

**D**er Erfolg eines EPB-Vortriebs – speziell im inhomogenen, porösen oder zur Verklebung neigenden Boden – ist in starkem Maß von dem richtigen Design der TBM und von der Effektivität der Bodenkonditionierungsadditive abhängig. Als Beispiele können hier die Projekte Madrid MetroSur, Toulouse oder Marseille Metro Extension und Rome 4 Venti genannt werden.

Ein weiterer wichtiger Punkt bei der Auswahl der Bodenkonditionierungsmittel ist deren Auswirkung auf die Umwelt. Hierzu sind Risikoanalysen bezüglich der möglichen Emission in das Grundwasser, die Arbeitsplatzkonzentrationen und mögliche Emissionen beim Einbau des abgebauten Bodens notwendig.

#### TBM Design in Abhängigkeit von der Geologie

EPB-Vortriebe werden sowohl in homogenen als auch in inhomogenen Böden durchgeführt. Besonders bekannte Beispiele für EPB-Projekte in sehr inhomogener Geologie sind BPNL Lyon mit einem Bohrdurchmesser von 10,98 m [1] und Barcelona Metro L9 mit Bohrdurchmessern von 12,06 m [2]. Die Sieblinien dieser Projekte sind neben weiteren in Bild 1 dargestellt.

Die große Heterogenität des Bodens innerhalb eines Projekts zwingt die Maschinenbauer zur Herstellung einer universellen Tunnelbohrmaschine [3], die jedoch durch Verwendung der auf die jeweils zu durchfahrende Geologie abgestimmte Bodenkonditionierung trotzdem den jeweils optimalen Vortrieb erreicht.

Die drei wichtigsten Faktoren für den Vortrieb im Lockergestein sind:

- Permeabilität und Sieblinie des Bodens,
- Grundwasserdruk
- Risiko von Verklebung und Adhäsion.

#### Permeabilität und Sieblinie des Bodens

EPB-Vortriebe decken heute die komplette Bandbreite ab: vom

#### Konditionierungsmittel

## Erddruckgestützter Schildvortrieb – Chancen und Risiken

Aufgrund der immer flexibler werdenden Einsatzmöglichkeiten von Erddruckschilden in Kombination mit der Verwendung moderner Bodenkonditionierungsmittel finden diese eine immer breitere Verbreitung in der Welt des Tunnelbaus. Die Eigenschaften von Schäumen und Polymeren als Konditionierungsmittel, einen stabilen und sicheren Erddruck in der Abbaukammer aufzubauen und den Drehwiderstand des Schneidrads dabei so gering wie möglich zu halten, gehören zusammen mit deren Umweltfreundlichkeit mit zu den wichtigsten Faktoren für einen erfolgreichen EPB-Vortrieb.

impermeablen Ton (Heathrow T5) bis hin zu einer Permeabilität von  $k = 10^{-3}$  (BPNL Lyon, Turin).

Bei Vortrieben in tonhaltigen Böden kommt es oft zu Problemen mit der Verklebung des Schneidrads und zu Adhäsions- respektive Kohäsionsproblemen in der Abbaukammer.

Bei Vortrieben in porösen Böden hingegen liegen die Schwierigkeiten



Herbert Egli (Chemiker HTL) und Dipl.-Ing. Lars Langmaack.

