Maschinen- und verfahrenstechnische Charakterisierung des Gebirges unter dem Einfluss des Interaktionsverhaltens Maschine – Baugrund

Der vorliegende Beitrag stellt ein Modell zur Beschreibung des Baugrundes bei Vortrieben mittels Tunnelvortriebsmaschinen (TVM) unter Berücksichtigung von verfahrens- und maschinentechnischen Kriterien vor. Durch Simulation der einzelnen Teilprozesse eines TVM-Vortriebes und der daraus resultierenden Beanspruchungen auf das gelöste Gestein, sollen Indizien für die Beurteilung des Veränderungspotenzials und der Eigenschaften des veränderten Gesteins gewonnen werden. Weiter soll eine Abschätzung von Auswirkungen der Veränderungsprozesse auf den Vortrieb ermöglicht werden.

Mechanical and process-technical Characterisation of the Rock influenced by interactive Behaviour of Machine – Ground

This article presents a model to describe the ground for excavation using tunnel boring machines (TBMs) taking process-technical and engineering criteria into account. By simulating the individual part-processes of a TBM drive and the resultant effects on the loosened rock, it is proposed to obtain indices for evaluating the potential for change and the characteristics of the changed rock. In addition it is intended to provide an appreciation of the effects of the changing processes on driving.

1 Einleitung

Bei Vortrieben mittels TVM unterliegt das Ausbruchmaterial unter dem Abbauprozess durch das Schneidrad bis hin zum Abwurf am Portal zahlreichen Veränderungsprozessen, welche sich mitunter erheblich auf die Vortriebsleistung der TVM, sowie auf nachgeschaltete Arbeitsschritte, wie z.B. den Transport und die weitere Verwendung des Ausbruchmaterials (Wiedereinbau/Deponierung) auswirken können. Dabei geht es im Wesentlichen um die Parameter Klebrigkeit, Abrasivität und innere Reibung sowie Verbreibarkeit des gelösten Gesteins.

Die Auswirkungen dieser Veränderungsprozesse sind ei**Dr.-Ing. Dieter Handke**, Gesellschafter IMM Maidl & Maidl Beratende Ingenieure GmbH & Co. KG, Projektleiter Schildvortriebsverfahren **Dipl.-Ing. Robert Matt**, ÖBB Infrastruktur AG, Engineering Services, Fachreferent Tunnelbau

Dipl.-Ing. Nicole Wilfinger, viglconsult ZT, Bereich Tunnelbau/Wasserbau

nerseits von den Eigenschaften (v.a. Gesteinseigenschaften und Bergwasserverhältnisse) des anstehenden Gebirges und andererseits von der eingesetzten Verfahrenstechnik und der Betriebsweise abhängig und lassen sich im Planungsstadium meist nur schwer und eingeschränkt abschätzen.

Insbesondere bei EPB-Schildvortrieben (SM-V5) wird im geschlossenen Modus bewusst die Verbreiung des gelösten Gesteins, meist unter Zu-

1 Introduction

In the case of TBM drives the excavated material is subject to numerous processes of change while being extracted by the cutting wheel right up to being discharged at the portal, which for instance can considerably influence the TBM's rate of advance as well as follow-up working phases such as e.g. transport and the further use of the excavated material (reuse/dumping). In this connection the parameters adhesiveness, abrasivity and

internal friction as well as the transformation to paste of the loosened rock are concerned.

The effects of these processes of change on the one hand depend on the properties of the prevailing rock (rock properties and ground water conditions) and on the other on the applied process technology and the mode of operation and usually are very difficult to evaluate and only to a limited extent at the planning stage.

In the case of EPB shield drives in particular (SM-V5) the usual procedure involves attempting to produce a paste from the loosened rock in the extraction chamber by adding water and other conditioning agents such gabe von Wasser und anderen Konditionierungsmitteln wie z.B. Schäumen und Bentonitsuspensionen, in der Abbaukammer angestrebt und damit eine wesentliche Änderung der Eigenschaften bewirkt.

Bei den Gesteinen zeigen vor allem Ton-, Schluff- und Mergelsteine ein hohes Veränderungspotenzial, welches u.a. mit, Wasserlagerungsversuchen" festgestellt werden soll.

Für die Abschätzung der verfahrensabhängigen Veränderungsprozesse des gelösten Gesteins, sowie deren Auswirkungen auf die einzelnen Arbeitsschritte der TVM ist die normative Klassifizierung des Gebirges nur bedingt ausreichend, da der wesentliche Einfluss von Bauart (u.a. Verfahrenstechnik, Schneidradausbildung) und Betriebsweise (z.B. Steuerung, Einsatz von Konditionierungsmitteln) der TVM, in Baugrundansprachen im Normalfall noch nicht berücksichtigt werden kann.

2 Verfahrenstechnisch relevante Wechselwirkungsmechanismen Maschine – Baugrund

Die bedeutenden Wechselwirkungsmechanismen zwischen Baugrund und TVM sind Verschleiß, Verkleben und Verbreibarkeit. Diese sind von vielen Einflüssen und Parametern abhängig, die sich nicht in ihrer Gesamtheit fassen und zuordnen lassen.

2.1 Verschleiß

Als Verschleiß werden oberflächliche Abnutzungen (Materialverlust) von Maschinenteilen der TVM infolge von Beanspruchungen beim Abbau, bei der Zerkleinerung und beim Transport des Gesteins bezeichnet. Seitens der Gesteinseigenschaften wirken sich vor allem die Härte und Festigkeit des Gesteins, sowie bei Lockergestein mitunter auch die Kornverteilung, die Kornform (Kantigkeit) und Rauhigkeit der Kornoberfläche auf den Verschleiß aus.

2.2 Verbreiung – Veränderungspotenzial

Als Verbreiung wird die gezielte Veränderung des gelösten Gebirges in der Abbaukammer bezeichnet, um beim EPB-Schildvortrieb im geschlossenen Modus einen plastischen Erdbrei als Stützmedium für die Ortsbrust zu erzeugen. Die Erzeugung eines Erdbreis mit den geforderten Eigenschaften steht in direktem Zusammenhang mit dem Veränderungspotenzial des Baugrundes, der durch Wasserund Konditionierungsmittelzugabe beeinflusst werden kann.

