

Girmscheid, G.

Hochleistungsvortrieb im Tunnelbau

TBM-Systeme

Zusammenfassung Der Tunnelbau mittels Tunnelbohrmaschinen im Festgestein zählt zu den am weitesten entwickelten Bauprozessen, was die Mechanisierung des Bohrprozesses betrifft. Dies trifft auch auf die Anlagen für die temporären Sicherungsmaßnahmen und den abschließenden Ausbau zu. Weiterhin wurden folgende computergestützte Systeme entwickelt:

- Sensorgestützte Erfassung und Speicherung aller relevanten Funktions- und Steuerungsdaten
- Computergestützte Visualisierung der Betriebszustände und Steuerung der wichtigsten Aggregate
- Computergestützte, prozessorientierte Steuerung aller Funktionsprozesse

Dieser Aufsatz beschäftigt sich mit den neuesten Entwicklungen in Bezug auf Gripper- und Schild-Tunnelbohrmaschinen. Bei der Abhandlung über Gripper-TBM liegt der Fokus auf Innovationen wie z.B. der Installation der Felsstabilisierung direkt hinter dem Bohrkopf. Einen weiteren Fokus bilden die schildgestützten Tunnelbohrmaschinen und ihre Anwendungsfelder unter Berücksichtigung von druckhaftem Gebirge. Der Entwurf und Einkauf einer TBM sollte nach projektspezifischen und projektübergreifenden Kriterien erfolgen. Dadurch wird sicher gestellt, dass die TBM auch auf verfahrenstechnische Optionen ausgelegt ist, die ihr bei wechselhafter Geologie und Hydrologie eine hohe Flexibilität geben. Dann lassen sich TBM meist auch in Folgeprojekten wirtschaftlich einsetzen.

High performance tunneling TBM systems

Abstract Tunneling with tunnel boring machines in hard rock is numbered among the most advanced construction processes pertaining to the mechanization of the boring process. This also applies to the installations for the temporary support and for the final lining. In addition, computer-aided process systems have been developed which can be enumerated as follows:

- Sensor-supported gathering and computer-aided storage of all relevant operational and survey data
- Computer-aided visualization and control of the most important machine units
- Computer-aided, process-oriented controlling of all operational processes

This paper deals with the latest developments relating to gripper boring machines and shield-driven boring machines. As far as gripper boring machines are concerned, particular focus is directed to innovations such as the installation of ground stabilization directly behind the cutter head. A further focus will be the shield-supported tunneling machine and the innovations dealing with squeezing rock. The design and procurement of TBM should consider project specific and multi-project utilization criteria. Due to such multi-optional consideration

the TBM has enough operational flexibility to encounter changing geology and hydrology. This enables the usage of the machine economically in other projects.

1 Einleitung

Der Einsatz von Tunnelbohrmaschinen wird ganz wesentlich von Wirtschaftlichkeitsüberlegungen in Bezug auf Kosten und Termine bestimmt [1]. Für einen wirtschaftlichen TBM-Einsatz bedarf es einer Mindestprojektlänge sowie der Möglichkeit, die Gesamtinvestition für die Maschine in Folgeprojekten abzuschreiben. Diese hängt von den projektspezifischen Randbedingungen ab. Der TBM-Einsatz ist, in Abhängigkeit des Maschinendurchmessers, im Allgemeinen ab einer Länge von ca. 2 km wirtschaftlich. Die Forderung nach immer höherer Wirtschaftlichkeit im Tunnelvortrieb führt zu Überlegungen, den TBM-Vortrieb auch unter schwierigen Gebirgsbedingungen einzusetzen. Jedoch sind die Systeme in Bezug auf veränderte Gebirgsverhältnisse nur begrenzt flexibel. Folgende technische Problemkreise sind daher für jedes Projekt sorgfältig zu klären:

- Abbaubarkeit des Gesteins
- Verspannbarkeit der TBM im Gebirge
- Standfestigkeit und Verformbarkeit des Gebirges

Bezüglich der technischen und wirtschaftlichen Risikominimierung sind diese Aspekte äußerst sorgfältig entlang der Tunnelspur zu untersuchen. Die Maschine, einschließlich Nachläufersystem, ist auf die Bandbreite der wahrscheinlichsten Gebirgsverhältnisse zu optimieren.

Mit der Tunnelbohrmaschine lassen sich nur Kreisquerschnitte im Vollausschnitt auffahren. Der Ausbruchvorgang ist gebirgsschonend und profilgenau. Tunnelbohrmaschinen werden heute im Durchmesserbereich von ca. 2,5 bis 12 m und mehr eingesetzt. Folgende TBM-Systeme sind zu unterscheiden:

- Gripper-TBM
- Aufweitungs-TBM
- Schild-TBM
- Teleskopschild-TBM / Doppelschild-TBM / Verspannmantel-TBM

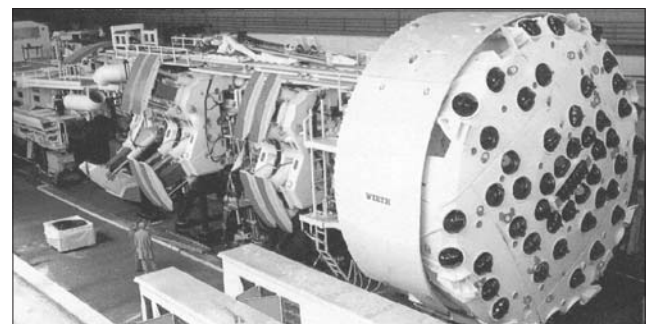


Bild 1. Gripper-TBM (Wirth) [3]
Fig. 1. Gripper-TBM

Prof. Dr.-Ing. Gerhard Girmscheid

Vorsteher Institut für Bauplanung und Baubetrieb,
Professur für Baubetriebswissenschaften und Bauverfahrenstechnik
ETH Zürich, CH-8093 Zürich

2 Geotechnische Einsatzbereiche von TBM

Tunnelbohrmaschinen eignen sich zum Ausbruch von Festgestein mit mittlerer bis hoher Festigkeit (50 - 300 N/mm²) und nicht zu hoher Abrasivität [3]. Unter Abrasivität versteht man die besondere Abnutzung der Werkzeuge durch Minerale mit hohem Härtegrad wie z.B. Quarz. Die Messgröße ist der CAI-Index (Cerchar Abrasivität Index).

2.1 Gripper- und Aufweitungs – TBM

Die Gripper-TBM werden zum Vortrieb von Stollen und Tunnel in möglichst standfestem und störzonenfreiem Gebirge eingesetzt. Als grober Richtwert kann gelten, dass ca. 80 - 90 % der Tunnellänge weitgehend standfest sein müssen und nur in geringem Umfang Stützmittel im Maschinenbereich benötigt werden sollten. Die Gesteinsdruckfestigkeit sollte zwischen 100 und 300 MN/m² liegen. Festigkeiten über 350 MN/m², hohe Zähigkeit bzw. Zugfestigkeit des Gesteins und ein hoher Anteil an abrasiv wirkenden Mineralien (CAI-Index = Abrasivität nach Cerchar) stellen wirtschaftliche Grenzen dar. Zur Beurteilung des Einsatzes werden auch die Spaltzugfestigkeit und der RQD-Index herangezogen. Die Spaltzugfestigkeit sollte 25 ± 5 MN/m² betragen. Der RQD-Index (Rock Quality Designation) drückt den Durchtrennungsgrad des Gebirges aus. Als RQD-Index bezeichnet man das Verhältnis L10/L in Prozent, wobei L10 die Länge aller der in der Bohrerprobenlänge L enthaltenen, über 10 cm langen Bohrerstücke bezeichnet.

$$RQD = \frac{\sum L10_i}{L} \cdot 100$$

L10_i = Länge des i-ten Bohrerstücks über 10 cm

n = Anzahl der Bohrerstücke über 10 cm

L = Länge der Bohrerstrecke

Bei einem RQD-Index 50 - 100 %, einem Kluftabstand von > 60 cm und den oben genannten weiteren Kriterien erscheint in einer ersten Abschätzung der Einsatz einer Gripper-TBM gerechtfertigt. Bei einem höheren Zerlegungsgrad kann die Standfestigkeit ein Problem werden. Geringe Gebirgsfestigkeiten unter 100 MN/m² können die Verformbarkeit der Gripper und damit die maximale Vorschubkraft beschränken. Diese Gripper-TBM sind meist mit einem kurzen Staubschild ausgerüstet.

2.2 Schild – TBM

Die Gesteinsfestigkeiten sollten in etwa den gleichen Bereichen liegen wie bei den Gripper-TBM. Die Verbandsfestigkeit kann jedoch stärker reduziert sein. Dies wird durch den Kluftabstand von 55 – 65 cm und einen RQD-Index von 50 ± 10 % deutlich. Auch bei relativ geringer einaxialer Gesteinsdruckfestigkeit von 50 ± 5 MN/m² und einer geringen Spaltzugfestigkeit von 5 ± 0,5 MN/m² ist der Einsatz einer Schild-TBM möglich. Bei Gebirgsklassen, die zu Niederbrüchen neigen, sind Schild-TBM die geeignete baubetriebliche Lösung. Die Schild-TBM bzw. Teleskopschild-TBM mit Tübbingeinbau im Schildmantel wird in Zukunft besonders bei größeren Durchmessern an Bedeutung gewinnen.

3 Gripper-TBM

Die Gripper-TBM (**Bild 1**) gehören zu den offenen Vollschnitt-Ver-spannmaschinen. Diese Maschinen eignen sich für alle Gebirgsklas-

sen, die eine Mindeststehzeit aufweisen, welche zum Einbau der Ausbaubögen und Anker hinter dem Bohrkopf ausreicht. Der Spritzbetonauftrag sollte, um den Verschleiß der beweglichen Hydraulikeinrichtungen der Maschine nicht zu erhöhen, im Nachläuferbereich erfolgen. Bei Gebirgsverhältnissen, die zu Niederbrüchen neigen, kann es, wenn diese Zonen zu spät erkannt werden, zum Zuschütten der Gripper-TBM hinter dem Bohrkopfmantel kommen. Meist muss dann mit aufwendigen Mitteln, z.B. mit einem zusätzlichen seitlichen Injektionsstollen, das Gebirge verfestigt werden. Die verschüttete Maschine muss durch Handarbeit freigelegt werden. Dies führt meist zu mehrmonatigen Bauunterbrechungen. In solchen Fällen eignen sich Schild-TBM besser.

