

Prediction of TBM performance

Prognose von TBM-Leistungen



Eckart Schneider

The increasing number of contributions to our journal concerned with mechanical tunnelling in hard and loose rock shows the enormous significance that this branch of tunnelling has now achieved. Since the start of mechanical tunnelling in the Swiss base tunnels, the prediction of advance rate and the cost of cutter wear has been particularly topical.

But practical men and academics had already been studying these problems

long before the subject became interesting to a broad specialist public. This is demonstrated not least by the contribution from Peter J. Tarkoy, an undisputed pioneer in the field.

Karlheinz Gehring writes as a former TBM designer. His article shows the interactions between machine layout, advance rates and cutter wear. The second US contribution comes from Lok Home, the president of the Robbins Company. The idea he has developed to increase advances rates in squeezing rock with a new type of shield machine that he calls the All Conditions Tunneller will probably prompt discussion. The construction report from Ernst Gschnitzer & Robert Goliasch about the Niagara tunnel describes the problems, which have arisen so far on this unusual project, and how they were overcome.

Two further articles are concerned with loose rock tunnelling. Kurosch Thuro & Heiko Käsling concern themselves with the measurement and classification of abrasiveness. Ulrich Maidl & Jörg Wingmann discuss the difficulty of forecasting the progress of earth pressure shields in loose soils.

Although it has not proved possible to obtain contributions from L. Ozdemir (Colorado School of Mines) and G. Bruland (NTU Trondheim), which should have rounded off the theme, the present issue still gives a good overview of the question posed.

If, as planned, the Geomechanics Colloquium 2010 in Salzburg includes a report about the research project "ABROCK Analysis of Penetration and Abrasion in TBM Tunnelling", this will provide new results from the research group consisting of teams from the Universities of Innsbruck, Munich, Leoben, ETH Zürich and EPF Lausanne. The group is investigating the process of cutting rock, analysing the driving of the large tunnels crossing the Alps and implementing a multitude of laboratory tests and numerical models.

Eckart Schneider & Max John



Max John

Die zunehmende Zahl von Beiträgen in unserem Journal, die sich mit maschinellen Vortrieben im Fest- und Lockergestein beschäftigen, zeigt die enorme Bedeutung, die diese Sparte des Tunnelbaus mittlerweile erlangt hat. Seit Beginn der TBM-Vortriebe in den Schweizer Basistunneln ist die Vorhersage der Vortriebsgeschwindigkeit und der Kosten des Meißelverschleißes im Hartgestein von besonderer Aktualität. Aber schon lange

bevor dieses Thema ein breiteres Fachpublikum interessierte, haben sich Praktiker und Wissenschaftler damit beschäftigt. Dies zeigt nicht zuletzt der Beitrag von Peter J. Tarkoy, einem unbestrittenen Pionier auf diesem Gebiet.

Mit Karlheinz Gehring kommt ein ehemaliger TBM-Konstrukteur zu Wort. Sein Beitrag zeigt die Zusammenhänge zwischen Maschinenauslegung, Vortriebsleistung und Meißelverbrauch auf. Der zweite US-amerikanische Beitrag stammt von Lok Home, dem Präsidenten der Firma Robbins. Die von ihm entwickelten Ideen zur Steigerung der Vortriebsleistung in druckhaftem Gebirge durch eine Schildmaschine neuen Typs, die er All-Conditions-Tunneller nennt, werden vermutlich Diskussionen auslösen. Der Baustellenbericht von Ernst Gschnitzer & Robert Goliasch über den Niagara-Tunnel schildert die bisher bei diesem außergewöhnlichen Projekt aufgetretenen Probleme und deren Bewältigung.

Zwei Beiträge behandeln Themen aus dem Bereich der Lockergesteinsvortriebe. Kurosch Thuro & Heiko Käsling beschäftigen sich mit der Messung und Klassifizierung der Abrasivität. Ulrich Maidl & Jörg Wingmann zeigen die Schwierigkeiten von Leistungsprognosen für Erddruckschilde im Lockergestein auf.

Obwohl es nicht gelungen ist, Beiträge von L. Ozdemir (Colorado School of Mines) und G. Bruland (NTU Trondheim), die das Thema abrunden sollten, zu erhalten, gibt das vorliegende Heft einen guten Überblick über das gestellte Thema.

Wenn – wie geplant – beim Geomechanics Kolloquium 2010 in Salzburg über das Forschungsprojekt „ABROCK Analysis of Penetration and Abrasion in TBM-Tunnelling“ berichtet wird, werden neue Erkenntnisse der Forschergruppe, die aus Teams der Universitäten Innsbruck, München, Leoben, ETH Zürich und EPF Lausanne besteht, vorliegen. Diese Gruppe untersucht den Gesteinslösevorgang, analysiert die Vortriebe der großen alpenquerenden Tunnel und führt umfangreiche Labortests und numerische Modellierungen durch.

Eckart Schneider & Max John

Simple and practical TBM performance prediction

Einfache und praxistaugliche Voraussage von TBM-Leistungen

The prediction of excavation rates for tunnel boring was originally developed for rock boring machines. One of the earliest working methods for predicting TBM performance was developed at the University of Illinois. The method was simple, reliable, inexpensive, and the data available to the public. Since then, various methods, more sophisticated, more time consuming and more expensive have been developed by various researchers. Some of them were quite exacting in the prediction despite a limited knowledge of anticipated conditions. Others were ever changing and unavailable for public use.

Predictions of penetration rates and disc cutter consumption were tied to rock properties and machine variables while the prediction of TBM utilization was ignored even though in many cases it was the most variable element having the greatest impact. Prediction of TBM utilization was substantially more difficult since it was a function of time and length dependent downtimes, project conditions, TBM design features, work force, construction management, and site limitations. Many of these influences were simply a function of the impact of the human element and therefore tenuous to predict.

The development of machines designed to negotiate soil, rock, and a combination of both inherently imposed additional influences on the productivity. An increase in the use of electronic technology in tunnel boring, both for control functions and recording of instantaneous machine variables have allowed the imposition of additional constraints, such as thrust & torque limitations.

How do we take all of these additional variables into account in the forecasting of TBM performance?

1 Methods of prediction for rock tunnel boring machines

1.1 Total hardness

The original method for predicting TBM performance in terms of reliable penetration rates and cutter consumption was developed at the University of Illinois [1] [2] [3] [8] [9] [10] [11] [12]. The method was simple, inexpensive (< \$ 200), and the tests could be performed in a timely manner (12 to 24 h).

The Total Hardness consists of a modified Taber Abrasion hardness test, Schmidt (L-type) Hammer hardness test, and occasionally using the Shore Scleroscope (C-2 Type) test when the rock is too weak for using the Schmidt Hammer. Total hardness is defined as follows:

Die Voraussage von Ausbruchgeschwindigkeiten für das Bohren von Tunneln wurde ursprünglich für Gesteinsbohrmaschinen entwickelt. Eine der ersten funktionierenden Methoden für die Voraussage von TBM-Leistungen wurde an der Universität von Illinois entwickelt. Die Methode war einfach, zuverlässig, kostengünstig und die Ergebnisse der Öffentlichkeit zugänglich. Seither wurden von verschiedenen Forschern die unterschiedlichsten Methoden entwickelt, die anspruchsvoller, zeitaufwändiger und teurer sind. Einige davon waren, trotz beschränkter Kenntnisse der zu erwartenden Bedingungen, genauer in der Voraussage. Andere wurden ständig verändert und nie der allgemeinen Verwendung zugänglich.

Die Voraussage der Penetrationsraten und des Verbrauchs an Diskenmeißeln waren an Gesteinseigenschaften und Maschinenparameter geknüpft, während die Voraussage der TBM-Ausnutzung ignoriert wurde, obwohl sie in den meisten Fällen das veränderlichste Element mit dem größten Einfluss war. Die Voraussage der TBM-Ausnutzung war wesentlich schwieriger, da sie eine Funktion von zeit- und längenabhängigen Stillstandzeiten, den Projektvorgaben, den Besonderheiten der TBM, der Mannschaft, der Bauleitung und der Baustellen-Beschränkungen war. Viele dieser Einflüsse waren einfach eine Folge der Einwirkung des menschlichen Faktors und deshalb schwierig vorauszusagen.

Die Entwicklung von Maschinen zur Bewältigung von Böden, Gestein und eine Kombination aus beiden vergrößerte naturgemäß die Anzahl der zusätzlichen Einflüsse auf die Produktivität. Eine Zunahme der Elektronik bei Tunnelbohrmaschinen, sowohl für Kontrollzwecke als auch zur Aufzeichnung der momentanen Maschinenparameter, hat die Auferlegung zusätzlicher Beschränkungen zugelassen.

