

Konditionierung des Ausbruchsmaterials zur Stützung der Ortsbrust

Dipl.-Ing. Lars Langmaack

Degussa Construction Chemicals (Europe), Zürich, Schweiz

KURZFASSUNG: Erddruckschilde (EPB-TBMs) mit Verwendung moderner Bodenkonditionierungsmittel finden immer mehr Verbreitung in der Welt des Tunnelbaus. Die Eigenschaften dieser Schäume und Polymere, einen Erddruck in der Abbaukammer aufzubauen und diesen sicher aufrecht zu erhalten, gehören zusammen mit deren Umweltfreundlichkeit mit zu den wichtigsten Faktoren für einen erfolgreichen TBM-Vortrieb.

ABSTRACT: Earth Pressure Balancing (EPB) tunnel boring machines using soil conditioning additives become more and more frequent in the world of tunnelling. Their ability to produce & secure the earth pressure equilibrium together with consideration on their ecological and toxicological aspects belongs to the most important factors of a successful TBM drive.

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 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 zwei Projekte sind in Figure 1 dargestellt.

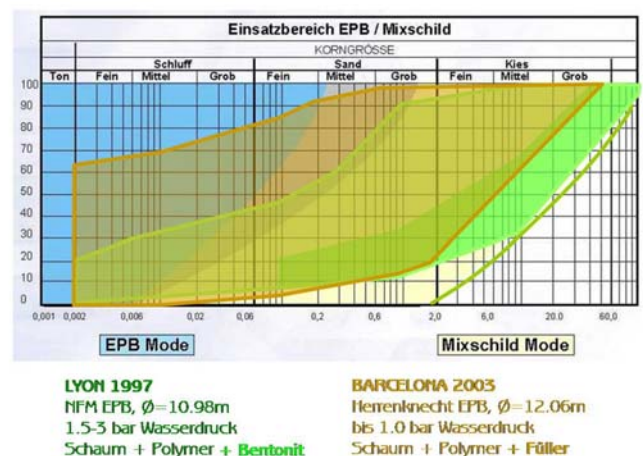


Figure 1: Sieblinien Lyon und Barcelona (Langmaack 2004)

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 des Bodens
- Grundwasserdruck
- Risiko von Verklebung & Adhäsion

2.1 Permeabilität des Bodens

EPB-Vortriebe decken heute die komplette Bandbreite vom impermeablen Ton (Heathrow T5) bis hin zu einer Permeabilität von $k=10^{-3}$ (BPNL Lyon, Turin) ab.

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 zuletzt beim Mailand Metro Projekt beschrieben (Grandori et al, 2003). Wichtig für einen erfolgreichen TBM Vortrieb ist die technische Anpassung an die Gegebenheiten (Öffnungsgrad des Schildes, Anzahl und Art der Abbauwerkzeuge, installierte Kraft, ...) kombiniert mit der richtigen Bodenkonditionierung durch Schäume und Polymere. Eine Verwendung reiner Schäume wird bei hoch permeablen Böden nicht ausreichen – Details hierzu siehe Absatz 3.2.

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 Wassereintritt 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.



Figure 2: Verklebung des Schneidrades

Figure 2 verdeutlicht, wie schnell sich in tonhaltigen Böden 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 EPB-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 sensibler Oberfläche (Babendererde 2003), wie aus Figure 3 hervorgeht.

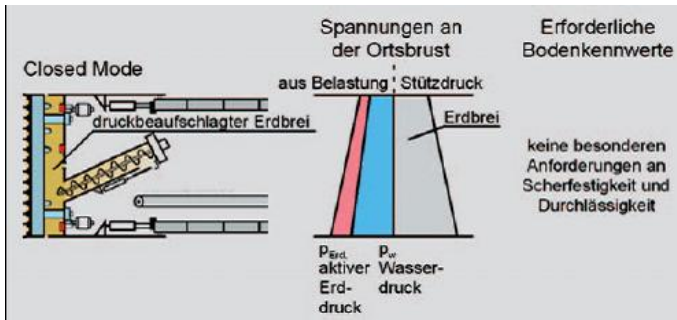


Figure 3: EPB-Modus (Babendererde 2003)

