



**Abb. 1** Die richtige Volumenberechnung ist beim Spülbohren entscheidend.

# Mengenkalkulation und Spülmessung bei Spülbohrungen ohne Spülmwiederaufbereitung

**Qualitätssicherung auf der Baustelle** ■ Spülbohrungen ohne Spülmwiederaufbereitung machen den Großteil aller durchgeführten Horizontalbohrungen aus und erfordern für die Kalkulation und Qualitätssicherung des spülungstechnischen Anteils eine differenziertere Betrachtung.

Bei der Betrachtung der einschlägigen Regelwerke für die gesteuerte Horizontalbohrtechnik fällt auf, dass den Themen Bohrspülung und Spülmessung eine vergleichsweise recht oberflächliche und unvollständige Behandlung zukommt, die zudem für den Anwender nicht immer sehr hilfreich ist. Wenn man sich in diesem Zusammenhang die Bedeutung der Bohrspülung für die erfolgreiche Durchführung jeder Horizontalbohrung vor Augen führt, ist dieser Umstand besonders verwunderlich. Bei zukünftigen Überarbeitungen dieser Werke scheinen einige Änderungen und Ergänzungen notwendig. An dieser Stelle erfolgt lediglich der Versuch einer etwas verständlicheren und vereinfachten Darstellung der grundlegenden Zusammenhänge und Erfordernisse für einfache Spülbohrungen im Lockergestein ohne Spülmwiederaufbereitung, welche sicherlich mehr als 90 Prozent aller durchgeführten Horizontalbohrungen ausmachen und deshalb auch Hauptziel von Empfehlungen und Vorgaben in den Regelwerken sein sollten.

## Erforderliches Spülmvolumen

Grundlage für die Ermittlung des für die Bohrung notwendigen Spülmvolumens ist das herzustellende Bohrlochvolumen, zu berechnen auf Basis des maximalen Aufweiddurchmessers DN und der Länge der Bohrung. Ob und in welchem Umfang dieses Volumen mit einem Zuschlag für Auskesselung versehen werden muss, hängt von einer Reihe von Faktoren ab, u. a. vom Boden, von der Düsengeometrie des Bohrwerkzeuges und der Anzahl der Räumschritte bis zum Erreichen des Enddurchmessers. In der Regel ist dies jedoch für die Ermittlung des Spülmbedarfs von untergeordneter Bedeutung.

$$\text{Bohrlochvolumen [m}^3\text{]} = 0,785 \times \text{DN} \times \text{DN} \times \text{Länge (alle Angaben in m)}$$

Das so errechnete Bohrlochvolumen ist jedoch nicht mit der benötigten Spülmmenge gleichzusetzen, auch wenn dies in verschiedenen Regelwerken so dargestellt wird. Unter der Voraussetzung, dass der Boden ausgetragen

und nicht verdrängt werden soll, ergibt sich das insgesamt herzustellende Spülmvolumen durch Multiplikation des Bohrlochvolumens mit dem sogenannten „Mudfaktor“. Mit Mudfaktor wird das Verhältnis von eingepumptem Spülmvolumen zu auszutragendem Bodenvolumen bezeichnet. Je nach Baugrund sollte dieser Faktor zwischen 3 und 5 liegen, bei Bohrungen in bestimmten Tonen auch darüber. Lediglich in verdrängungsfähigen Böden, zu denen z. B. Sand nicht gehört, kann dieser Faktor bei kleinkalibrigen Bohrungen auch darunter liegen.

$$\text{Benötigtes Spülmvolumen [m}^3\text{]} = \text{Bohrlochvolumen [m}^3\text{]} \times \text{Mudfaktor}$$

Ein zusätzlicher Faktor für Bohrlochverluste ist bei dieser Art der Kalkulation der Spülmmenge nicht erforderlich. Das benötigte Spülmvolumen entspricht zusammen mit der Verdrängung des einzuziehenden Rohres auch dem theoretischen Entsorgungsvolumen an aufgeladener Spülm. In der Praxis liegt die zu entsorgende Spülmmenge auf



Abb. 2 Papierteststreifen zur Wasserprüfung



Abb. 3 Marsh-Trichter und Spülungswaage

Grund der Zirkulationsverluste und der Volumenreduzierung des Bodenkörpers beim Übergang in den Spülstrom jedoch fast immer darunter.

