Entsandungs- und Alterungsverhalten von Glaskugeln und Filterkiesen – Erkenntnisse für die Brunnenbaupraxis

Seit ihrer Einführung als Schüttgut im Brunnenbau im Jahr 2007 sind Glaskugeln Gegenstand intensiver Erforschung, aber auch kontroverser Diskussionen über Sinn und Notwendigkeit. In einer Reihe vergleichender Untersuchungen wurden zwischenzeitlich grundlegende Ergebnisse zur Funktion von Ringraumschüttungen sowie deren Systemzusammenhängen und Beeinflussungsfaktoren gewonnen.

Tabelle 1 – Ausbaudaten der Versuchsbrunnen 1 bis 6 auf dem Gelände des Bau-Ausbildungszentrums Rostrup (Länge der Filterstrecke: 4 m)

Brunnennummer	Typ der Ringraum-schüttung	eingebaute Körnung/ Kugelgröße [mm]	Länge des Schüttkörpers [m]
1	Glaskugeln (Gk)	1,7 bis 2,1	8,30
2	Filtersand (Fk)	1,0 bis 2,0	8,30
3	Glaskugeln (Gk)	2,0 bis 2,4	6,00
4	Glaskugeln (Gk)	2,4 bis 2,9	7,00
5	Glaskugeln (Gk)	2,85 bis 3,45	7,00
6	Filterkies (Fk)	2,00 bis 3,15	8,00

Abb. 1 – Ausbaudetail der Versuchsbrunnen auf dem Gelände des Bau ABC Rostrup

Abbildung: Treskatis

Der Einsatz neuer Verfahren oder Werkstoffe im Brunnenbau löst meist kontroverse Diskussion über Sinn und Notwendigkeit aus. Ein positiver Effekt dieser Diskussionen ist, dass sie nicht nur die produktbezogene Forschung anregen, sondern auch das Hinterfragen bisheriger, meist empirisch erworbener Arbeitsgrundlagen und Glaubenssätze.

Die physikalischen Eigenschaften der beiden unterschiedlichen Schüttguttypen wurden 2008 im Rahmen eines F&E-Vorhabens im Labormaßstab untersucht. Dabei ergaben sich deutlich messbare Unterschiede zwischen den Materialtypen bei den Eigenschaften Rundheit, Bruchlast, Bruchcharakteristik, Abriebfestigkeit und beim Anlagerungsverhalten gegenüber chemisch induzierten Eisenhydroxiden [1+2].

2011 wurden am Bau-Ausbildungszentrum in Rostrup Laborversuche und Versuche an einem Teststand durchgeführt. Diese Versuche dienten der Ermittlung hydraulischer Kenngrößen, die eine allgemeine hydraulische Charakterisierung der Schüttgüter für den Brunnenbau zulassen. Im Labor- und Technikumsmaßstab wurden für verschiedene Schüttguttypen die Porosität bei lockerer und dichter Lagerung, das Setzungsverhalten unter ungesättigten und gesättigten Bedingungen, die Durchlässigkeitsbeiwerte und Durchflussraten sowie die Systemdurchlässigkeit „Gebirge-Schüttung“ bestimmt [3+4].

Die Erkenntnisse aus den Labor- und Technikumsversuchen aus den Jahren 2009 bis 2011 wurden im Rahmen einer Masterarbeit an der Jade Hochschule Oldenburg an realen Brunnen auf dem Gelände des Bau ABC in Rostrup vertieft betrachtet [5].

Untersuchungsziel

In Fortführung der Labor- und Technikumsversuche aus dem Jahr 2011 erfolgten 2012 und 2013 am Bau ABC Rostrup vertiefende Betrachtungen an realen Brunnen. Im Fokus standen der Einfluss von Schüttgütern auf die Entwicklungs-/Entsandungsfähigkeit und die Verockerungsneigung von Glaskugeln in Relation zu vergleichbar gekörnten Filterkiesen. Die von Laborversuchen flankierten Felduntersuchungen lassen erste Bewertungen von vergleichbaren Kugel- und Kieskorngrößen hinsichtlich der Sensibilität der Schüttgutbemessungen, der spezifischen Ergiebigkeiten, des Entsandungs- und Alterungsverhaltens zu.

Ziele der nachfolgend vorgestellten experimentellen Untersuchungen waren einerseits eine Überprüfung der Laborergebnisse in der Brunnenbetriebspraxis und andererseits die Herausarbeitung von Vor- und Nachteilen der Schüttguttypen in Abhängigkeit vom Einsatzgebiet und von den brunnentechnischen Rahmenbedingungen. Parallel dazu erfolgten Säulenversuche mit natürlichen Kiesen und Glaskugeln zur Untersuchung des

