

The interaction of machine and rock mass analysed using TBM data and rock mass parameters

Interaktion Maschine-Gebirge analysiert mittels TBM-Daten und Gebirgskennwerten

Statistical investigations of TBM data and rock parameters have shown that interactions determined theoretically or in the laboratory are often not realistic because the interaction of the machine with the rock mass is considerably influenced by the type of machine in use, the machine driver and the characteristics of the rock mass. Evaluations of excavation data have shown that the maximum net advance rate is not produced by the maximum thrust force, even in the same rock type. Individualised optimisation of the interaction on the basis of continuously recorded machine data and basic information about the rock mass (type of rock, degree of jointing), which can be determined by geological and geophysical investigations during tunnelling, is therefore of particular significance for economical tunnelling. The evaluation of these data should not replace but rather supplement the control of the machine by the driver.

1 Introduction

Publications have described many ways in which the machine interacts with the rock mass, including:

- sticking of the machine in squeezing rock [28] [29] [22],
- the influence of rock structure [10] [27],
- rock classification using machine data and rock mass parameters [19] [21],
- the control of tunnel boring machines [20] [15],
- the required power of a TBM [23] [24],
- the supporting effect of the cutterhead on the face and the shield on the rock mass [14],
- measures in the event of a collapse [17] [12] or the overloading of the support [31] [3],
- the prediction of penetration rates and cutter wear [1] [9] [25] [11].

The following discourse attempts to analyse the interaction of machine and rock mass using selected machine data and rock mass parameters in relation to thrust force, advance rate and vibration according to the rock mass characteristics.

2 Dependency of the advance rate on the structure of the rock mass

Investigations, for example from *Gehring* [10], show that close joint spacing (i.e. heavy jointing) permits faster penetration. Classification systems, however, e.g. from *Bieniawski* [5], only consider jointing when it affects the extent of support measures. The classification

Die statistischen Untersuchungen von TBM-Daten und Gebirgskennwerten haben gezeigt, dass im Labor oder theoretisch ermittelte Zusammenhänge in der Realität oft nicht gegeben sind, weil die Interaktion Maschine-Gebirge stark von der eingesetzten Maschine, der Fahrweise des Maschinenführers und dem jeweiligen Gebirge beeinflusst wird. So haben Auswertungen von Vortriebsdaten gezeigt, dass auch in der gleichen Gebirgsart die maximale Nettovortriebsgeschwindigkeit nicht bei maximaler Anpresskraft auftritt. Der individuellen Optimierung der Interaktion auf Basis von laufend erhobenen Maschinendaten und von Basisinformationen über das Gebirge (Gesteinsart, Zerlegungsgrad), die durch geologische und geophysikalische Untersuchungen während des Vortriebs erhalten werden können, kommt daher in Bezug auf einen wirtschaftlichen Vortrieb besondere Bedeutung zu. Die Auswertung dieser Daten soll die Steuerung durch den Maschinenführer nicht ersetzen sondern unterstützen.

1 Einleitung

Die Interaktion Maschine-Gebirge kommt in vielfältiger Weise zum Ausdruck. Veröffentlichungen liegen u.a. vor über:

- Das Einklemmen der Maschine im druckhaften Gebirge [28] [29] [22],
- Den Einfluss des Gefüges [10] [27],
- Die Gebirgsklassifikation mittels Maschinendaten und Gebirgsparametern [19] [21],
- Die Regelung von Tunnelbohrmaschinen [20] [15],
- Die erforderliche Leistung einer TBM [23] [24],
- Die Stützwirkung des Schneidrads auf die Ortsbrust und des Schilds auf das Gebirge [14],
- Maßnahmen bei einem Verbruch [17] [12] bzw. bei Überbeanspruchung des Ausbaus [31] [3],
- Die Voraussage von Penetrationsraten und Meißelverschleiß [1] [9] [25] [11].

Im Folgenden wird versucht, anhand von ausgewählten TBM-Daten und Gebirgskennwerten die Interaktion zwischen Maschine und Gebirge in Bezug auf Anpresskraft, Vortriebsgeschwindigkeit und Erschütterungen in Abhängigkeit von den Gebirgseigenschaften zu analysieren.

2 Abhängigkeit der Vortriebsgeschwindigkeit vom Trennflächengefüge des Gebirges

Wie Untersuchungen, z.B. von *Gehring* [10], zeigen, ermöglicht ein geringerer Trennflächenabstand (d.h. eine

system adapted to TBM-drives from Barton [4], for example, takes into account that rock mass quality affects penetration as well as the extent of support measures. The (gross) advance rate falls in the case of an open machine when jointing and thus the extent of support measures is increasing despite faster penetration. With shield machines, this "limit" is only reached later with the requirement for additional and special measures.

During TBM drives in the granite gneiss as well as paragneiss and mica schist of the Ötztal crystalline (pressure tunnel of the lower stage of Sellrain-Silz power station group, TIWAG), it turned out that heavier jointing led to three to four times the penetration (Figures 1a and 1b). The degree of jointing was defined according to the intensity of jointing and schistosity as well as the nature of the joints [26]. At the same time, it must be considered that this relationship depends strongly on the type of rock – the gradient of the increase of penetration with the degree of jointing is significantly higher in the paragneiss and mica schist than in granite gneiss [27].

Statistical investigations of the data of the new Hieflau head race tunnel [6] driven in limestones and dolomites have shown that the influence of jointing was considerably less on this drive than in the example of Sellrain-Silz (Figure 2).

Additional information about the rock conditions was obtained for a section of the Hieflau headrace tunnel from seismic reflection measurements using the "Tunnel Seismic While Drilling" (TSWD) method [7] [8]. The seismic reflections from the rock mass can be directly related to the rock jointing because it is dependent on alterations of the seismic velocity and the density. If the rock is more heavily jointed, larger amplitude reflections can be expected

höhere Zerlegung) eine höhere Penetration. Klassifikationssysteme, z.B. von Bieniawski [5], berücksichtigen die Zerlegung jedoch nur, soweit sie den Stützmittelaufwand beeinflussen. Im für TBM-Vortriebe adaptierten Klassifikationssystem nach Barton [4] kommt zum Ausdruck, dass die Gebirgsqualität sowohl die Penetration als auch die Stützmaßnahmen beeinflusst. Durch den höher werdenden Stützmittelaufwand bei steigender Zerlegung sinkt bei offener TBM trotz höherer Penetration die (Brutto-) Vortriebsleistung. Bei Schildmaschinen wird diese „Wende“ erst später – bei der Notwendigkeit von Zusatz- oder Sondermaßnahmen – erreicht.

Bei TBM-Vortrieben in Granitgneisen sowie Paragneisen und Glimmerschiefern des Ötztaler Kristallins (Druckstollen Unterstufe, Kraftwerksgruppe Sellrain-Silz, TIWAG) zeigte sich, dass eine höhere Zerlegung zu einer drei- bis vierfach höheren Penetration führt (Bilder 1a und 1b). Der Zerlegungsgrad wurde nach Intensität der Klüftung und Schieferung sowie Kluftbeschaffenheit definiert [26]. Gleichzeitig ist zu erkennen, dass dieser Zusammenhang stark gesteinspezifisch ist – der Gradient der Zunahme der Penetration mit dem Zerlegungsgrad ist in den stärker geschieferten Paragneisen und Glimmerschiefern deutlich höher als im Granitgneis [27].