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:

- Verflüssigungseffekt durch Verringerung der Oberflächenspannung. Bodenpartikel sind nicht länger durch gebundenes Wasser verbunden
- elektrostatischer Abstoßungseffekt der sich anziehende Bodenpartikel separieren kann

Sowohl Labortests als auch Baustellenerfahrungen zeigen, dass unterschiedliche Bodenarten unterschiedliche Schäume erfordern, um eine möglichst große Effektivität zu erreichen. Figure 4 veranschaulicht die nötigen Effekte.

Toniger Boden erfordert eine drastische Reduzierung der Kohäsion aber auch des inneren Reibungswinkels und stellt damit eine sehr komplexe Aufgabe dar; bei schluffigen Böden ist meist relativ einfach eine Reduzierung des Reibungswinkels zu erreichen. Bei kiesigen Böden muss das Gegenteil erfolgen, nämlich eine Steigerung der Kohäsion bei gleichzeitiger Verringerung des Reibungswinkels.

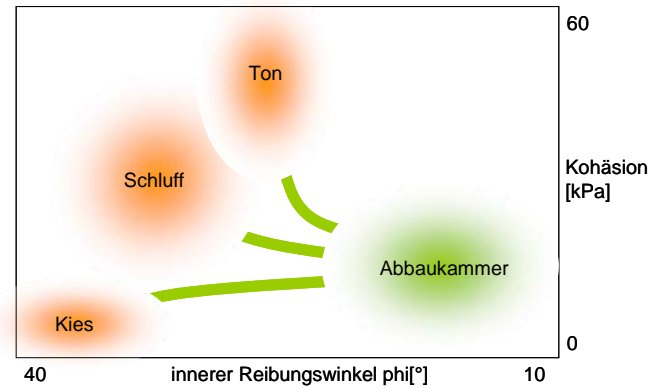


Figure 4: notwendige Eigenschaften der Bodenkonditionierungsmittel

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 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.

Figure 5 illustriert den Effekt dieser Polymere in tonhaltigem Boden (Bologna Metro).



Figure 5: 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 (Figure 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 (Figure 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.



Figure 6: Vergleich des anstehenden Bodens vor und nach der Konditionierung mit Schaum und Polymer

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 Anforderungen 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 Eliminationsprozess (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 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 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 (Sorptions).

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 CO₂. 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 LC_{50} oder EC_{50} -Werten zu bevorzugen. Für Polymere können Werte $>100\text{mg/l}$ für Fische, Daphnien und Algen erreicht werden. Bei Schäumen sind diese Werte von $>100\text{mg/l}$ 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 Bodenconditionierungsmittel 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.

5.3 Resultate der Risiko-Analyse

5.3.1 Arbeiterrisiko

Der zu erwartende Einfluss auf die Arbeiter sollte prinzipiell sehr niedrig sein, wenn die generellen Schutzvorschriften für den Umgang mit Chemikalien (siehe Sicherheitsdatenblatt) eingehalten werden.

Idealerweise liegen die Konzentrationen in der Tunnelluft auch unter Worst-Case-Bedingungen um mehr als das 1000-Fache unter den Expositionsgrenzen (air hazard index = 1).

5.3.2 Umweltrisiko

Generell sollte kein Risiko für Oberflächenwasser durch Emission von Tunnelwasser bestehen, wenn

dieses einer kommunalen Kläranlage zugeleitet wird.

Die potentielle Infiltration von Substanzen in das Grundwasser sollte keine relevanten Umweltrisiken herbeiführen. Konditionierter Boden sollte ohne spezielle Nachbehandlung deponiert werden können.

6 BAUSTELLENBEISPIELE

Die folgenden Kapitel stellen drei TBM-Baustellen mit schwieriger Geologie vor, bei denen sowohl die technischen als auch die Umwelteigenschaften der eingesetzten Conditionierungsmittel 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 aufgeföhren. Nach Durchföhrtung von tonigem Schluff und schluffigem Ton wechselte der Boden abrupt zu kiesigem Sand mit bis zu 3,0 bar Seewasserdruck. Die Sieblinie ist in Figure 7 dargestellt.

