

Penetration, Meißelverschleiß und Vortriebsgeschwindigkeit für TBM-Vortriebe im Festgestein

Em. Univ. Prof. E. Schneider, Dr. M. Spiegl, M. Türtscher, Dr. W. Leitner

Leistungsprognosen sind eine wesentliche Grundlage für die Kostenermittlung und Ablaufplanung von Bauprojekten. Im Tunnelbau ist die Vortriebsleistung, die wegen ihrer physikalischen Dimension [m/d] in den österreichischen Untertagebaunormen richtigerweise als Vortriebsgeschwindigkeit bezeichnet wird, die entscheidende Leistungsgröße. Der folgende Beitrag betrachtet die Möglichkeiten einer entsprechenden Prognose.

1 Einleitung

Eine möglichst zutreffende Prognose der Vortriebsgeschwindigkeit ist insbesondere bei langen Tunneln bereits in

Em. Univ. Prof. Dipl. Ing. E. Schneider, Arbeitsbereich Baubetrieb, Bauwirtschaft und Baumanagement, Universität Innsbruck/A
Dipl. Ing. Dr. techn. M. Spiegl, Geschäftsführer SSP Bauconsult GmbH, Innsbruck/A
Dipl. Ing. M. Türtscher, Arbeitsbereich Baubetrieb, Bauwirtschaft und Baumanagement, Universität Innsbruck/A
Dipl. Ing. Dr. techn. W. Leitner, G. Hinteregger & Söhne, Baugesellschaft m.b.H., Salzburg/A

frühen Projektphasen von großer Bedeutung. Mit dem Näherücken der Realisierung wird für den Auftraggeber eine genaue Planung des Bauablaufs immer wichtiger, was eine noch genauere Prognose der Vortriebsgeschwindigkeit erfordert. Für die bauausführenden Firmen ist die Vortriebsgeschwindigkeit eine entscheidende Eingangsgröße für die Angebotskalkulation und für die Abschätzung des Terminrisikos.

Für konventionelle Vortriebe (in Österreich gemäß ÖNORM B2203-1 als zyklischer Vortrieb bezeichnet) hat sich mit der Berechnung über die Zyklusdauer ein bewährtes Verfahren zur Berechnung der Vortriebsgeschwindigkeit eingebürgert,

Penetration, cutter wear and rate of advance for TBM operations in hard rock

Em. Univ. Prof. E. Schneider, Dr. M. Spiegl, M. Türtscher, Dr. W. Leitner

Productivity forecasts are an essential basis for determination of costs and operational planning in construction projects. In tunnelling, tunnelling rate which, due to its physical dimension [m/d], is correctly referred to as „rate of advance“ in Austrian underground engineering standards, is the decisive productivity variable. The following examines the potentials for corresponding forecasting.

1 Introduction

The most accurate possible forecast of rate of advance is of great importance in early project phases, particularly in the case of long tunnels. As project implementation draws nearer, precise planning of the operational sequence begins to become ever more important for the client, and necessitates an even more accurate forecast of rate of advance. For the contractor, rate of advance is a decisive input factor for bid calculation and for estimation of the completion-time risk.

In the case of conventional tunnelling (referred to in Austria as cyclical tunneling in accordance with ÖNORM B2203, Part 1), a tried and proven pro-

cedure for calculation of rate of advance, the results of which generally fall within an acceptable bandwidth, has become established, in the form of calcula-

Em. Univ. Prof. Dipl. Ing. E. Schneider, Institute of Construction Management, University of Innsbruck/A
Dipl. Ing. Dr. techn. M. Spiegl, CEO of SSP Bauconsult GmbH, Innsbruck/A
Dipl. Ing. M. Türtscher, Institute of Construction Management, University of Innsbruck/A
Dipl. Ing. Dr. techn. W. Leitner, G. Hinteregger & Söhne, Baugesellschaft m.b.H., Salzburg/A



1 Von der Penetration zur Vortriebsleistung



1 From penetration to rate of advance

dessen Ergebnisse im Allgemeinen innerhalb einer akzeptablen Bandbreite liegen. Für maschinelle Vortriebe (in Österreich gemäß ÖNORM B2203-2 als kontinuierlicher Vortrieb bezeichnet) konnte sich bisher kein Standardberechnungsverfahren etablieren.

Wie bei Submissionen festgestellt werden kann, liegen die von den Bietern prognostizierten Vortriebsgeschwindigkeiten teilweise weit auseinander. Ähnlich verhält es sich mit den tatsächlich erzielten Vortriebsgeschwindigkeiten, die oft erheblich von den prognostizierten Werten abweichen. Diese Situation, die Lok Home (Präsident, The Robbins Company, USA) mit den Worten „Tolerance of inaccurate estimations is hurting our industry“ kritisiert [1], ist für alle Projektbeteiligten äußerst unbefriedigend. Im Folgenden werden die Ursachen für diesen Zustand untersucht und ein Berechnungsverfahren vorgestellt, das zu besseren Ergebnissen führt.

2 Grundlagen

Um Vortriebsleistungen für Tunnelbohrmaschinen in einer gegebenen Geologie berechnen zu können, muss zunächst die Penetration, ausgedrückt in mm Vortrieb pro Bohrkopfumdrehung, ermittelt werden.

Der nächste Schritt führt zur Nettobohrgeschwindigkeit, angegeben in m/h. Dazu wird die Penetration multipliziert mit der Drehzahl des Bohrkopfs – angegeben in Umdrehungen pro Minute – multipliziert mit 60 Sekunden dividiert durch 1000 mm.

Im nächsten Berechnungsschritt, der von der Nettobohrgeschwindigkeit zur Vortriebsgeschwindigkeit führt, müssen die Behinderungen, Störungen und Unterbrechungen des Bohrbetriebs berücksichtigt werden. Dies geschieht in vielen Fällen durch Multiplikation der Nettoleistung mit einem Ausnutzungsgrad [%], bei genauerer Berechnung durch Ansetzen von Stillstandszeiten in Minuten oder Stunden.

Als weiterer Faktor muss die Vortriebszeit, das ist die für den Vortrieb zur Verfügung stehende Arbeitszeit, in die Berechnung einfließen. Diese beträgt maximal 24 Stunden pro Arbeitstag. Wenn eine regelmäßige Wartungsschicht vorgesehen ist oder das Arbeitszeitmodell keinen 24-h-Betrieb erlaubt, beträgt die Vortriebszeit entsprechend weniger.

In Gesteinen mit einem hohen Anteil an abrasiven Mineralien spielt – zumindest in Tunneln mit großem Durchmesser – der Meißelverschleiß eine nicht zu unterschätzende Rolle.

tion via the cycle time. In the case of TBM-based tunnelling (referred to in Austria as continuous tunnelling in accordance with ÖNORM B2203, Part 2), no standard calculation procedure has up to now become established.

