Das volumenkontrollierte Bentonitschmiersystem für den Rohrvortrieb

Vortragender | Autor: Steffen Praetorius | Herrenknecht AG

Zusammenfassung

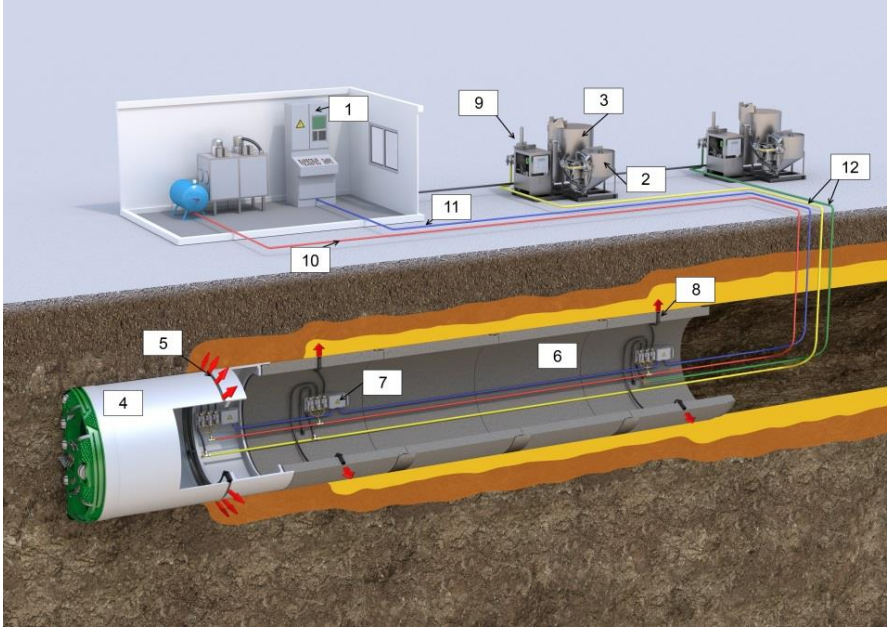
Grundliegendes Element eines gut funktionierenden Rohrvortriebs ist eine optimale Bentonitschmierung des Ringspaltes. Herkömmliche Systeme haben dabei noch einigen Verbesserungsbedarf. Das neue volumenkontrollierte Bentonitschmiersystem sorgt Dank seiner Steuerlogik größtenteils automatisch für die Erzeugung eines durchgängigen Schmierfilms. Die dafür benötigten Verpressmengen sind abhängig von der Untergrundart, dem Maschinendurchmesser und der Vortriebsgeschwindigkeit. Das volumenkontrollierte Bentonitschmiersystem trägt diesen Zusammenhang Rechnung und schmiert dementsprechend. Der Einsatz auf Vortriebsbaustellen zeigt dass die Steuerlogik maßgeschneidert ist auf die Bedürfnisse der Baustellenabläufe.

1. Grundlagen Bentonitschmierung beim Rohrvortrieb

Eine Grundvoraussetzung für einen gut funktionierenden Rohrvortrieb ist eine möglichst geringe Mantelreibung zwischen Baugrund und Vortriebsrohr. Diese wird über eine dem Baugrund angepasste Bentonitschmierung erreicht. Die eingebrachte Bentonitsuspension stützt dabei den Ringspalt und setzt durch seine Schmiereigenschaft die Reibung zwischen Baugrund und Rohrstrang herab.

Prinzipiell besteht die technische Ausrüstung (Abb.1) zur Bentonitschmierung aus Bentonitmischer und - pumpe, Durchflussmesser mit Drucksensor, Steuereinheit (meist der Steuercontainer), Steuerkabel, Druckluftleitung, Bentonitversorgungsleitung und Schmierstationen im Tunnel (Abb.2).

