

## Zusammenfassung

*Der maschinelle Schildvortrieb mit aktiver Erddruckstützung (EPB-Vortrieb) wurde ursprünglich entwickelt für homogene, schluffige Sande. Durch die Verwendung spezieller Tunnelschäume konnte der Einsatzbereich in der Vergangenheit bereits ausgedehnt werden – jedoch erst die Entwicklung neuer, flüssiger Polymere und Hochleistungsschäume ermöglicht heute den erfolgreichen Einsatz von EPB-Maschinen auch in heterogenen Böden.*

*Die Entwicklung der Konditionierungsmittel - wie auch die der EPB-Technologie - nahm in Japan ihren Ursprung und ist in Europa, hauptsächlich bedingt durch die hier dominierenden heterogenen Böden, wesentlich verfeinert worden: von den Anfängen in Mailand 1994 über Lyon 1997 bis hin zu Barcelona 2004. Durch die Kombination dieser Entwicklungen mit den Fortschritten im Maschinenbau ist es heute mit einer einzigen Vortriebsmaschine möglich, einen Tunnel sowohl im Hartgestein als auch in Tonen oder Sanden aufzufahren. Dies wird erreicht, indem die TBM maschinentechnisch so weit wie möglich auf alle Geologien vorbereitet wird und die Anpassung an die jeweils vorherrschende Geologie durch die Variation der Boden-Konditionierung mit Hilfe verschiedener Schäume & Polymere erfolgt.*

## Zusammenfassung

*Der maschinelle Schildvortrieb mit aktiver Erddruckstützung (EPB-Vortrieb) wurde ursprünglich entwickelt für homogene, schluffige Sande. Durch die Verwendung spezieller Tunnelschäume konnte der Einsatzbereich in der Vergangenheit bereits ausgedehnt werden – jedoch erst die Entwicklung neuer, flüssiger Polymere und Hochleistungsschäume ermöglicht heute den erfolgreichen Einsatz von EPB-Maschinen auch in heterogenen Böden.*

*Die Entwicklung der Konditionierungsmittel - wie auch die der EPB-Technologie - nahm in Japan ihren Ursprung und ist in Europa, hauptsächlich bedingt durch die hier dominierenden heterogenen Böden, wesentlich verfeinert worden: von den Anfängen in Mailand 1994 über Lyon 1997 bis hin zu Barcelona 2004. Durch die Kombination dieser Entwicklungen mit den Fortschritten im Maschinenbau ist es heute mit einer einzigen Vortriebsmaschine möglich, einen Tunnel sowohl im Hartgestein als auch in Tonen oder Sanden aufzufahren. Dies wird erreicht, indem die TBM maschinentechnisch so weit wie möglich auf alle Geologien vorbereitet wird und die Anpassung an die jeweils vorherrschende Geologie durch die Variation der Boden-Konditionierung mit Hilfe verschiedener Schäume & Polymere erfolgt.*

## 1. Vortriebstechnologie

Beim erddruckgestützten, maschinellen Schildvortrieb (**Earth-Pressure-Balance: EPB**) müssen Konditionierungsmittel verwendet werden. Unter Konditionierungsmittel versteht man einen Schaum oder/und ein Polymer, welche durch die Bewegung des Schneidrades und der Rotoren & Statoren in der Abbaukammer der TBM mit dem Boden vermischt werden. Hierdurch wird die Konsistenz und Rheologie des Bodens so verändert, dass die Abbaukammer der TBM komplett gefüllt werden kann und dann der nötige Erddruck homogen aufgebaut wird. Ohne Verwendung von Konditionierungsmitteln ist kein Füllen der Arbeitskammer der TBM und kein homogener Druckaufbau möglich. Dies führt zu instabilen Verhältnissen an der Ortsbrust, folglich zu unkontrolliertem Mehrabbau von Boden und damit zu Setzungen respektive Tagbrüchen.

Der theoretisch notwendige minimale Erddruck (Stützdruck) kann in nicht-kohäsiven oder leicht kohäsiven Böden mit Hilfe eines dreidimensionalen Finite-Elemente-Modells bestimmt werden (siehe Abb. 1).