As can be observed from bids submitted, the rates of advance predicted by bidders in some cases diverge greatly. The same is also true of the rates of advance actually achieved, which frequently deviate significantly from the forecast figures. This situation, criticized by Lok Home (president of The Robbins Company, USA) in his words, „Tolerance of inaccurate estimations is hurting our industry“ [1] is most unsatisfactory for all those involved in the project. The causes of this situation are investigated below, and a calculation procedure which produces better results is examined.

2 Basic principles

It is necessary, in order to calculate tunnelling rates for tunnel boring machines (TBMs) in a given geology, to determine penetration, expressed in mm of advance per rotation of the cutter head.

The first step produces net boring speed, stated in m/h. To obtain this, penetration is multiplied by the speed of rotation of

the cutter head - stated in revolutions per minute (rpm) - multiplied by 60 (seconds) and divided by 1000 (mm).

The next calculation operation, which leads from net boring speed to rate of advance, must take account of obstructions, faults and interruptions to tunnelling. In many cases, this is accomplished by multiplying net boring speed by a utilization factor [%], and in more precise calculation, by means of the assumption of downtimes in minutes or hours.

Tunnelling time, i.e., the working time available for tunnelling, is another factor which must be included in the calculation. This, naturally, is a maximum of twenty-four hours per working day. Tunneling time is correspondingly lower in cases in which a regular maintenance shift is scheduled, or where the working-hours model does not permit 24 h operation.

In strata containing a high abrasive-minerals content, cutter wear also plays a role which should not be underestimated, at least in large-bore tunnels, since the tunnelling time available is automatically reduced as soon as the time available during the maintenance shift is no longer adequate for performance of all the necessary cutter changes. This situation becomes even more critical if it is



2 Vortriebszyklus einer TBM-S; Teilprozesse Vortrieb und Sicherung

Sobald nämlich die in der Wartungsschicht zur Verfügung stehende Zeit nicht mehr ausreicht, um alle notwendigen Meißelwechsel durchzuführen, verringert sich automatisch die zur Verfügung stehende Vortriebszeit. Verschärft wird diese Situation, wenn während der Vortriebszeit zusätzliche Meißel gewechselt werden müssen.

Bei offenen TBM haben auch Menge und Art der im Arbeitsbereich A1 unmittelbar hinter dem Bohrkopf einzubauenden Stützmittel einen wesentlichen Einfluss auf die Vortriebsgeschwindigkeit. So bedingt Spritzbetoneinbau in diesem Bereich fast immer eine Unterbrechung des Bohrzyklus, während Anker, Baustahlgitter und Firstkappen weitgehend parallel zum Bohrfortschritt eingebaut werden können.

Darüber hinaus sind bei der Berechnung der Vortriebsgeschwindigkeit noch diverse maschinentechnische, baubetriebliche, logistische und organisatorische Randbedingungen zu beachten. Die quantitative Berücksichtigung all dieser Parameter, Abhängigkeiten, Rückkoppelungen und Einflüsse ist nicht ganz einfach und – weil teilweise mehrere Iterationsschritte erforderlich sind – nur in einem komplexen Rechenmodell möglich. Bild 1 illustriert die Zusammenhänge.

In der Praxis werden zur Berechnung der Vortriebsgeschwindigkeit meist vereinfachende Rechenmodelle verwendet, die nur die wesentlichen Zusammenhänge berücksichtigen. Auch gibt es viele Projekte, bei denen nicht alle für eine genaue Berechnung der Penetration erforderlichen Kennwerte

vorliegen. Erfahrene Anwender – insbesondere die im maschinellen Tunnelbau tätigen Baufirmen – können diese Mängel meist durch Erfahrung kompensieren. In Anbetracht des essentiellen Einflusses der Vortriebsgeschwindigkeit auf die Ausbruchpreise und auf die zeitgebundenen Baustellengemeinkosten, aber auch weil die Vortriebsgeschwindigkeit in vielen Verträgen von den Unternehmern garantiert werden muss oder zumindest über die Terminalschiene mit Vertragsstrafen belegt wird, ist dies ein hohes Risiko. Angeregt durch die Analyse vieler TBM-Vortriebe und angetrieben von dem Wunsch, eine bisher unbefriedigend gelöste Aufgabenstellung besser zu lösen, haben die Autoren ein neues Modell zur Berechnung der Vortriebsgeschwindigkeit erarbeitet und dazu eine Software entwickelt, welche die komplexen Zusammenhänge berücksichtigt und den Anwendern die komplizierten Rechenvorgänge und Iterationen abnimmt.

3 Stand der Technik

Für die Prognose der Penetration gibt es eine Vielzahl von Modellen, die unterschiedlich konzipiert sind und auf unterschiedlichen Erfahrungen beruhen. Die bekanntesten sind (aufgezählt nach dem Erscheinungsjahr der zuletzt erschienenen Publikation) das CSM-Modell (Colorado School of Mines, 1993), das Modell von Gehring (ehemaliger Leiter F&E Voest-Alpine Montantechnik, Zeltweg/A, 1995) und das NTNU-Modell (Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet



2 The tunnelling cycle of a TBM-S; the tunnelling and support sub-processes

necessary to change additional cutters during tunneling time.

In the case of open TBMs, the quantity and type of the support systems to be installed in Work Zone A1 immediately behind the cutter head also have a significant influence on rate of advance. Shotcreting in this zone, for example, virtually always necessitates interruption to the tunnelling cycle, whereas rock bolts, steel mesh and steel arches can largely be installed simultaneously to tunnelling advance.

In addition, various machine, operational, logistical and organizational boundary conditions must also be taken into account in calculation of rate of advance. Quantitative inclusion of all these parameters, interdependencies, feedback interactions and influences is not entirely simple and is possible only in the context of a complex computation model, since multiple iterations are necessary in many cases. Fig. 1 illustrates the correlations.

In practice, simplifying computation models, which take account only of the most essential correlations, are generally used for calculation of rate of advance. In addition, there are also many projects for which not all the characteristics data necessary for precise calculation of penetration are available. Experienced users, and contractors active in machine tunneling, in particular, are in most cases able to make good these deficiencies with their experience. This involves a high level of risk, however, in view of the critical influence of rate of advance on excavation costs and on time-dependent site over-

heads, and also due to the fact that rate of advance must, in many project contracts, be guaranteed by the contractor, or is, at the least, subject to liquidated damages clauses via the agreed milestones. Stimulated by analysis of a large number of TBM projects, and motivated by the desire to find a better solution to a task which has, up to now, been solved only unsatisfactorily, the authors have developed a new model for the calculation of rate of advance and, for this model, software which takes due account of the complex correlations and relieves users of the complicated calculation procedures and multiple iterations otherwise necessary.

