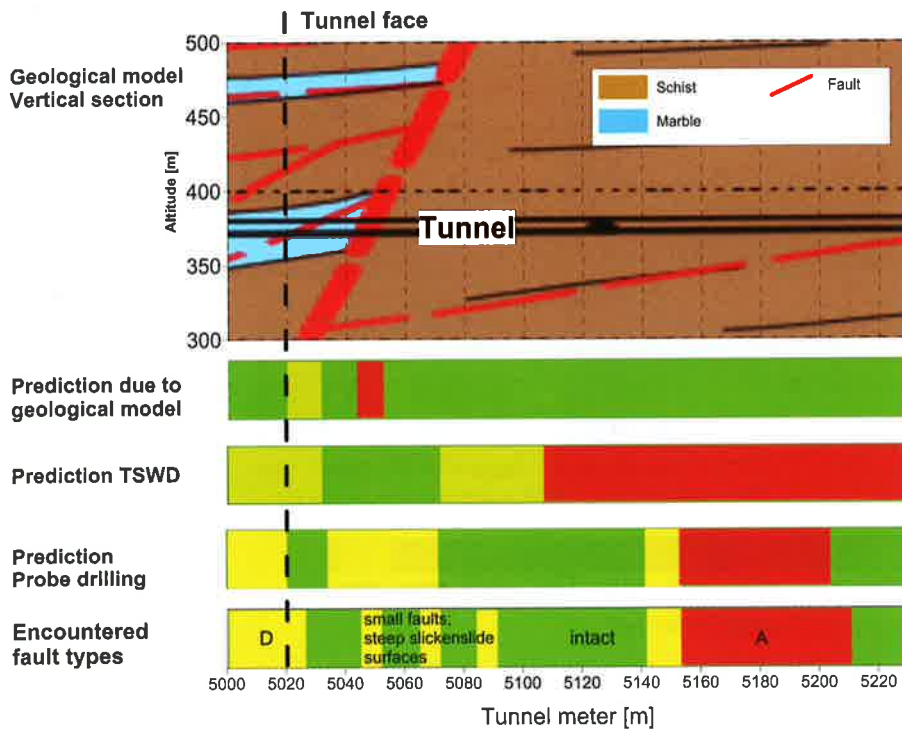


Fig. 7. Generalized example of a geological-geotechnical prediction
Bild 7. Generalisiertes Beispiel einer baugelologischen Vorauserkundung

- With the exploration methods being used, it is possible to detect heavily faulted or disturbed areas up to 150 m ahead of the face. Nearly all fault zones with relevance for tunnelling were predicted by both methods.
- The thickness, orientation, cataclasite content and internal structure of faults can only be directly evaluated by probe drilling or TSWD to a limited extent. For this purpose, and to reliably assess the relevance for tunnelling, it is necessary to make use of core drilling in a specific case.
- TSWD enables however a reliable estimation of the basic conditions and thus above all the optimised use of probing. After the successful completion of the test phase on KAT2, it was demonstrated that a significant reduction of probing is possible since this could be con-

4.2 Geophysikalische Vorauserkundung (TSWD)

Mittels TSWD können, wie mit allen seismischen Verfahren, stärker zerlegte oder gestörte Gebirgsbereiche entsprechend erkundet werden. Die Prognosedistanz von bis zu 150 m liegt merklich über jener der hier angewendeten Drehschlagbohrungen. Eine Vorhersage der zu erwartenden geologischen Ausprägung allfälliger geologischer Schwäche zonen mittels Interpretation der geophysikalischen Auswertungen ist aber nur durch Einbeziehung der Erkundungsbohrungen möglich. So kann beispielsweise eine 0,5 m mächtige Störung mit linearem Verlauf, steilstehender bzw. stumpfwinkliger Orientierung zum Tunnel und einer markanten Grenze zum ungestörten Gebirge einen deutlichen seismischen Reflektor ausbilden. Im Vergleich dazu, kann sich eine mehrere Meter mächtige Störungszone mit wechselhaftem internen Aufbau, welligem Verlauf und fließenden Übergängen vom ungestörten Gebirge zu zerrütteten Randbereichen und kataklatischen Kernbereichen nur undeutlich abbilden. Aussagen zum Thema Bergwasser und der bei diesem Bauprojekt wichtigen Frage der Wiederverwertbarkeit des Ausbruchmaterials sind mittels Tunnelseismik eingeschränkt und nur durch die Einbeziehung direkter Aufschlussmethoden möglich. Wie bei den Drehschlagbohrungen sind auch bei der Tunnelseismik der Erfassung sehr flach liegender und schiefend zur Tunnelachse streichender Strukturen Grenzen gesetzt.

