

Additive zur Beherrschung starker Durchlässigkeiten bei EPB- und Slurry-TBM

Durch die fortschreitende Erweiterung der Anwendungsbereiche von TBM-Vortrieben im Tunnelbau muss zusehends auch die Verfahrenstechnik der Vortriebsverfahren angepasst werden. Hierzu gehört die Beherrschung hoher Durchlässigkeiten bei Vortrieben mit aktiver Ortsbruststützung. Im folgenden Beitrag wird die Theorie dazu erklärt und an einem praktischen Beispiel erläutert.

1 Hintergrund

Hohe Durchlässigkeiten beinhalten das Risiko, dass es möglicherweise nicht gelingt, die notwendige Stützung der Ortsbrust während des Vortriebs als auch bei Drucklufteinstiegen sicherzustellen. Beim Versagen der Stützung an der Oberfläche der Ortsbrust, sind Mehrausbruch und daraus resultierende erhöhte Setzungen oder gar Verbrüche meist die Folge.

Diese Problemstellung wurde von der Bauindustrie erkannt und es werden permanent neue Lösungen entwickelt, die die Risiken bei TBM-Vortrieben minimieren helfen. Erst kürzlich wurden in der ungarischen Hauptstadt Budapest 2 EPB-Vortriebe erfolgreich aufgeföhren, die sich einer Geologie stellen mussten, die aufgrund der in Teilstrecken hohen Durchlässigkeiten extreme Anforderungen an die Ortsbruststützung stellten.

2 Theorie

2.1 EPB-Prinzip

Durch die Vorwärtsbewegung der TBM im Boden kommt zu-

Tim Babendererde, Babendererde Engineers GmbH, Bad Schwartau/D
Wolfgang Hensel, SAWAT Water Management GmbH, Heiligenhaus/D
Binayak Sharma, Babendererde Engineers GmbH, Bad Schwartau/D
www.babeng.com

sätzliches Bodenvolumen in die Abbaukammer; durch die gesteuerte Extraktion des Materials mit der Förderschnecke hält der Schildfahrer so viel Material im Abbauraum, dass der Stützdruck stabil bleibt. Die erreichbare Toleranz liegt im Bereich von 0,2 bar. Zum Erreichen einer aktiven Ortsbruststützung muss der abgebaute Boden mittels Additiven zu einem Erdbrei vermischt werden. Als Additive kommen in Abhängigkeit der Randbedingungen Tenside, Polymere und Wasser zum Einsatz. Der entstehende Erdbrei ist nach dem Anmischen pastös und hat durch das enthaltene Luftvolumen kompressible Eigenschaften. Durch die stark unterschiedlichen Wichten der einzelnen Bestandteile des Erdbreis neigt dieser zum Absetzen, zum Separieren. Dieser Vorgang ist zur Deponierung gewünscht, jedoch setzt er im Stillstand

Additives to master major Permeabilities for EPB and Slurry TBMs

As a result of the ever-greater spread in fields of application for TBM drives in tunnelling, the process technology of the driving methods must also be adapted. This includes the mastering of high permeabilities during drives with active face support. The following report examines the related theory and a practical case provided as an example

1 Background

High permeabilities entail the risk that perhaps it is not possible to secure the required support needed for the face during the drive as well as in the case of compressed air accesses. Should the support fail on the surface of the face the outcome is usually overbreak and increased settlements arising from it or even cave-ins.

