

Optimierung des schaumgestützten EPB-Vortriebes Boulevard Périphérique Nord de Lyon (BPNL)

Vorwort in eigener Sache:

Zum Zeitpunkt dieses Vortrages war der Autor noch Angestellter bei der Firma Rhône-Poulenc S.A.

Seit Ende 1999 ist der Bereich Konditionierungsmittel für den Tunnelbau in der MBT International Underground Construction Group (Degussa Construction Chemicals) aufgegangen.

Da die erwähnten Produkte heute nicht mehr hergestellt werden, sind sie hier den aktuellen Entsprechungen gegenübergestellt:

Produktbezeichnung in der Veröffentlichung	heutige Produktbezeichnung
RHOCA Foam AB 20	MEYCO Fix SLF 20
RHOCA Foam AN 45	MEYCO Fix SLF 30
RHOCA Flow T3L	MEYCO Fix SLF P2

Frankfurt, im November 2001

Lars Langmaack

Optimierung des schaumgestützten EPB-Vortriebes Boulevard Périphérique Nord de Lyon (BPNL)

Dr. Eric BENTZ, Raymond FAVA - *Bouygues S.A. (Lyon, F)*

Dr. Fabrice GRANDHAIE, Robert PERUCHON - *Rhône-Poulenc S.A. (Paris, F)*

Lars LANGMAACK - *Rhône-Poulenc GmbH (Frankfurt, D)*

1 Einleitung

Im Rahmen des 'Projektes Boulevard Périphérique Nord de Lyon' (Stadtautobahn) wurde die Nordröhre des Tunnels Caluire mit einem Erddruckschild aufgefahren. Um den Vortrieb des Schildes im geschlossenen System zu ermöglichen, wurde auf 62% der Tunnellänge (ca. 2000 m) eine Schaumstützung der Firma Rhône-Poulenc verwendet. Nach Fertigstellung der Nordröhre und nach erfolgter Wendung des Schildes im Zielschacht wird zur Zeit die Südröhre aufgefahren.

Hervorgerufen durch eine sehr variable Geologie ergaben sich bei der Durchörterung der Nordröhre mehrere Situationen, in denen der Schaum und dessen Anwendung an die aktuelle Gegebenheit angepaßt und optimiert werden mußten. Diese Vielfalt an Vortriebssituationen hat dazu geführt, daß neue Produktformulierungen und Labortests entwickelt werden mußten, um eine Optimierung der Schaum- und Injektionsparameter realisieren zu können (Dosierung, Einsatzmenge, Expansionsgrad, Zusammensetzung, etc.).

In Laborstudien wurde eine Simulation der Vortriebsbedingungen vorgenommen, deren Ergebnisse eine optimierte Einstellung der Schaumparameter auf der Schildvortriebsmaschine und somit einen entscheidenden Fortschritt des Vortriebes ermöglicht haben.

Im Rahmen des BPNL befaßten sich diese Studien vor allem mit der Stabilität des Schaumes und dem Verflüssigungseffekt der Schaummittel. Ebenfalls untersucht wurde der Einfluß der Schaumzusammensetzung und der Injektionsparameter auf die Ortsbruststützung und den Schildvortrieb.

2 Charakterisierung des Bauvorhabens

Der Tunnel von 3.252 m Länge wurde durch eine sehr variable Geologie vorgetrieben.

Der Tunneldurchmesser beträgt 11,02 m, der Ausbruchsquerschnitt liegt somit bei 95 m².

2.1 Durchörterte Böden

- 1.250 m kristallin-blättriges Gestein mit kristallinen Adern, Vortrieb im 'open mode'.
- 450 m Übergangszone mit abwechselnd Alluvionen und kristallinen Gesteinsformationen, 'mixed face', Vortrieb im geschlossenen System.
- 1.552 m Sedimentgestein 'full face', Vortrieb im geschlossenen System.

2.2 Schildvortriebsmaschine

Gesamtlänge (ohne Nachläufer).....	13,55 m
Schildmantellänge.....	12,25 m
Gewicht.....	1.700 t
Leistung.....	3.515 kW
Anzahl Werkzeuge.....	256
Anzahl Disken.....	82
Rotationsgeschwindigkeit.....	1,5 U/Min
Anpressdruck.....	10.200 t