Statistische Untersuchungen der Daten des in Kalken und Dolomiten aufgefahrene, neuen Triebwasserstollens Hieflau [6] haben gezeigt, dass der Einfluss der Gebirgszerlegung bei diesem Vortrieb bedeutend geringer war als im Beispiel Sellrain-Silz (Bild 2).

Zusätzliche Informationen über den Gebirgszustand ergaben sich für einen Teilabschnitt im Triebwasserstollen Hieflau aus den reflexionsseismischen Messungen mit der „Tunnel Seismic While Drilling (TSWD)-Methode“ [7] [8]. Die reflexionsseismische Antwort des Gebirges kann di-

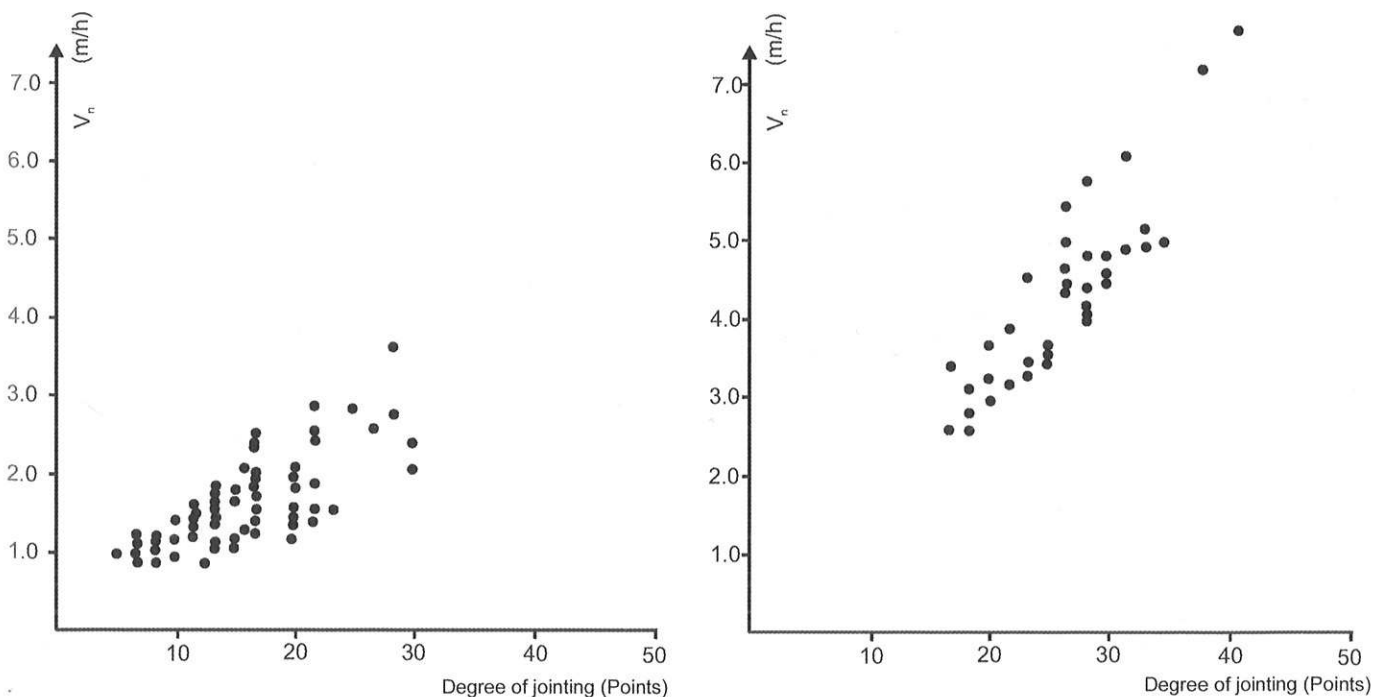


Fig. 1. Relationship of the advance rate to the degree of jointing of the rock mass in the pressure tunnel of the lower stage of Sellrain-Silz power station group (open TBM, \varnothing 3.9 m, daily average values); left: granite gneiss, right: paragneiss and mica schist

Bild 1. Abhängigkeit der Vortriebsgeschwindigkeit vom Zerlegungsgrad des Gebirges im Druckstollen der Unterstufe der KW-Gruppe Sellrain-Silz (offene TBM, \varnothing 3,9 m, Tagesmittelwerte), links: Granitgneis, rechts: Paragneis und Glimmerschiefer

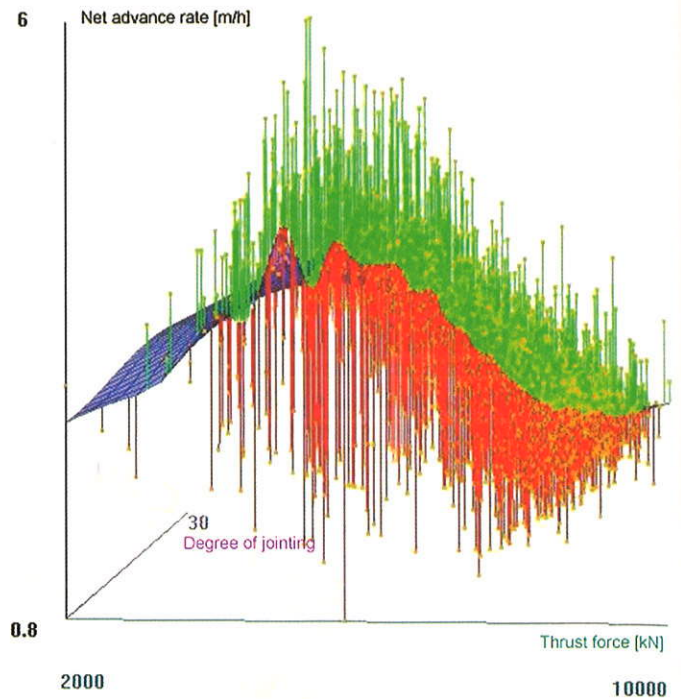
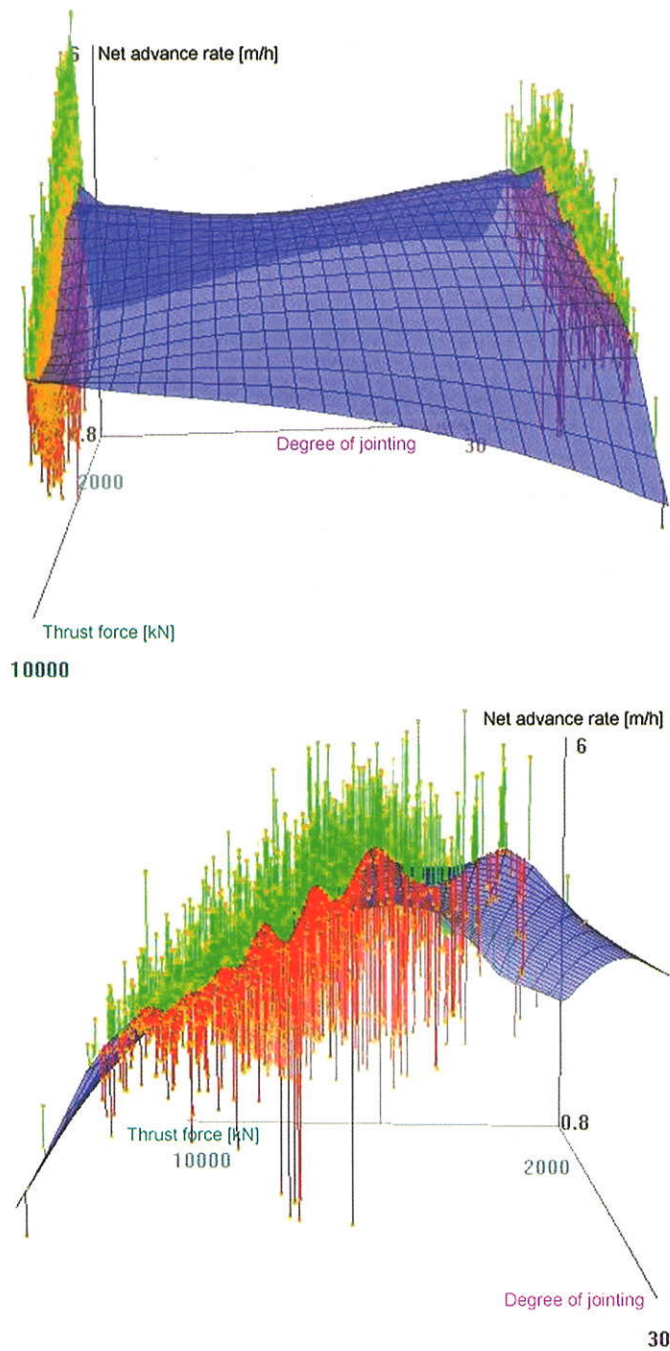