SiLibeads® – lassen Brunnen länger sprudeln

INNOVATIONS

Glaskugeln als Ersatz für Filterkies in Brunnen

- SiLibeads Glaskugeln entsprechen den Anforderungen des § 31 LFGB und Artikel 3 der Verordnung (EG) Nr. 1935/2004, somit entfällt die Desinfektion vor der Befüllung
- Einkornschüttung ermöglicht optimale Anpassung der Filterschlitzöffnungen
- Kein Materialbruch beim Befüllen des Ringraumes, somit bleiben Filterschlitzöffnungen frei
- Harmonische Kugelform und einheitliche Kugelgröße verhindern Brückenbildung beim Befüllen des Ringraumes
- Klar- bzw. Entsandungspumpen nach dem Befüllen entfällt
- Höchstmöglicher Wasserdurchfluss auf Grund exakt gleicher Korngröße und Kugelform
- Eisen- und Manganverockerung reduziert sich um bis zu 40%, dadurch lassen sich Kosten für Brunnenregenerierarbeiten einsparen

SIGMUND LINDNER GmbH • Oberwarmensteinacher Str. 38 • D-95485 Warmensteinach
Phone (+49) 92 77 - 99 40 • Fax (+49) 92 77 - 9 94 99 • E-Mail: sili@sigmund-lindner.com
www.sili.eu

Gefördert vom Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie auf Grund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages

SiLi® SIGMUND LINDNER

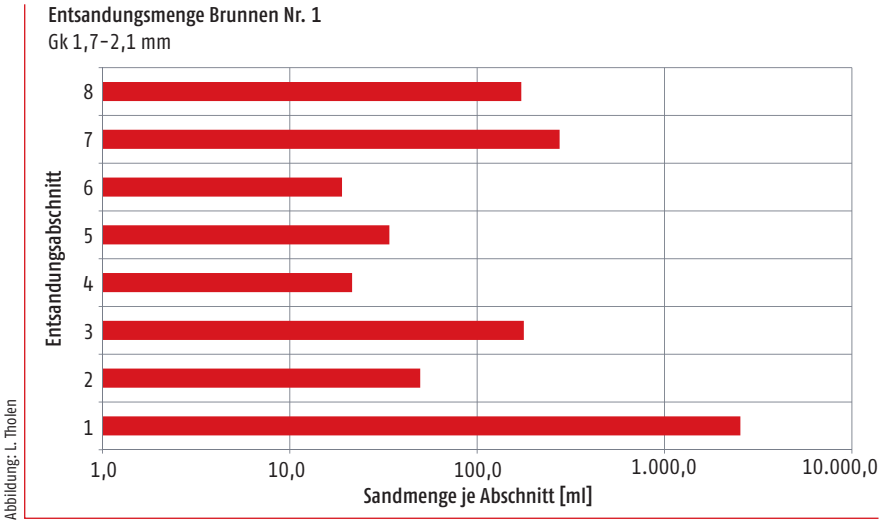

Abb. 2 – Sandmengen in den acht Entsandungsabschnitten (L = 0,5 m) des Brunnen B1 (Ausbau mit Glaskugeln 1,7 bis 2,1 mm); nach [5]

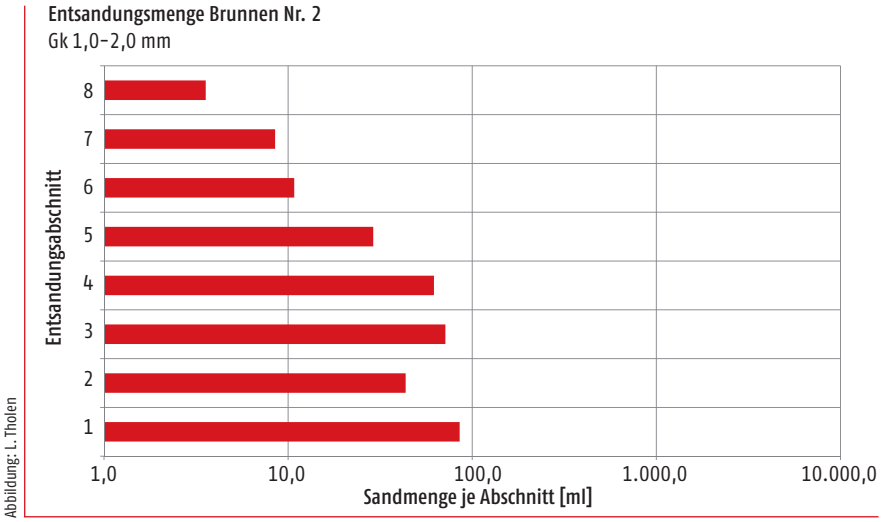

Abb. 3 – Sandmengen in den acht Entsandungsabschnitten (L = 0,5 m) des Brunnen B2 (Ausbau mit Filterkies 1,0 bis 2,0 mm); nach [5]

Tabelle 2 – Entsandungsmenge pro Abschnitt bei Brunnen B1 bis B6 sowie deren Gesamtsandmengen nach Erreichen eines Beharrungswertes bzw. des Abbruchkriteriums, nach [5]

Entsandungsmenge [ml]						
Entsandungsabschnitt in der Filterstrecke	B1: Gk 1,7-2,1	B2: Fk 1,0-2,0	B3: Gk 2,0-2,4	B4: Gk 2,4-2,9	B5: Gk 2,85-3,45	B6: Fk 2,0-3,15
1	2.541,5	85,5	1.099,5	2.713,0	335,0	3.350,0
2	49,7	43,5	431,5	832,0	202,0	1.126,0
3	177,5	71,5	264,0	1.205,0	65,0	930,0
4	21,5	62,0	267,0	840,0	80,0	655,0
5	34,0	29,0	141,0	650,0	50,5	135,0
6	19,0	10,8	154,0	1.188,0	204,0	485,0
7	275,6	8,5	291,0	785,0	162,0	220,0
8	172,0	3,6	332,0	1.910,0	124,0	86,0
Gesamtmenge des Brunnens	3.290,8	314,4	2.980,0	10.123,0	1.222,5	6.987,0

jeweiligen Verockerungsverhaltens. Die Ergebnisse der genannten Untersuchungen sind ausführlich in [5] beschrieben.