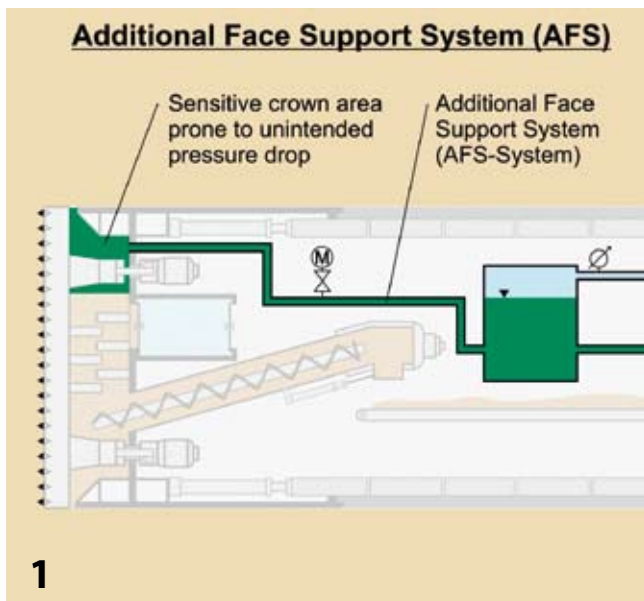
This problem complex has been identified by the construction industry and new solutions have been constantly developed to help minimise the risks involved during TBM excavations. Recently for example 2 EPB drives were successfully executed in the Hungarian capital Budapest, which had to cope with extremely high demands placed on the face support owing to the high permeabilities encountered in part-sections.

2 Theory

2.1 EPB Principle

Additional volumes of soil accrue

in the extraction chamber owing to the TBM moving forward in the soil; the shield operator holds just as much material in the extraction chamber through the controlled extraction of the material by means of the screw so that the supporting pressure remains stable. The tolerance that can be attained amounts to roughly 0.2 bar. The removed soil has to be mixed with additives to form an earth pulp to achieve an active face support. Depending on the prevailing conditions tenside, polymer and water can be applied as additives. The earth pulp that ensues becomes pasty after mixing and possesses compressible characteristics thanks to the air volume it contains. Owing to the extremely different densities of the earth pulp there is a tendency towards precipitation, to separation. This process is desired at the dumping stage, however it already occurs when at a standstill in the extraction chamber and considerably affects the behaviour of the earth pulp.



Schema Additional Face Support System AFS
Additional Face Support System

auch schon im Abbauraum ein und verändert das Verhalten des Erdbreis wesentlich.

2.2 Additional Face Support System

Das „Additional Face Support System“ (AFS) wird angewendet, um das Absinken des Erddrucks während Vortriebsunterbrechungen (Ringbau, Wartung, o.ä.) zu unterbinden (Bild 1). Bleibt die TBM stehen, wird kein weiteres Volumen durch die Schildfahrt der Abbaukammer mehr zugeführt. Wenn in diesem Zustand die Schaumbläschen im konditionierten Erdbrei platzen, diffundiert die freigesetzte Luft in den umgebenden Baugrund. Die Aufrechterhaltung der aktiven Ortsbruststützung durch den Erdbrei kann nur erfolgen wenn zusätzliches Volumen dem Abbauraum zugeführt wird, welches nicht in den Baugrund diffundiert. Bisher wurde in dieser Situation das AFS eingesetzt, um beim Absinken des Erddrucks an der Ortsbrust eine Bentonitsus-

pension in die Abbaukammer zu injizieren.

Das System ist auf den Nachläufern der TBM angeordnet und besteht aus einem oder mehreren Tanks, die mit Bentonitsuspension gefüllt und direkt mit dem Firstbereich in der Abbaukammer verbunden sind. Die Tanks sind über ein Regelventil mit einem Druckluftkompressor verbunden.

Fällt in der Abbaukammer der wirksame Stützdruck unter das eingestellte Maß ab, injiziert das AFS automatisch Bentonitsuspension in die Abbaukammer bis der voreingestellte Stützdruck in der Abbaukammer wieder erreicht wird. So kann eine Fluktuation des Stützdruckes über die zulässige Toleranzgrenze von 0,2 bar ausgeglichen werden.

Neben diesem typischen Fall kommt das AFS zum Einsatz, wenn es aufgrund von grobkörnigen Böden zu einer erschwerten Herstellung des Erdbreis durch das abgebaute Material und dem künstlich zugesetzten Schaum kommt.