#### Beispiele von Sieblinien

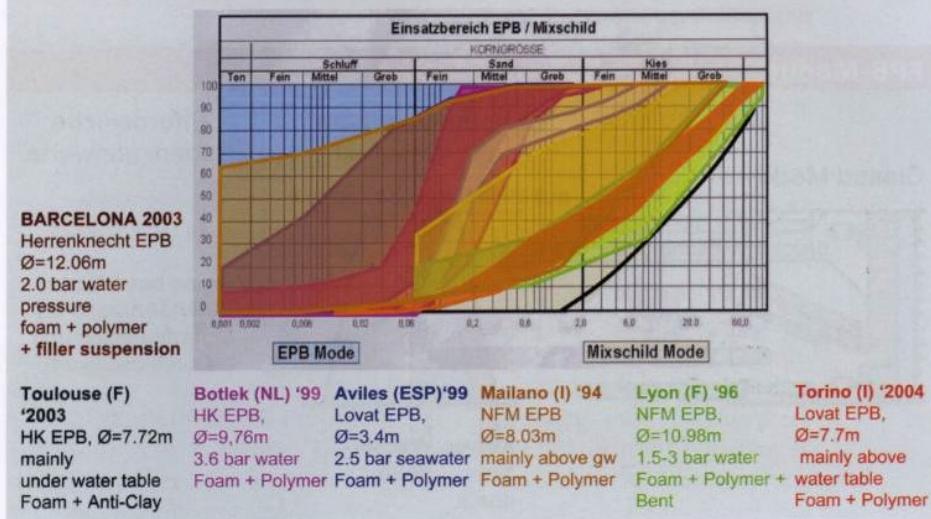


Bild 1. Sieblinien verschiedener EPB Projekte.

ehler in der instabilen Ortsbrust, unkontrolliertem Wasser- und Bodenabbau und Verlust des Erddrucks. Diese Probleme wurden unter anderem beim Projekt Mailand Metro beschrieben [4]. Wichtig für einen erfolgreichen TBM-Vortrieb ist die maschinentechnische Anpassung an die Gegebenheiten (Öffnungsgrad des Schildes, Anzahl und Art der Abbauwerkzeuge, installierte Kraft, usw.) kombiniert mit der richtigen Bodenkonditionierung durch Schäume und Polymere. Auch eine sorgfältige Analyse der zur Verfügung stehenden Sieblinien ist für einen erfolgreichen Vortrieb wichtig.

#### Grundwasser

Ein wichtiger Faktor bei EPB-Vortrieben im Lockergestein ist der Grundwasserspiegel respektive der Grundwasserdruk. Je höher der Wasserdruk und die Porosität des anstehenden Bodens, desto schwieriger wird die Vermeidung von unkontrolliertem Wassereinbruch oder Oberflächensetzung. Maschinentechnisch kann hier nur durch eine längere Extraktionsschnecke oder durch die Installation einer Kolbenpumpe am Ende der Schnecke eingegriffen werden. Der wichtigste Faktor, ein Eindringen des Wassers in die TBM von vornherein zu vermeiden, ist die komplette Füllung der Abbaukammer der TBM mit einem homogenen und impermeablen Bodenbrei, hergestellt

durch die Verwendung von Schaum und Polymer. Baustellenbeispiele hierfür sind Botlek Tunnel (NL) und Aviles Abwassertunnel (ESP) wie in der Literatur und im hier Folgenden vorgestellt.

#### Verklebung, Adhäsion, Kohäsion

EPB-Vortriebe in tonhaltigen Böden kämpfen oft mit Verklebungen des Schneidrads, Ineffektivität der Abbauwerkzeuge, Zuwachsen der Fenster und Kohäsion des vom Schneidrad abgebauten Bodens in der Abbaukammer.

In tonhaltigen Böden können sich schnell die Schneidradöffnungen verschließen und die Abbauwerkzeuge ineffektiv werden. Das Problem der Adhäsion und Kohäsion von Tonen führt in der Regel zu geringen Vortriebsgeschwindigkeiten, Schwierigkeiten der TBM-Steuerung und extensiven Reinigungsmaßnahmen. Rein maschinentechnisch gibt es hier nur wenige Angriffspunkte, wie zum Beispiel der Öffnungsgrad des Schildes (speziell im Schneidradzentrum) und gut platzierte Rotoren und Statoren in der Abbaukammer. Hier ist wiederum einer der wichtigsten Einflussparameter die Bodenkonditionierung, die durch den gezielten Einsatz von Anti-Ton-Additiven zusammen mit Schaum die Adhäsions- und Kohäsionsneigung des anstehenden Bodens drastisch reduzieren kann.

Baustellenbeispiele hierzu sind Madrid MetroSur (MBT Online, siehe [www.ugc.bASF.com](http://www.ugc.bASF.com)) und Roma 4 Venti (MBT Online, siehe [www.ugc.bASF.com](http://www.ugc.bASF.com)) wie auch Toulouse Metro.