Bei echtem Gebirgs- sowie Quelldruck kann es zum Einklemmen des Schildmantels kommen. Dieses Problem muss sehr sorgfältig untersucht werden, um das richtige Vortriebskonzept zu entwickeln. Bei langsamen Verformungsprozessen kann dem Problem durch Überschneidwerkzeuge, die einen größeren Querschnitt als den Schilddurchmesser (Staubschild bei der Gripper-TBM bzw. Schildmantel bei der Schild-TBM) erzeugen, begegnet werden. Bei solchen Gebirgsverhältnissen ist jedoch in vielen Fällen der konventionelle Vortrieb zu bevorzugen.

Den typischen Maschinenaufbau einer modernen Gripper-TBM kann man wie folgt gliedern:

- Abbau-, Abstütz- und Antriebsaggregate
- Förder- und Montageeinrichtungen

Zu den primären Aggregaten der Maschine zählt der Bohrkopf. Dieser wird von hydraulischen oder elektrischen Antriebsmotoren, die meist ringförmig um das mittelfreie Hauptlager am Schaft der Maschine angeordnet sind, angetrieben. Der Bohrkopf ist durch einen Bohrkopfmantel mit Staubwand vom aufgefahrenen Querschnitt getrennt. Der Bohrkopfmantel schützt den Bohrkopf vor hereinbrechendem Material. Der hintere Arbeitsraum wird durch die Staubwand vor Staub und absplitterndem Material geschützt. Das abgebaute Material wird über Schöpfereinrichtungen am Bohrkopf und über Leitbleche auf der Rückseite des geschlossenen Bohrkopfes zum Zentrum gefördert. Dort fällt das Material auf einen Bohrguttrichter, der es auf ein Förderband übergibt. Das Förderband befindet sich meist in der Mittelachse der Maschine. Bei hydraulischen Antriebsmotoren befinden sich die Elektromotoren zum Antreiben der Hydraulikpumpen auf dem Nachläufer. Die Anpresskraft für den Bohrkopf wird durch ein Grippersystem zur Verfügung gestellt. Das Grippersystem, bestehend aus Verspannpratzen und Vorschubzylindern, kann in zwei prinzipielle Systeme unterschieden werden:

- System mit einer horizontalen Gripperebene und geneigten Vorschubzylindern, die mit der Innenkelly verbunden sind. Die Gripperplatten befinden sich an der Außenkelly.
- System mit zwei Gripperebenen und horizontaler oder x-förmiger Gripperanordnung. Die Vorschubzylinder sind in Längsrichtung der TBM mit der Innen- und Außenkelly als Reaktionssystem verbunden.

Die Vorteile der beschriebenen Systeme beim Einsatz in schwierigem und instabilem Fels sind folgende:

- Das Ein-Ebenen-Grippersystem (**Bild 2**) hat einen größeren Abstand zwischen Bohrkopf-Staubwand und Gripperebene und bietet somit mehr Platz zum Einbau der temporären Felsicherung. Dies ist ein besonderer Vorteil beim Vortrieb in schwierigem, brüchigem Fels. Die Länge solcher Freiräume entspricht ungefähr einem Schilddurchmesser. In diesem Bereich sind die Bogenmontage- und Erektoreinheit sowie ein oder zwei Bohrlafetten auf Rotations- und Längsverschiebeinheiten montiert. Diese ermöglichen die In-

stallation der Stahlbögen und Felsanker während des Bohrvortriebs. Der Schildmantel erstreckt sich normalerweise bis hinter die Staubwand und ist im hinteren Bereich geschlitzt. Diese Art der Konstruktion erlaubt die sofortige Installation der Felsanker im Schutz des geschlitzten Dachschildes. Die Bohrgeräte sind mit FOPS-Kabinen (Falling Objects Protective Structure) zum Schutz der Bediener ausgerüstet. Theoretisch ist jedoch der Ein-Ebenen-Gripper in horizontal geschichtetem Fels mit unterschiedlichen Festigkeiten schwieriger zu steuern.

- Das Zwei-Ebenen-Grippersystem (Bild 1) bietet auf einer Länge von ungefähr einem halben Schilddurchmesser Raum zwischen Bohrkopf-Staubwand und Gripperebene zum Einbau der oben erwähnten temporären Felssicherung. Die Installationen können dieselben sein wie beim Ein-Ebenen-Grippersystem. Allerdings kann die Vortriebsgeschwindigkeit und somit der Bohrfortschritt in schwierigem, brüchigem Fels wegen des verringerten Platzes für die sofortige temporäre Felssicherung begrenzt sein. Im Gegensatz zur Ein-Gripper-TBM ist jedoch die Steuerfähigkeit der Maschine im horizontal geschichteten Fels ausgezeichnet. Bei Felsbedingungen mit vertikalen, sich abwechselnden harten und weichen Schichten bieten die zwei Gripperflächen mehr Flexibilität, um ausreichend Greifkraft für genügend Schub zur Verfügung zu stellen.

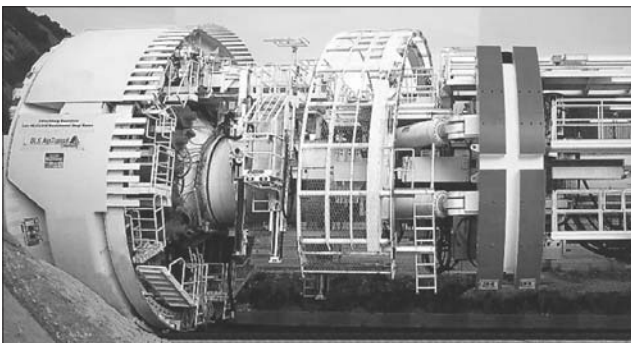


Bild 2. Gripper-TBM (Herrenknecht) - eine Verspannebene
Fig. 2. Gripper-TBM - one gripping plane

Die sekundären Aggregate und Einrichtungen dienen zum Einbau der Sofortsicherungsmaßnahmen hinter der Ortsbrust bzw. dem Staubschild der TBM sowie zum Vorsondieren des Gebirges. Zum Einbau der ersten Schutzsicherungen gehören:

- Versetzen von Ausbaubögen direkt hinter dem Bohrkopfmantel
- Kopfschutz im Firstbereich mit Netzen und Ankern

Neben den mechanischen und hydraulischen Einbauhilfen sind Materialfördereinrichtungen zum Fördern der Ausbaubögen vom Zwischenlager auf dem hinteren Teil der TBM zum Einbauort erforderlich. Zur Sondierung und Injektion der Ortsbrust ist eine mobile Bohrlafette am Umfang der Außenkelly angebracht. Diese Bohrlafette lässt sich radial über einen Kreisschlitten an jeder gewünschten Stelle des Tunnelumfangs für eine vorauseilende Bohrung positionieren. In sehr zerklüftetem und gebrächem Gebirge können mit diesen Bohr- und Injektionsgeräten vorauseilende Injektionsschirme hergestellt werden, um Niederbrüche hinter der Maschine zu verhindern. Diese Einrichtungen eignen sich meist nur zum Sichern kleinerer Störzonenbereiche, da

die entsprechenden Sondermaßnahmen sehr zeitaufwendig sind. Der systematische Sicherungseinbau erfolgt ca. 15 m hinter der Maschine, mechanisiert auf einem Nachläufer, jedoch mit konventionellen Methoden wie Bögen, Spritzbeton und Anker. Sind umfangreiche Störzonenbereiche, in denen Nachbrüche erwartet werden, zu durchfahren, ist möglicherweise eine Schild-TBM mit Tübbingauskleidung besser geeignet.

Die Sohlütbänge - falls verwendet - werden mittels hydraulisch angetriebenem Transport- und Hebegerät auf der Ausbaubühne des Nachläufers zwischengelagert (diskontinuierliche Versorgung) und je nach Vortriebsfortschritt verlegt. Zum Einbau werden die Sohlütbänge über eine hydraulische Hebe- und Transporteinrichtung zur Übergabe an den Erektor, der sich an der Unterseite der Außenkelly befindet, bewegt. Diese Übergabe erfolgt unter dem hinteren Teil der Außenkelly. Der Erektor ist mit einem Zentrierstift und Vakuumsaugplatten ausgerüstet, um den Sohlütbänge zu übernehmen und zu verlegen. Dieser Sohlütbänge dient meist dem Nachläufer als Gleisfahrbahn.

Beim Ausbruchvorgang an der Ortsbrust entsteht kleinstückiges Material unter entsprechender Staubeentwicklung. Daher sind aus arbeits- und sicherheitstechnischen Gründen Vorrichtungen erforderlich, welche die Staubeentwicklung einschränken, den Staub absaugen und vor der Vermischung mit der Atemluft entfernen. Folgende Möglichkeiten bestehen hierfür:

- Staubschild hinter dem Bohrkopf und Staubabsaugung am Bohrkopf mit Entstaubung auf dem Nachläufer oder
- Besprühen der Ortsbrust im Bohrkopfbereich mit Wasser (Vorsicht bei wasserempfindlichem Gestein!).

Die Entstaubungslutte befindet sich auf der Maschine. Sie saugt den Staub aus dem Bohrkopfmantel ab und fördert ihn zur Entstaubungsanlage. Diese befindet sich meist auf dem Nachläufer.

3.1 Bohrkopf

Im Felsbau verwendet man meist geschlossene Felsbohrköpfe, bestückt mit Disken und Räumschlitzern. Der Bohrkopf dient als Abbauwerkzeughalter. Er ist meist an der Frontseite zur Ortsbrust schwach konisch ausgebildet und besteht im Wesentlichen aus der geschlossenen Grundkonstruktion. Um dem Bohrkopf eine ausreichende Steifigkeit zu geben, ohne große Materialstärken zu verwenden, die zu Eigenspannungen und damit zu Rissbildungen neigen, besteht er meist aus einem kegelstumpfförmigen Element, das im Inneren mit radialförmig angeordneten Leitblechen (Scheiben) versteift ist. Diese Leitbleche bilden kegelförmige Kammern im Bohrkopf, in die das gelöste Material über radialförmig am Bohrkopf angeordnete Räumschlitzte mittels Kratzern (Schöpfwerke) zugeführt wird. Sie zwangsfördern das Material in das Zentrum des mittelfrei gelagerten Bohrkopfes. Dort wird es in den Aufgabetrichter des Förderbandes der Maschine übergeben. Die Räumschlitzte (**Bild 3**) der Kratzwerke sollten möglichst weit in die Mitte geführt werden. Dadurch wird verhindert, dass das gelöste Material über die ganze Ortsbrust an allen Disken vorbei rutschen muss. Werden die Räumschlitzte nur an den Rändern angeordnet, sinkt die Schneidleistung, da das gelöste Material über die Schneidspuren rieselt und dadurch die Penetration der Disken durch Bildung eines Polsters behindert.

