Erddruckgestützter Schildvortrieb – Chancen & Risiken

Herbert Egli (Chemiker HTL)
BASF Construction Chemicals, Development Center Zürich

Lars Langmaack (Dipl.-Ing.)
BASF Construction Chemicals, technical manager TBM

KURZFASSUNG: 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 Schäume und Polymeren als Konditionierungsmittel, einen stabilen & sicheren Erddruck in der Abbaukammer aufzubauen und den Drehwiderstand des Schneidrades dabei so gering wie möglich zu halten, gehören zusammen mit deren Umweltfreundlichkeit mit zu den wichtigsten Faktoren für einen erfolgreichen EPB-Vortrieb.

1 ALLGEMEINES

Der Erfolg eines EPB-Vortriebs - speziell im inhomogenen, porösen oder zur Verklebung neigenden Boden – ist in starkem Maße 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.

2 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 10,98m (Bentz et al 1997) und Barcelona Metro L9 mit Bohrdurchmessern von 12,06m (Gabarró et al 2003). Die Sieblinien dieser Projekte sind neben weiteren in Abbildung 1 dargestellt.

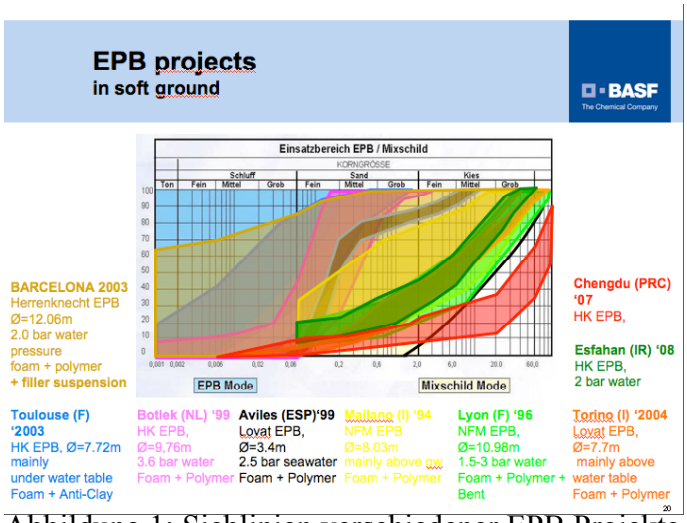

Abbildung 1: Sieblinien verschiedener EPB Projekte

Die große Heterogenität des Bodens innerhalb eines Projektes zwingt die Maschinenbauer zur Herstellung einer universellen Tunnelbohrmaschine (Rehm 2004), 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 & Sieblinie des Bodens
- Grundwasserdruck
- Risiko von Verklebung & Adhäsion

2.1 *Permeabilität & Sieblinie des Bodens*

EPB-Vortriebe decken heute die komplette Bandbreite ab: vom 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 Schneidrades und zu Adhäsions- respektive Kohäsionsproblemen in der Abbaukammer, wie in Absatz 2.3 beschrieben.

Bei Vortrieben in porösen Böden hingegen liegen die Schwierigkeiten eher in der instabilen Ortsbrust, unkontrolliertem Wasser- und Bodenabbau und Verlust des Erddruckes. Diese Probleme wurden unter anderem beim Projekt Mailand Metro beschrieben (Grandori et al, 2003). Wichtig für einen erfolgreichen TBM Vortrieb ist die maschinentechnische Anpassung an die Gegebenheiten (Öffnungsgrad des Schildes, Anzahl und Art der Abbauwerkzeuge, installierte Kraft, …) kombiniert mit der richtigen Bodenkonditionierung durch Schäume und Polymere. Auch eine sorgfältige Analyse der zur Verfügung stehenden Sieblinien ist für einen erfolgreichen Vortrieb wichtig.

2.2 *Grundwasser*

Ein wichtiger Faktor bei EPB-Vortrieben im Lockergestein ist der Grundwasserspiegel respektive der Grundwasserdruck. Je höher der Wasserdruck 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 vorn herein 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 (Fernandez et al 2002) und in Absatz 6.1 beschrieben.

2.3 *Verklebung, Adhäsion, Kohäsion*

EPB-Vortriebe in tonhaltigen Böden kämpfen oft mit Verklebungen des Schneidrades, 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 platzierter 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 (Details siehe Absatz 3.3). Baustellenbeispiele hierzu sind Madrid MetroSur (MBT Online) und Roma 4 Venti (MBT Online) wie auch in Absatz 6.2 dargestellt oder Toulouse Metro in Absatz 6.3.