#### Notwendigkeit der Bodenkonditionierung

Die Verwendung von Bodenkonditionierungsmitteln ist ein integraler und unverzichtbarer Bestandteil eines EBP-Vortriebs. Einzig die Verwendung von Bodenkonditionierungsmitteln ermöglicht die komplette Füllung der Arbeitskammer der TBM, die Reduzierung des Drehwiderstands und der Abrasion der Abbauwerkzeuge, des Schneidrads und der Extraktionsschnecke. Nur dieser klassische EPB-Vortriebsmodus – und kein anderer wie auch immer gearteter – ist sinnvoll bei Lockergestein und sensibler Oberfläche [6], wie aus Bild 2 hervorgeht.

Das Erddruckgleichgewicht kann nur bei komplett gefüllter Abbaukammer erreicht werden [7, 8]. Aus diesem Grund muss der anstehende Boden während des Vortriebs mit Bodenkonditionierungsmitteln vermischt werden. Hierzu dienen:

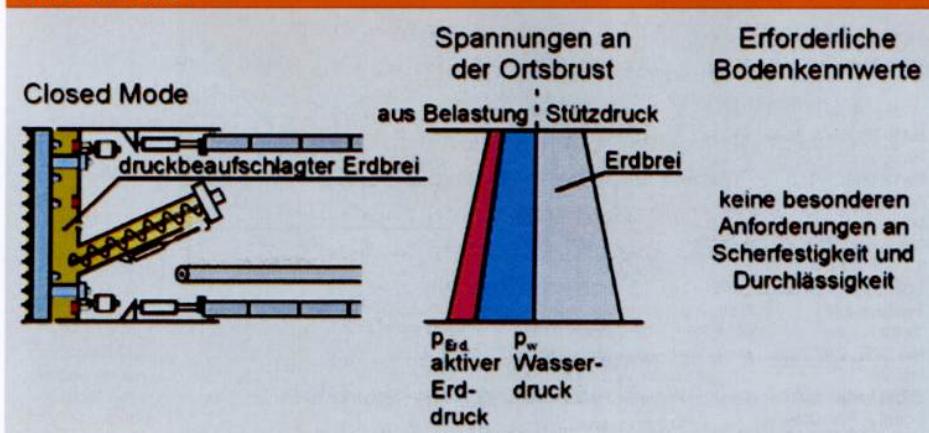
- Schäume,
- Polymere für poröse Böden,
- Polymere für tonige und tonhaltige Böden.

Sie können entweder einzeln oder in Kombination untereinander verwendet werden.

#### Schäume

Die Hauptaufgabe der Schäume bei der Bodenkonditionierung ist die Transformation des anstehenden Bodens in eine für die TBM handhabbare Rheologie. Der von außen anstehende Erddruck muss in der Abbaukammer erreicht und gehalten werden, ebenso müssen Druckschwankungen durch Bodenaustrag aus der Schnecke vermieden werden. Der homogen im Boden verteilte Schaum erfüllt hierbei die gleiche Aufgabe wie die Luftblase bei den Slurry-TBMs. Da-

#### EPB-Modus



**Bild 2.** Verwendung von Bodenkonditionierungsmitteln.

über hinaus sind die Reduzierung des Drehwiderstandes und der Abrasion sehr wichtige weitere Effekte. Der Schaum selbst wird durch eine turbulente Mischung aus Schaumlösung und Druckluft auf der TBM hergestellt [9].

Die Haupteigenschaften der Schäume sind:

- Plastifizierung des Bodens,
- Homogenisierung des Bodens.

Sowohl Labortests als auch Baustellenerfahrungen zeigen, dass unterschiedliche Bodenarten unterschiedliche Schäume und/oder Schaumparameter erfordern, um eine möglichst große Effektivität zu erreichen. Bild 3 veranschaulicht die nötigen Effekte.