3 The current state-of-the-art

There is a large number of models, of differing conception and based on differing experience, for forecasting of penetration. The best known of these are (in order of the year of the most recent publications) the CSM model (Colorado School of Mines, 1993), the Gehring model (Karl-Heinz Gehring is the former head of R&D at Voest-Alpine Montantechnik, Zeltweg, Austria; 1995) and the NTNU model (Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet i Trondheim, Norway; 1998). These are used individually, and also, in some cases, in combination (as in the case of E. Büchi, for instance, which utilizes the CSM model as the basis, combining it with elements of the NTNU model, in order to take anisotropy and the cleavage plane structure of the rock into account [2, 4]). The manufactur-

i Trondheim/N, 1998). Sie werden einzeln, teilweise aber auch in Kombination (z. B. bei E. Büchi, der als Basis das CSM-Modell verwendet und es mit Teilen des NTNU-Modells kombiniert, um Anisotropie und Trennflächengefüge des Gesteins zu berücksichtigen [2, 4]) verwendet. Die TBM-Hersteller und manche Experten setzen auch eigene oder modifizierte Standard-Berechnungsverfahren ein, die nur in seltenen Fällen publiziert wurden. Weil die Modelle primär zur Prognose der Penetration entwickelt wurden, enthält keines von ihnen eine Anleitung zur Berechnung der Vortriebsgeschwindigkeit, die die zuvor skizzierten Anforderungen erfüllt. Sie beschränken sich meist auf die Ermittlung der Penetration; die Standardmodelle enthalten auch Ansätze zur Berechnung des Werkzeugverschleißes.

Allerdings werden von verschiedenen Autoren – unter anderen von N. Barton [3] – auf Grund empirischer Daten Zusammenhänge zwischen der Nettobohrgeschwindigkeit und der Vortriebsgeschwindigkeit angegeben. Auch A. Bruland hat in seiner Dissertation [4], in der er die aktuell gültige Version des NTNU-Prognosemodells für Penetration und Meißelverschleiß entwickelt hat, einen Weg aufgezeigt, wie die Vortriebsgeschwindigkeit über einen pauschalen „utilization factor“ aus der Nettobohrgeschwindigkeit abgeleitet werden kann. Angaben über Ausnutzungsgrade finden sich auch noch bei anderen Autoren wie z. B. M. Alber [5], der Ausnutzungsgrade in Relation zur Standfestigkeit des Gebirges angibt.

4 Verbesserungsvorschläge

Die heute gängige Praxis,

TBM-Vortriebe als semi-kontinuierliche Prozesse zu modellieren und die Vortriebsgeschwindigkeit ausgehend von der Penetration und der täglichen Arbeitszeit unter Berücksichtigung von Ausnutzungsgraden – eventuell verfeinert durch gesonderte Ansätze für Gripperumsetz-, Ringbauzeiten und andere Unterbrechungen – zu berechnen, bildet die Realität nur unvollkommen ab.

Wesentlich zutreffender ist es, bei der Berechnung der Vortriebsgeschwindigkeit zu berücksichtigen, dass es sich beim Vortrieb mit TBM nicht um einen kontinuierlich oder stetig ablaufenden Prozess sondern immer, d. h. unabhängig vom Maschinentyp, um einen intermittierenden, also zyklisch ablaufenden Prozess handelt. Besonders gut ist dies in Bild 2 erkennbar, die einen Vortrieb mit Einfach-Schild und nachfolgendem Tübbingausbau zeigt (die beiden Hauptarbeitsgänge Bohren und Tübbing einbauen folgen sequentiell aufeinander).

Dieser Modellierungsansatz erlaubt es, Unterbrechungen und Stillstände direkt und ursachengerecht bei der Berechnung der Zyklusdauer zu berücksichtigen. Weil die Dauern der einzelnen Arbeitsvorgänge in Minuten eingegeben werden können, ist auch ein detaillierter SOLL-IST Vergleich der Ausfall- und Stillstandszeiten möglich. Dieser ist wesentlich aussagekräftiger als ein SOLL-IST-Vergleich der Gesamtzeiten bzw. der Gesamtausnutzungsgrade, der keine Information über die Ursachen der Abweichung liefert.

Mit diesem Ansatz umfassend analysiert und modelliert wurden die baubetrieblichen Prozesse des maschinellen Tunnelvortriebs erstmals von W. Leitner. Durch die Einführung des Hilfsmittels „fiktiver Hub“, auf welchen die Stillstands- und Ausfallzeiten umgelegt werden,

ers of TBMs, and many experts, too, also use their own and modified standard calculation procedures, these being published only in rare instances. None of these models, which were developed primarily for prediction of penetration, includes for calculation of rate of advance any procedure which would satisfy the requirements outlined above. On the contrary, they are restricted, in the main, solely to determination of penetration; the standard models also include concepts for the calculation of tool wear.

Various authors – including Barton [3] – state correlations between net boring speed and rate of advance based on empirical data, however. In his dissertation [4], in which he developed the currently applicable version of the NTNU forecasting model for penetration and cutter wear, A. Bruland outlined a method for derivation of rate of advance from net boring speed by means of a universal „utilization factor“. Information on utilization factors can also be found in other authors, such as M. Alber [5], for example, who states utilization factors as a function of the stability of the rock.

4 Proposals for improvements

The current customary practice of modeling TBM tunneling operations as semi-continuous processes and calculating rate of advance from penetration and daily working time, taking account of utilization factors, and possibly refined via the inclusion of separate terms for gripper setting times, segmental-support installation times, and other interruptions, provides only an imperfect replica of reality.

It is much more accurate to take into account when calculating rate of advance the fact that TBM tunnelling is not a continuous or continuously operating

process, but is, instead, always and in every case, i.e., irrespective of the type of machine, an intermittent, i.e., cyclically operating process. This is particularly well illustrated in Fig. 2, which shows a tunneling operation using a simple shield and trailing segmental-support installation (the two main working operations of tunnel boring and support installation follow one another in sequence).

This modeling concept makes it possible to take account directly, and with inclusion of causes, of interruptions and downtimes in calculation of cycle time. The fact that individual working operations can be stated in minutes signifies that a detailed TARGET/ACTUAL assessment of stoppages and downtimes is also possible. This is of significantly greater informational value than a TARGET/ACTUAL comparison of total times and/or total utilization factors, which would supply no information on the causes of the deviation.

The operational processes of machine tunnelling were first comprehensively analyzed and modeled using this concept by W. Leitner. The introduction of the „theoretical excavation rate“ aid, to which downtimes and other outages could be assigned, enabled Leitner to develop a consistent and coherent mathematical solution; inclusion of the boundary conditions is then accomplished in multiple iterations. He elaborated in his dissertation [6] corresponding algorithms for the TBM-O, TBM-S and TBM-DS machine types used in solid rock. This model provided the basis for programming of the software examined in Section 7.

