

Europa & Asien: Einsatz neuer TBM-Konditionierungsmittel

ZUSAMMENFASSUNG

Schildvortriebe nehmen einen immer höheren Stellenwert im Tunnelbau ein. Um diese jedoch erfolgreich durchzuführen, erfordern sowohl Bentonit- als auch Erddruckschilde den Einsatz von modernen Konditionierungsmitteln. Manchmal wird ein Projekt überhaupt erst durch Ihren Einsatz ermöglicht.

Die Neuentwicklungen der letzten Jahre auf dem Gebiet der Konditionierungsmittel führten jedoch zu einer bisher nicht vorhandenen Produktvielfalt, so daß differenziertere Betrachtungsweisen bezüglich der Vor- und Nachteile von Konditionierungsmitteln nötig sind. Der Komplex ‚Bodenkonditionierung‘ muß also möglichst effektiv mit den bestehenden Komplexen ‚Tunnelbohrmaschine‘ und ‚Geologie‘ kombiniert werden, um einen optimalen Vortrieb zu erreichen.

Vorgestellt werden neue Entwicklungen auf dem Gebiet der Tunnelschäume und –Polymere. Neben den klassischen Konditionierungsaufgaben wie Modifizierung der Bodenrheologie und Erhaltung eines stabilen Druckes in der Abbaukammer spielen auch so gegensätzliche Problemlösungen wie Verringerung der Verklebungsneigung bei bindigen Böden und Kontrolle des Wassereintrages bei porösen Böden eine immer größere Rolle. Ein weiterer Schwerpunkt ist die Darstellung der Wirkungsweisen der Konditionierungsmittel und wie durch Labortests das Praxisverhalten dieser Additive verdeutlicht werden kann.

Die Verwendung moderner Konditionierungsmittel ermöglicht folglich auch das Verschieben des bisher recht ‚klassischen‘ Einsatzbereiches von Erddruckschilden. Die weltweiten Baustellenanwendungen – hier an Beispielen aus Europa und Asien verdeutlicht - unterstreichen, daß sich die Technologie der Konditionierungsmittel erfolgreich in der Praxis bewährt.

1 Konditionierungsmittel - Überblick -

1.1 Sind Konditionierungsmittel notwendig?

Die neuere Literatur [1] zeigt das in Bild 1 dargestellte Diagramm bezüglich der Grenzen des EPB-Vortriebes. Folglich gelten heute Böden mit einem Tongehalt geringer als 10%, einem Schluffanteil von 10-60% und einem (Fein-)Kiesanteil bis 30% als für EPB-Maschinen ‚auffahrbar‘. Aber auch um diese Grenzen zu erreichen, ist die Verwendung von Konditionierungsmitteln notwendig:

- Verringerung der Verklebung und Adhäsion in tonigen Böden
- Plastifizierung von porösen, kohäsionslosen Boden, ...

Auch für die Bereiche der schluffigen Sande zeigt die Konditionierung wichtige Effekte wie Reduzierung des Drehwiderstandes oder des Abriebes und eine daraus resultierende erhöhte Vortriebsleistung.

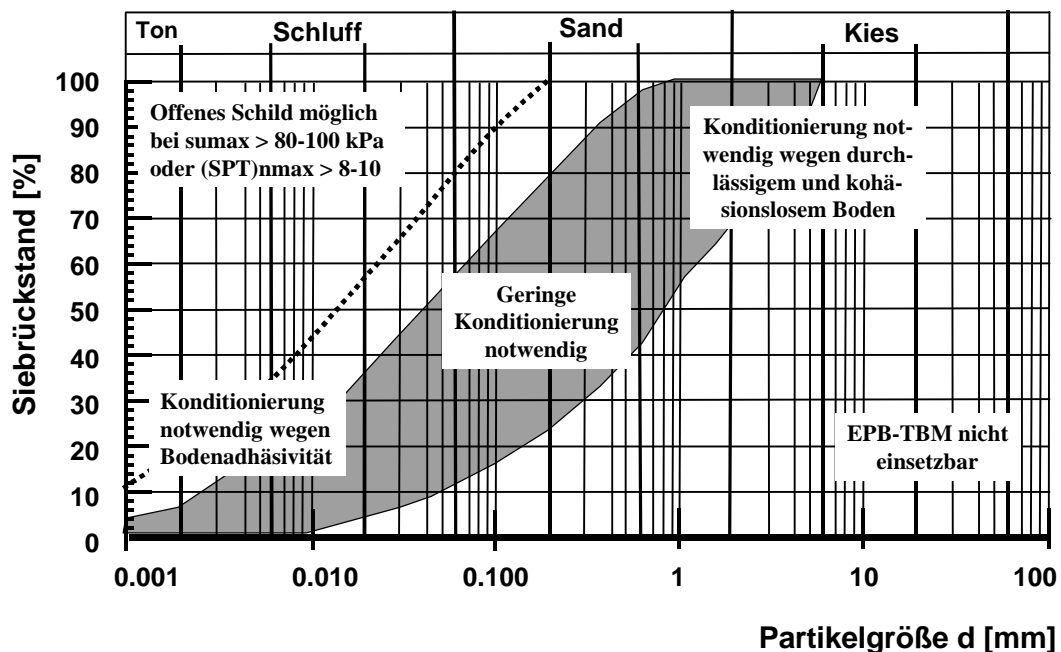


Bild 1. Grenzen des EPB-Vortriebes

1.1.1 Die Verwendung von Additiven bei EPB-Schilden

Bezugnehmend auf Bild 1 ergeben sich 3 Hauptgebiete der Konditionierung:

- *poröser, kohäsionsloser Boden*
Konditionierung notwendig, um ein plastisches Material zu erhalten. Nur so ist ein zuverlässiger Aufbau des Erddruckes 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.
- *Ton*
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 Luftdruckstützung) eingesetzt werden. Sehr poröse Böden wie kiesige Sande werden heutzutage meist mit Bentonitschilden aufgeföhren, aber einige Baustellen zeigen, daß auch diese Böden effektiv mit EPB-Schilden bewältigt werden können.

1.1.2 Die Verwendung von Additiven bei Bentonitschilden

Additive für Bentonitschilde können unter den folgenden Gesichtspunkten von Nutzen sein:

- Salines Grundwasser (Bentonit verliert notwendige Eigenschaften)
- Quelltone oder Tone mit Verklebungsrisiko (durch das Schneidrad hergestellte Tonchips können beispielsweise wieder zusammenkleben und dadurch das Schneidrad selbst verkleben oder die Bentonitzu- und Abfuhr beeinträchtigen)
- Segregationsprobleme in der Abbaukammer
Die hier verwendeten Additive sind in der Regel Polymere oder spezielle Tondispersierger.

1.1.3 Die Verwendung von Additiven bei Hartgesteinsmaschinen

Hier kommen Additive zur Anwendung, die gegen die Problematik Staub und Abrasion eingesetzt werden. Zur Staubreduzierung werden Tunnelschäume eingesetzt, die möglichst 'trocken' sind und eine möglichst große Zahl an Staubpartikeln binden können. Der Tunnelschaum kann dabei auf das Transportband gesprüht werden oder aber direkt am Schneidrad injiziert werden um den Staub erst gar nicht entstehen zu lassen. Dies ist vielleicht die effektivste Einsatzform, aber nicht alle Maschinen sind für diese Injektionsmaßnahmen ausgerüstet.

1.2 Charakterisierung des Tunnelschaumes

Um einen Tunnelschaum zu erzeugen, muß eine Schaumlösung zusammen mit Luft durch einen Schaumgenerator gepumpt werden. Der Generator kann entweder mit Gittern, Membranen oder mit Granulat gefüllt sein. 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:*
 - a. Boden wird zu trocken, Temperatur und Drehmoment steigen, Vortriebsleistung sinkt
 - b. Entwicklung einer großen Luftblase im oberen Bereich der TBM, dadurch wird kein gleichmäßiger Bodenruck erzeugt und das Risiko von Ausbläsern erhöht
- *Zuviel Schaum oder Schaumlösung injiziert:*
 - a. Boden kann unkontrolliert durch die Extraktionsschnecke getrieben werden
 - b. Handling des Ausbruchsmaterials schwierig, ausgebrachtes Volumen wird größer
 - c. unnötige Steigerung der Kosten pro linear Meter Tunnel
- *Zu geringe Konditionierung:*
 - a. Boden kann das Schneidrad oder die Abbaukammer verkleben, Vortriebsleistung sinkt
 - b. Druck kann nicht mehr gehalten werden
 - c. Risiko des Wassereintrittes steigt

Um eine Bodenkonditionierung unter definierten Bedingungen zu realisieren, sind die in Bild 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^3 Boden injiziert wird

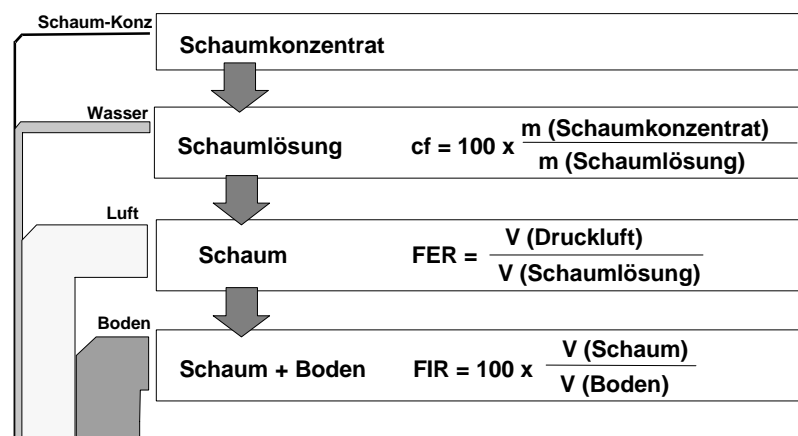


Bild 2. wichtige Parameter beim Einsatz von Tunnelschaum

Das Schaumkonzentrat, aus dem die Schaumlösung hergestellt wird, enthält oberflächenaktive Substanzen, die Tenside. Diese stellen eine Kombination aus hydrophiler Kette und hydrophobem Kopf dar. Bild 3 erläutert die Wirkungsweise der Tenside.

