



Ochs Bohrgesellschaft mbH / Berliner Wasserbetriebe

Impulsgestützte Schüttgutkonsolidierung – Mechanische und hydraulische Veränderungen im Brunnenneubauprozess

Beim Brunnenneubau der Berliner Wasserbetriebe AÖR wird seit mehreren Jahren standardgemäß die Schüttgutkonsolidierung beim Einbringen der Ringraumschüttung sowie eine impulsgestützte Brunnenentwicklung ausgeführt. Neben der Herstellung einer finalen Lagerungsdichte des Filterkieses durch die Schüttgutkonsolidierung wird durch das nachgehende Entfernen von Feinstpartikeln aus der anstehenden Geologie sowie auch von Unterkorn aus der Ringraumschüttung sowohl die maximal mögliche Durchlässigkeit der eingebauten Filterkiese als auch ein homogener Übergang zum Grundwasserleiter geschaffen. Die Vielzahl der im Rahmen des Brunnenneubauprogramms der BWB neu errichteten Vertikalfilterbrunnen erlaubt zum einen eine Abschätzung hinsichtlich möglicher Setzungsbeträge, die im Laufe des Brunnenbetriebes auftreten können. Zum anderen soll durch einen Vergleich mehrerer Neubrunnen auf Basis wiederholter geophysikalischer und hydraulischer Messungen im Prozess des Brunnenneubaus eine Abschätzung erfolgen, ob und wenn in welchem Maße das Zuflussverhalten am Brunnen durch die verschiedenen technischen Maßnahmen beeinflusst wird.

Die Berliner Wasserbetriebe AÖR betreiben für die Versorgung von ca. 3,7 Mio. Einwohnern in und um Berlin rund 650 Brunnen. Neben regelmäßigen Regenerierungen der Brunnen werden durchschnittlich 30 nicht mehr leistungsfähige Altbrunnen pro Jahr neu errichtet. Im Laufe der letzten Jahre hat sich dabei ein Standard hinsichtlich Bohrverfahren, Ausbaumaterialien, Brunnenentwicklung und Ausrüstung entwickelt, der zuletzt durch die Schüttgutkonsolidierung ergänzt wurde [1]. Die Brunnen werden im Trockenbohrverfahren (Bohrendurchmesser DN 900 bzw. DN 1200) abgeteuft und mit Edelstahlvoll- und Wickeldrahtfilterrohren DN 400 bzw. DN 600 ausgebaut. Der Ringraum im Bereich der Filterstrecke wird mit Filterkies in zweischaliger Ausführung in Anpassung an die Geologie unter Anwendung der Schüttgutkonsolidierung verfüllt. Die doppelte Kiesschüttung hat sich aufgrund der starken Heterogenität der zumeist fluvialen bis glazifluvialen Sande des Grundwasserleiters im Warschau-Berliner Urstromtal beim Brunnenneubau der BWB manifestiert. Einfach ge-

schüttete Brunnen müssten demzufolge nur mit feinen Filtersanden oder aber mit häufig und in kurzen Intervallen wechselnden Schlitzweiten ausgebaut werden.

Die Lagerungsdichte im Schüttgutkörper

Beim Einspülen oder auch beim freien Schütten des Filterkieses in den Ringraum stellt sich eine lockere Lagerung ein. Bereits in Folge betriebsinduzierter Schwingungen durch den Pumpenbetrieb

monate nach sich ziehen. Die Erhöhung der Lagerungsdichte im Kieskörper bedingt im Wesentlichen eine Querschnittsverringerung der Porenkanäle. In der Folge werden Partikel, die bei lockerer Lagerung noch transportfähig waren, im sich verengenden Porensystem des Schüttgutes eingeschlossen, womit sich eine irreversible Schädigung des Brunnens ergibt. Gleichzeitig kann eine Verschiebung der vertikalen Differenzierung im Schüttgut resultieren, womit die Korngrößenmäßige Anpas-

» Mit der Anwendung der geophysikalischen Verfahren sollen räumliche Veränderungen der Lagerungsverhältnisse im kiesverfüllten Ringraum erfasst werden. «

kommt es zu Setzungen, die eine Veränderung des Porenraumsystems und damit häufig einen relativ schnellen Leistungsrückgang innerhalb der ersten Betriebs-

zung des Schüttgutes an die anstehende Geologie des Grundwasserleiters zurückgemacht wird. Ein weiteres Problem kann bei einer unzureichenden Über- ➔

Eigen
1/4 Seite hoch
90 x130

Stüwa
1/4 Seite hoch
90 x130

schüttung des Filterrohrbereiches entstehen. In Folge der Setzungen können sich Hohlräume zwischen der quasi stationären Ringraumabdichtung des Vollrohrbereiches und der Filterkiesschüttung ausbilden. Dadurch werden Wegsamkeiten für Material aus dem Grundwasserleiter geschaffen, die zu einer permanenten Sandführung im Brunnen führen können.