Entsandungsversuche an realen Brunnen

Im Bau-Ausbildungszentrum in Rostrup wurden sechs Vertikalfilterbrunnen in die quartären Fein- bis Mittelsande unter dem örtlichen Grundwasserstauer abgeteuft und mit PVC-Rohren ausgebaut (Abb. 1). Der Grundwasserleiter ist gespannt und durch eine reduzierte Grundwasserbeschaffenheit mit hohen Eisen- und Mangangehalten gekennzeichnet (7 bis 12 mg/l Fe gesamt und 1,2 bis 1,8 mg/l Mn gesamt). Der Standort Rostrup wurde für den Versuchsaufbau gewählt, da die Untergrundverhältnisse dort nur im geringen Umfang wechseln und somit verschiedene Brunnenausbauten bei in etwa gleichen hydrogeologischen Randbedingungen untersucht werden können.

Der Ausbau der Bohrungen mit einem Durchmesser von 324 mm erfolgte mit PVC Material DN 125 sowie mit Filterkiesen oder Glaskugeln in unterschiedlichen Schüttkorngrößen. Dabei wurden Körnungen bzw. Kugelgrößen verwendet, die sowohl nahe als auch bewusst über dem nach DVGW-Arbeitsblatt W 113 ermittelten Schüttkorn lagen (Tab. 1). Aus den mit erweiterten Siebsätzen erhaltenen Siebkurven ergaben sich nach DVGW-Arbeitsblatt W 113 Schüttkorngrößen ≤ 2 mm, für die eine DIN-Schüttung von 1 bis 2 mm abgeleitet wurde. Der Ungleichförmigkeitsgrad lag durchweg unter 2.

Die Brunnen wurden im Jahr 2010 niedergebracht und damals nur klar gepumpt, geophysikalisch vermessen und bis zu Versuchsbeginn im Herbst 2012 ohne Förderung stehen gelassen. Nach einer TV-Befahrung, die für alle Brunnen unterschiedlich starke weiche Beläge, bevorzugt im oberen Filtersegment, nachwies, erfolgte ein dreistufiger Pumpversuch nach DVGW-AB W 111. Im Anschluss wurden alle Brunnen mittels einer Doppelkolbenkammer (Packerabstand 0,60 m) entwickelt. Danach erfolgte ein weiterer Pumpversuch mit den Förderstufen 8, 12 und 16 m³/h. Im Zuge der Entwicklungsarbeiten ergaben sich folgende qualitative Erkenntnisse bei den sechs untersuchten Brunnen:

- Die bei ca. 9 m³/h über die Kammer geförderten Sandmengen waren im Trend bei den Filterkiesbrunnen geringer als bei den Glaskugelbrunnen (Tab. 2 und Abb. 2+3); der Sandaustrag nimmt mit der Kugel- bzw. Korngröße des jeweiligen Schüttguttyps erwartungsgemäß zu.

- Im Filterkiesbrunnen 6 mit der Bemessungsschüttung 2,0 bis 3,15 mm wurde trotz Konformität mit dem Schüttkorn (ermittelt mit dem Norm-Siebsatz) beim Pumpversuch nach der Entsandung ein unerwartet starker Sanddurchbruch festgestellt, dessen Ursache vermutlich auf eine Fehlbestimmung des Kennkorns (z. B. aufgrund des Einsatzes eines Siebsatzes mit einer zu weitständigen Prüfsiebgröße) oder Fehler bei der Bodenprobennahme zurückgeführt wird.
- Bereits durch mäßige Impulseinträge beim „bewegten" Kolben (Hubhöhe 0,5 m) wurde eine Zunahme des Sandaustrags unabhängig vom Schüttguttyp festgestellt. Eine stabile Beharrung der Sandausträge konnte jedoch nicht in allen Brunnen bzw. in allen Behandlungsstufen entlang der 4 m langen Filterstrecken erreicht werden, was auf die versuchstechnisch gewollte „Überbemessung" der Schüttung in den Brunnen 4 bis 6 zurückzuführen ist.
- Die Brunnen 1 und 2 mit den feinen Schüttungen (s. Tab. 1) erreichten beim Pumptest nach der Entsandung erwartungsgemäß bei allen Förderstufen die vorab definierte Sandfreiheit von < 0,1 g/m³. Am Brunnen 3 wurde erst bei der höchsten Förderstufe (16 m³/h), die über der für den Standort definierten Betriebsförderung von 12 m³/h lag, ein Sanddurchbruch erzielt.
- Die gröber geschütteten Glaskugelbrunnen 4 und 5 konnten nicht sandfrei hergestellt werden, da deren Schüttung erwartungsgemäß bei der Betriebsfördermenge nicht stabil gegenüber Feststoffeinträgen aus dem Grundwasserleiter ist.
- Der Kiesschüttungsbrunnen 6 zeigte bei 12 m³/h einen Sandgehalt von < 0,1 g/m³, bei 16 m³/h Förderleistung erfolgte analog zum Glaskugelbrunnen 3 ein Sanddurchbruch.