Tunnel - Schaum

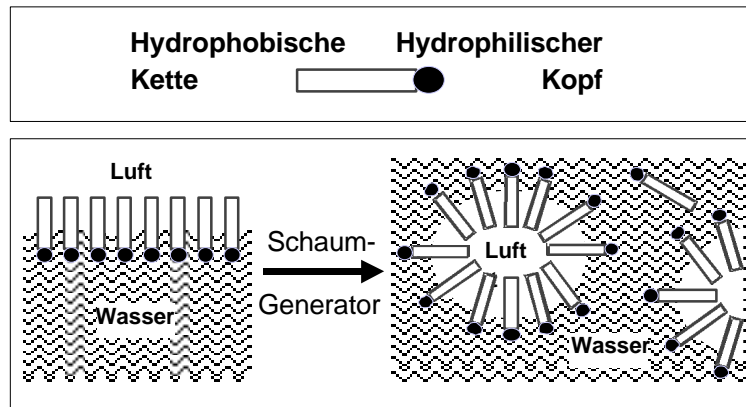


Bild 3: Wirkungsweise der Tenside

Beide Parameter – sowohl die hydrophobe Kette als auch der hydrophile Kopf – können chemisch variiert werden. Unterschiedliche Kettenstrukturen (Länge, Streiche Struktur, ...) und unterschiedliche Kopfcharakter (anionisch, nicht-ionisch, kationisch, amphoter) sind möglich. Diese unterschiedlichen chemischen Strukturen erzeugen unterschiedliche Eigenschaften bei Tunnelschäumen. Dabei ist die Veränderung von folgenden Parametern möglich:

- Oberflächenkräfte
- Dispersionskräfte
- Löslichkeit
- Emulgierbarkeit
- Schäumungsverhalten
- Schaumstabilität, etc.

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.

1.3 Charakterisierung der Polymere

Polymere haben einen sehr weiten Einsatzbereich. Beispiele hierzu sind:

- ‚Strukturierung‘ des Bodens
- Reduzierung von Verklebungen
- Reduzierung von Adhäsion an Metalloberflächen
- ‚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 sind:

- Polyacrylamide (nicht ratsam aufgrund möglicher Umweltschädigungen)
- 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. Geeignete Additive sollten mindestens folgende Kriterien erfüllen:

- Flüssig (zur einfachen und kontrollierbaren Dosierung)
- Keine Verstopfung des Schaumgenerators bei kombiniertem Einsatz mit Schaum
- Schnelle Wirksamkeitsentfaltung (innerhalb von Minuten, um möglichst schnell auf Veränderungen reagieren zu können)
- Ungefährlich für die Umwelt

Eine recht neue und vielversprechende Produktreihe sind die Biopolymere, die zusätzlich Effekte wie Thixotropie oder Pseudoplastizität zeigen. Diese können sowohl in EPB- als auch in Bentonit-TBMs angewendet werden.

1.4 Tondispersierier

Dispersierier können bei Tonböden verwendet werden, um die destrukturierenden 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 Tondispersierern erfüllt werden, die Dispersierier sind jedoch aufgrund ihrer höheren Ladungsdichte effektiver. Bild 4 illustriert dies.

Dispersierier und Tunnelschäume

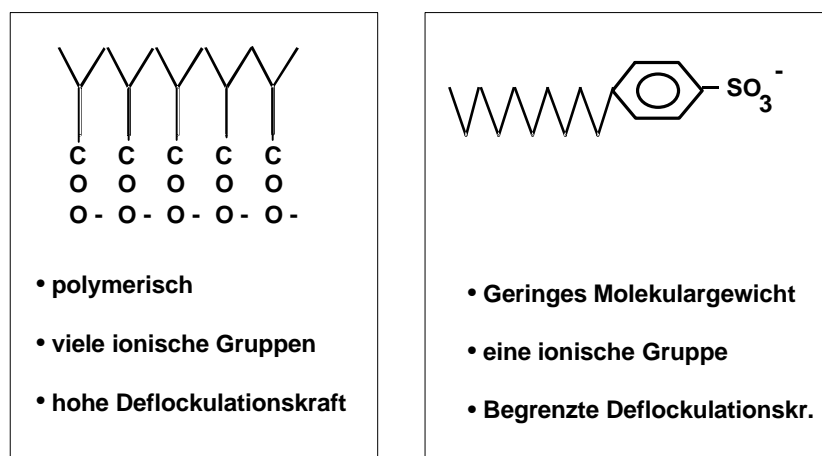


Bild 4: Dispersierier und Tunnelschäume

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

2 Baustellenbeispiele

Nach den vorangegangenen Hintergrundinformationen über die verschiedenen Typen von Additiven und ihrer jeweiligen möglichen Einsatzgebiete, werden in diesem Kapitel einige Praxisbeispiele ihrer erfolgreichen weltweiten Anwendung dargestellt.

2.1 Aviles Collector (Spanien):

Poröser Sand unter 3,0 bar Seewasserdruck

Auf dieser Baustelle ist ein Lovat EPB-Schild mit 3,40 m Durchmesser im Einsatz. Nach Auffahren von tonigem Schluff wechselte die Geologie auf über 1.000m Länge in reinen ‚Strandsand‘ (kiesiger Sand ohne Schluffanteil) unter Seewasserdruck von 3,0 bar. Die Sieblinie ist in Bild 5 dargestellt.