Somit ist es erforderlich, bereits beim Bau eines Brunnens einen Zustand zu erreichen, der keinen sekundären Veränderungen bezüglich der Lagerungsdichte im Schüttgutkörper unterliegt. Erreicht wird dies mit der Durchführung einer effektiven Schüttgutkonsolidierung. Bei den Berliner Wasserbetrieben wird diese standardmäßig durch gasdruckinduzierte Impulseinträge im hydropuls-Verfahren realisiert (Abb. 1). Dabei erfolgt die Konsolidierung abschnittsweise in Abhängigkeit der vertikalen Schüttgutdifferenzierung bis zum jeweiligen Setzungsstillstand (Abb. 2). Da alle Bohrungen grundsätzlich als Trockenbohrung niedergebracht werden, ist dabei die Standsicherheit des Bohrloches jederzeit gegeben.

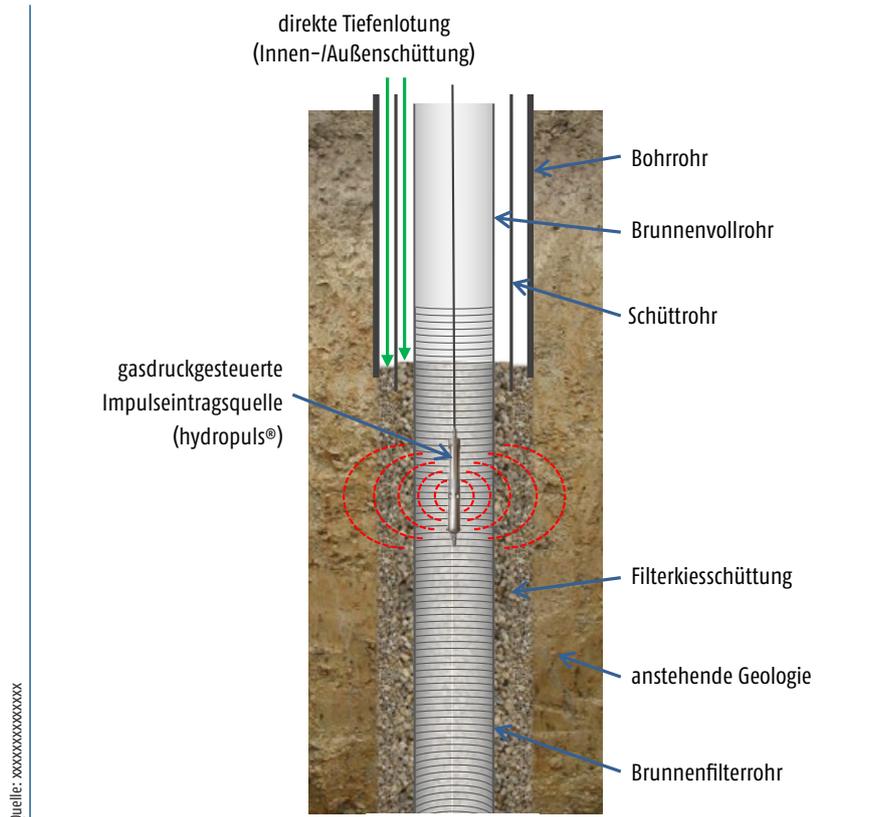


Abb. 1 – Prinzip der Schüttgutkonsolidierung mittels hydropuls beim Brunnenneubau

Mechanische Veränderungen im Filterkieskörper

Grundsätzlich ist festzustellen, dass keinerlei negative Beeinflussungen auf die Ausbauserhöhung durch die Ausführung einer Schüttgutkonsolidierung im hydropuls-Verfahren festgestellt werden konnten. Wesentlich ist, dass das eingesetzte Ausbaumaterial eine entsprechende Qualität aufweist. Bei der Verwendung von Edelstahl-Wickeldrahtfilter ist eine Schüttgutkonsolidierung problemlos durchführbar.