Die Membraneigenschaften werden durch den Anteil des Feinkorns in der Sieblinie bestimmt, der wesentlich vom mechanischen Eingriff der TVM beim Lösen (Schneidrad), Mischen und Fördern (Abbaukammer) hinsichtlich Intensität und Dauer abhängig ist.

2.3 Verkleben

Als Verkleben wird die starke Adhäsion von Ausbruchmaterial an Maschinenteilen oder durch Kohäsion bedingte Klumpenbildungen bezeichnet, welche z.B. ein Zusetzen von Einlassöffnungen im Schneidrad und von Förderkanälen verursachen kann. Verklebungen sind in bindigem Lockergestein und in veränderlich festen Gesteinen zu erwarten.

Ein hoher Feinkorngehalt führt in der Regel zu Verklebungen am Schneidrad und in der Abbaukammer, welche wiederum as e.g. foams and bentonite suspensions thus causing the properties to change radically.

As far as rocks are concerned above all clay, silt and marl rocks reveal a high potential to change, which is to be established among other things through "water storage tests".

For evaluating process-related processes of change for the loosened rock as well as their effects on the individual working steps of the TBM, normative classification of the rock is only sufficient to a limited extent as the essential influence of design (including process technology, form of cutting wheel) and mode of operating (e.g. control system, application of conditioning agents) of the TBM, cannot be normally considered relating to the ground.

2 Process-technical relevant interactive Mechanisms Machine-Ground

The significant interactive mechanisms between the ground and TBM are wear, adhesiveness and transformation to paste, which depend on many influences and parameters, which cannot be collated and classified in their entirety.

2.1 Wear

Wear is described as abrasion on the surface (material loss) of mechanical parts of the TBM on account of strains resulting from extraction, crushing and transportation of the rock. As far as the rock characteristics are concerned the hardness and strength of the rock exert the greatest effect on the wear as well as the granular distribution, the grain form (angularity) and roughness of the grain surface in the case of soft ground.

2.2 Transforming to Paste – Potential for Change

The transformation to paste represents the targeted alteration of the loosened rock in the extraction chamber in order to produce a plastic earth paste as supporting medium for the face during an EPB shield drive. Creation of an earth paste with the required properties is directly related to the potential for change of the rock, which can be influenced by adding water and conditioning agents. The membrane characteristics are determined by the percentage of fine grain in the grading curve, which is largely governed by the TBM's mechanical intervention during loosening (cutting wheel), mixing and conveyance (extraction chamber) with respect to intensity and duration.

2.3 Clogging

Clogging denotes the strong adhesion of excavated material on mechanical parts or clumps formed as a result of cohesion, which e.g. can cause inlet openings of the cutting wheel and conveyance channels to become clogged. Adhesiveness can be expected in cohesive soft ground and in changeable solid rocks.

Clogging on the cutting wheel and in the extraction chamber is usually caused by a high fine grain content, which for its part leads to diminished rates of advance ("clay fragment") as well as being accompanied by increased (secondary) wear and a greater need for cleaning. Obstacles affecting driving as a result of these mechanisms can so far merely be estimated in general in the course of planning owing to a lack of normative regulations.

verminderte Vortriebsleistungen ("Tonscheibe"), sowie damit einhergehend einen erhöhten (Sekundär-) Verschleiß und außerplanmäßige Stillstände für erhöhten Reinigungsaufwand nach sich ziehen. Durch diese Mechanismen bedingte Vortriebserschwernisse lassen sich bis dato aufgrund fehlender normativer Regelungen in der Planung lediglich allgemeingültig bzw. pauschal abschätzen.

2.4 Veränderlich feste Gesteine

Einen besonderen Stellenwert bei der Betrachtung der Auswirkungen von Wechselwirkungsmechanismen stellen die veränderlich festen Gesteine wie z.B. Ton-, Schluff- und Mergelsteine dar, da diese ein hohes Veränderungspotenzial aufweisen. Das Veränderungspotenzial hängt von einer Vielzahl von Parametern ab, wie z.B. der Druckfestigkeit, dem Porenvolumen, der Quellfähigkeit, der Kornverteilung und der Kornbindung. Aufgrund einer sehr geringen bzw. fehlenden mineralischen Bindung neigen diese Gesteine infolge mechanischer Beanspruchungen und/oder bei Wasserkontakt zur Auflösung des Gefügeverbandes. Die ursprünglich nach felsmechanischen Eigenschaften beprobten und beurteilten Festgesteine zerfallen in ihre Ursprungskörnungen oder zumindest teilweise in klebrige Agglomerate, die als Lockergestein bodenmechanisch zu beurteilen sind.

Ein in der Planung als Festgestein angesprochener und beprobter Tonstein kann durch verfahrenstechnisch bedingte Prozesse, zu einem weichen, klebrigen, ausgeprägt plastischen Ton verändert werden. In der Bauausführung kommt es zu den erwähnten Vortriebserschwernissen. Die Veränderungsprozesse sind bekannt; allein eine genaue qualitative Bewertung der Folgen für den Vortrieb aufgrund der Vielzahl an Einflussfaktoren ist bislang nur schwer möglich.

Die gängigen Normenwerke zur Charakterisierung des Festgesteins sehen zwar eine grobe Einteilung der Gesteine in Veränderlichkeitsklassen vor, die Eigenschaften des veränderten Gesteins werden iedoch nicht behandelt. Für den Einsatz von Erddruck- und Hydroschilden bei veränderlich festen Gesteinen ist eine weiterführende Charakterisierung des Baugrundes unter Berücksichtigung von maschinen- und verfahrenstechnischen Aspekten anzustreben.

3 Labortechnische Untersuchungen zur Charakterisierung des Baugrundes

Die EN-Normen unterscheiden für die Charakterisierung des Baugrundes zwischen Festgestein (EN ISO 14689-1) und Lockergestein (EN ISO 14688-1 und EN ISO 14688-2). In Abhängigkeit der Gesteinsart werden unterschiedliche geotechnische Laborversuche durchgeführt. Dies ist zum einen dadurch bedingt, dass je nach Gebirgsart unterschiedliche "Schlüsselparameter" zur Beschreibung der Gebirgscharakteristika von Interesse sind, zum anderen, dass bestimmte Versuche nur bei entsprechenden Probekörpern durchgeführt werden können. Ein weiterer Faktor für die Festlegung der geotechnischen Laborversuche stellt das Erkundungsziel in Abhängigkeit vom geplanten Eingriff dar.