2.2 Additional Face Support System

The “Additional Face Support System” (AFS) is applied in order to prevent the earth pressure dropping during interruptions in driving (ring installation, maintenance etc.) (Fig. 1). If the TBM remains stationary no further volume is added to the extraction chamber through the shield passage. Should the foam bubbles explode in this state in the earth pulp, the released air diffuses in the surrounding subsoil. It is only possible to maintain the active face support with the earth pulp providing that an additional volume is added to the extraction area, which does not diffuse in the subsoil. Up till now the AFS has been applied in this situation, in order to inject a bentonite suspension into the extraction chamber when the earth pressure at the face drops.

The system is set up on the TBM trailers and consists of one or several tanks, which are filled with bentonite suspension and are directly connected with the roof area of the extraction chamber. The tanks are connected with a compressed air compressor via a control valve.

Should the effective support pressure drop in the extraction chamber below the predetermined amount, the AFS automatically injects bentonite suspension into the extraction chamber until the predetermined pressure in the extraction chamber is once again attained. In this way a fluctuation of the support pressure in excess of the 0.2 bar tolerance limit can be compensated.

Apart from this typical case the AFS is applied should it turn out to be difficult to produce the earth pulp with the excavated material and the artificially indu-

ced foam on account of coarse-grained soils. It was feared that this was the case during the case of the Budapest Metro in Hungary dealt with here.

3 Case Example Budapest Metro

The JV BAMCO Tunnel and the Metro Construction Unlimited Partnership Budapest recently concluded the driving operations for Line 4 of the Budapest Metro. The parallel north and southbound tunnels were driven by means of 2 EPB TBMs, with 6.10 m bore diameter: The section between “Népszínház Straße” and “Keleti” Station is analysed in this report on account of the sophisticated geological conditions.

3.1 Geology

The tunnel passes underneath multi-storey buildings, roads and an elevated roadway in the historic old part of the city. The overburden below the building foundations amounts to roughly 8.8 m. The foundations of the elevated roadway are located between the 2 tunnel bores and tail off some 3.2 m above the roof. The groundwater table in this section is located some 11 m above the roof.

The face conditions between “Népszínház Straße” and “Keleti” Station must be assessed as critical for EPB-TBMs on account of the extensive, coarse-grained subsoil both for the drive as well as for compressed air accesses.

The geology in the zone that has to be excavated by and large comprises a layer of clay at floor level and a gravel layer in the roof. The permeability coefficient for the gravel lies between 8×10^{-5} m/s and 2×10^{-2} m/s. The composition of the layers of soil in front of

Dieser Fall wurde bei dem hier betrachteten Beispiel der Metro Budapest in Ungarn befürchtet.

3 Fallbeispiel Metro Budapest

Die Arbeitsgemeinschaft BAM-CO Tunnel und die Metro Construction Unlimited Partnership Budapest haben erst kürzlich die Vortriebsarbeiten für die Linie 4 der Metro Budapest abgeschlossen. Die parallelen Nord- und Südtunnel wurden mit 2 EPB-TBM aufgeföhren, deren Bohrdurchmesser 6,10 m betrug. Der Abschnitt zwischen „Népszin-ház Straße“ und der Station „Keleti“ wird wegen der anspruchsvollen geologischen Verhältnisse in diesem Beitrag analysiert.

3.1 Geologie

Der Tunnel unterquert mehrstöckige Gebäude, Straßenzüge und eine Hochstraße in der historischen Altstadt. Die Überdeckung beträgt ca. 8,6 m zu den Gebäudefundamenten. Die Fundamente der Hochstraße befinden sich zwischen den beiden Tunnelröhren und enden ca. 3,2 m über der Firste. Der Grundwasserspiegel liegt in diesem Bereich ca. 11 m oberhalb der Firste.

Die Ortsbrustverhältnisse zwischen der „Népszin-ház Straße“ und der Station „Keleti“ müssen aufgrund des weitgestuften, grobkörnigen Baugrunds für EPB-TBM, sowohl für den Vortrieb als auch für Drucklufteinstiege, als kritisch eingestuft werden.

the face varies from 100 % clay to more than 80 % gravel. Fig. 2 shows the grading curves for the cases, in which the face consists of 80 % and 100 % proportions of gravel. Furthermore the section is presented in which it is generally possible to condition the soil.