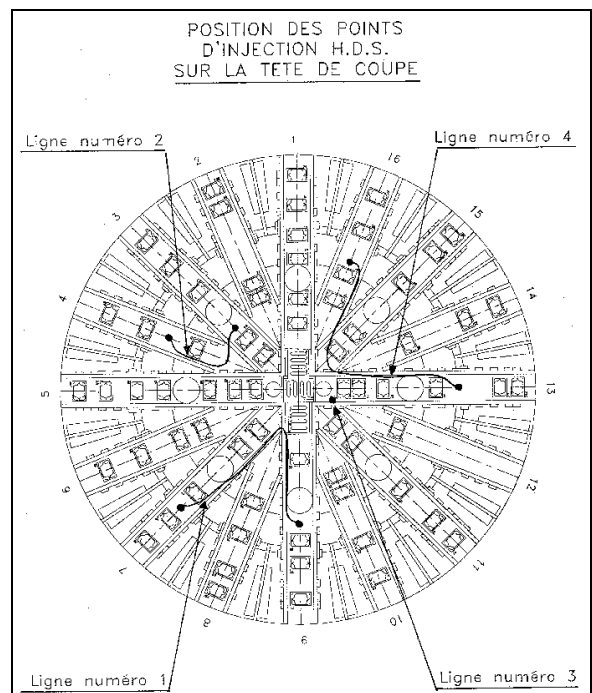


Bild 1: Schneidradgeometrie TBM Caluire

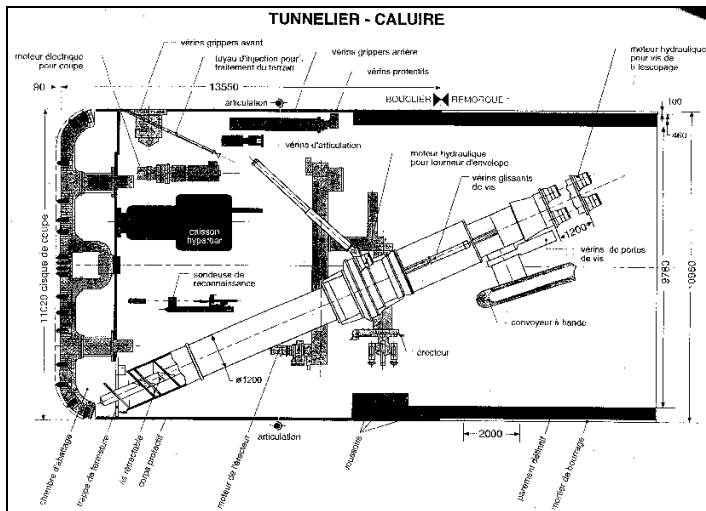


Bild 2: Längsschnitt TBM Caluire

2.3 Schaumherstellung

In der ersten Phase der Schaumherstellung wird in einem 5-m³-Mischbehälter maschinell eine Schaumlösung bereitgestellt. Zuerst wird der Behälter mit Wasser gefüllt, dann entsprechend der zuvor im Labor ermittelten Dosierung das Schaumkonzentrat und anschließend das Polymer hinzugegeben. Zum Erreichen der exakten Dosierungen wird in Lyon die Pumpleistung der Zusatzmittelpumpen über den Wassermassenstrom geregelt.

In der zweiten Phase wird die Schaumlösung mit Hilfe von 5 separaten Pumpen mit einer maximalen Gesamtleistung von 1 m³/Min zu den 5 Schaumgeneratoren gepumpt. Am Eingang dieser Zylinder werden Schaumlösung und Luft simultan eingedüst, wobei die Menge an Schaumlösung hier die Menge der Luftzugabe bestimmt. Der so hergestellte Schaum wird direkt zu den gewünschten Injektionspunkten auf dem Schneidrad und in der Abbaukammer befördert. Insgesamt befinden sich auf dem Schneidrad 4 Injektionslinien (7 Injektionspunkte), in der Abbaukammer 2 Injektionspunkte und in der Austragsschnecke ebenfalls 2 Injektionspunkte. Wahlweise kann auch Bentonit injiziert werden.

3 Anwendung des Schaumes

Der verwendete Schaum ist ein 'modularer Schaum', der sich aus einem Schaummittel und einem Polymer zusammensetzt. Die sich ergänzenden Aufgaben dieser beiden Additive ermöglichen eine einfache und wirksame Bewältigung eines Großteils der unterschiedlichen Anforderungen an den maschinellen Schildvortrieb.

3.1 Schaummittel (Tenside)

Unter Berücksichtigung der vielfältigen Eigenschaften jedes einzelnen Schaummittels (Modifikation der Oberflächen- und Grenzflächenspannung, Benetzungskraft, Schäumungs-

vermögen, Dispergierkraft, Emulgiervermögen, etc.) ist es wichtig, die verwendeten Schaummittel genau zu kennen. Nur so sind die verschiedenen anwendungstechnischen Aspekte zu beherrschen. Zur Bewältigung der geologischen und technischen Vielfalt werden bei Rhône-Poulenc zur Zeit drei verschiedene Schaummittel eingesetzt, die darüber hinaus eine hohe biologische Abbaubarkeit besitzen.

3.2 Polymer

Es handelt sich um ein durch Fermentation hergestelltes, wasserlösliches Biopolymer. Es ist biologisch abbaubar und mit verschiedensten Schaummitteln kompatibel.

Das Polymer ruft aufgrund seiner Molekülstruktur unterschiedliche Effekte hervor, wie beispielsweise Rheologieveränderung, Filtratreduzierung, Verringerung der Verklebungerscheinungen, etc. Bei Dosierungen < 1% ermöglicht es die Herstellung eines homogenen Schaumes.

Das Biopolymer wurde auf den vorgetriebenen 2000 m größtenteils in Verbindung mit Schaum verwendet, ohne die Schaumgeneratoren zu verstopfen.

4 Frakturierter Gneiss unter anstehendem Wasser

Aufgrund von klüftigem Gneiss kam es zu bedeutenden Wassereintrüben, die teilweise mehr als 100 m³/h erreichten. Aus diesem Grund war die Suche nach einer Schaumrezeptur mit hohem Auswaschungswiderstand notwendig, um während des Vortriebs das Eindringen von Wasser in die Abbaukammer zu verhindern.

Weiteres Ziel war die optimale Einstellung der Rheologie des abgebauten Materials, so daß die anschließende Abraumförderung mit Hilfe von Fließbändern ohne Überlaufen möglich ist.

