

Drilling processes to explore the rock mass and groundwater conditions in correlation with TBM-tunnelling

Bohrtechnische Verfahren zur Erkundung der Gebirgs- und Bergwasserverhältnisse im Zusammenhang mit TVM-Vortrieben

Deep Alpine tunnels are characterised by great lengths and deep overburden and are mostly bored by TBMs. The exploration of rock mass conditions plays an essential role with regard to the technical feasibility, the estimation of advance rates and the safety and cost-effectiveness of a project. Investigation drilling from the surface is often not possible due to the topographical conditions and the very high cost considering the great depths involved. Most TBMs are therefore designed to permit the exploration of the ground in parallel to continued tunnelling. This paper offers an overview of currently available drilling processes, with hammer drilling with logging of drill data, core drilling with the use of preventers and directional drilling methods. Special attention is paid to the restricted space available at the cutterhead of a TBM and the practicalities of installing machinery. The quality of exploration results under the conditions of TBM operation, which is mainly intended to optimise advance rate, is also considered.

Tiefliegende Alpentunnel sind gekennzeichnet von großen Vortriebslängen und hohen Überlagerungen und werden vorwiegend mit TVM's aufgeföhren. Die Erkundung der Gebirgsverhältnisse spielt dabei eine wesentliche Rolle im Hinblick auf die technische Machbarkeit, die Einschätzung von Vortriebsleistungen sowie die Sicherheit und die Wirtschaftlichkeit eines Projekts. Erkundungsbohrungen von der Geländeoberfläche sind wegen der topographischen Verhältnisse, aber auch wegen der sehr hohen Kosten aufgrund der großen Überlagerungshöhen oft nicht machbar. Daher werden die meisten TVM-Vortriebe mit einer parallel zum Vortrieb laufenden Untergrunderkundung konzipiert. Dieser Beitrag gibt einen Überblick über die aktuellen Bohrverfahren von Hammerschlagbohrungen mit Bohrdatenaufzeichnung über Kernbohrungen mit dem Einsatz von Bohrpreventern bis hin zu gesteuerten Bohrmethoden. Dabei wird speziell auf die Anforderungen der engen Platzverhältnissen im Bereich des Bohrkopfs einer TVM und deren gerätetechnischen Möglichkeiten eingegangen. Darüber hinaus erfolgt eine Betrachtung der Qualität der Erkundungsergebnisse unter den Zwängen eines TVM-Vortriebs, der in erster Linie auf Vortriebsleistung ausgelegt ist.

1 Introduction

TBM tunnelling has become a fixed part of modern tunnelling in recent decades. Particularly for the major projects crossing the Alps such as the Gotthard Tunnel in Switzerland, but also tunnel projects for the ÖBB like the Wienerwald Tunnel or the Koralm Tunnel, which is currently under construction, the technical and economic advantages of mechanised tunnelling have been clearly demonstrated. The range of applications of tunnel boring machines has also been demonstrated in many areas of underground railway construction and for the construction of long headrace tunnels with diameters now greater than 14 m such as the headrace tunnel for the Niagara Falls Project in Canada.

TBM manufacturers are now in a position to make suitable machines for almost any type of rock or soil formation. One essential factor in the selection of a suitable TBM and its successful application is the prevailing ground conditions. The appropriate investigation of the ground conditions, and the provision of exploration of the ground ahead of the machine, pose great challenges for drilling processes.

1 Einleitung

TVM-Vortriebe haben sich in den letzten Jahrzehnten zu einem festen Bestandteil des modernen Tunnelbaus entwickelt. Speziell die großen Tunnelbauprojekte der Alpen transversalen wie der Gotthardtunnel in der Schweiz, aber auch die Tunnelprojekte der ÖBB wie der Wienerwaldtunnel oder der derzeit in Bau befindliche Koralmtunnel haben die technischen sowie die wirtschaftlichen Vorteile von TVM-Vortrieben eindeutig unter Beweis gestellt. Auch in vielen anderen Bereichen vom U-Bahnbau bis zur Erstellung von langen Triebwasserstollen mit Bohrdurchmesser von bereits über 14 m wie der Triebwasserstollen für das Niagara Falls Project in Kanada zeigen die vielfältigen Einsatzmöglichkeiten von Tunnelvortriebsmaschinen.

Die TVM-Hersteller sind mittlerweile in der Lage, beinahe für jeden Gesteinstyp oder jede Bodenformation das geeignete Gerät herzustellen. Ein wesentlicher Faktor für die Wahl der geeigneten TVM und deren erfolgreichen Einsatz sind dabei in erster Linie die anstehenden Untergrundverhältnisse. Diese entsprechend zu erkunden, aber auch eine dem Vortrieb vorausseilende Erkundung des Ge-

2 Definition of the aims of exploration

The aims of exploration can be varied and are intended to provide more detailed knowledge about ground conditions or hydrogeological conditions. In rock, the intention is often to determine the spatial location of rocks, discontinuities and fault zones, and also to discover the water situation in discontinuities and fault zones in order to plan and appropriately implement any effects on the advance, the type of lining or necessary additional or special measures. In soil, the boundaries from cohesive layers to fine-grained sandy or gravelly layers are of most interest. The groundwater conditions are also of significance. Above all highly permeable strata, and also confined aquifers or artesian conditions can have a great influence on the advance and support construction. Tunnelling practice shows that, particularly in Alpine conditions, transitions from rock to weathered zones or to fill (which sometimes occurs in deep synclines) can lead to enormous technical problems as the tunnel advances.

Some exploration aims, such as for example strata boundaries and thicknesses, can be achieved by manual or automatic recording of drilling parameters, visual observation of the material returned from flushing or drillhole stability control with simple drilling methods like rotary drilling of any type or also hammer drilling. Other exploration aims, on the other hand, demand the obtaining of a core to check the type of rock or soil. Drillhole tests, wished-in place tests or also pumping tests can then require certain drilling processes or drillhole casing types.

This paper does not refer to methods of investigation, which deliver the basis for the design and tendering of tunnel projects. These investigations are mostly undertaken from the surface and form part of a geological-geotechnical forecast along the planned course of the tunnel route. The number of boreholes often has to be greatly restricted for economic reasons, particularly for the deep Alpine tunnels with very high overburden depths. Unless these are integrated into an existing geological model, they are sometimes only pinpricks for the exploration of the rock mass in relation to the entire tunnel route.

For this reason, but also to obtain more detail, further exploration is undertaken from the machine on most tunnel projects as tunnelling proceeds, or from already driven tunnel bores. Probe drilling is a relatively simple matter on conventional tunnel drives since the installation of a probe drill at the face is possible without any problems. Nonetheless, attention has to be paid to the selection of equipment and the type of exploration in order that the aims of exploration are achieved. In mechanised tunnelling, the question of where to position the drill behind the cutterhead and the question of the aims of exploration are both of decisive significance.

At this point, the first decisions and possible compromises between the quality of the exploration method and the obstruction of TBM performance have to be made. A quick method of probe drilling does indeed have the advantage of only briefly interrupting boring, but also has the disadvantage of producing results that are mostly inadequate or can only be interpreted with difficulty. Rapid drilling methods also offer hardly any chance to perform drillhole investigations or tests. In contrast to this, a high-

birges oder der anstehenden Bodenformationen sicherzustellen, stellt besondere Anforderungen an die bohrtechnischen Verfahren.