Zur Auswertung wurden zunächst die direkt ermittelten Setzungsbeträge pro

Brunnen aufsummiert und ins Verhältnis mit der jeweiligen Ringraumstrecke gesetzt. Die Ringraumstrecke ist dabei als Höhe der zweischaligen Filterkiesschüttung definiert. Generell fallen die Setzungen der Innenschüttung (IS) höher aus als die der Außenschüttung (AS). Insgesamt ergeben sich mittlere Setzungen von 10,8 % (IS) bzw. 5,9 % (AS) (Abb. 3). Einzelne Maximalwerte, die bis 24 % Setzung beschreiben, können auf gelöste Brückenbildungen im Filterkies zurückgeführt werden. Abhängigkeiten im Hin-

blick auf die eingebauten Filterkiesfraktionen, der Teufendifferenzierung der Filterkiesschüttung als auch der Länge des jeweils konsolidierten Ringraumes konnten nicht festgestellt werden. Auch im Hinblick auf den Ausbaudurchmesser und damit das deutlich höhere Ringraumvolumen zeigen sich keine signifikanten Unterschiede. Lediglich das Verfahren zum Filterkieseinbau spiegelt sich deutlich in der Setzung wieder. Höhere Setzungsbeträge zieht dabei das Einspülen des Filterkieses nach sich (Abb. 4).

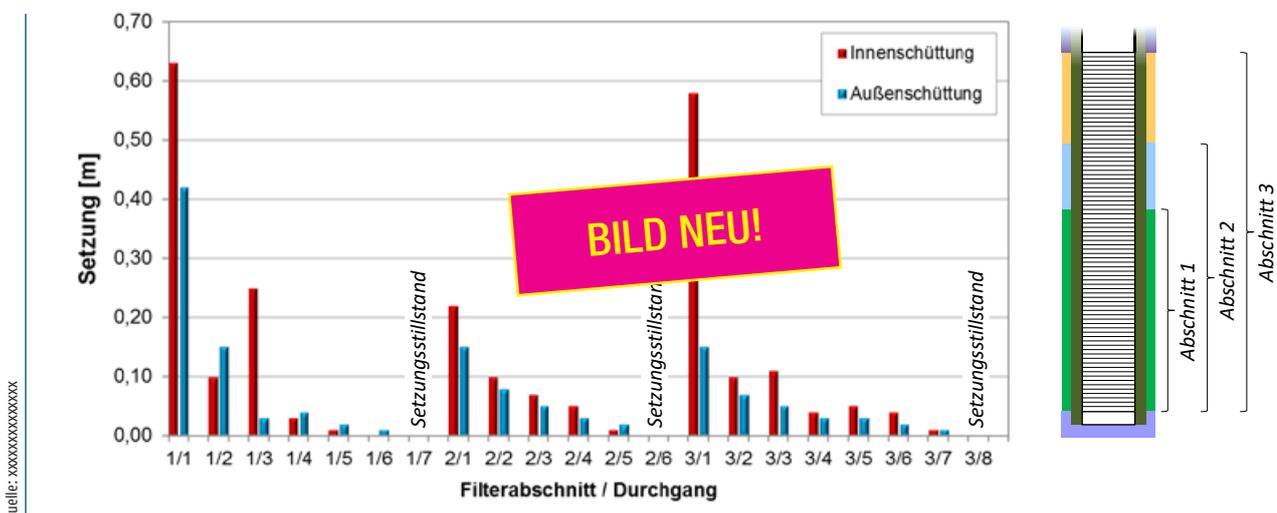


Abb. 2 – Beispiel zur Dokumentation einer Schüttgutkonsolidierung in drei Abschnitten entsprechend der teufendifferenzierten Außenschüttung an einem Brunnen mit 16 m Filterstrecke