Als Schlussfolgerungen aus den Versuchen an den sechs Brunnen sind folgende Erkenntnisse und Nachweise abzuleiten:

Die spezifische Ergiebigkeit in den Glaskugelbrunnen fällt bei den standörtlichen Bodenverhältnissen etwa 15 % höher aus als bei den Vergleichskorngrößen der DIN-Filterkiese (Abb. 4). Diese Relation ändert sich auch nach der Entwicklung der Brunnen nicht.

Die Systemdurchlässigkeiten der Brunnen werden durch die Entsandung erwartungsgemäß gesteigert, wobei Filterkiesbrunnen 2 den größten Zuwachs erfuhr. Jedoch sind die Systemdurchlässigkeiten der Glaskugelbrunnen insgesamt eine Zehnerpotenz höher als die der Filterkiesbrunnen.

Die Brunnen 1 und 2 entsprechen der Schüttkornausstattung standorttypischer Brunnen in Rostrup. Dies wurde durch die technische Sandfreiheit am Ende der Entwicklungsarbeiten durch den Pumptest nach DVGW-AB W 119 nachgewiesen.

Die Brunnen 4 bis 6 sind gegenüber dieser Schüttkornausstattung für $Q_{Betrieb}$ trotz einer nach DVGW-AB W 113 bestimmten Schüttung von 2 bis 3,15 mm als „überbemessen" einzustufen.

Die ausgetragene Sandmenge steigt mit der Kugel- bzw. Korngröße an und erreicht in den bearbeiteten Abschnitten der jeweils 4 m langen Filterstrecken unterschiedliche Beträge.

Die bei der Entsandung ausgetragenen bestimmten Korngrößen lagen bei dem „korrekt" bemessenen Filterkiesbrunnen (Brunnen 2) mit Partikeln bis zu 0,2 mm Größe (< 5 % der Masse) unter der nach W 113 ermittelten Kennkorngröße von 0,36 mm; beim Glaskugelbrunnen 1 ergab sich ein geringer Durchbruch von Körnern bis maximal 0,5 mm (ca. 5 % der Masse). Die übrigen Brunnen zeigten Sanddurchbrüche mit steigenden Anteilen der hier gewählten Prüfkorngröße von 0,5 mm (13 bis 17 % bei Brunnen 4 und 5).

Die Durchgangskorngröße steigt bei dem feinkörnigen Bodentyp (C_u < 2) in Funktion der Kugel- bzw. Korngröße der Schüttung an.

Bei den nach DVGW AB W 113 „überbemessenen" Glaskugelschüttungen ergaben sich Durchbrüche von Sandkörnern, die größer als das Kennkorn sind. Bei der gröberen Kiesschüttung nicht so deutlich erkennbar.

Bei Glaskugelschüttungen können bei „korrekter" Bemessung der Kugelgröße Durchbrüche bis zum Kennkorn der Sieblinie erwartet werden. Den Nachweis dieses Ansatzes liefert auch die Entsandung eines kombinierten Förder- und Schluckbrunnens in alluvialen Sanden und Kiesen in Phoenix, Arizona. Der Brunnen wurde aus Budgetgründen nur teilweise mit Glaskugeln geschüttet. Der Rest wurde mit Kies der dort üblichen Körnung verfüllt. Die Glaskugelgröße korrespondiert mit der Kiesabstufung. Während der Bereich der Kiesschüttung, bei insgesamt geringerem Austrag, auch gröberes Korn, vermutlich aus dem Schüttgut selbst, liefert, stoppt der Sandaustrag in der Glaskugelpackung bei der Kennkorngröße. Der Durchmesser des Kennkorns entspricht exakt dem bei dichter Lagerung

Bei Filterkiesen beginnt ein verockerungsbedingter Druckanstieg früher als in analogen Glaskugelschüttungen. «

der Kugelpackung und zeigt, dass Glaskugeln ohne zusätzliche Maßnahmen in diese Bettungskonfiguration gebracht werden. (Abb. 5+6) [6].

Fehlbemessungen und Sanddurchbrüche können nur durch möglichst exakte Probennahmen und mit einem in den feineren Korngrößen zwischen 2,0 und 0,063 mm stufenweise erweiterten Siebsatz bzw. genaueren Messverfahren, (z. B. Camsizermessung) vermieden werden.

Filterkiese weisen in Bezug auf die Sandfreiheit und die Filterstabilität scheinbar eine höhere „Toleranz" gegenüber Fehlbemessungen und Ausführungsfehlern im Brunnenbau auf. Diese höhere „Toleranz" des Filterkieses gegenüber handwerklichen Fehlern wird aber durch die erhöhte Kolmationsgefahr und die damit verbundene geringere Ergiebigkeit der Filterkiese im Vergleich zu Glaskugelschüttungen bei vergleichbaren Brunnen aufgewogen.