Der entscheidende Vorteil des TSWD Systems liegt aber im geringen Aufwand und der durchgehenden und vortriebsbegleitenden Vorauserkundung, welche die Bauarbeiten selbst nicht behindern. Grundsätzliche Aussagen zu den zu erwartenden Gebirgsverhältnissen werden möglich. Gebirgsabschnitte mit sehr geringen und sehr hohen Impedanzkontrasten und damit relevante Störbereiche können mit ausreichender Sicherheit prognostiziert werden. Zur Detailerkundung und Beurteilung der bautechni-

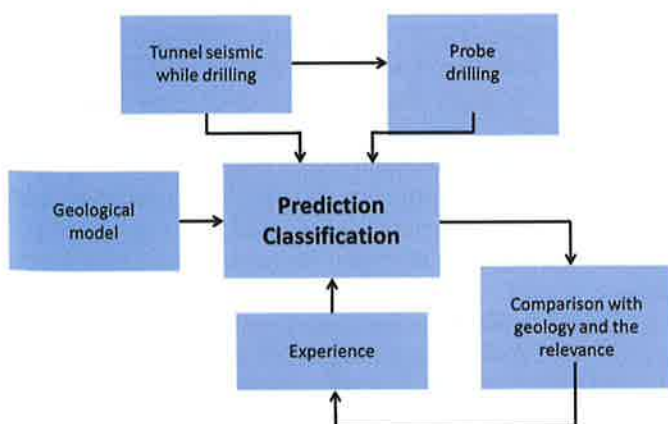


Fig. 8. Principal sequence of exploration at Koralm tunnel KAT2, reaching from the creation of prediction to the evaluation of the results

Bild 8. Ablauf der Vorauserkundung Koralm tunnel KAT2 von der Prognoseerstellung bis zur nachlaufenden Ergebnisevaluierung

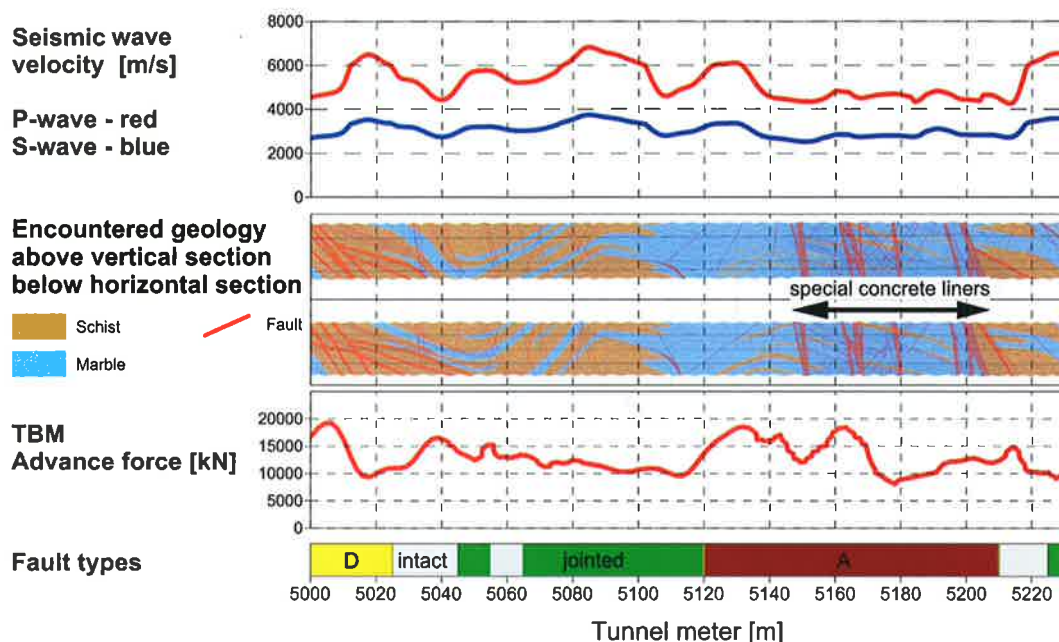


Fig. 9. Evaluation of the prognosis data for a significant section of the Koralm Tunnel KAT2

Bild 9. Evaluierung der Vorauserkundungsergebnisse für einen repräsentativen Bauabschnitt des Koralmtunnels KAT2

centrated in weak zones, which had been detected by TSWD.