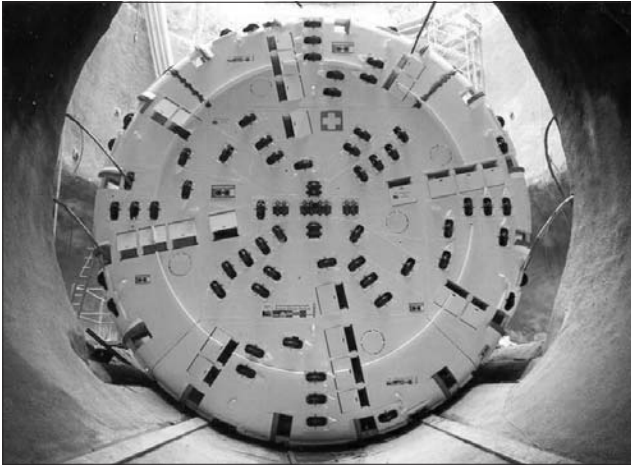


Bild 3. Bohrkopf mit Räumschlitzen (Herrenknecht)
Fig. 3. Cutter Head with scraper slots

In der Grundkonstruktion der Bohrkopffrontplatte sind die Schneidrollenhalter eingelassen. Die Disken bzw. Schneidrollen sind auf Böcken bzw. Schneidrollenhaltern gelagert, die auf der Rückseite der Bohrkopffrontplatte befestigt sind. Die Schneidrollenhalter sollten so konstruiert sein, dass die Disken von vorne und hinten ausgewechselt werden können. Das Auswechseln der Disken erfolgt zum Teil mit hydraulischen Werkzeugen und Kettenzügen, was allfällige Reparaturen vereinfacht und die Wartungszeiten verkürzt. Der freie Abstand zwischen Ortsbrust und Bohrkopf wird durch den Einbau der Schneidrollenhalter auf der Rückseite der Bohrkopfplatte auf ein Minimum reduziert. Dadurch wird die Beanspruchung der Disken und Werkzeughalter verringert. Die Gefahr, dass hereinbrechende Gesteinsbrocken den Bohrkopf blockieren oder die Schneidrollenhalter abreißen, wird weitgehend eliminiert. Die Bohrkopflagerung wird fast ausschließlich durch maschinenbautechnische Gesichtspunkte bestimmt. Es werden meist folgende Lagerungs- und Antriebsarten verwendet:

- Zentralwellenlagerung
- Umfangslagerung
- mittelfreie Kompaktlagerung

Bei Gripper-TBM mit einem Durchmesser > 4 m wird in der Regel die mittelfreie Kompaktlagerung verwendet. Diese hat den Vorteil, dass die Schutterung mittels Förderband in der Mitte des Bohrkopfes angeordnet werden kann und somit das Ausbruchmaterial durch den Bohrkopf zwangszugeführt wird. Ferner erfolgt hier die Durchführung von Leitungen mittels Drehdurchführung; auch der Einstieg ins Bohrkopfinnere befindet sich hier.

Der Einstieg erfolgt meist durch eine Luke an der Unterseite der Innenkelly, was das Zurückziehen des Maschinenförderbandes erfordert. Mannlöcher Ø 60 cm an der Rückseite der Staubwand dienen als weitere Möglichkeit zum Einstieg ins Bohrkopfinnere. In der Frontplatte des Bohrkopfes befinden sich zusätzliche Mannlöcher zum Durchstieg an die Ortsbrust. Weiterhin gestatten die Schneidrollenhalter zusätzlichen Zugang zur Ortsbrust. Ferner hat man durch das mittelfreie Hauptlager genügend Platz, um die Multi-Hydraulikmotoren oder E-Frequenzumwandlungsmotoren am Umfang anzuordnen, so dass das notwendige Arbeitsmoment auf den Bohrkopfantriebskranz aufgebracht werden kann. Die E-Motoren werden - im Gegensatz zu den Hydraulikmotoren - meist nicht direkt am Hauptlager angebracht, sondern am hinteren Ende der Innenkelly angeordnet. Das Antriebsmoment wird mit einer Kellystange zum Hauptlager übertragen. Die Torsionssteifigkeit der Antriebsstange gibt dem Motor eine gewisse Elastizität in Bezug auf schlagartig erhöhte Bohrkopfwiderstände.

3.2 Bohrkopfantrieb und Hauptlager

Um einen schonenden Betrieb und eine optimale Anpassung an die Gebirgseigenschaften zu ermöglichen, ist es wichtig, dass der Bohrkopf weich angefahren und vibrationsarm betrieben werden kann. Aus diesen Gründen sind die TBM meist mit stufenlos regelbarem Hydraulikantrieb oder E-Frequenzumwandlungsantrieb ausgerüstet. Der Antrieb sollte durch manuelles Umschalten auf Bypassbetrieb gewechselt werden können und so konzipiert sein, dass ein kurzzeitiges Losbrech-Drehmoment vom 1,5- bis 2fachen Nenndrehmoment zur Verfügung steht. Die Antriebssteuerung muss so ausgelegt sein, dass die Maschinenteile nicht überlastet werden. Für Wartungsarbeiten sollte der Antrieb für Rechts- und Linksdrehen ausgelegt und der Bohrkopf mit einer Feststellbremse ausgerüstet sein. Zum Antrieb des Bohrkopfes bestehen folgende Möglichkeiten:

- elektrischer Antrieb mit Reibungskupplung; meist zwei verschiedene Drehzahlen
- elektrischer Antrieb frequenzgesteuert; variable Drehzahl
- hydraulischer Antrieb; variable Drehzahl
- elektrischer Antrieb mit Hilfshydraulikantrieb für ein hohes Losbrechmoment

Der elektrische Antrieb ist meist mit zwei Geschwindigkeitsstufen ausgerüstet. Dadurch sind die Motoren wenig flexibel. Das beim Anfahren notwendige Losbrechmoment ist ca. 1,5-mal so hoch wie das Betriebs- bzw. Antriebsmoment. Dieses Losbrechmoment ist jedoch zeitlich limitiert. Es wird erreicht, indem alle Motoren hochgefahren werden und dann die Kuppelung eingeworfen wird. Der festsitzende Bohrkopf bricht los und beginnt sich zu drehen, oder die Rutschkuppelung entlastet den Motor. Der Wirkungsgrad des E-Motors liegt bei ca. 95 %.

Die Elektromotoren mit frequenzgesteuerten Umrichtern arbeiten hingegen sehr variabel. Mit ihnen kann man ein zeitlich begrenztes Losbrechmoment von ca. 1,7fachem Antriebsmoment erreichen. Das Losbrechmoment wird durch einen Hitzeschalter geregelt, um Schäden am Motor zu verhindern und die Beanspruchung der Werkzeughalter zu begrenzen. Zum Losbrechen werden die frequenzgesteuerten Motoren aus dem Stand mit voller Kraft angefahren. Der Wirkungsgrad liegt bei ca. 90 %.

Die Hydraulikmotoren werden wegen ihrer Einfachheit und Robustheit sehr oft eingesetzt. Mit ihnen lassen sich sehr hohe Losbrechmomente erzielen, die zwischen dem 2- bis 2,5fachen des Antriebsmomentes bei der nominalen Drehzahl liegen. Bei geringeren Drehzahlen kann das Antriebsmoment auf das 1,5- bis 1,8fache des Antriebsmomentes bei der nominalen Drehzahl gesteigert werden. Der Wirkungsgrad liegt allerdings nur bei 75 %.

Beim normalen elektrischen Antrieb mit zwei Geschwindigkeitsstufen kann das Losbrechmoment durch einen kleinen hydraulischen Hilfsmotor mit sehr kleiner Umdrehungszahl auf das 1,8- bis 2,2fache des Antriebsmomentes gesteigert werden.

Der Vorteil der Elektromotoren liegt in ihrer hohen Energieausnutzung. Dies macht sich bei dem sehr hohen Energieverbrauch der TBM über die Nutzungszeit stark bemerkbar. Der Neupreis von Elektromotoren ist heute nicht mehr wesentlich höher als der Preis von Hydraulikmotoren. Die Instandhaltung von Elektromotoren kann nur durch qualifiziertes Personal erfolgen. Besonders anspruchsvoll sind frequenzgesteuerte Elektromotoren. Hydraulikmotoren dagegen sind sehr robust und pflegeleicht. Zudem kann ein sehr hohes Losbrechmoment erreicht werden. Bei Instandsetzungsarbeiten sind meist nur Schläuche oder Dichtungen zu ersetzen; dies kann einfach durch einen Me-

chaniker erfolgen. Durch den geringen Wirkungsgrad entsteht in der Umgebung der Pumpen und Motoren relativ viel Wärme im Tunnel. Dadurch sind die Energiekosten höher als bei E-Motoren gleicher Nutzleistung.

Bei Maschinen mit sehr großem Durchmesser ist eine variable Umdrehungsgeschwindigkeit aus folgenden Gründen von Vorteil:

- bestmögliche Anpassung an verschiedene Gesteins- und Gebirgsbedingungen durch veränderte Drehzahl
- Möglichkeiten zur Kontrolle der Losbrechmomente und Maschinenvibrationen

Diese Bedingungen werden durch frequenzgesteuerte elektrische sowie hydraulische Antriebe erfüllt. Die Vorschubgeschwindigkeit und der Anpressdruck des Bohrkopfes sollten zudem stufenlos regelbar sein, um, in Verbindung mit dem optimalen Arbeitsantriebsmoment, den effizientesten Gesteinslösevorgang unter den jeweils an der Ortsbrust gegebenen Gebirgsbedingungen einstellen zu können. Unter dem effizientesten Gesteinslösevorgang versteht man den wirtschaftlichsten Bohrfortschritt unter optimaler Ausnutzung der Bohrwerkzeuge. Der Bohrkopf bewegt sich während des Abbaus gleichmäßig drehend.

Um die Tunnelbohrmaschinen für eine gewisse Durchmesserbandbreite einsatzfähig zu konstruieren, besteht der Bohrkopf meist aus einem runden oder quadratischen Kern. Um diesen werden projektbezogen äußere Segmente angeordnet. Bei einer Durchmessermodifikation müssen neben den äußeren Bohrkopfsegmenten nur der Schildmantel und der Staubschild angepasst werden. Die Antriebs-, Abstütz- und Vortriebsaggregate müssen dabei auf den maximal möglichen Durchmesser ausgelegt sein.