5 Calculation of penetration

Penetration must be calculated as an initial step in the cal-

konnte Leitner eine durchgängige mathematische Lösung entwickeln. Die Berücksichtigung der Randbedingungen erfolgt dann in mehreren Iterationsschritten. In seiner Dissertation [6] hat er für die im Festgestein eingesetzten Maschinentypen TBM-O; TBM-S und TBM-DS entsprechende Algorithmen entwickelt. Diese Modellierung war die Grundlage für die Programmierung der in Abschnitt 7 vorgestellten Software.

5 Berechnung der Penetration

Als erster Schritt zur Berechnung der Vortriebsgeschwindigkeit muss die Penetration berechnet werden. Die Penetration ist (Bild 3) abhängig von den drei Hauptfaktoren Maschine, Gestein und Gebirge und deren Wechselwirkungen.

5.1 Standard-Modelle

Es würde den Rahmen dieses Beitrags sprengen, auf die Vor- und Nachteile der Standardmodelle zur Prognose der Penetration näher einzugehen oder gar die nicht explizit erwähnten Modelle – weit über ein Dutzend – zu beschreiben. Allen Modellen ist gemeinsam, dass sie in erheblichem Maße auf der Auswertung von Daten ausgeführter Projekte beruhen. Daher ist die verwendete Datenbasis von entscheidender Bedeutung. Beim CSM-Modell

sind dies primär Daten von TBM-Vortrieben in Nordamerika, bei Gehring Daten von TBM-Vortrieben in Südafrika und Südkorea und Werte aus der Literatur. Beim NTNU-Modell wurden Daten von Vortrieben in Skandinavien und solchen, die unter skandinavischer Beteiligung im Ausland durchgeführt wurden und andere, von denen der NTNU Daten zur Verfügung standen, verwendet.

Spätestens mit Beginn der maschinellen Vortriebe bei den AlpTransit-Projekten in der Schweiz wurde ein neues Kapitel im Hartgesteinsvortrieb aufgeschlagen. Es war daher naheliegend, die Daten von diesen und anderen großen Verkehrstunneln, die seit 1990 im Alpenraum maschinell aufgeföhren wurden bzw. in den nächsten Jahren aufgeföhren werden sollen, zur Verbesserung eines bestehenden oder zur Entwicklung eines neuen Modells heranzuziehen. Maßgebend für die Entscheidung, ein solches Vorhaben in Angriff zu nehmen, war auch die Tatsache, dass die meisten der vor 1990 fertig gestellten Tunnel mit Bohrdurchmessern < 6,0 bis 7,0 m aufgeföhren wurden, während moderne Straßen- und Eisenbahntunnel auch bei Richtungsverkehr einen Ausbruchdurchmesser von mindestens 9,0 m erfordern. Auch die Weiterentwicklung der Maschinenteknik – Durchmesser und Material der Schneidringe, Bohrkopfgeometrie und

culuation of rate of advance. Penetration (Fig. 3) depends on the three central factors of machine, rock and rock mass, and their interactions.

5.1 Standard models

The examination in more detail of the advantages and disadvantages of the standard models for forecasting of penetration, not to mention the – well over a dozen – other models not explicitly cited here, would exceed the scope of this article. A factor common to all these models is the fact that they are based to a significant extent on the evaluation of data obtained from completed projects. The data-basis used is therefore of critical importance. In the case of the CSM model, these are primarily data from TBM tunnelling projects in North America, in the case of Gehring, data from TBM tunnelling projects in South Africa and South Korea, and data obtained from the relevant literature, while the NTNU model uses data from tunnelling projects implemented in Scandinavia and abroad but with Scandinavian involvement, and still other projects for which data was available to NTNU.

A new chapter in hard rock tunnelling began, at the latest, with the start of machine tunnelling operations in the context of the AlpTransit projects in Switzerland. It was therefore a logical step to utilize the data

from these and other major transport-infrastructure tunnels completed using machine methods in the Alpine region since 1990, or scheduled for implementation in the next few years, for improvement of an existing or development of a new model. Also definitive in the decision to attempt such an undertaking was the fact that the majority of tunnels completed prior to 1990 had bore diameters of < 6.0 to 7.0 m, whereas road and rail tunnels necessitate a tunnelling diameter of not less than 9.0 m, even in case of reversing one-way traffic flow. Developments in machine technology – the diameter of and material used for the disks, cutter head geometry and support, infinite speed adjustment, etc. – in the intervening period also make many forecasting models effectively obsolete. There has, in principle, been continuous development and refinement only in the case of the NTNU model, and even here the data material forming the basis for the 1998 version is today more than fifteen years old.

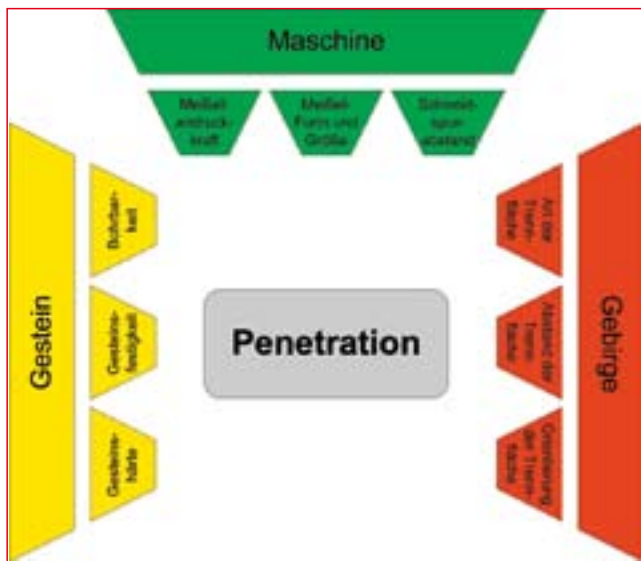
5.2 Development of a new model

To provide a remedy for this deficiency, E. Schneider, after intensive preparatory work, set up in 2006 the „ABROCK - Analysis and Prediction of Penetration and Cutter Wear“ project [7]. Five renowned university insti-