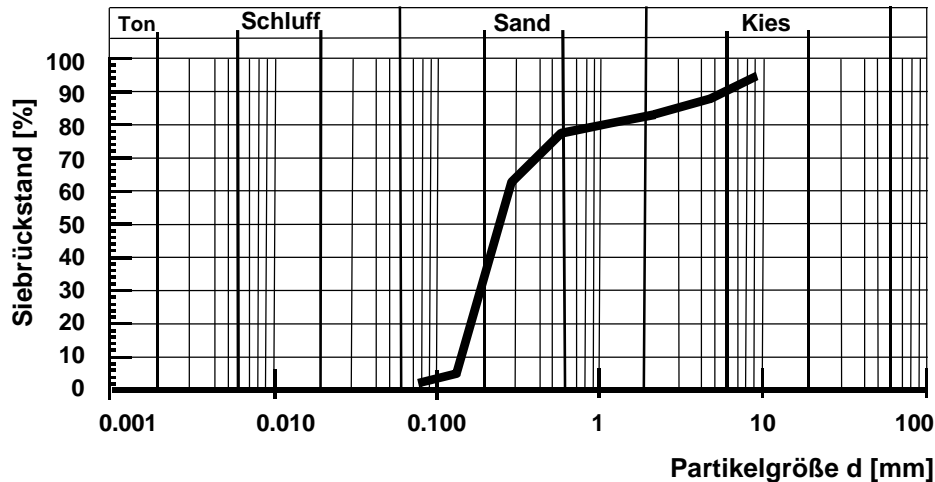


Bild 5: Sieblinie des Aviles-Sandes

Bei dieser Maschine war keine Möglichkeit vorgesehen, zusätzlich Feststoff (Bentonit, ...) in die Arbeitskammer zu injizieren. Eine nachträgliche Installation wäre zu teuer und zeitaufwendig gewesen. Die Alternativlösung war die Verwendung zusätzlicher geeigneter Polymere, um den Boden in eine möglichst plastische Konsistenz zu überführen (um dem Seewasserdruck entgegen wirken zu können) und um den Restwassergehalt des abgebauten Materials zu reduzieren.

2.1.1 Laboruntersuchungen

Im Labor wurden Untersuchungen bezüglich des Segregationsverhaltens des Bodens (Bild 6) und bezüglich des Verhaltens bei Wasserüberschuß (Bild 7) unternommen. Alle Untersuchungen wurden mit original Aviles Sand mit $W_i=7\%$ und $d(\text{org})=1,5$ durchgeführt.

Segregationsverhalten des Aviles Bodens

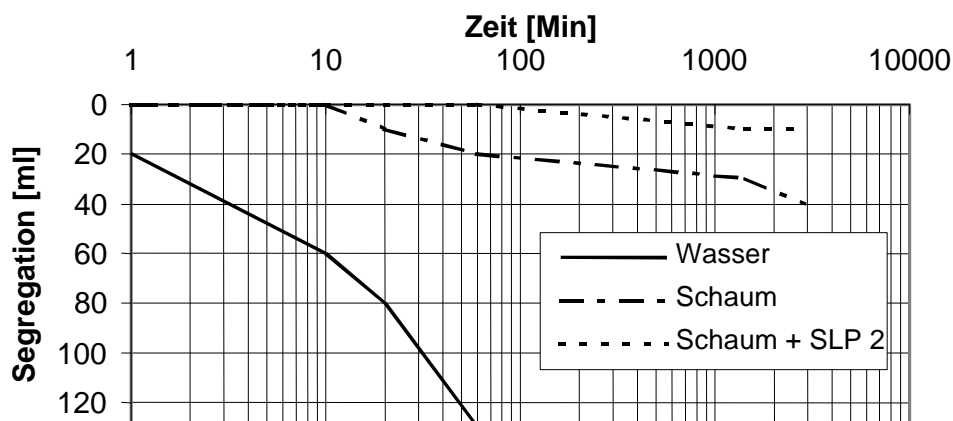


Bild 6: Segregationstests mit Aviles Boden

Bild 6 zeigt drastisch das Problem sandig-kiesiger Böden unter Wasserbeaufschlagung. Durch die sofort einsetzende Segregation ist dieser Boden für eine TBM nicht zu handhaben. Mit Hilfe von stabilen Tunnelschäumen kann die Segregation verringert werden, jedoch sind auch 20% nach

15 Minuten zu viel, um diesen Boden sicher mit einer TBM aufzufahren. Letztendlich wird die Herstellung und Kontrolle der Homogenität und Plastizität dieses Bodens erst durch den Einsatz eines strukturierenden Biopolymers zusätzlich zum Schaum möglich.

Die Penetrometerversuche liefern einen Wert für die Plastizität des Bodens: je höher die Eindringtiefe ist, desto ‚flüssiger‘ ist ein Boden. Beim Aviles-Boden war das Ziel der Konditionierung, auch bei weiterer Zugabe von Flüssigkeit (→ Simulation hoher bzw. steigenden Wassergehalte) die Penetrationstiefe nicht wesentlich ansteigen zu lassen; Der Boden soll eine gewisse Grundkonsistenz beibehalten. Die Testergebnisse sind in Bild 7 dargestellt.