Abbildung 1: Aufbau des Bentonitschmierequipments beim Rohrvortrieb



1 Steuerungseinheit

2 Mischbehälter

3 Vorratsbehälter

4 Vortriebsmaschine

5 Schmierring

6 Vortriebsrohr

7 Schmierstation

8 Injektionsstutzen

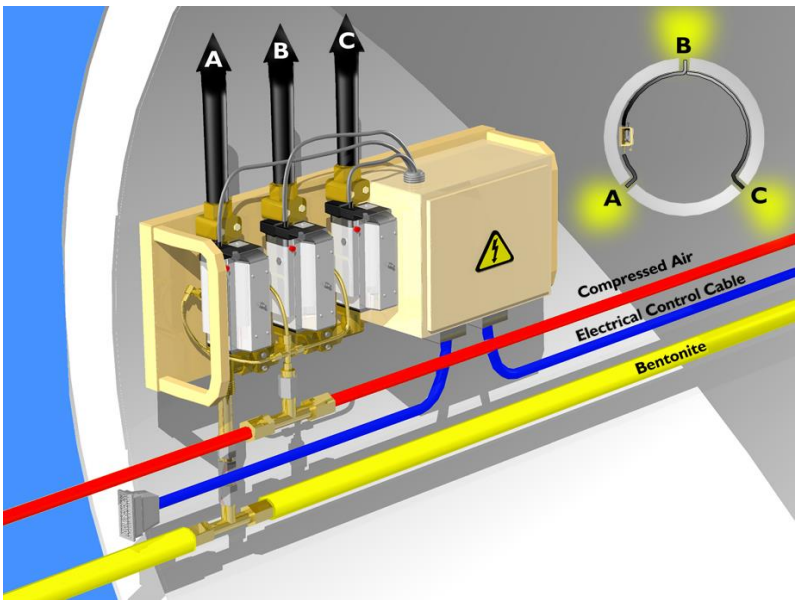
9 Bentonitpumpe

10 Druckluftzuführung

11 Steuerkabel

12 Bentonit-zuführungsleitung

Abbildung 2: Bentonitschmierstation



Die Bentonitsuspension wurde früher mittels Pumpen und Handventilen in den Ringspalt eingebracht. Im Laufe der Zeit wurde dieser Vorgang immer weiter automatisiert. Die Ventile wurden in Intervallen automatisch von einer Zentralsteuerung geöffnet. Die Öffnungsintervalle wurden meist über eine gewisse Zeit und teils über eine voreingestellte Menge geregelt. Durch geschicktes Einstellen der Schmierintervalle konnte der Maschinenfahrer eine sehr gute Bentonitschmierung umsetzen und somit eine geringe Mantelreibung erzeugen.

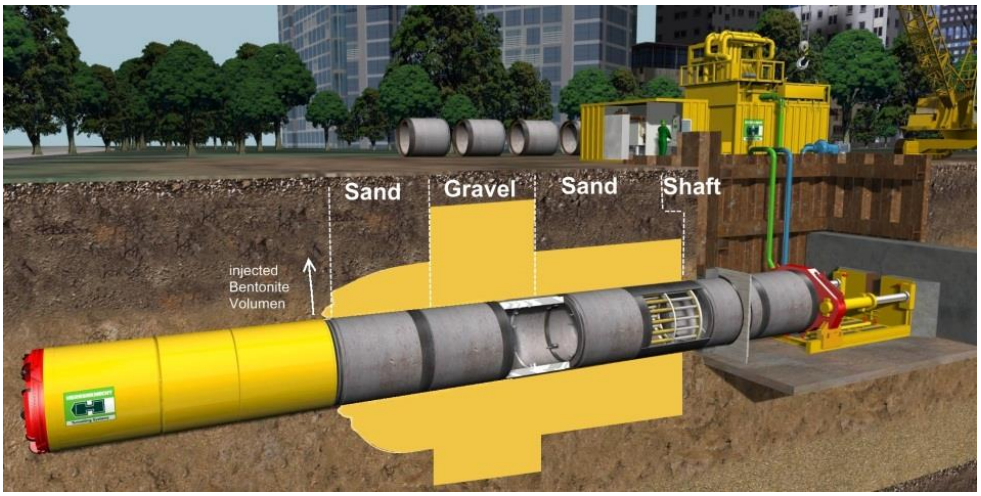
Bei Problemsituationen stellte sich jedoch heraus das es sehr schwierig war nachträglich die wirkliche Bentonitmengenverteilung nachzuvollziehen da die verpressten Mengen nicht ohne weiteres einzelnen Trassenabschnitten zugeordnet werden konnten.