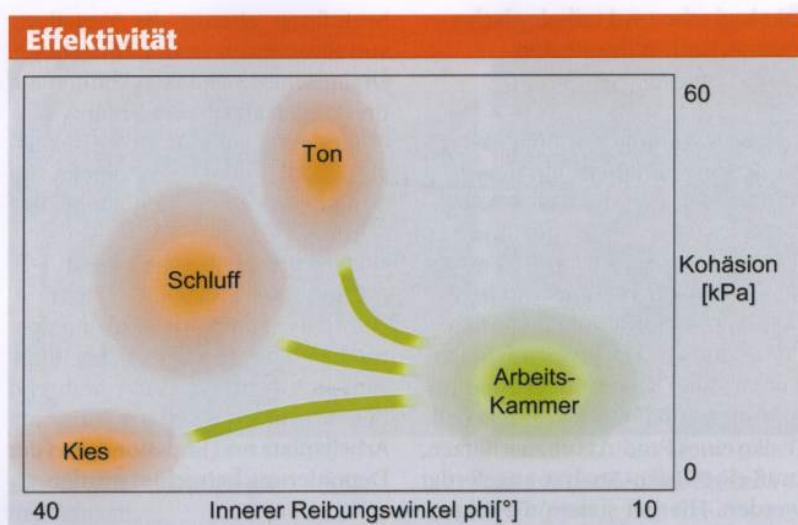
Die Auswahl des für die jeweilige Geologie effektivsten Schaums erfolgt am besten durch Laboruntersuchungen mit dem Originalboden vor Vortriebsbeginn.

#### Anti-Ton-Additive

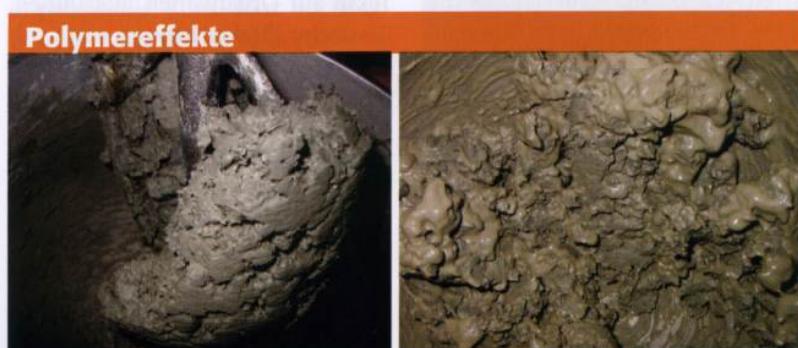
Wie bereits angedeutet, soll die Bodenkonditionierung die Verklebungs- und Kohäsionsneigung tonhaltiger Böden reduzieren. Reicht der Einfluss des Schaums allein nicht mehr aus, so erfolgt der zusätzliche Einsatz von speziellen Anti-Ton-Additiven. Diese besitzen eine hohe Ladungsdichte, um mit Hilfe der durch das Schneidrad eingebrachten mechanischen Energie die bestehenden Bindungen zwischen den Bodenpartikeln aufzubrechen und anschließend durch eine sterische Barriere die einzelnen Bodenpartikel an der Re-Agglomeration zu hindern.

Bild 4 illustriert den Effekt dieser Polymere in tonhaltigem Boden (Bologna Metro).

Durch den Gebrauch von Schaum und Wasser agglomerieren sich die Tonpartikeln sofort und verkleben das Mischwerkzeug (Bild 4 links). Bei einer TBM würde somit innerhalb kürzester Zeit sowohl das Schneidrad als auch die Abbaumammer verkleben. Nur der zusätzliche Einsatz von Anti-Ton-Additiven führt zu einer bleibenden Separierung der Tonpartikel mit einem Minimum an Kohäsion (Bild 4 rechts).



**Bild 3.** notwendige Eigenschaften der Bodenkonditionierungsmittel.



**Bild 4.** Verhalten nur mit Schaum und mit zusätzlichem Rheosoil® Anti-Ton-Additiv.

und schafft die Bedingungen für einen effektiven TBM Vortrieb.

#### Polymere für poröse Böden

Im Gegensatz zu den Anti-Ton-Additiven sollen die Polymere für poröse Böden Kohäsion erzeugen, um eine plastische Abraumkonsistenz herzustellen.