2 Definition des Erkundungsziels

Die Erkundungsziele können vielfältig sein und dienen der Vertiefung der Kenntnisse über den Baugrund oder/und die hydrologischen Verhältnisse. Im Fels ist es oft die Aufgabe, die räumliche Lage von Gesteinen, Trennflächen und Störungszonen festzustellen, ebenso wie die Feststellung der Wasserverhältnisse in Trennflächen und Störungszonen, um etwaige Einflüsse auf den Vortrieb, die Ausbauart oder etwaige notwendige Zusatz- und Sondermaßnahmen zu planen und zweckmäßig umzusetzen. In Böden interessieren vor allem die Schichtabgrenzungen von bindigen Bodenschichten zu feinkörnigen sandigen und kiesigen Bodenschichten. Zusätzlich sind die Grundwasserverhältnisse von Bedeutung. Vor allem stark durchlässige Schichten, aber auch gespannte Wässer oder artesische Verhältnisse haben großen Einfluss auf die Vortriebsart und Ausbauherstellung. Die Praxis im Tunnelbau lehrt, dass insbesondere in alpinen Lagen Übergänge von Fels zu verwitterten Bereichen oder zu Anschüttungen (teils in tiefen Einschnitten als Auffüllungen vorliegend) während des Tunnelvortriebs zu enormen technischen Problemen führen können.

Manche Erkundungsziele, z. B. Schichtgrenzen und Schichtstärken, können durch manuelle oder automatische Aufzeichnung von Bohrparametern, visuelle Beobachtung des Rückflusses der Bohrspülung oder Bohrlochstabilitätskontrolle mit einfachen Bohrmethoden wie Rotationsbohrverfahren jeglicher Art oder auch Schlagbohrverfahren erreicht werden. Andere wiederum benötigen eine Kerngewinnung zur Überprüfung der Gesteins- oder Bodenart. Bohrlochversuche, Wasserabpressversuche oder auch Pumpversuche setzen wiederum bestimmte Bohrverfahren oder Bohrlochausbauarten voraus.

Dieser Beitrag bezieht sich nicht auf die Erkundungsmethoden, die Grundlagen für die Planung und Ausschreibung von Tunnelprojekten im Vorfeld der Ausführung liefern. Diese Erkundungen erfolgen ja meist von der Geländeoberfläche aus und sind Teil einer geologischen-geotechnischen Prognose über den geplanten Verlauf der Tunneltrasse. Die Anzahl dieser Bohrungen müssen speziell bei tiefliegenden Alpentunneln mit sehr hohen Überlagerungshöhen oft aus wirtschaftlichen Gründen eingeschränkt werden und sind, sofern sie nicht in ein bestehendes geologisches Modell eingebaut werden, teilweise nur „Nadelstiche“ für die Erkundung des Gebirges in Bezug auf die gesamte Tunneltrasse.

Aus diesem Grund, aber auch zu weiteren Detaillierungen, sind bei den meisten Tunnelprojekten weitere Vorerkundungen während des Vortriebs oder aus der bereits aufgefahrenen Tunnelröhre vorgesehen. Diese Erkundungsbohrungen lassen sich bei konventionellen Tunnelvortrieben relativ einfach bewerkstelligen, da die Installation eines Aufschlussbohrgeräts an der Ortsbrust problemlos möglich ist. Trotzdem muss auf die richtige Auswahl des Geräts und die Aufschlussart geachtet werden, damit das vorgegebene Erkundungsziel erreicht wird. Bei TVM-Vortrieben ist neben der Frage nach den Mög-

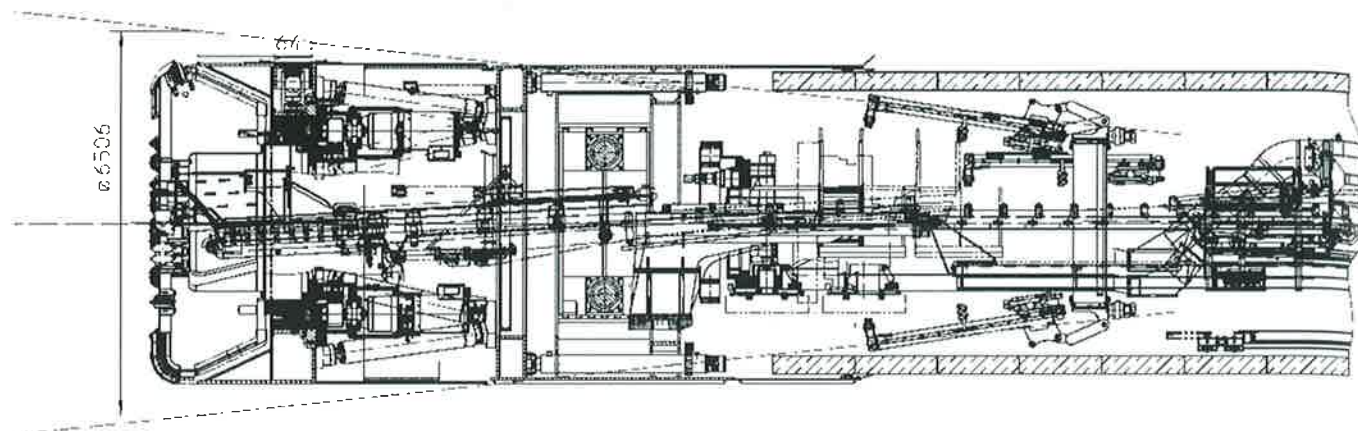


Fig. 1. Possible locations for the drilling rig on a TBM
Bild 1. Mögliche Anordnung der Bohrgerät auf der TVM

er quality drilling process such as core drilling requires correspondingly more time but delivers considerably better results at the cost of the advance rate of the TBM.

In an extreme case, inadequately performed exploration drilling can lead to unexpected incidents such as collapses or water inflows and thus to the stopping of the TBM.

3 Placing drills depending on the space available

The question about a suitable location of a drill at the cutterhead is answered in the first place by the construction of the TBM and the space available as well as the question whether probing is to be carried out sporadically when fault zones are encountered or sections are to be systematically probed, or even the entire tunnel. For sporadic probing, a suitable installation location can normally be found under the machine immediately behind the cutterhead or on the intermediate deck of the machine (Figs. 1 and 2).

One much discussed question is the location and inclination of holes in the direction of the advance. Most TBM cutterheads are designed so that drilling ahead of the machine is not possible along the tunnel axis due to the lack of openings in the cutterhead. The decision is

lichkeiten der Aufstellung eines Bohrgeräts hinter dem Bohrkopf der Maschine auch die Frage nach dem Erkundungsziel von entscheidender Bedeutung.

An dieser Stelle müssen die ersten Entscheidungen und mögliche Kompromisse zwischen der Qualität der Erkundungsmethode und dem Leistungsverlust des TVM-Vortriebs getroffen werden. Eine schnelle Aufschlussbohrmethode hat zwar den Vorteil einer kurzen Unterbrechung der Vortriebsleistung, jedoch auch den Nachteil eines meist unzureichenden oder nur schwer interpretierbaren Erkundungsergebnisses. Schnelle Aufschlussmethoden lassen auch kaum Raum für Möglichkeiten für etwaige Bohrlochuntersuchungen oder Versuche. Im Gegensatz dazu benötigt eine qualitativ hochwertigere Erkundungsmethode, z. B. Kernbohrungen, entsprechend mehr Zeit, liefert jedoch wesentlich bessere Aufschlussresultate auf Kosten der Vortriebsleistung der TVM.

Im Extremfall kann eine unzureichend durchgeführte Vorauserkundung dazu beitragen, dass es zu unerwarteten Ereignissen, z. B. Verbrüche oder Wassereintritte, und letztlich zum Stillstand eines TVM-Vortriebs kommt.

3 Platzierung der Bohrgeräte in Abhängigkeit der Platzverhältnisse

Die Frage nach einer geeigneten Positionierung eines Aufschlussbohrgeräts im Bereich des Bohrkopfs richtet sich in erster Linie nach der Konstruktion der TVM und den verfügbaren Platzverhältnissen sowie der Frage nach sporadischen Erkundungen beim Antreffen von Störungszonen oder einer systematischen Vorauserkundung von Teilabschnitten oder der gesamten Tunnelstrecke. Für sporadische Erkundungen kann meist eine geeignete Installationsposition unter der Maschine unmittelbar hinter dem Schneidrad oder auf dem Zwischendeck der Maschine gefunden werden (Bilder 1 und 2).

