

# Chemische Additive für den maschinellen Tunnelvortrieb

Lars Langmaack  
BASF Construction Chemicals Europe Ltd, Zürich, Schweiz

## 1 Einleitung

Chemische Additive sind aus dem maschinellen Tunnelbau nicht mehr wegzudenken. Nur durch ihren Einsatz werden die Vortriebe nach Stand der Technik erst möglich.

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

Aber auch Bentonitschilde benötigen in bestimmten Fällen Hilfsmittel zur Stützung der Ortsbrust, zur Reduzierung von Verklebungserscheinungen und zur effizienten Separation des abgebauten Bodens von der Bentonitsuspension.

Die Hinterfüllmörtel lassen sich ebenfalls wesentlich effektiver einsetzen durch die Verwendung von Additiven zur Verlängerung der Offenhaltezeit, zur Verbesserung des Auswaschverhaltens oder zur Beschleunigung der Erhärtung.

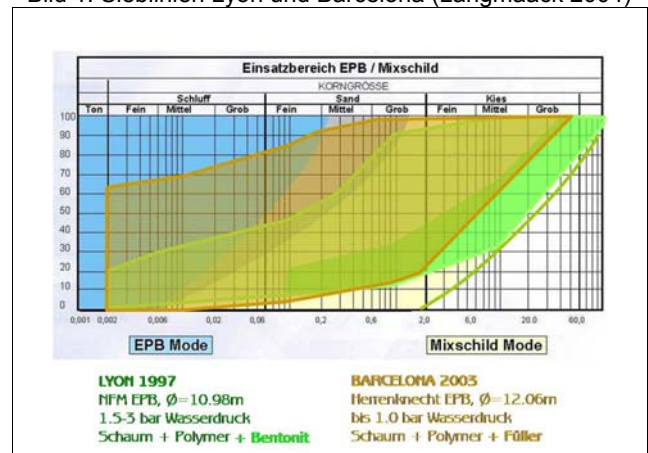
## 2 Bodenconditionierung bei EPB Maschinen

### 2.1 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 Bild 1 dargestellt.

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 abgestimmten Bodenconditionierung trotzdem den jeweils optimalen Vortrieb erreicht.

Bild 1: Sieblinien Lyon und Barcelona (Langmaack 2004)



Die drei wichtigsten Einflußfaktoren für den Vortrieb im Lockergestein sind:

- Sieblinien des Bodens & Permeabilität
- Grundwasserdruck
- Risiko von Verklebung & Adhäsion

### 2.1.1 Durchlässigkeit des Bodens

EPB-Vortriebe decken heute die komplette Bandbreite vom praktisch undurchlässigem Ton (Heathrow T5) bis hin zu einer Permeabilität von  $k=10^{-3}$  m/s (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.

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, Drehmoment, ...) kombiniert mit der richtigen Bodenconditionierung durch Schäume und Polymere. Eine Verwendung reiner Schäume wird in den meisten Fällen nicht ausreichen.

### 2.1.2 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 Wassereintrich 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 der Aviles Abwassertunnel (ESP) sowie Toulouse Metro Line B Lot2 (F).

### 2.1.3 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.

Bild 2: Verklebung des Schneidrades

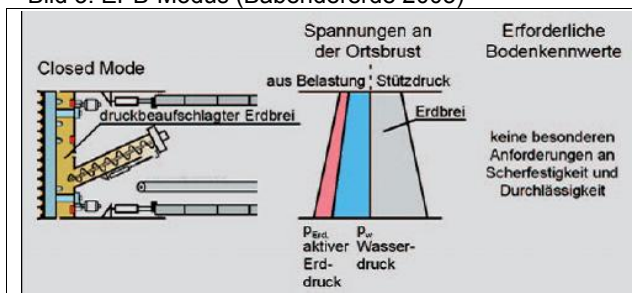


Bild 2 verdeutlicht, wie schnell sich in tonhaltigen Böden die Schneidradöffnungen verschließen und die Abbauwerkzeuge ineffektiv werden. Das Problem der Adhäsion und Kohäsion von Tonen führt in der Regel zu geringen Vortriebsgeschwindigkeiten, Schwierigkeiten der TBM-Steuerung und extensiven Reinigungsmaßnahmen. 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 Bodenconditionierung, 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 oder Toulouse Metro.

## 2.2 Notwendigkeit der Bodenconditionierung

Die Verwendung von Bodenconditionierungsmitteln ist ein integraler und unverzichtbarer Bestandteil eines EPB-Vortriebes. Nur die Verwendung von Bodenconditionierungsmitteln ermöglicht die komplette Füllung der Arbeitskammer der TBM (die einzige Ausnahme bildet hier homogener, weicher, normalkonsolidierter Ton in geringer Tiefe: Beispiel Taipeh), 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 Bild 3 hervorgeht.