Laborversuche zur Bestimmung des Druckaufbaus bei einer chemischen Verockerung

Die Ausfällung von Eisen- und Manganoxiden in Bohrbrunnen durch Oxidation in Verbindung mit mikrobiellen Einflüssen ist häufig eine unvermeidliche Begleiterscheinung des Förderbetriebs. Die Folge dieser sogenannten „Verockerung" ist, unabhängig von ihrer Ursache, eine allmähliche Zunahme der Druckverluste am Brunnen in Folge der Verstopfung der durchflussfähigen Poren in der Ringraumschüttung mit Ablagerungen und Abscheidungen von Eisen- und/oder Manganoxiden sowie eine Abnahme in der spezifischen Ergiebigkeit des Brunnens.

Im Bau-ABC in Rostrup wurden Laborexperimente zur Ermittlung der Druckverluste infolge einer künstlich hervorgerufenen chemischen Verockerung (induziert durch einen Sauerstoffeintrag in das ansonsten reduzierte, eisen- und manganhaltige Rohwasser eines Brunnens) in unterschiedlichen Schüttguttypen und Körnungen durchgeführt. Dabei wurden verschiedene Filterkiese und Glaskugelfraktionen direkt miteinander verglichen (Tab. 3). Mikrobiologische Aspekte der Verockerung und der Entfernung der Ablagerungen durch handelsübliche Regeneriermittel wurden im Rahmen dieser Experimente nicht untersucht [7]. Von der Zielsetzung gleiche und vom Aufbau ähnliche Versuche wurden ungefähr im gleichen Zeitraum in Berlin von einem Team aus verschiedenen Institutionen in Koordination durch das Kompetenzzentrum Wasser Berlin gGmbH durchgeführt [8].

Für die Druckverlustbestimmung in verschiedenen Materialien wurde eine Darcy-Versuchsanordnung gewählt, mit der bei früheren Untersuchungen die Durchlässigkeit der Schüttgüter bei verschiedenen Lagerungsdichten bestimmt wurde [5]. Der Versuchszylinder wurde mit dem jeweiligen Schüttgut ca. 50 cm hoch befüllt und nicht zusätzlich verdichtet. Der eingebaute Filterkies wurde vorher trocken gesiebt, damit das Unterkorn des Filterkieses das feinmaschige Sieb nicht verstopft, welches der Filterschüttung Halt gibt. Die Maschenweiten des Siebes wurden bei jedem Versuchsdurchgang an die Größe der Filterschüttung angepasst, um den Druckverlust zu mindern.

Das Durchlaufwasser wurde aus einem Brunnen in der Versuchshalle entnommen und zur Beschleunigung der chemischen Verockerung mit Sauerstoff künstlich angereichert. Die Pumpe wurde auf 2 bar eingeregelt, um die Anlagensicherheit zu gewährleisten [7]. Der Druckverlauf in der Schüttung wurde bei konstant