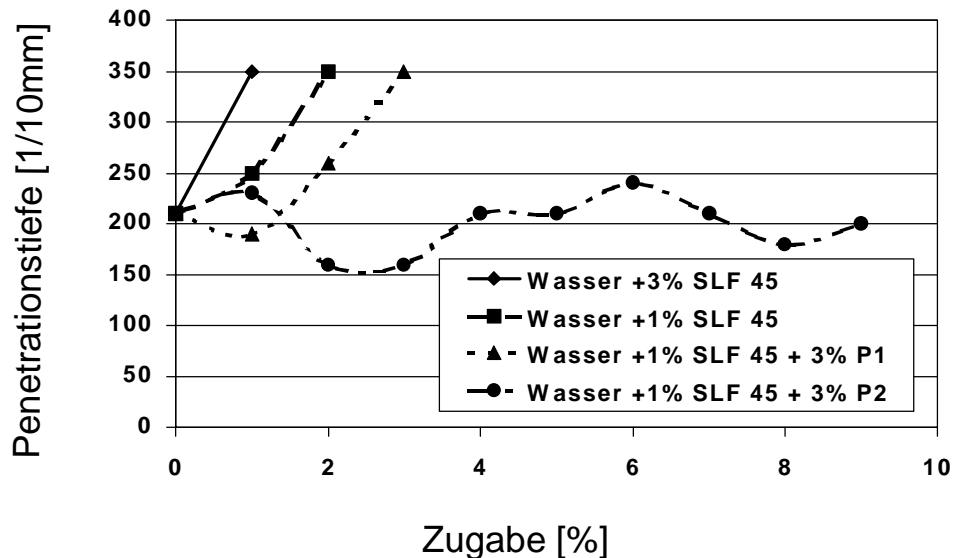


Bild 7: Kegelpenetrometertests mit Aviles Boden + Schaum + Polymer

Die alleinige Konditionierung mit Schaum wird nicht erfolgreich sein, denn der Boden verflüssigt sich unkontrollierbar schnell – auch bei Reduzierung der Schaumkonzentration auf $cf=1\%$. Die Verwendung des Polymers SLF P1 stabilisiert den Boden bis zu einem bestimmten Wassergehalt und verliert dann seine Effizienz. Das Polymer SLF P2 hingegen zeigt keine wesentliche Veränderung der Penetrationstiefe auch bei höheren Wassergehalten. Ermöglicht wird dies durch die strukturierenden Eigenschaften dieses Langkettenpolymers.

2.1.2 *Schlußfolgerung*

Es wurde die Entscheidung getroffen, einen Schaum zusammen mit dem Biopolymer SLF P2 am Schneidrad zu injizieren, um die (wenigen) Bodenfeinpartikel zu strukturieren und das Wasser fern zu halten. Das Resultat war ein stabiler, pastöser und homogener Boden. Aus Sicherheitsaspekten wurde ein zweites Polymer SLF P1 in den unteren Teil der Schnecke injiziert, um das ankommende Material noch weiter ‚auszutrocknen‘.

Die Durchörterung dieser Bodenformation mit der Kombination aus Schaum und zwei Polymeren war sehr erfolgreich und trotz der schwierigen Geologie erreichte die TBM hohe Vortriebsgeschwindigkeiten.

2.2 Hongkong:

Konditionierung von verwittertem Granit

Die schwierigste Bodenformation für die vor Ort befindliche EPB-TBM war verwitterter Granit mit der in Bild 8 dargestellten Sieblinie.

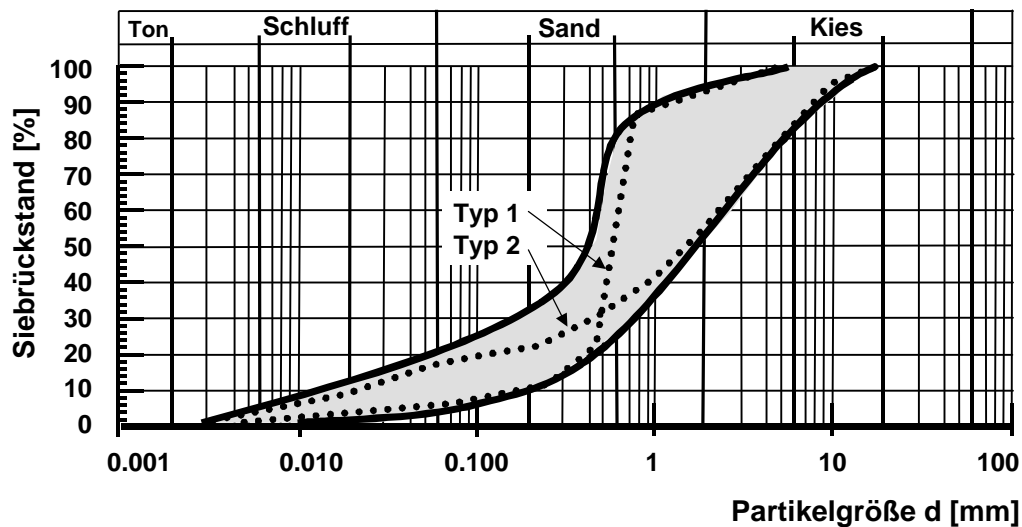


Bild 8: Korngrößenverteilung von verwittertem Granit aus Hongkong

Um die korrekten Konditionierungsmittel und -parameter zur Herstellung eines Filterkuchens zu ermitteln, wurden Permeametertests (wie in Bild 9 verdeutlicht) unternommen. Hierzu wurden Zylinder zunächst mit Kies gefüllt, dann wurde der zu testende Boden hinzugegeben und der Zylinder anschließend komplett mit Wasser gefüllt. Die Tests wurden mit einem Überdruck von 0,4 bar und dem Bodentyp I (geringerer Feinanteil) realisiert.