Bild 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 Boden-konditionierungsmitteln vermischt werden. Hierzu werden folgende Produkte verwendet:

- Schäume (für schluffige Böden)
- zusätzliche Polymere mit strukturierenden Eigenschaften (für poröse und kiesige Böden)
- zusätzliche Anti-Ton-Additive (für tonige und zur Verklebung neigende Böden)

Diese Produkte sollten entweder einzeln oder in Kombination untereinander verwendet werden können.

### 2.2.1 Schäume

Die Hauptaufgabe der Schäume bei der Boden-konditionierung 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 Flüssigkeitsschilden. 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).

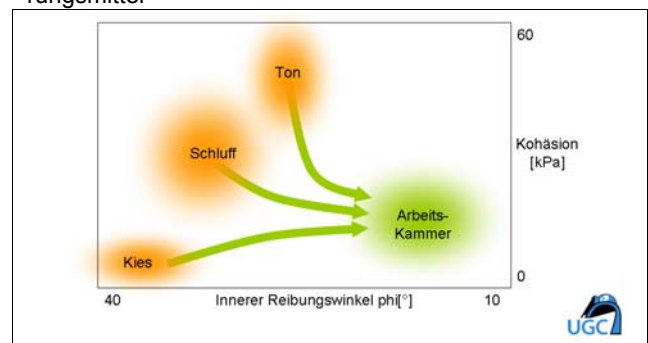
Die Haupteigenschaften der Schäume sind:

- 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. Bild 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.

Bild 4: notwendige Eigenschaften der Boden-konditionierungsmittel



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

### 2.2.2 Anti-Ton-Additive (für tonige und zur Verklebung neigende Böden)

Wie bereits angedeutet, soll die Boden-konditionierung 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 sehr hohe Ladungsdichte, um mit Hilfe der durch das Schneidrad eingebrachten mechanischen Energie die bestehenden Bindungen zwischen den Bodenpartikeln aufzubrechen und anschließend eine Re-Agglomeration der Bodenpartikel (Verklumpung in der Abbaukammer) zu verhindern.

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

Durch den Gebrauch von Schaum und Wasser agglomerieren sich die Tonpartikel sofort und verkleben das Mischwerkzeug (Bild 5 links). Bei einer TBM würde somit innerhalb kürzester Zeit sowohl das Schneidrad als auch die Abbaukammer verkleben.

Bild 5: Verhalten eines tonigen Bodens nur mit Schaum und mit zusätzlichem Rheosol® Anti-Ton-Additiv



Nur der zusätzliche Einsatz von Anti-Ton-Additiven führt zu einer bleibenden Separierung der Tonpartikel mit einem Minimum an Kohäsion (Bild 5 rechts) und schafft die Bedingungen für einen effektiven TBM Vortrieb.

### 2.2.3 Polymere für poröse Böden (für poröse und kiesige Böden)

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

Bild 6: Vergleich des Original-Bodens mit konditioniertem Boden (mit Schaum und Polymer)



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

- Wasser bindende Polymere zur Austrocknung von (flüssigen) Böden
- strukturierende Polymere einzusetzen in lockeren, kohäsionslosen Böden, zur Veränderung der Bodenrheologie und zur Vermeidung von Segregationerscheinungen
- 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 einer Änderung der Geologie und damit auch der Änderung der notwendigen Bodenconditionierung ist so das Polymer sofort einsatzbereit.

## 2.3 Ökologische und toxikologische Anforderungen

Wie bereits verdeutlicht, ist die Verwendung von Bodenconditionierungsmitteln ein integraler Bestandteil der EPB-Technologie. Doch neben dem technischen Anforderungsprofil müssen sie auch hohe ökologische und toxikologische Anforderungen erfüllen. Diese sind ein Ausschlusskriterium bei der Entwicklung neuer Bodenconditionierungsmittel. Um das potentielle Risiko eines Produktes abzuschätzen, muss eine Risiko-Analyse angefertigt werden. Hierbei stehen die folgenden 4 Punkte besonders im Vordergrund:

1. die Menge der Substanz, die in die Umwelt gelangt
2. 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
3. die Toxizität der Substanz für die Umwelt respektive für Wasserlebewesen und Säugetiere

4. 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.

### 2.3.1 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<sub>50</sub>-Wert in mg/kg Körpergewicht, bei Wasserorganismen wird der LC<sub>50</sub>-Wert in mg/l Wasser angegeben. Je höher die angegebenen Werte, desto geringer ist deren Gefährdungspotential.