Der Mudfaktor bestimmt auch die in Abhängigkeit vom abzutragenden Bodenvolumen und der gewählten Pumprate maximal zulässige Räumgeschwindigkeit:

$$\text{Räumgeschwindigkeit [min/m]} = \frac{\text{Bodenvolumen [l/m]} \times \text{Mudfaktor}}{\text{Pumprate [l/min]}}$$

Bodenvolumen ist dabei stets die Differenz zwischen aktuell hergestelltem Bohrlochvolumen (z. B. mit Räumerdurchmesser DN 500) und dem Volumen, dass mit dem Arbeitsschritt zuvor erzeugt wurde (z. B. mit Räumerdurchmesser DN 300). Beide sind analog dem Bohrlochvolumen zu errechnen.

Ein Überschreiten der für den jeweiligen Boden und die eingesetzte Spülung maximal zulässigen (=geeigneten) Räumgeschwindigkeit ist die Haupt-

ursache für ausbleibenden Spülungsrückfluss, Ausbläser, Geländehebungen, unzureichenden Bohrkleinaustrag und festgezogene Rohre. Aus dem kalkulierten Spülungsvolumen lässt sich mit Hilfe des durchschnittlichen Bedarfs an Bentonit pro Kubikmeter Spülung auch die erforderliche Bentonitmenge für die Bohrung abschätzen.

$$\text{Bentonitbedarf [kg]} = \text{Spülungsvolumen [m}^3\text{]} \times \text{Bentoniteinsatz [kg/m}^3\text{]}$$

Bei einem kalkulatorischen Durchschnittseinsatz von z. B. einem Sack Bentonit (25 kg) pro Kubikmeter reicht eine Tonne Bentonit bei einem Mudfaktor (MF) von 5 etwa für das Herstellen von 8 m<sup>3</sup> Bohrlochvolumen (MF 4: 10 m<sup>3</sup>, MF 3: 13,5 m<sup>3</sup>).

### Spülmessung auf der Baustelle

Für Standardhorizontalbohrungen mit kleinen Bohranlagen und ohne Spülmwiederaufbereitung kommt man mit recht wenigen Messungen aus, diese allerdings sind dann unabdingbar.

### Wasser

Zu den auf der Baustelle erforderlichen Messungen gehört als Erstes die Überprüfung der Qualität des zum Anmischen verwendeten Wassers. Zwei einfache Messungen mittels Papierteststreifen reichen aus, um die Eignung des Wassers festzustellen bzw. um zu wissen, ob eine Konditionierung notwendig ist (Abb. 2):

- pH-Wert Soll: > 7
- Wasserhärte (Carbonathärte) Soll: < 15 °d

Ist der pH-Wert zu niedrig oder die Wasserhärte zu hoch, kann in der Regel beides durch die Zugabe von Soda korrigiert werden. Zur Reduzierung der Carbonathärte um 1°d sind etwa 20g Soda pro Kubikmeter Wasser erforderlich. Der pH-Wert-Anstieg verläuft nicht linear und kann nach schrittweiser Sodazugabe nur durch erneute Messung bestimmt werden. In einigen Regionen kann bei Verwendung von Oberflächenwasser ein zusätzlicher Test zur Feststellung möglichen Salzgehaltes sinnvoll sein. Auch hierfür gibt es einfache Teststreifen.

### Spülung

Neben dem Lösen des Gesteins und dem Erzeugen eines hydraulischen Gegendruckes zur Stützung des Bohrkanals sind die Hauptaufgaben der Spülung der Austrag und das In-der-Schwebelhalten des gelösten Bodenmaterials. Um die letztgenannten Funktionen auf der Baustelle zu überprüfen und ggf. sicherzustellen, genügen in den meisten Fällen zwei Messungen (Abb. 3):

- Marsh-Trichter Auslaufzeit (TAZ) und ggf. Restauslaufzeit (RAZ) und
- Spülmgewicht im Rückfluss mit der Spülmwaage.