As the proportion of gravel at the face grows the grading curve approaches the limit for the sector in which pure conditioning of the soil is still technically possible. In the project geology this limit is exceeded given an 80 % proportion of gravel. As a result the high share of gravel calls for a high degree of care when conditioning the earth pulp. If it is not possible to produce a reliable, stable earth pulp, then this has grave consequences on

the face stability resulting in increased settlements right up to cave-ins.

3.2 AFS in Budapest

The AFS installed on the TBM used in Budapest had a capacity of 2 m³. The Budapest excavation was carried out with the usual EPB parameters. A “Foam Injection Ratio” (FIR) of 0.4 and a “Foam Expansion Ratio” (FER) of 9 were adopted for a comparative calculation. Taking these values the share of air in the earth pulp in the extraction chamber was determined to be roughly 8 m³. This volume has to be capable of being compensated by the AFS, so that stable face conditions can be assured even given lengthy standstills. The installed AFS was only capable of compensating



Wir können es besser. Und wirtschaftlicher.



Rowa vereint hohe Kompetenz im Anlagenbau und langjährige Erfahrung im Untertagebau. Intelligente Gesamtlösungen vom Vortrieb bis zur Deponie sind unser Markenzeichen: Sie garantieren eine überdurchschnittliche Betriebssicherheit und eine hohe Wirtschaftlichkeit.

Wir können es besser – weltweit. Das Vertrauen unserer Kunden beweist es.

Rowa Tunnelling Logistics AG, Leuholz 15, CH-8855 Wangen SZ
Telefon +41 (0)55 450 20 30, Fax +41 (0)55 450 20 35
rowa@rowa-ag.ch, www.rowa-ag.ch

Die Geologie im aufzufahren den Bereich setzt sich im Wesentlichen aus einer Schicht Ton im Liegenden und einer Schicht Kies im Hangenden zusammen. Der Durchlässigkeitsbeiwert für den Kies liegt zwischen 8×10^{-5} m/s bis 2×10^{-2} m/s. Die Zusammensetzung der Bodenschichten vor der Ortsbrust variiert von 100 % Ton bis zu mehr als 80 % Kies. Bild 2 zeigt die Sieblinien für die Fälle, dass sich die Ortsbrust aus 80 % bzw. aus 100 % Kiesanteilen zusammensetzt. Zusätzlich wird der Bereich dargestellt, in dem eine Konditionierung des Bodens im Regelfall möglich ist.

Mit steigendem Kiesanteil in der Ortsbrust nähert sich die Sieblinie der Grenze des Bereichs, in dem eine reine Konditionierung des Bodens noch technisch möglich ist. In der Projektgeologie wird diese Grenze bei einem Kiesanteil von 80 % überschritten. Somit verlangt der hohe Kiesanteil ein hohes Maß an Sorgfalt bei der Konditionierung des Erdbreies. Gelingt es nicht, einen zuverlässig stabilen Erdbrei zu erstellen, hätte dieses schwerwiegende Auswirkungen auf die Ortsbruststabilität resultierend in erhöhten Setzungen bis hin zum Verbrauch, gehabt.

3.2 AFS in Budapest

Das auf den in Budapest eingesetzten TBM installierte AFS hatte eine Kapazität von 2 m^3 . Der Vortrieb in Budapest wurde mit den üblichen EPB-Parametern durchgeführt. Für eine vergleichende Rechnung wird ein „Foam Injection Ratio“ (FIR) von 0,4 und ein „Foam Expansion Ratio“ (FER) von 9 angenommen. Mit diesen Werten wird

der Anteil an Luft im Erdbrei der Abbaukammer mit ca. 8 m^3 ermittelt.

Dieses Volumen muss durch das AFS ausgeglichen werden können, um stabile Ortsbrustverhältnisse, auch bei längeren Stillständen, gewährleisten zu können. Das installierte AFS hätte nur ca. 25 % des maximal auftretenden Volumenverlustes ausgleichen können.