Auch hing die Effektivität des Bentonitschmierfilms stark von der individuellen Bedienung des Systems ab. Ein Verhindern des Abreißens des Schmierfilms war nicht automatisch gewährleistet. Aus diesen und noch weiteren Gründen wurde von der Herrenknecht AG ein neuartiges Bentonitschmiersystem entwickelt welches einen durchgängigen und gleichmäßigen Schmierfilm am Rohstrang sicherstellt.

2. Grundlagen des volumenkontrollierten Bentonitschmiersystems

Ein weiterentwickeltes Bentonitsystem stellt das volumenkontrollierte Bentonitschmiersystem dar. Dieses System ermöglicht eine gezieltere und damit einfachere und effizientere Einbringung des Bentonites entlang der Tunneltrasse. Dabei kann auf trassenspezifische Unterschiede, wie z.B. erhöhten Bentonitbedarf einzelner Trassenabschnitte in Kiesbereichen, reagiert werden (Abb.3). Jede Bentonitstation die diesen Bereich durchfährt verpresst dann auch entsprechend der gewählten Nachverpressmenge mehr.

Abbildung 3: Trassenbezogene Bentonitverteilung bei Verwendung des volumenkontrollierten Bentonitschmiersystems

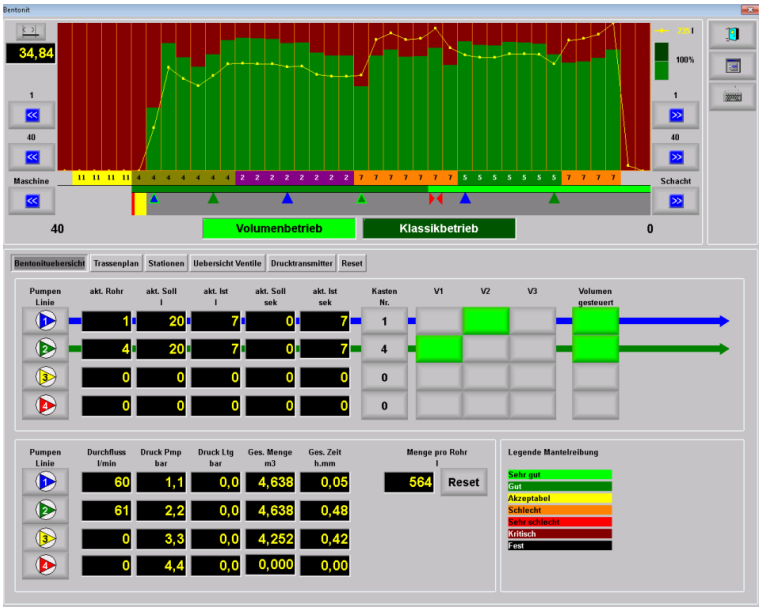


Folgende Funktionen liegen dem volumenkontrollierten Bentonitschmiersystem zu Grunde:

- Die Steuerlogik läuft volumenkontrolliert.
- Die Trasse wird in Abschnitte von 1 m unterteilt. Jeder Trassenabschnitt wird in eine Untergrundart eingeteilt. Entsprechend der Untergrundart werden Erstverpressmengen und Nachverpressmengen (Liter pro Abschnittsmeter und Meter Vortrieb) den jeweiligen Abschnitte zugeteilt.