Die Messung mit dem Marsh-Trichter ermöglicht eine Kontrolle der für den jeweiligen Baugrund notwendigen Haupteigenschaften der Bohrspülung in Form einer Referenzmessung. Da Auslaufzeit und die zugehörigen rheologischen Eigenschaften für viele Bentonite recht unterschiedlich sind, sind die Ergebnisse verlässlich nur durch den Vergleich mit den bodenspezifischen Vorgaben für die Auslaufzeit (Richtwerten) des jeweiligen Bentonitlieferanten verwertbar. Ein allgemeiner Zusammenhang von Marsh-Trichter-Auslaufzeit und Austragvermögen bzw. Tragfähigkeit von Bohrspülungen besteht nicht. Bohrspülungen mit sehr hohen Auslaufzeiten besitzen nicht notwendigerweise eine hohe Tragfähigkeit. Auch wenn die Restauslaufzeit einen Anhaltspunkt für das Vergelungsverhalten der Spülung liefert, ist die Tragfähigkeit im Stillstand (Gelstärke) besser mittels Probenmaterial der auszutragenden Korngröße und Spülmprobe im Feldversuch zu bestimmen. Das Verhalten des Bohrkleins im Probebecher liefert in der Regel ein 1:1-Abbild der Verhältnisse im Bohrloch bei Stillstand.

Sobald eine Wiederaufbereitung der Spülung erfolgt, sind Marsh-Trichtermessungen in den meisten Fällen allein nicht mehr ausreichend, da sich der Zusammenhang zwischen Auslaufzeit und Rheologie/Qualität der Spülung durch den möglichen Einfluss von Baugrund und Grundwasser nicht mehr sicher herstellen lässt. In diesem Fall können die qualitativen Eigenschaften der Spülung nur durch Messungen mit

einem Viskosimeter bestimmt werden. Dabei werden die Schubspannung und daraus abgeleitet die effektive Viskosität der Spülung bei verschiedenen Schergeschwindigkeiten (=Schergefälle) ermittelt. Das Schergefälle ist abhängig von der Strömungsgeometrie (Ringraum- oder Rohrquerschnitt) und der Pumprate. Im übertragenen Sinne kann es als Strömungsgeschwindigkeit angesehen werden, während die Schubspannung als Krafteinwirkung pro Fläche, also Reibungswiderstand oder auch Druck zur Überwindung des Fließwiderstandes betrachtet werden kann. Da die Viskosität einer Bohrspülung nicht konstant ist, sondern von der Schergeschwindigkeit (Strömungsgeschwindigkeit) abhängt, ermöglicht nur die Verwendung eines Viskosimeters eine Aussage darüber, welche Viskosität die Spülung bei den jeweils im Bohrloch herrschenden Strömungsbedingungen tatsächlich besitzt. Die Plastische Viskosität ist hierbei die niedrigste Viskosität, die die Bohrspülung haben kann, bedeutsam nur für den Grad der Verflüssigung und den Widerstand beim Pumpen durch Düsen oder kleine Rohrquerschnitte, nicht für die Eignung der Spülung zur Erfüllung ihrer o. g. Haupt-



Abb. 4 Test-Kit zur Sandgehaltsmessung

aufgaben im Bohrkanal. Hier sind die Fließgrenzen, die effektive Viskosität, insbesondere bei langsamen Fließgeschwindigkeiten, und die Gelstärke die relevanten Parameter. Allesamt handelt es sich hierbei um Größen, die nicht mit dem Marsh-Trichter bestimmt werden können. Die häufig zitierte Scheinbare Viskosität ist für die Qualität von HDD-Spülungen ohne Aussagekraft.