4.1 Geotechnische Eigenschaften

Druckfestigkeit	25 - 100 MPa
Zugfestigkeit (brasil. Versuch)	3 - 9 MPa
Young Modul	5.000 - 30.000 MPa
Trockendichte γ_d	26,5 kN/m ³

4.2 Laborversuche

Die Laborversuche dienten zur Definition einer Minimalrezeptur, um ein zu schnelles Auswaschen des Schaumes bei Wasserkontakt zu verhindern. Hierzu wurde die Stabilität des mit Wasser verdünnten Schaumes untersucht. Die Mischungen wurden realisiert aus jeweils 50 Vol% Wasser und Schaum (Bild 3).

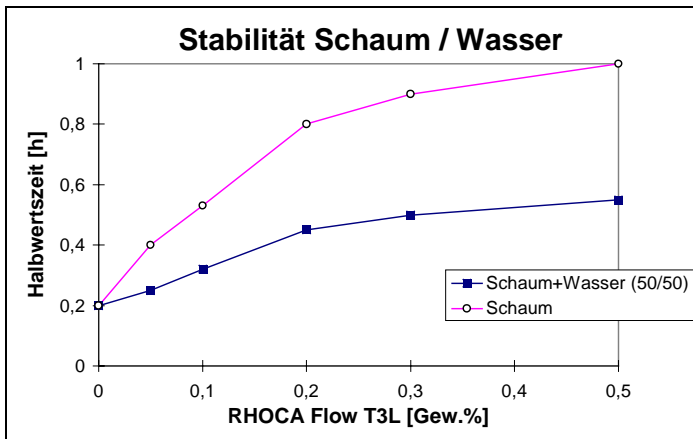


Bild 3: Stabilität von Schaum und Schaum-Wasser-Mischungen

Um eine Stabilität (Halbwertszeit) des mit Wasser verdünnten Schaumes > 0,4 Stunden zu erhalten, ist es notwendig, das Biopolymer RHOCA Flow T3L in einer Dosierung von > 0,2 Gew.% der Schaumlösung zuzusetzen.

4.3 Baustellenanwendung

Auf 100 m Vortrieb wurde die Schaumkonditionierung unter folgenden Bedingungen ausgeführt:

- RHOCA Foam AB 20 2 - 4%
- RHOCA Flow T3L..... 0,2 - 0,5%
- Expansionszahl 10 - 16
- Zugabe Schaumlösung 100 l/Min
- Mittlere Vortriebsgeschwindigkeit..... 17 mm/Min
- Hydrostatischer Druck (Kalotte) 1,5 - 2 bar

Mit dieser Konditionierung und einer zu 60% gefüllten Abbaukammer war es möglich, Ausbruchmaterial mit einem Wassergehalt von 8 - 10% zu erhalten. Damit wurde eine angemessene Stabilität des abgebauten Bodens erreicht, um den Abtransport mittels Förderband zu gewährleisten.

5 Grober Kies unter anstehendem Wasser

Bei einem hydrostatischen Druck zwischen 1,5 und 2 bar in der Kalotte (2,5 - 3 bar am Tunnelboden) und einem sehr permeablen Boden bei gleichzeitig hoher Wasserzufuhr ist es absolut notwendig, die Rheologie des Abraumes so zu kontrollieren, daß in der Austragsschnecke ein Druckgradient erzeugt werden kann.

Das angestrebte Ziel war eine möglichst plastische Abraumrheologie, die mit einem Permeabilitätskoeffizienten von $K < 1 \cdot 10^{-5}$ m/s sowohl zum Druckaufbau herangezogen werden kann als auch Bestand gegen das anstehende Wasser hat.

5.1 Geotechnische Eigenschaften

Der Vortrieb erfolgte in 'mixed-face'-Abschnitten von sandigem und grobem Kies, dessen Permeabilität zwischen 10^{-2} m/s und 10^{-4} m/s variierte.

Die durchschnittliche Korngrößenverteilung des Austrags betrug: $0,5 \text{ mm} < d_{10}$ und $10 \text{ mm} < d_{60} < 23 \text{ mm}$. (s. Bild 3).

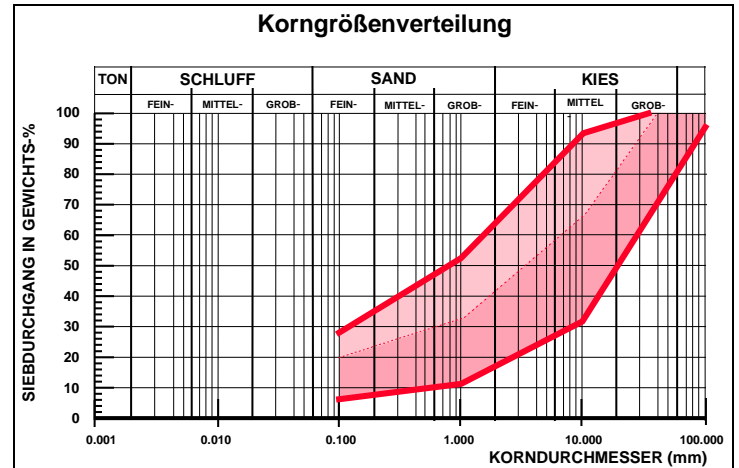


Bild 4: Korngrößenverteilung des Kiesel unter anstehendem Wasser

5.2 Versuchsbedingungen

Um die besten Bedingungen zur Erzielung des gewünschten Erfolges zu ermitteln, wurde die Permeabilität verschiedener nachgestellter Mischungen aus abgebautem Boden und Schaum / Polymer mittels eines 'Permeameter-Experimentes' gemessen (Bild 4). Verwirklicht werden sollte eine Permeabilität des Abraumes von $K < 10^{-5}$ m/s.