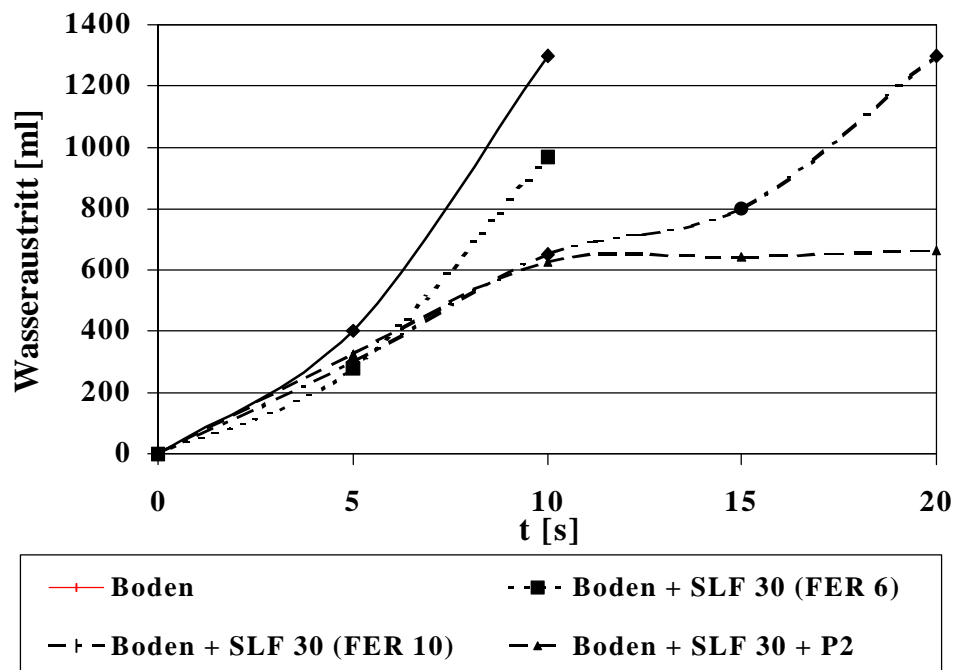


Bild 9: Permeametertests mit $\Delta p = 0,4$ bar und Hongkong-Boden

Die Porosität des unbehandelten (nur Wasser zugegeben) Bodens wurden auf $k = 5 \cdot 10^{-3}$ [m/s] bestimmt. Der Wasseraustritt vergrößert sich mit der Zeit durch Auswaschen der Feinpartikel. Wird der Boden mit Schaum ($cf = 3\%$, $FER = 6$, $FIR = 40$) konditioniert, so verringert sich der Wasseraustritt, eine Filterkuchenentwicklung ist jedoch auch hier nicht möglich. Bei einer Steigerung des FER von 6 auf 10 werden die ersten Indikatoren eines Filterkuchenaufbaus sichtbar, der jedoch nicht stabil genug ist. Erst durch die Konditionierung mit Schaum und zusätzlichem Polymer (MEYCO Fix SLF P2, $cp = 2,5\%$) wird ein stabiler Filterkuchen erreicht, der auch einem $\Delta p = 0,6$ bar standhält.

2.3 Bangkok Metro (Thailand):

Verklebungsprobleme beim Bangkok-Ton

Die EPB-Maschine durchörterte zum teil steifen und adhäsiven Bangkok-Ton. Das Bauunternehmen verwendete zunächst ein japanisches Kurzkettenpolymer, war aber mit dem Kosten-Nutzen-Verhältnis nicht zufrieden.

Die Lösung war eine Tondispersgierung von definierter Intensität, um die unbehandelten Tonchips in einer homogenen und nicht klebenden Bodenpaste einzubetten. Hierzu wurden im Labor ‚Rollversuche‘ (Zylinder gefüllt mit Tonbällen + Sand + Wasser) durchgeführt. Die Ergebnisse sind in Bild 10 dargestellt.