3 NOTWENDIGKEIT DER BODENKONDITIONIERUNG

Die Verwendung von Bodenkonditionierungsmitteln ist ein integraler und unverzichtbarer Bestandteil eines EBP-Vortriebes. Einzig die Verwendung von Bodenkonditionierungsmitteln ermöglicht die komplette Füllung der Arbeitskammer der TBM, die Reduzierung des Drehwiderstandes und der Abrasion der Abbauwerkzeuge, des Schneidrades und der Extraktionsschnecke. Nur dieser klassische EPB-Vortriebsmodus – und kein anderer wie auch immer gearteter – ist sinnvoll bei Lockergestein und sensitiver Oberfläche (Babendererde 2003), wie aus Abbildung 2 hervorgeht.

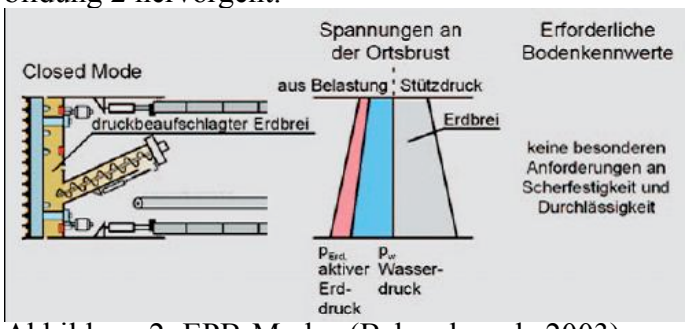

Abbildung 2: EPB-Modus (Babendererde 2003)

Das Erddruckgleichgewicht kann nur bei komplett gefüllter Abbaukammer erreicht werden (Herrenknecht et al 2003, Steiner et al 1994). Aus diesem Grund muß der anstehende Boden während des Vortriebes 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.

3.1 *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. Darüber 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 (Langmaack 2000).

Die Haupteigenschaften der Schäume sind:

- Plastifizierung des Bodens
- Homogenisierung des Bodens

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

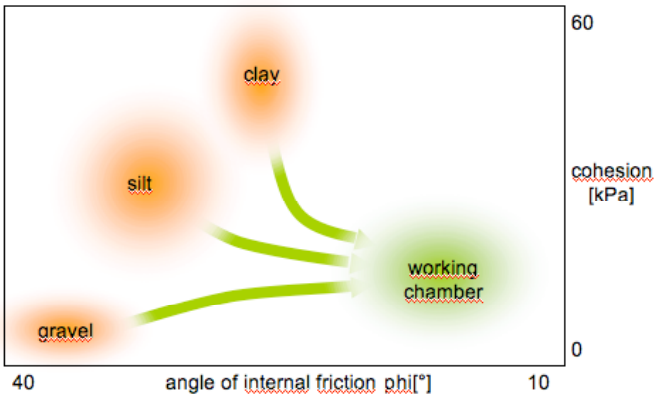

Abbildung 3: notwendige Eigenschaften der Bodenkonditionierungsmittel

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

3.2 *Anti-Ton-Additive*

Wie bereits im Absatz 3.1 angedeutet, soll die Bodenkonditionierung die Verklebungs- und Kohäsionsneigung tonhaltiger Böden reduzieren. Reicht der Einfluss des Schaumes 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.
Abbildung 4 illustriert den Effekt dieser Polymere in tonhaltigem Boden (Bologna Metro).

Abbildung 4: Verhalten nur mit Schaum und mit zusätzlichem Rheosoil® Anti-Ton-Additiv

Durch den Gebrauch von Schaum und Wasser agglomerieren sich die Tonpartikeln sofort und verkleben das Mischwerkzeug (Abbildung 5 links). Bei einer TBM würde somit innerhalb kürzester Zeit sowohl das Schneidrad als auch die Abbaukammer verkleben. Nur der zusätzliche Einsatz von Anti-Ton-Additiven führt zu einer bleibenden Separierung der Tonpartikel mit einem Minimum an Kohäsion (Abbildung 5 rechts) und schafft die Bedingungen für einen effektiven TBM Vortrieb.

3.3 *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, kohäsionsslosen 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.