Fig. 2. New headrace tunnel at Hieflau (shield TBM, $\varnothing 6.18$ m, average values per running m), relationship of the degree of jointing (details according to the joint venture, interpreted in accordance with [26]), thrust force [kN] and advance rate [m/h] from [18]
 Bild 2. Neuer Triebwasserstollen Hieflau (Schild-TBM, $\varnothing 6,18$ m, Mittelwerte pro lfm), Zusammenhang Zerlegungsgrad (Angaben laut ARGE, interpretiert gemäß [26]), Anpresskraft [kN] und Vortriebsgeschwindigkeit [m/h] aus [18]

ed than with less jointing, because there is a continuous alternation of rock strength. This is also confirmed by the estimation of rock parameters like the Rock Strength Index [2] and the Rock Mass Rating [30] from the amplitudes of the reflections.

In the case of Hieflau, the seismic reflection amplitudes (Figure 3), which can be equated with rock jointing, only showed an extremely small increase of advance rate with increasing rock jointing. The reasons for the greatly contrasting relationships could be:

1. As shown by Figure 4, thrust forces were less with heavier jointing.

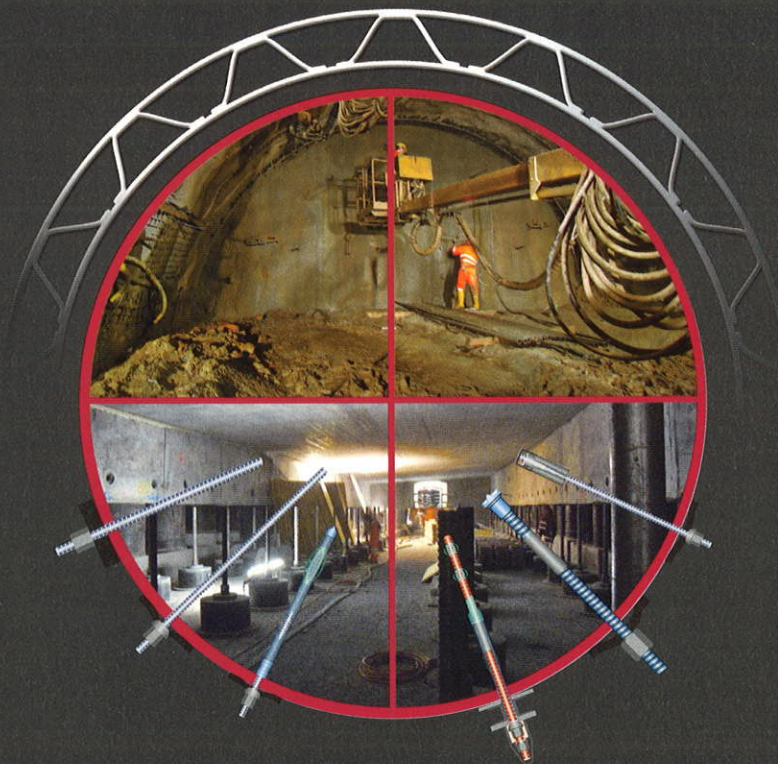
In less heavily jointed areas (left-hand diagram), the box and thus the average thrust force (median – continuous line in the box) lie considerably higher than in the diagram for the more heavily jointed area (right-hand diagram).

rekt mit der Gebirgszerlegung in Zusammenhang gebracht werden, da sie von den Veränderungen der seismischen Geschwindigkeit und der Dichte abhängt. Bei hoher Gebirgszerlegung sind größere Amplituden der Reflexionen als bei niedriger Gebirgszerlegung zu erwarten, da ein ständiger Wechsel in der Gebirgsfestigkeit besteht. Dies wird auch durch Abschätzungen von Gebirgsparametern wie dem „Rock Strength Index“ [2] und dem „Rock Mass Rating“ [30] aus den Amplituden der Reflexionen bestätigt.

Im Fall Hieflau zeigen die reflexionsseismischen Amplituden (Bild 3), die somit mit der Gebirgszerlegung gleichzusetzen sind, nur eine äußerst geringe Zunahme der Vortriebsgeschwindigkeit bei steigender Gebirgszerlegung. Die Ursachen für die stark unterschiedlichen Zusammenhänge könnten sein:

1. Wie Bild 4 zeigt, waren die Anpresskräfte bei höherer Zerlegung geringer.

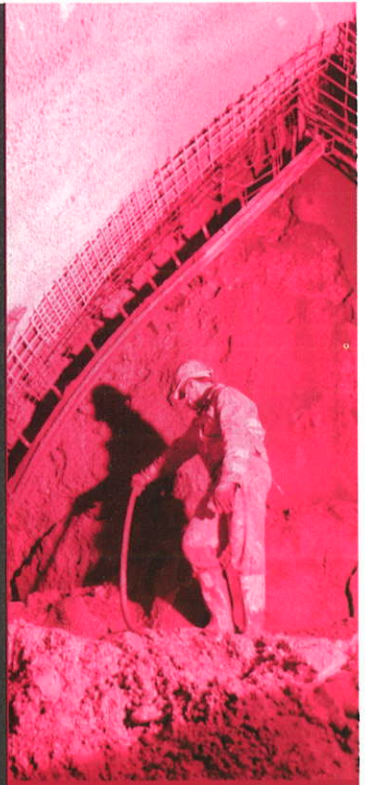
GROUND CONTROL SOLUTIONS



Chienberg-Tunnel

Each tunnel has a different geology and requires specific customized products and systems. DSI Tunneling Products and Systems match these requirements perfectly.