Wie sind all diese zusätzlichen Variablen bei der Prognose der TBM-Leistungen zu berücksichtigen?

1 Methoden der Voraussage für Gesteins-TBM

1.1 Gesamthärte

Die ursprüngliche Methode zur Voraussage von TBM-Leistungen in Bezug auf verlässliche Penetrationsraten und Meißelverbrauch wurde an der Universität von Illinois entwickelt [1] [2] [3] [8] [9] [10] [11] [12]. Die Methode war einfach, kostengünstig (< \$ 200), und der Test konnte zeitnah (12 bis 24 h) durchgeführt werden.

Die Gesamthärte besteht aus einem modifizierten Taber-Abnutzungshärtetest, einem Schmidt-Hammer-Härtetest und in der fallweisen Anwendung des Shore-Sklerskops (C2-Typ), wenn das Gestein zu weich ist, um den Schmidt-Hammer zu verwenden. Die Gesamthärte wird wie folgt definiert:

Table 1. Total hardness methodology
Tabelle 1. Methodik der Gesamthärte

	Hardness Test	Description	Range of Values	Remarks
H_R	Schmidt (L-type) Hammer Rebound (must be used on core mounted in a test anvil)	10 readings are taken; average of 5 highest values are used after calibration on a standard	0 – 70	Best for rock mass property measurements because contact point is large (about 1/2 in diameter).
H_S	Shore Scleroscope (C-2 type) Rebound Hardness (must be used on core mounted in a test anvil)	20 readings are taken; average of 10 highest values are used after calibration on a standard	0 – 140	Contact point is fine, therefore measurements are more accurate for individual grains and crystals, but statistical sampling must be taken and averaged for mass properties; can be used to estimate H_R if necessary.
H_A	Rock Abrasion Hardness	2 NX-size discs ($1/4$ in thick) abraded for 400 revolutions on each side; determine weight loss; use average values of 2 discs. $H_A = 1/\text{average wt. loss per disk}$	<1	This test is sensitive to factors that influence small-scale strength, shearing, crushing, and abrasion.
A_R	Rock Abrasiveness	Measure wt loss of 4 wheels (1 for each side of rock discs) and average. $A_R = 1/\text{average wt. loss}$	<1	Weight loss of the abrader wheel is caused by rock abrasiveness, not necessarily by hardness. The same is true in the case of a cutter.
H_T	Total Hardness	Use appropriate average values to compute $H_T = H_R \sqrt{H_A}$	0 – 250	This combination of hardness has been successfully correlated with advance rates

$$H_T = H_R \times (H_A)^{1/2}$$

with:

H_T total hardness
 H_R Schmidt hammer hardness
 H_A rock abrasion hardness

$$H_T = H_R \cdot (H_A)^{1/2}$$

mit:

H_T Gesamthärte,
 H_R Schmidt-Hammer-Härte,
 H_A Gesteinsabnutzungshärte.

A number of publications [8] [9] [11] [12] provide a detailed description of the Total Hardness testing procedure and testing equipment. Details of the methodology are defined in detail [8] and summarized in Table 1.

The relationship between Total Hardness and penetration rates is illustrated in Fig. 1. In order to use this data, it is necessary to go back to the original TBM specifications and data, rock total hardness values, and the correlation relationships provided in references [11] [12]. The relationships between Total Hardness and cutter rolling path life (CRPL) for various sizes of cutters are illustrated in Fig. 2.

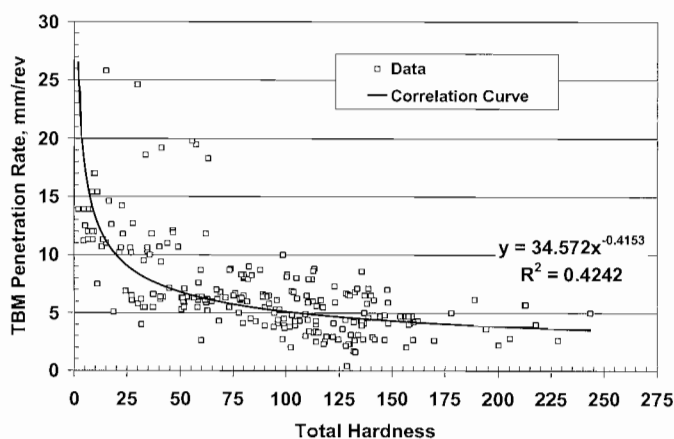


Fig. 1. Total hardness vs. penetration rate
Bild 1. Gesamthärte gegenüber Penetrationsrate

Eine Anzahl von Publikationen [8] [9] [11] [12] liefert eine detaillierte Beschreibung des Gesamthärte Testverfahrens und der Prüfeinrichtungen. Einzelheiten der Methode sind im Detail in [8] definiert und in Tabelle 1 zusammengefasst.

Das Verhältnis von Gesamthärte und Penetrationsraten ist in Bild 1 dargestellt. Um diese Daten anzuwenden, ist es notwendig auf die ursprünglichen TBM-Spezifikationen und -Daten, die Gesamthärtewerte des Gesteins und die untereinander bestehenden Abhängigkeitsverhältnisse, die in [11] [12] angegeben sind, zurückzugreifen. Die Zusammenhänge zwischen der Gesamthärte und der Meißelrollweg-

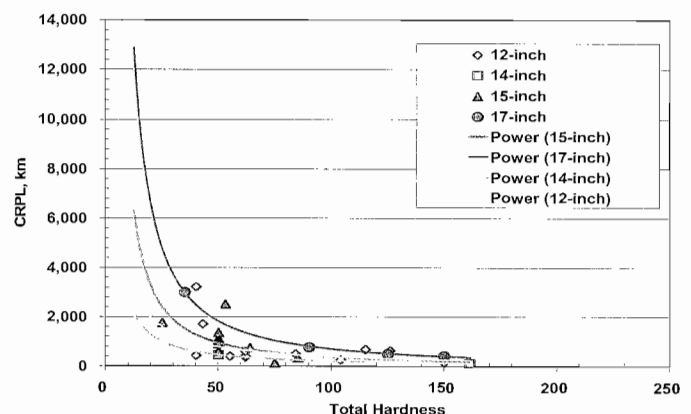


Fig. 2. Total hardness vs. cutter rolling path life
Bild 2. Gesamthärte gegenüber Rollweglebensdauer

TBM penetration rates predicted on the basis of Total Hardness have consistently been reliable and within about 5 % of encountered excavation rates.

While this author was employed by Perini Corporation's Tunnel Division, the need to predict TBM downtime, TBM utilization, and overall excavation rates became evident and has become more crucial than just predicting the penetration rate. In the 1976 "Mechanical Boring or Drill and Blast Tunnelling Workshop", *Duri Prader's* (Switzerland) methods of estimating costs [7] were contributed to the workshop and compiled by *Peter J. Tarkoy*, and reported [4]. These same methods were computerized [14], to deal with anticipated TBM downtime, TBM utilization, and TBM advance rates based on geotechnical conditions, installed mining system character, backup system, and workforce character. These methods have been extensively described [15] [18] [20] [21] [24] [26] [27].

1.2 NTH/NTNU

The method [5] [6] was based on multiple tests and a vast amount of field experience. It takes into account rock intact properties as well as rock mass properties. It also utilized various machine variables to predict penetration rates and cutter wear. The method is much too precise in predicting penetration rates than the precision possible in predicting TBM utilization. Consequently, it is akin to estimating the diameter of circle and calculating the circumference to seven decimal points. The method is expensive (~US\$ 1,500), time consuming, and only available in Norway.

1.3 Colorado School of Mines (CSM)

The various rock properties used by the CSM system have been variable; one in particular, the unconfined compressive strength has been grossly misleading in predicting boreability. The equations are complex, unavailable to the public, ever changing, and according to our personal experience [29], unreliable.

2 Evolution of tunnel boring machinery

2.1 Open gripper rock TBMs

Prediction methods for penetration and cutter consumption of rock machines were established and simple. There was negligible interference between the applied thrust and the loads sustained by each of the cutters. Consequently, the relationship of rock hardness, cutter load, cutter head rotational rate, cutter type, and penetration rates was simple and straightforward.

