

Development of a disc cutter force and face monitoring system for mechanized tunnelling

Ortsbrustmonitoring und Leistungsprognose bei TBM-Vortrieben

The loading on the tools of a TBM can usually only be estimated through the global thrust force, which gives a typical force of about 250 kN for 17" discs. The actual loading is however highly variable, with peak loads that can be many times the nominal load. In the present paper the development and implementation of a method is presented, which makes it possible to measure disc forces in-situ and in real time. It turns out that the measured forces are unevenly distributed over the area of the face and can be correlated with geological/geotechnical features in the face. Furthermore, a method is presented which makes it possible to document the face photographically. Single images or videos are combined to an overall image by means of digital image processing. The quality of the pictures obtained in this way can provide a significant improvement of the geological documentation of TBM drives.

1 Introduction

For some years, the Chair of Subsurface Engineering at the University of Leoben has undertaken intensive research into tunnel boring machines (TBM). One focus is the interaction between cutterhead and rock mass, with the interaction being investigated theoretically through simulations and in laboratory and in-situ tests. The current paper gives an overview of the development of a method for the measurement of disc cutter forces and its trial implementation on a tunnel boring machine at work in the Koralm Tunnel. In addition, a development is presented that enables the photographic documentation of the face during a TBM drive.

2 Development of a method of measuring disc cutter force

The instrumental monitoring of excavation tools is becoming ever more important in mechanized tunnelling. This makes it possible to obtain information directly at the face which could improve tunnelling in essential points. This applies to the efficiency of the boring process, and also provides more precise information about the state of the face and monitors the condition of the excavation tools. Major TBM manufacturers have already started the development and implementation of methods of measurement in order to measure, for example, the temperature, rotation speed and vibrations of a disc [1] [2].

Die Belastungen von TBM-Abbauwerkzeugen können in der Regel nur über die globale Vorschubkraft abgeschätzt werden, woraus sich eine durchschnittliche Anpresskraft von etwa 250 kN für 17"-Disken ergibt. Die tatsächliche Belastung ist jedoch stark ungleichmäßig mit Spitzenkräften, die ein Vielfaches der nominellen Last betragen können. Im vorliegenden Beitrag wird die Entwicklung und Implementierung einer Messmethodik vorgestellt, die es ermöglicht Diskenkräfte in situ und in Echtzeit zu messen. Es zeigt sich, dass die gemessenen Kräfte ungleich über die Ortsbrust verteilt sind und mit geologisch/geotechnischen Merkmalen der Ortsbrust korreliert werden können. Darüber hinaus wird eine Methodik präsentiert, die es ermöglicht, die Ortsbrust fotografisch zu dokumentieren. Dabei werden einzelne Bilder oder Videos mittels Methoden der digitalen Bildverarbeitung zu einem Gesamtbild zusammengesetzt. Die Qualität der Bilder ist geeignet, die geologische Dokumentation bei TBM-Vortrieben wesentlich zu verbessern.

1 Einleitung

Seit einigen Jahren wird am Lehrstuhl für Subsurface Engineering der Montanuniversität Leoben intensiv Forschung im Bereich Tunnelbohrmaschinen (TBM) betrieben. Ein Fokus liegt auf der Interaktion zwischen Bohrkopf und Gebirge, wobei diese Wechselwirkung theoretisch, anhand von Simulationen sowie durch Labor- und In-situ-Versuche untersucht wird. Der vorliegende Beitrag gibt einen Überblick über die Entwicklung einer Methodik zur Messung von Diskenkräften sowie deren Implementierung auf der Tunnelbohrmaschine des Koralmtunnels. Darüber hinaus wird eine Entwicklung vorgestellt, die es ermöglicht die Ortsbrust in einem TBM-Vortrieb fotografisch zu dokumentieren.

2 Entwicklung einer Methodik zur Diskenkraftmessung

Die messtechnische Überwachung von Abbauwerkzeugen gewinnt im maschinellen Tunnelbau immer mehr an Bedeutung. Dadurch wird es möglich, Informationen direkt an der Ortsbrust zu bekommen, die den Vortrieb in wesentlichen Punkten verbessern können. Das betrifft einerseits die Effizienz des Bohrvorgangs, andererseits die genauere Kenntnis über den Zustand der Ortsbrust sowie die Zustandsüberwachung der Abbauwerkzeuge. Große TBM-Hersteller haben bereits begonnen, Messmethoden zu entwickeln und zu implementieren, um beispielsweise

The loading on the excavation tools of a tunnel boring machine can usually only be estimated through the global thrust force. It is, however, known from laboratory [3] and in-situ [4] [5] [6] [7] tests that the loading on a disc can be very uneven and that peak forces occur, which can be many times the nominal load. Knowledge about the actual disc forces would be of great interest for the monitoring of the cutting process, the sizing of the discs and cutterhead and the monitoring of the geotechnical conditions at the face.