Weiterführende geophysikalische Untersuchungen

Um den Einfluss einer Schüttgutkonsolidierung sowie einer impulsgestützten Brunnenentwicklung auf die hydraulischen Bedingungen am Brunnen zu evaluieren, wurden weiterführende geophysikalische Untersuchungen ausgeführt [2]. Die dafür ausgewählten Brunnen zeichnen sich dadurch aus, dass für die jeweilige Filterkiesschüttung unüblicher Weise keine vertikale Differenzierung notwendig ist. Ziel soll sein, die möglichen Auswirkungen durch die Schüttgutkonsolidierung und die nachgehende impulsgestützte Brunnenentwicklung qualitativ und möglichst auch quantitativ zu erfassen. Besonderes Augenmerk soll dabei auf die spezifische Ergiebigkeit, die Lagerungsdichte im Filterkies sowie auf die Zufluss-Charakteristik gelegt werden. Um diese drei wesentlichen Parameter zu erfassen, wurde in verschiedenen Bauphasen (vor und nach Schüttgutkonsolidierung, nach impulsgestützter Hochleistungsentsandung, nach Leistungspumpversuch) eine Kombination aus hydraulischen und geophysikalischen Untersuchungen zur Anwendung gebracht und miteinander verglichen.

Mit der Anwendung der geophysikalischen Verfahren sollen räumliche Veränderungen der Lagerungsverhältnisse im kiesverfüllten Ringraum erfasst werden. Hierbei stehen vor allem die Lagerungsdichte sowie die Homogenität der Filterkiesschüttung im Vordergrund. Zusätzlich sollen hydrodynamische Veränderungen hinsichtlich des Zuflussprofils, der spezifischen Ergiebigkeit der Brunnen sowie der Durchlässigkeit des Filters als auch des brunnennahen Ringraumes erfasst werden. Der Vergleich der Pumpversuche erfolgt auf Basis der jeweils sich ergebenden spezifischen Ergiebigkeit. Um eine Vergleichbarkeit zu sichern, wurde für den Zeitraum der Pumpversuche auf gleiche Förderbedingungen im Umfeld des jeweils betrachteten Brunnens geachtet.

Die Brunnenentwicklung bzw. -entsandung wurde mittels bewegter Funktionsstrecke, bestehend aus einer dichtungswirksamen Entnahmekammer, einem

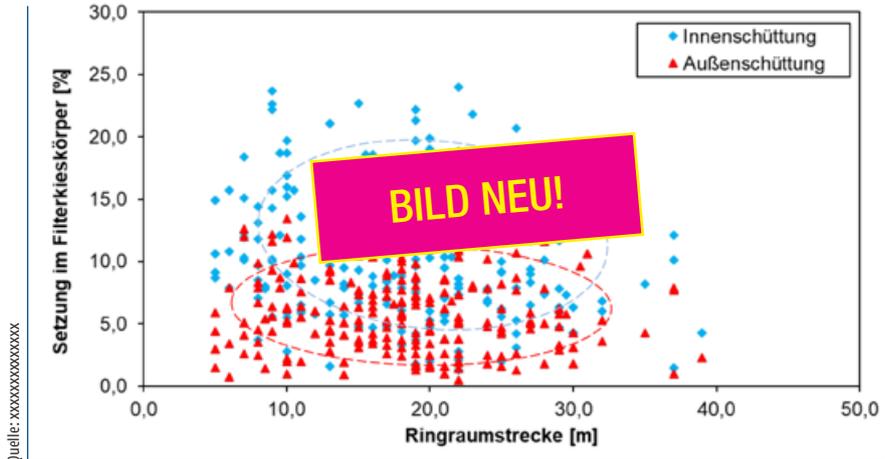


Abb. 3 – Ermittelte Setzungen im Filterkieskörper durch Schüttgutkonsolidierung mit Bezug zur Ringraumstrecke (n = 134). Die Ellipsen beschreiben graphisch abgeschätzte Kernbereiche zur jeweiligen Korrelation.