2.2 Shielded TBMs

An industry evolution from open tunnel boring machines in hard rock to the use of shielded machines in poor quality rock, has required taking into account the forward thrust lost, due to the skin friction of the shield against the rock, thus reducing the force available to load the cutters. Even such a simple calculation has been fraught with a great deal of controversy with some machine manufactur-

lebensdauer (CRPL) für verschiedene Diskengrößen sind in Bild 2 dargestellt. Die auf Basis der Gesamthärte vorausgesagten Penetrationsraten sind durchgängig zuverlässig und liegen innerhalb von ungefähr $\pm 5\%$ der erreichten Werte.

Während der Beschäftigung des Autors in der Tunnelabteilung des Unternehmens Perini wurde die Notwendigkeit, TBM-Stillstandzeiten, TBM-Ausnutzung und Vortriebsgeschwindigkeiten voraussagen zu können augenscheinlich und stellte sich als wichtiger heraus als die einfache Voraussage der Penetrationsrate. 1976 wurden auf dem Tunnel-Workshop „Mechanisiertes Bohren oder Bohren und Sprengen“ die Methoden zur Kostenveranschlagung von *Duri Prader* (Schweiz) vorgestellt, von *Peter J. Tarkoy* zusammengestellt und behandelt [4]. Die gleichen Methoden wurden automatisiert [14], um angenommene TBM-Stillstandzeiten, TBM-Ausnutzung und TBM-Vortriebsgeschwindigkeiten in Abhängigkeit der geotechnischen Bedingungen, der Besonderheiten des eingesetzten Abbausystems, des Nachläufers und der Eigenheiten der Mannschaft zu behandeln. Diese Methoden werden ausführlich in [15] [18] [20] [21] [24] [26] [27] beschrieben.

1.2 NTH/NTNU

Die Methode [5] [6] basiert auf vielfältigen Tests und einem großen Erfahrungsbereich. Sie berücksichtigt sowohl die Eigenschaften des ungestörten Gesteins als auch des Gebirges. Sie verwendet verschiedene Maschinenparameter, um Penetrationsrate und Meißelverbrauch voraussagen. Die Methode ist jedoch in der Voraussage der Penetrationsrate viel präziser als die mögliche Genauigkeit in der Voraussage der TBM-Ausnutzung. Dies ähnelt der Berechnung eines Kreisumfangs auf sieben Dezimalstellen mit einem geschätzten Durchmesser. Die Methode ist teuer (~US\$ 1,500), zeitintensiv und nur in Norwegen verfügbar.

1.3 Colorado School of Mines (CSM)

Die vom CSM-System verwendeten verschiedenen Gesteinseigenschaften waren unterschiedlich; in einem bestimmten Fall war die einachsige Druckfestigkeit grob irreführend in Bezug auf die Bohrbarkeit. Die Gleichungen sind umfangreich, der Öffentlichkeit unzugänglich und nach der persönlichen Erfahrung des Autors [29] unzuverlässig.

2. Die Entwicklung der Maschinentechnik

2.1 Offene Gripper-TBMs

Die Voraussagemethoden für Penetration und Meißelverbrauch von Tunnelbohrmaschinen für Festgestein waren etabliert und einfach. Die Störeinflüsse zwischen der aufgetragten Vorschubkraft und den von den einzelnen Meißeln aufzunehmenden Lasten sind vernachlässigbar. Daher waren die Abhängigkeiten zwischen Gesteinhärte, Schnittkraft, Bohrkopfdrehzahl, Meißelart und Penetrationsraten einfach und überschaubar.

2.2 Schild-TBMs

Die industrielle Entwicklung von offenen Tunnelbohrmaschinen im Hartgestein hin zu Schildmaschinen im

ers, claiming unrealistically low losses to skin friction despite evidence to the contrary.

Shielded machines also sustained some difficulty related to muck concentrations in and around the cutter head, further reducing penetration rates. As a result, the prediction methods became fraught with complications.

2.3 Mixed face TBMs

The application of slurry and earth pressure balance (EPB) technology in tunnel boring for soil and mixed face excavation has invalidated the methods of assessment developed for rock penetration rates and cutter consumption rates. Furthermore, with the introduction of machines that could deal with a mixed face of soil and rock, the relationship between the excavated material and the excavation rate changed as a result of innumerable influences.

The inherent character of mixed face machine design had a direct effect on TBM penetration rates. Some of these include:

- Recessed cutters which limits the space available for muck movement between the cutting face and the rock face (Fig. 3),
- Bi-directional rotation and associated design which has typically been found to be less efficient when in rock than one directional cutter head designs,
- Cutter head openings for soil are not as efficient for rock and vice versa (Fig. 4), and
- EPB screw conveyors have a constricting and limiting effect on the unobstructed flow of muck.

In mixed face tunneling, simultaneous excavation of soft soils and hard rock will necessitate manual control as a result of:



Fig. 3. Illustrations of rear mounted cutters and crowded face

Bild 3. Darstellung der rückseitig montierten Meißel und crowded face

schlechten Gebirge erforderte die Berücksichtigung des Vorschubkraftverlustes durch Mantelreibung zwischen Schild und Gebirge, wodurch die verfügbare Meißelkraft reduziert wurde. Selbst solch einfache Berechnungen waren durch Meinungsverschiedenheiten mit einigen Maschinenherstellern belastet, die unrealistisch niedrige Mantelreibungsverluste trotz gegenteiliger Belege verlangten.

Schildmaschinen hatten ebenso Schwierigkeiten mit Haufwerksansammlungen im und um den Bohrkopf herum, wodurch die Penetrationsraten weiter abnahmen. In der Folge wurden die Voraussagemethoden mit Komplikationen behaftet.

2.3 TBMs für wechselhaftes Gebirge

Der Einsatz von Slurry- und EPB-TBMs für Locker- und Mischböden setzte die für Penetrationsraten und Meißelverbrauch entwickelten Bewertungsmethoden außer Kraft. Darüber hinaus veränderte sich mit der Einführung dieser Maschinen die Beziehung zwischen Ausbruchmaterial und Ausbruchgeschwindigkeit infolge unzähliger Einflüsse.

Typische Besonderheiten der TBMs für Mischböden hatten direkte Auswirkungen auf die Penetrationsraten. Dazu gehörten:

- Eingelassene Meißel, wodurch der Raum zwischen Schneidrad und Ortsbrust zum Abtransport des Bohrguts begrenzt wird (Bild 3),
- Drehbarkeit des Bohrkopfs in beide Richtungen, was sich im Felsgestein im Allgemeinen als weniger effizient gegenüber einem Schneidekopf für eine Drehrichtung herausgestellt hat,
- Materialauslassöffnungen im Schneidrad für Boden sind im Festgestein weniger wirksam und umgekehrt (Bild 4),

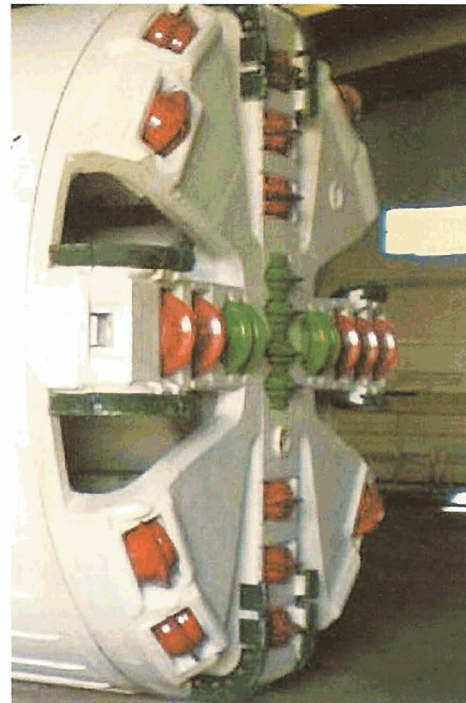


Fig. 4. Cutter head openings designed for soil (face) and rock (peripheral)

Bild 4. Bohrkopföffnungen für Boden (Oberfläche) und Gestein (Umfang)

- A disproportionate impact of forward progress by the hardest vs. the softest material in the face,
- Required (manual) reduction of thrust and torque to prevent eccentric loadings of the cutter head, and
- Restricted muck flow by the screw conveyor.

Furthermore, one manufacturer imposes severe and obstructive limitations through the on-board programmable logic chips (PLC). The major limitations affect the operating:

- Thrust (cutter normal load) and
- Cutter head torque (cutter tangential load).

Furthermore, these limitations cannot be changed in the field by the owner of the equipment. On one project, these limitations have had a monumental impact on TBM performance as summarized in Fig. 5 (note logarithmic scale).