Our extensive R&D activities guarantee innovative, flexible and reliable underground support products to control every imaginable condition. We offer a complete line of high-quality ISO 9001:2000 certified and patented products. DSI is a leading company in the development, production and application of ground control solutions for the tunneling market. In line with our strong service approach, we are always committed to satisfying our customers' demands.



Rock Reinforcement

DYWIDAG THREADBAR® Anchors
Rebar Rock Bolts and Spiles
IBO, IBI & DYWI® Drill
Self-Drilling Bolts and Spiles
Expandable Friction Bolts
AT – POWER SET Self-Drilling
Bolts and TUBESPILE™
Mortar-Mixing Pumps

Rock Support

Steel Arches and TH-Beams
Liner Plates
PANTEX Lattice Girders
AT – LSC™ Elements
Lining Stress Controllers

AT – Casing System

AT – Pipe Umbrella
Support System
AT – Drainage System
AT – GRP Injection System

DYWIDAG-SYSTEMS INTERNATIONAL



Local Presence – Global Competence

www.dsi-tunneling.com

DYWIDAG-Systems
International GmbH
Alfred-Wagner-Straße 1
4061 Pasching/Linz
www.alwag.com

ALWAG SYSTEMS

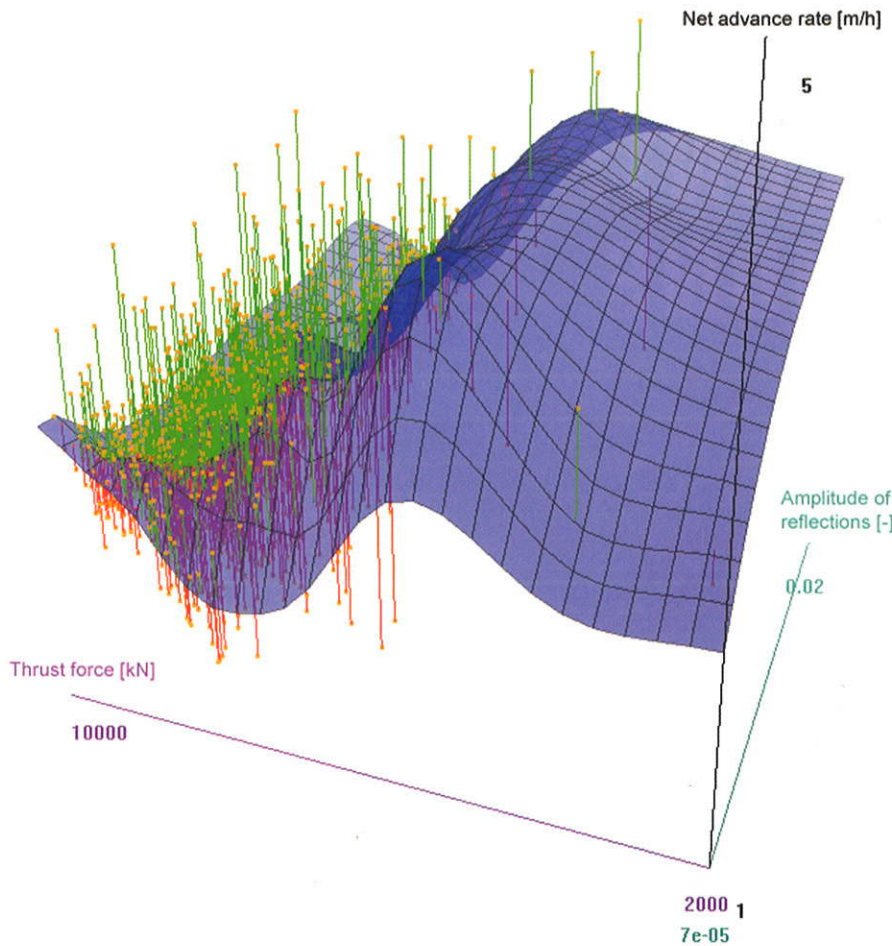


Fig. 3. New headrace tunnel at Hief lau, relationship of amplitude of reflections [-], thrust force [kN] and net advance rate [m/h]
 Bild 3. Neuer Triebwasserstollen Hief lau, Zusammenhang Reflexionsamplitude [-], Anpresskraft [kN] und Nettovortriebsgeschwindigkeit [m/h]

This probably results from the fact that the quantity of material to be carried away was too large and the performance of the machine had to be reduced because otherwise the capacity of the conveyor belt would have been exceeded, so higher power or shorter stroke time would not have been sensible on account of the achievable ring construction time.

- The required power of a machine can be calculated from the following formula according to *Rostami, Ozdemir & Nilson* [23] or *Rostami* [24]:

required power

= constant

$$D \cdot N \cdot \text{RPM} \cdot \sqrt[3]{\Phi^2} \cdot R^{\frac{5}{6}} \cdot T^{\frac{5}{6}} \cdot \frac{\sin \frac{\Phi}{2}}{1 + \Psi} \cdot \sqrt[3]{S} \cdot \sqrt[3]{\sigma_c^2} \cdot \sqrt[3]{\sigma_t}$$

with the machine parameters:

- D cutterhead diameter,
- N number of cutters,
- RPM cutterhead rotation speed,

and disc parameters:

- Φ angle of the contact between the rock and disc cutter,
- R cutter radius,
- T thickness of the disc cutting edge,
- Ψ constant for the pressure distribution function in the area of contact between disc and rock (typically 0.2 to -0.2),

Im schwächer zerlegten Bereich (linkes Diagramm) liegt die Box und somit auch die mittlere Anpresskraft (Median – durchgehender Strich in der Box) wesentlich höher als im Diagramm des stärker zerlegten Bereichs (rechtes Diagramm).

Dies ist wahrscheinlich darauf zurückzuführen, dass die Menge an abzuführendem Material zu groß war und die Leistung der Maschine gedrosselt werden musste, weil die Kapazität des Förderbands sonst überschritten worden wäre oder eine höhere Leistung bzw. kürzere Hubzeit aufgrund der erzielbaren Ringbauzeit nicht sinnvoll wäre.