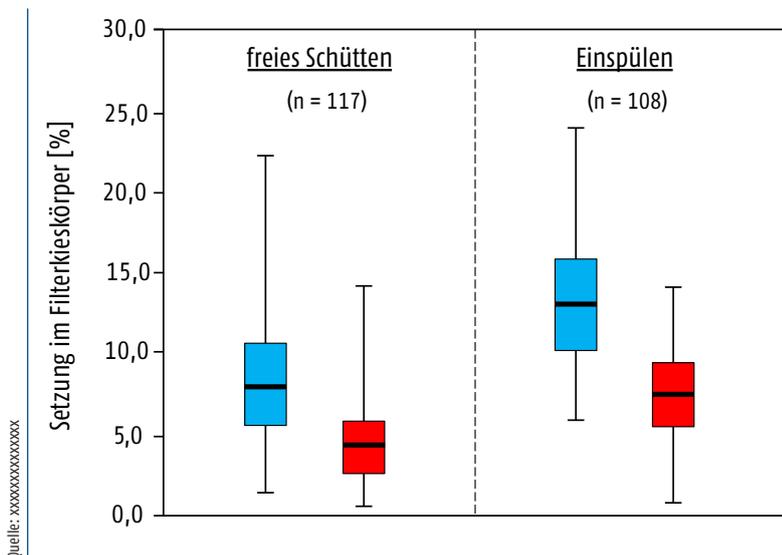


Abb. 4 – Ermittelte Werteverteilungen zu Setzungen im Filterkieskörper (blau: Innenschüttung, rot: Außenschüttung) durch Schüttgutkonsolidierung unter Berücksichtigung des zur Anwendung gebrachten Verfahrens zum Einbringen des Filterkieses.

Strömungsteiler mit einem gasdruckgesteuerten Impulsgenerator und einer gekammerten Unterwassermotorpumpe ausgeführt. Im Nachgang erfolgte eine Reinigung des Ringraumes mittels stehender Doppelkolbenkammer ohne Impulseintrag. Ziel dieser Brunnenentwicklung ist zum einen der anteilige Austrag anstehender Geologie, um einen homogenen Übergang zwischen dem Grundwasserleiter und der Filterkiesschüttung

zu schaffen. Zum anderen soll der nach der Schüttgutkonsolidierung setzungsstabile Filterkieskörper von Unterkorn befreit werden.

Hydraulische Veränderungen im Brunnenneubauprozess

Mit dem Einsatz der geophysikalischen Verfahren konnte nachgewiesen werden, dass die bei der Schüttgutkonsolidierung registrierten Setzungsbeträge →

Eigen
1/8 Seite quer

direkt auf Setzungen im Filterkieskörper zurückzuführen sind. Erkennbar sind sie im Vergleich der Logs zum Packer-Flowmeter, bei dem auf der gesamten Filterstrecke eine leicht herabgesetzte Durch-

lässigkeit im filterrohrnahen Bereich beschrieben ist (Abb. 5). Dies wird auch direkt durch den entsprechenden Abgleich der GG-Logs gezeigt (Abb. 6). Dass die Dichtezunahme tatsächlich auf eine Erhö-

hung der Lagerungsdichte zurückzuführen ist, wird dabei durch eine weitgehend geringe Porenraumabnahme (NN-Log) bestätigt.

Zur Charakterisierung der hydrodynamischen Verhältnisse an den Brunnen wurden Flowmeter-Befahrungen, hier dargestellt als vertikale Fließrate (FLOW.Q), ausgeführt. Bei allen untersuchten Brunnen zeigte sich, dass durch die Schüttgutkonsolidierung keine wesentlichen Veränderungen der Zuflussverhältnisse verursacht wurden. Dies belegt, dass der Zustrom aus dem Grundwasserleiter durch die anstehenden Sedimentschichten gesteuert und durch eine Schüttgutkonsolidierung, bei entsprechender Planung eines Brunnen, nicht beeinflusst wird. Dies ist sicherlich auch der Tatsache geschuldet, dass die Ringraumschüttung eines Brunnen eine weit größere Durchlässigkeit als das umgebende Gebirge aufweist.

Auch im Nachgang der impulsgestützten Entsandung wurden keine Veränderungen der grundsätzlichen Zuflussverhältnisse registriert. Auffallend ist jedoch, dass sowohl in den NN-Logs als auch den GG.D-Logs im Vorfeld deutliche Extremwerte reduziert erscheinen und auch gleichzeitig ein gleichmäßigerer Verlauf der Spuren erkennbar ist. Insgesamt ist damit eine Homogenisierung bezüglich der Porosität sowie der Lagerungsdichte zu verzeichnen. Grundsätzlich kann damit ein homogeneres Anströmen am Brunnenfilter und damit eine Vermeidung zusätzlicher Turbulenzen im direkten Einstrombereich des Wickeldrahtfilters angenommen werden.