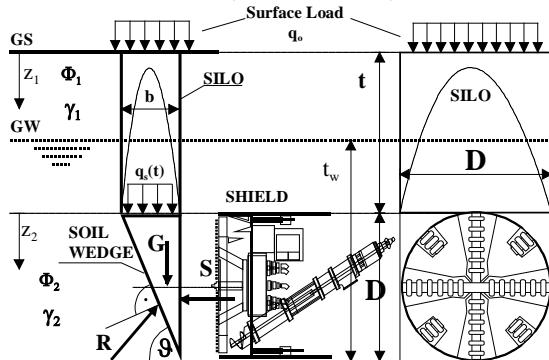


Abb. 1. 3D Finite-Element-Modell für leicht kohäsive Böden.

Die Details der Theorie sind nachzulesen in: Jancsecz & Steiner 1994. Wichtige Elemente sind der Durchmesser der TBM, die Überlagerung, Grundwasserspiegel und Reibungswinkel des Bodens.

## 2. Konditionierungsmittel

Die Art und Aufgabe der Konditionierungsmittel variiert mit der Geologie. Identisch bleibt jedoch immer das Ziel, die Abbaukammer der TBM komplett zu füllen und einen

homogenen Erddruck zu erzielen. Heute gelten auch Tonböden und Böden mit einem (Feinkiesanteil über 30% als für EPB-Maschinen „auffahrbar“. Aber um diese Grenzen zu erreichen, ist die Verwendung von Konditionierungsmitteln aus folgenden Gründen notwendig:

- *poröser, kohäsionsloser Boden*  
Konditionierung notwendig, um ein plastisches Material zu erhalten. Nur so ist ein zuverlässiger Aufbau des Erddrucks in der Arbeitskammer möglich.
- *schluffige Sande*  
Konditionierung zeigt positive Effekte bezüglich der Verringerung der Abrasion und Reduzierung des Drehwiderstandes. Dies ermöglicht in Konsequenz eine höhere Vortriebsgeschwindigkeit der TBM.
- *adhässiver, toniger Boden*  
Konditionierung notwendig, um Verklebungs- und Adhäsionsprobleme zu verringern

Ist der Ton homogen und standfest und die Überdeckung groß genug, so kann auch ein offenes Schild (mit Lufterdruckstützung) eingesetzt werden. Sehr poröse Böden wie kiesige Sande werden heutzutage meist mit Bentonitschilden aufgefahren, aber neue Projekte zeigen, dass auch diese Böden vermehrt effektiv mit EPB-Schilden bewältigt werden können (Lyon, Turin, Barcelona, ...).

### 2.1 Schäume

Um einen Tunnelschaum zu erzeugen, muss eine Schaumlösung zusammen mit Luft durch einen Schaumgenerator gepresst werden. Er sollte in jedem Fall mit Durchfluss- und Druckmessern ausgerüstet sein, da nur so eine sichere und komplette Überwachung der tatsächlich injizierten Schaummenge möglich ist. Dies ist unabdingbar für das Funktionieren des Vortriebes, denn folgende Situationen können sich durch inkorrekte Injektionsparameter einstellen:

*Zuviel Luft injiziert:*

- Boden wird zu trocken, Temperatur und Drehmoment steigen, Vortriebsleistung sinkt
- Entwicklung einer großen Luftblase im oberen Bereich der TBM, dadurch wird kein

gleichmäßiger Bodendruck erzeugt und das Risiko von Ausbläsern erhöht

#### Zuviel Schaum oder Schaumlösung injiziert:

- Boden kann unkontrolliert durch die Extraktionsschnecke getrieben werden
- Handling des Ausbruchsmaterials schwierig, ausgebrachtes Volumen wird größer
- unnötige Steigerung der Kosten pro linear-Meter-Tunnel

#### Zu geringe Konditionierung:

- Boden kann das Schneidrad oder die Abbaukammer verkleben, Vortriebsleistung sinkt
- Druck kann nicht mehr gehalten werden
- Risiko des Wassereinbruches steigt