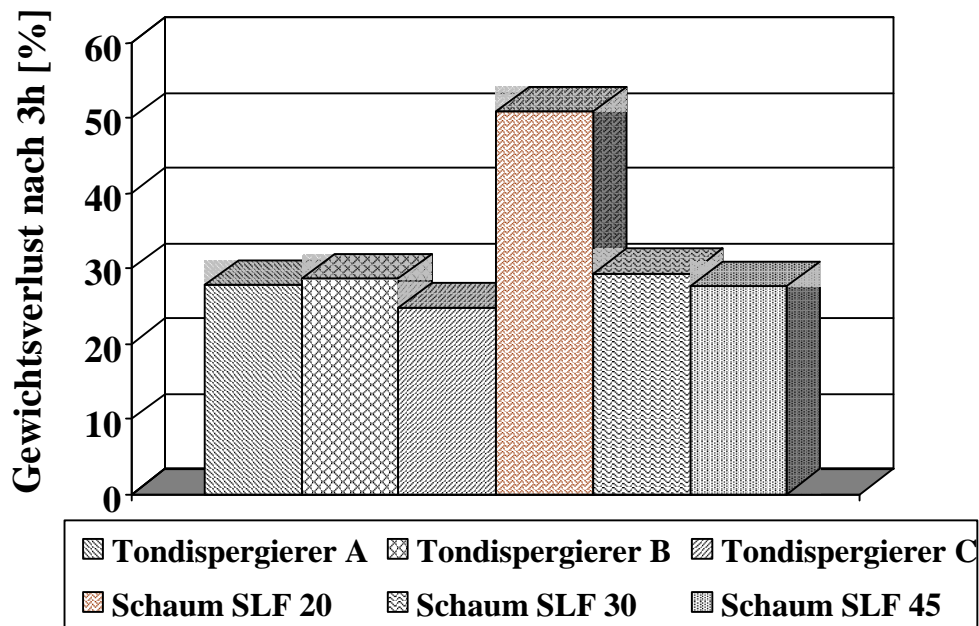


Bild 10: Rollversuche mit Bangkok-Ton

Auf dem ersten Blick sind die Resultate erstaunlich. Die speziell für tondispersgierende (tonzersetzende) Aufgaben entworfenen Additive oder die eher für tonige Böden gedachten Schäume SLF 30 oder 45 erwiesen sich als weniger effektiv als ein für andere Aufgaben gedachter Schaum. Dies verdeutlicht einmal mehr die Komplexität der Interaktionen zwischen Boden und Konditionierungsmitteln.

Die besten Resultate wurden in diesem Fall mit dem Schaum SLF 20 erzielt. Die Baustelle erzielte mit dieser Konditionierung seit Februar 2000 sehr gute Ergebnisse.

2.4 Wesertunnel (Deutschland):

Adhäsion und Verklebung im Lauenburger Ton

Die schwierigste Geologie der aufzufahrenden Strecke dieses Bentonitschildes sind die Zonen mit Lauenburger Ton, der Adhäsions- und Verklebungsprobleme am Schneidrad und in der Abbaukammer hervorruft. Zusätzlich problematisch ist das Vorhandensein salinen Grundwassers, welches die Bentoniteigenschaften reduziert.

Das Ziel der Labortests war, die durch das Schneidrad erzeugten Tonchips vor dem zusammenkleben zu bewahren und Sekundärprobleme wie Segregation zu vermeiden. Der verwendete Laborversuch war wiederum ein Rollversuch. Diesmal wurde der Zylinder mit der original Bentonitsuspension (hergestellt mit Originalwasser) gefüllt und anschließend wurden frisch hergestellte Tonchips zugegeben. Die Resultate sind in Bild 11 verdeutlicht.

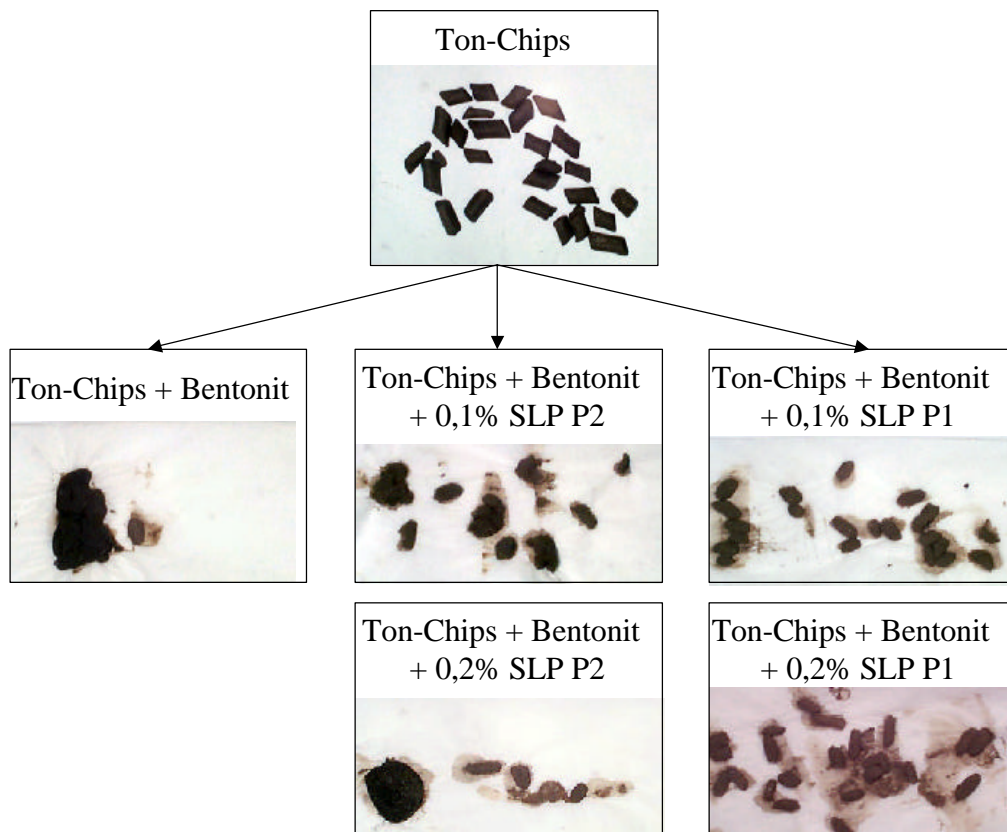


Bild 11: Rolltest mit Lauenburger Ton in Bentonitsuspension

Die Tonchips in der unbehandelten Bentonitsuspension kleben schnell zusammen und ergeben einen zusammenhängenden Klumpen Ton. In der Abbaukammer der TBM resultieren daraus Verklebung des Schneidrades (einhergehend mit geringer Vortriebsleistung), Segregationsprobleme und schließlich Unterbrechung des Bentonitkreislaufes.