Fig. 10 shows a comparison between the predictions (red and yellow areas) from TSWD and from probe drilling with the thrust force of the TBM during the test phase. The faults are classified according to the minimum thrust force of the TBM at each location. The prediction certainty for structures (ca. 80 %), which were bored through by the TBM with very low thrust forces, is shown in Fig. 10. In the class < 6,000 kN thrust force, just one fault could not be predicted by TSWD due to its small thickness and the gentle dip to the tunnel axis.

The 41 structures bored with minimal thrust forces of 10,000 to 15,000 kN are above all sundry small-scale structures (e.g. increased occurrence of slickenside or jointing surfaces, fault planes with thicknesses of some dm etc.). The prediction certainty of these sundry structures with little relevance for tunnelling is still a good 65 %.

6 Outlook TSWD

Since a second TBM is underway in the north bore of construction section KAT2 of the Koralm Tunnel, and this is following behind the south machine, accelerators have been installed on the north TBM for optimisation. This offers the additional possibility of observing and evaluating the forward seismic wave field in the measurement sections on the north TBM. This data leads to a better understanding of the chipping process at the cutterhead, which is regarded as the definite source of the seismic waves. A dissertation is currently being produced in collaboration with the Technical University of Vienna to look into this question in more detail. In addition, seismic receivers have been installed on the surface above the tunnel for this purpose. The TBM will pass beneath these, which will enable observation and analysis of the entire wave field.

schen Relevanz von prognostizierten Anomalien bzw. Störungsbereichen, ist aber die ergänzende und gezielte Erkundung mittels Drehschlag- oder Kernbohrungen erforderlich.

5 Geologische Kurzzeitprognosen und Vergleich mit den angetroffenen Gebirgsverhältnissen

Sämtliche gewonnen Erkenntnisse aus den Bohrungen und der Geophysik werden den Projektbeteiligten in Form von geologischen Kurzzeitprognosen regelmäßig zur Kenntnis gebracht. Dabei werden die Daten und Ergebnisse der Geophysik und der Bohrungen in ihrer Gesamtheit betrachtet und Einstufungen bzw. Beschreibungen der prognostizierten Gebirgsverhältnisse in Form von Prognosedatenblättern erstellt (Bild 7).

Über den Abgleich der Prognose (Vorauserkundung) mit dem Baugrundmodell und den angetroffenen Gebirgsverhältnissen (Dokumentation) – vor allem hinsichtlich Vortriebsrelevanz – erfolgt eine Evaluierung der eingesetzten Methoden. Die daraus abgeleiteten Erkenntnisse und Erfahrungen fließen in die laufenden Prognosen ein und helfen diese bzw. deren Treffsicherheit zu verbessern (Bild 8). Bis dato kann in der Südröhre des Bauloses KAT2 am Koralm Tunnel auf eine Vortriebslänge von knapp 7 km mit systematischer und konsequenter Vorauserkundung als Datengrundlage zurückgegriffen werden.

Bild 8 stellt für einen repräsentativen Vortriebsabschnitt den Vorauserkundungsdaten der Seismik (TSWD) die geologische Dokumentation und ausgewählten Maschinendaten gegenüber. Für diesen Erkundungs- bzw. Vortriebsabschnitt zeigt sich, dass ab Station 5145 m signifikant geringere seismische Geschwindigkeiten bestimmt wurden. Die im Nachgang analysierten P- und S-Wellen-Geschwindigkeiten, korrelieren in hohem Maße mit dem Störungsbereich, der im Vorfeld (Bild 9) prognostiziert wurde. Dieser Bereich wurde im Zuge der baugeologi-