Eine viel diskutierte Frage ist die Lage und Bohrneigung in Richtung Vortrieb. Die meisten TVM-Schneidräder sind so konzipiert, dass eine Vorausboreung in Tunnelachse wegen fehlender Öffnungen im Schneidrad überhaupt nicht möglich ist. Deshalb entscheidet man sich in den meisten Fällen für einen geringen Winkel von 5 bis 10° aus der Tunnelachse an der Tunnelsohle oder im Firstbereich des Querschnitts. Die Wahl dieser Bohrrichtung ent-



Fig. 2. Drilling rig on the upper deck of a TBM
Bild 2. Bohrgerät auf TVM-Oberdeck

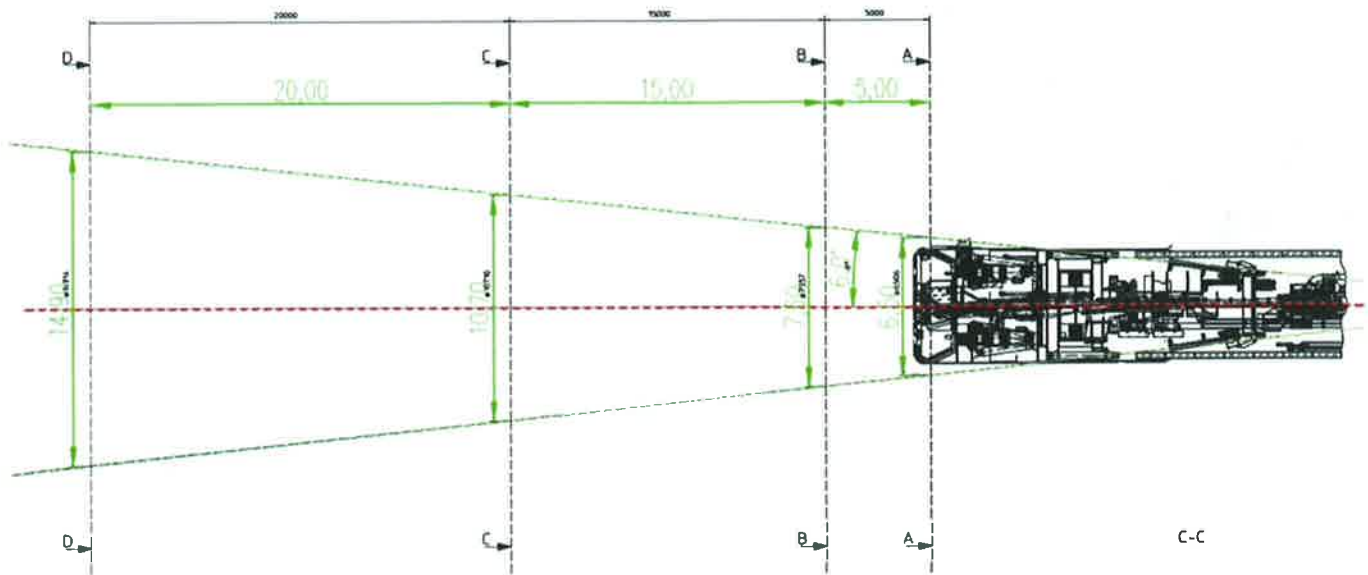


Fig. 3. Diagram of possible drilling directions
Bild 3. Schema für mögliche Bohrrichtung

thus generally made to angle the holes at 5 to 10° from the tunnel axis at the invert or crown of the tunnel cross-section. The selection of this drilling direction often determines the practical length of the holes since with these inclinations and, for example, a drilling depth of 100 m, drilling deviations of 10 to 20 m have to be expected in some geologies (Fig. 3).

The available space determines the size of the drilling rig and thus also the size of the drilling equipment and above all the lengths of the rod and casings. The rod lengths also have an influence on the duration of drilling. Depending on the type of machine, the size of the drilling equipment has an essential influence on the drilling depth, which is different according to the drilling process, and also on the drilling precision. Space is needed for any flushing pumps, air compressors, drilling equipment like rods, lifting devices for drill rods, mixers for flushing and mixers for grouting after the completion of the hole.

4 Drillhole deviation

In general, the drillhole deviation cannot be neglected, particularly for greater drilling depths independent of the chosen drilling direction. Due to the different positions of the percussion energy input, hammer drilling with a top hammer already has a considerably higher deviation than the down-the-hole process. If the down-the-hole process is compared to wire line core drilling, the latter leads to considerably less deviation, both for vertical and for horizontal or near-horizontal drilling. Any deviations using wire-line core drilling can be corrected by a combination of a wireline system with core drilling.

A decision always has to be made for each exploration target whether surveying of the course of the hole can be generally omitted, since for example interpolation of the geology in relation to the tunnel axis is possible for shorter holes, or whether the drillhole is of great significance for exploration after being drilled and the hole is surveyed. Today, surveying systems are available for almost any drilling process, and the course of the drillhole

scheidet oft auch über die mögliche Länge der Erkundungsbohrung, da man mit diesen Neigungen, z.B. bei einer Bohrtiefe von 100 m, in manchen Geologien bereits mit Bohrabweichungen von 10 bis zu 20 m aus der Tunnelachse rechnen muss (Bild 3).

Die Platzverhältnisse bestimmen die Bohrgerätegröße und daraus resultierend auch die Bohrwerkzeuggrößen und vor allem die Gestänge- und Verrohrungslängen. Die Gestängelängen haben einen Einfluss auf die Bohrdauer. Je nach Maschinentyp hat die Größe der Bohranlage einen wesentlichen Einfluss auf die Bohrtiefe, die je nach Bohrverfahren unterschiedlich ist, und auch auf die Bohrgenauigkeit. Es wird auch Platz für etwaige Spülpumpen, Luftkompressoren, Bohrwerkzeuge wie Gestänge, Hebewerkzeuge für Bohrgestänge, Mischer für Bohrspülungen und Mischer für Injektionsgut zur Bohrlochverpressung nach Fertigstellung der Bohrung benötigt.

4 Bohrlochabweichung

Generell darf die Bohrlochabweichung speziell bei größeren Bohrtiefen, unabhängig von der gewählten Bohrrichtung, nicht außer Acht gelassen werden. Aufgrund der unterschiedlichen Lage des Schlagenergieeintrags weisen Hammerbohrungen mit einem Außenhammer bereits wesentlich höhere Abweichungen auf als Imlochhammerverfahren. Vergleicht man Imlochhammerverfahren mit dem Seilkernbohrverfahren, erzielt man nicht nur bei vertikal sondern auch bei horizontalen oder horizontal geneigten Bohrungen mit dem Seilkernbohrverfahren deutlich geringere Abweichungen. Etwaige Abweichungen beim Seilkernbohrverfahren können durch die Kombination eines Wireline-Systems mit Kernbohrverfahren korrigiert werden.