Modern TBMs mostly use back-loading systems, enabling the discs to be changed from inside the cutterhead. In contrast to this, when front-loading systems are used discs are changed between the cutterhead and the face, which is not only a problem for the working sequence but also dangerous from the point of view of health and safety. The most commonly used back-loading systems are wedge lock and shaft-mounted systems. In the course of the current work, the development and implementation of a method for the measurement of disc force with a shaft-mounted system is described; more detailed information about wedge-lock systems has been published by *Bumberger et al.* [8].

The first tests, in which the loading on the mechanical excavation tools of raise boring and TBM cutterheads was successfully measured, were already undertaken in the 1970s [4] [5] [6] [7]. The measurements took place as part of scientific research with a limited duration. The first test of the long-term installation of a disc force measurement system was undertaken as part of Tunconstruct in the Mobydic project [9]. As with the formerly mentioned projects, all the sensors here are located inside a special measuring disc, which in the view of the author is not very suitable for permanent use.

The development of a method of measuring disc forces was therefore started at the end of 2010 at the Chair for Subsurface Engineering as part of the FFG research project EMSAT in collaboration with Geodata GmbH and the Ruhr University, Bochum. In this system, all sensors are placed in the disc support, so that construction operations, particularly disc changing, can be carried out without affecting the measurement system. This provides the basis for the permanent use of the system.

Fig. 1 shows the most important components of a disc cutter and its housing. In order to find the optimal location for the sensor, extensive numerical simulations were performed, in which the stress flow in the disc and the housing were considered. Fig. 2c shows the von-Mises stresses in the simulation model. Particular attention was paid to the correct modelling of the reduction of the prestressing force of the bolts, with the application of spring elements, which were connected with the nodes of the thread and the bolt head. At the start of the simulation, the components were pushed into each other (Fig. 2a) and were then pulled apart to achieve the correct bolt pre-stress (Fig. 2b).

Working from the results of the simulations and practical considerations, numerous variants were produced, which were intended to make it possible to measure disc forces. The most promising of these were validated in a laboratory test. Fig. 3 shows the test rig in the servo-hydraulic press at the Chair for Subsurface Engineering. In

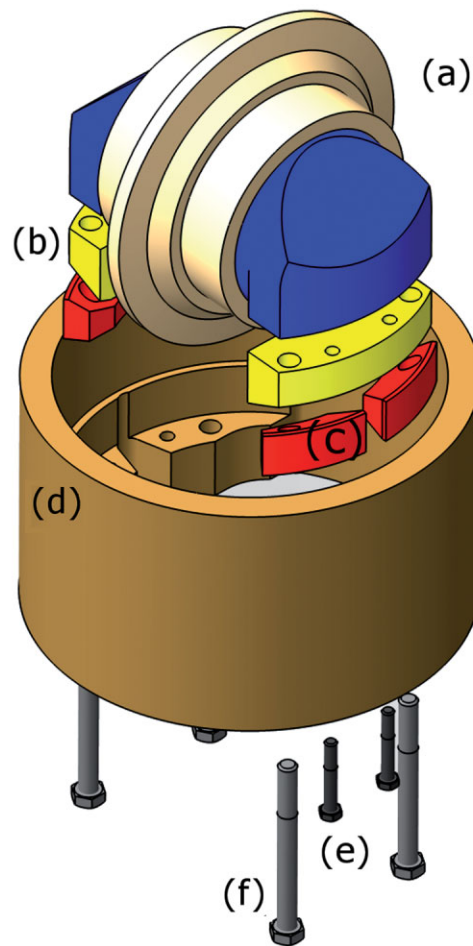


Fig. 1. Exploded drawing of a disc with housing [10]; (a) disc with cutter ring, (b) tapered support surfaces, (c) mounting shells, (d) housing, (e) M16 bolts to fix the mounting shells, (f) M24 bolts for disc changing
Bild 1. Explosionszeichnung einer Diske mit Topf [10]; (a) Diske mit Schneidring, (b) konische Auflagerflächen, (c) Einsatzschalen, (d) Topf, (e) M16-Schrauben zur Befestigung der Einsatzschalen, (f) M24-Schrauben für den Diskenwechsel

Temperatur, Rotationsgeschwindigkeit und Vibrationen einer Diske zu messen [1] [2].

Die Belastung der Abbauwerkzeuge einer Tunnelbohrmaschine kann im Allgemeinen nur über die globale Vorschubkraft abgeschätzt werden. Es ist jedoch aus Labor- [3] und in situ-Versuchen bekannt [4] [5] [6] [7], dass die Belastung einer Diske sehr unregelmäßig sein kann und Spitzenkräfte auftreten, die um ein Vielfaches größer sind als die nominelle Last. Die Kenntnis der tatsächlichen Diskenkräfte wäre von großem Interesse für die Überwachung des Schneidprozesses, die Dimensionierung von Disken und Bohrkopf sowie die Überwachung der geotechnischen Verhältnisse an der Ortsbrust.