Durch Messung des Gewichtes (Dichte) der zurückkommenden Spülung ist eine sehr gute Kontrolle des Austragvermögens der Spülung möglich. Das Gewicht der Spülung gibt Aufschluss über den Gesamtfeststoffgehalt und ist damit eine direkte Indikation dafür, ob der

beabsichtigte Feststoffaustrag (bestimmt durch den gewählten Mudfaktor) auch erreicht wird und die Viskosität und Tragfähigkeit der Spülung für den betreffenden Baugrund ausreichend sind.

Dichtemessungen können mit der Spülungswaage oder einem Hydrometer durchgeführt werden, mit einem Aerometer lässt sich ausschließlich die Dichte von Gasen bestimmen. Das theoretische Gewicht der Bohrspülung bei optimalem Bohrkleinaustrag lässt sich in Abhängigkeit vom gewählten Mudfaktor und der ungefähren Lagerungsdichte des Bodens wie folgt ermitteln:

$$\text{Spülgewicht [kg/dm}^3\text{]} = \frac{\text{Mudfaktor} + 2}{\text{Mudfaktor} + 1}$$

<b>Bohrlochvolumen</b>	<b>VB</b> [m <sup>3</sup> ]	=	0,785 x DN [m] x DN [m] x Länge [m]
<b>erforderliches Spülvolumen</b>	<b>VS</b> [m <sup>3</sup> ]	=	Bohrlochvolumen <b>VB</b> [m <sup>3</sup> ] x Mudfaktor <b>MF</b>
<b>zulässige Räumgeschwindigkeit</b>	<b>RG</b> [min/m]	=	$\frac{\text{Bodenvolumen } \mathbf{VR} \text{ [l/m]} \times \text{Mudfaktor } \mathbf{MF}}{\text{Pumprate [l/min]}}$
<b>Bodenvolumen Räumen (D<sub>1</sub> auf D<sub>2</sub>)</b>	<b>VR</b> [l/m]	=	(785 x D <sub>2</sub> [m] x D <sub>2</sub> [m]) - (785 x D <sub>1</sub> [m] x D <sub>1</sub> [m])
<b>Bentonitbedarf</b>	<b>BB</b> [kg]	=	Spülvolumen <b>VS</b> [m <sup>3</sup> ] x Bentoniteinsatz [kg/m <sup>3</sup> ]
<b>Bodenvolumen in Spülung</b>	<b>BS</b> [%]	=	$\frac{100}{\mathbf{MF} + 1}$
<b>Feststoffgehalt</b>	<b>FG</b> [%]	=	$\frac{\text{Spülgewicht } \mathbf{SG} \text{ [kg/dm}^3\text{]} - 1}{1,6} \times 100$
<b>theoretisches Spülgewicht</b>	<b>SG</b> [kg/dm <sup>3</sup> ]:	=	$\frac{\mathbf{MF} + 2,6}{\mathbf{MF} + 1}$ (Fels)
		=	$\frac{\mathbf{MF} + 2}{\mathbf{MF} + 1}$ (Lockergestein)
<b>Mudfaktor MF:</b>	Verhältnis von eingepumptem Spülvolumen zu auszutragendem Bodenvolumen in Standardböden 3:1 bis 5:1, in einigen Tonböden auch größer		

Tabelle 1 Basiskalkulationen Bohrspülung



Abb. 5 Ringapparat

Für die Lagerungsdichte des Bodens wird hierbei ein durchschnittlicher Wert für Lockergestein von etwa  $2,0 \text{ kg/dm}^3$  angenommen, die geringe Dichteerhöhung durch den Bentonitgehalt der Spülung wird vernachlässigt. Messungen des Spülgewichtes von frisch angemischter Spülung sind nur in Ausnahmefällen nötig; Messungen von Auslaufzeiten des Spülrückflusses sind generell unnötig, ebenso wie in den allermeisten Fällen die Messung des pH-Wertes der fertigen Bohrspülung.