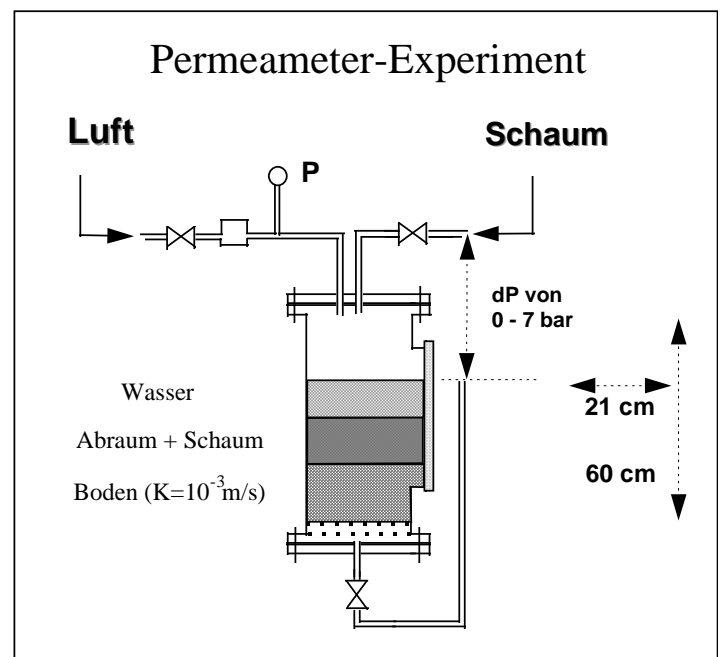


Bild 5: Permeameter

Der verwendete Schaum kann prinzipiell mit Polymer versetzt werden, um die Abraum-Rheologie zusätzlich zu modi-

fizieren. Die Feinanteile des Bodens werden strukturiert und so ist eine umfassende Rheologieänderung möglich.

Bei Alluvion-Böden mit nur geringem bis nicht vorhandenem Feinkornanteil (Permeabilität $K > 10^{-2}$ m/s) erscheint es notwendig, das bestehende Korngerüst durch Zugabe von Feinanteilen (Bentonit, Illite, etc.) zu ergänzen. Die Verwendung eines Schaumes, der Polymer enthält, erlaubt eine Strukturierung dieser zugegebenen Feinanteile. Die Folge ist eine Plastifizierung des Abraumes, so daß beste Bedingungen zur Filterkuchenbildung bestehen und die Abraum-Rheologie verbessert wird. Die mögliche Migration der zugesetzten Feinanteile aus der Abbaukammer hinaus in den Boden wird somit ebenfalls limitiert.

Durch den Zusatz von Schaum (Expansionszahl: 8; Schaumlösung: 2% + 0,05% Polymer) kombiniert mit 100 l Bentonit-Slurry (7%ig) pro m³ abgebautem Boden wurde es möglich, mit einem anstehenden Boden der Permeabilität $K = 2,7 \cdot 10^{-3}$ m/s eine Abraumpermeabilität von $K = 4,5 \cdot 10^{-5}$ m/s zu erreichen.

Bilanz:

Die Zugabe von Feinkorn modifiziert die Korngrößenverteilung des Abraumes und verringert so dessen Permeabilität. Das Polymer verhindert durch die Strukturierung der zugesetzten wie bestehenden Feinanteile deren Auswaschen. In diesem Zusammenhang entsteht eine pastöse Masse, deren hohe Viskosität die nötige Homogenität des Abraums ermöglicht.

5.3 Auswirkungen auf den Vortrieb

Die Verwendung von kombinierten Schaum / Polymer-Rezepturen führt zu einem sichtbar homogenen Abraum, sowohl am Ausgang der Extraktionsschnecke als auch auf dem Förderband. Die aufgrund der Laborversuche erwarteten Effekte haben sich während des TBM-Vortriebs bestätigt. Auf einer Länge von 20 m Vortrieb wurde die Anwendung unter folgenden Bedingungen ausgeführt:

- RHOCA Foam AB 20 3 %
- RHOCA Flow T3L..... 0,2 - 0,5 %
- Expansionszahl 10
- Zugabe Schaumlösung 120 - 200 l/Min
- Zugabe Bentonit (7%ig)..... 90 - 160 l/Min
- Mittlere Vortriebsgeschwindigkeit..... 19 mm/Min
- Druck Abbaukammer 2 bar

Unter diesen Bedingungen war es möglich, einen Abraum mit einem Wassergehalt von 8-10% zu erhalten. Dies ergab eine angemessene Rheologie und eine Permeabilitäts-einstellung, die die gewünschte Ausbildung eines Druck-

gradienten in der Extraktionsschnecke ermöglichte. Somit konnte mit offener Austragsklappe ohne Druckverlust in der Abbaukammer gearbeitet werden.

6 Einstellung der Schaumstabilität

Ziel: Herstellung eines Tensids mit variierbarer Halbwertszeit zur Behandlung des ausgetragenen Bodens entsprechend den folgenden Anforderungen:

Der Schaum muß stabil sein, um die Homogenität des Abraums in der Abbaukammer des Schildes zu gewährleisten. Nach dem Austrag des Bodens muß der Schaum sich jedoch schnell zersetzen, um die Separation des überschüssigen Wassers zu ermöglichen, bevor der Abraum durch Lastwagen abtransportiert wird.