- Das System versorgt während des fortschreitenden Vortriebs automatisch die jeweiligen Trassenabschnitte mit den festgelegten Mengen.
- Die Erstverpressmengen werden an der ersten Bentonitauslassmöglichkeit verpresst.
- An den restlichen Trassenabschnitten summieren sich die Nachverpressmengen innerhalb eines Trassenabschnitts solange auf (für jeden aufgefahrenen Vortriebsmeter kommt die festgelegte Nachverpressmenge dazu), bis eine Bentonitstation diesen Trassenabschnitt erreicht und dann die aufsummierte Bentonitmenge verpresst.
- Die Bentonitmengenverteilung entlang der Trasse wird in Echtzeit dargestellt (Abb. 4)

Abb. 4: Systemmonitor volumenkontrolliertes Bentonitschmiersystem mit Mengenverteilung in Echtzeit



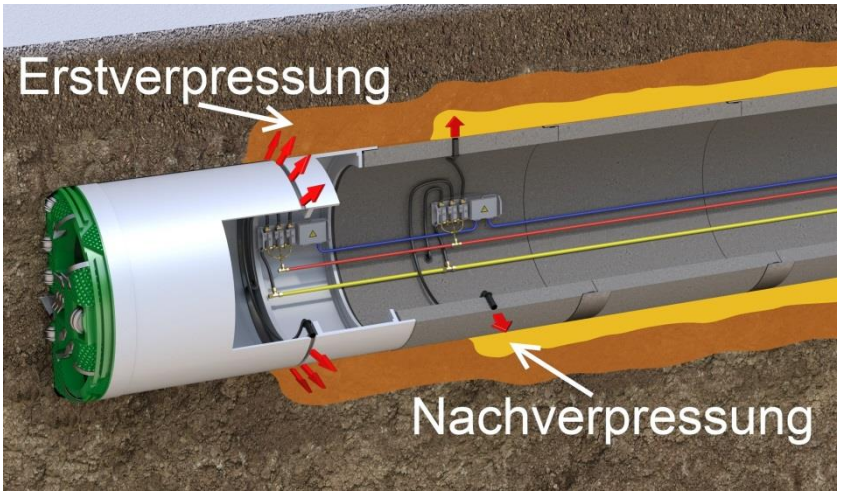
3. Schmierstrategie Erstverpressung und Nachverpressung

Der wichtigste Bereich, um eine effektive Bentonitschmierung aufzubauen, ist dort wo der Ringspalt entsteht. Also direkt am Schild oder spätestens hinter dem Schild beim Übergang zum Vortriebsrohr. Die Bentonitverpressung in diesem Bereich (Abb.5) wird auch als Erstverpressung bezeichnet. Aufgaben und Ziele der Erstverpressung sind:

- Füllung des Ringspaltes mit Bentonitsuspension und damit Vermeidung des Rückspülens von der Ortsbrustbohrspülung und Bohrklein
- In Schwebe halten einzelner Bodenpartikel durch die Gelstärke der Bentonitsuspension
- Stützung des Untergrundes durch Aufbringen eines Stützdrucks
- Aufbau eines Stützdruckes durch Bildung eines Filterkuchens oder durch Penetration der Bentonitsuspension in den Untergrund bis eine Stagnation eintritt
- Reduktion der Mantelreibung zwischen Untergrund und Vortriebsrohr

Sind die o.g. Punkte erfüllt, ist der Grundstein für eine effektive Ringraumschmierung gelegt.

Abbildung 5: Erstverpressung und Nachverpressung bei der Bentonitschmierung



Die am restlichen Rohrstrang verpressten Bentonitmengen der sog. Nachverpressung (Abb 5) dienen dazu, mögliche im Vortriebsverlauf auftretende Schmiermittelverluste in den anstehenden Baugrund durch Abwanderung in den Baugrund oder Auswaschung oder durch eine Veränderung der Suspensionseigenschaften über den Vortriebszeitraum infolge von Zersetzung und Abnahme oder Verlust der Fließgrenze, Viskosität etc. auszugleichen.

Es muss also sowohl der Bereich bei der Maschine (Erstverpressung) als auch der restliche Rohrstrang (Nachverpressung) mit Bentonitsuspension versorgt werden. Die Priorität liegt hierbei auf der Erstverpressung.

Die Versorgung der Erstverpressung muss immer, unter allen Umständen und in ausreichender Menge gewährleistet sein. Eine separate Schmiermittelversorgung (entkoppelt von der Versorgung der Schmierstationen im nachfolgenden Rohrstrang) kann eine permanente Versorgung der Erstverpressung gewährleisten.