Limitations of thrust and torque forces have been imposed on both rock and mixed face machines. For example, grooves produced by cutters having inadequate (limited) cutter loads are nearly half of the predicted groove depth based on the available cutter loads. Furthermore, cutter head crowding of the rock face (see Fig. 3) inhibits muck evacuation and full possible penetration into the rock. Shallow penetration because of limited cutter load and cutter head crowding of the rock face is illustrated in Fig. 3, accounting for performance that was far below expectations (note logarithmic scale).

There are scores of additional variables that have limitations that cannot be determined directly or quantitatively, these relationships are poorly defined, nevertheless, they cannot be ignored.

3 Proposed methodology for establishing anticipated TBM performance

3.1 Estimating penetration rates

The penetration rate is defined as:

penetration rate [m/h] = length of tunnel/machine time

Instantaneous penetration rate [mm/revolution] = tunnel length cut per cutter head revolution

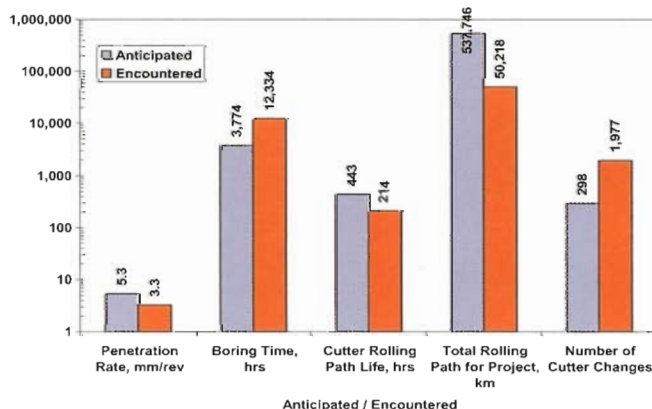


Fig. 5. Consequence of artificially imposed limitations of TBM forces

Bild 5. Folgen künstlich auferlegter Beschränkungen von TBM Kräften

- Förderschnecken haben eine einengende und begrenzende Wirkung auf das ungehinderte Abfordern des Haufwerks.
- Beim Vortrieb in Mischböden erfordert der gleichzeitige Abbau von weichen Böden und hartem Gestein eine manuelle Steuerung wegen:
- Unverhältnismäßigem Einfluss des härtesten Materials in der Ortsbrust auf den Vortrieb,
- Benötigter (manueller) Verringerung des Andrucks und des Drehmoments, um außermittige Belastungen des Bohrkopfs zu vermeiden und
- Eingeschränktem Materialabfluss durch die Förderschnecke.

Darüber hinaus schafft ein Hersteller durch die vollelektronische Steuerung schwerwiegende und äußerst einengende Beschränkungen. Die Haupteinschränkungen beeinträchtigen den Betrieb in Bezug auf:

- Vorschubkraft und
- Drehmoment.

Diese Einschränkungen können durch den Betreiber der Maschine vor Ort nicht verändert werden. Bei einem Projekt hatten diese Einschränkungen einen erheblichen Einfluss auf die Leistungen der TBM, wie in Bild 5 zusammenfassend dargestellt (die logarithmische Skalierung ist zu beachten).

Beschränkungen der Vorschubkraft und des Drehmoments wurden bei Maschinen sowohl für Mischböden als auch für Gestein eingeführt. Bei nicht ausreichender (limitierter) Meißelandruckkraft wird beispielsweise nur etwa die Hälfte der auf Basis der verfügbaren Meißelandruckkraft prognostizierten Penetration erreicht. Darüber hinaus verhindert das „Vollpacken“ des Bohrkopfs (cutter head crowding) die Abförderung des Bohrguts an der Ortsbrust (vgl. Bild 3). Die geringe Penetration aufgrund begrenzter Meißelandruckkräfte und des „Vollpackens“ des Bohrkopfs (cutter head crowding) ist in Bild 5 dargestellt; es ist deutlich, dass die erreichten Leistungen weit unter den Erwartungen lagen (die logarithmische Skalierung ist zu beachten).

Es gibt zahlreiche zusätzliche Variablen, die Einschränkungen verursachen und nicht direkt oder quantitativ bestimmt werden können. Diese Abhängigkeiten sind

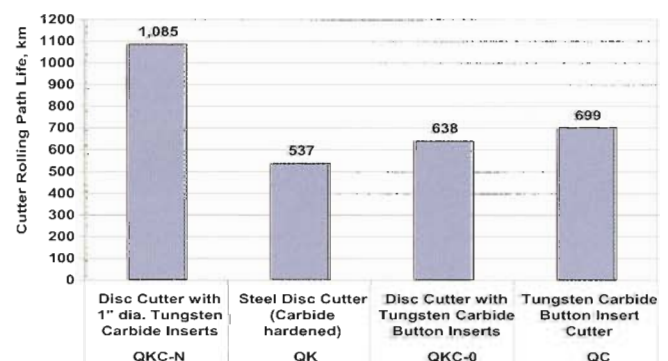


Fig. 6. Experience with multiple disc and multiple disc carbide insert cutters

Bild 6. Erfahrungen mit verschiedenen Diskenmeißeln und verschiedenen Hartmetallbestückungen

Table 2. TBM specifications required for estimating rate of penetration and cutter consumption

Tabelle 2. Erforderliche TBM-Maßangaben zur Abschätzung der Penetrationsrate und des Meißelverbrauchs

TBM diameter	m
Cutter diameter	mm
Maximum gauge velocity	m/min
Actual cutter head rotation	rpm
Maximum allowable cutter head rotation	rpm
Number of cutters	#
Nominal cutter spacing	mm
Rated cutter load	Kg
Average operating cutter load	Kg
Cutter head rolling path	m/rev

Table 3. Summary of geotechnical variables used for estimating rate of penetration

Tabelle 3. Zusammenfassung der geotechnischen Parameter zur Abschätzung der Penetrationsrate

Instantaneous penetration via H_T	mm/rev
Average penetration based on H_T	m/hr
Instantaneous penetration via UCS	mm/rev
Average penetration based on UCS	m/hr

Prediction of penetration rates for mixed face systems is less than straightforward and we know of no credible method that defines this process. Furthermore, penetration is no longer the crucial element for estimating overall TBM advance rate. Nevertheless, it is still necessary to have a general idea of the magnitude of possible penetration rates. However, it is only necessary to predict rock penetration rates using a simple method that will provide a general order of magnitude between 1 to 10 m/h. The TBM specifications required to estimate penetration rates are summarized in Table 2. These TBM specifications are incorporated with the geotechnical variables summarized in Table 3 to estimate penetration rates for the rock.

For soil excavation, however, predicting the penetration rate from the material becomes moot. It will generally depend on the mucking capacity more than any other factor. In mixed face excavation, either the rock Total Hardness or the mucking capacity will control and will require judgment.

A simple and adequate method of evaluation of anticipated penetration rates for the most resistant material in the face can be used, such as the relationship between Total Hardness, machine variables, and penetration rates [15] [18] [20] [21] [24] [26] [27].

3.2 Estimating downtime and TBM Utilization

Estimating downtime is largely an exercise using past experience (statistical), calculation of time to perform functions that stop TBM operation, and a well educated guess.

unzureichend definiert, können aber dennoch nicht ignoriert werden.

3 Methodik zur Ermittlung erwartbarer TBM-Leistungen

3.1 Abschätzung der Vortriebsgeschwindigkeiten

Die Penetrationsrate ist definiert als:

Penetrationsrate [m/h] = Länge des Tunnels/Maschinenzeit

Momentane Penetrationsrate [mm/Umdrehung] = Eindringtiefe des Meißels pro Umdrehung des Bohrkopfs

Die Voraussage der Penetrationsraten in Mischböden ist weit weniger geradlinig, und bisher ist keine zuverlässige Methode bekannt, die diesen Prozess definiert. Darüber hinaus ist die Penetration nicht mehr das ausschlaggebende Element für die Abschätzung Gesamtvortriebsgeschwindigkeit der TBM. Trotzdem benötigt man eine allgemeine Vorstellung der Größenordnung möglicher Penetrationsraten. Hierfür reicht die Anwendung einfacher Methoden aus, die eine Größenordnung zwischen 1 und 10 m/h liefern. Die für die Schätzung der Penetrationsraten benötigten TBM-Parameter sind in Tabelle 2 zusammengefasst. Diese Angaben dienen in Verbindung mit den in Tabelle 3 zusammengefassten geotechnischen Parametern der Abschätzung der Penetrationsraten im Fels.