Um eine Bodenkonditionierung unter definierten Bedingungen zu realisieren, sind die in Abb. 2 dargestellten Parameter definiert worden:

$c_F$  (*Konzentration der Schaumlösung*) legt die Konzentration der Schaumlösung fest  
 $FER$  (*Foam Expansion Ratio, Aufschäumrate*) legt das Verhältnis der Mischung aus Schaumlösung und Luft fest

$FIR$  (*Foam Injection Ratio, Injektionsrate*) legt die Menge Schaum fest, die pro m<sup>3</sup> Boden injiziert wird

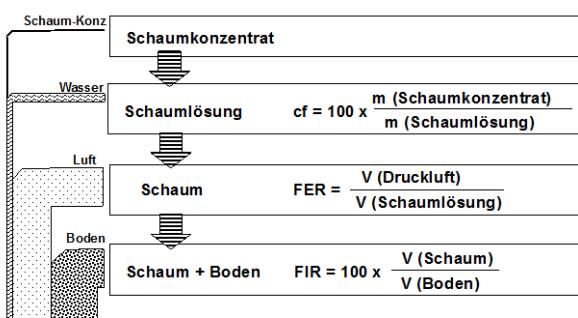


Abb. 2. wichtige Tunnelschaum-Parameter

Jeder Bodentyp, ob fester Ton oder sandiger Kies, benötigt mehr oder weniger einen speziellen Schaumtyp, um optimale Ergebnisse zu erzielen. Der für einen bestimmten Vortrieb in Frage kommende Schaumtyp sollte durch Labortests am Originalboden ermittelt werden.

## 2.2 Polymere

Polymere haben einen sehr weiten Einsatzbereich. Beispiele hierzu sind:

- „Strukturierung“ poröser Böden
- Reduzierung von Verklebungen
- Reduzierung von Adhäsion an Metalloberflä-

chen

- „Austrocknung“ von Böden
- Reduzierung von Segregationserscheinungen in der Arbeitskammer

Als Folge der vielfältigen Einsatzbereiche existiert eine breite Palette an Produkten auf dem Markt, die sich „Polymere“ nennen. Beispiele hierfür sind:

- Polyacrylamide
- Polyacrylate
- CMCs
- Biopolymere

Hierbei handelt es sich um völlig unterschiedliche Produkttypen, die nicht alle dem gleichen Entwicklungsstand entsprechen und auch nicht immer gleich gut für den TBM-Einsatz geeignet sind. Teilweise ist ein Einsatz auch nicht ratsam aufgrund möglicher Umweltschädigungen.

Geeignete Additive sollten mindestens folgende Kriterien erfüllen:

- flüssig (zur einfachen und kontrollierbaren Dosierung)
- keine Verklebung des Schaumgenerators bei kombiniertem Einsatz mit Schaum
- schnelle Wirksamkeitsentfaltung (innerhalb von Minuten, um möglichst schnell auf Veränderungen reagieren zu können)
- ungefährlich für die Umwelt

## 2.3 Anti-Verklebungs-Additive

Anti-Verklebungs-Additive werden bei Tonböden oder tonhaltigen Böden verwendet, um die destruktivierenden bzw. dispergierenden Eigenschaften von Schaum zu unterstützen. Sie können aber auch allein und ohne Schaum verwendet werden. Um Ton zu dispergieren (in eine schluffige Konsistenz zu bringen), müssen diese Additive an der Tonoberfläche adsorbiert werden. Sie müssen eine hohe Ladungsdichte aufweisen, um die Tonpartikel voneinander zu trennen und müssen gleichzeitig eine sterische Barriere aufbauen, um zu verhindern, daß die einzelnen Tonpartikel sich wieder zusammenlagern. Prinzipiell können diese Aufgaben von Tunnelschäumen und Tondispergierern erfüllt werden, die Dispergierer sind jedoch aufgrund ihrer höheren Ladungsdichte effektiver.