### 2.3.2 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).

### 2.3.3 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<sub>2</sub>.

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

### 2.3.4 Empfehlungen für Bodenkonditionierungsmittel

Bei dem Einsatz von Bodenkonditionierungsmitteln ist die aquatische Toxizität der selbste Bereich. Toxizitätstests sind analog der OECD Richtlinien 201 bis 203 vorzunehmen. Das Erreichen von LC<sub>50</sub> oder EC<sub>50</sub>-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 Bodenkonditionierungsmittel mit den höchsten LC<sub>50</sub> oder EC<sub>50</sub>-Werten zu bevorzugen. Für Polymere und Anti-Ton-Additive sollten Werte >100mg/l für Fische, Daphnien und Algen erreicht werden. Bei Schäumen sind diese Werte von >100mg/l für Algen und Daphnien zu erreichen, bei Fischen hingegen können zur Zeit bestenfalls Werte von 10-100 mg/l erreicht werden.

Weiterhin werden die ökologischen Eigenschaften durch die biologische Abbaubarkeit bestimmt, die nach den OECD Richtlinien 301 bis 304 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.

Bei dem biologischen Abbau von Bodenkonditionierungsmitteln sollte prinzipiell darauf geachtet werden, dass genügend Sauerstoff für den aeroben Abbau vorhanden ist.

### 2.4 Baustellenbeispiele

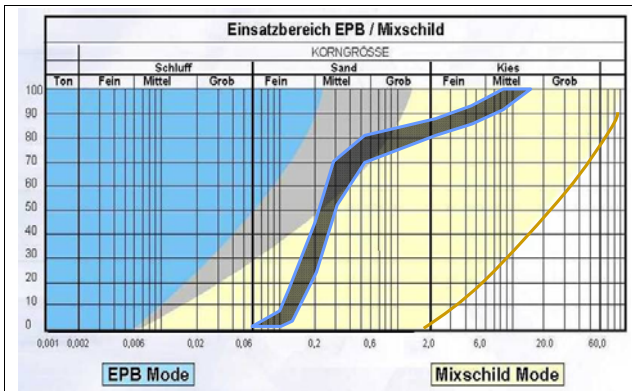
Die folgenden Kapitel stellen drei TBM-Baustellen mit schwieriger Geologie vor, bei denen sowohl die technischen als auch die Umwelteigenschaften der eingesetzten Konditionierungsmittel signifikant zum Erfolg des Projektes beigetragen haben.



### 2.4.1 Aviles Abwasserprojekt (Spanien)

Dieser Tunnel wurde von Dragados mit einer Lovat EPB Maschine mit einem Durchmesser von 3,40m aufgeföhren. 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 7 dargestellt.

Bild 7: 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 Bild 8 verdeutlicht.

Bild 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.

Bild 9: Aviles Vortrieb mit Schaum & strukturierendem Polymer



Das Resultat ist in Bild 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.

### 2.4.2 Toulouse Metro Linie B (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 Reini-

gungsaufwand, 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 gefüllt und unter Erddruck gefahren werden. Bild 10 illustriert die Qualität des konditionierten Bodens.

Bild 10: 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. Bild 11 zeigt das Schneidrad nach dem Durchbruch in einem der Zwischenschächte.

Bild 11: sauberes Schneidrad nach Durchbruch



### 3 Additive für Bentonitschilde

Auch bei Bentonitschilden kommen chemische Additive zum Einsatz. Grob kann man hier 3 Teilbereiche definieren:

- Stützung der Ortsbrust
- Verklebungerscheinungen durch Ton
- Separation des Bentonit/Boden-Gemisches

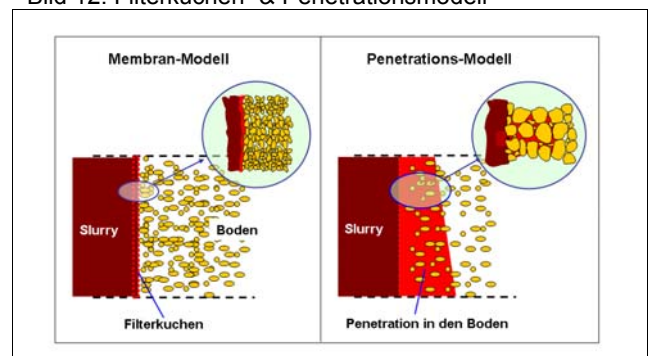
#### 3.1 Stützung der Ortsbrust

Normalerweise wird die Stützung der Ortsbrust durch eine reine Bentonitsuspension erreicht. Diese kann je nach Qualität des Bentonites und Anforderungen des Bodens zwischen 3 und 8 Gewichtsprozent liegen. Grundsätzlich stehen 2 Wirkungsmethoden zur Diskussion:

- Filterkuchenmodell
- Penetrationsmodell

deren einzelne Wirkungsweise und Theorie hier nicht weiter vertieft werden soll.