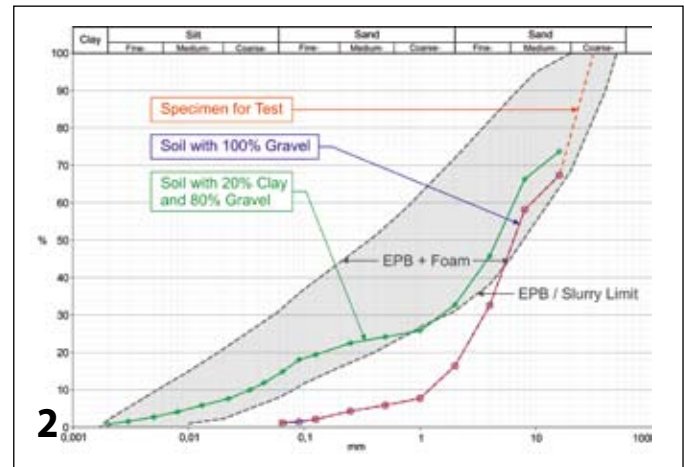
Nach der Analyse der vorhandenen Situation hat Babendererde Engineers Vorschläge unterbreitet, um das AFS für die Grenzsituation auszugleichen.

- **Modifikation des AFS-Kreislaufs und Kapazitätserhöhung des AFS:**

Die Kapazität des AFS sollte durch eine Erweiterung um einen weiteren Bentonittank mit einem Fassungsvermögen von 2 m^3 auf insgesamt 4 m^3 verdoppelt werden. Der zweite Tank wurde mit Leitungen (100 mm Durchmesser) parallel zu dem bestehenden Kreislauf angeschlossen. Drucksensoren und Durchflussmesser wurden installiert, um den eingestellten Druck und den Durchfluss des AFS aufzuzeichnen und zu kontrollieren.

- **Modifikation des AFS-Stützmediums:**

Es musste davon ausgegangen werden, dass aufgrund der in diesem Tunnelabschnitt vorhandenen Geologie mit dem hohen Kiesanteil die standardmäßige Bentonitsuspension im AFS nicht die erforderlichen Voraussetzungen erfüllt, um die Ortsbrust ausreichend zu stützen. Aus diesem Grund wurden Laborversuche durchgeführt, um ein adäquates Stützmedium zu empfehlen.



Sieblinien der Böden

Grading curves of the soils

for approx. 25 % of the maximum loss in volume that occurred.

Following an analysis of the prevailing situation Babendererde Engineers put forward proposals for preparing the AFS for the limit situation.

- **Modification of the AFS circuit and increase in capacity of the AFS:**

The AFS capacity was to be augmented through a further bentonite tank with a capacity of 2 m^3 thus doubling the capacity to 4 m^3 . The second tank was connected with lines (100 mm diameter) parallel to the existing circuit. Pressure sensors and flowmeters were installed to register and control the determined pressure and the flow rate of the AFS.

- **Modification of the AFS support medium:**

It had to be assumed that on account of the geology prevailing in this tunnel section with a high proportion of gravel that the standard bentonite suspension in the AFS would not fulfil the required prerequisites to provide adequate face supporting. As a consequence lab tests were executed in order to recom-

mend an adequate support medium.

3.3 Laboratory Tests

Experiments with various support mediums were designed to show whether and to which extent pressure limit variations with bentonite and polymers are capable of effectively supporting the face in spite of high permeabilities.

The soil made available for the tests was not representative of the coarse-grained soils, anticipated as a result of the Geological Report-. For this reason a representative soil was prepared in accordance with the grading curve for a 100 % proportion of gravel (Fig. 2).

The choice of the polymers took place in keeping with the grain sizes and the size of the AFS feedline. The swelling time of the individual polymers amounted to between 1 and 2 h. Care was taken to observe that the polymers could be easily mixed and were properly pumpable so that they could be used on site without any complications. The recipes applied for the suspensions assured long stability: it was possible to arrive at several weeks in this particular case.