Die Entscheidung, für welche Geologie oder Vortriebssituation besser Tunnelschäume oder Dispergierer eingesetzt werden, kann nur durch Spezialisten mittels Laborstudien am Originalboden und Kombination dieses Wissens mit den auftretenden Effekten an der Maschine getroffen werden.

### 3 EPB-Vortriebe in inhomogener Geologie

Die Anwendung der modernen Hochleistungs-Konditionierungsmittel ermöglicht eine signifikante Ausweitung der mit EPB-Schilden sicher aufzufahrenden Geologie. Einige Beispiele sind in der Abb. 3 zusammengefasst.

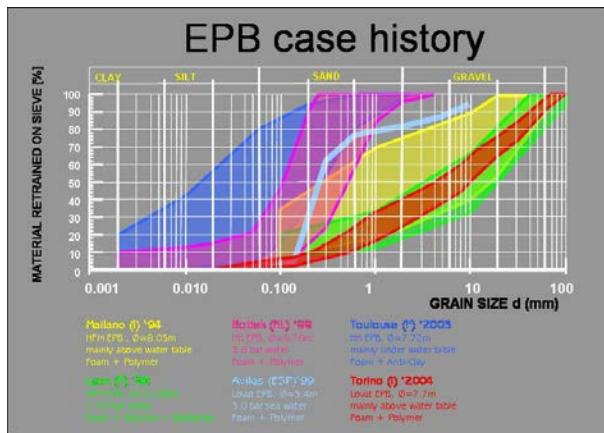


Abb. 3: Sieblinien ausgewählter Vortriebe

Der Vortrieb in Mailand 1994 zeigte damals sehr deutlich die Grenzen des EPB-Tunnelbaus auf. Die Entwicklung der Konditionierungsmittel befand sich noch in den Kinderschuhen. Dies änderte sich bereits deutlich 1996 mit dem Vortrieb BPNL in Lyon, bei dem über einige Jahre hinweg große Schritte hin zu Hochleistungskonditionierungsmitteln geleistet wurden. Weiterhin sind die Vortriebe Botlek (Niederlande) und Aviles (Spanien) als Meilensteine zu nennen. Die Vortriebe in der bisher variabelsten Geologie sind Lyon (1996) und Barcelona (2003). Interessanterweise sind dies auch gleichzeitig die weltgrößten EPB-Maschinen. Das unterstreicht die Bedeutung der Konditionierungsmittel und verdeutlicht die Innovationskapazität der Maschinenbauer. Die Sieblinien der Geologien sind in Abb. 4 gezeigt.

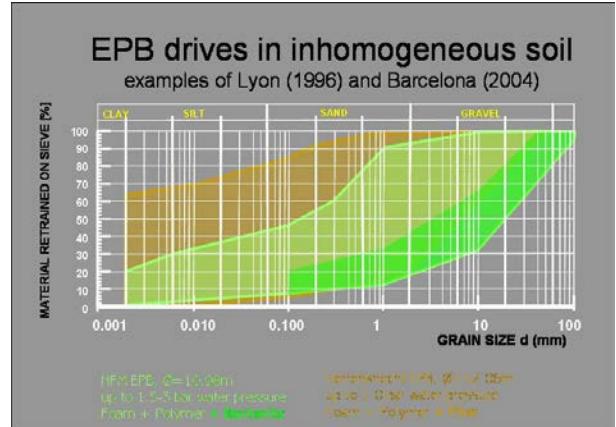


Abb. 4: Sieblinien Lyon & Barcelona

Früher hätten unterschiedliche Maschinen dieses Projekt aufgefahren, heute ist dies Dank der Maschinentechnik und der Konditionierungstechnik nicht mehr notwendig.

#### 3.1 BPNL Lyon (1996-1998)

Auf dieser Baustelle war ein NFM EPB-Schild mit 10,96 m Durchmesser im Einsatz, mit einem Schneidrad wie in Abb. 5 dargestellt.