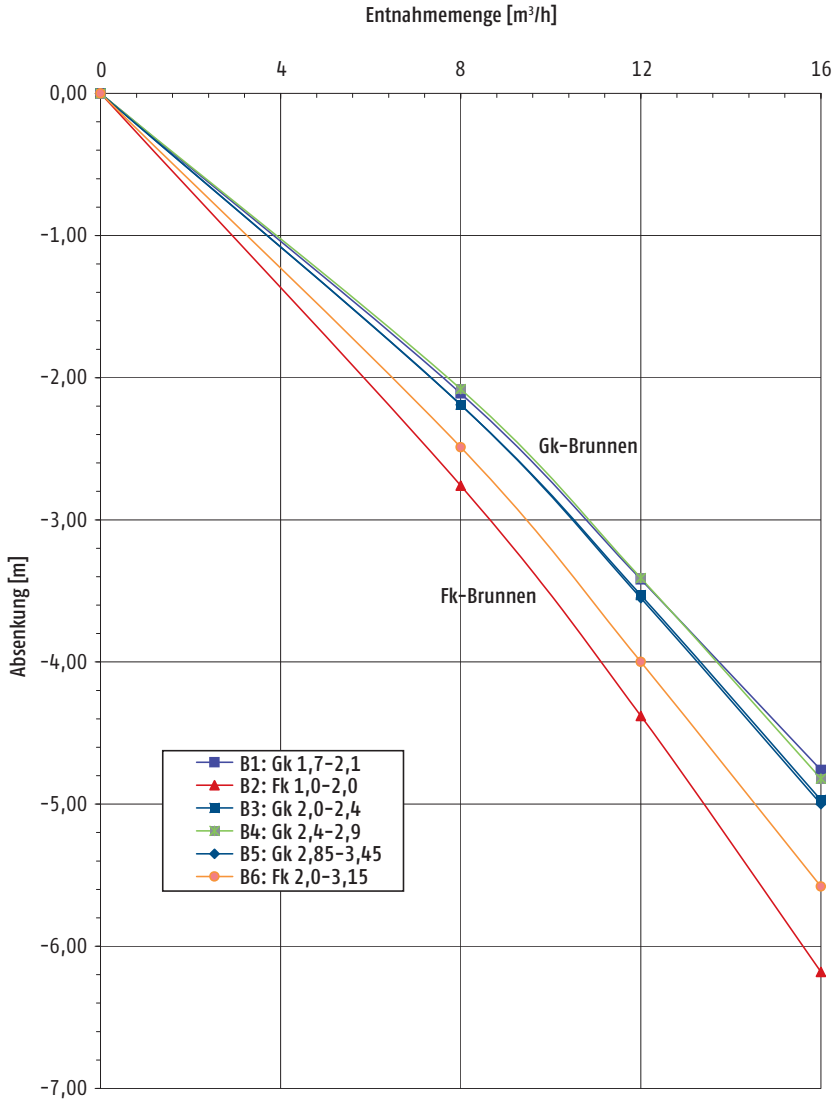

Abbildung: C. Treskatis

Abb. 4 – Ergiebigkeitskurven der Brunnen 1-6 vor der Entsandung; aus [5]

gehaltenem Durchfluss mit Datenloggern aufgenommen und für die untersuchten Schüttgüter in Abbildung 7 dargestellt. Der Anstieg des Drucks im Versuchskörper erfolgte in den verschiedenen Schüttgütern zu unterschiedlichen Zeitpunkten. Nach Erreichen des versuchstechnisch eingestellten Druckniveaus von 2 bar wurde die Plateauphase zu unterschiedlichen Zeitpunkten erreicht. Die zeitliche Verschiebung ist dabei vom Schüttguttyp und von der Körnung abhängig. Die Zeitdifferenz zwischen den Druckaufbaukurven ist nach Erreichen des Wendepunkts vor der versuchstechnisch bedingten Plateauphase in etwa konstant.

Versuchsergebnisse

Zu Beginn des Versuchs wurden bereits ohne chemische Verockerung geringe Druckunterschiede zwischen den Materialtypen festgestellt, wobei Glaskugeln den geringsten Anfangsdruck aufwiesen.

Die chemische Verockerung ist in allen untersuchten Schüttguttypen sehr ausgeprägt und optisch deutlich erkennbar.

Es bildeten sich im Zentrum der Versuchssäule verbackene Agglomerate aus Eisenoxiden und Glaskugeln bzw. Filterkies. Die Glaskugeln waren wie die Filterkieskörner zunächst mit einer dünnen Schicht mit Manganoxiden ummantelt und in einer Matrix aus Eisenoxiden eingelagert [7].

Tabelle 3 – Auswahl der untersuchten Schüttgüter zur Bestimmung der Druckverlaufskurven infolge einer induzierten chemischen Verockerung

Kies [mm]	Glaskugeln [mm]
0,70 – 1,25	0,75 – 1,00
1,00 – 2,00	1,70 – 2,10
2,00 – 3,15	2,40 – 2,90

Aus den bisher durchgeführten Versuchen ist abzuleiten, dass in den Filterkiesen ein verockerungsbedingter Druckanstieg grundsätzlich früher beginnt als in den analogen Glaskugelschüttungen. Diese Schlussfolgerung gilt für den direkten Vergleich gleich großer Schüttgüter.

In den Glaskugelschüttungen beginnt unter vergleichbaren Randbedingungen der Druckanstieg je nach Kugelgröße nach ca. 40 bis ca. 98 h; die vergleichbaren Filterkiese zeigten einen Druckanstieg bereits nach ca. 24 bis ca. 70 h. Die Verockerung der Glaskugeln beginnt im Labor um den zeitlichen Faktor 2 bis 2,5 später.

Die Druckaufbaukurven steigen nach Erreichen des versuchsbedingten Wendepunktes (die Plateauphase ist durch die Druckbegrenzung der Pumpe bedingt und ist nicht mit dem realen Brunnenbetrieb zu vergleichen) bis zur versuchsbedingten Druckbegrenzung von 2 bar bei allen Kugelgrößen nahezu parallel mit in etwa gleicher Steigung an.

Der Verlauf der Druckaufbaukurven in der ersten Phase bis zum versuchsbedingten Wendepunkt ist nach diesen Messergebnissen von der Materialart und der Korngröße der Schüttung abhängig und wird in ihrem Ausmaß von der Wasserbeschaffenheit maßgeblich gesteuert.

