

Einsatz von Bentonit im Tunnelbau bei der Elbquerung im Zuge der A20

Um die Gesamtsituation des geplanten Tunnelvortriebes unter Einsatz von Bentonitsuspensionen zu erläutern, wird folgend erst allgemein der Stoff Bentonit und seine Wirkungsweise im Tunnelbau und HDD-Verfahren erläutert. Auch wenn dieser Baustoff auch im Spezialtiefbau (Baugruben, Bohrungen, etc.) verwendet wird, liegt der Fokus dieses Dokuments auf den unterirdischen Hohlraumbauten (Verkehrstunnel und Leitungen unter dem Deich).

1. Bentonit – Als Baustoff

Bentonit ist ein Tongemisch dessen wirksamer Hauptbestandteil Montmorillonit (60-80 Massen%) ist. Dieses Tonmineral wird in der Natur gemeinsam mit einigen weniger aktiven Bestandteilen gewonnen und aufbereitet. Wichtig für den späteren Einsatz im Tunnelbau (im Folgenden gleichlautend gemeint Tunnelbau und HDD-Verfahren) ist das Verhalten des quellfähigen Montmorillonit, welches bei qualitativ hochwertigen Fertigprodukten mit mehr als 50 % Reinheit vorliegt. Das Quellen des Bentonit erfolgt durch die Einlagerung von Wassermolekülen zwischen die Elementarschichten des Montmorillonits.

Durch die Zugabe von Wasser entsteht eine sogenannte Bentonitsuspension, also eine sehr feine Verteilung der Tonpartikel in der gesamten Flüssigkeit. Die feine Verteilung und die Einlagerung des Wassers zwischen die Elementarschichten des Montmorillonit erfolgt durch das Einbringen großer mechanischer Energie. Hierfür werden meistens Scherpumpen benutzt, die direkt in der sogenannten Bentonitmischanlage eingebaut sind. Nach dem energiereichen Einmischen des Tones in das „Anmachwasser“ muss die Bentonitsuspension quellen. In dieser Quellzeit lagert sich das Wasser zwischen die Elementarschichten des Bentonits und formt so die besonderen Eigenschaften einer Bentonitsuspension, die Thixotropie.

Die Thixotropie ist die Eigenschaft einer Bentonitsuspension im Ruhezustand einen Scherwiderstand aufzubauen, der bei Bewegung der Suspension stark reduziert wird. Bildlich gesprochen, stellt sich eine gute Bentonitsuspension im Ruhezustand wie ein Joghurt und im Bewegungszustand wie Wasser dar.



Abbildung 1: Vergleich Scherfestigkeit

In diesem Foto sieht man zwei Gläser gefüllt mit der gleichen Bentonitsuspension, jedoch zu unterschiedlichen Zeitpunkten nach dem Abschluss einer Fließbewegung. In dem rechten Glas hat sich die Suspension so weit verfestigt, ihren inneren Scherwiderstand erhöht, dass ein kleiner Stein nicht in dieser versinkt.

Durch diese einmalige Eigenschaft können thixotrope Flüssigkeiten zur Stützung des Bodens und ebenfalls als Transportmittel des abgebauten Bodens benutzt werden.

Der Boden an der Ortsbrust, die Fläche an der das Schneidrad den Boden abbaut, wird durch die Bentonitsuspension gestützt um einen kontrollierten Abbau sicherzustellen. Die Bentonitsuspension wird unter Druck gehalten, um den auf die Ortsbrust wirkenden Erd- und Wasserdruck im Gleichgewicht zu halten. Um ein Sicherheitspolster zu haben, wird der Druck in der Tunnelvortriebsmaschine leicht erhöht. Dadurch wirkt immer ein leicht höherer Druck über die Bentonitsuspension auf die Ortsbrust und diese wird stabil gehalten. Durch die Thixotropie kommt die Bentonitsuspension an der Ortsbrust zur Ruhe und „steift“ so an, dass sie nicht in den Boden eindringt (Joghurteffekt).



Abbildung 2: Eindringversuch zur Ortsbruststützung

Erst nach dem die Suspension wieder von der Ortsbrust mit den Werkzeugen abgekratzt wurde, wird sie mit dem gelösten Boden durch Pumpleitungen an die Oberfläche gefördert und dort in einer Separationsanlage vom Boden getrennt. Die Bentonitsuspension wird anschließend wieder zur Tunnelvortriebsmaschine gepumpt, um erneut wieder die Ortsbrust zu stützen und Boden heraus zu transportieren.