Das Hauptlager der TBM besteht meist aus einem Hochleistungs-Achsal-Radial-Rollenlager zur Aufnahme der hohen Bohrkopfbelastung. Eine Mehrfachlippendichtung mit Sperrfett schützt den Ölraum auf der vorderen Innen- und Außenseite des Lagers. Aus jedem dieser Räume wird das Öl separat abgesaugt und zu Druckfiltern gefördert, die mit Tauchmagneten ausgerüstet sind. Das Öl wird mittels Wärmetauscher gekühlt. Über mehrere Leitungen wird das gereinigte und thermisch kontrollierte Öl am Umfang des Hauptlagers unter Druck wieder zugeführt (Zwangsolversorgung). Eine Verriegelung zwischen Schmierung und Bohrkopftrieb soll Trockenbetrieb ausschließen.

3.3 Bohrkopfmantel

Der Bohrkopfmantel umgibt den sich drehenden Bohrkopf im Kratzwerkbereich. Dieser Mantel dient zum Schutz des Bohrkopfes gegen hereinbrechendes Gebirge und verhindert somit ein Verklemmen. Auf der Rückseite ist er mit dem Staubschild verbunden. Der Bohrkopfmantel wird oft zur Führung der Einbauhilfen für die Einbaubögen genutzt oder dient als Träger eines geschlitzten Kopfschutzschildes hinter der Staubwand. Der Bohrkopfmantelfuß wird auch als vordere TBM-Abstützung während des Umsetzens der Maschinenverspannung und als zusätzliche Bohrkopfabstützung während des Bohrens benutzt. Durch diese zusätzliche Lagerung der Maschine lassen sich auch die Maschinenvibrationen reduzieren. Der Bohrkopfmantel setzt sich aus Kegelblechen und Rippen zusammen und besitzt eine keilförmige Schneide. Diese dient gleichzeitig zur Sohlreinigung (Bohrgutschieber).

Falls die Gebirgsverhältnisse es erfordern (druckhaftes Gebirge), besteht der Bohrkopfmantel aus einzelnen Segmenten und orthogonal angeordneten Hydraulikzylindern. Dadurch kann der Außendurchmesser verstellt werden. Der Hub in radialer Richtung beträgt gegenüber dem Nenndurchmesser zwischen 50 und 100 mm. Dies soll si-

cherstellen, dass die Maschine bei echtem Gebirgs- bzw. Quelldruck nicht stecken bleibt und wieder freigegeben werden kann.

3.4 Innen- / Außenkelly mit Verspann- und Vorschubeinrichtung

Die Innenkelly ist mit dem Bohrkopfmantel in Längsrichtung biegesteif verbunden. Die Lagerung der Innenkelly in Längsrichtung ist in der Bohrphase wie folgt:

- Ein-Ebenen-Grippersystem: eingespannter Kragarm, der noch zusätzlich am Bohrkopfmantel abgestützt ist
- Zwei-Ebenen-Grippersystem: eingespannte Zweipunktlagerung, die noch zusätzlich am Bohrkopfmantel abgestützt ist

In der Umsetzphase sind beide Systeme statisch bestimmt gelagert, auf dem Bohrkopfmantel und der hinteren Abstützung.

Die Innenkelly besteht aus einer Rohr- oder Kastenkonstruktion, die auf Gleitbahnen in der Außenkelly gelagert ist. Die Innenkelly bildet den zentralen Führungskörper der Gripper-TBM. Die Vorschubkräfte werden von der Außenkelly über die Vorschubzylinder auf die Innenkelly übertragen. Der vordere Innenkellybereich hinter dem Staubschild wird außen möglichst von primären Elementen freigehalten, damit dieser Raum für Zusatzeinrichtungen genutzt werden kann, z.B. für ein Versetzgerät zum Einbau von Ausbaubögen. Der hintere Innenkellybereich ist mit der hinteren TBM-Abstützung ausgerüstet. Im Inneren der Innenkelly befindet sich bei den meisten Geräten das Förderband mit hydraulischem oder elektrischem Antrieb. Das Band ist zu Reparaturzwecken als Ganzes herausziehbar. Es übernimmt im Bohrkopf das Abbaumaterial vom Bohrguttrichter und gibt es an die Bandanlage des Nachläufers weiter. Für Reinigungszwecke ist bei der Förderung von Abbaumaterial durch die Innenkelly ein Gummizuggurt erforderlich, der ein- und ausgezogen werden kann.

Gripper-TBM mit einer Verspannebene sind mit einer Außenkelly und Maschinen mit zwei Verspannebenen sind mit zwei Außenkellies ausgerüstet.

Die Außenkelly - ein oder zwei, je nach Anzahl der Verspannebenen - besteht aus einer kurzen Rohr- oder Kastenkonstruktion, die die Innenkelly umspannt. Die Außenkelly wird auf der Innenkelly entlang der Hublänge der Vorschubzylinder auf Gleitflächen geführt. An der Außenkelly befindet sich biegesteif angeschlossen die Abstütz- und Verspanneinrichtung der Gripper. Die Abstützfüße bestehen aus Teleskopbeinen und Abstützfüßen (Verspannplatten), die je Seite mit zwei hydraulischen Verspannzylindern ausgerüstet sind, um den notwendigen Verspanndruck zu erzeugen.

Bei engen Bogenabständen müssen die Verspannplatten in zwei separate Füße unterteilt werden, deren Abstand größer als eine Ausbaubogenbreite ist. Es ist sicher zu stellen, dass die Verspannung nicht auf dem Bogen aufsitzt und diesen zerstört. Eine Verspanneinheit besteht aus folgenden Elementen:

- Spanschild (Gripper, Pratze)
- meistens zwei Verspannzylindern
- Teleskop-Führungsstück zur Aufnahme und Übertragung der Querkraft aus dem Drehmoment und der Vorschubkraft

Die Verspannung der TBM kann in Längsrichtung in einer oder in zwei Ebenen erfolgen. In Querschnittsebene erfolgt die Verspannung horizontal oder x-förmig.

Zur sicheren Einleitung der hohen Vorschubkräfte in die ein- bzw. zweiteilige Außenkellykonstruktion und zwecks kompakter Bauweise gliedert sich die Vorschubeinrichtung meist in zwei Druckzylindergruppen. Beim Ein-Ebenen-Grippersystem sind die Vorschubpressen zwischen Innen- und Außenkelly je Seite diagonal angeordnet. Die

Gripper der Außenkelly und die Innenkelly dienen als Widerlager für die Vorschubzylinder. Beim Zwei-Ebenen-Grippersystem sind je Außenkelly die Vorschubpressen in Längsrichtung zwischen Innen- und Außenkelly befestigt. An den Vorschubzylindern erfolgt die Bohrhubwegmessung. Bei zwei getrennten Außenkellies können, bei lokal begrenzten Störungen der Gebirgsverhältnisse mit geringer Festigkeit, die Einzelkellies mit den zugehörigen Verspann- und Vorschubzylindern getrennt gefahren werden. Nach dem Ende eines Bohrhubs und Absetzen des Geräts auf die vordere und hintere Abstützung erfolgt das Zurückfahren der Vorschubzylinder in die Ausgangslage. Der hintere Innenkellybereich wird von einem Rahmen umgeben, der während der Umsetzphase über hydraulische Stempel auf dem Tunnelsohlbereich abgestützt wird. In dieser Umsetzphase steht die Innenkelly auf den Vertikalzylindern des Rahmens. Bei gelöster Verspannung kann das TBM-Heck über diese Zylinder gehoben und gesenkt werden. Das seitliche Verschieben des TBM-Hecks erfolgt mittels Horizontalzylindern. Diese Bewegungen sind für die Richtungsbestimmung des nächsten Bohrhubs notwendig.

3.5 Mechanische Hilfseinrichtung

Die gesamte Maschinenoberseite sowie der untere Bereich, der von der Sohle aus nicht mehr erreichbar ist, sollte durch Bühnen zugänglich sein. Der Zugang erfolgt über Steigleitern. Die Stehhöhe im Hauptarbeitsbereich sollte 1,80 m nicht unterschreiten. Das Setzen von Firstbögen und Netzen als Kopfschutz bei nachbrüchigem Gebirge und von umlaufenden Ausbaubögen erfolgt in gebräuchtem Gebirge direkt hinter dem Bohrkopf auf der oberen Arbeitsbühne im vorderen Innenkellybereich. Zu diesem Zweck befindet sich auf der Innenkelly ein aufgeschweißter Grundrahmen, der als Führungsbahn für das hydraulisch bewegliche Bogenversetzgerät dient. Die Bogenversetzvorrichtung besteht aus:

- einem Speicherkarussell mit hydraulischem Antrieb für die Vormontage und
 - einer längsverschiebbaren Arbeitsbühne mit integrierten Stahlbogenhub- und Stahlbogenspreizzylindern, die während des Bohrvorgangs relativ zum Tunnel stehen bleibt, um die Bögen zu versetzen.
- Die Ausbaubögen werden in mehrere Segmente unterteilt (ca. 3 – 7 pro Bogen). Diese werden als Bündel mit dem Transportsystem der TBM auf der Kellyoberseite zum Einbauort transportiert. Nacheinander werden die Segmente in das Speicherkarussell eingeführt und untereinander bis auf den Stoß im Sohlbereich verschraubt. Nach dem Drehen des Speicherkarussells in die richtige Position übernimmt die Arbeitsbühne mit zwei Hub- und zwei Spreizzylindern den vormontierten Ring und fährt ihn längs auf der Innenkelly in die Setzposition. Dann erfolgen das Spreizen und Schließen des Bogens durch Verschrauben mit einer Lasche mit Langlöchern oder mittels Reibungsstoßverbindung.

Zum Setzen von Ankern (ca. 3,0 – 4,5 m Länge) am Tunnelumfang und zum Befestigen von Ausbau- und Kopfschutzbögen mittels Firstbogennägeln wird ein hydraulisches Ankerbohrgerät eingesetzt. Dieses befindet sich auf einer Lafette mit Schwenkeinrichtung. Diese wiederum ist auf einem kreisrunden Grundrahmen aufgesetzt, der mittels eines längsverschiebbaren Schlittens auf der Innenkelly befestigt ist. Das Zusammenwirken der Hebevorrichtung für die Ausbau- und Kopfschutzbögen mit der Ankerbohrereinrichtung ermöglicht ein schnelles und effizientes Setzen und Vernageln dieser Sicherungselemente direkt hinter dem Staubschild. Bei Verwendung eines geschlitzten Kopfschutzschildes hinter der Staubwand können die Anker im Schutz dieses Kopfschutzschildes im Bereich der Schlitze ge-

setzt werden. Dies erhöht die Arbeitssicherheit.