Wird die Suspension mit 0,1% Polymer SLF P2 behandelt, so kann die Reagglomeration der Tonchips drastisch verringert werden, um bei $cp=0,2\%$ langsam wieder zuzunehmen.

Wird die Suspension mit 0,1% Polymer SLF P1 behandelt, so kann die Reagglomeration fast ganz verhindert werden, bei $cp=0,2\%$ nehmen die Dispergiereffekte des Polymers jedoch deutlich zu. Dies kann negative Einflüsse auf die Bentonitseparierung haben.

Diese vielversprechenden Resultate müssen noch auf die Baustellenanwendung übertragen werden.

3 Zusammenfassung

Diese Laborresultate kombiniert mit den drei weltweiten Baustellenbeispielen demonstrieren die Effektivität der modernen Konditionierungsmittel für Schildvortriebsmaschinen. Ihre Verwendung ist einer der Schlüssel für einen erfolgreichen und insgesamt ökonomischen Vortrieb.

Hinzu kommt, daß sowohl in tonigen Böden (z.B. London Heathrow) als auch in porösen Böden (z.B. Aviles, DTSS Singapur, ...) die Tendenz zunimmt, EPB Maschinen zu verwenden. Hieraus ergibt sich eine Ausdehnung der EPB-Anwendungsgrenzen, wie sie in Bild 12 dargestellt ist.

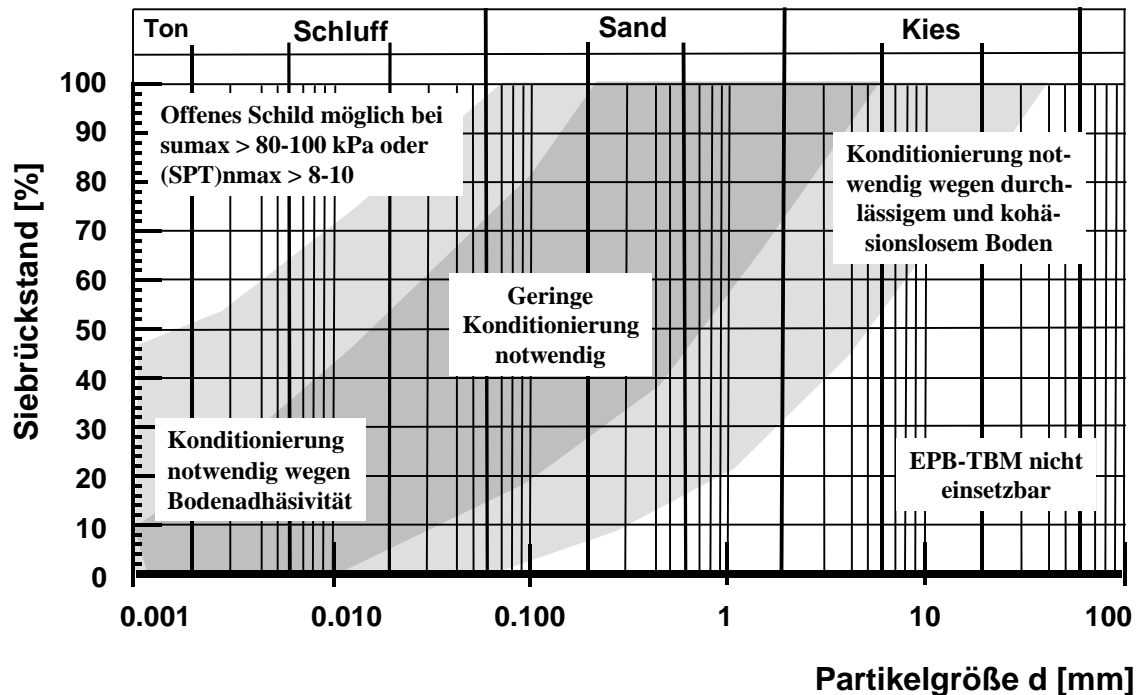


Bild 12: EPB Anwendungsgrenzen

Durch die neuen Generationen von Konditionierungsmitteln, ihrer einfachen Handhabung auf der Baustelle und Dank der großen Einflüsse auf das Verhalten des anstehenden Bodens, werden EPB-Maschinen die Bentonitschilde sicher in einigen Bereichen verdrängen.

4 Danksagungen

Der Autor möchte folgenden Personen für ihre exzellente Arbeit bezüglich der dargestellten Projekte danken:

- Peter Ellenberger, MBT International, Zürich
- Dr. Mustapha Sari, Rhodia SA., Paris

5 Literaturverweise

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