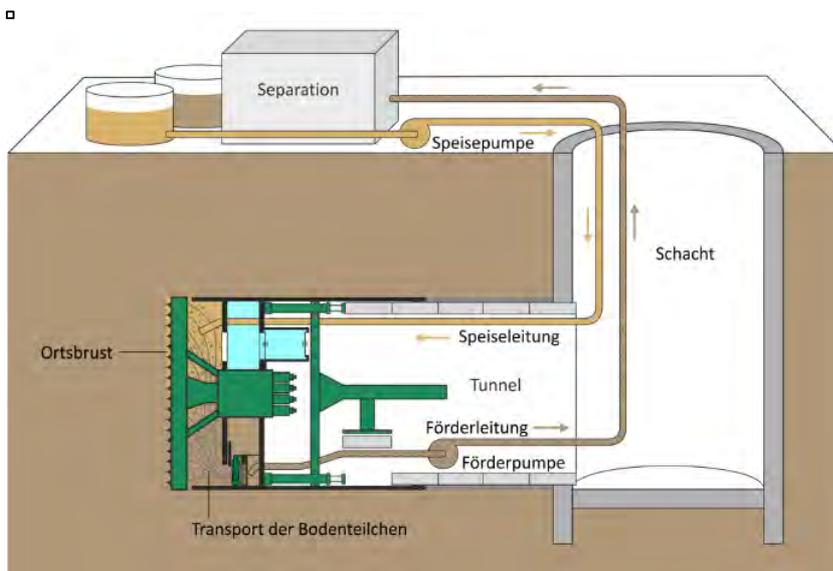


Abbildung 3: Suspensionskreislauf

Bei der Separation kann aus technischen Gründen keine Reinigung zu 100% erfolgen. Deshalb muss nach einer gewissen Anzahl an „Durchläufen“ die Bentonitsuspension entsorgt werden.

Hierfür wird die Bentonitsuspension aus dem Flüssigkeitskreislauf herausgenommen, fachtechnisch „ausgeschert“, und anschließend mit Zentrifugen oder Filterpressen möglichst stark vom Wasser getrennt. In dem übrigbleibenden „Zentrifugenschlamm“ werden ca. 5 Massen-% Restfeuchte vorhanden sein. Damit ist dieser Zentrifugenschlamm stichfest. Je nach Entsorgungsweg wird eine Verfestigung durch Zugabe von Kalk oder Zement vorgesehen.

Das Zentratwasser, also das Wasser das vom Schlamm getrennt wurde, wird entweder entsorgt oder wiederholt als Anmachwasser eingesetzt.

Zur Erzielung einer möglichst hohen Reinheit des Zentratwassers werden Flockmittel der Altbentonitsuspension zugegeben. Diese Flockmittel bestehen aus langkettigen Polymeren, die die feinen Tonpartikel an sich binden und somit eine Trennung vom Wasser überhaupt erst ermöglichen. Diese Flockmittel sind später im Zentrifugenschlamm enthalten und werden mit diesem entsorgt.

Bentonitsuspensionen wurden und werden bei allen größeren Tunnelvortrieben im norddeutschen Raum (4. Röhre Elbtunnel, Wesertunnel, Herrtunnel, Elbedüker) und bei nahezu allen innerstädtischen Tunnelvortrieben in der norddeutschen Geologie eingesetzt.

Aufgrund der überwiegend eiszeitlich geprägten Geologie im norddeutschen Raum sind die Bentonitsuspensionen für die unterschiedlichen Sande das technisch sinnvollste Stütz- und Transportmedium. Dies gilt nicht nur für den Tunnelbau, sondern auch im Spezialtiefbau. Alle Schlitzwand- oder Bohrpfahlbaugruben werden innerhalb des Grundwasserbereiches mit Bentonitsuspensionen stabil gehalten und gestützt.

Die Bentonitsuspension „verschließt“ die Poren zwischen den Bodenteilchen und trennt damit den „Baubereich“ und den Umgebungsbereich voneinander ab. Zur Bildung dieser „Schutzschicht“, dem sogenannten Filterkuchen, muss ein geringer Anteil der Bentonitsuspension sein enthaltenes Wasser in den umgebenden Boden auspressen. Dieser Vorgang wird Filtratwasserabgabe genannt.