Meist wird ein separates Sondierbohrgerät für Bohrungen \varnothing 50 - 80 mm und Bohrlängen von 30 - 50 m vorgehalten. Die Bohrungen erfolgen meist im 120° -Firstbereich bei stehender TBM. Dieses Gerät kann auch für vorausseilende Stabilisierungsschirminjektionen verwendet werden. Diese Sondierbohrungen können während der Unterhaltsschicht durchgeführt werden, um die Vortriebsleistung nicht zu reduzieren.

Zum Säubern der Sohle im Bohrkopfbereich dient der Bohrkopfmantel als Materialschieber. Zur Entsorgung von kleinstückigem Material aus Firstniederbrüchen oder Spritzbetonrückprall ist meist im Sohlbereich ein Minibagger mit allseitig hydraulisch drehbarer Schaufel erforderlich, der das Material in einen Materialkübel oder auf ein zusätzliches Band gibt, das auf das Nachläuferband entleert wird. Bei Stollen und Tunnel, die mit einem Sohlflüßband ausgerüstet werden, kann dieser oft mittels Versetzeinrichtung unterhalb der TBM vor dem Nachläufer verlegt werden.

3.6 Arbeits- und Unterhaltszyklen einer Gripper-TBM

Die Arbeits- und Unterhaltszyklen im TBM-Betrieb sind diskontinuierlich wie folgt:

- repetitiver Arbeitszyklus: Bohren, Schreiten (Umsetzen und Verspannen) usw.

- repetitiver Unterhaltszyklus: Wartung und Diskenwechsel

Gripper-TBM arbeiten im zyklischen Wechsel von Bohren, Sichern und Umsetzen. Zum Umsetzen der Maschine nach einem Bohrvorgang wird die Innenkelly auf der vorderen und hinteren Abstützung abgesetzt. Im Anschluss daran wird die Verspannung der Außenkelly gelöst. Mit den hinteren Zylindern der Abstützung kann die Maschinenachse entsprechend der erforderlichen Bohrrichtung ausgerichtet werden.

Es werden periodisch Revisions- und Unterhaltsarbeiten durchgeführt. Um den Vortrieb nicht zu stören, werden diese Arbeiten einmal täglich bzw. wöchentlich zusammengefasst und möglichst in der geplanten Stillstandszeit durchgeführt. Diese Arbeiten werden zeitlich getrennt von der Arbeitszeit der Vortriebssequipe durchgeführt. Dadurch werden die Equipen für den Vortrieb und die Wartung wirtschaftlich optimal eingesetzt. Die tägliche bzw. wöchentliche Inspektion und Wartung ist ganz entscheidend für eine hohe Betriebsbereitschaft der Maschine. Diese gilt generell für alle Maschinen, die im Untertagebau eingesetzt werden.

3.7 Steuerung

Grundsätzlich muss bei den Gripper-TBM zwischen den folgenden zwei Verspann- und Steuersystemen unterschieden werden:

- Zwei-Ebenen-Grippersystem: Geführt wird die Innenkelly von den beiden Außenkellies, welche von je zwei Verspannebenen abgestützt werden.

- Ein-Ebenen-Grippersystem: Geführt wird die Innenkelly durch die Außenkelly, die als vertikal angeordnete Verspannebene dient.

Die Lagesteuerung von Tunnelvortriebsmaschinen mittels einer Verspannebene erfolgt über die Hydraulikzylinder der Pratten (Gripper). Dieser Maschinentyp ist während des Bohrvorgangs wie ein statisch bestimmter Kragarm gelagert. Daher ist eine Steuerung während des Bohrvorgangs bis zu einer maschinenbautechnisch abhängigen Größe ohne Zwängungen über die schräg angeordneten Vorschubpressen möglich. Der Nachteil einer TBM mit einer Verspannebene liegt in der möglichen Lageveränderung aus der Sollspur beim Ein-

schneiden von horizontal geschichtetem Gestein unterschiedlicher Festigkeit. Durch Rutschungen in der Verspannebene, bedingt durch eine am Bohrkopf exzentrisch wirkende Anpresskraft, kann es zum Absacken oder Hochfahren der TBM kommen. Zudem müssen die Vorschubkräfte über nur zwei Pratzen durch Vorspannung in das Gebirge eingebracht werden. Dies führt zu sehr großen Pratzen oder hohen lokalen Druckspannungen unter den Pratzen. Ferner ist es schwieriger, lokale Störzonen mit geringer Festigkeit mit nur einer Verspannebene zu überbrücken. Bei einer mit zwei Verspannebenen ausgerüsteten TBM ergibt sich dieses Problem weniger. Systeme mit einer krugarmähnlichen Lagerung neigen im Regelfall auch stärker zu Eigenschwingungen.

Die Steuerung der Gripper-TBM mit zwei Verspannebenen erfolgt meist über die hintere Abstützvorrichtung nach dem Umsetzvorgang und vor dem Verspannen der Pratzen, oder über die Pratzen selbst. Während des Vortriebs ist die Maschine wie ein Stab mit zwei Einspannebenen gelagert und verhält sich daher während des Vorschubs sehr lagegenau. Daher sind diese Maschinen in inhomogenem Gebirge besonders geeignet. Die Steuerung der Maschine entlang der Vortriebsspur erfolgt polygonal.

Während des gesamten Vortriebs ist eine „real time“-Aufzeichnung der Ist- zur Soll-Position notwendig, um nach jedem Bohrhub möglichst sofort Korrekturen durchzuführen. Die Position und Richtung der TBM ist bestimmt durch:

- x-, y-, und z-Koordinate des Bohrkopfes im Raum
- φ_x -, φ_y -, φ_z -Winkel (Nick-, Roll- und Gierwinkel)

Der Lenkvorgang erfolgt durch Änderungen des Nick- und des Gierwinkels. Dies wird erreicht, indem die Innenkelly um den Bohrkopfmittelpunkt gedreht wird, und zwar durch Veränderungen in den Pratzenachsen 1 und 2, durch Δx_1 und Δx_2 , bzw. Δy_1 und Δy_2 . Die Gradienten sowie die Trassierungskurve werden in Polygonform nachgefahren. Die Länge der einzelnen Polygonabschnitte richtet sich nach den im Projekt definierten Profilabweichungen. Je nach Länge des Staubschildmantels um den Bohrkopf sind diese Maschinen unterschiedlich träge in der Steuerung. Eine permanente Lageüberwachung ist erforderlich, um frühzeitig Steuerkorrekturen durchzuführen. Die heutigen Maschinen werden hinsichtlich ihrer Lage mittels Lasergeräten und CCD-Kameras überwacht. Die Überwachung kann wie folgt durchgeführt werden:

- koordinatenmäßige Position mittels automatischen Lasertheodoliten
- Nick- und Rollwinkel mittels Inklinometern (Erdlotabweichungen)
- Gierwinkel mittels Laserstrahl durch zwei hintereinander liegende Zieltafeln oder durch Kreiselgeräte

Diese Daten werden elektronisch erfasst und zum Steuercomputer in der Steuerkabine übertragen. Befindet sich die Maschine innerhalb eines vorher definierten Toleranzbereichs, muss die Steuerung nicht unbedingt durchgeführt werden. Wird dieser Bereich überschritten, wird meist ein optisches und akustisches Signal abgegeben, um die Gegensteuerung manuell einzuleiten. Bei einem teilroboterisierten System errechnet der Computer die optimale polygonartige Korrektur sowie den Punkt der Gegensteuerung. In der Steuerkabine werden alle maschinentechnisch relevanten Daten nach Kreisläufen kontrolliert. Zu diesen gehören Pressenwege, Hydraulikdruck, Anpressdruck, Umdrehungsgeschwindigkeit etc. Die einzelnen Kontrollbereiche sind gegen obere und untere Grenzen abgesichert, um Überbelastungen zu vermeiden. Die abhängigen Kreisläufe müssen nach Materialmengenflüssen kontrolliert werden, um die Lokalität von Betriebsstörungen im System zu erkennen.

Die TBM gehören zu den am weitestgehend automatisierten Gesamtgerätekomponten im Bauwesen. Bei den teilroboterisierten Maschinen wird über einen Steuercomputer nicht nur die geometrische Lage der Maschine bestimmt, auch werden die Pressen automatisch beim nächsten Schreitvorgang zur Sollachse hin gesteuert. Zudem werden die Leistungen der Abbau- und Schutteraggregate automatisch programmgesteuert und aufeinander abgestimmt. Es ist zur Aufrechterhaltung der Produktionssicherheit bei roboterisierten Systemen immer notwendig, auch eine manuelle Steuerung ohne Computerunterstützung durchführen zu können.

4 Aufweitungs-TBM

Eine weitere technische Alternative bildet das Aufweitungs-TBM-System. Dieses System besteht aus den folgenden zwei separaten Geräten:

- einer Pilot-Gripper-TBM
- einer Aufweitungs-TBM

Diese beiden Geräte werden zeitlich unabhängig voneinander eingesetzt. Mit der Pilot-Gripper-TBM wird zuerst ein Pilotstollen über die gesamte Länge des Tunnels aufgeföhren. Erst danach kann die Aufweitungs-TBM eingesetzt werden. Diese Aufweitungsmaschine ist mit einem vorlaufenden Grippersystem ausgerüstet, das sich mit den Gripperplatten in dem vorgängig erstellten Pilotstollen abstützt. An der Aufweitungs-TBM wird, wie bei den anderen TBM auch, das Nachläufersystem angehängt.

Die Aufweitungs-TBM (**Bild 4**) ergänzt in technischer und wirtschaftlicher Hinsicht den Einsatzbereich der Vollschnittmaschinen. Sie eignet sich besonders in Gebirgsverhältnissen, in denen durch Sondierstollen besondere Risikofaktoren erfasst werden sollen.