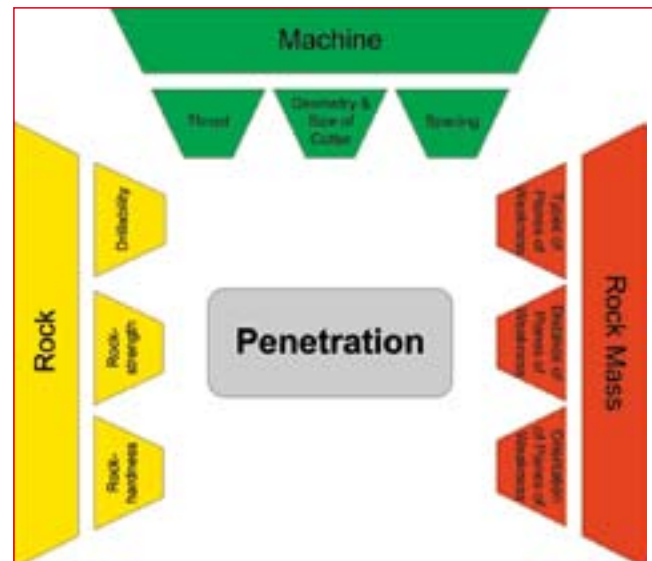
Name/Name	Institut/Institute	Universität/University
Prof. E. Schneider	Arbeitsbereich Baubetrieb, Bauwirtschaft und Baumanagement (Kordinator) Institute of Construction Management (Coordinator)	Universität Innsbruck University of Innsbruck
Prof. K. Thuro	Institut für Ingenieurgeologie Department of Engineering Geology	TU München TU Munich
Prof. R. Galler	Institute for Subsurface Engineering Institute for Subsurface Engineering	MU Leoben
Prof. G. Anagnostou	Institut für Geotechnik und Tunnelbau Institute for Geotechnical Engineering	ETH Zürich
Prof. J. Zhao	Laboratoire de Mécanique de Roches Soil Mechanics Laboratory	EPF Lausanne

Tabelle: Mitglieder des Forschungsverbundes ABROCK

Table: Members of the ABROCK reasearch consortium



3 Wesentliche Einflussparameter auf die Penetration



3 The main parameters influencing penetration

Lagerung, stufenlose Drehzahlregelung und ähnliches – lassen manches Prognosemodell alt erscheinen. Eine kontinuierliche Weiterentwicklung gab es praktisch nur beim NTNU-Modell, wobei das der Version von 1998 zugrunde liegende Datenmaterial heute mehr als 15 Jahre alt ist.

5.2 Entwicklung eines neuen Modells

Um diesem Mangel abzuwehren, wurde im Jahr 2006 von E. Schneider nach intensiver Vorarbeit das Forschungsprojekt ABROCK – Analysis and Prediction of Penetration and Cutterwear ins Leben gerufen [7]. Fünf namhafte Universitätsinstitute aus dem Alpenraum haben sich zu einem Forschungsverbund zusammengeschlossen, um ein neues Modell zur Prognose der Penetration zu entwickeln (Tabelle).

Die Teams der Universitätsinstitute werden von Partnern aus der Wirtschaft – Bauherren, Ingenieurbüros, Baufirmen und TBM-Experten – unterstützt. Mit Hilfe von Labortests an Gesteinsproben, die primär an der TU München durchgeführt werden, und Schneidversuchen

mittels einer Linear Cutting Machine, die im Umfeld der Montanuniversität Leoben zur Verfügung steht, sollen bekannte Korrelationen überprüft und neue Korrelationen – z. B. zwischen Penetration und Zerstörungsarbeit – näher untersucht. Grundlegende Untersuchungen zum „fracturing under dynamic load“ sollen an der EPF Lausanne durchgeführt werden. Begleitet und unterstützt werden die Versuchsreihen durch numerische Modellierungen und Simulationen. Der Einfluss des im Gebirge herrschenden Spannungszustands auf den Lösevorgang wird an der ETH Zürich untersucht.

An der Universität Innsbruck werden geologisch-geotechnische Daten und Betriebsdaten von abgeschlossenen TBM-Vortrieben in das Modell von Gehring [8] eingespeist und anschließend untersucht, ob die Übereinstimmung zwischen theoretischer (berechneter) und gemessener Penetration durch Variation der im Modell verwendeten Ansätze oder durch Einführung neuer bzw. zusätzlicher Einflussfaktoren verbessert werden kann. Außerdem wird in Innsbruck untersucht,

tutes from the Alpine region allied to form a research consortium, in order to develop a new model for forecasting of penetration (see table).

The teams from the university institutes received support from industrial partners - project clients, engineering consultancies, contractors and TBM experts. Known correlations were to be verified, and new ones - such as those between penetration and energy of destruction, for example - investigated in more detail, by means of laboratory tests on rock samples, which were performed, primarily, at the Technical University of Munich, and cutting tests using a linear-cutting machine, which is available at the Montanuniversität Leoben (Leoben University of Mining and Technology). Fundamental investigations into „fracture under dynamic load“ are to be performed at the EPF Lausanne. The series of tests are being underpinned and supported by means of numerical models and simulations. The influence of the stress state prevailing in the rock mass on the extraction process is under investigation at the ETH Zurich.

At the University of Innsbruck, geological and geotechnical data, and also operating data obtained from completed TBM tunnelling projects, are being fed into the Gehring model [8], with subsequent investigation of whether the accordance between theoretical (calculated) and measured penetration can be improved by varying the approaches used in the model or via the introduction of new and/or additional influencing factors. Also under investigation in Innsbruck is the question of whether it might, under certain circumstances, also be possible to use the GSI (Hoek-Brown) in place of multiple individual parameters in a forecasting model for the characterization of rock and rock-mass properties. This would be of particular interest for projects for which no, or only few, laboratory tests have been performed for determination of rock characteristics.

5.3 Tool wear

As already mentioned, the standard models for forecasting of penetration also include modules for prediction of tool wear. In this area, too, there is also need for improvement,

ob in einem Prognosemodell zur Charakterisierung der Gesteins- und Gebirgseigenschaften an Stelle mehrerer Einzelparameter unter Umständen auch der GSI-Wert (Hoek-Brown) verwendet werden könnte. Dies wäre insbesondere für Projekte, bei denen nur wenige oder keine Laboruntersuchungen zur Bestimmung der Gesteinskennwerte durchgeführt wurden, interessant.

5.3 Werkzeugverschleiß

Wie bereits erwähnt beinhalten die Standardmodelle zur Prognose der Penetration auch Module zur Prognose des Werkzeugverschleißes. Weil die darin enthaltenen Algorithmen aus Regressionsanalysen gewonnen wurden, die ebenfalls

auf „altem“ Datenmaterial basieren, besteht – wie von einem der Verfasser schon vor längerer Zeit angemerkt [9] – auch in diesem Bereich Verbesserungsbedarf. Erste Erkenntnisse wurden durch die Auswertung neuerer Vortriebe im Rahmen des Forschungsprojekts ABROCK bereits gewonnen und werden demnächst publiziert [10]. Konkrete Verbesserungsvorschläge sind mit Fortschreiten des Projekts zu erwarten.

6 Berechnung der Vortriebsgeschwindigkeit

In diesem Berechnungsschritt, der von der Penetration zur Vortriebsleistung führt, sind nicht nur baubetriebliche, orga-

since the algorithms contained in these modules were obtained from regression analyses also based on „old“ data material, as indeed was noted some good time ago by one of the authors [9]. Initial insights have already been gained by means of evaluation of more recent tunneling projects in the context of the ABROCK research project, and are to be published in the near future [10]. Specific proposals for improvements may be anticipated as the project proceeds.