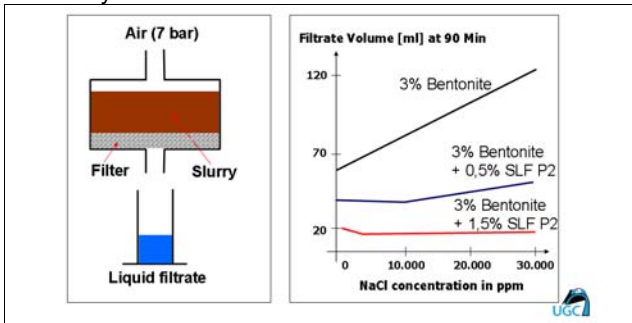
Bild 12: Filterkuchen- & Penetrationsmodell



Interessant wird es in diesem Zusammenhang jedoch, wenn die Porosität des umgebenden Bodens so groß wird, dass die Bentonitsuspension in den umgebenden Boden gedrückt wird, ohne dass ein Filterkuchenaufbau beziehungsweise eine gezielte Penetration zum Druckaufbau möglich ist. Weitere Störfaktoren können eine pH-Verschiebung des Bodens beispielsweise durch Zementinjektion oder saline Grundwässer sein, die beide zu einer zum Teil drastischen Reduzierung der Wirksamkeit von Bentonitsuspensionen führen.

Hier kann neben klassischen Zusätzen wie Sägemehl oder Vermiculit auch der Einsatz von speziellen Polymeren vorteilhaft sein.

Bild 13: API Filtrat-Test: Auswirkungen von Salzgehalt und Polymerzusatz auf das Filtratvolumen



Das MEYCO® SLF P2 Polymer ist in der Lage, das Filtratvolumen der ursprünglichen Bentonitsuspension zu reduzieren und die negativen Auswirkungen beispielsweise von salzhaltigen Wässern zu reduzieren respektive zu egalisieren. Somit kann auch unter schwierigsten Bedingungen eine stabile Ortsbrust erhalten und ein Bentonitverlust vermieden werden.

### 3.2 Verklebungserscheinungen durch Ton

Auch bei Bentonitschilden kann eine Verklebungssproblematik auftreten, wie aus zahlreichen Vortrieben bekannt: U-Bahn München, U-Bahn Wien, U-Bahn Hamburg, Wesertunnel, ... um nur einige Beispiele zu nennen (vergleiche Bild 14)

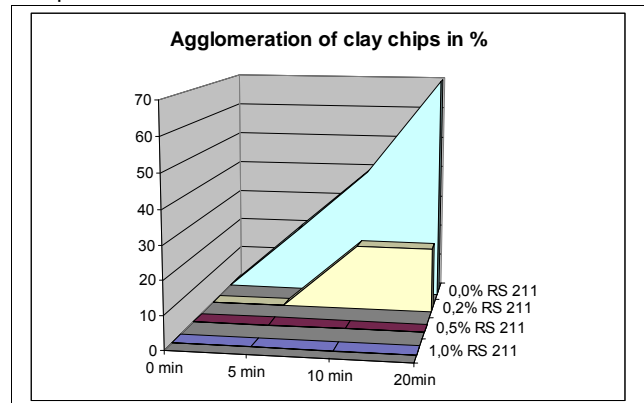
Bild 14: Verklebung am STBM-Schneidrad



Bezüglich der Verklebungsproblematik sei in diesem Zusammenhang auf [14] hingewiesen – eine der wenigen Forschungsarbeiten zu diesem Thema.

Zur Verringerung dieser Verklebungsproblematiken können wie bei den Erddruckschilden Rheosoil® Anti-Ton-Additive eingesetzt werden.

Bild 15: Verringerung der Re-Agglomeration von Tonchips durch Einsatz von Rheosoil®



### 3.3 Separationstechnik und Hilfsmittel

Separieranlagen im Tunnelbau müssen eine hohe Flexibilität im Bezug auf die Kapazität, aber auch auf die Verarbeitung unterschiedlichster Geologien aufweisen, um den konstanten Betrieb der Tunnelbohrmaschine zu gewährleisten.

#### 3.3.1 generelle Verfahrensschritte der Separieranlagen

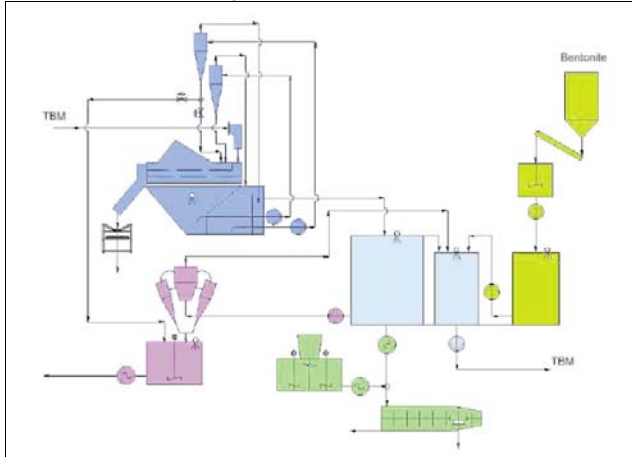
1. Grobabtrennung mit Rüttelsieben bis > 2-6 mm Korndurchmesser
2. Entsandung mit Hdyrozyklon und Entwässerungssieb bis > 60 µm
3. Entschlammung mit Hdyrozyklon und Entwässerungssieb bis > 20-30 µm
4. Feinteilseparierung mit Hilfe von Zentrifugen oder Filterpressen