Der Ergiebigkeitsverlauf der Brunnen im Zuge der verschiedenen Bauphasen wurde mit jeweils vier Pumpversuchen dokumentiert. Dabei wurden die standardisierten Klar- und Leistungspumpversuche (4-stufig, 8- bzw. 48-stündig) durch Kurzpumpversuche (1-stufig, 1-stündig) vor und nach der Schüttgutkonsolidierung ergänzt. Wesentliche Veränderungen bezüglich der spezifischen Ergiebigkeit der untersuchten Brunnen im Zuge der verschiedenen Bauphasen wurden nicht registriert. Ausgehend vom Kurzpumpversuch vor der Schüttgutkonsolidierung (entspricht 100 %) treten maximale Veränderungen von bis zu -4 % (entspricht $2,2 \text{ m}^3/\text{h}/\text{m}$) bzw. +0,8 % (entspricht $0,5 \text{ m}^3/\text{h}/\text{m}$) bis zum Leistungspumpversuch auf. Auffallend dabei ist auch, dass der direkte Vergleich der Kurvenverläufe der Kurzpumpversuche vor und nach der Schüttgutkonsolidierung

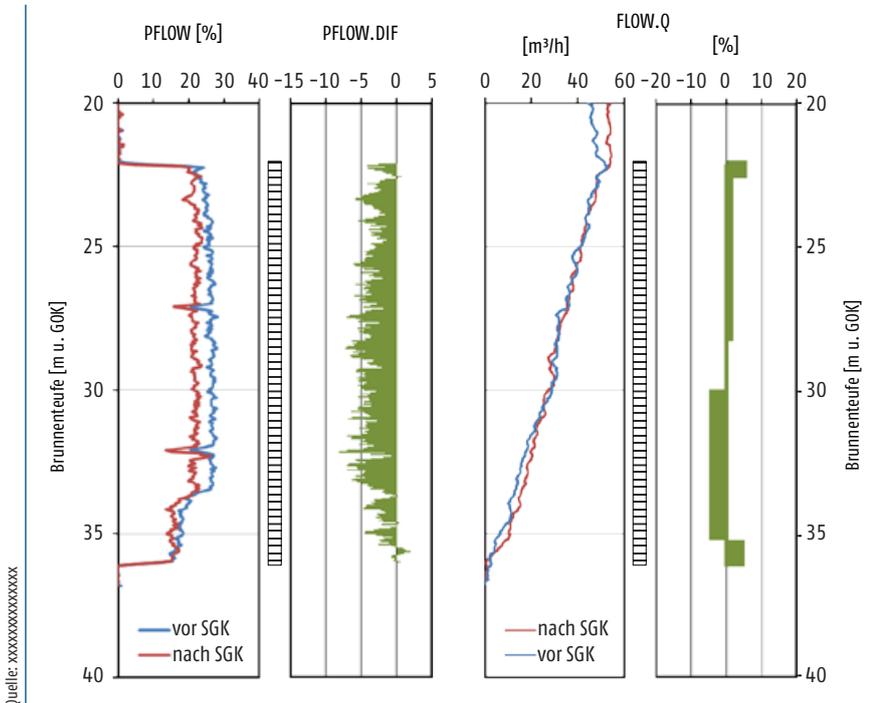


Abb. 5 – Exemplarische Auswertung des Packer-Flowmeter (PFLOW) als Einzel-Logs und als Differenzbetrachtung sowie Zuflussprofilierung (FLOW.Q) jeweils vor und nach Schüttgutkonsolidierung (SGK).