Beim Vortrieb im Lockergestein wird die Voraussage der Penetrationsrate aufgrund des Materials jedoch fraglich. Sie wird im Allgemeinen eher von der Abförderkapazität als von irgendeinem anderen Faktor abhängen.

Bei Mischböden wird entweder die Gesamthärte des Gesteins oder die Abförderkapazität maßgebend. Für die Bewertung der zu erwartenden Penetrationsraten für das widerstandsfähigste Material kann eine einfache Methode verwendet werden wie die Beziehung zwischen Gesamthärte, Maschinenparametern und Penetrationsraten [15] [18] [20] [21] [24] [26] [27].

3.2 Abschätzung der TBM-Ausnutzung und der Stillstandzeiten

Die Schätzung der Stillstandzeiten ist größtenteils eine Aufgabe, die auf (statistischen) Erfahrungswerten aus der Vergangenheit, der Zeiterfassung der Arbeitsabläufe, die den TBM-Betrieb unterbrechen, und einer wohlbegründeten Schätzung beruht. Das wahre Ziel ist jedoch, die Stillstandzeit soweit wie möglich durch die Auslegung der Maschine, des Ausbaus und des Nachläufers, das Zusammenspiel der Mannschaft und eine leistungsfähige Projektleitung zu verhindern.

Zeiten, in denen die TBM nicht in Betrieb ist oder keine Maschinenlaufzeiten aufgezeichnet werden, werden als Stillstandzeiten bezeichnet. Es gibt grundsätzlich drei allgemeine Kategorien:

- Stillstandzeiten in Abhängigkeit von der Tunnellänge,
- Stillstandzeiten in Abhängigkeit von der Zeit und
- Sonstige Stillstandzeiten.

In jeder Stillstandskategorie können geotechnische, maschinenabhängige oder bedienungsbedingte Gründe ursächlich sein.

However, the real objective is to eliminate as much of the downtime as possible by machine design, ground support design, backup system design, orchestration of labor, and effective project management.

At times when the TBM is not operating or recording machine time, it is called TBM downtime. There are fundamentally, three general categories of downtime, as follows:

- Tunnel length dependent,
- Time dependent, and
- Other downtime.

Each of the foregoing may depend on geotechnical, machine, and/or operational causes.

Längenabhängige Stillstandzeiten treten auf als Auswirkungen von:

- Umsetzen der Gripper,
- Meißelwechsel,
- Verlängerung der Ver- und Entsorgung,
- Einbringen des Ausbaus,
- Verzögerungen durch Materialabfuhr,
- Sonstige Tätigkeiten.

Diese Stillstände treten im Regelbetrieb auf und stehen in direktem Bezug zur Länge des gebohrten Tunnels.

Zeitabhängige Stillstandzeiten treten üblicherweise als Folge des Ablaufs von zeitlichen und sich wiederholenden Vorgängen auf, wenn die Maschine infolge von Pau-

Table 4. Summary of downtimes and source of calculations
Tabelle 4. Zusammenfassung der Stillstandzeiten und Berechnungsquellen

Variable	Unit	Source	Method of control
TBM R&M	min/shift	Statistical	Can be minimized
Hydraulics	min/shift	Statistical	Can be minimized
re-stroke	min/shift	Calculated	
Backup downtime			
Backup R&M	min/shift	Statistical	Can be minimized
Extension of utilities	min/shift	Statistical	Can be eliminated by design
Extension of power cable	min/shift	Statistical	Can be eliminated by design
Maintenance of utilities	min/shift	Statistical	
Mucking system			
Tunnel conveyor	min/shift	Statistical	Can be minimized by design
Conveyor	min/shift	Statistical	Can be minimized by design
Derailments	min/shift	Statistical	Can be minimized by design
Train delays	min/shift	Statistical	Can be minimized by design
Shaft delays	min/shift	Statistical	Can be minimized by design
Survey/engineering/align	min/shift	Statistical	
Geological downtime			
Rock fallout	min/shift	Statistical	Can be eliminated by design
Gripper bearing	min/shift	Statistical	Can be eliminated by design
Cutter change	min/shift	Calculated	Can be minimized by design
Cutter check	min/shift	Calculated	
Gas and testing	min/shift	Calculated	Can be minimized by design
Probe drilling	min/shift	Calculated	Can be minimized by design
Support	min/shift	Calculated	Can be minimized by design
Water inflow	min/shift	Statistical	
Other downtime			
Safety meeting	min/shift	Statistical	Can be eliminated by design
Shift change & travel time	min/shift	Calculated/Statistical	Can be eliminated by design
Lunch	min/shift	Calculated/Statistical	Can be eliminated by design
Unexpected downtime	min/shift	Statistical	
Learning curve	min/shift	Calculated	Can be minimized by design

Table 5. Summary of additional considerations for TBM downtime

Tabelle 5. Zusammenfassung zusätzlicher Betrachtungen von TBM Stillstandzeiten

Excavation-Support-Drill-Grout			
Support time	shifts	Statistical	Can be minimized and eliminated
Hand mining	shifts	Calculated	
Total tunnel length grouted	m	Calculated	
Grouting rate	m/shift	Statistical/ Experience	
Grouting	shifts	Calculated	
Drill grout holes	shifts	Calculated	
Excavation, support, probe, and grout	shifts	Calculated	

Length-dependent downtimes occur as a function of:

- TBM re-gripping,
- Cutter changes,
- Extension of utilities,
- Installation of ground support,
- Mucking delays, and
- Other activities.

The foregoing is typical and directly related to the length of tunnel bored.

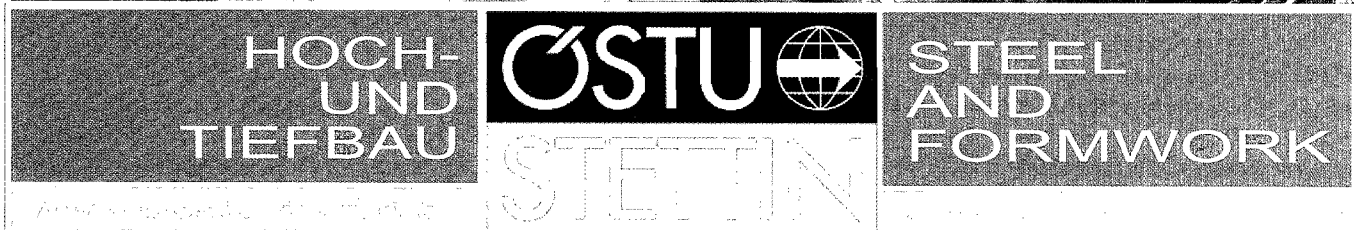
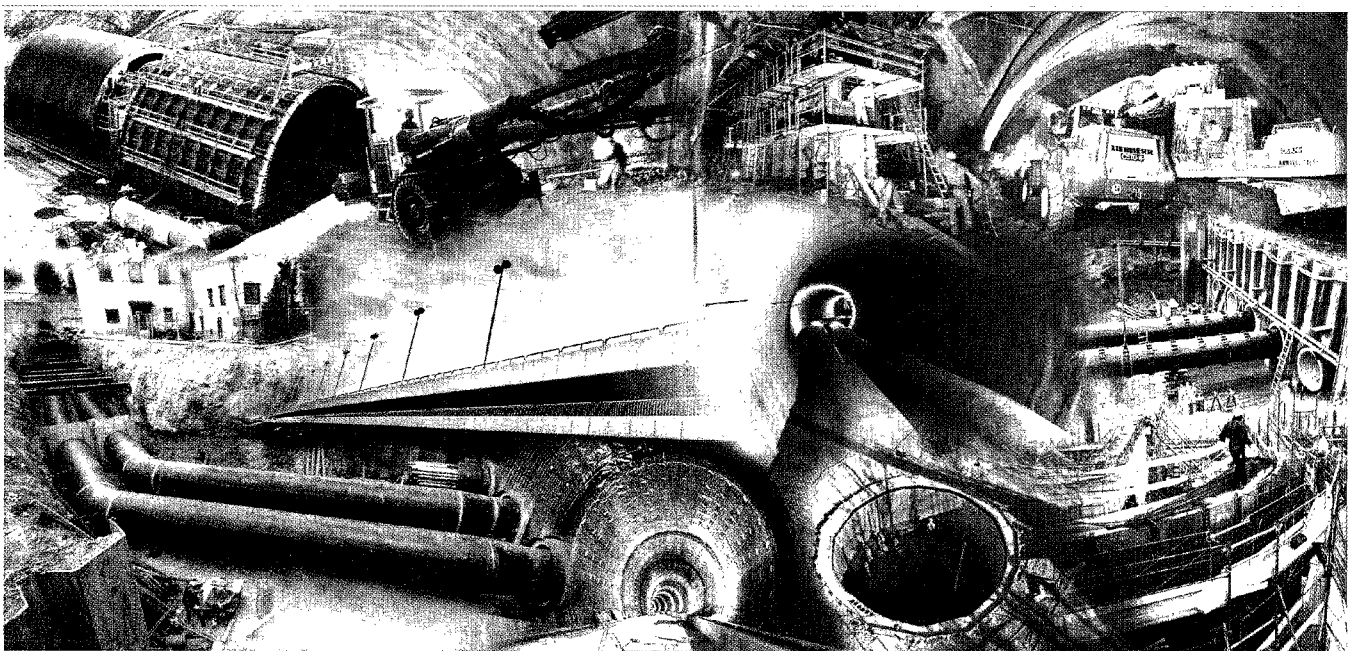
Time-dependent downtimes occur typically as a consequence of the passing of time and time cyclic activities when the machine is unavailable for boring as a result of meal times, shift change, and scheduled maintenance based on time.

senzeiten, Schichtwechseln und turnusmäßigen Wartungen nicht für Bohrtätigkeiten verfügbar ist.