Folgendes Foto zeigt die Filterkuchenbildung bei einem Filtratwasserabgabe Versuch mit zwei qualitativ unterschiedlichen Bentonitsuspensionen.



Abbildung 4: Ausbildung Filterkuchen in Filtratwasserabgabe Versuch (Quelle: Baroid Industrial Drilling Products)

Hinweis: Die dargestellten Filterkuchen sind bei einem Überdruck von 7 bar entstanden. Der Überdruck im Tunnelbau beträgt ca. 0,5 bar. Deshalb bilden sich wesentlich dünnere Filterkuchen aus.

Für die in den Baugrund abgegebene Menge an Filtratwasser hat sich in der Praxis ein Daumenwert von 10 l/m² der benetzten Fläche bewährt. Hierbei wird aber im Gegensatz zu Rohrvortrieben beim Tunnelbau (wie im gegenständlich Fall vorliegend) nur die Außenfläche des Ausbruchsquerschnittes berücksichtigt, da die Tunnelvortriebsmaschine das gesamte nach vorne abgewanderte Filtratwasser beim weiteren Vortrieb wiederaufnimmt.

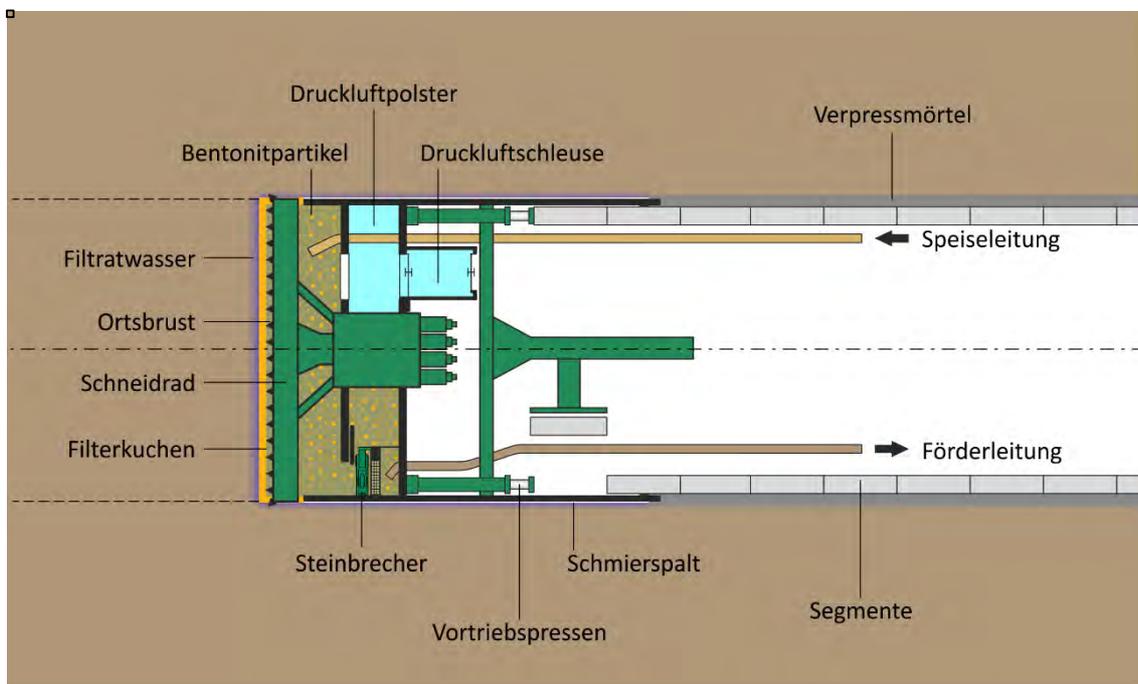


Abbildung 5: Ausbildung Filterkuchen

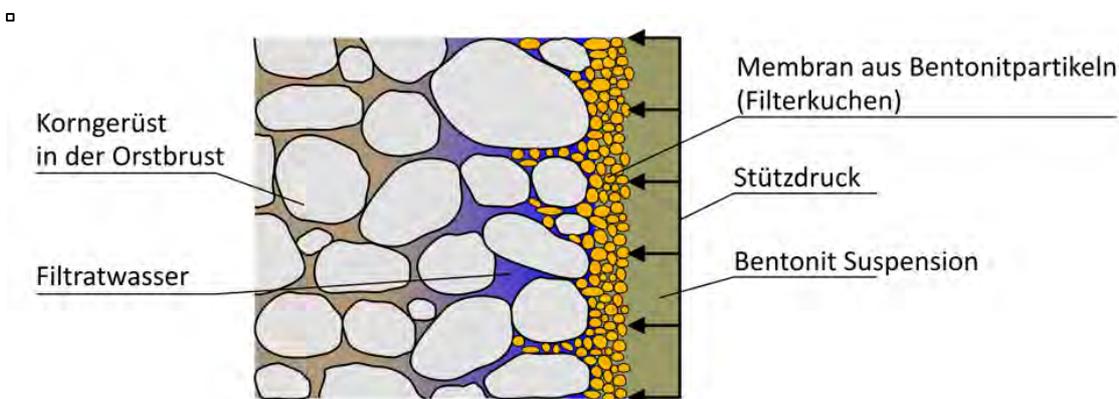


Abbildung 6: Vergrößerung Ausbildung Filterkuchen an der Ortsbrust

2. Einsatz von Zusatzstoffen (Additiven) in Bentonitsuspensionen

Zusatzstoffe können den Bentonitsuspensionen zugesetzt werden, um entweder schädliche Wirkungen des Baugrundes auf die Bentonitsuspension zu verhindern oder aber auch bewusst positive Eigenschaften der Bentonitsuspension auf das Baugrundverhalten auszubilden.

Ganz überwiegend werden fünf funktionale Gruppen benutzt:

- Viskositätsregulierer
- Filtratregulierer
- Toninhibierer
- Mechanische Stopfmittel
- Schmiermittel

Diese Additive können aus vollkommen unterschiedlichen Substanzen bestehen. Beispielsweise gibt es natürliche organische Additive, wie z.B. Xanthangummi, Guargummi, Stärke oder Polysaccharide. Andere Additive sind wiederum chemisch veränderte Stoffe wie Methcellulose u.a. synthetische Additive wie Polyacrylamid oder polyanionische Cellulose (PAC).

Der Einsatz dieser Additive hängt sehr stark von der Geologie ab. Je nach Geologie und deren Verhalten auf den Kontakt mit einer Bentonitsuspension könnte der Einsatz eines Additivs notwendig sein.

Diese Additive werden nur in sehr kleinen Mengen dem Anmachwasser zugesetzt. In der folgenden Beispielbetrachtung wird ausschließlich der radiale Verlust von Bentonitsuspension betrachtet, die Verluste in Vortriebsrichtung über die Ortsbrust können vernachlässigt werden, da der Boden und somit die in diesem Bereich eingetragenen Mengen des Additives im weiteren Vortrieb durch das Schneidrad wieder abgebaut werden.

Bei einer gängigen Beispielkonzentration eines Additivs von 2 kg/m^3 Bentonitsuspension und einem Flüssigkeitsverlust von ca. 10 l/m^2 Tunneloberfläche im radialen Peripheriebereich werden somit max. $0,02 \text{ kg/m}^2$ ausgetragen.

Es kann ein radialer Einflussbereich um den Tunnel herum von der Ausdehnung eines Tunneldurchmessers angesetzt werden.