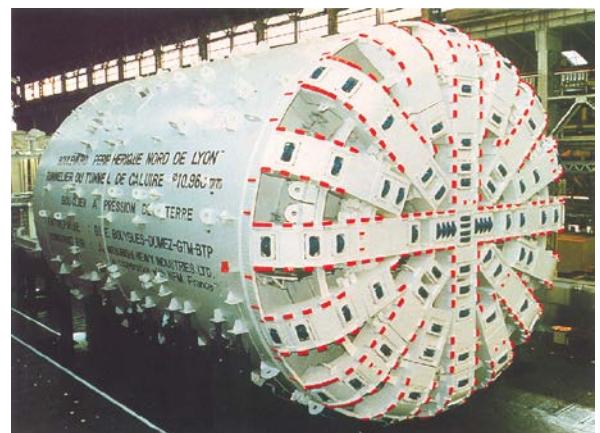


Abb. 5: NFM TBM in Le Creusot

Das Schneidrad wurde während des gesamten Vortriebes nicht umgebaut, lediglich die Konditionierung variiert. Ein grober Überblick über die Geologie ist in Abb. 6 gegeben.



Abb. 6: Geologie BPNL Lyon

Bei diesem Projekt wurden zwei unterschiedliche Schaumvarianten verwendet, züglich einem Polymer für die poröseren Bodenschichten. Ebenfalls hinzu kam eine Bentonitinjektion, falls in den extrem offenen Bodenbereichen der Stützdruck nicht zu halten war.

### 3.2 Barcelona L9 (2003-)

Auf dieser Baustelle ist unter anderem ein Herrenknecht EPB-Schild mit 12,06 m Durchmesser im Einsatz, mit einem Schneidrad wie in Abb. 7 dargestellt:



Abb. 7: Herrenknecht TBM in Schwanaeu

Das Schneidrad wird während des gesamten Vortriebes nicht umgebaut, lediglich die Konditionierung variiert. Ein grober Überblick über die Geologie ist in Abb. 8 gegeben:

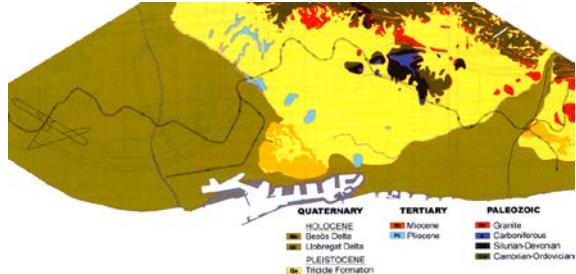


Abb. 8: Geologie Barcelona L9

Zurzeit befindet sich die Maschine in tonigem Boden. Verwendet wird eine Kombination aus Schaum und Anti-Ton-Additiv. Wenn die TBM später Bereiche mit vereinzelt sehr hoher Porosität auffährt, ist die Injektion von polymerstabilisierter Feinkornsuspension vorgesehen. Eine Bentonitinjektion, wie sie bei dem Projekt BPNL Lyon verwendet wurde, wird nicht verwendet, da das Bentonit nicht

vom Bodenaushub getrennt werden kann und somit nicht weiterverwendet werden kann.

### 4. Literatur

Jancsecz, S. and Steiner, W. 1994.  
Face support for a large Mix - Shield in heterogeneous ground condition. Proc. of Tunnelling '94. London : Chapman & Hall

Atkinson, J. H. and Mair, R. J. 1981.  
Soil mechanics aspects of soft ground tunnelling.  
Ground Engineering. Emap Construct Ltd.

Broms, B. and Bennermark, H. 1967.  
Stability of clay at vertical openings.  
Journal of ASCE

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

Rehm, U. 2001:  
Botlekspoortunnel – ein Meilenstein in der Erddrucktechnologie;  
Tunnel Jg.20 (2001), Nr.8, S.28-37

Bentz, Fava, Grandhaie, Langmaack 1997  
Optimierung des Schaumgestützten EPB-Vortriebes,  
BPNL Lyon  
Neue Akzente im unterirdischen Bauen, Berlin 1997  
Alba Verlag Düsseldorf, ISBN 3-87094-636-9

## **EPB-Vortrieb in inhomogenen Böden: Möglichkeiten neuer Konditionierungsmittel**