Generell können in porösen Böden unterschiedliche Arten von Polymeren benutzt werden:

- Wasser bindende Polymere zur Austrocknung von (flüssigen) Böden,
  - Boden strukturierende Polymere, einzusetzen in lockeren, kohäsionslosen Böden, zur Veränderung der Bodenrheologie und zur Vermeidung von Segregationserscheinungen,
  - Schaum stabilisierende Polymere.
- Einige Polymerentwicklungen basieren auf Kohlenwasserstoffketten und werden durch bakterielle Fermentation produziert. Diese Polymere sind wasserlöslich, biologisch abbaubar und kompatibel mit den eingesetzten Schäumen. Es existieren auch umweltfreundliche, nicht abbaubare Polymere. Generell wichtig ist, dass die Polymere zusammen mit Schaum eingesetzt werden können, also den Schaumgenerator nicht verstopfen. Weiterhin ist wichtig, dass die Polymere bereits in flüssiger Form vorliegen, so wird die Dosierung vereinfacht, lange Herstellzeiten vermieden und bei Auftreten eines Problems ist so das Polymer sofort einsatzbereit.

#### Ökologische und toxikologische Eigenschaften der Bodenkonditionierungsmittel

Die Verwendung von Bodenkonditionierungsmitteln ist ein integraler Bestandteil der EPB-Technologie. Doch neben dem technischen Anforderungsprofil müssen sie auch hohe ökologische und toxikologische Anforderungen erfüllen. Diese sind ein KO-Kriterium bei der Entwicklung neuer Bodenkonditionierungsmittel. Um das potenzielle Risiko eines Produkts abzuschätzen, muß eine Risiko-Analyse angefertigt werden. Hierbei stehen die folgenden vier Punkte besonders im Vordergrund:

- die Menge des Substanz, die in die Umwelt gelangt,
- die chemischen und physikalischen Eigenschaften der Substanz, die deren Verteilung in der Umwelt beeinflusst. In den meisten Fällen ist hier die Auslaugung in das Grundwasser anzuführen. Die biologische Abbaubarkeit muss ebenfalls berücksichtigt werden.
- Die Toxizität der Substanz für die Umwelt respektive für Wasserlebewesen und Säugetiere,
- der Eliminationsprozess (Degradation oder Immobilisation)

beeinflusst ebenso die Verteilung von Substanzen in der Umgebung. Organische Substanzen können auf drei Wegen abgebaut werden:

- Biodegradation: mittels Organismen (Bakterien), die bereits im Boden vorliegen oder hinzugeführt werden,
- Hydrolyse: Abbau im Wasser,
- Photolyse: Abbau durch Licht.

Für eine komplette Risikoanalyse müssen weiterhin mögliche Emissionen ins Grundwasser während des Vortriebs, Konzentration am Arbeitsplatz und Emissionen bei der Deponierung betrachtet werden.

#### Definition der Toxizität

Die Toxizität bezeichnet die Kapazität von Substanzen, negative Effekte auf Organismen auszuüben. Toxische Effekte hängen stark mit der Konzentration zusammen, der die Organismen ausgesetzt sind. Toxizitätstests im Labor ermitteln die „sicheren Konzentrationen“, bei denen keine negativen Effekte mehr auf die Lebewesen mehr festgestellt werden können. Für Säugetiere wird hier der LD50-Wert in mg/kg Körpergewicht, bei Wasserorganismen wird der LC50-Wert in mg/l Wasser angegeben. Je höher die angegebenen Werte, desto

geringer ist deren Gefährdungspotenzial.

#### Definition der Bioakkumulation

Die Bioakkumulation ist ein Prozess, bei dem Organismen Substanzen in sich speichern und aufkonzentrieren. Dies geschieht entweder durch die Nahrungsaufnahme oder direkt durch die Umwelt (Sorption).

#### Definition der biologischen Abbaubarkeit

Die biologische Abbaubarkeit bezeichnet den Abbau von Substanzen durch Mikro-Organismen. Dies geschieht durch Zersetzung der Substanz in kleinere Bruchstücke und schlussendlich zu Wasser und CO<sub>2</sub>.