2.4 Changeable solid Rocks

Changeable solid rocks such as e.g. clay, silt and marl rocks possess a special significance when considering the effects of interactive mechanisms, as they have a high potential for change. The potential for change depends on a large number of parameters, such as e.g. the compressive strength, the pore volume, the swelling capacity, the grain distribution and the grain bond. On account of an extremely low or non-existent mineral bond the structure of these rocks tends to disintegrate as a result of mechanical strains and/or contact with water. Solid rocks, which originally were sampled and assessed in accordance with rock mechanical characteristics, are reduced to their original granulations or at least in part to sticky conglomerates, which are to be assessed as soft ground in terms of rock mechanics.

A clay rock addressed and tested as a solid rock at the planning stage can be transformed into a soft, sticky, thoroughly plastic clay as a result of processes based on technical procedures. During the execution of construction the aforementioned difficulties in driving ensue. The processes of change are known; however a precise qualitative assessment of the consequences for driving based on a large number of factors of influence has so far provide to be rather difficult.

Although the conventional codes of standards for characterising solid rock foresee a rough distribution of the rocks into variability classes, the properties of the changed rock have still not been dealt with. For the application of earth pressure balance and hydro shields given changing solid rocks it is essential to arrive at a more far-

reaching characterisation of the ground taking mechanical and process-technical aspects into consideration.

3 Laboratory technical Examinations to characterise the Ground

The EN norms distinguish between solid rock (EN ISO 14689-1) and soft ground (EN ISO 14688-1 and EN ISO 14688-2) for characterising the ground. Depending on the ground type various geotechnical lab tests are carried out. This is on the one hand because different "key parameters" to describe the rock characteristics are of interest and on the other that certain tests can only be executed given corresponding samples. A further factor for determining the geotechnical lab tests is represented by the aim of the investigation depending on the planned intervention.

The following rock properties are of interest for performance and wear prognoses for TBM drives:

- rock strength
- rock abrasivity
- changeability/potential for change
- adhesiveness

3.1 Rock strength

The rock strength is established by means of uni-axial pressure tests. Furthermore in keeping with the project in hand Brazilian tests, point load tests and tri-axial pressure tests are undertaken. Additionally in conjunction with fine grained soft grounds it must be observed that the strength greatly depends on the consistency and varies with the water content.

3.2 Rock abrasivity

The rock abrasivity as the means to estimate the wear is usually

Für Leistungs- und Verschleißprognosen bei TVM-Vortrieben sind vor allem die folgenden Gesteinseigenschaften von Interesse:

- Gesteinsfestigkeit
- Gesteinsabrasivität
- Veränderlichkeit/Veränderungspotenzial
- Klebrigkeit.

3.1 Gesteinsfestigkeit

Die Gesteinsfestigkeit wird mit einaxialen Druckversuchen bestimmt. Ergänzend werden projektabhängig auch Spaltzugversuche, Punktlastversuche und Triaxiale Druckversuche durchgeführt. Bei feinkörnigen Lockergesteinen ist zudem zu beachten, dass die Festigkeit stark von der Konsistenz abhängt und sich mit dem Wassergehalt ändert.

3.2 Gesteinsabrasivität

Die Gesteinsabrasivität als Maß zur Abschätzung des Verschleißes wird bei Festgesteinen meist mit dem Cerchar-Abrasivitäts-Versuch, bei Lockergesteinen mit dem LCPC-Versuch bestimmt [4]. Die Bestimmung des äquivalenten Quarzgehaltes kann als weiteres Maß zur Abschätzung des Verschleißes herangezogen werden.

3.3 Veränderlichkeit/Veränderungspotenzial

Zur Beurteilung der Veränderlichkeit des Gesteins sehen die Europäische Norm EN ISO 14689-1, als auch darauf aufbauende nationale Regelwerke (z.B. DIN EN ISO 14689-1, ÖNORM B4400-2), Wasserlagerungsversuche vor.

M. Nickmann führt schon 2005 in der Veröffentlichung "Untersuchungen zur Klassifizierung veränderlich fester

Gesteine unter ingenieurgeologischen Aspekten" [1] Probleme bei der Durchführung und Auswertung der Wasserlagerungsversuche an und kommt zur Schlussfolgerung: "Insgesamt zeigt sich, dass der Wasserlagerungsversuch nicht geeignet ist, das Verhalten veränderlich fester Gesteine ausreichend zu erfassen und zu klassifizieren." Bei Siebtrommelversuchen und Slake durability tests werden der technisch relativ hohe Aufwand und v.a. die Versuchsdurchführung mit getrocknetem Material, welches nicht den "in situ" Bedingungen entspricht, negativ angemerkt. Die in der o.a. Veröffentlichung vorgestellte Modifizierung des Wasserlagerungsversuchs, auf Basis eines dreifachen Trocknungs-Befeuchtungswechsels, stellt eine deutliche Verbesserung für die Klassifizierung von veränderlich festen Gesteinen dar. Die Beanspruchung durch die 3 Wechsel reicht aber meist nicht aus um die Beanspruchungen, welche bei einem TVM-Vortrieb durch Abbau-, Zerlegungs- und Konditionierungsprozesse auf das Gestein wirken, abdecken zu können.

3.4 Klebrigkeit

Die Klebrigkeit wird in den Normen nicht explizit behandelt. Teilweise finden sich in Werkvertragsnormen Ansätze zu dieser Thematik, über visuelle Beurteilungen und pauschale Aussagen gehen diese jedoch nicht hinaus. In der ÖNORM B2205 "Erdarbeiten – Werkvertragsnorm" findet sich zur Klebrigkeit z.B. folgender Hinweis: "Klebrige Beschaffenheit ist dann gegeben, wenn sich der auf der Wurfschaufel oder auf dem Spaten befindliche

established with the Cerchar abrasivity test for solid rocks and with the LCPC test for soft grounds [4]. The determination of the equivalent quartz content can be taken as an additional means of estimating the wear.

3.3 Changeability/Potential of change

In order to assess the changeability of the rock the European Norm EN ISO 14689-1 as well as national standards based on it (e.g. DIN EN ISO 14689-1, ÖNORM B4400-2) foresee water storage tests.