Für das Erkundungsziel muss in jedem Fall entschieden werden, ob auf eine Vermessung des Bohrverlaufs generell verzichtet werden kann, da zum Beispiel bei kurzen Bohrungen eine Interpolation der Geologie in Bezug auf die Tunnelachse möglich ist, oder ob das Bohrloch nach Fertigstellung von wesentlicher Bedeutung für die Erkundung ist und die Bohrung vermessen wird. Heutzutage

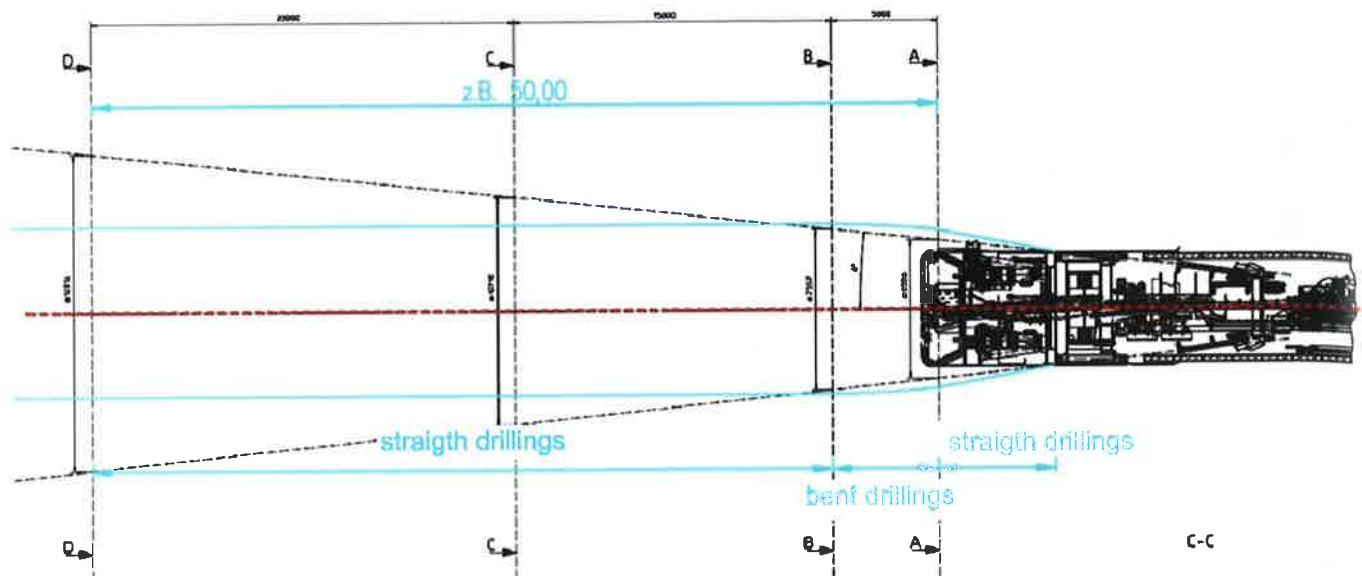


Fig. 4. Drilling directions for directional drilling
Bild 4. Bohrrichtung mit gesteuerter Bohrung

can be surveyed relatively quickly even under conditions of water pressure. According to the surveying system, the surveying probe can be inserted, flushed in or also drawn in. The most suitable method depends on factors such as the hole diameter, internal diameter of the string or casing and the inclination of the drillhole.

For deeper drilled depths (from ca. 50 m), the use of a directional drilling systems should always be considered (Fig. 4). In hard rock, water-powered drill motors (mud motors) can be used, although for exploration drilling, this system is only used to correct the drilling direction for shorter sections, while the rest of the drilling depth is drilled with conventional exploration methods. Directional wireline drilling systems with continuous core extraction are now available on the market.

5 Drilling methods

Various drilling systems are available for exploration of rock mass conditions ahead of the machine as it advances. The selection of the most suitable drilling method should mainly be based on the definition of the aims of exploration. In practice, however, this decision is mostly made for a quick method of drilling due to scheduling and economic considerations, although this is at the cost of the quality of the results.

5.1 Hammer drilling without extraction of cores

Hammer drilling is always a destructive method, i.e. the entire cross-section of the drilled hole is destroyed by the drill bit over its entire cross-section and the rock is removed in the form of cuttings (in fraction sizes from fine to medium sand) and transported out of the mouth of the hole with the flushing water or blown out. An analysis of the rock mass conditions met by the drill can only be made by registering the penetration, change of water output and geological designation of the cuttings.

Hammer drilling with top hammer is mostly undertaken with the drill mounted on the TBM, which is also

gibt es fast für jedes angewandte Bohrverfahren ein Vermessungssystem, mit dem der Bohrlochverlauf sogar relativ rasch auch unter drückenden Wasserverhältnissen gemessen werden kann. Je nach Vermessungssystem kann die Vermessungssonde entweder eingeschoben, eingespült oder auch eingeschleppt werden. Welche Methode am geeignetsten ist, hängt unter anderem vom Bohrdurchmesser, Innendurchmesser der Gestänge oder Verrohrungen und der Neigung des Bohrlochs ab.

Für größere Bohrtiefen (ab ca. 50 m) sollte auf jeden Fall auch der Einsatz von gesteuerten Bohrsystemen überlegt werden (Bild 4). Im Hartgestein kommen dabei wasserbetriebene Bohrmotoren (Mud Motor) zum Einsatz, wobei dieses System bei Erkundungsbohrungen nur zur Korrektur der Bohrrichtung auf kurzen Streckenabschnitten zum Einsatz kommt, während die restlichen Bohrlochstrecken mit herkömmlichen Erkundungsmethoden abgebohrt werden. Es gibt auf dem Markt inzwischen auch steuerbare Wireline-Bohrsysteme mit durchgehender Kerngewinnung.

5 Bohrmethoden

Zur vorausseilenden Erkundung der Gebirgsverhältnisse im Zusammenhang mit einem laufenden TVM-Vortrieb stehen verschiedenste Bohrsysteme zur Verfügung. Die Wahl der geeigneten Bohrmethode sollte in erster Linie von der Definition des Erkundungsziels beeinflusst sein. In der Praxis fällt diese Entscheidung jedoch meistens aufgrund terminlicher und wirtschaftlicher Zwänge in Richtung einer schnellen Bohrmethode, jedoch auf Kosten der Qualität des Aufschlussergebnisses.

5.1 Schlagbohrungen ohne Kerngewinn

Hammerschlagbohrungen sind immer zerstörende Bohrmethoden, d.h. das aufgefahrene Bohrloch wird durch den Bohrmeißel auf den vollen Bohrlochquerschnitt zerstört und das angetroffene Gebirge in Form von Bohrklein (in Fraktionsgrößen von Fein- bis Mittelsand) am Bohrloch-

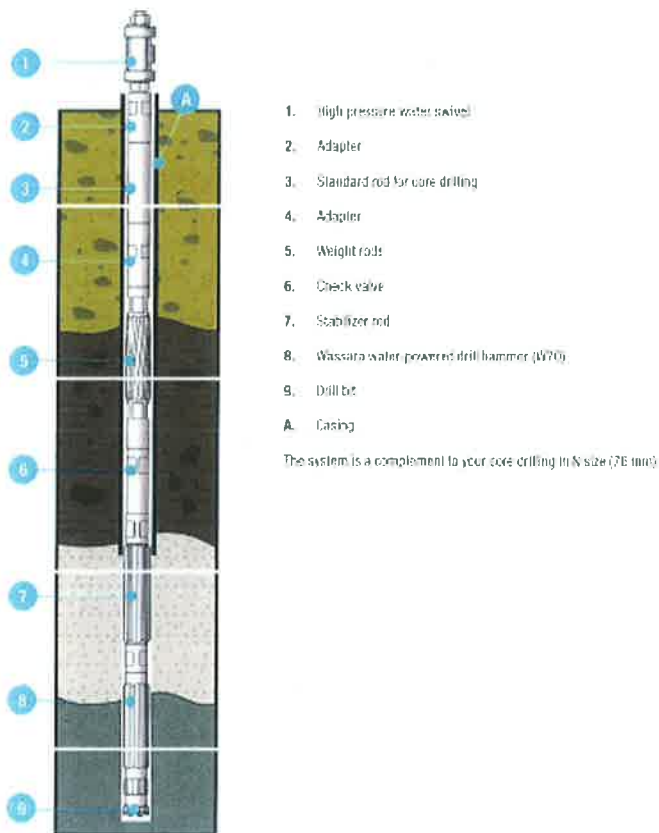


Fig. 5. Wassara drilling technology with core extraction
Bild 5. Wassara Bohrtechnik mit Kernbohrung

used for systematic rock bolting. These drills have, according to the space available, drill carriages from 3 to 6 m long and are equipped with a hydraulic percussion hammer and hydraulic thrust.