Den Einfluss des Versuchsaufbaus auf die zeitliche Entwicklung des Druckaufbaus zeigte eine Wiederholung des Versuchs mit der Kugelgröße Gk 1,7 bis 2,1 mm. Der Erstversuch mit der Gk-Schüttgröße 1,7 bis 2,1 mm ergab einen Druckanstieg nach ca. 160 h. Der Wiederholungsversuch am Ende der gesamten Versuchsreihe zeigte einen Druckan-

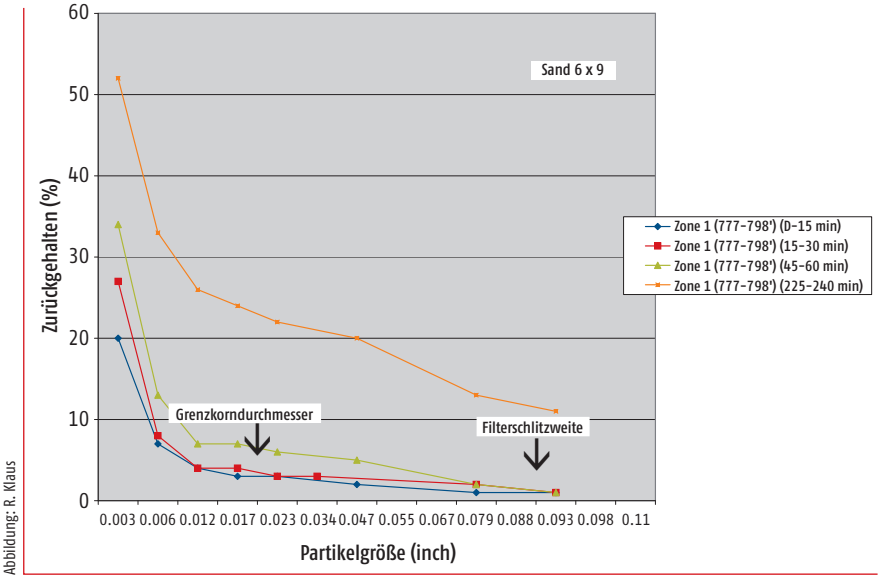

Abb. 5 – Kornverteilung des Austrags aus dem Bereich der Kiesverfüllung

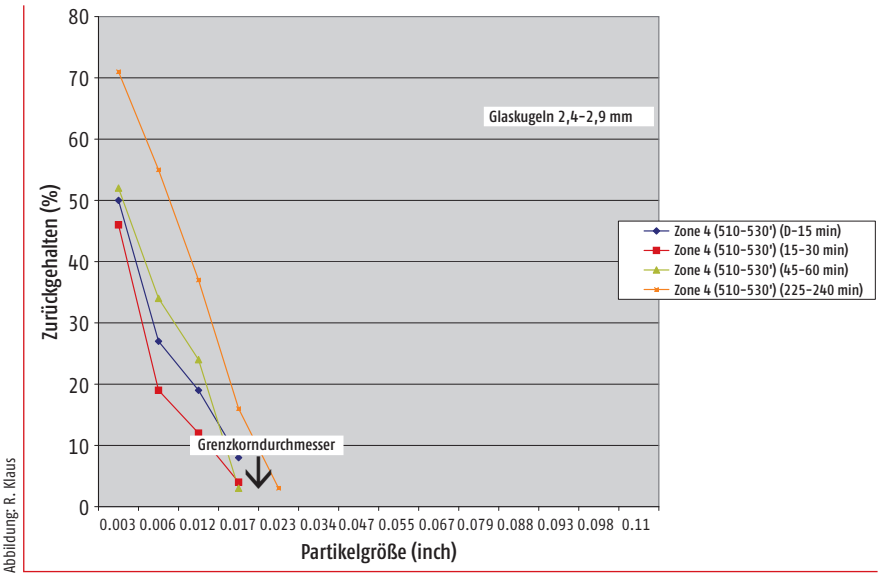

Abb. 6 – Kornverteilung des Austrags aus dem Bereich der Glaskugelverfüllung

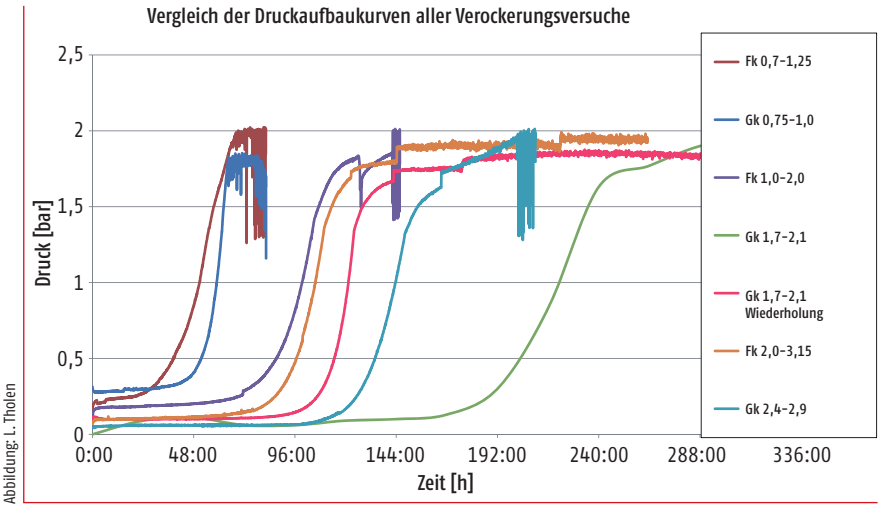

Abb. 7 – Druckaufbaukurven in den untersuchten Schüttgütern bei einer induzierten chemischen Verockerung; nach [5+7].

stieg bereits nach ca. 80 h. Eine der möglichen Ursachen dieses zeitlichen Unterschiedes wird auf die im Versuchsablauf zunehmende Verockerung der Zuführungsleitung und die da-durch vermutlich ausgelösten Abrisse und Verlagerungen von Verockerungsprodukten in die Schüttgutzylinder gesehen, die zu einem im Vergleich zum Erstversuch frühzeitigerem Druckaufbau führten [6].