6 Calculation of rate of advance

In this calculation step, which progresses from penetration to rate of advance, it is necessary to take into account not only

operational, organizational and logistical influences, but also those machine parameters and boundary conditions which have not been included in calculation of penetration. These are, essentially:

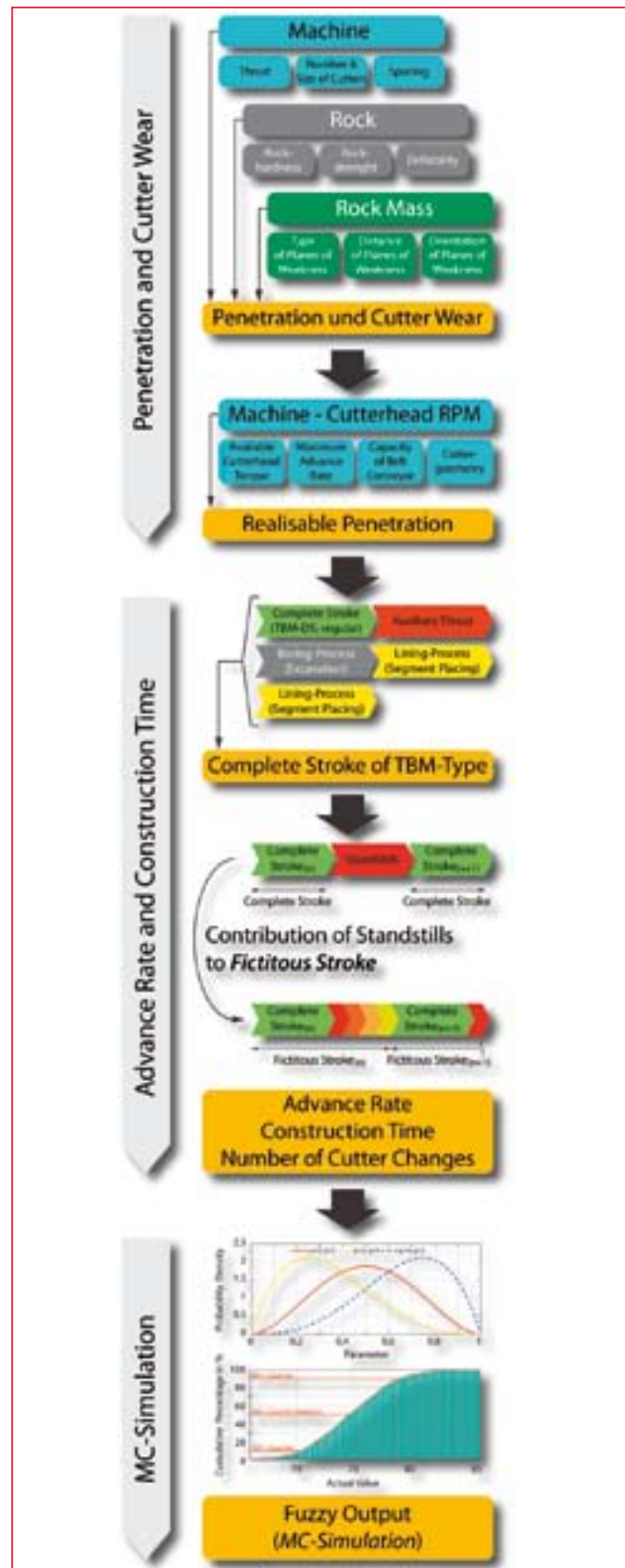
- Cutter head speed
- Available torque as a function of speed
- Maximum available/permissible speed of the thrust cylinders
- Maximum permissible disk penetration depth
- Maximum permissible disk wear
- Maximum permissible/available cutter head thrust
- Maximum permissible/available disk cutter cutting thrust
- Minimum necessary cutting thrust per disk cutter

nisatorische und logistische Einflüsse zu berücksichtigen, sondern auch diejenigen maschinentechnischen Parameter und Randbedingungen, die nicht in die Penetrationsberechnung eingeflossen sind. Wesentlich sind

- Drehzahl des Bohrkopfes
- Abhängigkeit des verfügbaren Drehmoments von der Drehzahl
- maximal verfügbare/zulässige Geschwindigkeit der Vorschubpressen
- maximal zulässige Eindringtiefe der Disken
- maximal zulässige Abnutzung der Disken
- maximal zulässige/verfügbare Vorschubkraft des Bohrkopfes
- maximal zulässige/verfügbare Anpresskraft der Rollmeißel
- erforderlich Mindestanpresskraft pro Rollmeißel
- maximale Leistung des Maschinenbandes.

Die in der Praxis durch die Maschinenfahrer vorgenommene Optimierung des Vortriebs, die durch laufende Anpassung des Verhältnisses zwischen Anpresskraft und Drehzahl erfolgt, muss ebenfalls in die Berechnung einfließen. Neben dem direkten Einfluss des Gesteins und des Gebirges, der bei der Berechnung der Penetration berücksichtigt werden muss, ist bei der Berechnung der Vortriebsgeschwindigkeit auch der indirekte Einfluss des Gebirges, der aus dem Stützmitteleinbau resultiert, zu berücksichtigen. Die entsprechenden baubetrieblichen Parameter sind bei offenen Maschinen die Einbauzeiten für die Stützmittel im Arbeitsbereich A1, bei Schildmaschinen die Ringbauzeiten für den Tübbingausbau.

Ein weiterer Einfluss, der bei Vortrieben in abrasiven Gesteinen einen erheblichen Einfluss auf die Vortriebsgeschwindigkeit haben kann, ist – wie bereits erwähnt – der Meißelverschleiß.



4 Ablauforganigramm und Funktionen SIMTUNNEL PRO 2.0

4 Scheduling chart and functions, SIMTUNNEL PRO 2.0

- Maximum conveying rate of the TBM conveyor

The optimization of tunnelling accomplished in practice by machine operators by means of continuous balancing of cutting thrust and speed must also be incorporated into the calculation. Not only the direct influence of the rock and the rock mass, which must be taken into account in calculation of penetration, but also the indirect influence of the rock mass resulting from installation of support, must be included in calculation of rate of advance. The corresponding operational parameters are the support-installation times in Work Zone A1 in the case of open machines, and times for support-ring installation in the case of segmental support systems.

As already mentioned, cutter wear is yet another factor which is capable of exercising a significant influence on rate of advance in the case of tunnelling operations in abrasive rock types. The available tunnelling time is reduced if it is necessary to change more cutters than is possible during the maintenance shift scheduled for this purpose. Unscheduled cutter changing during tunnelling causes further losses of operating time.