Air driven down-the-hole (DTH) hammer drills are available for hole diameters from ca. 50 to 150 mm and more. This drilling method differs from probing from a TBM solely due to the dust development or the measures necessary against dust caused by drilling.

The Wassara DTH hammer technology (Fig. 5) has proven very successful for DTH drilling, especially against water under pressure. The DTH hammer is driven by a high-pressure water pump; this requires pumps capable of pumping ca. 100 to 400 l/min and pressures of 170 to 200 bar. Clean water is used as a flushing medium, with a high quantity being required to operate the DTH hammer, which also ensures good flushing of the cuttings. Such high water pressures can also be used to drill against formation water under high pressures, although in this case a preventer should also be used for protection.

The Wassara drill technology now offers a combination for deep exploration drilling with a diameter of 76 mm upwards. The philosophy of this system is to drill ahead of the machine in stable rock mass strata until a fault zone is encountered. When the fault zone is reached, the DTH hammer is replaced with a wireline core drill of the dimension NQ (76 mm) and drilling is continued as a classic exploration borehole with complete extraction of cores. The advantage of this method of drilling is the high penetration in compact rock mass formations (which represent no danger for mechanised tunnelling) and a higher quality of exploration results when a fault zone is encoun-

Wire line core barrel SK6L bit and reamer method I = 146 x 102mm bit and reamer method II = 150 x 102mm

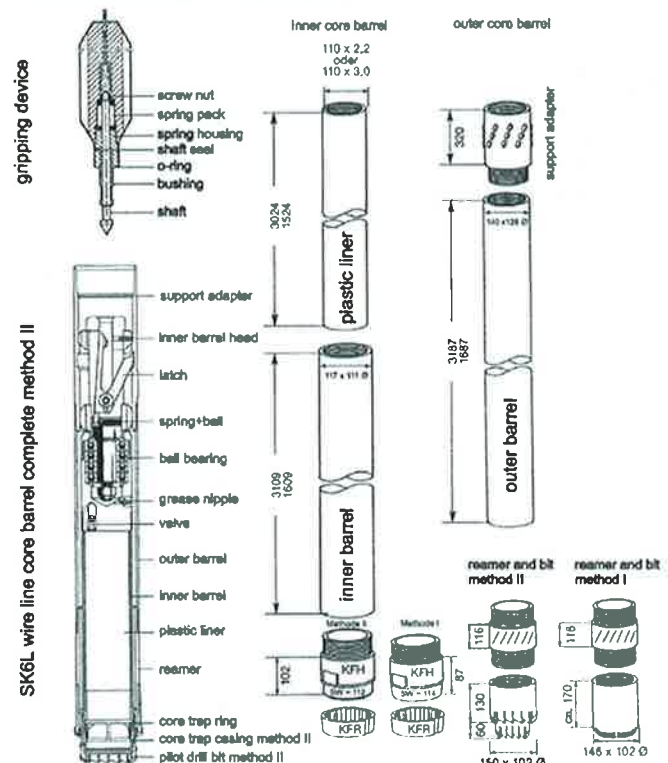


Fig. 6. Wireline drilling technology
Bild 6. Seilkernrohr Bohrtechnik

mund mit dem Spülwasser oder der Spülluft ausgetragen. Eine Analyse der angetroffenen Gebirgsverhältnisse kann nur durch Registrierung des Bohrfortschritts, Veränderung der Wasserzutritte und geologische Ansprache des Bohrkleins erfolgen.

Hammerbohrungen mit dem Außenhammer werden meist mit den auf der TVM montierten Hammerbohrgeräten, das auch für systematische Ankerungen verwendet wird, durchgeführt. Die Bohrgeräte haben je nach verfügbaren Platzverhältnissen Lafettenlängen von 3 bis 6 m und sind mit einem hydraulischen Schlaghammer und Hydraulikvorschub ausgestattet.

Luftbetriebene Imlochbohrhämmer gibt es für Bohrolochdurchmesser von ca. 50 bis 150 mm und darüber. Diese Bohrmethode scheidet für Erkundungsbohrungen aus einer TVM alleine schon wegen der Staubentwicklung oder der notwendigen Maßnahmen gegen den Bohrstaub praktisch aus.

Als Imlochhammerbohrungen, speziell gegen drückendes Wasser, hat sich die Wassara-Imlochhammer-Bohrtechnik bisher sehr gut bewährt (Bild 5). Der Imlochhammer wird mit einer Hochdruckwasserpumpe betrieben; dazu benötigt man Pumpen mit einer Förderrate von ca. 100 bis 400 l/min und Pumpendrüken von 170 bis 200 bar. Als Spülmedium verwendet man reines Wasser, wobei die hohe Spülmenge einerseits zum Betreiben des Imlochhammers erforderlich ist, zum anderen jedoch auch einen sehr guten Austrag des Bohrkleins gewährleistet. Mit solch hohen Spüldrücken kann auch gegen stark drückendes Bergwasser gebohrt werden, jedoch sollten diese Bohrungen dann im Schutz eines Preventers erfolgen.

Table 1. Drilling and core diameter for standard wireline tubes

Tabelle 1. Bohr- und Kerndurchmesser für Standardseilkernrohre

Description Bezeichnung	Drilled diameter Bohrdurchmesser [mm]	Core diameter Kerndurchmesser [mm]
BQ	60	36
NQ	76	47
HQ	96	64
PQ	122	85
SKL 146	146	102

tered thanks to the use of a wireline drill with coring tube for core extraction.

5.2 Core drilling

For exploration in front of a TBM, classic methods of core drilling with single or double coring tubes are practically ruled out since the necessary manoeuvring of rods consumes too much time and also because the stability of the hole cannot be guaranteed while this is done.

A proven system is probe drilling using the wireline process. Table 1 summarises the standard dimensions for this process.

The advantage of this drilling system is the comparatively high penetration. The coring tube is flushed into horizontal or uphill holes by the water pressure for hole flushing and latched by the mechanism of the drilling system and withdrawn out of the hole after a core length has been bored using the winch of the drill system. The drill string (coring tubes 3 to 6 m long) serves in this case both as drill string to drive the drill bit and also as a casing to support the hole sides during the entire drilling procedure.

When this drilling system is used from a TBM, the dimensions NQ or HQ should mostly be used due to the restricted space available, particularly if the formation water pressure is high, in which case a counterpressure builds up over the bored cross-section as the hole is drilled.

The wireline drilling system is now also available on the market as a directional system with hole diameter NQ and has already been used successfully in mining and in the oil industry down to drilled depths of more than 2,000 m.

5.3 Exploration drilling against pressurised water with preventer

If high water pressures are to be expected when probe holes are drilled below ground, the use of a preventer is essential. Preventers must be the right size for the relevant hole diameter. The basic rule is that the higher the pressure is, the smaller the hole diameter should be chosen.