- Die erforderliche Leistung einer Maschine ergibt sich laut *Rostami, Ozdemir & Nilson* [23] bzw. *Rostami* [24] zu:

erforderliche Leistung

= Konstante

$$D \cdot N \cdot \text{RPM} \cdot \sqrt[3]{\Phi^2} \cdot R^{\frac{5}{6}} \cdot T^{\frac{5}{6}} \cdot \frac{\sin \frac{\Phi}{2}}{1 + \Psi} \cdot \sqrt[3]{S} \cdot \sqrt[3]{\sigma_c^2} \cdot \sqrt[3]{\sigma_t}$$

mit den Maschinenparametern

- D Bohrkopfdurchmesser,
- N Anzahl der Meißel am Bohrkopf,
- RPM Bohrkopfdrehungsgeschwindigkeit,

Meißelparametern

- Φ Meißelanstellwinkel,
- R Meißelradius,

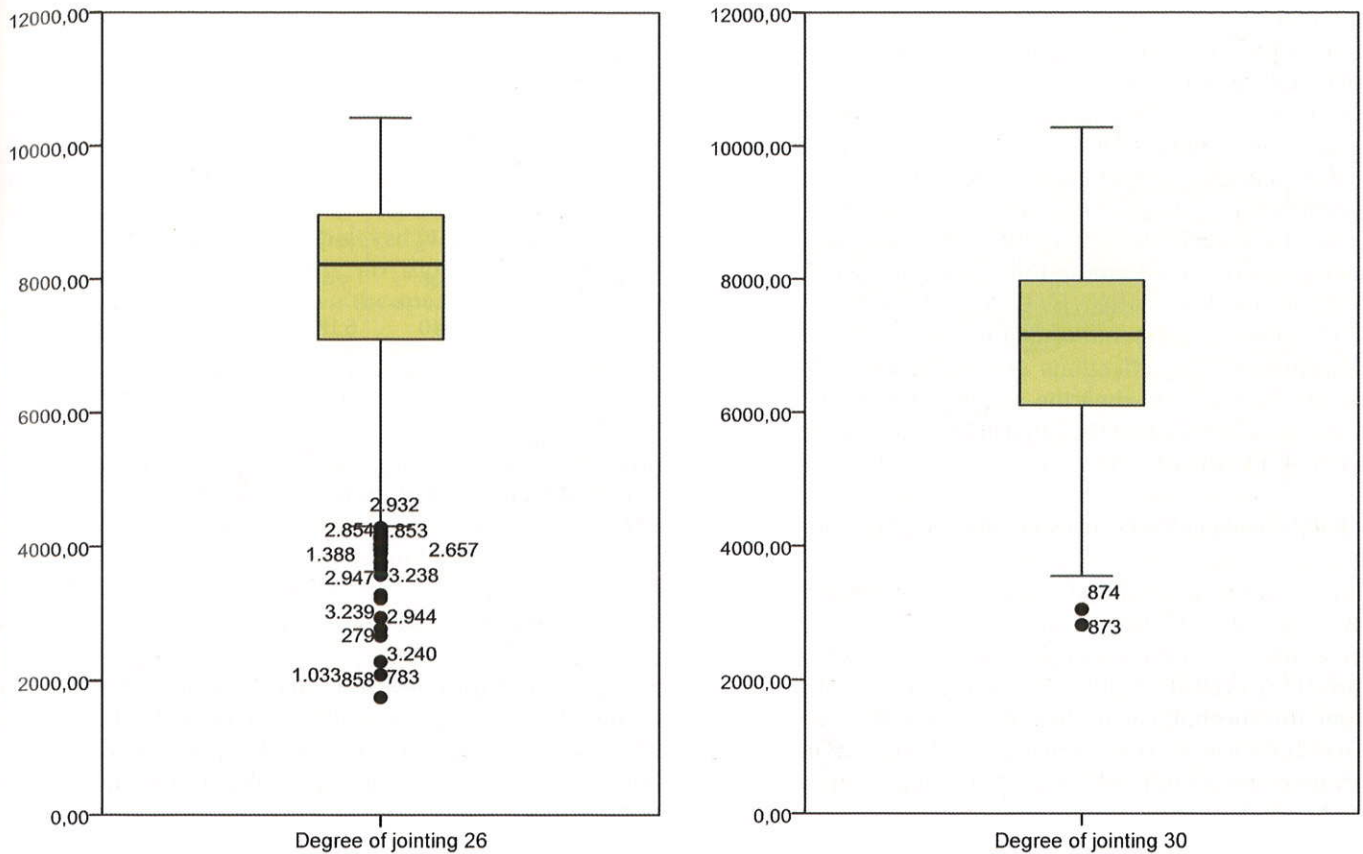


Fig. 4. New headrace tunnel at Hieflau, relationship of thrust force [kN] and degree of jointing (details according to the joint venture, interpreted in accordance with [26])

Bild 4. Neuer Triebwasserstollen Hieflau, Zusammenhang Anpresskraft [kN] und Zerlegungsgrad (Angaben laut ARGE, interpretiert gemäß [26])

and rock parameters:

- S spacing between the cuts,
- σ_c uniaxial compressive rock strength,
- σ_t tensile strength of rock.

Although different generations of machines were used in the cases of Sellrain-Silz and Hieflau, an estimation of the required power has been attempted on the basis of the formula shown above. Taking into account the machine and cutter parameters given in Table 1 and the similar rock parameters in both cases, the ratio of required power is 2.2. This ratio is, however, considerably less than that of the actual installed power of the machines (= 3.9). The power of the machine in Hieflau in relation to the rock properties was therefore considerably higher than that of the machine in Sellrain-Silz. The influence of rock jointing was therefore less significant in Hieflau than in Sellrain-Silz.

Statistical investigations of the influence of the rock type on the advance rate etc. have also produced no significant correlations in the case of Hieflau.

3 Vibration – structure of the rock mass

During the course of the seismic reflection measurements in Hieflau, the vibrations caused by the TBM were measured by an accelerometer directly at the cutterhead while

- T Dicke der Meißelschneide,
- Ψ Konstante für die Verteilung der Spannungen im Kontaktbereich Meißel-Fels (0,2 bis -0,2),

Gebirgsparametern

- S Gebirgszerlegung,
- σ_c einaxiale Gesteinsdruckfestigkeit,
- σ_t Gesteinszugfestigkeit.

Obwohl es sich in den Fällen Sellrain-Silz und Hieflau um unterschiedliche Maschinengenerationen handelt, wird eine Abschätzung der erforderlichen Leistung auf Basis der oben angeführten Formel versucht. Unter Berücksichtigung der in Tabelle 1 angegebenen Maschinen- und Meißelparameter und in beiden Fällen ähnlichen Gebirgsparametern ist das Verhältnis der erforderlichen Leistungen 2,2. Dieses Verhältnis ist aber wesentlich kleiner als das Verhältnis der tatsächlich installierten Leistungen der Vortriebsmaschinen (= 3,9). Die Leistung der Maschine in Hieflau in Relation zu den Gebirgseigenschaften war daher wesentlich größer als die Leistung der Maschine in Sellrain-Silz und der Einfluss der Gebirgszerlegung in Hieflau weniger ausgeprägt wie im Fall Sellrain-Silz.

Statistische Untersuchungen des Einflusses der Gesteinsart auf die Vortriebsgeschwindigkeit usw. haben im Fall Hieflau ebenfalls keine signifikanten Zusammenhänge erbracht.

tunnelling was in progress. The magnitude of these vibrations depends on the coupling of the cutterhead with the rock mass and therefore also on the condition of the rock, e.g. the degree of jointing. If the jointing is heavy, stones have to be broken at the face, which results in increased power acting in the cutterhead/rock mass system [14], which can then lead to increased vibration. As described above, the amplitude of the reflections was interpreted as a measure of rock jointing during the seismic reflection measurements in Hieflau. As Figure 5 shows, the intensity of vibration is independent of the thrust force when the amplitude of the reflections are higher (= more heavily jointed rock). Only when the amplitude of the reflections is low (= light jointing) the intensity of vibration is proportional to the thrust force.