Die Beständigkeit bezeichnet die Fähigkeit von Substanzen, dem biologischen Abbau zu widerstehen.

#### Auswahl der Bodenkonditionierungsmittel

Zur Anwendung sollten demnach nur solche Produkte kommen, die die gesuchten funktionalen Eigenschaften beim Vortrieb zeigen und zugleich das kleinstmögliche Risiko für die Umwelt und die Arbeiter darstellen.

#### Toxikologische Empfehlungen

Der empfindlichste Bereich ist hier die aquatische Toxizität. Tests sind analog der OECD Richtlinien 210 bis 203 vorzunehmen. Das Erreichen von LC50- oder EC50-Werten von 100 mg/l (Substanzkonzentration von 100 mg Substanz pro Liter Wasser) ist hier als die Konzentration festgelegt worden, bei der per Definition kein akutes-toxisches Risiko für die getesteten Organismen mehr besteht.

Generell sind hier die Produkte mit den höchsten LC50- oder EC50-Werten zu bevorzugen. Für Polymere können Werte >100mg/l für Fische, Daphnien und Algen erreicht werden. Bei Schäumen sind diese Werte von >100mg/l auch für Algen und Daphnien zu erreichen, bei Fischen hingegen können durch die Verringerung der Oberflächen-

#### Aviles Abwasserprojekt

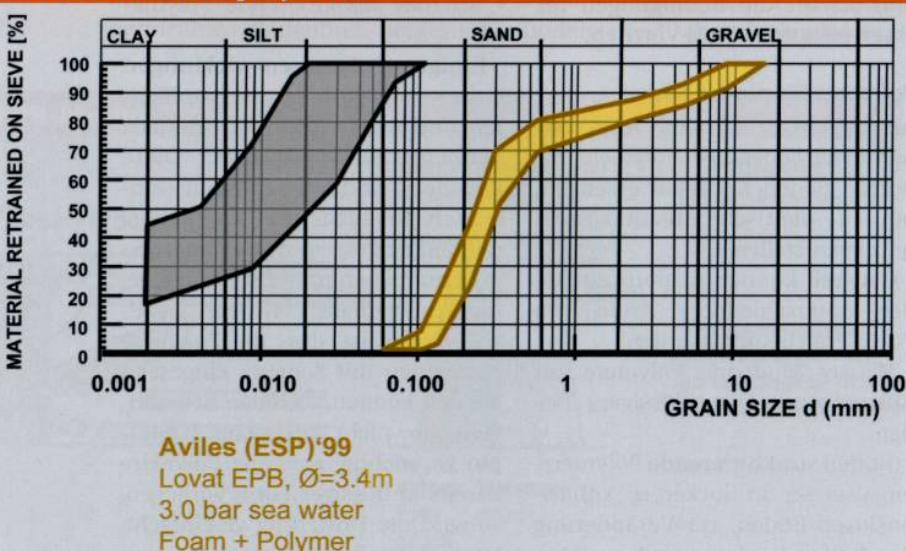


Bild 5. Sieblinie des Aviles Sands.

spannung des Wassers durch den Schaum bestenfalls Werte von 10 bis 100 mg/l erreicht werden.

#### Ökologische Empfehlungen

Die ökologischen Eigenschaften werden durch die biologische Abbaubarkeit bestimmt, die nach OECD Richtlinien mit einer definierten Menge und Art an Startbakterien bestimmt wird. Generell sollten Bodenkonditionierungsmittel entweder

- gut biologisch abbaubar oder
- nicht biologisch abbaubar (inert) UND nicht toxisch so wie nicht bioakkumulierbar sein.

Beide Varianten garantieren einen geringsten möglichen negativen Effekt auf die Umgebung.

#### Baustellenbeispiele

In den folgenden Kapiteln werden TBM-Baustellen mit schwieriger Geologie vorgestellt, bei denen sowohl die technischen als auch die Umwelteigenschaften der eingesetzten Konditionierungsmittel signifikant zum Erfolg des Projekts beigetragen haben.