6.1 Einstellbare Schaumstabilität

Mit Hilfe der Tenside RHOCA Foam AN 45, AB 20 und AMP 10 wurde über einen Versuchsschaumgenerator Schaum hergestellt. Die mit diesen drei Produkten hergestellten Schäume weisen unterschiedlich große Luftblasen auf, was sich auf die Stabilität des Schaumes auswirkt. Für eine Expansionszahl von 10 und den im Forschungszentrum Auber-villiers verwendeten Schaumgenerator wurde folgender mittlerer Blasendurchmesser ermittelt:

- 1 - 2 mm für RHOCA Foam AB 20
- 0,5 - 1 mm für RHOCA Foam AN 45
- < 0,5 mm für RHOCA Foam AMP 10

Die Größe der Blasen ist insgesamt von der Dosierung des Schaummittels, dessen chemischen Eigenschaften und von der Technologie des verwendeten Schaumgenerators abhängig. So kann für die gleiche Zusammensetzung der Schaumlösung (2% RHOCA Foam AB 20) mit einem klassischen Generator die Blasengröße einen durchschnittlichen Durchmesser von einigen Millimetern erreichen, während man mit einem Venturigenerator mittlere Durchmesser in der Größenordnung von 100 µm erzielen kann.

Es wurde experimentell versucht, die Stabilität des Schaumes sowohl allein als auch in Verbindung mit Boden einzuschätzen. Dadurch kann die Dosierung des Schaumes festgelegt werden, die zur optimalen Schaumstabilität der jeweiligen Anwendung führt.

Die Fachliteratur zeigt, daß sich die Stabilität des Schaumes erhöht, wenn man mineralische Feinstpartikel hinzufügt. Unter diesen Bedingungen ist es wichtig, das Verhalten des Gemisches Boden-Schaum zu kennen und zu beherrschen. Erfahrungsgemäß ist es ab einem gewissen Porenvolumen

möglich, aufgelockerten Boden (Mischung Boden / Schaum) als Schaum zu betrachten und seine Stabilität zu messen.

Es ist eine Testreihe mit 2 verschiedenen Bodentypen durchgeführt worden, um im Hinblick auf die jeweilige Bodenart die Stabilitätsbedingungen des Schaum/Boden-Gemischs besser bestimmen zu können. Der Boden wird in einen Mischer gegeben und die zur Erzielung des gewünschten Wassergehaltes notwendige Wassermenge zugesetzt. Anschließend wird in den Mischer eine definierte, separat hergestellte Schaummengenge gegeben. Die zugegebene Schaummengenge sollte eine Verringerung der Dichte des Bodengemischs auf $\rho < 1,2 \text{ g/cm}^3$ ermöglichen, um eine gute Messgenauigkeit bei den Versuchen zu erreichen.

Zur Bestimmung der Schaumstabilität wird die Messung der Halbwertszeit unter definierten Bedingungen herangezogen. Die Halbwertszeit entspricht der notwendigen Zeit, um von einem Schaumvolumen V_1 zu einem Schaumvolumen $V_2 = \frac{1}{2} V_1$ zu gelangen. Experimentell wurde die Halbwertszeit an einem Initialvolumen von 2 Litern Schaum gemessen. Der untersuchte Schaum wurde jeweils mit einem Tensidgehalt von 2% hergestellt.

Die Stabilität des Gemischs Schaum/Boden wurde mit Limon-Boden (0-300 μm) getestet. Hierbei handelt es sich um eine Mischung aus feinem Quarzsand und tonigen Feinstpartikeln. Die Korngrößenverteilung stellt sich wie folgt dar:
 $d_{30} = 0,005 \text{ mm}$; $d_{60} = 0,022 \text{ mm}$; $d_{100} = 0,3 \text{ mm}$

Die in dem folgenden Diagramm dargestellten Kurven beruhen auf Messungen der Halbwertszeit von verschiedenen Schäumen in Funktion des Expansionsgrades und des verwendeten Schaummittels (Bild 5) und der entsprechenden Stabilität des Boden / Schaum- Gemischs (Bild 6).