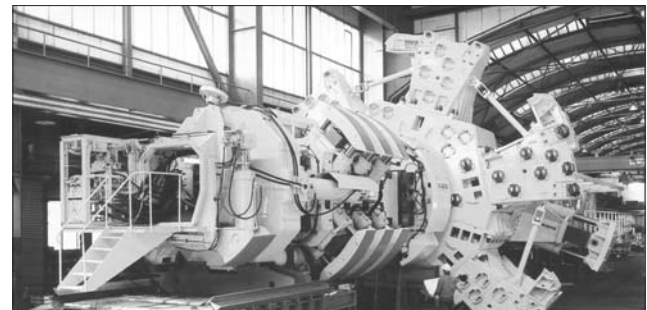


Bild 4. Aufweitungs-TBM (Wirth)
Fig. 4. Enlargement - TBM

Zuerst wird in der Phase I der Pilotstollen mit der Pilot-TBM mit einem Durchmesser von 3,5 bis 4,5 m aufgeföhren. Nach der Fertigstellung des Pilotstollens erfolgt in Phase II die Erweiterung durch die Aufweitungs-TBM. Die Aufweitungsbohrmaschine wird meist mit einem Speichenrad ausgerüstet. Aufgrund der günstigen Platzverhältnisse auf den Bohrramen des Speichenrades können sogar mehrere Disken pro Schneidspur hintereinander angebracht werden. Dies ist bei Vollquerschnitts-Bohrköpfen der Gripper- und Schild-TBM im Zentrumsbereich nicht möglich, denn eine Doppelbesetzung zur Erhöhung der Schneidleistung pro Umdrehung des Bohrkopfes muss auf allen Diskenspuren erfolgen, um wirksam zu sein. Dies lässt sich bei der Aufweitungs-TBM jedoch realisieren, da die Bohrrame bei einem Durchmesser von ca. 3,5 - 4,5 m beginnen. Die Bohrgeschwindigkeit der Pilot-TBM kann aufgrund des relativ geringen Durchmessers bei maximal 12 Umdrehungen/min liegen. Bei der Aufweitungs-TBM liegen die Umdrehungen/min in der Größenordnung der Gripper-TBM, jedoch

kann, durch die Doppelbesetzung jeder Schneidbahn durch zwei hintereinander liegende Disken, die Penetration pro Bohrkopfumdrehung erhöht werden. Das Konzept der Aufweitungs-TBM bietet somit ein Potenzial, das gegen andere TBM-Systeme abgewogen werden muss, um die optimale projektspezifische Leistung und die günstigsten Gesamtkosten zu ermitteln. Bei Tunnelprojekten, in denen kein Sondierstollen benötigt wird, ist der Einsatz der Aufweitungs-TBM gegenüber der Gripper-TBM hinsichtlich Bauzeit und Kosten nicht wirtschaftlicher.

Ferner erlaubt die Aufweitungs-TBM eine einfachere Modifikation der Maschine für einen veränderten Tunneldurchmesser bei einem anderen Projekt. Die Speichen der Maschine können innerhalb einer relativ großen Durchmesserbandbreite angepasst werden. Damit verringert sich der Umrüstungsaufwand der Maschine bei weiteren Projektein-sätzen. Die Pilot-TBM kann dabei unverändert bleiben.

Im Vergleich zu Vollschnittmaschinen ergeben sich beim Aufweitungs-TBM-System Vorteile in Bezug auf den Transport und die Montage, bedingt durch:

- das niedrige Gewicht und die geringere Größe der Pilot-TBM
- die einfachere Zerlegbarkeit der Aufweitungs-TBM in Grundkörper, Speichen etc.

Da sich der Verspannkörper der Aufweitungs-TBM mit Innen- und Außenkelly sowie Vorschubpressen und Hydraulikantriebsmotoren in der vorausseilenden Pilotbohrung verspannt, steht fast der gesamte Tunnelquerschnitt hinter der Maschine für den sofortigen Ausbau auf der nachgezogenen Nachläuferkonstruktion zur Verfügung. Neben der Verspannung ist am Übergang vom Pilotstollen zum Aufweitungsquerschnitt - direkt vor dem Aufweitungsbohrkopf - ein Abstützung mit Firstschuttschild anzuordnen, um einen unkontrollierten Materialabbruch in den Pilotstollen zu verhindern. Dies ist erforderlich, um die Integrität des Gebirges im Bereich der Gripperplatten im Pilotstollen zu sichern. Da der Pilotstollen relativ klein im Durchmesser ist, können nicht beliebig große Verspannkräfte ins Gebirge geleitet werden. Daher ist die Vorschubkraft der Maschine begrenzt. Aus diesen und praktischen Überlegungen kann man das maximale Verhältnis zwischen Pilotstollen- und Aufweitungsquerschnitt mit etwa 1:2,5 angeben. Der aufgefahrene Tunnelquerschnitt direkt hinter dem Aufweitungsbohrkopf wird nur durch das Förderband zur Schutterung und die Elektro- und Hydraulikversorgung eingeschränkt. Somit steht fast der gesamte Querschnitt direkt hinter dem Schneidrad zur Sicherung durch

- Ausbaubögen,
- Anker und Netze,
- Spritzbeton

zur Verfügung. Dies wirkt sich besonders günstig bei gebrächem und zu Niederbrüchen neigendem Gebirge aus. Der Einsatz der Maschine eignet sich außerdem bei Tunnel-durchmessern von mehr als 7,5 m.

5 Schild-TBM

Bei der Schild-TBM ist die gesamte Bohrmaschine durch einen Schildmantel geschützt. Die Schild-TBM wird bei mittelgutem, d.h. in nachbrüchigem bis gebrächem Gebirge, in dem relativ viele Stützmaßnahmen direkt hinter dem Bohrkopf erwartet werden, eingesetzt. Die Sicherung wird bereits im Schutz des Schildmantels eingebaut. Damit wird bei nachbrüchigen und gebrächem Gebirgen auch der psychische Druck vom Personal genommen und die Leistung gesteigert. Die Sicherung und der Ausbau des

Tunnels erfolgen mittels Tübbing im Schutze des Schildes. Der Tübbingausbau ist jedoch unflexibel gegenüber geologischen Veränderungen und relativ teuer in Bezug auf den Materialeinsatz. Hat man sich für den Tübbingeinsatz entschieden, müssen auch dort Tübbinge eingebaut werden, wo aus Sicherheitsgründen kein Einbau erforderlich wäre. Durch die industrialisierte Vorfertigung und die hochmechanisierte, maschinelle Verlegung der Tübbinge mittels Erektor wird jedoch eine konstant hohe Leistung erzielt. Die hohe Leistung resultiert meist in einer Verkürzung der Bauzeit und muss deshalb in die Evaluation, ob eine Gripper- oder eine Schild-TBM eingesetzt wird, einbezogen werden. Beim Einsatz von Tübbing im Felsgestein außerhalb des Grundwassers sollte man den Ringspalt zwischen Ausbruch und Tübbingaußenseite möglichst durch Einblasen von Sand oder feinem Kies/Splitt verfüllen. Die Injektion mit Mörtel hat bei verschiedenen Projekten folgende Probleme ergeben:

- Aufschwimmen der Tübbinge im frischen Mörtel des Ringspaltes hinter den Vorschubpressen in den Bereichen, die noch nicht erhärtet waren;
- Verrollung von Schildmantel und Tübbing, da nicht genügend Reibung für den Reaktionswiderstand auf das Bohrkopfantriebsmoment vorhanden war. Im Fels sind meist sehr große Antriebsmomente für den Bohrkopf erforderlich. Dies kann jedoch durch Schrägstellen der Vorschubpressen korrigiert werden.

Der Vorteil einer Schild-TBM (**Bild 5**), den Ausbau im Schildmantel zu realisieren, ohne mit dem Gebirge in Kontakt zu kommen, kann allerdings im Bereich von schweren Störzonen auch große Probleme generieren, z.B. durch Kavernenbildung. Daher ist es in Bereichen mit prognostizierten Störzonen fast unabdingbar, systematisch Bohrsondierungen während des Vortriebs durchzuführen. Diese Sondierungen können meist mit einem Schlagbohrgerät ohne Kerngewinnung ausgeführt werden. Zur Evaluierung der Gebirgsverhältnisse reicht oft schon der Vergleich der Bohrleistung bezüglich Druck und Vorschubgeschwindigkeit aus, um Störzonen zu erkennen. Die TBM sollte so konzipiert sein, dass im Fall von erkannten Problemzonen, wenn erforderlich, Injektionen zur Verfestigung des Gebirgsverbandes durchgeführt werden können, oder dass das Gebirge im Verband mit Hilfe von GFK-Ankern bewehrt werden kann. Ferner sollten die Ausstiegsmöglichkeiten im Bohrkopf optimal gestaltet werden, um Störfälle vor der Ortsbrust begutachten bzw. beseitigen zu können. Aus diesen Ausstiegsöffnungen können auch „Kavernen“ vor der Ortsbrust mit Spritzbeton stabilisiert werden.

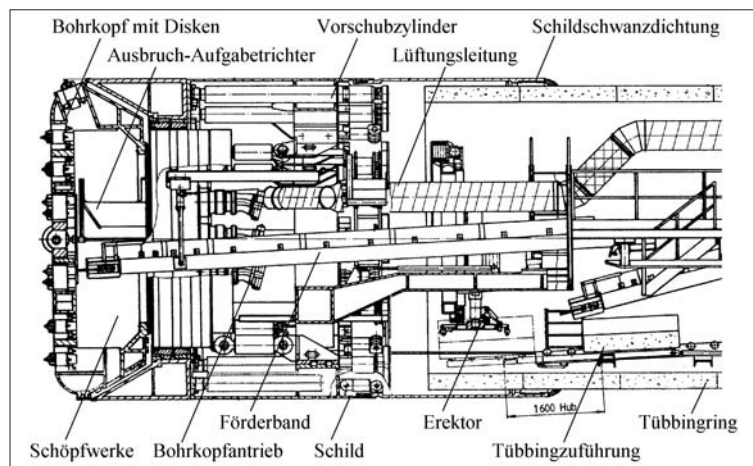


Bild 5. Schild-TBM
Fig. 5. Shield-TBM

Die Schildmaschinen sind mit Vorschubpressen ausgerüstet, die sich in Längsrichtung auf den Tübbingausbau abstützen und sich daran vorschieben. Auf diese Weise wird der rotierende Bohrkopf mit den Rollenmeißeln (Disken) gegen die Ortsbrust gepresst. Dabei löst sich das Gestein durch die Kerbwirkung unter den Meißeln. Beim Abbau entsteht kleinstückiges Material unter entsprechender Staubbentwicklung. Aus diesem Grund müssen Maßnahmen zur Einschränkung der Staubbentwicklung getroffen werden (Absaugung und Ableitung zur Entstaubungsanlage).

Beim maschinellen Tunnelvortrieb ist die Tendenz zu erkennen, Felsmaschinen mit einem Durchmesser von mehr als 10 m generell mit einem Schild auszurüsten und die Tunnel mit Tübbing auszukleiden. Diese großen Durchmesser erschweren den Sicherungseinbau (z.B. Einbaubögen) bei den Gripper-TBM direkt hinter dem Staubschild. Ferner werden bei größer werdendem Radius die Krümmungen immer kleiner (flacher); damit nimmt die stützende Gewölbewirkung im Firstbereich stärker ab, und die Gefahr von lokalen Nachbrüchen im Firstbereich steigt bei schildlosen Maschinen. Ist ein Sicherungseinbau erforderlich, verringert sich dann die Leistung der offenen TBM.