Hierbei hat die Kornverteilung des abzubauenen Bodens einen entscheidenden Einfluß auf die Zyklontechnik (Art und Anzahl, Klassierstufen), die Siebtechnik



(Siebfläche, -Belag, -Neigung) und die Feinteil entwässerung (Zentrifuge, Filterpresse, Siebbandpresse).

Bild 16: Separationstechnik am Beispiel von Portland (USA), Schauenburg



Teilweise wird auch wie in Portland eine zusätzliche dritte Hydrozyklonstufe installiert, um ein breites Spektrum unterschiedlicher Korngrößen zu bewältigen. Mit der dritten Hydrozyklonstufe kann beispielsweise speziell der Bereich zwischen 30  $\mu\text{m}$  und 15  $\mu\text{m}$  separiert werden, um einen starken Anstieg der Dichte der Bentonitsuspension (Umlaufsuspension) in Bereichen mit tonigem Boden zu verringern.

### 3.3.2 Flockung

Viele Entwässerungsaggregate, wie Zentrifugen, Dekanter, Bandfilter oder Kammerfilterpressen sind ohne die Zugabe von chemischen Hilfsmitteln kaum, oder nur mit erheblichen Leistungseinschränkungen funktionsfähig. Deutlich wird dies anhand von Sedimentationszeiten die notwendig sind, dass ein Teilchen um einen Meter absinkt:

- Schluff ( $\varnothing=10\mu\text{m}$ ): 3 Stunden
- Ton ( $\varnothing=0,1\mu\text{m}$ ): 5 Jahre

Um die Effizienz von Separationsanlagen zu erhöhen, ist also dringend eine Flockung der Bodenpartikel notwendig. Unter Flockung versteht man alle Vorgänge, die die Abscheidung der in einem kolloidalen System suspendierten Teilchen in Form von Flocken bewirken. Dabei treten die Kolloidteilchen unter dem Einfluß von Flo-

ckungs(hilfs)-mitteln infolge Elektrolyt- oder Additions-Koagulation bzw. Flockulation (Zusammenschluß von Teilchen unter Einwirkung intramolekular brückenbildender Makromoleküle) zu größeren Einheiten zusammen. Die Aggregation zu Flocken erfolgt in ruhenden Systemen durch Brownsche Molekularbewegung (perkinetische Flockung), in bewegten Systemen z.B. durch Rühren (orthokinetische Flockung).

### 3.3.3 Flockungsmittel

Flockungsmittel sind Stoffe, welche das (Zeta-) Potential der zu flockenden Teilchen in kolloidalen Suspensionen so beeinflussen, dass sie zu Flocken aggregieren und nach Sedimentation oder Aufschwimmen aus dem System entfernt werden können.

Die Flockungsmittel müssen hierzu die elektrostatische Abstoßung der im Wasser meist negativ aufgeladenen Partikeln überwinden. Aus diesem Grund verwendet man als so genannte Klärmittel meist Metallsalze (Eisen- oder Aluminiumchloride/ -sulfate). Diese bilden in bestimmten pH-Bereichen voluminöse kationische Hydroxide. Weil die Dichteunterschiede zum wässrigen Medium nicht sehr groß sind, ist die Absetzgeschwindigkeit der mit den absorbierten Teilchen beladenen Flocken nicht sehr ausgeprägt. Man setzt daher oft Flockungshilfsmittel oder Sedimentationsbeschleuniger zu.

### 3.3.4 Flockungshilfsmittel

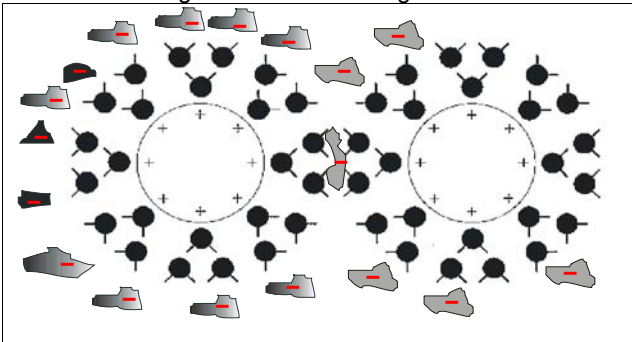
Flockungshilfsmittel finden überall dort Verwendung, wo eine Fest-Flüssig-Trennung gewünscht ist.