4 Relationship between advance rate and thrust force

The relationship of thrust force to penetration is mostly given as directly proportional: with increasing thrust force, the penetration and the advance rate increase linearly [16] [11]. The statistical investigations of the data from the mechanical boring of the Vereina tunnel [13] have, however, shown (Figure 6) that the maximum net advance rate is not achieved at the maximum, but with medium thrust force and torque.

As Figure 2 shows, the drive at Hieflau was not bored with maximum advance rate when the thrust force was maximum, but rather the maximum advance rate occurred with medium thrust force independent of the degree of jointing.

Table 1. Machine and cutter parameters of the compared drives

Tabelle 1. Maschinen- und Meißelparameter der verglichenen Vortriebe

	Installed power at the cutter head [kW]	D [m]	N [-]	RPM [min ⁻¹]	D _M ["]	T ["]
Sellrain-Silz	368	3.9	32	5.6	14	3/4
Hieflau	1440	6.18	43	6.25-7.25	17	3/4

D - TBM diameter, N - number of cutters, RPM - cutterhead rotation speed, D_M - diameter of the cutters, T - thickness of the disc cutting edge
 D - TBM-Durchmesser, N - Anzahl der Diskenmeißel, RPM - Bohrkopfdrehungsgeschwindigkeit, D_M - Durchmesser der Diskenmeißel, T - Dicke der Meißelschneide

3 Erschütterungen – Gefüge

Im Zuge der reflexionsseismischen Messungen in Hieflau wurden während des laufenden Vortriebs die Erschütterungen der TBM durch einen Beschleunigungsaufnehmer direkt am Schneidrad registriert. Die Größe dieser Erschütterungen hängt von der Ankopplung des Bohrkopfs mit dem Gebirge und damit auch vom Zustand des Gebirges, z.B. dem Zerlegungsgrad, ab. Bei hohem Zerlegungsgrad kommt es an der Ortsbrust vermehrt zu Ablösung von Steinen, die eine erhöhte Krafteinwirkung im System Bohrkopf-Gebirge bewirkt [14], was wiederum zu größe-

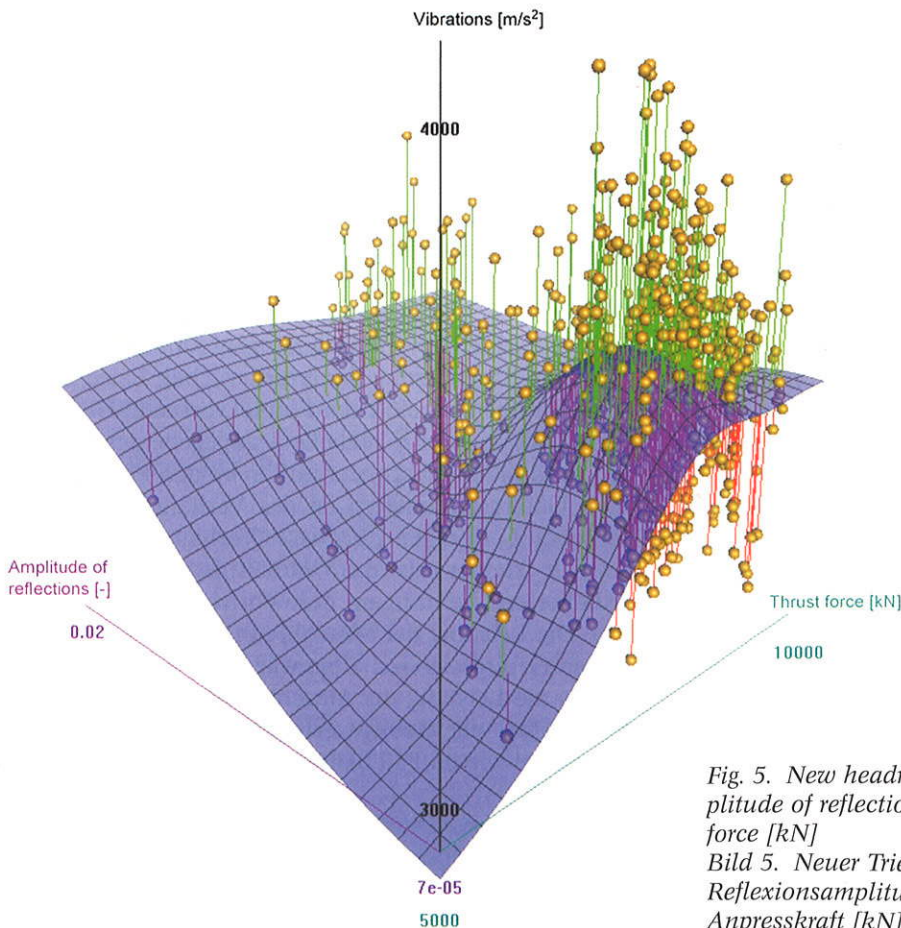


Fig. 5. New headrace tunnel at Hieflau, relationship of amplitude of reflections [-], TBM vibration [m/s²] and thrust force [kN]

Bild 5. Neuer Triebwasserstollen Hieflau, Zusammenhang Reflexionsamplitude [-], TBM-Erschütterungen [m/s²] und Anpresskraft [kN]

5 Relationship between thrust force and wear

Menghin [16] reports that during the boring of the lower pressure tunnel stage of the Sellrain-Silz power station group, the use of the full capability of the machine as given by the manufacturer resulted in an unproportionately high increase in wear costs (cutters, bearings, hydraulics) in relation to the increase achieved in gross advance rate.

In the case of Hieflau, no significant relationship could be established between the specific cutter costs and the thrust force.

6 Conclusions and outlook

The statistical investigations of TBM data and rock mass parameters showed that relationships determined in the laboratory or theoretically often do not occur in reality because the interaction of the machine with the rock mass is strongly influenced by the type of machine used, the "driving style" of the machine driver and the rock mass. The advance rate of the machine is partly influenced by geological parameters (rock type, geotechnical parameters, degree of jointing), partly by the type of machine and by machine parameters (installed power, thrust force, number of discs, torque) and also by the driving style. Statistical investigations of such data have demonstrated that the maximum net advance rate does not occur at the maximum thrust force, even in the same rock mass. The knowledge of

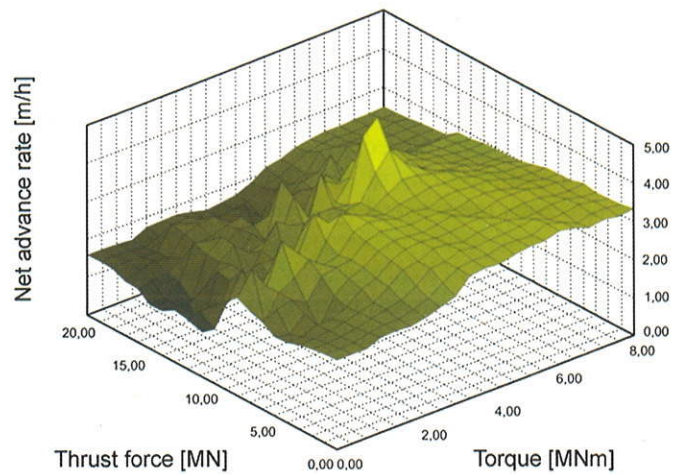


Fig. 6. Vereina tunnel, relationship of thrust force, torque and advance rate

Bild 6. Vereinatunnel, Zusammenhang Anpresskraft, Drehmoment und Vortriebsgeschwindigkeit

ren Erschütterungen führen kann. Wie oben beschrieben, wurde bei den reflexionsseismischen Messungen in Hieflau die Amplitude der Reflexionen als Kenngröße für die Gebirgszerlegung interpretiert. Wie Bild 5 zeigt, ist bei höherer Amplitude der Reflexionen (= höhere Gebirgszerlegung) die Intensität der Erschütterungen unabhängig von der Anpresskraft. Nur bei geringer Amplitude der Re-