Auf heutigen TBM kommen zumeist nur „back loading“-Systeme zum Einsatz, bei denen die Diske innerhalb des Bohrkopfs gewechselt werden kann. Im Gegensatz dazu wird der Diskenwechsel bei „front loading“-Systemen zwischen Bohrkopf und Ortsbrust durchgeführt, was nicht nur vom Arbeitsablauf her problematisch ist, sondern vor allem aus Sicht der Arbeitssicherheit gefährlich ist. Die am weitesten verbreiteten „back loading“-Systeme

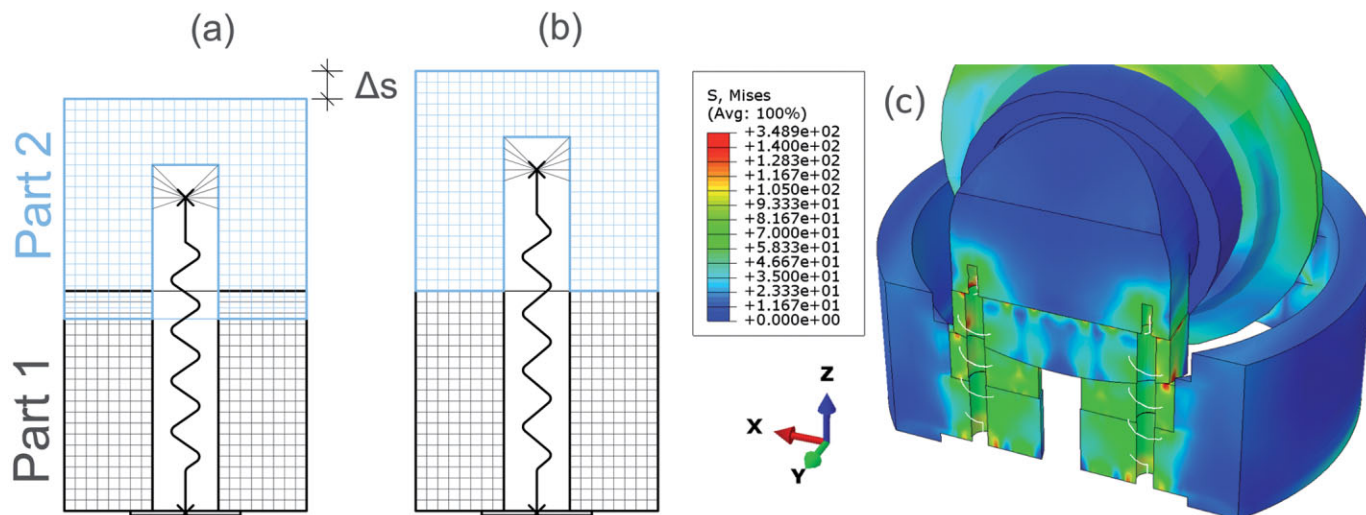


Fig. 2. Simulation of the bolts, (a) spring without prestress, (b) prestressed spring, (c) simulation result (von Mises stress) [10]
 Bild 2. Simulation der Schrauben, (a) Feder ohne Vorspannung, (b) vorgespannte Feder, (c) Simulationsergebnis (von Mises Spannung) [10]

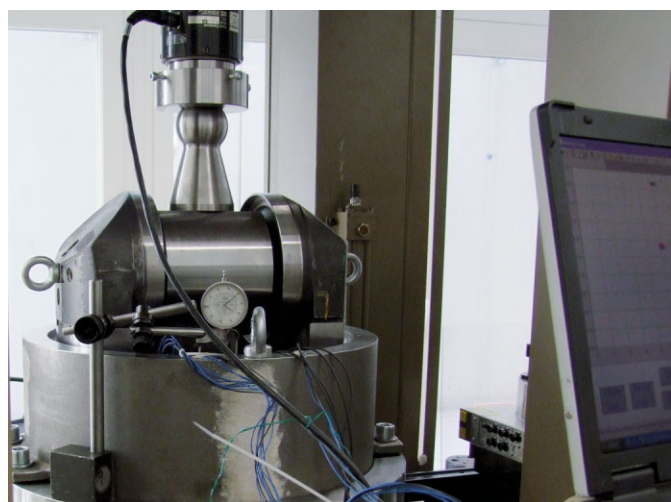


Fig. 3. Test rig in the laboratory of the Chair for Subsurface Engineering [10]
 Bild 3. Versuchsaufbau im Labor des Lehrstuhls für Subsurface Engineering [10]

in addition to the measuring instrumentation intended for in-situ application, the discs and housing were fitted with strain gauges, pressure cell foils and dial gauges in order to understand the structural behaviour better. The cutter ring was replaced with a dummy for the test, which enables the introduction of force from various directions (different loading cases) due to its ball shape.