3.3 Laborversuche

Die Experimente mit unterschiedlichen Stützmedien sollten zeigen, ob und bis zu welcher Druckgrenze Variationen mit Bentonit und Polymeren in der Lage sind, die Ortsbrust trotz der hohen Durchlässigkeiten effektiv zu stützen.

Der für die Tests zur Verfügung gestellte Boden war nicht repräsentativ für den grobkörnigen Boden, so wie er laut dem Geologischen Gutachten zu erwarten war. Aus diesem Grund wurde ein repräsentativer Boden gemäß der Sieblinie für 100 % Kiesanteil (Bild 2) hergestellt.

Die Auswahl der Polymere erfolgte unter Berücksichtigung der Korngrößen und der Größe der AFS-Speiseleitung. Die Quellzeit

der einzelnen Polymere betrug zwischen 1 und 2 Stunden. Es wurde darauf geachtet, dass die Polymere leicht angemischt werden konnten und leicht pumpbar waren, um einen reibungslosen Baustelleneinsatz sicherstellen zu können. Die eingesetzten Rezepte für die Suspensionen garantierten eine lange Stabilität: hier konnten mehrere Wochen erreicht werden.

In dem in Bild 3 dargestellten Test wurde zunächst der Beispielboden eingebaut und vollständig mit Wasser gesättigt. Anschließend wurde die Suspension in den Zylinder eingefüllt und mit 0,8 bar Druckluft beaufschlagt.

Bei einer reinen Bentonit-suspension drang diese in den Boden ein und konnte

In the test presented in Fig. 3 first of all the exemplary soil was installed and completely saturated with water. Then the suspension was filled into the cylinder and 0.8 bar compressed air applied.

Given a pure bentonite suspension this penetrated the soil and was unable to establish the filter cakes necessary to transfer the support pressure at the face surface. As a result it was not possible to assure that the face was supported. For this reason largish pieces of polymer from Sawat Water Management were added to the bentonite suspension. Further test series with different grading curves for the polymers either on their own or featuring bentonite suspension ensued. In

the process it was revealed that the application of varied grading curves for largish pieces of polymer best assured the formation of the filter cake. These largish pieces of polymer swelled to a size of 7 mm after adding water and caused the large soil pores to become clogged up. The bentonite suspension has then the capacity to effectively span the residual pores and establish the necessary support pressure.

The tests also showed that the addition of a straightforward polymer diameter or application without a bentonite suspension cannot assure the required sealing effect. It is essential that the grading curves are geared to the prevailing project geology in such cases of application.

rascor®



Wer richtig plant, bleibt trocken.

Als Pioniere in der Abdichtungstechnik entwickeln wir Produkte für die höchsten, trockensten Ansprüche Ihrer Tunnelprojekte – denn Trockenheit heisst auch Sicherheit! Problemorientierte und massgeschneiderte Abdichtungskonzepte sichern den Erfolg! **RASCOR - Pioniere der Bauabdichtung.**

Rascor International AG
Gewerbestrasse 4
CH-8162 Steinmaur
Telefon 044 857 11 11
Telefax 044 857 11 00
info@rascor.com

nicht den zur Übertragung des Stützdrucks notwendigen Filterkuchen an der Ortsbrust-Oberfläche aufbauen. Eine Stützung der Ortsbrust konnte folglich nicht gewährleistet werden. Aus diesem Grunde wurden der Bentonitsuspension grobstückige Polymere von Sawat Water Management beigemischt. Es folgten weitere Testserien mit unterschiedlichen Sieblinien der stückigen Polymere allein oder mit Bentonitsuspension. Dabei zeigte sich, dass der Einsatz einer abgestuften Sieblinie der stückigen Polymere die Bildung des Filterkuchens am besten gewährleistete. Diese stückigen Polymere quellen nach Zugabe von Wasser bis zu einer Größe von 7 mm auf und bewirken eine Verstopfung der großen Bodenporen. Die Bentonitsuspension kann anschließend die restlichen Poren wirksam überbrücken und den erforderlichen Stützdruck aufbauen.