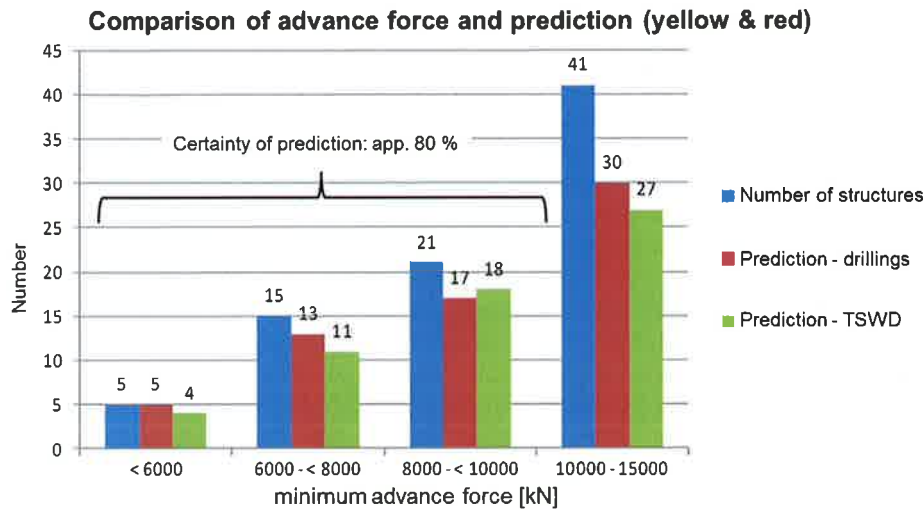


Fig. 10. Comparative evaluation of the exploration methods at Koralm tunnel section KAT2

Bild 10. Vergleichende Bewertung der Vorauserkundungsmethoden am Koralmtunnel Baulos KAT2

7 Summary

The combination of TSWD and rotary hammer probe drilling for the mechanised tunnel drive on contract KAT2 of the Koralm Tunnel can be regarded as absolutely successful after the test phase. With consistent use and the appropriate combination, the methods of exploration being used enable the prediction of heavily faulted or disturbed zones up to 150 m in front of the face. So far, almost all faults have been detected or predicted. In addition, it has been shown that using a seismic system such as TSWD, the number and extent of the probe drillings needed can be optimised, which is favourable for overall construction progress. Structures, which dip very gently or strike at an acute angle to the tunnel axis, have been found to be unfavourable for both methods. The continuous incorporation and evaluation of all geological-geotechnical tunnel data naturally increases the scope of experience and thus also the prediction certainty on the project.

References

- [1] Radonicic, N., Hein, M., Moritz B.: Determination of the system behaviour based on data analysis of a hard rock shield TBM/Analyse der Maschinenparameter zur Erfassung des Systemverhaltens beim Hartgesteins-Schildvortrieb. *Geomechanics and Tunneling* 7 (2015), No. 5, pp. 565–576 (this issue).
- [2] Petronio, L., Poletto, F., Schleifer, A., Morino, A.: Geology prediction ahead of the excavation front by Tunnel-Seismic-While-Drilling (TSWD) method. Society of Exploration Geophysicists, 73rd Annual International Meeting, Expanded Abstract, 2003.
- [3] Brückl, E., Chwatal, W., Mertl, S., Radinger, A.: Exploration Ahead of a Tunnel Face by TSWD Tunnel Seismic While Drilling. *Geomechanics and Tunneling* 1 (2008), No. 5, p. 460–465.
- [4] Brückl, E., Chwatal, W., Mertl, S., Radinger, A.: Continuous Exploration Ahead of a Tunnel Face by TSWD-Tunnel Seismic While Drilling. Proceedings at 23rd SAGEEP – EEGS Annual Meeting Keystone, pp. 353–360. Colorado 2010.
- [5] Kreutzer, I., Chwatal, W., Radinger, A., Brückl, E.: The use of a Tunnel Boring Machine (TBM) as a seismic source. *Geophysical Research Abstracts* 16. EGU2014-3768, 2014, EGU General Assembly, 2014.

schen Dokumentation als baurelevante Störung ausgewiesen.

Die laufende Evaluierung der Prognosen ergibt folgendes Bild bezüglich der Prognosesicherheit:

- Mit den zum Einsatz kommenden Vorauserkundungsmethoden sind Prognosen von stark zerlegten bzw. gestörten Bereichen bis zu 150 m vorauseilend möglich. Nahezu alle bautechnisch relevanten Störungsbereiche wurden von beiden Methoden prognostiziert.
- Die direkte Bewertung von Mächtigkeit, Orientierung, Anteilen an Kataklasiten und Internaufbau von Störungen ist mittels einer Drehschlagbohrung und TSWD nur eingeschränkt möglich. Dafür und für eine konkrete Beurteilung der bautechnischen Relevanz braucht es im Einzelfall den Einsatz von Kernbohrungen.
- TSWD ermöglicht allerdings eine verlässliche Einschätzung der grundsätzlichen Verhältnisse und damit vor allem einen optimierten Einsatz von Bohrungen. Nach erfolgreichem Abschluss der Testphase am Baulos KAT2 zeigte sich, dass eine signifikante Reduktion der Bohrungen möglich ist, da diese auf Schwächezonen reduziert werden können, die von TSWD ausgewiesen werden.