Back in 2005 M. Nickmann examined problems in executing and evaluating water storage tests in the publication "Investigations to classify variable solid rocks under engineering-geological Aspects" [1]. He arrives at the conclusion: "All in all it is shown that the water storage test is not suitable to adequately collate and classify the behaviour of variable solid rocks". In the case of drum screening tests and Slake durability tests the relatively high technical outlay and above all the execution of the tests with dried material, which fails to correspond to the "in situ" conditions are negatively rated. The modification presented in the above-mentioned publication relating to the water storage test based on a threefold drying-wetting changeover, represents a substantial improvement for classifying variable solid rocks. The strain resulting from the 3 changes however usually does not suffice to cover the strains, which result during a TBM drive through extraction, splitting and conditioning processes.

3.4 Adhesiveness

Adhesiveness is not explicitly dealt with in the norms. Approaches on this topic are partially to be found in works contract norms although they do not go beyond visual appraisals and general statements. In the ÖNORM B2205 "Earthworks – Works Contract Norm" adhesiveness is defined e.g. as follows: "An adhesive consistency prevails when the soil on the shovel or spade can only be removed from the tool with the aid of a further appliance (scraper or the like)".

When being used in practice the evaluation diagram according to Thewes (1999) [2] is often applied to assess the clogging potential of soils. By means of the initial parameters (consistency number I_c and plasticity number I_p) the investigated soil can be allo-



Boden vom Gerät nur mit Hilfe eines weiteren Gerätes (Spachtel oder dergleichen) ablösen lässt."

In der praktischen Anwendung wird zur Beurteilung des Verklebungspotenzials von Böden vielfach das Bewertungsdiagramm nach Thewes (1999) [2] verwendet. Mit den Eingangsgrößen (Konsistenzzahl I_c und Plastizitätszahl I_p) kann dem untersuchten Boden ein niedriges bis hohes Verklebungspotenzial zugeordnet werden (Bild 1).

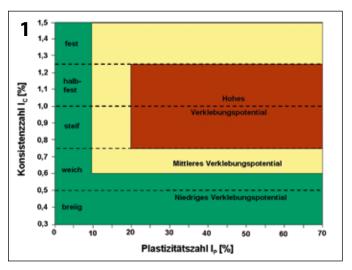
Die Plastizitäts- und Konsistenzzahl lassen sich mit Hilfe des natürlichen Wassergehalts und der Zustandsgrenzen nach Atterberg (Ausrollgrenze und Fließgrenze) bestimmen. Die Bestimmung der Ausroll- und Fließgrenzen ist nur bei bindigen Lockergesteinen möglich. Eine direkte Beurteilung des Verklebungspotenzials von veränderlich festen Gesteinen an Kernproben ist somit nicht möglich. Als Voraussetzung muss der mit Festgesteinseigenschaften vorliegende Bohrkern aufbereitet und in seine sedimentäre Ursprungskörnung zurückgeführt werden. An den aufbereiteten Proben lassen sich die genormten bodenmechanischen Laborversuche zur Bestimmung der Kornverteilungskurven, sowie die Bestimmung des natürlichen Wassergehalts und der Zustandsgrenzen nach Atterberg durchführen.

Auch mit Hilfe des Verklebungsdiagramms nach Thewes lassen sich für TVM-Vortriebe nur grobe Abschätzungen zum Verklebungspotenzial des Baugrundes tätigen, da zum Einen die Kornverteilung des zerlegten Probenmaterials je nach Zerlegungsintensität streuen kann. Zum Anderen für den Wassergehalt, als wesentlicher Parameter zur Ermittlung der Konsistenzzahl, nur ein möglichst repräsentativer Wert angesetzt werden kann. Beim Einsatz von Schildmaschinen wird der natürliche Wassergehalt des "in situ" Gesteins durch Bergwasserzutritte (besonders auch bei Stillständen der TVM), die Zugabe von Konditionierungs-

cated a low to high adhesiveness potential (Fig. 1).

The plasticity and consistency numbers can be ascertained with the help of the natural water content and the Atterberg limits (plastic limit and liquid limit). It is only possible to ascertain the liquid and plastic limits in the case of cohesive soft grounds. Thus it is impossible to assess the adhesiveness potential of variab-

representative value as possible can be applied for the water content as a significant parameter for determining the consistency number. During the application of shield machines the natural water content of the "in situ" rock is altered through ingressing ground water (especially during TBM standstills), the addition of conditioning agents and process waters and cannot be prognosed. The method of operation of the TBM and the percentage of clay materials with the capacity to swell represent other factors, which influence the adhesiveness of the loosened material.



Verklebungspotenzial in Abhängigkeit von Plastizität und Konsistenz für flüssigkeitsgestützte Schildvortriebe nach Thewes (1999) [3]

Clogging potential depending on plasticity and consistency for fluid-supported shield drives after Thewes (1999) [3]

mitteln und Prozesswässern verändert und lässt sich nicht prognostizieren. Die Betriebsweise der TVM und der Anteil an quellfähigen Tonmineralien sind weitere Faktoren, die sich auf die Klebrigkeit des gelösten Materials auswirken.

4 Strategiemodell zur maschinen- und verfahrenstechnischen Charakterisierung des Baugrundes vom Abbau bis zum Abwurf am Portal

4.1 Allgemeines

Wie bereits angeführt, betrachten die normativen Regelungen zur Beschreibung des Baugrundes das Gebirge im "in situ" le solid rocks on samples. As a prerequisite the core sample embodying the solid rock properties must be prepared and reduced to its sedimentary original granulation. The standardised soil-mechanical lab tests to ascertain the grain distribution curves as well as to determine the natural water content and the Atterberg limits can be carried out on the prepared samples.

The clogging diagram according to Thewes only allows coarse estimates of the clogging potential of the subsoil for TBM drives, as first of all the grain distribution of the fragmented sample material can spread depending on the intensity of fragmentation. Secondly only a

4 Strategy Model for mechanical and process-technical Characterisation of the Ground from Excavation to Discharge at the Portal

4.1 General

As already indicated the normative regulations for describing the ground in "in situ" state consider this regardless of the planned TBM deployment. The determining of changes in the rock properties as a result of strains during the individual working stages of a TBM is not regulated and up till now can only be roughly estimated. This circumstance is evident particularly in the case of changing solid rocks. The following strategy model is presented for appraising possible effects in a better manner.