Gleichfalls zeigten die Versuche, dass eine Zugabe lediglich eines Polymerdurchmessers oder ohne Bentonitsuspension nicht die notwendige Abdichtung gewährleisten kann. Eine Abstimmung der Sieblinien auf die vorhandene Projektgeologie bleibt in den Anwendungsfällen notwendig.

3.4 Durchführung auf der Baustelle


In der letzten Station vor der Passage der stark durchlässigen Geologie wurden beide TBM für den Einsatz der grobstückigen Polymer-Bentonitsuspension angepasst. Hierzu wurde das Volumen der AFS-Tanks auf den Maschinen verdoppelt und die Leitungen zwischen Tank und Abbaukammer mit automatischen Ventilen und Sensoren ausgerüstet. Das Ansetzen der

Polymer-Bentonit-Suspension erfolgte außerhalb des Tunnels. Das Polymer-Bentonit-Gemisch wurde fertig zum Einsatz zur Maschine transportiert.

Im August 2010 konnte der Tunnelabschnitt zwischen „Népszínház Straße“ und der Station „Keleti“ sicher und erfolgreich aufgeföhren werden.

4 Ausblick

In diesem Fallbeispiel kam eine Suspension von Polymeren in Kombination mit Bentonit im AFS zur Anwendung. Der Anwendungsbereich kann jedoch weiter ausgedehnt werden. So kommen zum Beispiel grobstückige Polymer-Bentonitsuspensionen auch bei Slurry-Vortrieben in Geologien mit hohen Durchlässigkeiten zum Einsatz. Bei Slurry-Vortrieben ist neben der Pumpbarkeit aber stets auch die Separierbarkeit der Suspension zu überprüfen. Da hier ebenfalls die Durchsatzmengen von Suspension um ein Vielfaches größer sind als bei einem EPB-Vortrieb sind die wirtschaftlichen Auswirkungen für ein Projekt deutlich höher.

Neben der Beherrschung des Vortriebs in hohen Durchlässigkeiten eignet sich der Einsatz grobstückiger Polymere insbesondere auch für Druckluftestiege. Ist ein Druckluftestieg in einem Abschnitt erforderlich, in dem mit erhöhten Druckluftverlusten zu rechnen ist, bietet es sich an, vor dem Einstieg und dem damit verbundenen Absenken des Stützmediums eine stabile Suspension mit angepasster Stückigkeit der Polymere in die Abbaukammer zu pumpen, um größere Poren in der Ortsbrust effektiv zu verschließen und somit für ein konstantes Luftdruckpolster und sichere Ortsbrustverhältnisse zu sorgen. 

3.4 Execution on the Construction Site


At the final stage prior to penetrating the highly permeable geology both TBMs were adapted for the suspension combining largish pieces of polymer and bentonite. Towards this end the volume of the AFS tank on the machines was doubled and the lines between the tank and extraction chamber fitted with automatic valves and sensors. The polymer-bentonite suspension was prepared outside the tunnel. The polymer-bentonite mix was transported to the machine ready for use.

In August 2010 the tunnel section between "Népszínház Straße" and "Keleti" Station was driven safely and successfully.

4 Outlook

In this case example a suspension of polymers combined with bentonite was applied in the AFS. However the field of application can be further expanded. Thus for instance suspensions comprising largish pieces of polymer

and bentonite can be employed for slurry drives in geologies with high permeabilities. In the case of slurry drives the separability of the suspension has to be checked in addition to its pumpability. As in this case the throughput quantities of suspensions are also many times greater than in the case of an EPB excavation the economic effects for a project are substantially higher.

Apart from mastering the drive in high permeabilities the application of largish pieces of polymer is suitable in particular for compressed air accesses as well. Should a compressed air access be required in a section, where increased compressed air losses can be reckoned with, it is advisable to pump a stable suspension with a properly adjusted size of polymer into the extraction chamber prior to access and the related decrease in the support medium in order to close larger pores in the face effectively and thus cater for a constant air pressure cushion and secure face conditions. 

Drucktest des Beispielbodens
Support pressure test