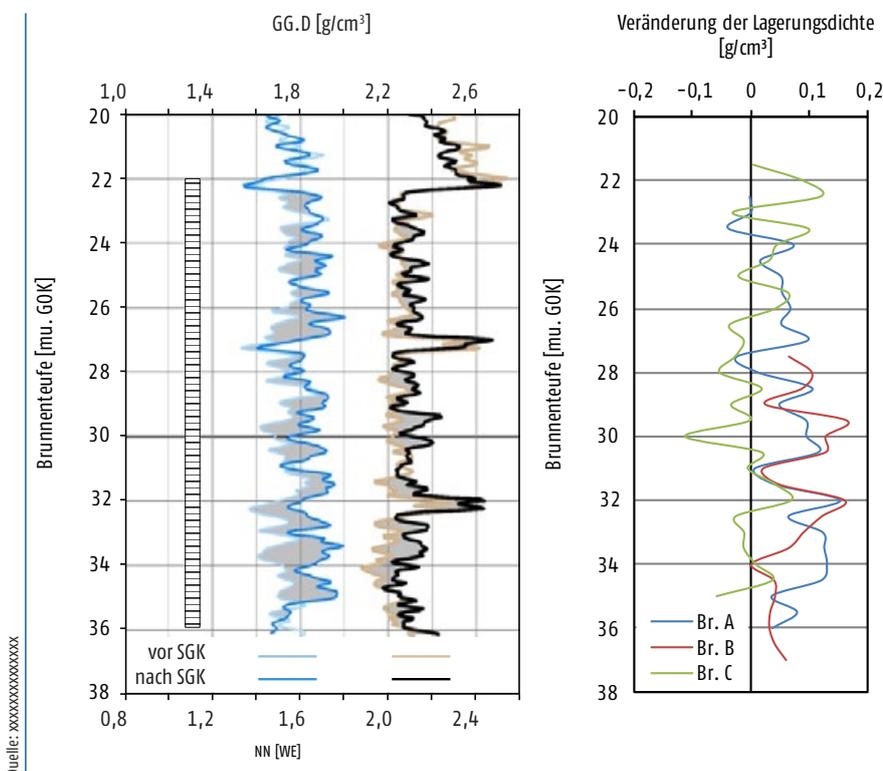


Abb. 6 – (links) Exemplarische Auswertung (Brunnen A) der Einzel-Logs NN (blau) und GG.D (braun bzw. schwarz) vor und nach Schüttgutkonsolidierung (SGK). Grauh hinterlegte Bereiche beschreiben eine leichte Porositätsabnahme (NN) bei gleichzeitiger Zunahme der Lagerungsdichte (GG.D). (rechts) Veränderung der Lagerungsdichte durch die SGK an den drei untersuchten Brunnen.

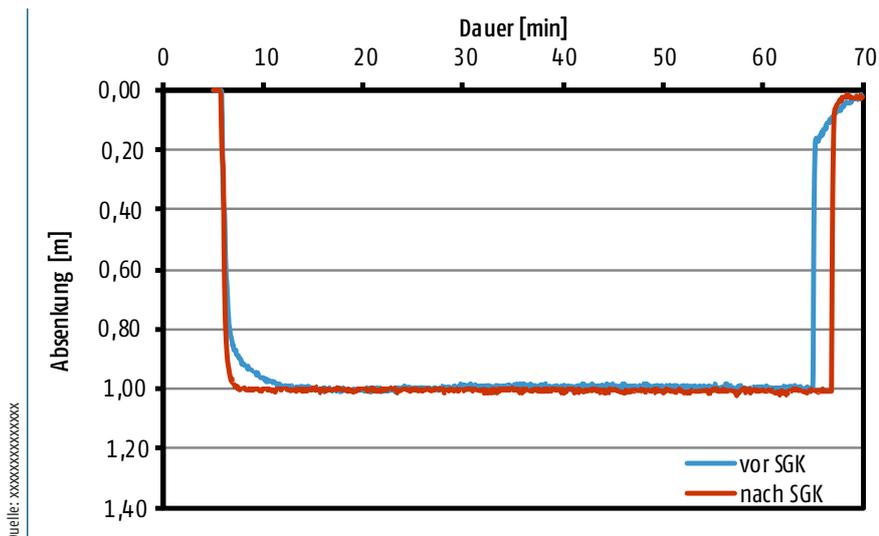


Abb. 7 – Exemplarischer Vergleich der Absenkungskurven vor und nach Schüttgutkonsolidierung. Die rote Kurve lässt eine bessere Anbindung der Filterkiesschüttung an die anstehende Geologie annehmen.

augenscheinlich eine günstigere Anbindung der Filterkiesschüttung an die Geologie annehmen lässt. Sowohl die Absenkungs- als auch die Wiederanstiegskurve zeigen eine deutlich schnellere Reaktion des Wasserspiegels (Abb. 7). Hierbei ist vermutlich die Impulswirkung auf die Bohrlochwand zu beobachten. Bei der Schüttgutkonsolidierung mittels hydropuls wird ein elastischer Impuls erzeugt. Aus der Kontraktion der Gasblase resultiert dabei eine erhebliche Sogwirkung, die bereits einen Austrag von Feinmaterial aus der Filterkiesschüttung verursacht. Anzunehmen ist daher, dass die verbesserte Anbindung auf einer Öffnung der Bohrlochwand beruht, die im Zuge des Bohrprozesses durch das Niederbringen der Bohrrohrtour und dabei verschlepptem Feinmaterial zugesetzt wurde. Dieses Phänomen tritt üblicherweise verstärkt nach dem Durchteufen toniger oder stark schluffiger Schichten im Hangenden auf.