Simple preventers that do not turn are called packers or annular preventers. These consist of a rubber seal in a steel housing with a hydraulic pressure plate, which squeezes the rubber ring and seals the annular gap around

Die Wassara-Bohrtechnik bietet inzwischen eine Kombinationsmöglichkeit für tiefe Erkundungsbohrungen mit einem Bohrdurchmesser von 76 mm aufwärts. Die Philosophie dieses Systems ist eine Vorausboreung in stabilen Gebirgsschichten auf entsprechende Tiefen bis zum Antreffen einer Störungszone. Beim Erreichen der Störzone wird der Imlochhammer ausgebaut und durch ein Seilkernrohr der Dimension NQ (76 mm) ersetzt und die Bohrung als klassische Erkundungsbohrung mit durchgehendem Kerngewinn fortgesetzt bzw. fertiggestellt. Der Vorteil dieser Bohrmethode liegt in einer hohen Bohrleistung in kompakten Gebirgsformationen (die für einen TVM-Vortrieb keine Gefahr darstellen) und in einer hohen Abschlussqualität in angetroffenen Störzonen durch den Einsatz der Seilkernrohrbohrtechnik (Wireline) mit Kernrohren zur Kerngewinnung

5.2 Kernbohrungen

Für Erkundungsbohrungen in TVM-Vortrieben scheiden klassische Kernbohrmethoden mit Einfach- oder Doppelkernrohren praktisch aus, da durch die erforderlichen Gestängemanöver für den Ein- und Ausbau der Kernrohre zu viel Zeit verloren geht und außerdem während dieser Manöver die Bohrlochstabilität nicht gewährleistet werden kann.

Ein durchaus bewährtes System ist die Vorauserkundung mit dem Seilkernrohrbohrverfahren (Wireline-System). Die Tabelle 1 fasst die Standarddimensionen für dieses Verfahren zusammen.

Der Vorteil dieses Bohrsystems liegt in einer vergleichsweise hohen Bohrleistung. Das Kernrohr wird bei horizontal oder nach oben geneigten Bohrungen mit dem Wasserdruck für die Bohrlochspülung eingespült und über den Verriegelungsmechanismus des Bohrsystems eingeklinkt und nach dem Abbohren einer Kernstrecke über den Ausklinkmechanismus mit dem Windenseil des Bohrgeräts aus dem Bohrloch zurückgezogen. Der Bohrstrang (Bohrrohre mit 3 bis 6 m Länge) dient dabei sowohl als Bohrgestänge für den Vortrieb der Bohrkronen als auch als Futterrohr zur Stützung der Bohrlochwandung während des gesamten Bohrvorgangs.

Für den Einsatz dieses Bohrsystems bei TVM-Vortrieben sollte aufgrund der beengten Platzverhältnisse vorwiegend mit den Dimensionen NQ oder HQ gearbeitet werden, speziell bei sehr hohen Gebirgswasserdrücken, bei denen sich natürlich über die aufgefahrene Querschnittsfläche ein entsprechender Gegendruck beim Bohrvorgang einstellt.

Das Wireline-Bohrsystem wird inzwischen auf dem Markt auch als steuerbares Bohrsystem mit dem Bohrdurchmesser NQ angeboten und wurde auch schon erfolgreich für Explorationsbohrungen im Bergbau und in der Erdölindustrie bis zu Bohrtiefen von über 2.000 m angewandt.

5.3 Erkundungsbohrungen gegen drückendes Wasser mit Preventer

Sind bei Erkundungsbohrungen unter Tage hohe Wasserdrücke zu erwarten, ist der Einsatz von Bohrlochpreventern auf alle Fälle vorzusehen. Die Preventer müssen auf die jeweilige Dimension der Bohrdurchmesser abgestimmt werden. Grundsätzlich gilt jedoch, je höher der Wasser-



Fig. 7. Drillhole preventer for diameters from 50 to 150 mm and pressures up to 50 bar
Bild 7. Bohrlochabsperrepreventer für Bohrdurchmesser von 50 bis 150 mm und Drücke bis zu 50 bar

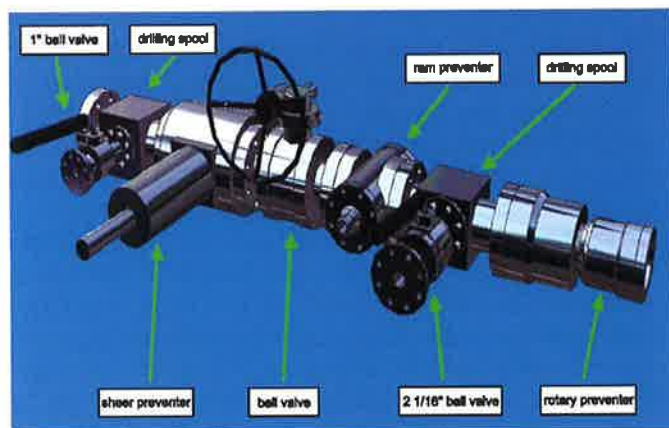


Fig. 8. Rotating preventer with total closure
Bild 8. Drehpreventer mit Totalabschluss

the drill rod. These preventers are only used to seal sudden and unexpected water pressure. Drilling can resume as long as water pressure is low and the preventer is slightly open. (Fig. 7).

For higher water pressures and drilling against pressurised water, the use of rotating preventers is necessary. These essentially consist of the following components (Fig. 8):

- The rotating preventer is a double rubber seal, which closes around the drill string against water pressure and rotates in the opposite direction with a ball bearing construction.
- The ram preventer is a mechanically closed seal to seal around the drill string while a section is unscrewed.
- The ball valve is the element closing the entire cross-section of the drillhole when the drill string is withdrawn.
- The shear preventer is a hydraulically operated shear, which can close the drillhole within a few seconds by completely shearing the drill string in case of a breakage or other problems.
- Between the shear preventer and the rotating preventer, T fittings are mounted with gate valves for the circulation of the flushing medium.

druck, desto kleiner sollte der Bohrdurchmesser gewählt werden.

Einfache, nicht mitdrehende Preventer bezeichnet man als Bohrlochverschluss oder Abschlusspreventer. Sie bestehen aus einer Gummidichtung in einem Stahlgehäuse mit einer hydraulischen Druckplatte, die durch Anpressen den Dichtgummi derart verformt, dass eine Abdichtung des Ringraums um das Bohrgestänge entsteht. Diese Preventer werden nur eingesetzt, um plötzlich unerwartet auftretenden Wasserdruck abzusperren und den Druck abzubauen. Eine Weiterführung der Bohrung ist nur bei geringem Wasserdruck mit leicht geöffnetem Preventer möglich (Bild 7).

Für höhere Wasserdrücke und Bohrarbeiten gegen drückendes Wasser ist der Einsatz von Drehpreventern unerlässlich. Sie bestehen im Prinzip aus folgenden Bauelementen (Bild 8):

- Der Drehpreventer ist eine doppelte Gummidichtung, die sich über den Wasserdruck um das Bohrgestänge schließt und über eine Kugellagerkonstruktion gegenläufig mitdreht.
- Der Backenpreventer ist eine mechanisch verschließbare Dichtung, um das Bohrgestänge während des Abschraubens abzudichten.
- Der Kugelhahn ist das Abschlussorgan für den gesamten Querschnitt der Bohrung im Zustand des ausgebauten Bohrgestänges.
- Der Scherpreventer ist ein hydraulisch verschließbarer Schlagschieber, der das Bohrloch im Fall eines Gestängebruchs oder anderer Probleme durch Abscheren des Bohrstrangs komplett innerhalb weniger Sekunden verschließt.
- Zwischen Scherpreventer und Drehpreventer sind jeweils T-Stücke mit Absperrschiebern für die Zirkulation der Bohrlochspülung angeordnet.

5.4 Counter-Flush-Bohrungen

Das sogenannte Counter Flush Drilling System, oder Bohrverfahren mit Umkehrspülung, hat sich bei Bohrarbeiten gegen hohe Wasserdrücke sehr gut bewährt. Das System kann nur in Kombination mit Preventerbohrung

5.4 Counter flush drilling

The counter flush drilling system has proven very successful for drilling against high water pressures. The system can only be used in combination with a preventer, with the drill string of a wireline casing being drilled by a diamond drill bit. The core is extracted by reversing the flushing circuit and flushing out the core.

The flushing medium is pumped through the T-fitting on the preventer in the annular space between drill string and rock mass to the drill bit and rod. It flows back through the inside of the drill string back to the mouth of the hole. The drill string is guided by the drive unit of the drill and closed at the free end by a Kelly valve. Opening of the Kelly valve starts the flushing flow and the core is transported to the surface.