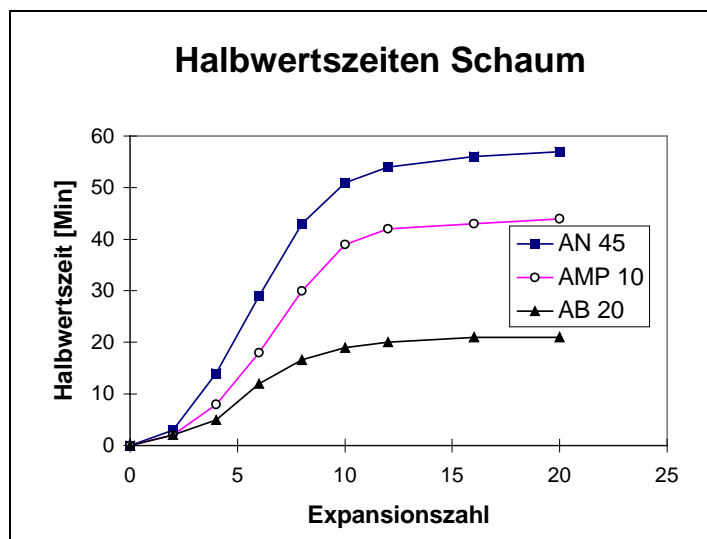


Bild 6: Halbwertszeit Schaum

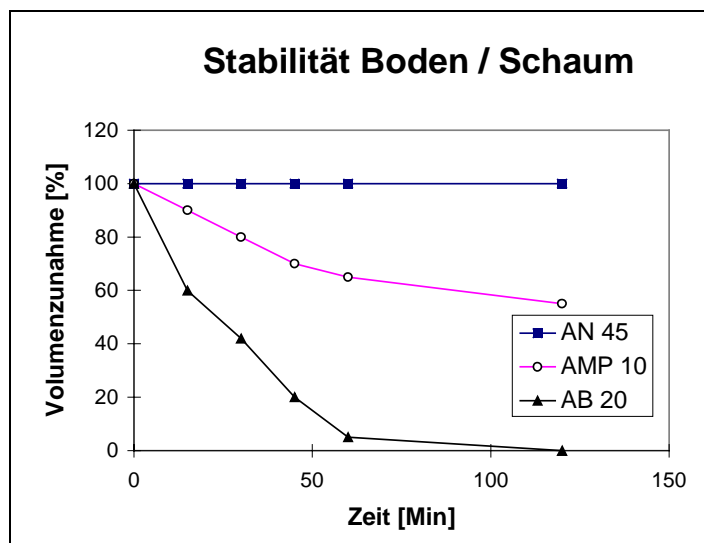


Bild 7: Stabilität Boden + Schaum

AB 20 \equiv RHOCA Foam AB 20;

AN 45 \equiv RHOCA Foam AN 45;

AMP10 \equiv RHOCA Foam AMP10;

Die Volumenzunahme entspricht hier dem zugegebenen Schaumvolumen

Es ist feststellbar, daß die mineralogische Beschaffenheit und die Größe der Feinanteile einen großen Einfluß auf die Stabilität des Schaum / Boden-Gemischs haben. In diesem Fall wird die Stabilität des Schaumes durch die Anwesenheit von Feinanteilen im Boden insgesamt verbessert. Mit einigen Schaummitteln und kleinen Blasengrößen kann diese Stabilität bis zu einem Tag und mehr erreichen.

Weiterhin zeigt der Vergleich zwischen RHOCA Foam AMP 10 und RHOCA Foam AN 45, daß die Eigenschaften und die Leistung des Schaummittels variieren, je nachdem, ob es allein oder in Zusammenhang mit einer Bodenfeinfraction betrachtet wird.

Es ist deshalb wichtig, nicht nur den Schaum allein zu berücksichtigen, sondern auch dessen Verhalten bei Kontakt mit Bodenpartikeln.

6.2 Baustellen-Anwendung

Eigenschaften

- spez. Feuchtdichte γ (w=15%) 19,0 kN/m³
- spez. Trockendichte γ_D 16,5 kN/m³
- Porosität.....39%
- Wassersättigung23%
- Permeabilität in situ.....ca. 10⁻⁵ m/s

Es handelt sich um Alluvion-Rundkorn 0 - 25 mm.

Die Korngrößenverteilung charakterisiert sich im Mittel durch: $d_{10} = 0,5 \mu\text{m}$, $d_{60} = 300 \mu\text{m}$ und $d_{90} = 1 \text{ mm}$.

Beobachtungen während des Vortriebs

Zwei Versuche wurden ausgehend von folgenden Schaum / Polymer-Mischungen durchgeführt:

- 1,5% RHOCA Foam AMP 10
+ 0,05% RHOCA Flow T3L
- 1,5% RHOCA Foam AB 20
+ 0,05% RHOCA Flow T3L

Der Schaum wurde mit einem Expansionsgrad von 8 hergestellt und in einer Menge von ca. 90 l/Min injiziert. Das ausgetragene Material wies eine ausgezeichnete Homogenität auf, es war kein Schaum auf der Oberfläche ersichtlich. In beiden Einsatzfällen lag die Dichte des Abraumes am Ausgang der Extraktionsschnecke bei ca. $1,3 \text{ g/cm}^3$ und der durchschnittliche Wassergehalt bei ca. 12,5 %. Im Gegensatz dazu war die Stabilität der Volumenänderung jedoch sehr verschieden:

- Stabilität von ca. 4 Stunden für den mit RHOCA Foam AB 20 aufgefahrenen Boden. Danach dekantierte das Gemisch Boden / Schaum, der Boden setzte sich im Zwischenlager in der gewünschten Zeit ab und konnte anschließend mit einem Schaufelbagger ausgehoben und durch LKW abtransportiert werden.
- Stabilität von > 2 Tagen für den mit RHOCA Foam AMP 10 aufgefahrenen Boden. In diesem Fall war es schwierig, den Abraum mit dem Schaufelbagger aufzunehmen (geringe Dichte und hohe Fluidität). Der Transport mit LKW war ebenfalls mit Schwierigkeiten verbunden, da sich das Material wie eine Flüssigkeit verhielt.