Zusammenfassung

Die Untersuchungen an über 200 neu errichteten Brunnen haben gezeigt, dass durch die Schüttgutkonsolidierung Setzungen von rund 11 % (Innenschüttung) bzw. rund 6 % (Außenschüttung) auftreten. Somit werden die Empfehlungen des DVGW-Arbeitsblattes W 123 bestätigt, dass eine Überschüttung eines Filters ohne begleitende Schüttgutkonsolidierung grundsätzlich unter Berücksichtigung der ausgebauten Filterstrecke bzw. der Länge des kiesverfüllten Ringraumes geplant werden muss. Dabei sollte eine mögliche sekundäre Setzung von mindestens 10 % der Ringraumstrecke angesetzt werden. Eine Beeinflussung der Setzungs-

beiträge konnte nur durch die Art der technischen Ausführung des Schüttvorganges (Einspülen oder Freies Schütten) festgestellt werden. Ein setzungsstabiler Filterkieskörper wird jedoch nur durch die Ausführung einer Schüttgutkonsolidierung erreicht. Sekundäre Setzungen, wie sie durch betriebsinduzierte Schwingungen infolge des Pumpenbetriebes oder Impulseinträgen bei späteren Regenerierungen unvermeidlich auftreten, und damit verbundene irreversible Schäden, können somit vermieden werden.

Anhand weiterführender geophysikalischer und hydraulischer Untersuchungen an ausgewählten Brunnen konnte gezeigt werden, dass der Zustrom aus dem Grundwasserleiter bei einer guten Planung des Brunnens nur durch die anstehende Geologie beeinflusst wird. Die Schüttgutkonsolidierung bewirkt keine Änderung der Zuflussverhältnisse. Mit der impulsgestützten Brunnenentwicklung mittels bewegter, dichtungswirksamer Entnahmekammer werden im Nachgang eine Homogenisierung der Porosität und somit ein homogeneres Anströmen am Filter erzeugt. In der Gesamtheit konnte bestätigt werden, dass die registrierten Setzungsbeträge bei der Schüttgutkonsolidierung aus Setzungen im Filterkieskörper resultieren und nicht auf ein quasideformales Verhalten, wie bei Glaskugeln möglich, zurückzuführen sind. Neben der Setzungsstabilität ist folglich auch eine formstabile, homogene Kiesummantelung der Filterrohre gegeben. Vor diesem Hintergrund ist dabei die Qualität des eingesetzten Filterkiesmaterials ein wesentlicher Aspekt. Neben der in der DIN 4924 geforderten gleichmäßigen Korngrößen-

verteilung innerhalb der definierten Korngruppen einschließlich der technisch bedingten Über- und Unterkornanteile muss hierbei auch der mineralogischen Zusammensetzung besonderes Augenmerk gewidmet werden. Höhere mineralogische Nebenanteile geringerer mechanischer Stabilität können dabei eine sekundäre Bildung von zusätzlichen Unterkornanteilen nach sich ziehen.

Ein Brunnenneubau für die Trinkwasserversorgung stellt immer eine hohe investigative Maßnahme dar. Ziel muss es daher u.a. sein, hinsichtlich Qualität, Einbau und Bearbeitung von Filterkiesen im Bau- und Entwicklungsprozess höchsten Ansprüchen zu genügen und dabei auch langjährigen Betriebs- und Regenerieranforderungen Rechnung zu tragen.

Literatur

- [1] Mosch, S., Pietzner, O., Moche, R.: Impulsgestützte Schüttgutkonsolidierung beim Brunnenneubau, in: DVGW energie | Wasser-praxis, Ausgabe 12/2017, S. 96–99.
- [2] Mosch, S., Pietzner, O., Baumann, K., Goldbeck, J.: Impulsgestützte Schüttgutkonsolidierung – hydraulische Veränderungen im Brunnenneubauprozess, in DVGW energie | Wasser-praxis, Ausgabe 8/2020, S. 22–28.

Autoren

Dr. Stephan Mosch
 Oliver Pietzner
 Berliner Wasserbetriebe AöR
 Leykestr. 11–13
 12053 Berlin
 Tel.: 030 864442-156
 stephan.mosch@bwb.de
 www.bwb.de

Karsten Baumann
 Bohrlochmessung-Storkow GmbH
 Schützenstr. 33
 15859 Storkow
 Tel.: 033678 43630
 baumann@blm-storkow.de
 www.blm-storkow.de