5.1 Teleskopschild-TBM

Die Teleskopschild-TBM (Bild 6) wird, wie die Schild-TBM, in schwierigerem, zu Nachbrüchen neigendem Gebirge und in gebrächnen Gebirgsabschnitten ohne anstehendes Grund- und Gebirgswasser mit Tübbingausbau im Schild verwendet. Die Teleskopschild-TBM wird auch als Doppelschild-TBM oder Verspannmantel-TBM bezeichnet. Entwickelt wurde sie zur Erhöhung der Vortriebsleistungen bei Schild-TBM mit Tübbingausbau. Das Doppelschildsystem gestattet gleichzeitig die Vorwärtsbewegung und den Einbau der Tübbinge. Die Unterbrechung der Bohrzeit bei einer Teleskopschild-TBM wird auf das kurze, zyklische Nachschieben des hinteren Anpressschilds pro Bohrhub reduziert. Bei einer normalen Schildmaschine wird die Bohrzeit um die gesamte Ringbauzeit, die in etwa gleich der Bohrzeit ist, unterbrochen. Dadurch wird die Nettobohrzeit pro Arbeitstag beinahe verdoppelt.

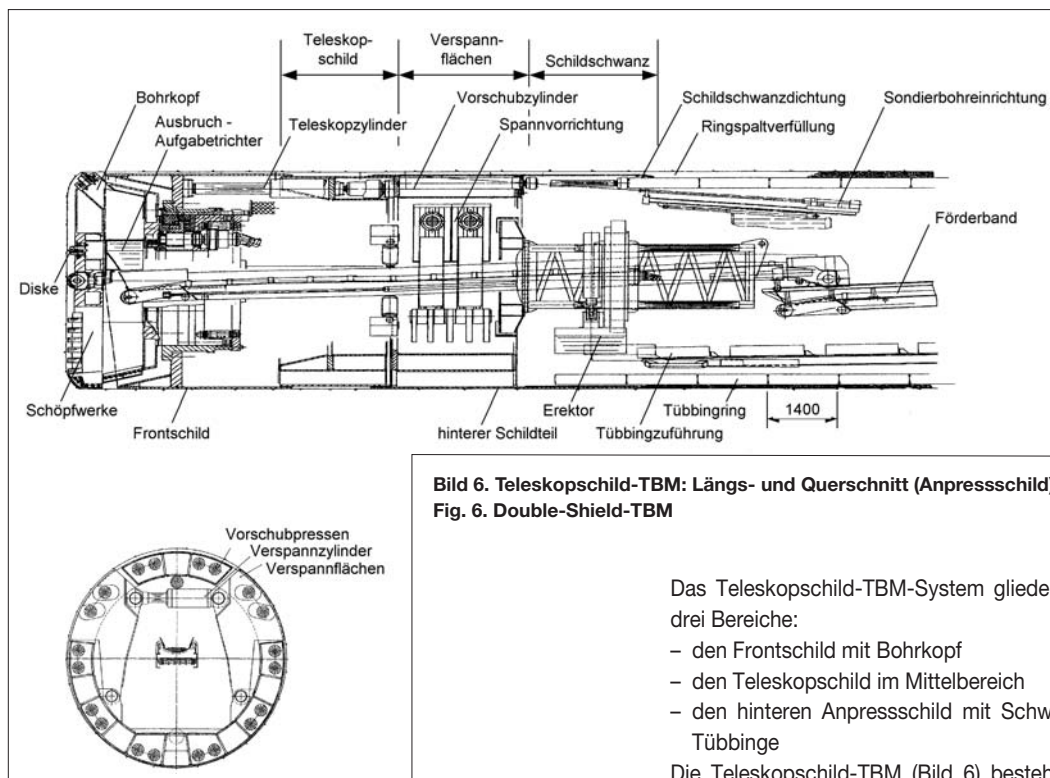


Bild 6. Teleskopschild-TBM: Längs- und Querschnitt (Anpressschild)
Fig. 6. Double-Shield-TBM

Das Teleskopschild-TBM-System gliedert sich in Längsrichtung in drei Bereiche:

- den Frontschild mit Bohrkopf
- den Teleskopschild im Mittelbereich
- den hinteren Anpressschild mit Schwanzschild zum Einbau der Tübbinge

Die Teleskopschild-TBM (Bild 6) besteht aus zwei unabhängigen, übereinander greifenden Schildmänteln. Der erste zusammenhängende Schild ist der Frontschild. In diesen ist der Teleskopschild als Teil des hinteren Schildmantels überlappend eingeführt. Der hintere Schildmantel ist eine weitere Einheit in Längsrichtung, bestehend aus:

- Teleskopschild,
- Anpressschild (Verspannmantel),
- Schildschwanz.

Der Frontschild mit Bohrkopf ist ähnlich aufgebaut wie eine konventionelle, äußerst kurze, offene Schild-TBM. Der Frontschild ist mit in Ringrichtung in äquidistanten Abständen angeordneten Längsvorschubpressen ausgerüstet. Diese Vorschubpressen stützen sich gegen die festen Widerlager am Frontschild und am hinteren Anpressschild ab. Über den zwischen Front- und hinterem Anpressschild befindlichen Teleskop-Schild schieben sich diese beiden Schildteile. Der Teleskop-Schild hat einen starren Mantel. Im Anpressschild, auch

Verspannschild genannt, befinden sich die Verspannzylinder mit den Schildmantelgrrippern. Der Anpressschild ist mit einem in Längsrichtung geteilten Schildmantel ausgerüstet. Der Durchmesser des Schildmantels kann durch im Inneren angeordnete, tangential wirkende Verspann-Hydraulikpressen aufgeweitet und verkleinert werden. Diese Teleskoppressen sind im oberen Teil des Schildes in horizontaler Querrichtung angeordnet. Sie bewegen einen als Pratzten ausgebildeten Schildteil, der auf seitlichen Konsolen im unteren Schildteil gelagert ist, und erzeugen so die erforderlichen Anpresskräfte. Der zweiphasige Arbeitszyklus der Teleskopschildmaschine mit Tübbingausbau ist wie folgt:

- Bohr- und Tübbingversetzvorgang: Der Verspannschild wird mit dem Gebirge radial verspannt. Die Bohrkopfvorschubzylinder stützen sich auf die Widerlager des Anpressschildes ab und schieben den Bohrkopf während des Bohrvorgangs kontinuierlich gemäß der erzielten Bohrleistung nach vorne, bis der Hub der Vorschubzylinder erschöpft ist. Gleichzeitig werden im Schildschwanz die Tübbinge eingebaut. Die Schildvorschubzylinder für den hinteren Schild stützen die Tübbinge während des Einbaus ab, bis der Ring geschlossen ist.

- Schreitphase des hinteren Schildes: Die Schreitphase des hinteren Schildmantels (Teleskopschild, Anpressschild und Schildschwanz) dauert nur einige Minuten. Zum Einleiten der Schildschreitphase werden zuerst die Bohrkopfvorschubzylinder kraftmäßig gelöst und dann die radialen Verspannzylinder der Schildmantelgrripper entspannt und zurückgefahren. Dann wird, mit Hilfe der hinteren Schildvorschubzylinder, der hintere Schildmantel um einen Bohrkopfvorschubzylinderhub nach vorn geschoben. Dabei stützen sich die Schildvorschubzylinder auf dem Tübbingring ab. Der hintere Schildmantel wird im Bereich des Teleskopschildes teleskopartig in den Frontschild (Bohrkopfschild) eingefahren. Danach läuft wieder der Bohr- und Tübbingversetzvorgang ab.

Aufgrund der kontinuierlich hohen Leistung eignet sich der Förderbandtransport zum Abtransport des Ausbruchmaterials aus dem Tunnel besonders. Der ausreichenden Versorgung der Maschine mit Tübbing - zur kontinuierlichen Aufrechterhaltung der Leistung der Teleskop-TBM - muss besondere Beachtung geschenkt werden. Entsprechend der Transportkapazität muss auf dem Nachläufer ein Tübbingmagazin vorhanden sein, um die antizyklische Anlieferung durch Transportfahrzeuge (Zug, LKW) abzupuffern. Der Tübbingtransport auf dem Nachläufer zur Versorgung des Erektors muss robust und schnell erfolgen, um keinen kritischen Weg beim Tübbingeinbau darzustellen. Der Hub der Bohrkopf- und Schildvorschubpressen muss optimal auf die maximale Bohrleistung - plus Sicherheitszuschlag - während der Tübbingeinbauphase ausgerichtet werden. Dadurch kann die maximale Bohrleistung der Maschine ausgenutzt werden, ohne Standzeit für den noch nicht fertigen Tübbingausbau.

Der Schildmantel ist im Längsgelenk überlappt. In Verbindung mit Zusatzeinrichtungen des Bohrkopfes erhält die Maschine eine weitgehende Anwendungsflexibilität im gebräuchtem Gebirge. Diese Zusatzeinrichtungen umfassen:

- Überschneideinrichtungen am Bohrkopf, die einen größeren Bohrdurchmesser erzeugen und durch den teleskopierbaren Schildmantel bis zum Einbau der Tübbinge offen gehalten werden,
- einen beweglichen Bohrkopf in Längs- und in Radialrichtung, um einseitiges Überprofil zu erzeugen und die Steuerbarkeit des Schildes zu verbessern.

6 TBM-Vortrieb in druckhaftem Gebirge

Beim Durchfahren von Abschnitten mit druckhaftem Gebirge mittels Schild-TBM müssen der Bohrkopfschild und der Bohrkopf selbst so konstruiert sein, dass ihr Durchmesser variierbar ist (**Bild 7**). Dies soll verhindern, dass die Maschine während Betriebsunterbrechungen (Wochenenden oder größeren Reparaturarbeiten) eingeklemmt wird.