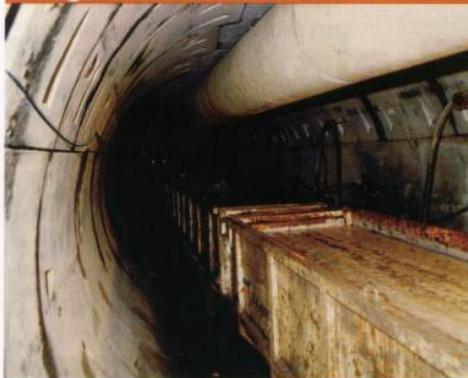
#### Aviles Abwasserprojekt (Spanien)

Dieser Tunnel wurde von Dragados mit einer Lovat EPB Maschine mit einem Durchmesser von 3,40 m aufgefahren. Nach Durchörterung von tonigem Schluff und schluffigem Ton wechselte der Boden abrupt zu kiesigem Sand mit bis zu 3,0 bar Seewasserdruck. Die Sieblinie ist in Bild 5 dargestellt.

Der alleinige Einsatz von Schaum gewährleistete keinen korrekten Druckaufbau in der Abbaukammer, unkontrollierter Wassereinbruch und sehr geringe Vortriebsgeschwindigkeiten waren die Folge, wie in Bild 6 verdeutlicht.

Auf der TBM gab es keine Möglichkeit, zusätzliche Suspension in die Abbaukammer zuzugeben. Eine neue Installation hierfür wäre sehr teuer und vor allen Dingen zeitraubend gewesen. Aus diesen Gründen wurde der Versuch des kombinierten Einsatzes von Schaum und Poly-

#### Möglichkeiten der Bodenkonditionierung

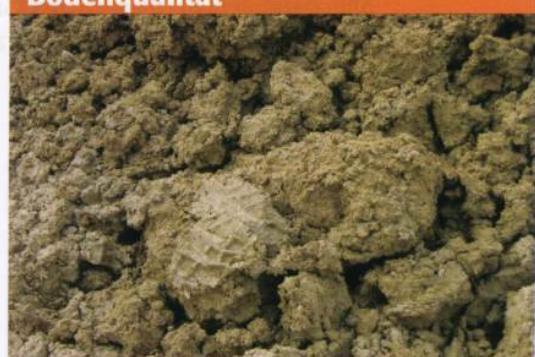


**Bild 6.** Aviles Vortrieb, nur mit Schaum.



**Bild 7.** Vortrieb mit Schaum + Polymer.

#### Bodenqualität



**Bild 8.** Plastischer, aber nicht zur Verklebung neigender konditionierter Boden nach dem Abbau.

hem Reinigungsaufwand, Schwierigkeiten auf der Bandförderanlage und Zweifeln bezüglich der Ortsbruststabilität und Oberflächensetzungen.

Nur die kombinierte Verwendung von Schaum und Rheosoil® Anti-Ton-Additiven ermöglichte letztendlich die Transformation der anstehenden Geologie in einen homogenen, pastösen und nicht adhäsiven Aushub. Nur so konnte die Abbaukammer der TBM überhaupt gefüllt und unter Erddruck gefahren werden. Bild 8 illustriert die Qualität des konditionierten Bodens.

Mit dieser Bodenkonditionierung erreichte die TBM respektable Vortriebsgeschwindigkeiten von 40 bis 50 mm/min. unter 1 bis 2 bar Erddruck. Die Wassereinbrüche konn-

ten gestoppt und der Stützdruck sichergestellt werden.

#### Zusammenfassung

Wie anhand der Baustellenbeispiele gezeigt wurde, kann eine EPB-TBM schnell und erfolgreich auch durch eine schwierige und inhomogene Geologie vorgetrieben werden. Entscheidend hierfür ist die richtige Auswahl der Tunnelbohrmaschine zusammen mit der korrekten Bodenkonditionierung. So kann eine große Bandbreite von Böden – von sehr permeablen Böden unter Grundwasserdruk bis zu tonigen Böden mit hohem Verklebungspotenzial – sicher aufgefahren werden.