Sonstige Stillstandzeiten können durch unerwartete Maschinenausfälle, unerwartete menschliche Ursachen, unvorhersehbare Bedingungen und zufällige Ereignisse verursacht werden. Naturgemäß können diese nicht, außer durch statistische oder auf Erfahrungen aus der Vergangenheit beruhende Methoden, vorausgesehen werden.

TBM-Stillstandzeiten werden im Allgemeinen in Minuten pro Schichtdauer aufgezeichnet und die Ausnutzung wird wie folgt berechnet:

TBM-Ausnutzung [%] = Maschinenbetriebszeit/Schichtdauer



Other downtime may be caused by unexpected failures, unexpected human causes, unanticipated conditions, and random events. Inherently, these cannot be predicted except by statistical or past experience methods.

TBM downtime is generally reported in minutes during shift time and the TBM utilization is calculated as follows:

TBM utilization [%] = machine operating time/shift time

The most common elements of downtime considered and the basis of estimates (calculated or statistical experience) are summarized in Table 4. Additional possible excavation delays associated with particularly unusual geological conditions are summarized in Table 5.

Some downtimes are normally dependent on machine and system design. As such, these downtimes can be eliminated or at least minimized. One such example is downtime due to mucking. When mucking is accomplished with a muck train, the sizing of the system and the switching system of trains (single or double track gantry) will have a considerable effect on downtime and must be taken into account as summarized in Table 6. The choice of mucking by conveyor will produce downtimes associated with system failures, wear and tear of the belts, and subsequent required conveyor system repair.

3.3 Estimating advance rates

Advance rates are calculated based on penetration, downtime, shift hours, and TBM utilization. The TBM advance rate is defined as follows:

advance rate [m/shift] = penetration rate [m/h] × shift hours × TBM utilization

If the calculated advance rate is unacceptable, downtimes may be eliminated or at least minimized by system redesign and thus improve the possibilities for higher advance rates.

One TBM manufacturer predicts a given cycle time to excavate (penetrate) and a cycle time to build a pre-cast concrete ring. The excavation cycle time is average and conservative. To achieve higher penetration rates it is essential to provide a system which can handle double the average rates of muck removal. Naturally, the machine manufacturer's support erection cycle times are conservative and can be bettered by the contractor with a fine tuned operation, as they often are.

3.4 Estimating cutter consumption

Cutter consumption estimates are most effective if based on the most recent experience related to rock properties. With improvement of bearing, seal, and wear technologies, recent cutters on the market have increased wear life by as much as 30% over competitor's previous technology. An estimate using old technology might be excessively conservative.

A study of cutter wear in the hard and abrasive rock of New York City over 36 years ago revealed that tungsten carbide insert cutters lasted about twice as long and cost

Die am weitesten verbreiteten Faktoren der berücksichtigten Stillstandzeiten und die Grundlage der Abschätzung (berechnet oder gemäß statistischer Erfahrung) sind in Tabelle 4 zusammengefasst. Zusätzliche mögliche Vortriebsverzögerungen im Zusammenhang mit besonders ungewöhnlichen geologischen Bedingungen sind in Tabelle 5 zusammengestellt.

Einige Stillstandzeiten sind normalerweise abhängig von der Auslegung der Maschine und des Systems. Diese Stillstandzeiten können vermieden oder zumindest minimiert werden. Ein entsprechendes Beispiel ist die Stillstandzeit aufgrund der Materialabfuhr. Wenn die Materialabfuhr mithilfe eines Schutterzugs durchgeführt wird, werden die Auslegung des Systems und das Rangiersystem (ein- oder zweispurige Verladebahnen) einen beträchtlichen Einfluss auf die Stillstandzeiten haben und müssen – wie in Tabelle 6 zusammengefasst – berücksichtigt werden. Die Wahl von Förderbändern zur Materialabfuhr wird Stillstandzeiten im Zusammenhang mit Systemausfällen, Verschleiß und Bandrissen sowie nachfolgenden notwendigen Reparaturen der Bandanlage erzeugen.

3.3 Abschätzung der Vortriebsgeschwindigkeiten

Vortriebsgeschwindigkeiten werden auf Grundlage von Penetration, Stillstandzeiten, Schichtdauer und TBM-Ausnutzung berechnet. Die Vortriebsgeschwindigkeit der TBM ist wie folgt definiert:

Vortriebsgeschwindigkeit [m/Schicht] = Penetrationsrate [m/h] × Schichtdauer × TBM-Ausnutzung

Wenn die berechnete Fördergeschwindigkeit nicht akzeptabel ist, kann eine Überarbeitung der Systemauslegung die Möglichkeiten für höhere Vortriebsgeschwindigkeiten verbessern.

Der TBM-Hersteller gibt eine Zykluszeit für den Ausbruch (Vortrieb) und eine Zykluszeit für das Setzen des Stahlbetontübbingrings an. Die Zykluszeit für den Ausbruch (Vortrieb) ist durchschnittlich und konservativ. Um höhere Penetrationsraten zu erreichen, ist es von grundlegender Bedeutung, ein System zur Verfügung zu haben, das in der Lage ist, auch das doppelte Ausbruchvolumen abzufördern. Die vom Maschinenhersteller angegebenen Zykluszeiten für das Einbringen des Ausbaus sind konservativ und können, wie in der Praxis oft der Fall, vom Kunden durch gut aufeinander abgestimmte Abläufe verbessert werden.

3.4 Abschätzung des Meißelverbrauchs

Die Schätzung des Meißelverbrauchs ist am besten, wenn sie auf den neuesten Erfahrungen bezüglich der Gesteinseigenschaften basiert. Durch die Verbesserung der Lager, Dichtungen und des Verschleißes wurde die Haltbarkeitsdauer der neuesten auf dem Markt verfügbaren Meißel um 30 % gegenüber der vorhergehenden Technik der Wettbewerber gesteigert. Eine Schätzung auf Grundlage alter Techniken könnte deshalb übermäßig konservativ ausfallen.

Eine Studie zum Meißelverschleiß im harten und abrasiven Gestein von New York City zeigte vor über 36 Jahren, dass Meißel mit Hartmetalleinsätzen ungefähr dop-

twice as much as the hardened steel cutters (Fig. 6). Insofar as hardware costs, neither had an advantage. However, use of the tungsten carbide insert cutters had double the life, required half the number of cutter changes resulting in a savings in labor costs, and reduced time delay.

Methods of cutter rolling path prediction based on methods compiled by *Duri Prader* and reported at the Mechanical Boring or Drill and Blast Tunnelling Workshop (1976) [4] were further developed and defined [14]. These methods are still effective and currently utilized. However, the highly variable advance rates, inconsistent character of a traverse through mixed ground, and cutters immersed in abrasive soils (sands, gravel, cobbles, residual soils), would require some modification of these methods based on specific and similar experience. The required data for calculating cutter consumption is summarized in Table 7. A performance summary should provide the results as illustrated in Table 8.

4 Conclusion

Neither the penetration rate nor the TBM utilization rate is ever achieved as predicted, therefore the achieved advance rate shall vary from those predicted. Since the relationship between intact rock properties and penetration is relatively well defined, predictions tend to be more accurate. Utilization is based on experience, calculated cycle times, and a great deal of professional judgment.