4. Volumenberechnungen

Als Basis für die nachfolgenden Berechnungen wird vorausgesetzt, dass das Schmiermittel mit seinen spezifischen Eigenschaften, wie z.B. Fließgrenze, Gelstärke oder Viskosität, an die bestehenden Baugrundbedingungen optimal angepasst ist.

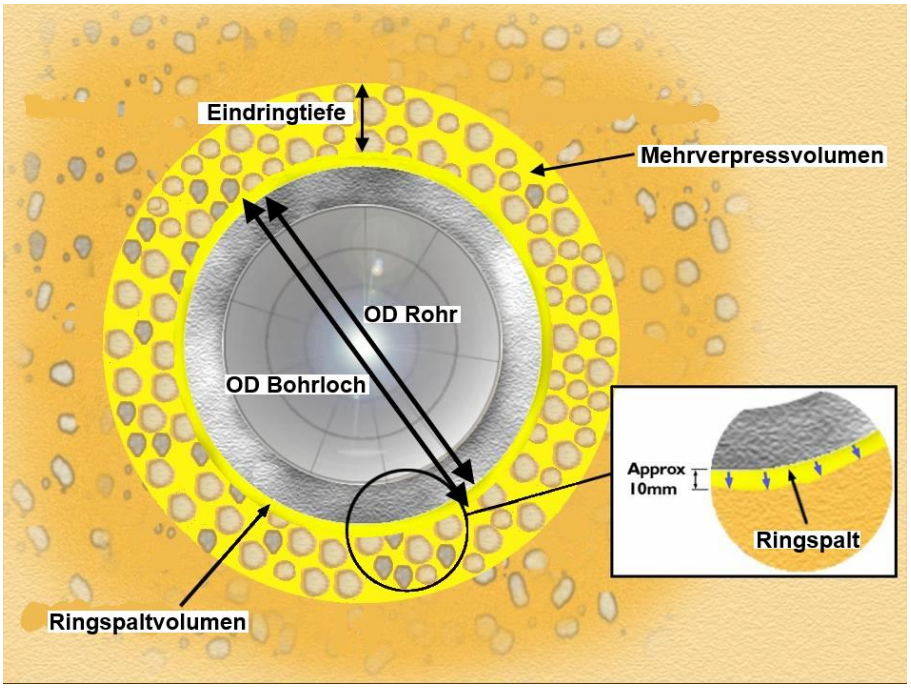
In der Vortriebsmaschine wird der Ringspalt sukzessive aufgefahren und vollständig mit Schmiermittel gefüllt. Zusätzlich wird dort der anstehende Baugrund durch die Infiltration des Schmiermittels stabilisiert. Dementsprechend ergibt sich die erforderliche Erstverpressmenge für die Vortriebsmaschine $V_{MASCHINE}$ aus der Summe des Ringspaltvolumens $V_{Ringspalt}$ und des Mehrverpressvolumens $V_{Mehrverpressung}$ [Literatur A]. Im nachfolgenden Rohrstrang werden lediglich mögliche Verlustmengen des Schmiermittels ausgeglichen. Daher besteht die erforderliche Nachverpressmenge für den Rohrstrang nur aus dem Volumen $V_{ROHRSTRANG}$.

Der Außendurchmesser des aufgefahrenen Hohlraums $OD_{Bohrloch}$, welcher sich aus dem Außendurchmesser der Vortriebsmaschine $OD_{Maschine}$ zuzüglich des Überschnittswerts $l_{Überschnitt}$ ergibt, und der Außendurchmesser der Vortriebsrohre OD_{Rohr} bilden die Bezugsgrößen zur Bestimmung des Ringspaltvolumens $V_{Ringspalt}$.

$$V_{Ringspalt} = \pi \cdot \frac{OD_{Bohrloch}^2 - OD_{Rohr}^2}{4} [m^2] \cdot \left[\frac{m}{m}\right]$$

Das Mehrverpressvolumen $V_{Mehrverpressung}$ ist abhängig von der Eindringtiefe s des Schmiermittels (Abbildung 6) in den anstehenden Baugrund über den Ringspalt hinaus. Hierbei wird nur der nutzbare Hohlraum im Baugrund, d.h. der Porenraum im Lockergestein bzw. der Kluftraum im Festgestein, mit Schmiermittel gefüllt. Für die theoretischen Betrachtungen wird eine radiale Verteilung im Boden zu Grunde gelegt.