This method of drilling does not deliver the same core quality as wireline drilling since loose rock mass strata are washed out by the flushing flow. In compact rock mass, however, very good core quality can be achieved. The advantage of this method of drilling is the high penetration (two to three times that of wireline drilling) and a drilling system constantly closed against high water pressures.

6 Data logging systems

Normally available drill data loggers are also used for probe drilling in front of TBMs. Electronic data loggers belong to the standard equipment of modern drills for ground exploration.

These devices normally consist of a screen with touchscreen operation or keys for the inputting of drilling data. During drilling, the relevant drilling data such as thrust pressure, torque, revolution speed, penetration, flushing quantity and pressure is continuously recorded against time or against drilled depth. The measured data is displayed on the screen and can be transmitted to another computer on a storage medium (chip card, USB stick) or over a wireless connection. The data recorded in this way can then be displayed in any form as a list or graphically.

The analysis of the rock formations encountered from this drilling data is however very problematic for several reasons. The characteristics of the recorded data are also very dependent on the chosen drilling system and also whether the hole was drilled against pressurised groundwater with packer or rotating preventer.

Reliable conclusions about the prevailing rock strengths would only be possible from the evaluation of the drill penetration if the parameters of thrust pressure and torque of the drill could be kept constant. In practice the drilling crew is expected to drill quickly due to pressure because of schedule. This has the consequence that the drilling foreman varies his drilling parameters so widely according to the rock conditions encountered that the hole is drilled as fast as possible (or measures have to be taken to prevent jamming of the drill string). In addition, the energy loss during drilling due to blunt drill bits, the use of short drill rods or friction losses at great drilled depths is not taken into account.

The recording of drilling data during probing ahead of a TBM therefore only offers very vague statements about the approximate condition of the rock mass

angewandt werden, dabei wird mit dem Bohrstrang eines Seilkernrohrs mit Diamantkrone ohne Innenrohr gebohrt. Die Gewinnung des Bohrkerns erfolgt jedoch durch Ausspülen des Bohrkerns und Umkehr der Bohrlochspülung.

Die Bohrlochspülung wird über das T-Stück am Preventer im Ringraum zwischen Bohrstrang und Gebirge zur Bohrkronen gepumpt und fließt in weiterer Folge durch den Innenraum des Bohrstrangs wieder zum Bohrlochmund. Der Bohrstrang wird durch den Antriebskopf des Bohrgeräts geführt und am freien Ende mit einem Kelly-Hahn verschlossen. Durch Öffnen des Kelly-Hahns wird der Spülstrom aktiviert und somit der Bohrkern an die Oberfläche gefördert.

Diese Bohrmethode liefert nicht dieselbe Kernqualität wie eine Seilkernrohrbohrung, da lose Gebirgsschichten durch den Spülstrom ausgewaschen werden. Im kompakten Gebirge sind jedoch auch sehr gute Kernqualitäten zu erzielen. Der Vorteil dieser Bohrmethode liegt in der hohen Bohrleistung (zwei- bis dreimal schneller als eine Seilkernrohrbohrung) und in einem ständig geschlossenen Bohrsystem beim Bohren gegen hohe Wasserdrücke.

6 Datenaufzeichnungssysteme

Als Datenaufzeichnungssysteme werden, auch für Erkundungsbohrungen in TVM-Vortrieben, handelsübliche Bohrdatenschreiber verwendet. Elektronische Bohrdatenschreiber gehören zur Standardausrüstung moderner Bohrgeräte für die Baugrunderkundung.

Die Geräte bestehen meist aus einem Bildschirm mit Touchscreen-Bedienung oder Tastenfunktion für die Eingabe der Bohrlochdaten. Während des Bohrvorgangs erfolgt eine laufende Aufzeichnung aller relevanten Bohrdaten wie Anpressdruck, Drehmoment, Umdrehung, Bohrfortschritt, Spülmenge und Spülungsdruck und gegen die Zeit bzw. gegen die Bohrtiefe. Die gemessenen Werte werden auf dem Bildschirm dargestellt und über ein Speichermedium (Chipkarte, USB-Stick) oder Funk auf einen Computer übertragen. Die so registrierten Daten können in jeder beliebigen Form als Liste oder Graphik ausgegeben werden.

Eine Analyse der angetroffenen Gebirgsformationen über diese Bohrdatenschreiber ist jedoch aus mehreren Gründen sehr problematisch. Die Charakteristik der erfassten Daten ist auch sehr stark abhängig vom gewählten Bohrsystem und auch davon, ob gegen drückendes Grundwasser mit Abschluss- oder Drehpreventer gebohrt wird.

Ein verlässlicher Rückschluss auf die vorherrschenden Gebirgsfestigkeiten über die Auswertung des Bohrfortschritts in Abhängigkeit der Bohrzeiten wäre nur bei konstant gehaltenen Parametern für Anpressdruck und Drehmoment des Bohrgeräts sowie Pumprate und Spülungsdruck der Bohrlochspülung möglich. In der Praxis wird jedoch vom Bohrmeister aufgrund des Termindrucks eine hohe Bohrleistung erwartet. Dies führt dazu, dass der Bohrmeister je nach angetroffenen Gebirgsverhältnissen seine Bohrparameter so variiert, dass er eine möglichst hohe Bohrleistung erzielt (oder Maßnahmen gegen ein Verklemmen des Bohrgestänges treffen muss). Zudem wird der Energieverlust der Bohrung durch stumpfe Bohrkronen, durch den Einsatz von kurzem Bohrgestänge oder

(soft/hard, presence of water) and no statements are possible about the jointing and stress behaviour of the rock mass, such as joint spacing and widths.

7 Example of the Gotthard Base Tunnel

On the Amsteg contract at the Gotthard Base Tunnel, altogether ten exploration holes 50 to 300 m long were drilled using the counter flush process. The drilling work was undertaken using an Atlas Copco Diamac 282 drilling rig working from the space behind the cutterhead of the TBM with the hole starting from the tunnel invert. Cores of 47 mm diameter were extracted from a drilled hole of 76 mm diameter.

One essential part of CF drilling is the use of an appropriate positioner. This is done by first boring a double-walled casing of diameter 146 mm to a depth of about 10 m. Then the positioner is installed with 10 mm wall thickness and a length of 6 to 10 m with a connecting flange for the assembly of the preventer construction.

The space between is filled with resin to achieve the best possible bonding after a short hardening time. The installed positioner serves to resist the expected water pressure of up to 150 bar, and also to bridge over any jointing in the area where the hole is started. As drilling proceeds, the positioner can be loaded in tension or compression.

Then the preventer system is mounted and the drill rig including the necessary anchorage of the drill carriage. Before drilling starts, the entire system is pressure tested to 200 bar in order to check the functioning of the preventer system, the anchoring of the drill rig and the bonding of the positioner.

After successful completion of the pressure test, CF drilling can proceed, with the cores being flushed up to the mouth of the hole by the pressure of the flushing circuit or by groundwater pressure and caught at the end of the drill string after the so-called Kelly valve.

When excessive water quantities or pressures were encountered, the planned measure was to grout entire length of the hole with cement grout through the T-fitting of the preventer at the mouth of the hole. These grouting measures were not necessary in the present case since the very high water pressure (up to 120 bar) reduced very quickly and due to the water quantities encountered, drilling could be continued without problems after a short interruption.

After the completion of the entire exploration depth of up to 300 m, the holes were grouted with cement grout and the drill and preventer could be dismantled after the grout had hardened. Under optimal conditions, a 300 m hole could be drilled with preventer in three to four days (Fig. 9).