- Lokomotiven, Stollen-Wagons, Personenwagen, Nachmischer
- Stollenbahnmaterial und Zubehör
- Hochleistungs-Dumper
- Untertage-Bewetterung, Spiral- und Flachlütten
- Mörtelmischpumpen
- Felsanker, Reibrohranker, Injektions-Selbstbohranker und Zubehör
- Pipe Roof Systeme
- Einbaubogen, TH-Profile, Gitterträger, Hinterfüll- und Profilverbundmatten, Liner Plates
- Pipelines für Wasser und Pressluft
- Polyurethanharze und Zweikomponenten-Verpresspumpen

belloli

TUNNELLING IS OUR BUSINESS



BELLOLI SA
CH-6537 Grono

Tel. ++41 (0)91 820 38 88
Fax ++41 (0)91 820 38 80
belloli@belloli.ch
www.belloli.ch

geophysical parameters like vibration or reflection amplitude (the latter being a measure of rock jointing) can lead to an early change of the way of driving (e.g. reduction of the thrust force). This can be used to optimise the drive, including for example the reduction of cutter wear. The individualised optimisation of the interaction between machine and rock mass based on continuously recorded machine data and basic information about the rock mass (rock type, degree of jointing), which can be obtained from geological and geophysical investigations during the drive, can therefore produce real economic benefits in tunnelling. The evaluation of machine data should, however, not replace but supplement the control by the driver.

Acknowledgement

The authors wish to thank Dipl.-Ing. Wolfgang Weber for his extremely helpful comments and suggestions and the Verbund and the joint venture Jäger-Strabag-Frutiger for providing the TBM data from Hieflau.

References

- [1] *Alber, M.*: An integrated approach to penetration, advance rates and disc cutter wear for hard rock TBM drives. *Geomechanics and Tunnelling* 1 (2008), No. 1, pp. 29–37.
- [2] *Aoki, K., Mito, Y., Yamamoto, T. & Shirasagi, S.*: Geostatistical Evaluation of the Mechanical Properties of Rock Mass for TBM Tunnelling by Seismic Reflection Method. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, Vol. 40 (2007), No. 6, p. 591–602.
- [3] *Bach, D., Fuchs, W., Lehner, W. & Obermeier, O.*: Tunnelkette Perschling – Reiserbergtunnel and Stierschweiffeldtunnel: TBM success under difficult ground conditions. *Geomechanics and Tunnelling* 1 (2008), No. 6, pp. 567–575.
- [4] *Barton, N.*: TBM tunneling in jointed and faulted rock. A.A. Balkema, Rotterdam. 2000.
- [5] *Bieniawski, Z. T.*: Tunnel design by rock mass classifications. U.S. Army Engineer Waterways Experiment Station. 1990.
- [6] *Bitschnau, M., Gappmaier, F. & Weber, W.*: Hieflau power station extension – mechanical tunnelling with innovative solutions. *Geomechanics and Tunnelling* 2 (2009), No. 1, pp. 85–93.
- [7] *Brückl, E., Chwatal, W., Mertl, S. & Radinger, A.*: Continuous exploration ahead of the tunnel face by TSWD – Tunnel Seismic White Drilling. Proceedings at EEGS' Annual Meeting Keystone, Colorado April 11–15, pp. 353–360, 2010.
- [8] *Brückl, E., Chwatal, W., Mertl, S. & Radinger, A.*: Exploration Ahead of a Tunnel Face by TSWD-Tunnel Seismic White Drilling. *Geomechanics and Tunnelling* 1 (2008), No. 5, pp. 460–465.
- [9] *Frenzel, C., Käsling, H., Thuro, K.*: Factors influencing disc cutter wear. *Geomechanics and Tunnelling* 1 (2008), No. 1, pp. 55–60.
- [10] *Gehring, K.*: Classification of drillability, cuttability, borability and abrasivity in tunnelling. *Felsbau* 15 (1997), No. 3, pp. 183–191.
- [11] *Gehring, K.*: The influence of TBM design and machine features on performance and tool wear in rock. *Geomechanics and Tunnelling* 2 (2009), No. 2, pp. 140–155.
- [12] *Gschmitzer, E. & Goliash, R.*: TBM modification for challenging rock conditions – a progress report of the Niagara project (NTP). *Geomechanics and Tunnelling* 2 (2009), No. 2, pp. 168–178.

flexionen (= geringere Gebirgszerlegung) ist die Intensität der Erschütterungen proportional zur Anpresskraft.

4 Zusammenhang Vortriebsgeschwindigkeit – Anpresskraft

Das Verhältnis Anpresskraft zu Penetration wird meist als direkt proportional angegeben: Mit steigender Anpresskraft steigt die Penetration bzw. die Vortriebsgeschwindigkeit linear an [16] [11]. Die statistischen Untersuchungen der Daten vom maschinellen Vortrieb im Vereinatunnel [13] haben aber gezeigt (Bild 6), dass die maximale Nettovortriebsgeschwindigkeit nicht bei maximaler Anpresskraft und maximalem Drehmoment erreicht wurde, sondern bei mittlerer Anpresskraft und mittlerem Drehmoment.

Wie Bild 2 zeigt, erfolgte der Vortrieb auch im Fall Hieflau nicht bei maximaler Anpresskraft mit maximaler Vortriebsgeschwindigkeit, sondern die maximale Vortriebsgeschwindigkeit stellte sich unabhängig vom Zerlegungsgrad bei mittlerer Anpresskraft ein.

5 Zusammenhang Anpresskraft – Verschleiß

Menghin [16] berichtet, dass beim Druckstollen Unterstufe der Kraftwerksgruppe Sellrain-Silz bei der vollen, vom Maschinenhersteller angegebenen Belastbarkeit der Maschine im Betrieb die Verschleißkosten (Meißel, Lager, Hydraulik) unverhältnismäßig höher stiegen als die erzielte Steigerung der Bruttovortriebsleistung.

Im Fall Hieflau konnte kein signifikanter Zusammenhang zwischen spezifischen Meißelkosten und Anpresskraft festgestellt werden.