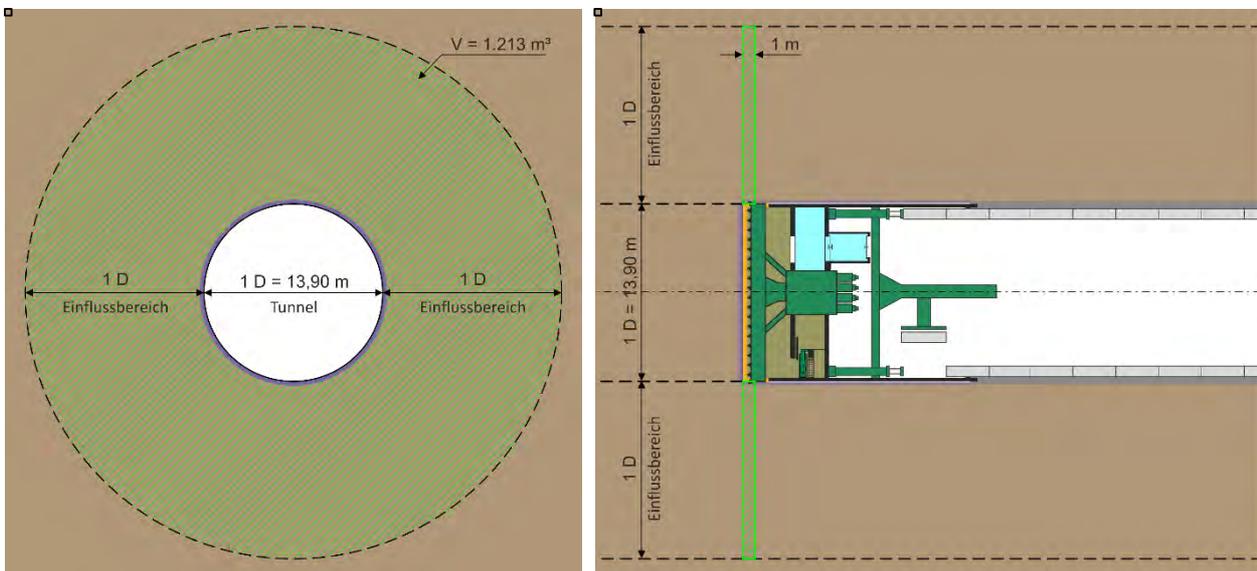


Abbildung 7: Einflussbereich pro Meter Vortrieb

Bevor überhaupt das Bentonit dem Wasser zugeführt wird, ist es üblich den pH-Wert des „Anmachwassers“ durch Zugabe von Sodaasche, geläufig „Backpulver“, in den Wunschbereich von 8 – 9 einzustellen. Dafür wird im Vorratsbecken oder in der Mischanlage Sodaasche im Wasser gelöst. Die Sodaasche bindet Kalk und erhöht den pH-Wert.

Additivverlust pro m² Tunneloberfläche:

$$2 \frac{kg}{m^3} = 0,002 \frac{kg}{l}$$

$$0,002 \frac{kg}{l} \times 10 \frac{l}{m^2} = 0,02 \frac{kg}{m^2}$$

Tunnelumfangsfläche pro Meter Vortrieb

$$2 \times \pi \times r \times 1 \text{ m}$$

$$2 \times \pi \times 6,95 \text{ m} \times 1 \text{ m} = 43,66 \text{ m}^2$$

Menge Additivverlust pro Meter Vortrieb

$$0,02 \frac{kg}{m^2} \times 43,66 \text{ m}^2 = 0,87 \text{ kg}$$

Volumen Boden im Einflussbereich pro Meter Vortrieb

$$\pi \times (R^2 - R_1^2) \times 1 \text{ m} =$$

$$\pi \times (20,85^2 - 6,95^2) \times 1 \text{ m} = 1213 \text{ m}^3$$

Masse Boden im Einflussbereich pro Meter Vortrieb

$$1213 \text{ m}^3 \times 1.900 \frac{kg}{m^3} = 2.304.700 \text{ kg}$$

Konzentration Additiv im Einflussbereich pro Meter Vortrieb

$$0,87 \text{ kg} / 2.304.700 \text{ kg} = 0,00000038 \text{ kg Additiv pro kg Boden}$$

Bei einem Einflussbereich von 1 Durchmesser um den Tunnel herum wird ein Bodenvolumen von ca. 1.213 m³ beeinträchtigt. Mit einem typischen Bodengewicht von 1.900 kg/m³ ergibt sich ein Bodengewicht von 2.304.700 kg pro Meter Vortrieb. Bei einem Additivverlust von 0,87 kg je Meter Vortrieb ergibt sich folglich ein Anteil von Additiv im Einflussbereich von 0,00000038 kg Additiv pro kg Boden. Mit anderen Worten kommen in den Einflussbereich des Tunnels maximal 0,000038 Massen-% Additiv in den Boden. Dies ist vernachlässigbar.

3. Schlussbemerkung

Der Einsatz von Bentonit gehört zum Tief- und Tunnelbau. Aufgrund der einmaligen Eigenschaft der Thixotropie sind Bentonitsuspensionen ein Standardstützmedium und seit Jahrzehnten weltweit im Einsatz.

Bad Schwartau, den 05.07.2017



Tim Babendererde
Ingenieurgesellschaft elbe-link