Die Maschinenparameter blieben - in diesem Boden nahezu ohne Ton - jedoch in beiden Fällen relativ stabil, d.h. durchschnittlich bei:

Anpressdruck 5.000 t
Leistung 1.100 kW
Vortriebsgeschwindigkeit..... 25 mm/Min

7 Einstellung der Verflüssigungskraft des Schaumes

Ziel: Verminderung der Verklebung des Schildes und der Abbaukammer. Die Verklebung tritt häufig mit dem Erscheinen von kompakten, erwärmten Bodenagglomerationen auf.

7.1 Experimentelle Laborbedingungen

Durch ihre Struktur haben die Schaummittel (\equiv Tenside, oberflächenaktive Substanzen) dispergierende und destrukturierende Kräfte mit unterschiedlichen Auswirkungen:

- Verflüssigung: Verminderung der Grenzflächenspannung zwischen den festen und flüssigen Bestandteilen
- Fragmentierung von agglomerierten Partikeln: Verringerung der Kohäsionskräfte zwischen den festen Partikeln
- Mischungsstabilisierung: Re-Agglomeration fester Partikel wird verhindert durch elektrostatische oder sterische Stabilisierung.

Auf der Baustelle gibt es prinzipiell zwei Möglichkeiten, um die Wirksamkeit verschiedener Schaummittel im Hinblick auf Verflüssigung und Destrukturierung zu bestimmen:

- Untersuchung der Plastizität der Feinkornfraktion
- Untersuchung der Verflüssigung der Fraktion 0-30 mm

Um die Dispergier-/Destrukturierungseigenschaften der Schaummittel auf den Boden zu beurteilen, wurden zwei Labortests ausgewählt:

- die Rheologiemessung mittels 'Slump Test'
- die Eindringtiefe mit 'Kegel-Penetrometer'.

In dem nachfolgend dargestellten Diagramm hat der ursprüngliche Boden in beiden Fällen einen Wassergehalt von 10%, dann fügt man Schaumlösung in o.g. Zusammensetzung hinzu.

Die beiden für die Tests verwendeten Böden bestehen aus tonigem Kies 0-30 mm und aus dem bereits vorab beschriebenen Limon. Vom mineralischen und granulometrischen Standpunkt aus gesehen stellt der Limon insgesamt die Fraktion von 0-0,3 mm des tonigen Kieses dar. Diese Wahl wurde mit dem Ziel getroffen, die Ergebnisse der beiden oben erwähnten Näherungen zu vergleichen.

Mit jedem Boden wurden zwei Schaummittel getestet, um deren Einfluß auf die Rheologie zu ermitteln (Bild 8, 9).

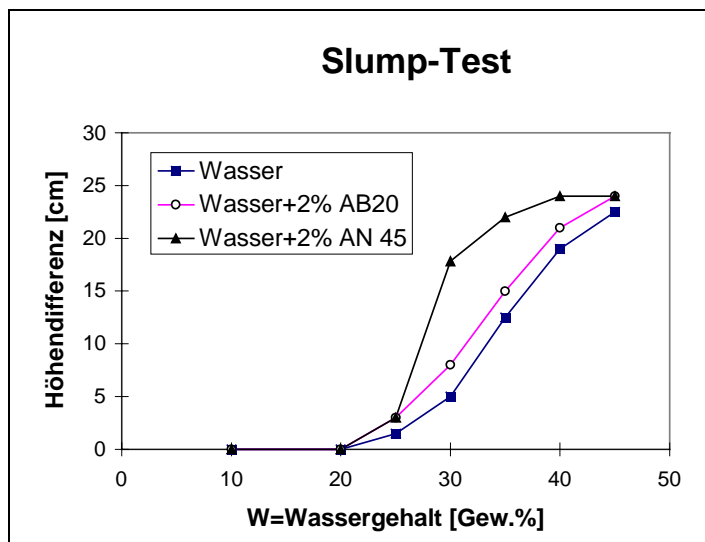


Bild 8: Senkung je nach Art des Schaummittels
(Boden: toniger Kies)

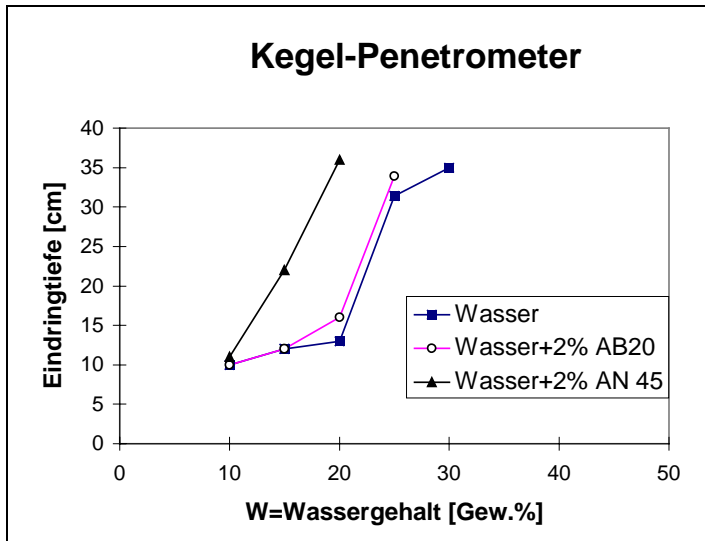


Bild 9: Eindringen je nach Art des Schaummittels
(Boden: Limon)

Die beiden Versuche zeigen übereinstimmend die zwischen beiden Schaummitteln bestehenden Unterschiede hinsichtlich ihrer Destrukturierungskraft. Die existierende Korrelation zwischen beiden Tests deutet darauf hin, daß die Dispergier- / Destrukturierungskraft der Tenside hauptsächlich den Bodenfeinanteil betrifft. Zur Ergründung der Destrukturierungseffektivität eines Schaummittels in Zusammenhang mit einem Boden ist es folglich notwendig, dessen Einfluß auf den Bodenfeinanteil zu untersuchen. In diesem Zusammenhang ergibt sich die Auswahl des Schaummittels durch die entsprechende Forderung an den Verflüssigungseffekt.