The best results were obtained with force measuring bolts. These are bolts with a hole drilled in the shaft, in which strain gauge strips are installed. This makes it possible to measure the prestress force in the bolt, which reduces under external loading. Through the reduction of prestress force at positions independent of each other, the external forces (pressing force, rolling force, side force) can be back calculated. The M16 bolts, which are used to fix the mounting shells, were replaced with force measurement bolts. The lifetime of the mounting shells greatly depends on the loading and from the careful installation of

sind „Wedge Lock“- und Steckachsensysteme. Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wird die Entwicklung und Implementierung einer Methodik zur Diskenkraftmessung bei einem Steckachsensystem beschrieben, genauere Informationen zu „Wedge Lock“-Systemen wurden von *Bumberger et al.* [8] veröffentlicht.

Bereits ab den 1970er Jahren gab es erste erfolgreiche Versuche, bei denen die Belastung auf mechanische Abbawerkzeuge an Raisebohrköpfen und TBM-Bohrköpfen gemessen werden konnte [4] [5] [6] [7]. Die Messungen wurden im Rahmen wissenschaftlicher Untersuchungen zeitlich begrenzt durchgeführt. Ein erster Versuch der dauerhaften Installation eines Diskenkraftmesssystems wurde im Rahmen von Tunconstruct im Mobydic-Projekt unternommen [9]. Wie bei den zuvor genannten Projekten befinden sich auch hier alle Sensoren innerhalb einer speziellen Messdiske, die für einen dauerhaften Einsatz aus Sicht der Autoren wenig geeignet ist.

Am Lehrstuhl für Subsurface Engineering wurde daher Ende 2010 im Rahmen des FFG-Forschungsprojekts EMSAT gemeinsam mit der Geodata GmbH und der Ruhr-Universität Bochum mit der Entwicklung einer Methode zur Messung von Diskenkraften begonnen, bei der alle Sensoren im Diskenaufleger platziert werden. Somit kann der Baubetrieb, insbesondere der Diskenwechsel, ohne Beeinträchtigung durch das Messsystem durchgeführt werden und so die Grundlage für einen dauerhaften Einsatz geschaffen werden.

Bild 1 zeigt die wichtigsten Bauteile einer Diske und des zugehörigen Gehäuses. Um die optimalen Stellen für die Sensorplatzierung zu finden, wurden umfangreiche numerische Simulationen durchgeführt, bei denen der Spannungsfluss in der Diske und dem Topf (Gehäuse) betrachtet wurden. Bild 2c zeigt die von-Mises-Spannungen im Simulationsmodell. Es wurde besonderer Wert darauf gelegt, die Abnahme der Vorspannkraft der Schrauben korrekt zu modellieren. Dazu wurden Federelemente verwendet, die mit den Knoten des Gewindes und des Schraubenkopfs verbunden wurden. Zu Beginn der Simulation waren die Bauteile ineinander verschoben

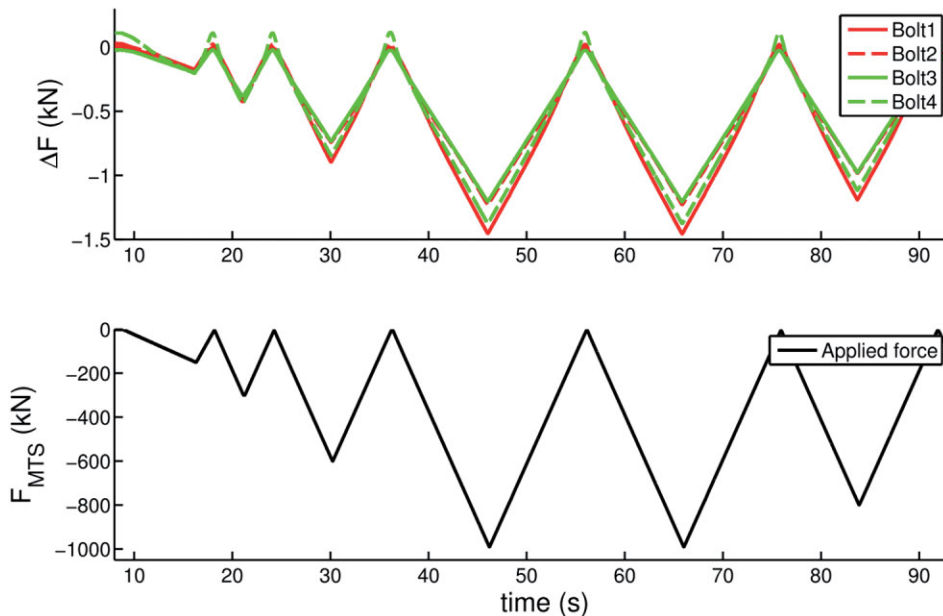


Fig. 4. Signal from the force measurement bolts with the disc under loading in the laboratory [10]
Bild 4. Signal der Kraftmessschrauben bei Belastung der Diske im Labor [10]

the discs, but is typically many months. The measurement equipment thus remains completely unaffected by daily maintenance work, ensuring the possibility of long-term use.