Bei Bohrungen im Sand kann das Ausstragvermögen alternativ auch über den Sandgehalt [%] mit Hilfe eines Sandmessglases bestimmt werden (Abb. 4). Im Gegensatz zur Messung mit der Spülungswaage wird hierbei nur der Gehalt an Sand bestimmt, nicht der Gesamtstoffgehalt. Aus diesem Grund ist in Böden, die bindige Anteile enthalten, mit der Sandgehaltsmessung keine verläss-

liche Aussage zum Austragvermögen der Spülung möglich und somit die Messung ohne Relevanz. Qualitätssichernde Sandgehaltsmessungen sind nur bei Verwendung von Recyclinganlagen zur Bewertung deren Effektivität erforderlich.

Überlegenswert, und auch für eine Reihe von vermeintlich einfachen Bohrungen durchaus sinnvoll, ist die Erweiterung der Baustellenmessungen um die Messung mit dem Ringapparat. Mit diesem, im Brunnenbau seit Langem eingesetzten, sehr einfach zu handhabenden kleinen Gerät ist über die Messung der Wasserabgabezeit eine sehr gute Einschätzung des Wasserbindevermögens der Spülung möglich (Abb. 5). Das Gerät ist für einfache Horizontalbohrungen eine vollwertige Alternative zur Filterpresse, deren Einsatz hier häufig nicht praktikabel ist. In Böden, die erhöhte Anforderungen an das Filtrationsverhalten der Spülung stellen, kann mit dem Ringapparat sehr gut die Wirksamkeit von zugesetzten Filtratsenkerpolymeren nachgewiesen werden.

An die Erfordernisse von Standardbohrungen angepasste Protokollvordrucke für Baustellenmessungen können unter [info@phrikolat.de](mailto:info@phrikolat.de) angefordert werden. Die notwendigen Testgeräte zur Spülmessung und die Teststreifen zur Prüfung des Anmachwassers sind bei Phrikolat ebenfalls erhältlich.

### Ausnahmen

Sobald Bohrungen von der Standardausführung abweichen – d. h. zum Beispiel eine Spülungswiederaufbereitung mittels Recyclingsystemen erfolgt, Spezialspülungen verwendet werden, die Bohrung über einen längeren Zeitraum oder in kontaminierten Böden erfolgt und in einigen anderen Fällen – sind die vorstehend beschriebenen Basismessungen nicht mehr ausreichend. Die Qualität der wiederaufbereiteten und ggf. durch den Baugrund oder das Grundwasser beeinflussten Bohrspülung kann nur mithilfe spezieller Testgeräte, wie Viskosimeter oder Filterpresse, kontrolliert werden. Im Allgemeinen ist es bei derartigen Bohrungen sinnvoll, die Überwachung der Spülungsparameter einem mit den erforderlichen Testgeräten ausgestatteten Spülungstechniker oder Spülungsingenieur zu übertragen.

Abbildungen: Phrikolat Drilling Specialties GmbH

### Autor:

Dipl.-Ing. Oliver Knopf  
Phrikolat Drilling Specialties GmbH  
Reisertstr. 24  
53773 Hennef  
Tel.: 02242 93392-0  
Fax: 02242 93392-19

E-Mail: [o.knopf@phrikolat.de](mailto:o.knopf@phrikolat.de)  
Internet: [www.phrikolat.de](http://www.phrikolat.de)



**Phrikolat Drilling Specialties GmbH**

[www.phrikolat.de](http://www.phrikolat.de)  
[info@phrikolat.de](mailto:info@phrikolat.de)



**Phrikolat**  
Drilling Specialties GmbH

Reisertstraße 24      Tel. 02242 933920  
53773 Hennef          Fax 02242 9339219  
[www.phrikolat.de](http://www.phrikolat.de)      [info@phrikolat.de](mailto:info@phrikolat.de)

Phrikolat - Spülungssysteme für Profis



**Testgeräte**  
für  
**Bentonitsuspensionen**  
**Zementsuspensionen**  
in  
**Bohrtechnik und Spezialtiefbau**

Marsh-Trichter • Spülungswaage  
Kugelharfe • Sandgehaltmessgerät  
Viskosimeter • API Filterpresse  
u.v.m.