Abbildung 6: Eindringtiefe und Ringspalt am Querschnitt eines Vortriebsrohres



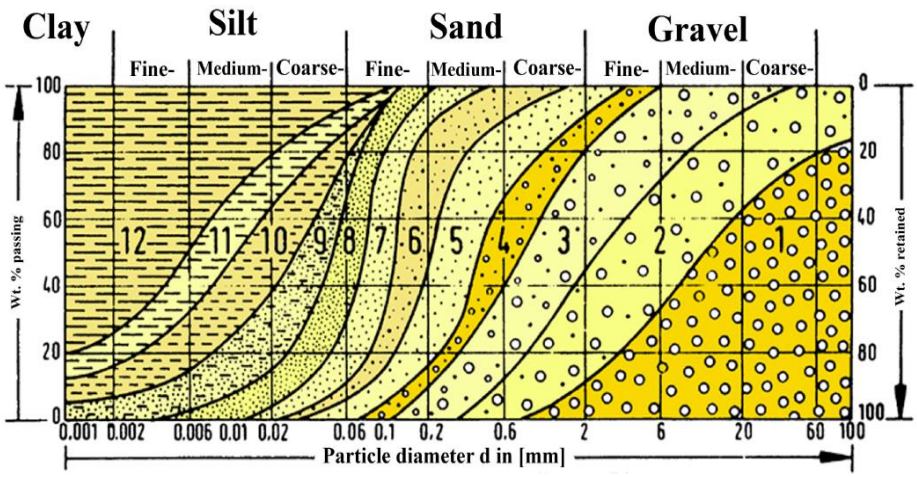
Die Eindringtiefe kann nach DIN 4126 [Literatur B]wie folgt berechnet werden:

$$\boldsymbol{s} = \frac{(\Delta \boldsymbol{p} \cdot \boldsymbol{d_w})^2}{\boldsymbol{2} \cdot \boldsymbol{\tau}} [\boldsymbol{m}]$$

Dabei werden folgende Größen verwendet:

s = Eindringtiefe der Bentonitsuspension in den Untergrund [mm]
τ = statische Fließgrenze der Bentonitsuspension Kugelharfe [N/m²]
Δp = Druckdifferenz von Anfang bis Ende der Eindringung [N/m²] meist 103 – 104 [N/m²]
dw = wirksamer Korndurchmesser, meist d10 einer Korngrößenverteilungskurve (Abb 7)

Abbildung 7: Korngrößenverteilungskurve



Das bodenabhängige Mehrverpressvolumen [nach Literatur A] wird wie folgt berechnet:

$$V_{Mehrverpr} = \pi \cdot \frac{(OD_{Bohrloch} + 2 \cdot s)^2 - OD_{Bohrloch}^2}{4} [m^2] \cdot C_{Porenraum}[-] \cdot \left[\frac{m}{m}\right]$$

Wobei $C_{Porenraum}$ dem Porenvolumen des Untergrundes entspricht. $OD_{Bohrloch}$ enspricht dem effektiven Bohrdurchmesser.

Daraus ergibt sich ein Erstverpressmenge $V_{MASCHINE}$ welche möglichst an dem ersten Verpresspunkt eingebracht werden sollte

$$V_{MASCHINE} = V_{Ringspalt} + V_{Mehrverpressung}$$

Somit kann sichergestellt werden dass der Ringspalt gefüllt, der Untergrund gestützt und der Schmierfilm optimal aufgebaut worden ist.

5. Beispielwerte und Auswirkung auf die Technik

Anhand der oben aufgeführten Berechnungen lassen sich für jede Vortriebsmaschine und für jeden Untergrund die Zielwerte für die Erstverpressung berechnen.