Zum Einsatz kommen die Flockungshilfsmittel generell bei der Reinigung kommunaler und industrieller Abwässer in Kläranlagen, der Aufbereitung von Prozess- und Kreislaufwasser sowie der Klärung von Roh- oder Oberflächenwasser für die Gewinnung von Betriebs- oder Trinkwasser. Die Flockungshilfsmittel beschleunigen die Sedimentation oder Flotation von suspendierten Feststoffteilchen und verbessern entscheidend das Entwässerungsverhalten der so eingedickten Schlämme bei statischen oder maschinellen Entwässerungsverfahren. So werden auch bei der Bentonitseparation Flockungshilfsmittel zugesetzt.

Flockungshilfsmittel bzw. Sedimentationsbeschleuniger sind Produkte, die die Zusammenballung von Feststoffpartikeln zu großen Einheiten (Flocken) bewirken. Diese - zwar in gleicher Richtung, aber auf andere Weise als Filterhilfsmittel wirkenden - Produkte bestehen aus Makromolekülen, die sich an die suspendierten Teilchen unter Brückenbildung (Flockulation) anlagern. Die Wirksamkeit hängt von der Kettenlänge und dem ionischen Charakter ab. (Je höher das Molekulargewicht, desto besser die Wirkung. Das Molgewicht kann daher mehrere Mio. betragen.) Es handelt sich dabei meist um organische, synthetische, hochmolekulare und wasserlösliche Polyelektrolyte auf der Basis von Polyacrylamid und Polyacrylat. Auch andere organische Polyelektrolyte synthetischen oder natürlichen Ursprungs finden als Flockungshilfsmittel Verwendung. Flockungshilfsmittel bilden jedoch im Gegensatz zum Flockungsmittel selbst keine Flocke.

Aufgrund der Zusammenballung zu Flocken können sich die Feststoffe wegen ihrer größeren Masse wesentlich schneller absetzen. Bei der Flockenbildung werden gleichzeitig die Poren zwischen den einzelnen Teilchen vergrößert, so dass das im Schlamm enthaltene Wasser durch Filtration oder Zentrifugation leichter zu entfernen ist.

Bild 17: Wirkungsweise der Flockungshilfsmittel



Mechanismus der Flockenbildung durch Flockungshilfsmittel:

Beim Auflösen von Flockungshilfsmitteln ziehen sofort die elektrisch geladenen Gruppen im Makromolekül des Polymers infolge ihrer elektrostatischen Ladung die nächstgelegenen Wassermoleküle an; bei anionischen

Gruppen orientiert sich der Wasserstoff in Richtung Polymermolekül, bei kationischen Gruppen übernimmt dies der Sauerstoff. Um die ionogenen Gruppen herum bauen, über Wasserstoffbrücken gebunden, viele weitere Wasserstoffmoleküle eine große "Hydratkugel" auf, deren Außenzone die gleiche Ladung aufweist wie das Ion, mit dem sie verbunden ist. Die Hydrathülle um die nichtionogene Amidgruppe wird durch Wasserstoffbrückenbildung an den beiden Wasserstoffionen der Amidgruppe aufgebaut. Die nichtionogene Gruppe verhält sich im nachfolgenden Beispiel vorwiegend als Kation. Durch das gleichzeitige Anwachsen dieser Hydrathülle auf seiner ganzen Kettenlänge wird das Flockungshilfsmittel als Polymermolekül entknäuelnd und gestreckt.

Die Oberflächen aller kolloidalen bzw. suspendierten Teilchen in einer Suspension weisen elektrische, meist gleichartige Ladungen auf (wäre dies nicht der Fall, würden die Teilchen durch elektrostatische Anziehung oder Massenanziehung agglomerieren und bereits ohne Einwirkung von Hilfsmitteln ausflocken). Diese Oberflächenaufladung, die bei natürlichen Verunreinigungen fast immer negativ ist, kommt durch unbesetzte Bindungskräfte und adsorbierte Ionen, meist Sauerstoff zustande.

Diese Tatsache verdeutlicht, dass positiv geladene Teilchen an die aktiven Gruppen eines anionaktiven polymeren Flockungshilfsmittels elektrostatisch gebunden werden, negative Teilchen dagegen an die aktiven Gruppen der kationaktiven und nichtionogenen Polymere. Außerdem können aber auch anion-aktive Polymere negative Teilchen binden.

Diese Teilchen enthalten in ihren Hydrathüllen (auch dispergierte Feststoffteilchen haben Hydrathüllen) positive Ionen, angezogen von der negativen Oberflächenladung des Teilchens, die einen Verknüpfungspunkt für die negativen Ionen des Flockungshilfsmittels geben.