Fig. 4 shows the pressing force applied in the laboratory and the corresponding answering signal from the measurement bolts. The tests were performed up to a force of 1,000 kN, which is four times the average loading on a 17" disc. The quality of the measurement signal depends greatly on the careful installation of the disc. It is important that the disc is positioned centrally and that the M24 bolts are retightened after a few load cycles. This is important because there are settlement effects due to the numerous component interactions. For in-situ application, the measurement signal is only reliable if all bolts are tightened after a certain loading after changing a disc.

3 Disc force measurement in the Koralm Tunnel

In collaboration with Aker Wirth GmbH and the consortium Arge KAT 2, the new method of measurement was tried out in the first Koralm Tunnel TBM. Three disc positions at different radii were selected for the fitting of the measurement equipment in order to cover large areas of the face with the measurements.

In order to consider the altered stiffness behaviour compared to the laboratory test and to test the entire measurement chain from the sensor via radio transmission to the database and the evaluation units, a calibration test was carried out in the assembly cavern of the TBM (Fig. 5). For this test, a clamping apparatus was used, which was mounted to the cutterhead with four adjustable arms and with which a force could be applied using a hydraulic hand pump and measured with a load cell. Since the apparatus is adjustable, it is possible to imitate a number of different loading cases, i.e. various combinations of pressing, side and rolling force.

After successful commissioning, during which a few initial difficulties had to be solved, data was successfully

(Bild 2a) und wurden anschließend auseinander gezogen, um die korrekte Schraubenvorspannung zu erreichen (Bild 2b).

Anhand der Simulationsergebnisse und praktischer Überlegungen wurden zahlreiche Varianten ausgearbeitet, die es ermöglichen sollen, Diskenkräfte messtechnisch zu erfassen. Die vielversprechendsten wurden in einem Laborversuch validiert. Bild 3 zeigt die Versuchsanordnung in der servohydraulischen Presse des Lehrstuhls für Sub-surface Engineering. Neben den Messmitteln, die für den In-situ-Einsatz vorgesehen waren, wurden Disken und Gehäuse mit Dehnmessstreifen, Druckmessfolien und Messuhren bestückt, um das Strukturverhalten besser zu verstehen. Der Schneidring wurde für den Versuch durch einen Dummy ersetzt, der dank der Kugelform eine Kräfteinleitung aus verschiedenen Richtungen (unterschiedliche Lastfälle) ermöglicht.

Die besten Ergebnisse konnten mittels Kraftmessschrauben erzielt werden. Das sind Schrauben mit einer Bohrung im Schaft, in der Dehnmessstreifen appliziert sind. Dadurch kann die Vorspannkraft der Schraube gemessen werden, die bei äußerer Belastung abnimmt. Durch die Abnahme der Vorspannkraft an voneinander unabhängigen Positionen kann auf die äußeren Kräfte (Anpresskraft, Rollkraft, Seitenkraft) rückgerechnet werden. Die M16-Schrauben, die der Befestigung der Einsatzschalen dienen, wurden durch Kraftmessschrauben ersetzt. Die Lebensdauer der Einsatzschalen hängt maßgeblich von der Belastung und vom sorgfältigen Einbau einer Diske ab, liegt aber in der Regel bei mehreren Monaten. Die Messmittel bleiben somit von den täglichen Wartungsarbeiten völlig unberührt, somit ist die Möglichkeit eines längeren Einsatzes gewährleistet.

Bild 4 zeigt die Anpresskraft, die im Labor aufgebracht wurde und das entsprechende Antwortsignal der Messschrauben. Die Tests wurden bis zu einer Kraft von 1.000 kN durchgeführt, was der vierfachen Durchschnittsbelastung einer 17"-Diske. Die Qualität des Messsignals hängt maßgeblich vom sorgfältigen Einbau der Diske ab.



Fig. 5. Calibration test in the assembly cavern of the first Koralm Tunnel TBM

Bild 5. Kalibrierversuch in der Montagekaverne der ersten TBM des Koralmtunnels

recorded at the end of January 2013. In addition to the force values, the angle was also measured, i.e. the exact current position of each disc. This makes it possible to compare the results with the corresponding geological documentation. Fig. 6 shows an average value of the pressing force over a number of revolutions of the cutterhead as well as the associated geological image [11].

The superimposition shows that the distribution of forces on the face is very uneven. An estimation of the loading through the global thrust force could lead to individual discs being massively overloaded. The pressing force is by far the least in the heavily fractured parts of the face, while it is the highest in the intact areas of the face at right angles to the cleavage. The dependency of the cutting forces to the direction of cleavage has already been demonstrated in the numerous cutting tests carried out at the Chair in recent years.