In folgender Tabelle 1 sind Beispielwerte für die Mehrverpressmengen für eine AVN 1400 mit 1720 mm Rohraußendurchmesser aufgeführt:

Tabelle 1: Beispielberechnung für Mehrverpressmengen einer AVN 1400 in Abhängigkeit unterschiedlicher Untergrundarten

Porenraum [%]		10	20	25	25	25
Maschine	Ringspaltvolumen $V_{Ringspalt}$ [m³/m]	Bodenabhängiges Mehrverpressvolumen $V_{Mehrverpess}$ [m³/m]				
		Schluff	Feinsand	Sand	Kies-Sand	Kies
AVN 1400	0,154	0,003	0,025	0,055	0,332	0,489

Hier wird schnell ersichtlich das die benötigten Verpressmengen stark vom Untergrund abhängen und nur in zweiter Linie von der Vortriebsmaschinengröße. Untergrundart, Vortriebsmaschinengröße sowie die Vortriebsgeschwindigkeit definieren dann die notwendige Pumpleistung (Tabelle 2), die mindesten installiert sein muss, um die Erstverpressung erfolgreich umzusetzen.

Folgende Beispielberechnung zeigt diesen Zusammenhang auf anhand eines Vortriebes einer AVN 1400 im Kies-Sand:

Tabelle 2: Pumpratenberechnung für eine AVN 1400 im Kies-Sand

Maschine	AVN 1400, DN 1400 // Untergrund: Kies-Sand		
Schmierung	Außendurchmesser Rohr	1720	mm
	Ringspaltvolumen $V_{Ringspalt}$	0,154	m³/m
	Mehrverpressvolumen $V_{mehrverpress}$	0,332	m³/m
	Erstverpressmenge $V_{Maschine}$	0,486	m³/m
Für Erstverpressung	Vortriebsgeschwindigkeit	10	cm/min
	Vortriebsgeschwindigkeit	6	m/h
	Benötigte Pumprate	2,9	m³/h
	Benötigte Pumprate	**48**	l/min

Dies Beispiel zeigt wie wichtig die Betrachtung der benötigten Erstverpressmengen in Abhängigkeit der Untergrundart und der Vortriebsgeschwindigkeit ist. Wird bei oben genanntem Beispiel mit 15 cm/min vorgetrieben muss die einzusetzende Bentonitpumpe schon 72 l/min liefern können. Die richtige Dimensionierung der Pumpengrößen ist ein wichtiger Punkt für eine erfolgreiche Bentonitschmierung.

6. Erfahrungen aus der Praxis

Das volumenkontrollierte Bentonitschmiersystem ist bereits seit August 2014 das Standartsystem in den Herrenknecht Steuercontainern. Durch seine innovative, streckenabhängige, volumenkontrollierte Arbeitsweise, hat dieses System eine wesentlich höhere Präzision als Vorgängersystem. Dies lässt sich z. B. anhand zweier Beispielbaustellen aufzeigen:

BV Mühlheimer Brücke Köln, Ausführender: Sonntag Baugesellschaft, Maschine: AVND 2500 mit Aufdoppelung auf OD 3400 mm, Vortriebslänge 644 m

Baugrund: Sand und hochdurchlässiger Kies mit Steinlagen. Zur Füllung des Ringspaltes und zur Stabilisierung des Baugrundes mussten große Mengen Schmierbentonit verpresst werden. Das volumenkontrollierte Schmiersystem sorgte durch seine, an den jeweiligen Vortriebstand angepasste Verpresslogik dafür, dass besonders der entstehende Ringspalt an der Maschine automatisch immer ausreichend gefüllt war. So konnte sich der Maschinenfahrer auf die Ortsbruststützung konzentrieren. Trotz des schwierigen Untergrundes wurden extrem niedere Mantelreibungen von teils unter 0,3 KN/m² erreicht.

BV St. Cyr l´Ecole. Ausführender Sade, Maschine: AVN 1200, Vortriebslänge 108 m

Baugrund: Schluffiger Ton, Kalksteinlagen, Trassenverlauf unter Bahngleisen. Obwohl es sich um eine kurze Haltung, mit einer relativ kleinen Maschine handelte, konnte das Schmiersystem hier Vorteile für die Baustelle erbringen. Durch die exakte Schmiermittelabgabe für jeden Vortriebsmeter, konnte die Balance zwischen Überschmierung und Unterschmierung sehr präzise gehalten werden. Sobald die Vortriebsmaschine Tendenzen zur Verrollung zeigte, wurde die Schmiermittelmenge pro Tunnelmeter angepasst und diese für den weiteren Verlauf übernommen. Dabei passte sich natürlich die verpresste Menge auch automatisch an die Vortriebsgeschwindigkeit an.