8 Summary

Exploration drilling ahead of TBM is not simple to perform due to the conditions. In each individual case, the aim of exploration must be defined in advance on each project and a decision made to what extent and in what quality probe drilling is necessary. On large tunnelling contracts, it may be the case that several exploration aims are defined according to the geological conditions. In

Reibungsverlust durch große Bohrtiefen nicht berücksichtigt.

Die Bohrdatenschreibung für Erkundungsbohrungen aus TVM-Vortrieben liefert daher nur eine sehr vage Aussage über die ungefähre Gebirgssituation (weich/hart, wasserführend), eine Aussage über Klüftigkeit und Spannungsverhalten des Gebirges in Bezug auf Lage und Klüftweiten ist nicht möglich.

7 Fallbeispiel Gotthard-Basistunnel

Im Los Amsteg des Gotthard-Basistunnels wurden insgesamt zehn 50 bis 300 m lange Vorauserkundungsbohrungen mit dem Counter Flush Verfahren durchgeführt. Die Bohrarbeiten wurden mit Atlas Copco Bohrergerät Diamac 282 aus dem Raum hinter dem Schneidrad der TVM mit Bohransatzpunkt an der Tunnelsohle ausgeführt. Bei einem Bohrdurchmesser von 76 mm wurden Bohrkern mit 47 mm Durchmesser gewonnen.

Ein wesentlicher Bestandteil der CF-Bohrung ist die Montage eines entsprechenden Standrohrs. Dazu wurde vorab eine Vorbohrung mit Doppelkernrohr Durchmesser 146 mm bis auf ca. 10 m Tiefe hergestellt. Anschließend erfolgte der Einbau von Standrohren mit 10 mm Wandstärke mit einer Länge von 6 bis 10 m und einem Anschlussflansch für die Montage der Preventerkonstruktion.

Der Ringraum wurde mit Kunstharz injiziert, um eine möglichst hohe Haftzugfestigkeit nach sehr kurzer Aushärtungszeit zu erreichen. Das eingebaute Standrohr diente einerseits als Widerlager gegen den zu erwartenden Wasserdruck von bis zu 150 bar, andererseits zur Überbrückung von eventuell vorhandenen Klüften im Bereich des Bohransatzpunkts. Je nach Bohrmanöver wurde das Standrohr entweder auf Zug oder Druck belastet.

Anschließend erfolgte die Montage des Preventersystems sowie des Bohrergeräts einschließlich der erforderlichen Verankerung der Bohrlafette. Vor Beginn der Bohrarbeiten wurde das gesamte System einem Drucktest bis zu 200 bar unterzogen, um die Funktion des Preventersystems, die Verankerung des Bohrergeräts und die Haftzugfestigkeit des Standrohrs zu testen.

Nach positivem Abschluss der Drucküberprüfungen konnte die CF-Bohrung durchgeführt werden, wobei der Bohrkern durch den Druck der Bohrspülung bzw. durch den Bergwasserdruck zum Bohrlochmund gespült wird und am Ende des Bohrstrangs nach dem sogenannten KellyHahn aufgefangen wird.

Beim Antreffen von zu hohen Wassermengen oder -drücken war eine Injektion der gesamten Bohrlochstrecke mit Zementinjektionen über das T-Stück des Preventers am Bohrlochmund vorgesehen. Diese Injektionsmaßnahmen waren im vorliegenden Fall nicht notwendig, da sich die sehr hohen Wasserdrücke (bis zu 120 bar) sehr rasch entspannten und aufgrund der angetroffenen Wassermengen nach kurzer Unterbrechung der Bohrarbeiten problemlos weitergeführt werden konnten.

Nach Fertigstellung der gesamten Erkundungsbohrstrecke von bis zu 300 m wurden die Bohrungen mit Zementsuspension verpresst und nach der Aushärtung des Zementes konnten das Bohrergerät und die Preventer wieder abgebaut werden. Unter optimalen Bedingungen konn-



Fig. 9. Counter flush drilling with Diamec, Gotthard Base Tunnel, Amsteg contract

Bild 9. Counter Flush Bohrung mit Diamec, Gotthard-Basistunnel, Los Amsteg

many cases, simply the information that an aquiferous zone has been encountered by a simple and quick method of drilling is sufficient. The more TBM tunnelling is performed in difficult rock mass classes, the more important becomes the quality of exploration ahead of the machine with appropriate information about the ground conditions to be expected.

For these situations, better collaboration between tunnel designers, TBM manufacturers, tunnelling contractors and specialist drilling contractors would be desirable in the future. In practice, appropriate drilling rigs are offered by the TBM manufacturers with their machines at various positions on the machine; the necessary drilling equipment and drilling systems are however the responsibility of the tunnelling contractor, whose experience is more concentrated on boring through and overcoming difficult rock mass formations and who have less experience of drilling technology for long and challenging exploration drilling.

Designers and clients could consider whether a systematic programme of probe drilling can be combined with the appropriate pre-support measures. Information about a fault zone ahead of a TBM is of little help unless the appropriate support measures such as pipe screen, grouting measures or ground freezing is provided and carried out as the TBM advances. Specialised civil engineering companies are ready to provide the benefit of their experience in the areas of drilling and grouting technology to assist this process and plan safe and economic solutions to such problems on future tunnel projects.



Ing. Kurt Kogler
Schmiedingerstrasse 85
5020 Salzburg
kurt.kogler@zueblin.at



Dr. Harald Krenn
Lagergasse 28 Stg. 1 Top 5
2700 Wiener Neustadt
harald.krenn@zueblin.at

te so eine 300 m Preventerbohrung in einem Zeitraum von drei bis vier Tagen hergestellt werden (Bild 9).

8 Resümee

Erkundungsbohrungen aus TVM-Vortrieben sind aufgrund der Randbedingungen nicht einfach auszuführen. Im Einzelfall muss für jedes Projekt im Vorfeld das Erkundungsziel definiert und entschieden werden, in welchem Umfang und mit welcher Qualität Erkundungsbohrungen erforderlich sind. Bei großen Tunnelbaulosen kann es auch vorkommen, dass verschiedene Erkundungsziele, je nach geologischen Verhältnissen, definiert werden. In vielen Situationen reicht schon die Information über das Antreffen von wasserführenden Zonen mit einer einfachen und schnellen Bohrmethode. Je mehr TVM-Vortriebe in schwierigen Gebirgsklassen durchgeführt werden, umso wichtiger ist auch die Qualität der Vorauserkundung mit entsprechenden Informationen über die zu erwartenden Gebirgseigenschaften.

Für diese Situationen wäre in Zukunft eine bessere Zusammenarbeit zwischen Tunnelplaner, TVM-Hersteller, Tunnelbauunternehmer und Bohrspezialisten wünschenswert. In der Praxis werden derzeit von den TVM-Herstellern entsprechende Bohrgeräte mit möglichen Bohrpositionen auf den TVM angeboten; die erforderlichen Bohrausrüstungen und Bohrsysteme werden jedoch dem Tunnelbauunternehmen übertragen, deren Erfahrung viel mehr im Auffahren und Bewältigen von schwierigen Gebirgsformationen liegt und weniger in der Bohrtechnik für anspruchsvolle, lange Vorausböhrungen.

Seitens der Planer und Bauherren sollte überlegt werden, ob ein systematisches Vorauserkundungsprogramm auch mit einer entsprechenden Voraussicherungsmethode kombiniert werden kann. Die Information über das Antreffen einer Störzone vor einem TVM-Vortrieb hilft wenig, wenn nicht entsprechende Sicherungsmethoden wie Rohrschirme, Injektionsmaßnahmen oder Baugrundvereisungen vorgesehen werden, die auch im Zuge eines TVM-Vortriebs ausgeführt werden können. Die Spezialtiefbau-firmen sind bereit Ihre Erfahrungen auf dem Gebiet der Bohr- und Injektionstechnik in diesen Prozess mit einzubringen und für künftige Tunnelprojekte sichere und wirtschaftliche Lösungen dafür auszuarbeiten.