4 Photographic documentation of the face

The face on TBM drives can normally only be seen through manholes and bucket slots, and a complete pic-

Es ist wichtig, dass die Diske zentrisch positioniert wird und dass die M24-Schrauben nach einigen Lastzyklen nachgezogen werden. Das ist wichtig, weil es aufgrund der zahlreichen Bauteilinteraktionen Setzungseffekte gibt. Für den In-situ-Einsatz bedeutet das, dass Messsignale erst dann zuverlässig sind, wenn nach einem Diskenwechsel alle Schrauben nach einer entsprechenden Belastung nachgezogen werden.

3 Diskenkraftmessung am Koralmtunnel

In Zusammenarbeit mit der Aker Wirth GmbH und der Arge KAT 2 ergab sich die Chance, die neue Messmethodik bei der ersten Koralmtunnel-TBM zu implementieren. Es wurden drei Diskenpositionen an unterschiedlichen Radien für die messtechnische Bestückung ausgewählt, um große Bereiche der Ortsbrust mit den Messungen abdecken zu können.

Zur Berücksichtigung der geänderten Steifigkeitsverhältnisse gegenüber dem Laborversuch und für den Testaufbau der gesamten Messkette vom Sensor, über die Funkübertragung, bis hin zur Datenbank und den Auswerteeinheiten wurde ein Kalibrierversuch in der Montagekaverne der TBM durchgeführt (Bild 5). Bei diesem Versuch wurde eine Aufspannvorrichtung verwendet, die mit vier längenverstellbaren Armen am Bohrkopf montiert wurde und mit der über eine hydraulische Handpumpe und eine Kraftmessdose kontrolliert Kraft aufgebracht werden konnte. Durch die Verstellbarkeit der Vorrichtung ist es möglich eine Vielzahl unterschiedlicher Lastfälle, d. h. verschiedene Kombinationen aus Anpress-, Seiten- und Rollkraft, abzubilden.

Nach der erfolgreichen Inbetriebnahme, bei der es galt einige Kinderkrankheiten zu überwinden, konnten Ende Januar 2013 erfolgreich Daten aufgezeichnet werden. Neben den Kraftwerten wurde auch der Winkelwert, d. h. die genaue aktuelle Position jeder Diske, mitbestimmt. Dadurch ist es möglich die Ergebnisse jenen der geologischen Dokumentation gegenüberzustellen. Bild 6

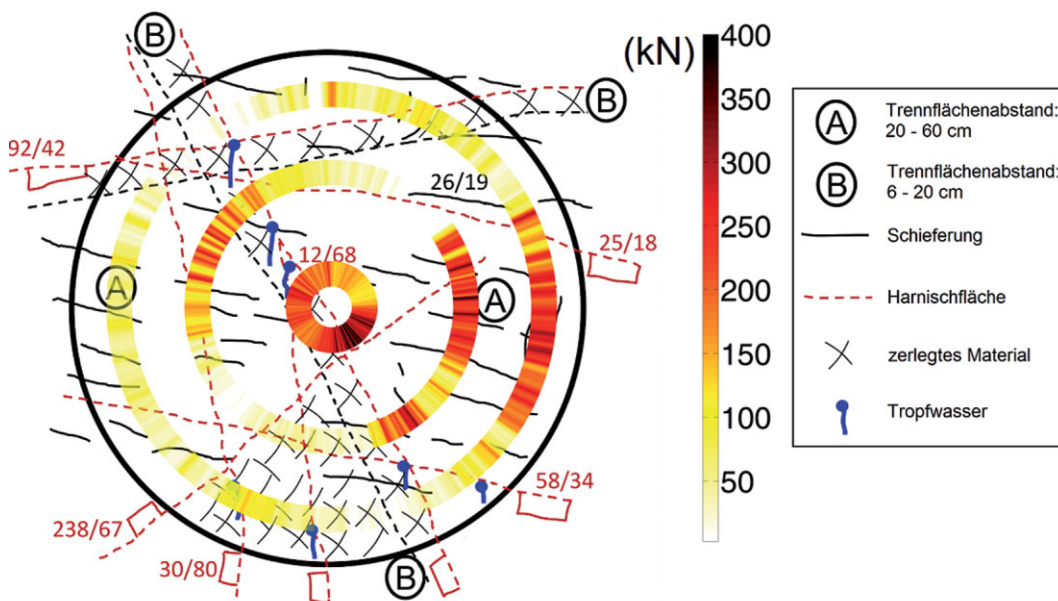


Fig. 6. Superimposition of the measured disc forces with the geological documentation [12]

Bild 6. Gegenüberstellung der gemessenen Diskenkräfte mit der geologischen Dokumentation [12]

ture of the face is normally impossible. A method was therefore developed at the Chair for Subsurface Engineering, which can generate a high-resolution photo of the face or individual rings on the face, which can be provided to geologists or geotechnicians as a tool for interpretation.