4.2 Basis of the Strategy Model

The conditions actually prevailing during the drive cannot be precisely reproduced technically in tests. The given model is an attempt to supply additional information for project-specific estimation of the effects of the changed excavated material.

Zustand, unabhängig vom geplanten TVM-Eingriff. Die Ermittlung von Veränderungen der Gesteinseigenschaften durch Beanspruchungen während der einzelnen Arbeitsschritte einer TVM ist nicht geregelt und diese können bis dato nur grob angeschätzt werden. Dieser Umstand macht sich besonders bei den veränderlich festen Gesteinen bemerkbar. Für eine bessere Abschätzung möglicher Auswirkungen wird das folgende Strategiemodell vorgestellt.

4.2 Grundlage des Strategiemodells

Die tatsächlich beim Vortrieb herrschenden Verhältnisse können versuchstechnisch nicht exakt abgebildet werden. Das gegenständliche Modell ist ein Versuch, zusätzliche Informationen zur projektspezifischen Abschätzung der Auswirkungen des veränderten Ausbruchmaterials zu liefern.

Durch eine schrittweise Vorgehensweise werden Gebirgsarten, Betriebsweisen (v.a. Vortriebsmodi) und Prozesse im Ablauf der TVM extrahiert, bei welchen deutliche Veränderungen des Ausbruchmaterials stattfinden. In weiterer Folge werden Untersuchungen an Gesteinsproben, in jeweils unterschiedlichen Zustandsformen durchgeführt. Frei definierte Probenvorbehandlungen erlauben, unter Einbeziehung von normierten Laboruntersuchungen, die Auswirkungen der verfahrenstechnisch herbeigeführten Zustandsänderungen des Gesteins zu beschreiben und liefern zusätzliche Informationen zur Abschätzung der Eigenschaften des Ausbruchmaterials in den jeweiligen Teilprozessen der TVM.

4.3 Aufbau des Strategiemodells

Auf Basis der geologischen, hydrogeologischen und geotechnischen Baugrundmodelle sind die für die Untersuchung relevanten Gebirgsarten auszuwählen sowie die entsprechend prognostizierten Bergwasserzutritte zugrunde zu legen.

Projektspezifisch ist ein Untersuchungsumfang festzulegen, welcher von der Betrachtung einzelner relevanter Teilprozesse (z.B. geschlossener Modus einer EPB-Schildmaschine) eines Bereichs für eine bestimmte Gebirgsart bis hin zu zahlreichen Kombinationen von Gebirgsarten und Teilprozessen reichen kann. Bei einer entsprechenden Datenmenge sind Sensitivitätsanalysen betreffend der Veränderungsprozesse in Abhängigkeit von Zeit, Gebirgsart, mechanischen Beanspruchungen, der zugegebenen Wassermenge, der Art und Menge von Konditionierungsmitteln und weiterer Parameter möglich.

Für jeden Teilprozess sind folgende Schritte durchzufüh-

- 1) Abschätzung der möglichen Beanspruchungen und Randbedingungen für den festgelegten Bereich und Teilprozess.
- 2) Vorbehandlung (Zerkleinerung, Wasser- und Konditionierungsmittelzugabe, Durchmischung) des Probenmaterials mit möglichst einfachen Mitteln zur Simulation der Beanspruchungen und Randbedingungen.
- 3) Für den jeweiligen Bereich der TVM sind die verfahrenstechnisch maßgeblichen Eigenschaften des Ausbruchmaterials wie z.B.

Through a gradual approach ground types, means of operation (above all operating modes) and processes relating to the application of the TBM are extracted, during which obvious changes of the excavated material take place. Subsequently rock samples are examined, in different forms in each case. Freely defined pretreatments of the samples enable the effects of the alterations to the state of the rock brought about by process technology under the inclusion of normed lab conditions and supply additional information to estimate the properties of the excavated material in the various part-processes of the TBM.

4.3 Set-Up of the Strategy Model

Based on the geological, hydrogeological and geotechnical ground model the relevant ground types for the examination have to be selected as well as establishing the corresponding prognosed ground water ingresses.

A frame for the examination must be established for the project, which can range from appraising individual relevant partprocesses (e.g. closed mode of an EPB shield machine) of a sector for a certain ground type right up to numerous combinations of types of rock and part-processes. Given a corresponding amount of data sensitivity analyses relating to the processes of change



Innovativer - Kompetenter - Zuverlässiger

Gemeinsam stärker

im Tunnelbau

Schläuche · Armaturen · Zubehör für:

hoses · fittings · equipment for:



Pressluft compressed air Wasser

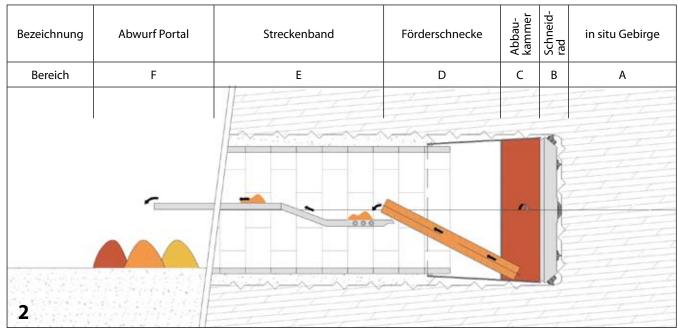
water



concrete



Salweidenbecke 21 44894 Bochum, Germany Tel. +49 (0)234/58873-73 Fax +49 (0)234/58873-10 info@techno-bochum.de www.techno-bochum.de



Relevante Bereiche im Abbau- und Förderprozess

Relevant sectors in the excavation and conveying process

Konsistenz, sowie die entsprechenden Parameter (z.B. Wassergehalt), zu erheben.

4) Durchführung der standardgemäßen Laborversuche wie z.B. einaxialer Druckversuch inklusive der normativen Probenaufbereitung (z.B. zylindrischer Probekörper aus Bohrkern) zur Ermittlung der Parameter des vorbehandelten Probenmaterials.

Die einzelnen Schritte sind so zu gestalten und zu dokumentieren, dass die Vorbehandlung der Proben jederzeit exakt reproduziert werden kann.

4.4 Umsetzung des Strategiemodells am Beispiel eines EPB-Schildvortriebes

Das Strategiemodell wird beispielhaft an einem EPB-Schildvortrieb dargelegt. Die TVM wird gemäß Bild 2 in 6 Bereiche unterteilt.