Bei der Bentonit-Separationstechnik wird meistens eine Kombination aus anorganischen und organischen Flockungsmitteln (Aufhebung der Abstossmechanismen, Erhöhung der Masse von Feststoffteilchen durch Koppelung mehrerer Einzelteilchen, Beschwerung der Flocken durch spezifisch schwere Metallhydroxyd-Flocken) und

hochmolekularer Polyacrylamide als Flockungshilfsmittel eingesetzt.

#### 4 Hinterfüllmörtel

Der Hinterfüllmörtel wird prinzipiell als Füll- und Stabilisiermedium für den Hohlraum bezeichnet, der durch die Differenz des Schneidraddurchmessers und des Tübbingaußendurchmessers entsteht. In der Regel handelt es sich hierbei um einen Ringraum-Spalt von 100-150mm Breite. Der Hinterfüllmörtel hat die Rolle eines Verbindungsmediums zwischen dem Umgebungsboden und den Tübbing. Richtig eingebrachter Hinterfüllmörtel verhindert eventuell mögliche Bewegungen der Tübbinge, Verschiebungen der Tübbingringe und Setzungen an der Oberfläche.

##### 4.1 Logistische Voraussetzungen

Ein Hinterfüllmörtel sollte prinzipiell gut pumpbar sein und zumindest auf der Strecke zwischen Lagertank und Injektionsort keinerlei Anzeichen von Segregation und/oder Ausbluten zeigen (<1%).

Die Offenhaltezeit des Mörtels sollte mindestens 4 Stunden (zum Teil bis zu 24 Stunden) betragen, um eventuelle Standzeiten der Vortriebsmaschine ausgleichen zu können.

Manchmal ist eine schnelle Erhärtung oder ein schnelles Ansteifen des Mörtels im eingebrachten Zustand notwendig, um Tübbinge sofort zu fixieren oder um Auswascherscheinungen entgegenzuwirken.

##### 4.2 Materialien

Der verwendete Zement sollte der Norm EN 197-1 genügen, die Zuschlagstoffe der Norm EN 12620 und ohne Beimischungen sein, die negative Effekte auf den Mörtel haben könnten. Wasser sollte der Norm EN 1008 genügen und durch vorherige Tests seine Eignung unter Beweis gestellt haben.

Folgende Gruppen von Zusatzmitteln können generell Verwendung finden:

- Verflüssiger
- Verzögerer und Beschleuniger
- Anti-Auswasch-Additive

- Luftporenbildner / Schäume
- Hydratationskontrollierer
- Bentonit / Verdicker / ...

Sonstige verwendbare Zusatzstoffe:

- Flugasche
- SilicaFume
- Nanosilica
- Kalksteinmehl

##### 4.3 Methoden

Generell sind 2 unterschiedliche Methoden zur Ring-spaltverpressung einsetzbar:

- Durch die Tübbinge hindurch
- Über den Schildmantel

Letztere Methode ist vorzuziehen bei der Notwendigkeit einer schnellen und umfassenden Füllung des Ringspalt – was speziell im Lockergestein notwendig ist. Allerdings sind in diesem Fall geeignete Verfahren zur schnellen Reinigung der Verpresssysteme vorzusehen, um einen reibungslosen Vortrieb sicherzustellen.

Prinzipiell sollte darauf geachtet werden, dass die kleinste Passage (Schlauch oder Rohrleitung) immer noch mindestens den 3-fachen Durchmesser des Größtkornes des benutzten Zuschlages aufweisen sollte.

##### 4.4 Unterschiedliche Hinterfüllmörteltypen

Generell können die Hinterfüllmörtel in 3 unterschiedliche Kategorien eingeteilt werden:

- Inert  
Das inerte System beinhaltet keinen Portlandzement, können jedoch Kalk und / oder Flugasche enthalten.
- Halb-inert  
Halb-inerte Systeme basieren im Wesentlichen auf dem interten System mit einem gewissen zusätzlichen Anteil an hydraulisch aktiver Substanz. Wird Portlandzement verwendet, dann in der Regel in einer Größenordnung von  $< 100 \text{ kg/m}^3$ . Dieser Hinterfüllmörtel benötigt generell eine längere Zeit-spanne um zu erhärten.
- Aktiv (hydraulisch abbindend)  
Bei einem hydraulisch aktiven Hinterfüllmörtel fin-

det in der Regel ein Portlandzement mit  $< 300 \text{ kg/m}^3$  Verwendung

Die Auswahl des richtigen Hinterfüllmörtelsystems hängt von den äußeren Rahmenbedingungen wie der Art des Untergrundes, den Anforderungen der Oberflächensetzungen oder der geforderten Wasserundurchlässigkeit ab.