This is done by mounting a camera on a fixing bracket in an opening such as a manhole during a maintenance stoppage to take pictures with a high repeat rate or a video while the cutterhead turns. If the overlaps are sufficient, the individual photos or video frames can then be assembled to a ring using automated picture processing methods. The width of the ring depends on how far the cutterhead is retracted, and a sufficient number of cameras can cover the entire face. Fig. 7 shows a photo, which has been assembled from individual video frames using a cross-correlation process in frequency. Small-scale geological changes, breaking out and joints can be recognised very well.

5 Summary

This paper has described developments which have the potential to decisively improve TBM tunnel drives. The measurement of disc force enables individual consideration of the processes at the cutter tools. This is in contrast to the global consideration of machine data, which has the disadvantage that it cannot describe the individual loading differences at the various disc positions and is distorted by friction losses, which are difficult to quantify. It has been shown that disc forces are not only of the highest interest for further mechanical improvement, but can also be correlated with geological features of the face. In combination with photographic documentation of the face, it will be possible in the future to evaluate the behaviour of the cutterhead more precisely. This method of documentation simplifies the work of geologists and geotechnicians, who could only view parts of the face until now.

References

- [1] *Shanahan, A., Box, Z.*: TBM cutter instrumentation at Malaysia's Pahang Selangor water tunnel and Canada's Niagara tunnel project. Proceedings of the World Tunnel Congress 2011, Helsinki, 2011.
- [2] *Edelmann, T., Himmelsbach, C.*: Device for monitoring the state of rotation of a disk cutter arrangement of a shield tunnel boring machine and a disk cutter arrangement for a shield tunnel boring machine. Patent number WO 2013/050010 A2, 2013.
- [3] *Entacher, M., Lassnig, K.*: Findings from disc cutting tests on alpine lithologies/Erkenntnisse aus Diskenschneidversuchen an alpinen Lithologien Geomechanics and Tunnelling 5 (2012), No. 5, pp. 547–556.
- [4] *Gobetz, F. W.*: Development of a Boring Machine Cutter Instrumentation Program. Final Report, United Aircraft Research Laboratories to Department of the Interior. USBM Contract H0122072, UARL Rept M-971373-10, 1973.
- [5] *Hopkins, M. J., Foden, R. L.*: The In-Situ Measurement of Dynamic Cutter Forces on Raiseborer Reaming Heads. Proceedings of the International Conference on Mining and Machinery, pp. 335–338. Brisbane, 1979.
- [6] *Samuel, A. E., Seow, L. P.*: Disc Force Measurements on a Full-face Tunneling Machine. International Journal of Rock



Fig. 7. Assembled photo of an annular ring of the face [13]
Bild 7. Zusammengesetztes Foto eines Kreisrings der Ortsbrust [13]

zeigt einen Mittelwert der Anpresskraft mehrerer Bohrkopfumdrehungen sowie die dazugehörige geologische Aufnahme [11].

Die Gegenüberstellung zeigt, dass die Verteilung der Kräfte an der Ortsbrust sehr unregelmäßig ist. Eine Abschätzung der Belastung über die globalen Vorschubkräfte könnte dazu führen, dass einzelne Disken massiv überlastet werden. In den stark zerlegten Bereichen der Ortsbrust ist die Anpresskraft mit Abstand am niedrigsten, während sie in den intakten Bereichen der Ortsbrust normal zur Schieferungsrichtung am höchsten ist. Die Abhängigkeit der Schneidkräfte von der Schieferungsrichtung deckt sich mit zahlreichen Schneidversuchen, die am Lehrstuhl in den letzten Jahren durchgeführt wurden.

4 Fotografische Dokumentation der Ortsbrust

Der Blick auf die Ortsbrust bei TBM-Vortrieben ist in der Regel nur durch Mannlöcher und Räumerschlitze möglich, ein vollständiges Bild der anstehenden Ortsbrust kann zumeist nicht erstellt werden. Am Lehrstuhl für Subsurface Engineering wurde daher eine Methode entwickelt, mit der es möglich ist, ein hochauflösendes Foto der Ortsbrust bzw. einzelner Kreisringe der Ortsbrust zu generieren, das Geologen und Geotechniker als Werkzeug zur Interpretation zur Verfügung gestellt werden kann.

Dazu wird in einer Öffnung, z. B. einem Mannloch, bei einer Vortriebsunterbrechung eine Kamera mittels einer Montagehalterung platziert und Fotos in kurzer Reihenfolge bzw. ein Video erstellt, während sich der Bohrkopf dreht. Bei ausreichender Überlappung können die Einzelfotos oder Videoframes anschließend mit Methoden der digitalen Bildverarbeitung automatisiert zu einem Kreisring zusammengesetzt werden. Die Dicke des Kreisrings hängt davon ab, wie weit der Bohrkopf zurückgezogen ist, wobei mit einer ausreichenden Anzahl an Kameras die gesamte Ortsbrust abgedeckt werden kann. Bild 7 zeigt ein Foto, das aus Einzelvideoframes mittels eines Kreuzkorrelationsverfahrens im Frequenzraum zusammengesetzt wurde. Kleinräumige geologische Änderungen, Ausbrüche und Klüfte sind sehr gut erkennbar.