Our personal experience is that penetration usually varies by $\pm 5\%$ and TBM utilization varies $\pm 20\%$ and commonly more. As such, the utilization will have five times as much impact on advance rates than the penetration. Consequently, the precise predictions of penetration rates become rather minor compared to the prediction of utilization which becomes crucial and requires a directed effort to achieve.

As we have said throughout our career, prediction of TBM excavation performance should be designed to be at cause rather than at effect. In other words, we as tunneling professionals should cause the desired excavation performance by foresight, by design, by planning, and by management. With this in mind, average and conservative estimates of performance can consistently be exceeded.

The material character is the independent variable, let us take our place as professionals, and limit to what extent the adverse effects are allowed to impact performance by design and management.

References

- [1] Dietl, B. & Tarkoy, P.J.: A Study of Rock Hardness and Tunnel Boring Machine Advance Rates in Manhattan Schist. Tunneling Technology Newsletter 3/1973, pp. 4–9.
- [2] Dietl, B. & Tarkoy, P.J.: Étude de la Dureté des Roches et des Vitesses d'Avancement d'Une Machine Foreuse dans les Schistes de Manhattan. Tunnels et Ouvrages Souterrains 2/1974, pp. 97–99.
- [3] McCusker, T.G. & Dietl, B.: Small Diameter Tunnels in Manhattan Schist. Proceedings, 2nd RETC, pp. 265–282. AIME, San Francisco, 1974.
- [4] McCusker, T.G. & Almgren, G.: Mechanical Boring or Drill & Blast Tunnelling. First US-Swedish Underground Workshop. Stockholm, December 5–10, 1976.

Table 6. Muck volume produced and mucking system requirements to maintain performance

Tabelle 6. Ausbruchvolumen und Anforderungen an das Schuttersystem zur Aufrechterhaltung der Leistung

Stroke length	M
Stroke length	Ft
Tunnel diameter	M
Tunnel diameter	Ft
Face area	sq m
Excavated volume	CM/m
Swell factor	
Muck volume	CM/m
Shove volume	CM/shove
Car capacity	CM
Number of cars	#
Train capacity	CM
Trains for shove	#
Anticipated penetration	m/hr
Anticipated muck	CM/hr
Train rate	Trains/hr
Train velocity	m/hr
Switch trains	Min
Train roundtrip travel time	Min
Train dump time	Min
Total train cycle time	Min
Train fill rate	Min
Number of trains required	#

pelt so lange halten und ungefähr das Doppelte von Meißeln aus gehärtetem Stahl kosten (Bild 6). In Hinblick auf die Werkzeugkosten hatte kein System einen Vorteil. Jedoch ermöglichte die Verwendung von Meißeln mit Wolframkarbideinsätzen die doppelte Lebensdauer, erforderte die Hälfte der Anzahl von Meißelwechseln, wodurch eine Reduzierung von Personalkosten und Zeitverzögerungen erzielt wurde.

Die Methoden zur Abschätzung des Rollwegs von Diskenmeißeln, die auf den von *Duri Prader* zusammengestellten und auf dem Tunnelbau-Workshop „Mechanisier-tes Bohren oder Bohren und Sprengen“ [4] vorgestellten Verfahren beruhen, wurden weiterentwickelt und festgelegt [14]. Diese Methoden sind immer noch gültig und werden gegenwärtig verwendet. Jedoch würden die höchst unterschiedlichen Vortriebsgeschwindigkeiten, die unbe-

- [5] *NTH*: Hard Rock Tunnel Boring. Project Report 1-94.
- [6] *NTNU*: Hard Rock Tunnel Boring Advance Rate and Cutter Wear. Project Report 1B-98.
- [7] *Prader, D.*: Boring of Tunnels: Remark on Borability. First US-Swedish Underground Workshop Stockholm, December 5-10, 1976.
- [8] *Tarkoy, P.J.*: Predicting Tunnel Boring Machine (TBM) Penetration Rates and Cutter Costs in Selected Rock Types. Proceedings of the 9th Canadian Rock Mechanics Symposium, Montreal, December 13-15, 1973, pp. 263-274. Mines Branch, Department of Energy, Mines and Resources, Ottawa, 1974.
- [9] *Tarkoy, P.J.*: Rock Index Properties to Predict Tunnel Boring Machine Penetration Rates. In Pattison & D'Appolonia, E. (eds.): Proceedings Rapid Evacuation and Tunneling Conference. Society of Mining Engineers of the American Institute of Mining, Metallurgical, and Petroleum Engineers, New York, 1974.
- [10] *Tarkoy, P.J.*: A Study of Rock Properties and Tunnel Boring Machine Advance Rates in Two Mica Schist Formations. In Hoskins (ed.): Applications of Rock Mechanics. Proceedings, Fifteenth Symposium on Rock Mechanics, Custer State Park, South Dakota, September 1973, pp. 415-447. American Society of Civil Engineers, New York, 1975.
- [11] *Tarkoy, P.J.*: Rock Hardness Index Properties and Geotechnical Parameters for Predicting Tunnel Boring Machine Performance. Ph.D. Thesis, University of Illinois, 1975.
- [12] *Tarkoy, P.J. & Hendron, A.J. jr.*: Rock Hardness Index Properties and Geotechnical Parameters for Predicting TBM Performance. Final Report of NSF RANN Research Grant GI-36468. 1976.
- [13] *Tarkoy, P.J.*: Discussion of: Importance of Groove Spacing in Tunnel Boring Machine Operations by P. Rad. J. of the Geotechnical Engineering Division, Proceedings of the American Society of Civil Engineers 102 pp. 1122-1124. October, 1976.
- [14] *Tarkoy, P.J.*: Notes and materials from the preparation of McCusker, T.G. and Almgren, G. (1977), Mechanical Boring or Drill & Blast Tunnelling paper.
- [15] *Tarkoy, P.J.*: Predicting Raise and Tunnel Boring Machine Performance: State of the Art. In Maevis & Hustrulid (eds.): Proceedings Rapid Evacuation and Tunneling Conference, Atlanta, GA, June 18-21, pp. 333-352. Society of Mining Engineers of the American Institute of Mining, Metallurgical, and Petroleum Engineers, New York, 1979.
- [16] *Tarkoy, P.J.*: Tunnel Boring Machine Performance as a Function of Local Geology. Bulletin Association of Engineering Geologists 18 (1981), No. 2, pp. 169-186.
- [17] *Tarkoy, P.J.*: Selecting Used Tunnel Boring Machines: The Pros and Cons. Tunnels and Tunneling 15 (1983), No. 12, pp. 20-25.
- [18] *Tarkoy, P.J.*: Practical Geotechnical and Engineering Properties for Tunnel-Boring Machine Performance Analysis and Prediction. Transportation Research Record 1087, Durability, Strength, and Analysis of Culverts and Tunneling machines, pp. 62-78. Transportation Research Board, National Research Council, Washington, D.C. 1986.
- [19] *Tarkoy, P.J.*: The Stuff that Claims Are Made Of. World Tunneling 1 (1988), No. 3, pp. 249-253.
- [20] *Tarkoy, P.J. & Wagner, J.R.*: Backing up a TBM. Tunnels and Tunneling 20 (1988), No. 10, pp 27-32.
- [21] *Tarkoy, P.J.*: A Tale of Two Tunnel Bores. Proceedings International Congress on Progress and Innovation in Tunneling, Toronto, Canada, September 9-14, 1989, pp 1045-1051.
- [22] *Tarkoy, P.J. & Byram, J.E.*: The advantages of Tunnel Boring: A Qualitative/Quantitative Comparison. Nankang-Ilan Expressway Engineering Bureau, Taiwan, Special Seminar on Tunnel Boring, August 31, 1990.

Table 7. Detail of data required for estimating cutter consumption

Tabelle 7. Einzelheiten der zur Schätzung des Meißelverbrauchs benötigten Daten

Cutter rolling path Life	km
Cutter replacement cycle (revs)	TBM revs
Cutter replacement cycle (time)	TBM hrs
Cutter replacement rate	LM Tunnel/cutter
Total number of cutter changes	Number
Cutter change time	min/cutter
Total cutter change time	Hours
Disk/ring-hub ratio	
Cutter hub and bearing usage rates	#/feet
Cutter disk usage rates	#/feet
Cost of one disk ring	US\$
Cost of one hub	US\$
Total cutter cost	US\$
Total cutter cost	per LF per CY
Total cutter cost	per LM
Total cutter cost	Per Cubic Meter
Stroke length	M

Table 8. Summary of estimated performance

Tabelle 8. Zusammenfassung der geschätzten Leistung

Total downtime	min/shift
Total machine time	hours
Average penetration rate	ft/hr
Average penetration rate	m/hr
Utilization	
Rate of advance	ft/shift
Rate of advance	m/shift
Rate of advance	ft/day
Rate of advance	m/day

ständige Beschaffenheit einer Trasse im Mischboden und das Eintauchen der Disken in abrasiven Böden (Sand, Kies, Geröll, Verwitterungsboden) eine Modifikation dieser Methoden auf Basis von spezifischen und ähnlichen Erfahrungen erfordern. Die für die Berechnung des Meißelverbrauchs benötigten Daten sind in Tabelle 7 zusammengefasst. Eine Leistungszusammenfassung sollte die in Tabelle 8 dargestellten Ergebnisse liefern.