Nachfolgend wird nur der geschlossene Modus betrachtet, da hier infolge der Verbreiung des gelösten Gesteins unter Bergwasserzutritten und der Zugabe von Konditionierungsmitteln, die maßgeblichsten Beanspruchungen erwartet werden. Die abgegrenzten Teilprozesse A bis F werden in der Folge betrachtet.

Bereich A - "in situ" Gebirge

Als "in situ" Gebirge wird jenes Gebirge betrachtet, welches sich außerhalb des Einflussbereiches des Vortriebes befindet. Dies betrifft sowohl Einflüsse aus der Spannungsumlagerung, der Bergwassersituation und der Eindringtiefe von Medien der Ortsbruststützung. Entsprechend endet das "in situ" Gebirge vielfach bereits vor der Ortsbrust.

Systembedingte Beanspruchungen: keine.

Probenvorbehandlung: Kernproben aus der Tiefenlage des Tunnelquerschnittes bilden das Ausgangsmaterial. Für den Bereich A (Tab. 1) wird keine Vorbehandlung durchgeführt. depending on time, ground type, mechanical strains, the added amount of water, the type and quantity of conditioning agents and further parameters are possible.

The following steps should be undertaken for each part-process:

- Estimating the possible strains and marginal conditions for the determined sector and part-process.
- Pretreatment (crushing, adding water and conditioning agents, thorough mixing) of the sample material with the simplest means possible to simulate the strains and marginal conditions.
- The process-technical determining properties of the excavated material such as consistency as well as the corresponding parameters (e.g. water content) must be collated.
- 4) Execution of the standardised lab tests such as uniaxial pressure test including the normative sample pre-

paration (e.g. cylindrical samples from a drill core) to ascertain the parameters of the pretreated sample material.

The individual steps are to be executed and documented in such a fashion that the pretreatment of the samples can be exactly reproduced at any time.

4.4 Applying the Strategy Model taking the Example of an EPB Shield Drive

The strategy model is applied exemplarily on an EPB shield drive. The TBM is split up into 6 sectors according to Fig. 2.

Only the closed mode is lent consideration in the following, as the hardest strains can be expected here on account of the loosened rock turning into paste as a result of ingressing ground water and the addition of conditioning agents. The demarcated part-processes A to F will be examined in the following.



DIE MISCHUNG MACHT'S – MODIFIZIERTER SPRITZBETON IM TUNNELBAU



Gesteinswechsel, Wasserdruck und Neigung – beim Bau eines Tunnels ist kein Meter wie der andere. Mit unserem neuen Modifiziermittel ETONIS® passen Sie den Spritzbeton individuell der Situation an. Modifizierter Spritzbeton haftet hervorragend an jedem Gestein und reduziert den Rückprall signifikant, selbst auf feuchten Untergründen. Vorausgesetzt die Mischung stimmt. Nicht nur zwischen Beton und Modifiziermittel, sondern auch zwischen Ihren Wünschen und unserer Beratung. Für beides engagieren sich unsere Experten vor Ort.

Bereich B - Schneidrad

Systembedingte Beanspruchungen: Mit dem Eingriff der TVM in den Baugrund findet ein erster Zerlegungsprozess durch das Schneidrad bzw. durch die eingesetzten Abbauwerkzeuge statt. Der Werkzeugbesatz ist auf die Projektbedingungen abgestimmt und bestimmt maßgeblich den Grad der Zerlegung.

Probenvorbehandlung: Zerlegung der Kernprobe in die Form des erwarteten Ausbruchmaterials, z.B. in Chip-Bruchstücke mit definierter Größe. Auffälligkeiten wie z.B. Bruchverhalten, anfallender Feinkornanteil etc. sind genau zu dokumentieren.

Maßgebliche Materialeigenschaften und Versuchsprogramm sind in Tabelle 2 aufgeführt.

Bereich C – Abbaukammer

Systembedingte Beanspruchungen: Mithilfe von Statoren, Rotoren und der Drehbewegung des Schneidrades findet eine mechanische Zerlegung und Homogenisierung des Abbaumaterials (Erdbreis) statt. Durch Bergwasserzutritte, als auch durch die gesteuerte Zugabe von Konditionierungsmitteln tritt eine weitere Plastifizierung des Abbaumaterials ein.

Probenvorbehandlung: Die aus den Kernproben gewonnenen Chip-Bruchstücke (siehe Pro-

Sector A - "in situ" Rock

"In situ" rock is defined as the rock, which is located outside the drive's sphere of influence. This applies to both influences of stress redistribution, the ground water situation and the penetration depth of the means of supporting the face. As a result the "in situ" rock in many cases ends before the face.

System-related Strains: none.

Sector B – Cutting Wheel

System-related strains: an initial cutting process with the cutting wheel or rather with the applied extraction tools takes place when the TBM is introduced into the ground. The set of tools is geared to the project

conditions and largely governs the extent of fragmentation.

Sample pretreatment: fragmenting the core sample in the form of the expected excavated material, e.g. as chip fragments with a defined size. Abnormalities such as e.g. fracture behaviour, prevailing fine grain percentage etc. must be exactly documented.

Sector C – Extraction Chamber

System-related strains: mechanised fragmentation and homogenisation of the excavated material (earth paste) takes place with the aid of stators, rotors and the cutting wheel's rotary movement. Further plastification of the excavated material

Material properties	Test programme
Solubility/ Workability	 uni-axial pressure test (DIN 18136) uni-axial tensile test point load test (DIN EN 10002) tri-axial test (DIN 18137)
Abrasivity	 wear classification after Cerchar (AFNOR NF P 94-430-2) mineralogical examinations on equivalent quartz content and grain form determining the Rock Abrasivity Index (RAI)
Clogging	clay-mineralogical examinations swelling pressure test
Variability	 water storage tests (DIN 4022-1 bzw. DIN EN ISO 14689-1, ÖNORM B4400-2) Slake Durability Test (ASTM D 4644-87 and Recommendation No. 20 of the Working Group 3.3 "Test Technology Rock" of the German Society for Geotechnical Engineering Inc.)