7.2 Experimentelle Baustellenergebnisse

Geotechnische Bedingungen

- Spez. Feuchtdichte γ (w=15%) 21 kN/m³
- Spez. Trockendichte γ_d : 18 kN/m³
- Porosität: 33 %
- Wassersättigung: 18 %

Die Permeabilität in situ (Versuch Lefranc) liegt zwischen $1 \cdot 10^{-2}$ und meistens $1 \cdot 10^{-5}$ m/s.

Die mittlere geologische Charakterisierung war 'mixed-face': kiesiger Sand, toniger Silt, leicht abweichend von Bild 10 (Schild ist nach unten in die Molasse zu versetzen)

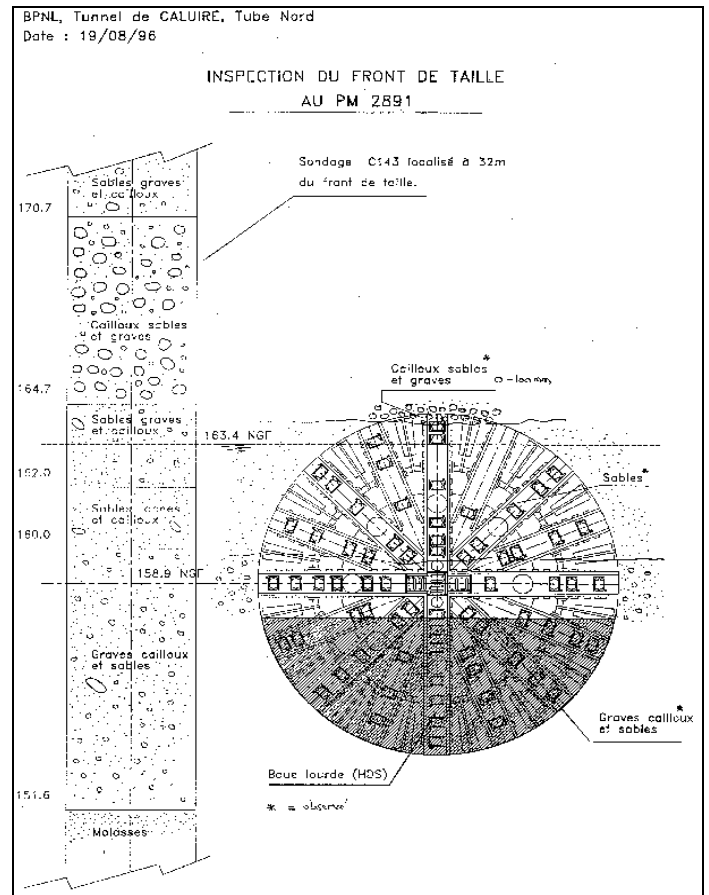


Bild 10: Vortriebssituation 'mixed-face'
kiesiger Sand, toniger Silt

Beobachtungen beim Vortrieb

Verschiedene Abmischungen der Schaumlösung RHOCA Foam AN 45 und AB 20 wurden auf Vortriebsabschnitten über jeweils ca. 20 m getestet, mit durchschnittlich identischen geotechnischen Eigenschaften des Abraumes.

Die verwendeten Mischungen zweier Schaumlösungen sind in der Tabelle 1 aufgeführt:

RHOCA Foam AN 45	100%	66%	50%	33%	0%
RHOCA Foam AB 20	0%	33%	50%	66%	100%
Dosierung [%] Schaummittel	2	2	2	2	2
Dosierung [%] Polymer T3L	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05
Schaum- stabilität (*)	1 h	1 h	40 Min	30 Min	20 Min
Bemer- kungen (**)	-	-	-	+	++

Tabelle 1

(*) Die Schaumstabilität wird durch die im Labor ermittelte Halbwertszeit angegeben, dargestellt durch auf dem Versuchsschaumgenerator hergestellte Schäume. Der Schaum wurde mit einem Expansionsgrad von 8 hergestellt.

(**) Beobachtung der Menge von erwärmten Verklumpungen auf dem Förderband. Diese setzen sich aus agglomerierten Bodenfeinanteilen zusammen. Sie sind Vorzeichen für das Verkleben des Schildes. ('-' keine Klumpen, '+' einige Klumpen, '++' viele Klumpen).

8 Zusammenfassung

Die Verwendung des Schaumes ermöglichte eine entscheidende Verbesserung der Vortriebsbedingungen auch in schwierigen Situationen. Dies betrifft sowohl die Maschinenparameter als auch den allgemeinen Baustellenablauf.

Schaum ist ein sehr komplexes Material, dessen Anwendung unbedingt an die Funktionsweise des Tunnelvortriebs und an die geotechnischen Eigenschaften der zu durchörternden Böden angepaßt werden muß.

Es ist feststellbar, daß zum Erreichen eines optimalen Vortriebs eine Einstellung des Schaumes gemäß der Beobachtungen im Labor und auf der Baustelle notwendig ist.