Eine weitere Unterteilung kann in Einzel- oder Mehrkomponentensystemen vorgenommen werden. Bei den Zwei- oder Mehrkomponentensystemen handelt es sich in der Regel um beschleunigte Systeme, die dann eingesetzt werden, wenn die sofortige und komplette Verfüllung des Ringraumes notwendig ist. Als Beschleuniger kommt traditionell Wasserglas zum Einsatz, was jedoch unter Handling- und Umweltaspekten nicht vorteilhaft ist. Neuere Entwicklungen wie alkalifreie Beschleuniger oder spezielle Nanosilika werden aus diesem Grund verstärkt im Hinterfüllmörtel als Beschleuniger eingesetzt.

## 5 Zusammenfassung

Moderne Tunnelvortriebsmaschinen werden nur noch sehr selten ohne die Verwendung von chemischen Additiven eingesetzt. Deren Verwendung ermöglicht sowohl neue Einsatzbereiche, erhöhte Sicherheiten beim Vortrieb als auch eine verbesserte Wirtschaftlichkeit.

### 5.1 Bodenkonditionierung

EPB-TBMs können auch durch eine schwierige und inhomogene Geologie schnell und erfolgreich 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. Bei sachgemäßer Anwendung sollten sich weder während des Vortriebes noch bei der Deponierung negative Einflüsse der Bodenkonditionierungsmittel zeigen – abgesehen natürlich von einer vo-

rübergehenden Erhöhung des TOC-Wertes des abgebauten Bodens.

Ausblick:

Weder die Entwicklung der Tunnelbohrmaschinen an sich noch die der Bodenkonditionierungsmittel befindet sich vor einem absehbaren Ende. Nach den sehr erfolgreichen Entwicklungen bezüglich der Anti-Ton-Additive in den letzten Jahren ist für die kommenden Jahre eine Weiterentwicklung der Konditionierungsmittel insbesondere für Böden mit erhöhter Porosität zu erwarten.

In Zukunft werden auch bei höherem Erddrücken EPB-Projekte realisiert werden, denn Dank effektiver Reduzierung der Drehmomente durch Konditionierungsmittel und technischer Weiterentwicklungen der Maschinen ist die Grenze des technisch Machbaren noch lange nicht erreicht.

### 5.2 Bentonitmodifikation und –Separation

Bentonitschilde sind – bis auf reine Sand- oder Kiesböden – ohne den Einsatz von Flockungs- und Flockungshilfsmitteln bei der Separation nicht einsetzbar.

Auch zur Stabilitätssteigerung der Ortsbrust können in den Fällen, in denen die Funktion der Bentonitsuspension reduziert wird, Langkettenpolymere eingesetzt werden. Eine Verwendung von Anti-Ton-Additiven ist ebenfalls möglich – aber nur dann mit einer ausreichenden Effizienz, wenn die Bentonitsuspension auch vorne am Schneidrad injiziert werden kann.

### 5.3 Hinterfüllmörtel

Auch Hinterfüllmörtel beinhalten in den meisten Fällen chemische Additive. Am häufigsten werden Fließmittel und Verzögerer angewendet, um eine möglichst lange Offenhaltezeit des Mörtels zu erzielen und das Handling zu erleichtern. Weiterhin häufigen Einsatz in den Hinterfüllmörteln finden Anti-Auswasch-Mittel und Beschleuniger.

## 6 Referenzen

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



- [2] 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
- [3] Fernandez 2002, Aviles Sewage Tunnel, a tunnel below sea water level, AFTES 2002 Toulouse, p. 131 ff, Specifique ISBN 951 04 16 2 4
- [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
- [5] 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
- [6] 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
- [7] 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
- [8] 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
- [9] Langmaack 2001, Application of new TBM Additives  
BAUMA 2001, 6<sup>th</sup> int. symposium for tunnel construction Verlag Glückauf GmbH, Essen, 2001, p. 27, ISBN 3 7739 5964 8
- [10] Langmaack 2004, EPB-Vortrieb in inhomogenen Böden: Möglichkeiten neuer Konditionierungsmittel, Tunnel- und Tiefbautagung 2004, Győr, p. 121 ff
- [11] Marchionni et al 2002, Galleria Quattro Venti in Rom  
Tunnel No.8, 2002, p. 8 ff
- [12] Rehm 2004, maschineller Tunnelvortrieb unter sehr schwierigen geologischen Verhältnissen, Tunnel- und Tiefbautagung 2004, Győr, p. 99 ff
- [13] Steiner et al 1994, Face support for a large Mix - Shield in heterogeneous ground condition, Proc. of Tunnelling '94. London : Chapman & Hall
- [14] Thewes 1999, Adhäsion von Tonböden beim Tunnelvortrieb mit Flüssigkeitsschilden, Berichte des Lehr- und Forschungsgebietes Geotechnik, Univ. Wuppertal, Band: 21