4 Schlussfolgerungen

Weder die Penetrationsrate noch der TBM-Ausnutzungsgrad werden jemals wie vorausgesagt erreicht; deshalb wird die erreichte Vortriebsgeschwindigkeit von der vorhergesagten abweichen. Da der Zusammenhang zwischen

- [23] Tarkoy, P.J. & Byram, J.E.: The Advantages of Tunnel Boring: A Qualitative/Quantitative Comparison of D&B and TBM Excavation. Hong Kong Engineer 19 (1991), No. 1, pp 30-36.
- [24] Tarkoy, P.J.: Appropriate Support Selection, Tunnels and Tunneling 23 (1991), No. 10, pp 42-45.
- [25] Tarkoy, P.J. & Marconi, M.: Difficult Rock Comminution and Associated Geological Conditions. Tunnelling 91, Sixth International Symposium, 14-18 April 1991, Institute of Mining and Metallurgy, Elsevier Applied Sciences, London, pp. 195-207.
- [26] Tarkoy, P.J.: Rock Mass Rating Systems: to use or not to use?, Tunnels and Tunneling 27 (1995), No. 5, pp 38-40.
- [27] Tarkoy, P.J.: Use of Rock Mass Rating Systems in Bored Tunnels. 13th Canadian Tunneling conference, Montreal, 18-20 Oct., 1995.
- [28] Tarkoy, P.J.: Comparing TBMs with drill and blast excavation. Tunnels and Tunneling 27 (1995), No. 10, pp 41-44.
- [29] Tarkoy, P.J.: Analysis of Differing Site Conditions on the 48" Water Main Across the Bronx River at Watson Ave City of New York, Department of Design and Construction, Division of Infrastructure, Bureau of Design Contract HED-502, 2004.

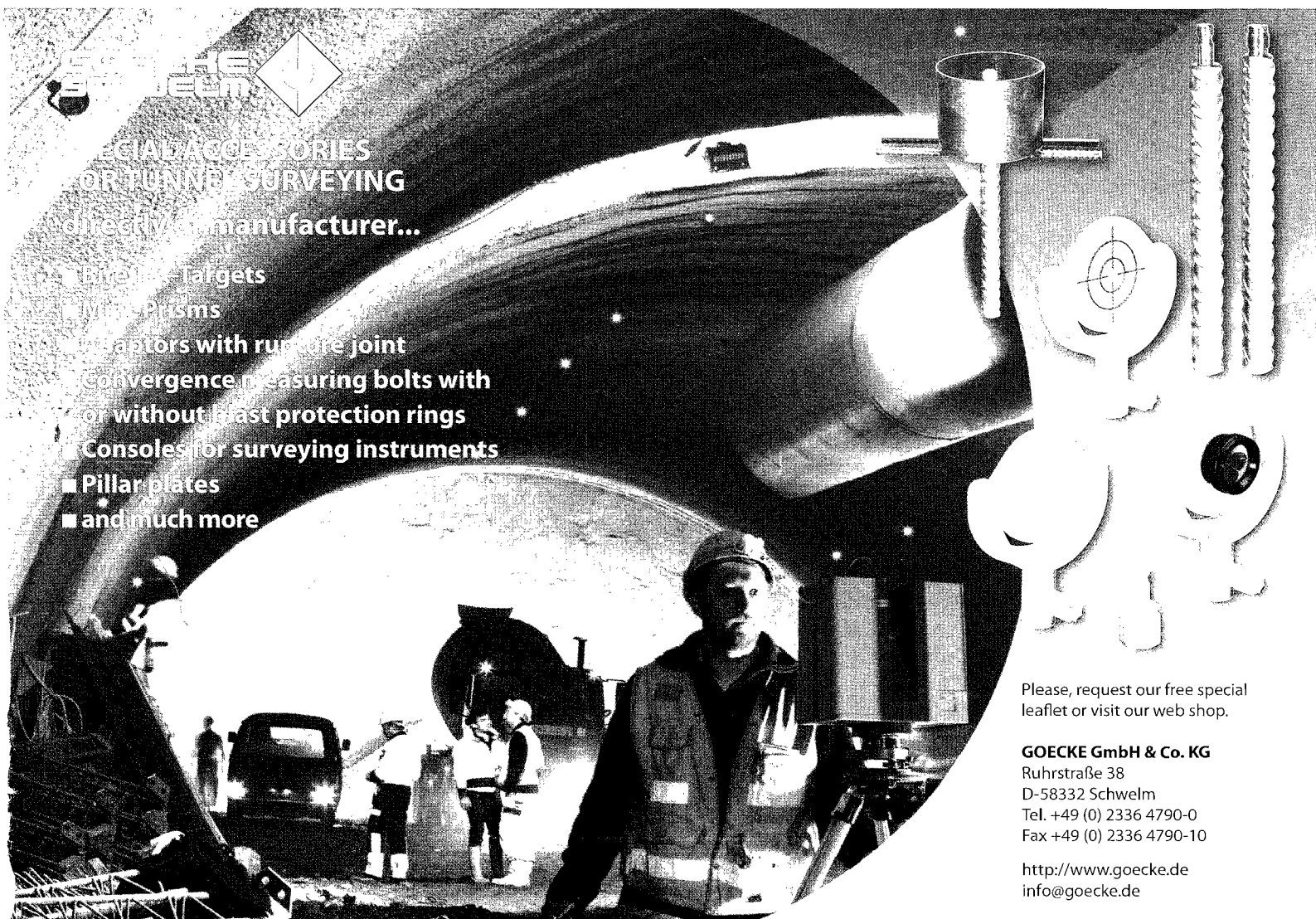
Peter J. Tarkoy, Ph.D.
GeoConSol, dba
176 Western Avenue
Sherborn, MA 01770
USA
PJT@GeoConSol.Com

den Eigenschaften von ungestörtem Gestein und Penetration relativ eindeutig ist, tendieren Voraussagen dazu zutreffender zu sein. Die Ausnutzung basiert auf Erfahrungswerten, berechneten Zykluszeiten und größtenteils auf fachmännischer Beurteilung.

Nach der persönlichen Erfahrung des Autors schwankt die Penetration gewöhnlich um $\pm 5\%$, die TBM Ausnutzung um $\pm 20\%$. Somit wird die Ausnutzung einen fünfmal größeren Einfluss als die Penetration auf die Vortriebsgeschwindigkeiten haben. Infolgedessen sind genaue Voraussagen über Penetrationsraten eher unbedeutend im Vergleich zu der Voraussage der Ausnutzung, die ausschlaggebend wird und eine zielgerichtete Anstrengung erfordert, um erreicht werden zu können.

Die Voraussage der TBM-Vortriebsleistung sollte eher als Grundlage als zur Schlussfolgerung herangezogen werden, d.h. die Tunnelbauer sollten die gewünschte Ausbruchleistung durch Vorausschau, Auslegung, Planung und Projektleitung herbeiführen. Damit können durchschnittliche und konservative Leistungsveranschlagungen durchweg übertroffen werden.

Die Eigenheit des Baugrunds ist die unabhängige Variable. Die Tunnelbauer sollten das Ausmaß begrenzen, mit dem ungünstige Einflüsse die Leistung beeinträchtigen.



Goecke GmbH & Co. KG
SPECIAL ACCESSORIES
FOR TUNNEL SURVEYING
directly from manufacturer...

- Borehole Targets
- Prism
- Adaptors with rupture joint
- Convergence measuring bolts with
- or without blast protection rings
- Consoles for surveying instruments
- Pillar plates
- and much more

Please, request our free special leaflet or visit our web shop.

GOECKE GmbH & Co. KG
Ruhrstraße 38
D-58332 Schwelm
Tel. +49 (0) 2336 4790-0
Fax +49 (0) 2336 4790-10
<http://www.goecke.de>
info@goecke.de