Determining material properties and lab tests – Sector A

Material properties	Test programme
Clogging	water content (DIN 18121, ÖNORM B4413) Atterberg limits (liquid limit WL, plastic limit WP) (DIN 18122, ÖNORM B4411) and determining the consistency and plasticity number) as starting parameters for assessing the clogging potential according to Thewes
Transforming to paste	• Grain size distribution (DIN 18123, ÖNORM B4412)
Abrasivity	wear classification through LCPC tests according to AFNOR P 18-579

Table 2: Determining material properties and lab tests – Sector C

Materialeigenschaften	Versuchsprogramm
Lösbarkeit / Abbaubarkeit	 einaxialer Druckversuch (DIN 18136) einaxialer Zugversuch Punktlastversuch (DIN EN 10002) Triaxialversuch (DIN 18137)
Abrasivität	 Verschleißklassifizierung nach Cerchar (AFNOR NF P 94-430-2) mineralogische Untersuchungen zum äquivalenten Quarzgehalt und zur Kornform Bestimmung des Rock Abrasivity Index (RAI)
Verkleben	tonmineralogische Untersuchungen Quelldruckversuch
Veränderlichkeit	 Wasserlagerungsversuche (DIN 4022-1 bzw. DIN EN ISO 14689-1, ÖNORM B4400-2) Slake Durability Versuch (ASTM D 4644-87 bzw. Empfehlung Nr. 20 des Arbeitskreises 3.3 "Versuchstechnik Fels" der Deutschen Gesellschaft für Geotechnik e.V.)

Tabelle 1: Maßgebliche Materialeigenschaften und Laborversuche – Bereich A

Materialeigenschaften	Versuchsprogramm
Verkleben	Wassergehalt (DIN 18121, ÖNORM B4413) Zustandsgrenzen nach Atterberg (Fließgrenze wL, Ausrollgrenze WP) (DIN 18122, ÖNORM B4411) und Bestimmung der Konsistenz- und Plastizitätszahl (DIN EN ISO 14688-2) als Eingangsparameter für eine Bewertung des Verklebungspotenzials nach Thewes
Verbreibarkeit	Korngrößenverteilung (DIN 18123, ÖNORM B4412)
Abrasivität	Verschleißklassifizierung durch LCPC-Versuche gem. AFNOR P 18-579

Tabelle 2: Maßgebliche Materialeigenschaften und Laborversuche – Bereich C

Den Fortschritt erleben.

Die Radlader L 566 T von Liebherr.

- Bedarfsoptimierte Schutzausstattung speziell für Tunneleinsätze
- Minimale Betriebskosten aufgrund von niedrigem Kraftstoffverbrauch, geringer Reifen- und Bremsenverschleiß
- Hohe Kipplast durch einzigartige Motoreinbaulage
- Deutlich weniger verschleißanfällige Bauteile durch innovatives Antriebskonzept
- Optimale Servicezugänglichkeit zu allen wichtigen Komponenten



Liebherr-Hydraulikbagger GmbH D-88457 Kirchdorf Tel.: (0 73 54) 80-0

LIEBHERR Die Firmengruppe E-Mail: info.lhb@liebherr.com www.liebherr.com

benbehandlung B) bilden das Ausgangsmaterial. Im Verhältnis zur Probenmenge sind Wasserzugaben entsprechend den prognostizierten Bergwasserzutritten und der bewussten Wasserzufuhr im Vortriebsprozess und weiterhin Konditionierungsmittelzugaben anzusetzen. Die Erdbreihomogenisierung und -plastifizierung kann z.B. in einem Zwangsmischer simuliert werden, wobei der Grad der Durchmischung durch Zeitdauer und Umdrehungen/Minute, etc. zu dokumentieren sind.

Bereich D - Förderschnecke

Systembedingte Beanspruchungen: Eine weitergehende mechanische Beanspruchung des abgebauten Materials erfolgt durch die Förderschnecke. Der Erdbrei wird für die notwendige Pfropfenbildung beim geschlossenen Modus zum Aufbau eines Druckniveaus am Verschlussorgan der Schnecke gestaut und kompaktiert; Porenwasser wird teilweise ausgepresst.

Probenvorbehandlung: Das Ausgangsmaterial bildet der Erdbrei (siehe Probenbehandlung C). Das Auspressen des Prozesswassers aus dem Erdbrei kann z.B. mit Hilfe einer Filterpresse unter einem definierten Druckniveau simuliert werden.

Bereich E – Streckenband

Systembedingte Beanspruchungen: Auf dem Streckenband wird keine zusätzliche Beanspruchung erwartet.



Probenmaterial der Bereiche A, B und CSample material from Sectors A, B and C

Probenvorbehandlung: keine; Probenmaterial entspricht der Probenvorbehandlung D.

Maßgebliche Materialeigenschaften und Versuchsprogramm: siehe Tabelle 3.

Bereich F – Streckenband und Abwurf am Portal

Systembedingte Beanspruchungen: Beim Abwurf am Portal erfolgen noch einmal eine mechanische Beanspruchung sowie eine gewisse Materialsortierung entlang des Schüttkegels. Letztere wird allerdings beim Ladevorgang für die weitere Verwendung des Ausbruchmaterials weitestgehend wieder egalisiert.

Materialeigenschaften	Versuchsprogramm
Konsistenz	Wassergehalt (DIN 18121, ÖNORM B4413)Zustandsgrenzen nach Atterberg (siehe Tabelle 2)
Abrasivität	Siehe Versuchsergebnisse von Bereich C

Tabelle 3:

Maßgebliche Materialeigenschaften und Laborversuche – Bereich D

occurs through ingressing underground water as well as the controlled addition of conditioning agents.

Sample pretreatment: the chip fragments won from the core samples (please see sample treatment B) form the starting material. Water has to be added in keeping with the prognosed ingressing ground water geared to the sample quantity and the targeted addition of water during the driving process and the continuing addition of conditioning agents. The homogenisation and plastification of earth paste can e.g. be simulated in a paddle mixer, with the degree of mixing being documented by the duration and rpm etc.

Sector D – Screw Conveyor

System-related strains: the screw conveyor causes a further mechanical strain on the excavated material. The earth paste is

dammed up and compacted for the necessary forming of a plug given the closed mode to establish a pressure level at the screw conveyor's closure device; pore water is partially pressed

Sample pretreatment: the starting material forms the earth paste (please see sample treatment C). The process water can e.g. be pressed out of the earth paste e.g. with the help of a filter press set at a defined pressure level.