Neben den technischen Vorteilen (siehe Kapitel 2.), lassen sich die Vorteile des Systems für folgende Personengruppen, die an Rohrvortriebsarbeiten beteiligt sind, weiter aufteilen:

- Für den Maschinenfahrer stellt das System ein Werkzeug dar, mit dem er die Bentonitverpressung effektiv, gleichmäßig und präzise einsetzen kann.
- Für den Bauleiter wird die Mengenverteilung transparent. So kann bei Problemsituationen gezielter gegengesteuert werden. Große Unterschiede z. B. zwischen Tag- und Nachtschicht können durch festgelegte Verpressmengen verhindert werden. Dies führt zu höherer und gleichmäßiger Schmierfilmqualität und beugt so Problemsituationen vor.

- Für den Projektkaufmann/Planer liegt der Vorteil in einer besseren Abschätzung der Baustelleneffektivität, bzw. des Risikos. Erstmals ist eine wirkliche Korrelation und Steuerbarkeit der Verpressmengen entlang des Tunnelstrangs möglich.

7. Systemvorteile

Mit dem neuen volumenkontrollierte Schmiersystem ist erstmals eine Echtzeitdarstellung der verpressten Bentonitmengen entlang des Rohrstranges möglich. Das System selbst sorgt für eine automatische und volumenkontrollierte Verteilung der Bentonitmengen entlang der Trasse. Dadurch wird ein Abreißen des Schmierfilmes bestmöglich verhindert bzw. sofort graphisch sichtbar. Für unterschiedliche Untergrundbedingungen können ortsspezifisch verschiedene Verpressmengen festgelegt werden. Sämtliche eingesetzten Schmierstationen folgen dieser Festlegung. Bis zu 4 Bentonitpumpen können mit dem System gleichzeitig gesteuert werden. Das System verfügt über eine komplette Datenspeicherung (Volumen, Drücke, Verteilung) und über eine Darstellung der spezifischen Rohrmantelreibung. Ein zusätzlicher Drucksensorwert in der Tunnelbentonitleitung wird angezeigt und aufgezeichnet.

Letztendlich sorgt das volumenkontrollierte Schmiersystem für eine optimierte Bentonitverpressung am Rohrstrang und somit zur Reduktion der Mantelreibung und Vorpresskräfte. Dies führt zur Einsparung von Zwischendehnerfahrten und zur Erhöhung der Vortriebsleistung. Vor allem durch seine präzise steuerbare Bentonitmengenverteilung wird ein deutlicher Mehrwert für die Vortriebsbaustelle erreicht.

Autor

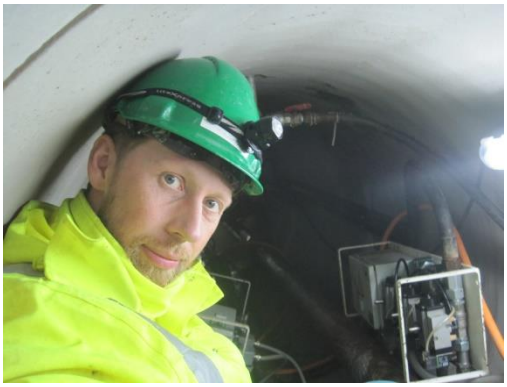
Dipl.-Geol. Steffen Praetorius

Herrenknecht AG

Schlehenweg 2

77963 Schwanau

Praetorius.Steffen@Herrenknecht.de



Literatur [A]; Praetorius, S., Schößer, B.:Bentonithandbuch, Ringspaltschmierung für den Rohrvortrieb, Berlin, Ernst & Sohn 2016

Literatur [B]: DIN 4126: Nachweis der Standsicherheit von Schlitzwänden. September 2003