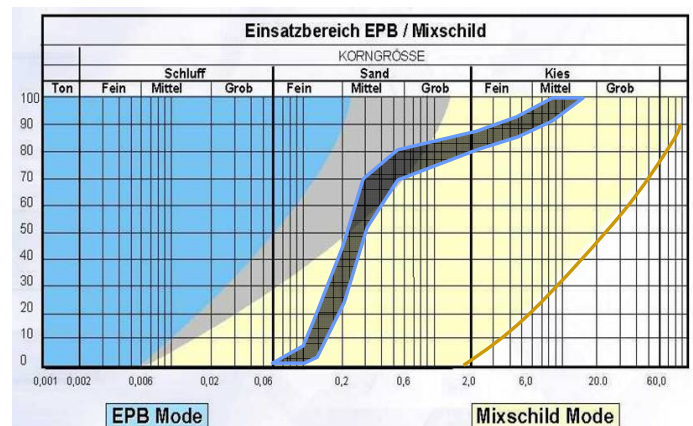


Figure 7: Sieblinie des Aviles Sandes

Der alleinige Einsatz von Schaum gewährleistete keinen korrekten Druckaufbau in der Abbaukammer, unkontrollierter Wassereintruch und sehr geringe Vortriebsgeschwindigkeiten waren die Folge, wie in Figure 8 verdeutlicht.



Figure 8: Aviles Vortrieb nur mit Schaum

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.



Figure 9: Aviles Vortrieb mit Schaum & Polymer

Das Resultat ist in Figure 9 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 Roma 4 Venti (Italien)

Dieser Eisenbahntunnel wurde von dem JV Astaldi / Impregilo mit einer Herrenknecht EPB-Maschine (S-184) mit 7,90 m Durchmesser aufgeföhren. Die zunächst schluffig-sandige Geologie wechselte später zu sehr klebrigem und adhäsivem Vatikan-Ton. Um die Verklebungsprobleme am Schneidrad und die geringen Vortriebsgeschwindigkeiten in den Griff zu bekommen, wurde dem verwendeten Schaum mit Rheosoil® ein Anti-Ton-Polymer zur Seite gestellt.



Figure 10: sauberes Schneidrad nach Durchbruch

Figure 10 zeigt das Schneidrad nach dem Durchbruch im Zielschacht nach der Verwendung von Schaum und Rheosoil®. Die Verklebungen konnten drastisch reduziert werden, bei gleichzeitiger Steigerung der Vortriebsgeschwindigkeit auf 40-50 mm/Minute. Weitere Projektdetails finden sich bei Marchionni et al 2002 und MBT Online Roma 4 Venti.

6.3 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 aufgeföhren.

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 Erdbrei. Nur so konnte die Abbaukammer der TBM überhaupt geföhrt und unter Erddruck geföhren werden. Figure 11 illustriert die Qualität des konditionierten Bodens.



Figure 11: plastischer, aber nicht zur Verklebung neigender konditionierter Boden nach dem Abbau

Mit dieser Bodenconditionierung erreichte die TBM respektable Vortriebsgeschwindigkeiten von 40-50 mm/Minute unter 1-2 bar Erddruck. Die Wassereinbrüche konnten gestoppt und der Stützdruck sichergestellt werden. Figure 12 zeigt das Schneidrad nach dem Durchbruch in einem der Zwischenschächte.



Figure 12: sauberes Schneidrad nach Durchbruch

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 Bodenconditionierung. 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 Bodenconditionierungsmittel, die zur Minimierung der negativen Umwelteinflüsse strikten Risiko-Analysen standgehalten haben. Weder während des

Vortriebes noch bei der Deponierung zeigten sich negative Einflüsse der Bodenconditionierungsmittel.

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, Specificque 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, Győr, 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, Győr, 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