Sector E - Belt Conveyor

System-related strains: no additional strain is anticipated on the belt conveyor.

Sample pretreatment: none: sample material corresponds to sample pretreatment D.

Determining material properties and test programme: please see Table 3.

Sector F – Belt Conveyor and Discharge at the Portal

System-related strains: once more a mechanical strain as well as a certain sorting process concerning the banked material occurs during discharge at the portal. However the latter is largely remedied during the loading process for further using the excavated material.

Sample pretreatment: none; sample material corresponds to the sample pretreatment D.

Determining material properties and test programme: please see Table 3.

As assistance for estimating a possible further application of the excavated material (e.g. reutilisation for fills) examinations

Probenvorbehandlung: keine; Probenmaterial entspricht der Probenvorbehandlung D.

Maßgebliche Materialeigenschaften und Versuchsprogramm: siehe Tabelle 3.

Als Hilfestellung zur Abschätzung einer möglichen weiteren Verwendung des Ausbruchmaterials (z.B. Wiedereinbau in Schüttungen) können auf Basis des vorbehandelten Probenmaterials Untersuchungen und Laborversuche wie z.B. Bestimmung des Wassergehalts, Proctorversuche, Scher- und Kompressionsversuche durchgeführt werden. Auch liefern die Versuchsauswertungen Indizien für die Effektivität von etwaigen Stabilisierungsmaßnahmen (z. B. mit Branntkalk) (Bild 3).

5 Erzielbare Ergebnisse

Mit dem beschriebenen Strategiemodell sind nachfolgende Ergebnisse erzielbar und sowohl in der Auswahl und Ausschreibung des Vortriebskonzeptes, bei der Bauausführung und der Materialbewirtschaftung und -verwertung auch umsetzbar:

- Identifikation und Minimierung möglicher Baugrundund Verfahrensrisiken [6]
- Klärung der Sphärenzuordnung in der Risikotragung
- Herleitung der bestgeeigneten Vortriebsmodi

- Spezifizierung und Optimierung des einzusetzenden Vortriebs- und Schuttersystems
- Regelung für Erschwernisse und Abrechnung
- Optimierung der Materialbewirtschaftung und Materialverwertung im Zusammenwirken mit der Genese während des Abbau- und Förderprozesses
- Objektivierung des komplexen Zusammenwirkens zwischen Gebirge, Bergwasser und Vortrieb.

6 Ausblick

Da das gegenständlich beschriebene Strategiemodell teilweise auf Annahmen der Eingangsdaten basiert, sind diese durch Proben aus den einzelnen Teilbereichen/-prozessen der TVM und verfahrenstechnischen Daten (z.B. Zugabemenge von Konditionierungsmitteln) während des Vortriebs zu verifizieren. Durch die beschriebene systematische Vorgangsweise im Strategiemodell sowie die Gegenüberstellung und Analyse der praktischen Erfahrungen wird für zukünftige Projekte eine Grundlage geschaffen, welche eine verbesserte Einschätzung der Auswirkungen des TVM-Vortriebes auf das Ausbruchmaterial ermöglicht und somit einen hilfreichen Beitrag zur Planung von TVM-Vortrieben in veränderlich festen Gesteinen liefern kann.

Material properties	Test programme
Consistency	• water content (DIN 18121, ÖNORM B4413) • Attenberg limits (please see Table 2)
Abrasivity	• see test results from Sector C

Table 3: Determining test results and lab tests – Sector D

and lab tests such as determining the water content, Proctor tests, shear and compression tests can be undertaken on the basis of the pre-treated sample material. These test evaluations also provide indications for the effectiveness of possible stabilisation measures (e.g. with burnt lime) (Fig. 3).

5 Attainable Results

The following results are attainable with the described strategy model and applicable both in the choice and invitation to bid for the driving concept, during the execution of construction and the material management and processing:

- Identification and minimising possible risks relating to the ground and methods [6]
- Clarification of the allocation of competences when bearing risks
- Devising the best possible driving modes
- Specification and optimising the applicable driving and mucking system
- Catering for added difficulties and accounting
- Optimisation of material management and material processing in conjunction with

the genesis during the excavation and conveying process

 Objectivising the complex interaction between ground, groundwater and driving.

6 Outlook

As the present strategy model that has been described is based in part on assumptions of the input data, these have to be verified by samples from the individual partsections/processes of the TBM and process-technical data (e.g. the amount of conditioning agents added) during driving. Through the described systematic approach applied in the strategy model as well as the comparison and analysis of practical experiences the basis has been created for future projects, which can enable an improved estimation of the effects of TBM driving on the excavated material thus supplying a helpful contribution to planning TBM drives in variable solid rocks.

Literatur

- [1] Nickmann, M. Spaun, G.; Thuro, K.: Untersuchungen zur Klassifizierung veränderlich fester Gesteine unter ingenieurgeologischen Aspekten. Erlangen: 15. Tagung Ingenieurgeologie, 2005.
- [2] Thewes, M.: Adhäsion von Tonböden beim Tunnelvortrieb mit Flüssigkeitsschilden. Bauingenieurwesen 21, 1999.
- [3] Köppl, F.; Frenzel, C.; Thuro, K.: Statische Modellierung von Gesteinsparameter für die Leistuns- und Verschleißprognose bei TBM Vortrieben, 17. Tagung für Ingenieurgeologie, Zittau 2009.
- [4] Thuro, K.; Käsling, H.: Klassifikation der Abrasivität von Boden und Fels, Geomechanics and Tunnelling 2, Berlin 2009, Ernst& Sohn Verlag für Architektur und technische Wissenschaften GmbH & Co. KG.
- [5] Handke, D.; Nolden, M.; Mussger, K.; Steidl, A.: Lösungsansätze für Planung und Bauausführung des Bauloses KAT3 des Koralmtunnels. Geomechanics and Tunnelling 2, Berlin 2010, Ernst& Sohn Verlag für Architektur und technische Wissenschaften GmbH & Co. KG.
- [6] Handke, D.; Maidl, B.: Bauverfahrenstechnische Prozessabhängigkeiten als Steuerungselemente zur Risikominimierung bei der Realisierung von Schildprojekten Vorstellung einer Risikostrategie auf der Basis baupraktischer Erfahrungen. Tunnelbautaschenbuch 2006, S. 189-220. Essen: Glückauf, 2005.