Other productivity-determining parameters which must be taken into account are

- the capacity of the system for removal of the excavated material
- the capacity of the logistical system as a whole and, in the organizational sphere
- Planned/available tunnelling time per working-day
- Working-days per month/year
- Losses of productivity resulting from the „familiarization effect“.

This list, which makes no claim to completeness, should nonetheless suffice to illustrate

Müssen mehr Meißel gewechselt werden als in der dafür vorgesehenen Wartungsschicht möglich ist, reduziert dies die zur Verfügung stehende Vortriebszeit. Weitere Einbußen bringen außerplanmäßige Meißelwechsel während der Vortriebszeit.

Weitere leistungsbestimmende Parameter, die zu berücksichtigen sind, sind die

- Kapazität des Systems zur Abförderung des Ausbruchmaterials
- Kapazität des gesamten Logistiksystems und aus dem organisatorischen Bereich
- geplante/verfügbare Vortriebszeit pro Arbeitstag
- Arbeitstage pro Monat/Jahr
- Leistungsverluste resultierend aus dem Einarbeitungseffekt.

Diese Aufzählung, die keinen Anspruch auf Vollständigkeit erhebt, mag genügen, um zu zeigen, dass eine Berechnung der Vortriebsgeschwindigkeit mittels „einfachem excel-sheet“ kaum möglich ist. Deshalb wurde – aufbauend auf der bereits erwähnten Dissertation von W. Leitner (Zusammenfassung in [11]) – im Rahmen des Forschungsprojekts TISROCK – TBM-Tunnelling in Squeezing Rock im Jahr 2005 an der Universität Innsbruck eine in Java programmierte Software SimTunnel entwickelt. Das Programm wurde damals als sogenannte Freeware mit der Musterkalkulation für TVM-Vortriebe, die zur gleichen Zeit gemeinsam mit dem Software House AUER Success entwickelt wurde, vertrieben.

7 Neuprogrammierung Software SIMTUNNEL

Da die erste Version den Wünschen der Anwender noch nicht in allen Punkten gerecht wurde und auch nicht alle Randbedingungen berücksich-

tigte, wurde das Programm im Jahr 2009 vollkommen neu aufgesetzt. Die Programmierung von SIMTUNNEL PRO 2.0 erfolgte in MATLAB. In dieser Programmiersprache konnten die Algorithmen und Abhängigkeiten besser umgesetzt werden (Bild 4).

Die Software enthält folgende Features:

- Standardeinstellung für alle Werte (kann vom Bearbeiter verändert werden, muss aber nicht)
- Möglichkeit, die Berechnung mit unscharfen Zahlen (Gesteinskennwerte, maschinen-technische Parameter und betriebliche Werte) durchzuführen
- Integration eines Moduls zur Berechnung von Penetration und Verschleiß. Wahlweise Gehring, NTNU oder CSM; auch mit individuellen Modifikationen
- Berücksichtigung beliebiger Arbeitszeit- und Schichtmodelle
- Berücksichtigung der Lernkurve durch Modellierung des Einarbeitungseffekts nach Wachter [12]
- Zentrale Eingabetabelle für alle Werte (Gestein, Gebirge, TBM, Betrieb etc.)
- Eingabe der Stillstände, strukturiert in
 - planmäßige Stillstände (z. B. Wartungsschicht, Bohrkopfinspektion, usw.)
 - systembedingte Stillstände (z. B. Zugwechsel, Förderbandverlängerung, usw.)
 - zufallsbedingte Stillstände (z. B. Reparaturen, Ausfallzeiten, usw.)
- Ergebnisdarstellung in Form
 - eines standardisierten Berichtes
 - eines Bauzeitplans in verschiedenen Grafik- und Vektorformaten
 - eines AutoCAD-Script-Files.

Für die Berechnung kann der Tunnel in beliebig viele Homo-

that calculation of rate of advance using a „simple Excel sheet“ will scarcely be possible. For this reason, SimTunnel, a software package programmed in Java, was developed at the University of Innsbruck in 2005 on the basis of the dissertation by W. Leitner already mentioned (a summary can be found in [11]) in the context of the „TISROCK – TBM Tunneling in Squeezing Rock“ research project. This program, including the specimen calculation for TBM tunnelling projects simultaneously jointly developed with the AUER Success software publisher, was distributed at that time as so-called Freeware.

7 Reprogramming of the SIMTUNNEL software

Since the initial version did not meet the requirements of users in all respects, and also did not take account of all boundary conditions, the program was completely rewritten in 2009. SIMTUNNEL PRO 2.0 was programmed in MATLAB, a programming language which made it possible to implement the algorithms and correlations better (Fig. 4).

This software includes the following features:

- A standard setting for all values (these can, but need not, be modified by the user)
- Facility for performance of the calculation using only approximately defined figures (rock characteristics data, machine parameters and operational data)
- Integration of a module for calculation of penetration and wear; optionally Gehring, NTNU or CSM; also with individual modifications
- Account can be taken of all working-time and shift models
- Account taken of the „learning curve“ via modeling of the

familiarization effect, as per Wachter [12]

- Central input table for all data (rock, rock mass, TBM, operation, etc.)
- Entry of shut-downs, classified into
 - scheduled shut-downs (e.g. maintenance shift, cutter head inspection, etc.)
 - system-related shut-downs (e.g. changing of the back-up train, extension of the conveyor, etc.)
 - random shut-downs (e.g. repairs, outages, etc.)
- Presentation of results in the form of
 - a standardized report
 - an operating schedule in various graphics and vector formats
 - AutoCAD script files.

The tunnel can be subdivided into any required number of homogenous or tunneling sectors for the purpose of the calculation. These can be calculated individually in each case, in which context the program's copy function provides useful assistance. Further subdivision into tunnelling-method classes, as may be necessary in the case of tunnelling using the TBM-O, is also possible. Input of parameters, and the calculation, are performed section-by-section. The results are presented section-by-section and also in summarizing form, and averages are automatically generated and displayed.

Deterministic calculation supplies well-defined figures for rate of advance, tunnelling time and number of cutter changes. Probabilistic calculation produces distribution functions for rate of advance, tunnelling time, cutter changes, etc., complete with statement of most probable values, fractiles, etc.

A standardized technical report in MS-Word is outputted as the computation result, plus a tunnelling schedule in the form

gen- oder Vortriebsabschnitte unterteilt werden. Diese können jeweils einzeln berechnet werden, wobei die Kopierfunktion des Programms nützliche Dienste leistet. Eine weitere Unterteilung nach Vortriebsklassen, die u. U. beim Vortrieb mit TBM-O notwendig ist, ist möglich. Die Eingabe der Parameter und die Berechnung erfolgen abschnittsweise. Die Ergebnisse werden abschnittsweise und summarisch dargestellt, Mittelwerte werden automatisch generiert und angezeigt.