Alle dargestellten Baustellenbeispiele verwendeten Bodenkonditionierungsmittel, die zur Minimierung der negativen Umwelteinflüsse strikten Risiko-Analysen standgehalten haben. Weder während des Vortriebs noch bei der Deponierung zeigten sich negative Einflüsse der Bodenkonditionierungsmittel.

#### Quellennachweis

- [1] BENTZ *et al.*: Optimierung des schaumgestützten EPB-Vortriebs, Boulevard Périphérique Nord de Lyon. STUVA Tagung Berlin 1997, Berlin: Alba Verlag, 1998, Nr. 37, S. 88.

[2] GABARRÓ *et al.*: Metro Barcelona Linea 9 – Europe's greatest metro project with tunnel boring machines of large diameter. ITA 2003, Amsterdam: Balkema, p. 637 ff.

[3] REHM: Maschineller Tunnelvortrieb unter sehr schwierigen geologischen Verhältnissen. Tunnel- und Tiefbautagung 2004, Györ, S. 99 ff.

[4] GRANDORI *et al.*: Turin Metro Systems – Design and operation of EPB TBMs beyond the limits of this technology. Felsbau 21 (2003), Nr. 6, S. 34 ff.

[5] FERNANDEZ: Aviles Sewage Tunnel, a tunnel below sea water level. AFTES 2002 Toulouse, p. 131 ff.

[6] BABENERERDE: TBM mit Slurry- oder Erddruckstützung – Einsatzbereiche und Zuverlässigkeitssanalyse. Felsbau 21 (2003), Nr. 5, S. 155 ff.

[7] HERRENKNECHT *et al.*: Geotechnische und mechanische Interaktion beim Einsatz von Erddruckschilden im Fels. STUVA Tagung 2003, Dortmund: Bauverlag, S. 175 ff.

[8] STEINER *et al.*: Face support for a large Mix-Shield in heterogeneous ground condition. Proceedings of Tunnelling '94. London: Chapman & Hall.

[9] LANGMAACK: Advanced Technology of Soil Conditioning.

North American Tunnelling Congress, Boston 2000, Amsterdam: Balkema, 2000, p. 525.

[10] LANGMAACK: Application of new TBM Additives. BAUMA 2001, 6<sup>th</sup> international symposium for tunnel construction. Essen: Verlag Glückauf GmbH, 2001, S. 27.

[xx] JANCSEZ *et al.*: Advantages of soil Conditioning in shield tunneling: Experiences of LRTS Izmir. ITA 1999 Oslo, Amsterdam: Balkema, p. 865 ff.

[xx] LANGMAACK: EPB-Vortrieb in inhomogenen Böden: Möglichkeiten neuer Konditionierungsmittel. Tunnel- und Tiefbautagung 2004, Györ, S. 121 ff.

[xx] MARCHIONNI *et al.*: Galleria Quattro Venti in Rom. Tunnel Nr. 8, 2002, S. 8 ff.

#### Autoren

Herbert Egli (Chemiker HTL), Project Manager, BASF Construction Chemicals, Development Center Zürich, Vulkanstraße 110, CH-8048 Zürich, E-Mail: herbert.egli@basf.com

Dipl.-Ing. Lars Langmaack, Technical Manager TBM, BASF Construction Chemicals Europe, Vulkanstraße 110, CH-8048 Zürich, E-Mail: lars.langmaack@basf.com ■

## Sonderdrucke

... aus den Fachzeitschriften:

- **Felsbau magazin**
- **geotechnik**
- **Glückauf**

Beiträge in Fachzeitschriften sind das aussagekräftigste (Werbe-) Mittel, Ihren Geschäftspartnern Ihr Know-how und dessen Anwendung praxisorientiert zu vermitteln.

## Felsbau

**magazin**



## Fortdrucke

Fordern Sie ein Angebot an über:

- **Sonderdrucke**  
individuell nach Ihren Wünschen
- **Fortdrucke**  
als kostengünstige Alternative

**VGE**  
Verlag GmbH

Postfach 18 56 20 · D-45206 Essen  
Telefon +49 (0) 20 54 / 9 24-111  
Telefax +49 (0) 20 54 / 9 24-119  
E-Mail redaktion@vge.de  
Internet www.vge.de