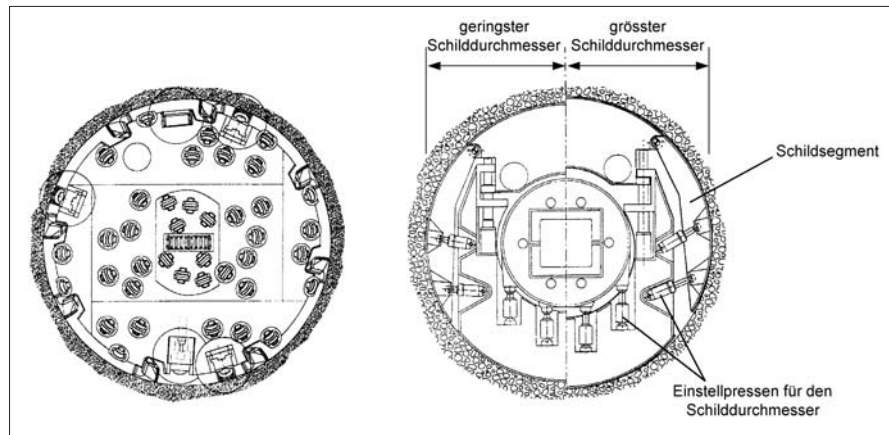


Bild 7. Verstellbarer Bohr- und Schilddurchmesser (Wirth)

Fig. 7. TBM with Enlargement Device

Druckhafter Fels ist dadurch gekennzeichnet, dass sich der aufgefahrene Querschnitt zeitabhängig verformt. Durch dieses Verhalten baut der Gesteinsdruck einen entsprechenden Stützwiderstand auf. Sollte sich der Fels, während Arbeitsunterbrechungen von mehreren Tagen, beginnen zu verformen, kann der Bohrkopfschild oder der Bohrkopf selbst eingeklemmt werden. Die Radialspannungen erzeugen folglich am Bohrkopf und am Schildzylinder derartig große Reibungskräfte, dass sich die Maschine normalerweise nicht mehr aus eigener Kraft befreien kann, um den Bohrprozess fortzusetzen. Demzufolge ist es notwendig, einen flexibel gestalteten Schildzylinder mit dem entsprechenden Bohrkopf einzusetzen, der einen erweiterten Bohrdurchmesser erlaubt. Vor dem Einbohren in solche Gesteinsbedingungen, in denen dann Vortriebsunterbrechungen erwartet werden, sind die Überschneidrollen und die Räumschlitze am Außenumfang des Bohrkopfes auszufahren, damit ein größerer Durchmesser aufgefahren wird (**Bild 8**). Die Aufweitung kann nach dem aktuellen Stand der Technik bis zu 250 mm betragen. Allerdings reduziert sich dadurch die Bohrgeschwindigkeit. Im Falle des erweiterten Bohrdurchmessers mit ausgeklappten Überschneidrollen sinkt die Leistung auf 50 % des Standardvortriebs.

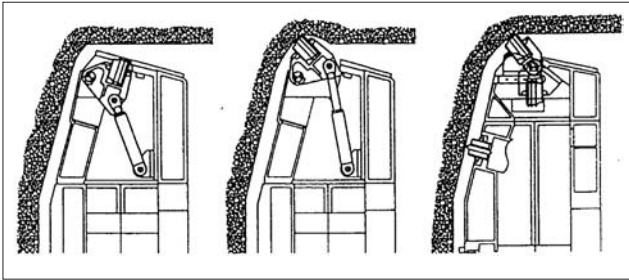


Bild 8. Phasen der Bohrkopfaufweitung (Wirth)
Fig. 8. Stages of Enlargement

Der Bohrkopf wird von einem schwimmend montierten Schild umgeben, welcher ihn gegen hereinbrechendes Gestein im Bereich der Erweiterungsrollen schützt, um ein Blockieren zu verhindern. Zum Umsetzen des Grippersystems der Bohrmaschine wird der Fuß des Schildmantels als vordere Abstützung der TBM eingesetzt. Weiter dient der Fuß auch als zusätzliche Bohrkopfabstützung während des Bohrvorganges. Der Schild besteht aus kegelförmigen Platten und aussteifenden Rippen. Er ist mit einer konischen Schneide versehen, die einerseits zur Säuberung der Tunnelsohle und auch als Staubschild dient, um sicher zu stellen, dass die Entstaubungsanlage effizient arbeitet. Der Bohrkopfschildmantel besteht aus einzelnen Segmenten, um den Durchmesser mittels der integrierten Hydraulikzylinder um jeweils 150 mm vergrößern bzw. verringern zu können. Die Erweiterung des Schildmantels erfolgt hydraulisch, um einen Anfangsstützwiderstand am Bohrkopf zur Verfügung zu stellen. Der maximal erreichbare Stützdruck beträgt 400 kN/m². Die TBM kann noch bis zu einem Gesteinsdruck von 600 kN/m² befreit werden. In diesem Fall wird allerdings der Schildmantel durch Deformationen beschädigt. Der Bohrkopf ist so konstruiert, dass er bei diesem Druck noch nicht

beschädigt wird. Zur Verhinderung der Gefahr des Einklemmens ist der Schild mit Druckmessdosen ausgerüstet. Sobald der maximale Druck von 400 kN/m² erreicht wird, wird ein Alarm ausgelöst, um die Maschine anzufahren.

Ein Ringspeicher für die Sicherungselemente und eine Vorrichtung zum Sicherungseinbau ist direkt hinter dem Schild angeordnet. Der Bohrkopf und der Bohrkopfschildmantel sollten so kurz wie möglich sein. Die Mindestlänge beträgt jedoch ca. 4 m, d.h. die ersten Sicherungsmaßnahmen können erst 4 m hinter der Ortsbrust vorgenommen werden.

Der Durchmesser des Schildes ist abhängig von dem des Bohrkopfes. Die Erfahrungen haben gezeigt, dass der Freiraum im First zwischen Bohrkopf und Schildmantel bei abgenutzten Disken 55 mm betragen sollte. Dieser freie Spalt reduziert sich bei neuen Rollenmeißeln auf 25 mm und gewährleistet somit noch genügend Bewegungsfreiheit.

Literatur

- [1] *Girmscheid, G.*: Baubetrieb und Bauverfahren im Tunnelbau. Berlin: Ernst & Sohn 2000.
- [2] Wirth GmbH, Erkelenz: Tunnelbohrtechnik von Wirth. Technische Unterlagen.
- [3] DAUB, ÖGG und SIA-FGU: Empfehlungen zur Auswahl und Bewertung von Tunnelbohrmaschinen. Tunnel 1997, H. 5, S. 20–35 und Taschenbuch für den Tunnelbau. Essen: Glückauf 1998.
- [4] Herrenknecht AG, Schwanau: Technische Unterlagen.
- [5] ROWA Engineering AG, Wangen SZ: Technische Unterlagen.
- [6] *Maidl, B.; Schmid, L.; Ritz, W.; Herrenknecht, M.*: Tunnelbohrmaschinen im Hartgestein. Berlin: Ernst & Sohn 2001.
- [7] *Girmscheid, G.*: Schildvorgetriebener Tunnelbau in heterogenem Lockergestein, ausgekleidet mit Stahlbetontübbing. Teil 2: Aspekte der Vortriebsmaschinen und Tragwerksplanung, Bautechnik 74 (1997) 85–100.

BUCHBESPRECHUNG

Kahlow, A.: Brücken in der Stadt – Der Potsdamer Stadtkanal & seine Brücken Potsdam 2001, 128 Seiten 19,94 Euro; ISBN 3-934329-11

Der Potsdamer Stadtkanal und seine Brücken sind nur ein Thema des Bandes. Etlliche Beiträge der 16 Autoren - in der Mehrzahl geschichtsbewusste Bauingenieure, die von der Brückenkultur ihrer Vorfahren fasziniert sind - reichen viel weiter, räumlich und zeitlich. Von frühen Brücken in den USA, ihrer Pflege und Bewahrung wird berichtet, den alten Brücken über die Grachten in Amsterdam ist ein Kapitel gewidmet und der behutsame Umgang mit den gefährdeten oder kriegsgeschundenen Brücken-Kunstwerken von Mostar, Regensburg und Nürnberg wird in Wort und Bild präsentiert. Als Einleitung zeichnet ein ausführlicher Exkurs die Entwicklung der Bogenbrückenentwürfe von der Renaissance bis in das 19. Jahrhundert nach. Der Band ist somit mehr als nur ein Katalog zu einer Ausstellung, die die Fachhochschule Potsdam im Frühjahr 2001 initiiert hatte. Er ist eine Fundgrube für alle, die sich die Erhaltung von Kulturgütern des Brückenbaus zur Aufgabe gemacht haben oder die vor eine solche Aufgabe gestellt werden.

Potsdam und seine Brücken nehmen aber doch den breitesten Raum in der Sammlung ein. Es geht um die Rekonstruktion des Potsdamer Stadtkanals, der von 1721 bis 1965 die Innenstadt wie eine Gracht durchzog. Danach wurde er zugeschüttet, um unter anderem Stellplätze für Kraftfahrzeuge zu gewinnen. Die Freilegung des Kanals, ein im wahren Sinne des Wortes einschneidendes Vorhaben, bedarf gewiss einer gründlichen Vorbereitung. Wird doch die Verwirklichung

deutliche Änderungen – im städtischen Verkehr mit sich bringen. Dafür muss die Öffentlichkeit erst einmal gewonnen werden!

Zur Bundesgartenschau 2001 wurde ein erstes kurzes Teilstück des historischen Kanals freigelegt. Hier nun wird die Geschichte des Kanals und seiner zehn Brücken sorgfältig, aus Detail eingehend nachgezeichnet. Sie ist gleichzeitig ein Abriss der Geschichte des Brückenbaus und somit von überregionalem Interesse. Von ersten Holzbrücken führt die Entwicklung über Steinbögen, gusseiserne Bögen, schmiedeeiserne Laves-Träger und Gitterträger bis zum Stahlbeton. Zum „Begreifen“ der kleinen Bauwerke haben Studierende der FH Potsdam Modelle der historischen Brücken gefertigt; und mit Entwürfen neuer Brücken nach dem heutigen Stand der Technik werben sie für die baldige Fortsetzung der Kanalfreilegung zur Belebung und Bereicherung der Stadt.

Was den Band besonders auszeichnet, ist das überaus reiche und vielfältige Bildmaterial in allen Kapiteln. Die hervorragende Qualität der Wiedergabe kommt vor allem den zarten Zeichnungen und Plänen des 19. Jahrhunderts zugute. Somit ist die Sammlung auch eine Augenweide und geeignet nicht nur den Fachmann zu bereichern, sondern auch den Nachwuchs für den Brückenbau und das Bauwesen im allgemeinen zu begeistern und zu gewinnen. In einer zu wünschenden 2. Auflage sollte dann der mittlere der Vornamen des viel zitierten hannoverschen Oberhofbaudirektors Georg Ludwig Friedrich Laves nicht mehr unterschlagen werden.

K. Dierks, Berlin