Bei deterministischer Berechnung erhält man scharfe Werte für Vortriebsgeschwindigkeit, Vortriebsdauer und Anzahl Meißelwechsel. Bei probabilistischer Berechnung ergeben sich Verteilungsfunktionen für Vortriebsgeschwindigkeit, Vortriebsdauer, Meißelwechsel etc. mit Angabe von Modalwert, Fraktile etc.


Als Berechnungsergebnis wird ein standardisierter technischer Bericht in MS-Word ausgegeben, dazu ein Bauzeitplan als Bilddatei oder im Vektorformat (Zeit-Weg Diagramm) sowie Kreisdiagramme für die verschiedenen Tätigkeiten. Die Darstellung erfolgt sowohl gesamtthaft von Portal A bis Portal B, als auch unterteilt nach Vortriebsabschnitten oder Homogenbereichen.

8 Zusammenfassung

Für die Berechnung der Penetration gibt es bewährte Modelle. Weil die zugrunde liegenden Daten relativ alt sind und meist aus Tunneln mit Durchmessern < 6,0 bis 7,0 m stammen, ist dieses Datenmaterial nicht mehr aktuell. Seit 1990 gab es außerdem erhebliche Fortschritte in der Vortriebstechnik, insbesondere bei den Schneidwerkzeugen (Material, Form und Durchmesser der Disken). Die veränderte Aus-

gangslage hat eine Forschergruppe aus fünf Universitätsinstituten bewegt, das Thema Analyse und Prognose von Penetration und Meißelverschleiß aufzugreifen, um ein neues, verbessertes Prognosemodell zu entwickeln. Dazu werden nicht nur Vortriebsdatendaten ausgewertet sondern in vertieftem Maß auch Grundlagenforschung betrieben.

Die Penetration ist aber nur eine, wenn auch die wesentliche Ausgangsgröße zur Berechnung der Vortriebsgeschwindigkeit. Die Vorausberechnung der Vortriebsgeschwindigkeit ist im Wesentlichen eine baubetriebliche Aufgabe, bei der maschinentechnische, baubetriebliche, organisatorische und logistische Aspekte berücksichtigt werden müssen. Das ist mittels einer einfachen straight forward Rechnung nicht möglich. Die Berücksichtigung aller Randbedingungen und Abhängigkeiten ist nur in mehreren iterativen Schritten möglich.

Basierend auf Vorarbeiten an der Universität Innsbruck wurde 2009/2010 von einem auf baubetriebliche Fragen spezialisierten Ingenieurbüro (SSP BauConsult, Ingenieurbüro für Baubetrieb und Bauwirtschaft, Innsbruck/A) eine Software entwickelt, die in nachvollziehbarer Form eine Berechnung der Vortriebsgeschwindigkeit unter Berücksichtigung aller bekannten Einflüsse und Randbedingungen ermöglicht. 


of a graphics file or in vector format (time-distance diagram) and pie charts for various activities. The view shown can be both all-encompassing, from Portal A to Portal B, and also subdivided by tunneling sections or homogenous sectors.

8 Summary

There are tried and proven models for calculation of penetration. The input data used for them are no longer up-to-date, however, since they are relatively old and in most cases originate from tunnels with diameters of < 6.0 to 7.0 m. There has, in addition, been considerable progress in tunnelling technology since 1990, particularly in the cutting tool sector (the material, geometry and diameter of the cutting discs). The modified starting situation was the occasion taken by a group of researchers from five university institutes to take up the topic of Analysis and Forecasting of Penetration and Cutter Wear, with the aim of developing a new and improved forecasting model. The activities involved include not only the evaluation of tunnelling data, but also, to an intensified degree, fundamental research.

Penetration is, however, only one – although, indeed, the essential – input variable, for calculation of rate of advance. Advance calculation of rate of advance is essentially an operational task, in which machine, operational, organizational and logistical aspects must be taken into account. This is not feasible using a simple „straightforward“ calculation. It is possible to take account of all boundary conditions and correlations only in multiple iterations.

During 2009 and 2010, a software package which permits in verifiable form computation of rate of advance, taking account of all known influenc-

ing factors and boundary conditions, was developed, on the basis of preliminary work performed at the University of Innsbruck, by an engineering consultancy, specializing in operational matters (SSP BauConsult, Ingenieurbüro für Baubetrieb und Bauwirtschaft, Innsbruck, Austria). 

Literatur

- [1] HOME, Lok: Penetration rate baseline dilemma. T&T North America June 2005 p. 4 and 5
- [2] BÜCHI, Ernst: Einfluss geologischer Parameter auf die Vortriebsleistung einer Tunnelbohrmaschine (mit besonderer Berücksichtigung der Gesteinsanisotropie). Dissertation Universität Bern, 1984
- [3] BARTON, Nick: TBM Tunnelling in jointed and faulted rock. A.A. Balkema, Rotterdam 2000, Seite 51–56
- [4] BRULAND, Amund: Hard rock tunnel boring – Advance rate and cutter wear. Project report 1B-98. NTNU Trondheim, 1998; Seite 33–40
- [5] ALBER, Michael: An Integrated Approach to Penetration, Advance Rates and Disc Cutter Wear for Hard Rock TBM Drives. Geomechanik und Tunnelbau 1/2008 Seite 29–37. Ernst & Sohn, Berlin
- [6] LEITNER, Wolfgang: Dissertation Universität Innsbruck: Baubetriebliche Modellierung der Prozesse maschineller Tunnelvortriebe im Festgestein. Books on Demand, Norderstedt 2004. ISBN 3-8334-1844-3
- [7] SCHNEIDER, Eckart und THURO, Kurosch: Prognose von Penetration und Verschleiß für TBM-Vortriebe im Festgestein. Felsbau Magazin Nr.6 / 2007 Seite 44–47. VGE Verlag, Essen
- [8] GEHRING, Karl-Heinz: Leistungs- und Verschleißprognosen im maschinellen Tunnelbau. Felsbau Nr. 6/1995; Seite 439-448. Verlag Glückauf, Essen
- [9] SPIEGL, Markus: Diskussion zur Prognose des Diskenverschleißes beim TBM-Vortrieb. Festschrift Prof. Schneider, i3b Universität Innsbruck, Seite 123–130. Book on Demand, Norderstedt 2005. ISBN 3-8334-3562-3
- [10] FRENZEL, Christian: Dissertation TU München: Kostenprognose für Schneidrollen bei maschinellen Tunnelvortrieben im Festgestein. Pfeil Verlag, München 2010
- [11] LEITNER, Wolfgang und SCHNEIDER, Eckart: Operational Modelling of Advance rates for TBM. Felsbau Nr. 6/2005
- [12] WACHTER, Robert: Dissertation Universität Innsbruck: Der Einarbeitungseffekt bei mechanischen Tunnelvortrieben. Innsbruck University Press 2001. ISBN 3-901249-60-5