4 ÖKOLOGISCHE UND TOXIKOLOGISCHE EIGENSCHAFTEN DER BODENKONDITIONIERUNGSMITTEL

Wie bereits im Kapitel 2 und 3 verdeutlicht, ist die Verwendung von Bodenkonditionierungsmitteln ein integraler Bestandteil der EPB-Technologie. Doch neben dem technischen Anforderungsprofil müssen sie auch hohe ökologische und toxikologische An-

forderungen erfüllen. Diese sind ein KO-Kriterium bei der Entwicklung neuer Bodenkonditionierungsmittel. Um das potentielle Risiko eines Produktes abzuschätzen, muß eine Risiko-Analyse angefertigt werden. Hierbei stehen die folgenden 4 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 Eleminationsprozess (Degradation oder Immobilisation) beeinflusst ebenso die Verteilung von Substanzen in der Umgebung. Organische Substanzen können auf 3 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 Vortriebes, Konzentration am Arbeitsplatz und Emissionen bei der Deponierung betrachtet werden.

4.1 *Definition der Toxizität*

Die Toxizität bezeichnet die Kapazität von Substanzen, negative Effekte auf Organismen auszuüben. Toxische Effekte hängen stark mit der Konzentration zusammen, den 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 LD_{50}-Wert in mg/kg Körpergewicht, bei Wasserorganismen wird der LC_{50}-Wert in mg/l Wasser angegeben. Je höher die angegebenen Werte, desto geringer ist deren Gefährdungspotential.

4.2 *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).

4.3 *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_2. Die Beständigkeit bezeichnet die Fähigkeit von Substanzen, dem biologischen Abbau zu widerstehen.

5 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.

5.1 *Toxikologische Empfehlungen*

Der empfindlichste Bereich ist hier die aquatische Toxizität. Tests sind analog der OECD Richtlinien 210 bis 203 vorzunehmen. Das Erreichen von LC_{50} oder EC_{50}-Werten von 100 mg/l (Substanzkonzentration von 100mg 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 Oberflächenspannung des Wassers durch den Schaum bestenfalls Werte von 10-100 mg/l erreicht werden.

5.2 *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.

6 BAUSTELLENBEISPIELE

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

6.1 *Aviles Abwasserprojekt (Spanien)*

Dieser Tunnel wurde von Dragados mit einer Lovat EPB Maschine mit einem Durchmesser von 3,40m 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 Abbildung 5 dargestellt.

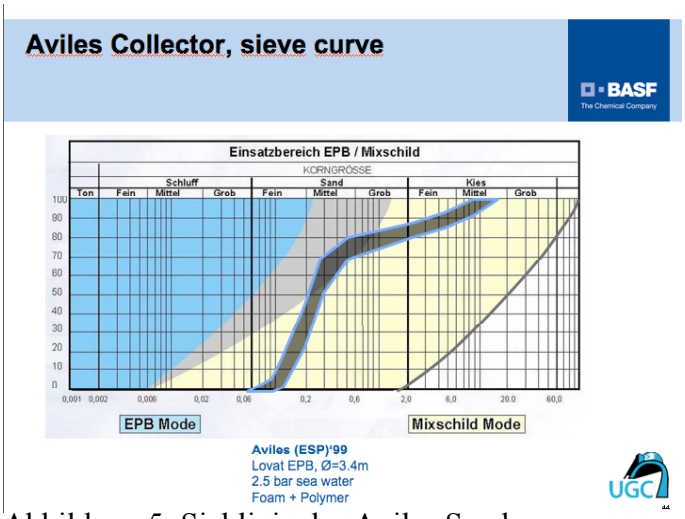

Abbildung 5: Sieblinie des Aviles Sandes

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

Abbildung 6: Aviles Vortrieb

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 Polymer unternommen, um den anstehenden Sand in eine plastische und impermeable Konsistenz zu überführen – trotz der für EPB-Vortriebe sehr ungünstigen Sieblinie, noch dazu unter 3 bar Seewasserdruck. Das Resultat ist ebenfalls in Abbildung 6 dargestellt und verdeutlicht sehr anschaulich die Möglichkeiten der Bodenkonditionierung.
Durch Verwendung von Schaum und strukturierendem Polymer konnten trotz der schlechten Geologie durchschnittliche tägliche Vortriebsleistungen von 27 Metern mit Spitzenleistungen von bis zu 50,5 Metern pro Tag erreicht werden, mit einer voll gefüllten Arbeitskammer unter 3 bar Erddruck und ohne Eintritt von Wasser. Weitere Details hierzu finden sich bei Fernandez 2002 und Langmaack 2001.