6 Schlussfolgerungen und Ausblick

Die statistischen Untersuchungen von TBM-Daten und Gebirgskennwerten haben gezeigt, dass im Labor oder theoretisch ermittelte Zusammenhänge in der Realität oft nicht gegeben sind, weil die Interaktion Maschine-Gebirge stark von der eingesetzten Maschine, der „Fahrweise“ des Maschinenführers und dem jeweiligen Gebirge beeinflusst wird. Die Vortriebsgeschwindigkeit einer TBM wird teils von geologischen Parametern (Gesteinsart, geotechnische Kennwerte, Zerlegungsgrad), teils vom Maschinentyp und von Maschinenparametern (installierte Leistung, Anpressdruck, Meißelanzahl, Drehmoment), aber auch von der Fahrweise beeinflusst. Statistische Untersuchungen von solchen Daten haben gezeigt, dass auch in der gleichen Gebirgsart die maximale Nettovortriebsgeschwindigkeit nicht bei maximaler Anpresskraft auftritt. Die Kenntnis von geophysikalischen Parametern wie Erschütterung oder Reflexionsamplitude (letztere ist ein Maß für die Gebirgszerlegung) kann zu einer frühzeitigen Änderung der Fahrweise (z.B. Rücknahme des Anpressdrucks) führen. Damit kann eine Optimierung des Vortriebs (z.B. auch Verringerung des Meißelverschleißes) erreicht werden. Der individuellen Optimierung der Interaktion Maschine-Gebirge auf Basis von laufend erhobenen Maschinendaten und von Basisinformationen über das Gebirge (Gesteinsart, Zerlegungsgrad), die durch geologische und geophysikalische Untersuchungen während des Vortriebs erhalten werden können, kommt daher in

- [13] *Helpersdorfer, M.*: Statistische Untersuchungen der Maschinendaten TBM Vereina. Unveröffentlichter Bericht. Institut für Ingenieurgeologie an der TU Wien. 1999.
- [14] *Lauffer, H.*: Die Festgesteinsschildmaschine, Interaktion zwischen Gebirge und Vortriebssystem, Kompetenz- und Risikoverteilung. *Geomechanics and Tunnelling 1* (2008), No. 6, pp. 590–595.
- [15] *Maidl, U.*: FEM-Simulation und wissenschaftliche Entscheidungsfindung im Rahmen des Prozesscontrollings beim hochmechanisierten Schildvortrieb. Tagungsband Österreichischer Tunneltag 2004. pp. 91–100. Österr. Nationalkomitee der ITA. Vienna, 2004.
- [16] *Menghin, M.*: Aktenvermerk betreffend die Kraftwerksgruppe Sellrain-Silz, Druckstollen Unterstufe – Baulos 7, Ausbruchsdaten (mechanischer Vortrieb). 1979.
- [17] *de Oliveira Filho, A.A., Belitardo, G.T., Büchi, E. & Vigl, A.*: San Francisco HEP headrace tunnel – TBM success under the presence of pressurized water in faulty deep rock. *Geomechanics and Tunnelling 1* (2008), No. 6, pp. 552–557.
- [18] *Ostermann, V.*: Untersuchung der Zusammenhänge Gebirge – Tunnelbohrmaschine am Beispiel des Triebwasserstollens des Kraftwerks Hieflau. Diplomarbeit, TU Wien, 2009.
- [19] *Poisel, R., Zettler, A., Bach, D., Lakovits, D. & Kastner, W.*: Rock mass rating based on tunnel boring machine data. *Felsbau 17* (1999), No. 3, pp. 168–174.
- [20] *Poisel, R., Tentschert, E., Bach, D. & Zettler, A.*: Gebirgsklassifikation und Regelung von Tunnelbohrmaschinen mittels Fuzzy Logik. *Felsbau 17* (1999), No. 5, pp. 486–492.
- [21] *Poisel, R., Tentschert, E. & Zettler, A.*: Rock mass rating and optimized performance of tunnel boring machines using machine data. *Felsbau 23* (2005), No. 4, pp. 40–48.
- [22] *Ramoni, M. & Anagnostou, G.*: Tunnel boring machines under squeezing conditions. *Tunnelling and Underground Space Technology 25* (2010), pp. 139–157.
- [23] *Rostami, J., Ozdemir, L. & Nilson, B.*: Comparison between CSM and NTH hard rock TBM performance prediction models. *Proceedings ISDT 1996, Las Vegas NV*. pp. 1–11.
- [24] *Rostami, J.*: Hard rock TBM cutterhead modelling for design and performance prediction. *Geomechanics and Tunnelling 1* (2008), No. 1, pp. 18–28.
- [25] *Tarkoy, P. J.*: Simple and practical TBM performance prediction. *Geomechanics and Tunnelling 2* (2009), No. 2, pp. 128–139.
- [26] *Tentschert, E.*: Auswirkungen geologischer Parameter auf die Gebirgsklassifizierung. Nicht veröffentlichter Bericht. TIWAG. 1984.
- [27] *Tentschert, E., Poisel, R. & Zettler, A.*: Gefügeeinfluss auf TBM-Vortriebe. *Felsbau 23* (2005), No. 5, pp. 42–47.
- [28] *Vigl, A., & Jäger, M.*: Double shield TBM and open TBM in squeezing rock – a comparison. In: *Proc. ITA World Tunnel Congress '97, Vienna*. Vol. 2, pp. 639–643.
- [29] *Vigl, A.*: TBM support in squeezing rock – a convergence-compatible segmental lining system. *Felsbau 21* (2003), No. 6, pp. 14–18.
- [30] *Yamamoto, T., Descour, J., Kohlhaas, M. & Yokota, Y.*: Assessing Ground Ahead of TBM Tunnel Using Low-Interruption Wireless Seismic Reflector Tracing System. Presented at RETC Conference, Las Vegas NV, June 14–17, 2009.
- [31] *Zwittinig, G., Diewald, M. & Hechenblaickner, K.*: TBM Wienerwald Tunnel – steps towards successful tunnelling. *Geomechanics and Tunnelling 1* (2008) No. 6, pp. 558–566.

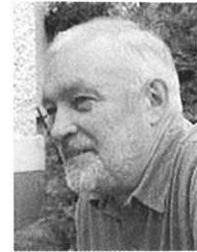
Bezug auf einen wirtschaftlichen Vortrieb besondere Bedeutung zu. Dabei soll die Auswertung von Daten die Steuerung durch den Maschinenführer nicht ersetzen sondern unterstützen.

Danksagung

Die Autoren danken Herrn Dipl.-Ing. Wolfgang Weber für außerordentlich wertvolle Hinweise und Anregungen und dem Verbund sowie der ARGE Jäger-Strabag-Frutiger für die Zurverfügungstellung der TBM-Daten Hieflau.



Univ. Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn.
Rainer Poisel
rainer.poisel@tuwien.ac.at



Univ. Prof. Dr.phil.
Ewald Tentschert
tentschert@tuwien.ac.at



Dipl.-Ing. Dr.techn. Alexander Preh
alexander.preh@tuwien.ac.at



Dipl.-Ing. Viktoria Ostermann
viktoria.ostermann@tuwien.ac.at

Vienna University of Technology
Institute for Geotechnics
Karlsplatz 13
A-1040 Vienna
Austria



Mag.rer.nat. Werner Chwatal
Vienna University of Technology
Institute for Geodesy and Geophysics
Gußhausstraße 25-29
A-1040 Vienna
Austria
werner.chwatal@tuwien.ac.at



Dipl.-Ing. Dr.techn. Alfred Zettler
zconsult ZT
Dollhopfgasse 11
A-9500 Villach
Austria
a.zettler@zconsult.at