Bild 10 zeigt den Vergleich der Prognose (rote und gelbe Bereiche) durch TSWD bzw. Drehschlagbohrungen mit der Vorschubkraft der TBM während der Testphase. Dabei wird eine Klassifikation der Störungen anhand der jeweils minimalen Vorschubkraft der TBM vorgenommen. Die Prognosesicherheit für Strukturen (ca. 80 %), die von der TBM mit sehr geringen Vorschubkräften durchörtert wurden, wird in Bild 10 dargestellt. Bei der Klasse < 6.000 kN Vorschubkraft konnte eine Störung mittels TSWD aufgrund der geringen Mächtigkeit und des flachen Einfallens zur Tunnelachse nicht prognostiziert werden.

Bei den 41 Strukturen mit minimalen Vorschubkräften von 10.000 bis 15.000 kN handelt es sich vor allem um sonstige, kleinräumige Strukturen (z. B. vermehrtes Auftreten von Harnisch- oder Kluftflächen, dm-mächtige Störungsbahnen, usw.). Die Prognosesicherheit diesen sonstigen Strukturen mit bautechnisch untergeordneter Relevanz liegt noch bei guten 65 %.

- [6] Chwatal, W., Radinger, A., Brückl, E., Mertl, S., Freudenthaler A.: Tunnel Seismic While Drilling – State Of The Art And New Developments. Conference Proceedings, World Tunnel Congress, Finland, 2011.



Mag. Alexander Radinger, MBA
Pöyry Infra GmbH
Rainerstrasse 29
5020 Salzburg, Austria
alexander.radinger@poyry.com



Dipl.-Ing. Florian Fasching
3G Gruppe Geotechnik Graz ZT GmbH
Triester Straße 478a
8055 Graz-Seiersberg, Austria
florian.fasching@3-g.at



Gudrun Pack, M.Sc.
3G Gruppe Geotechnik Graz ZT GmbH
Triester Straße 478a
8055 Graz-Seiersberg, Austria
pack@3-g.at



Dipl.-Ing. Ingrid Kreutzer
Vienna University of Technology
Department of Geodesy and Geoinformation
Research Group Geophysics
Gußhausstraße 27–29
1040 Vienna, Austria
ingrid.kreutzer@tuwien.ac.at



Mag. Dieter Kostial
Pöyry Infra GmbH
Rainerstrasse 29
5020 Salzburg, Austria
dieter.kostial@poyry.com

6 Ausblick TSWD

Da im Bauabschnitt KAT2 des Koralmtunnels eine zweite TBM in der Nordröhre im Einsatz ist, die der Südröhre hinterherläuft, wurden zur Optimierung der Vorauserkundung Beschleunigungsaufnehmer auf der Nord-TBM installiert. Damit wird es möglich in den Messquerschnitten in der Südröhre auch das seismische Wellenfeld nach vorne zu beobachten und auszuwerten. Diese Daten führen zu einem besseren Verständnis des Bruchprozesses am Bohrkopf (Chipping Prozess), der als konkrete Quelle der seismischen Wellen angesehen wird. Gemeinsam mit der Technischen Universität Wien wird zurzeit an einer Dissertation gearbeitet, die sich mit dieser Fragestellung vertiefend beschäftigt. Zusätzlich werden dafür an der Geländeoberfläche über dem Tunnel seismische Aufnehmer installiert. Diese werden von der TBM „unterfahren“ und ermöglichen so eine Betrachtung und Analyse des gesamten Wellenfelds.

7 Zusammenfassung

Die Kombination von TSWD und Drehschlagbohrungen für den maschinellen Tunnelvortrieb am Baulos KAT2 des Koralmtunnels kann nach Abschluss der Testphase als durchaus erfolgreich bezeichnet werden. Durch den konsequenten Einsatz und die geeignete Kombination, der angewandten Vorauserkundungsmethoden sind Prognosen von stark zerlegten oder gestörten Bereichen bis zu 150 m vorauseilend möglich. Bis dato wurden nahezu sämtliche Störungen erkannt bzw. prognostiziert. Zusätzlich zeigte sich, dass es mit einem seismischen Systems, wie TSWD möglich wird, Anzahl und Umfang der erforderlichen Bohrungen zu optimieren, was sich insgesamt günstig auf den Baufortschritt auswirkt. Als ungünstig für beide Methoden erweisen sich sehr flach liegende und schleifend zur Tunnelachse streichende Strukturen. Durch die ständige Einbeziehung und Evaluierung aller geologisch-geotechnischen Daten erhöht sich naturgemäß der Erfahrungsschatz und somit auch die Prognosesicherheit im Projekt.