6.2 *Toulouse Metro (Frankreich)*

Dieser Metrotunnel wurde unter anderem von dem JV Vinci / Eiffage mit einer Herrenknecht EPB-Maschine (S-208) mit 7,72 m Durchmesser aufgefahren.
Die Geologie bestand aus relativ trockenem tonigen Schluff mit eingebetteten und unter Wasserdruck stehenden Sandlinsen. In homogenen Tonformationen war eine Druckluftfahrweise möglich. Wurden jedoch die Sandlinsen angefahren, kollabierte der Stützdruck und Wassereinbruch in die TBM fand statt. Dies führte zu geringen Vortriebsgeschwindigkeiten, hohem 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. Abbildung 7 illustriert die Qualität des konditionierten Bodens.

Abbildung 7: plastischer, aber nicht zur Verklebung neigender konditionierter Boden nach dem Abbau

Mit dieser Bodenkonditionierung erreichte die TBM respektable Vortriebsgeschwindigkeiten von 40-50 mm/Minute unter 1-2 bar Erddruck. Die Wassereinbrüche konnten gestoppt und der Stützdruck sichergestellt werden.

7 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 Grundwasserdruck bis zu tonigen Böden mit hohem Verklebungspotential – sicher aufgefahren werden.
Alle dargestellten Baustellenbeispiele verwendeten Bodenkonditionierungsmittel, die zur Minimierung der negativen Umwelteinflüsse strikten Risiko-Analysen standgehalten haben. Weder während des Vortriebes noch bei der Deponierung zeigten sich negative Einflüsse der Bodenkonditionierungsmittel.

8 LITERATUR

Babendererde 2003
TBM mit Slurry- oder Erddruckstützung – Einsatzbereiche und Zuverlässigkeitsanalyse
Felsbau 21 (2003), No.5, p. 155 ff

Bentz et al 1997
Optimierung des schaumgestützten EPB-Vortriebs, Boulevard Périphérique Nord de Lyon
STUVA Tagung Berlin 1997, Alba Verlag Berlin, 1998, Volume 37, p. 88, ISBN 3 87094 636 9

Fernandez 2002
Aviles Sewage Tunnel, a tunnel below sea water level
AFTES 2002 Toulouse, p. 131 ff, Specifique ISBN 951 04 16 2 4

Gabarró et al 2003
Metro Barcelona Linea 9 – Europe's greatest metro project with tunnel boring machines of large diameter
ITA 2003 Amsterdam, p 637 ff, Balkema ISBN2: 90 5809 542 8

Grandori et al 2003
Turin Metro Systems – Design and operation of EPB TBMs beyond the limits of this technology
Felsbau 21 (2003), No.6, p. 34 ff

Herrenknecht et al 2003
Geotechnische und mechanische Interaktion beim Einsatz von Erddruckschilden im Fels
STUVA Tagung 2003, Dortmund, p. 175 ff, Bauverlag ISBN 3 7625 3602 3

Jancsecz et al 1999
Advantages of soil Conditioning in shield tunneling: Experiences of LRTS Izmir
ITA 1999 Oslo, p. 865 ff., Balkema ISBN 90 5809 063 9

Langmaack 2000
Advanced Technology of Soil Conditioning
North American Tunnelling Congress, Boston 2000, A.A. Balkema, Rotterdam, Brookfield, 2000, p. 525
ISBN 90 5809 162 7

Langmaack 2001
Application of new TBM Additives
BAUMA 2001, 6th int. symposium for tunnel construction
Verlag Glückauf GmbH, Essen, 2001, p. 27,
ISBN 3 7739 5964 8

Langmaack 2004
EPB-Vortrieb in inhomogenen Böden: Möglichkeiten neuer Konditionierungsmittel
Tunnel- und Tiefbautagung 2004, Györ, p. 121 ff

Marchionni et al 2002
Galleria Quattro Venti in Rom
Tunnel No.8, 2002, p. 8 ff

MBT Online Madrid MetroSur
www.degussa-ugc.com

MBT Online Roma 4 Venti
www.degussa-ugc.com

Rehm 2004
maschineller Tunnelvortrieb unter sehr schwierigen geologischen Verhältnissen
Tunnel- und Tiefbautagung 2004, Györ, p. 99 ff

Steiner et al 1994.
Face support for a large Mix - Shield in heterogeneous ground condition
Proc. of Tunnelling '94. London : Chapman & Hall