Mechanics and Mining Sciences & Geomech. Abstracts, Vol. 21 (1984), No 2, pp. 83–96.

- [7] *Zhang, Z. X., Kou, S. Q., Tan, X. C., Lindqvist, P. A.*: In-situ Measurements of Cutter Forces on Boring Machine at Äspö Hard Rock Laboratory, Part I. Laboratory Calibration and In-Situ Measurements. “Rock Mechanics and Rock Engineering, Vol. 36 (2003), pp. 39–61.
- [8] *Bumberger, T., Entacher, M., Galler, R.*: Numerische Modellierung des Verformungszustandes hochbelasteter Abbaugeräte von Tunnelbohrmaschinen. Calculation Methods in Geotechnics; Compilation of Extended Abstracts, October 12th, 2011, Salzburg, Austria, pp. 88–94.
- [9] *Beer, G.*: Technology Innovation in Underground Construction. Institut für Baustatik, Technische Universität Graz, 2009.
- [10] *Entacher, M., Winter, G., Bumberger, T., Decker, K., Godor, I., Galler, R.*: Cutter force measurement on tunnel boring machines – System design. Tunnelling and Underground Space Technology Vol. 31 (2012), pp. 97–106.
- [11] *Ritter, U.*: Koralmtunnel – Baulos KAT 2, Baugeologische Tunneldokumentation. Unpublished report, 2013.
- [12] *Entacher, M., Winter, G., Galler, R.*: Cutter force measurement on tunnel boring machines – Implementation at Koralmtunnel. Accepted paper for publication in Tunneling and Underground Space Technology, 2013.
- [13] *Henzinger, M.*: Geotechnische Dokumentation der Ortsbrust eines TBM-Vortriebes mittels moderner messtechnischer Methoden. Diplom thesis, Montanuniversität Leoben, 2013.



Martin Entacher
Chair for Subsurface Engineering
University of Leoben
Austria



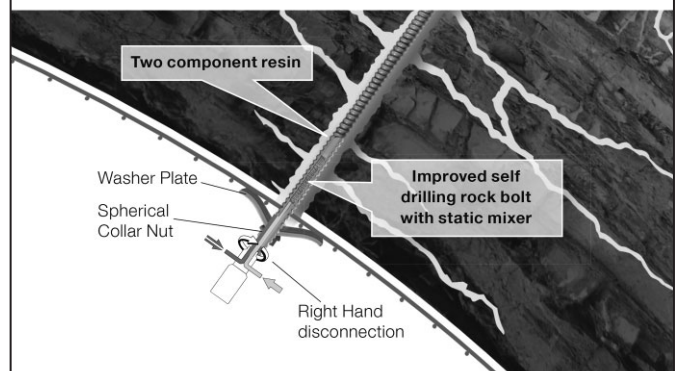
Robert Galler
Chair for Subsurface Engineering
University of Leoben
Austria

5 Zusammenfassung

In diesem Beitrag werden Entwicklungen vorgestellt, die das Potenzial haben, TBM-Vortriebe entscheidend zu verbessern. Die Diskenkraftmessung ermöglicht eine individuelle Betrachtung der Vorgänge am Schneidwerkzeug im Gegensatz zur globalen Betrachtung von Maschinendaten. Diese haben den Nachteil, dass sie die individuellen Belastungsunterschiede an den verschiedenen Diskenpositionen nicht darstellen können und durch Reibungsverluste, die nur schwer quantifizierbar sind, verzerrt werden. Es zeigt sich, dass Diskenkräfte nicht nur für maschinenbauliche Weiterentwicklungen von höchstem Interesse sind, sondern auch mit geologischen Merkmalen der Ortsbrust korreliert werden können. In Kombination mit einer fotografischen Dokumentation der Ortsbrust wird es in Zukunft möglich sein, das Verhalten des Bohrkopfs noch genauer zu beurteilen. Diese Art der Dokumentation erleichtert die Arbeit der Geologen und Geotechniker, die bisher die Ortsbrust nur an ausgewählten Stellen einsehen konnten.

Bohrloch instabil?

IQ – Quickset Roofbolt



- An unlimited volume of resin fills and seals the annulus and all fractures and fissures
 - Ideal where the drill hole collapses and where cartridges can't be inserted
 - Safe and efficient operation from a remote position
 - Coupling allows easy extension of roof bolts
 - The curing process is instant and after only a few seconds the roof bolt can transfer loads
- More information: www.ischebeck.de

FRIEDR. ISCHEBECK GMBH
Loher Str. 31-79 | DE-58256 Ennepetal

ISCHEBECK[®]
TITAN