Die Ergebnisse und Schlussfolgerungen der Untersuchungen in Berlin unterscheiden sich von den Ergebnissen aus Rostrup, vor allem was den Vergleich zwischen Glaskugeln und Sand bzw. Kies im Verockerungsverhalten betrifft [8]. Übereinstimmung in den Untersuchungsergebnissen besteht in den hydraulischen Eigenschaften und Kennwerten bei einem direkten Vergleich von entsprechend gekörnten Filtersanden und Glaskugeln. Hier korrespondieren die jeweiligen Körnungen bei den untersuchten Schüttgutmaterialien und bestätigen die Untersuchungen in Rostrup [1+2].

Bezüglich der Akkumulationsraten und des Regenerierpotenziales schneiden jedoch in der Berliner Studie Glaskugeln vergleichsweise schlechter als die dort untersuchten Fraktionen von Filtersand und Kies ab [8]. Die besten Ergebnisse lieferte die untersuchte Körnung eines Filterkieses. Bei der Bewertung und Schlussfolgerung ist jedoch zu berücksichtigen, dass die in Berlin untersuchten Filtermaterialien verschiedene Größenspektren aufwiesen. Die mit Abstand größte Körnung wies Kies der Gradierung 5,6 bis 8,0 mm auf, während Sand und Glaskugeln nur mit der Gradierung 1,25 bis 1,60 bzw. 1,65 mm in die publizierten Vergleichsuntersuchungen einbezogen wurden [8].

Ein direkter Vergleich der Ergebnisse ist wegen der methodisch unterschiedlichen Versuchsansätze nicht durchführbar. Die Materialien müssen wegen der, auch von den Autoren in [8] zitierten, Größenabhängigkeit der hydraulischen Parameter zwingend innerhalb der entsprechenden Größenklasse untersucht werden [7].

Zusammenfassung

Experimentelle Untersuchungen im Labor- und Geländemaßstab zeigten, dass die Bemessung der Kugelgröße auch bei Sedimenten mit geringen Ungleichkörnigkeiten unproblematisch ist, wenn die Bodenverhältnisse schichtspezifisch untersucht und eine mit erweitertem Siebsatz aufgestellte Korngrößenverteilung zur Kenn-

kornbestimmung verwendet wurde. Um eine Sandführung zu vermeiden, ist eine exakte Kugelgrößenbestimmung nach DVGW-W 113 erforderlich. Das gilt auch für Kiesschüttungen, nur wird die Sandführung bei einer Fehlbemessung durch die Einlagerung bzw. Kolmation von mobilisierbarem mineralischem Korn aus dem Grundwasserleiter in die Ringraumschüttung verschleiert. Bei Glaskugelschüttungen ist dieser Prozess oft im Kamerabild direkt optisch erkennbar.

Die Verockerung von Glaskugelschüttungen verläuft im Labormaßstab im Vergleich zu gleich großen Filterkiesen zeitlich verzögert. Die daraus ableitbare „Verockerungsgeschwindigkeit" als Maß für die Zunahme des Differenzdrucks im Versuchskörper über die Zeit wird durch die glatten Oberflächen der Glaskugeln und die im Vergleich zum Filterkies relativ gleichmäßige Porenraumgeometrie reduziert. Die weitere Druckaufbaucharakteristik der Glaskugelpackungen verläuft im Laborversuch nach Durchgang eines versuchstechnisch bedingten Wendepunktes parallel zur der Druckaufbaukurve der Filterkiese. Der Druckaufbau war bei den Laborexperimenten aus sicherheitstechnischen Gründen durch eine Frequenzregelung der Pumpe bei konstantem Fördervolumenstrom limitiert, die im realen Brunnen so nicht vorkommt. In realen Brunnen nimmt der Differenzdruck in der Schüttung im Vergleich zu den Druckaufbaukurven aus den Laborexperimenten bei rückläufigen Fördermengen immer weiter zu.

Glaskugeln verhindern eine Verockerung der Schüttung in Brunnen nicht, sie verzögern den Druckaufbau und den Rückgang der Ergiebigkeit. Die Befunde aus den Experimenten bestätigen, dass die anfänglich unterschiedlichen Materialeigenschaften der untersuchten Schüttkorntypen mit zunehmender Betriebszeit sehr stark von den individuellen Alterungsprozessen im Brunnen überlagert werden.

Danksagung
Die Autoren danken der Firma Sigmund Lindner, Warmensteinach, für die finanzielle und materielle Unterstützung sowie die langjährige Förderung der praxisorientierten Forschung an Glaskugeln und Filterkiesen. Ein großer Dank geht auch an das Bau-Ausbildungszentrum in Rostrup für die technische und personelle Unterstützung der Arbeiten.

Literatur
[1] Treskatis, C., Danhof, M., Dressler, M. & Herrmann, F. (2010): Vergleich ausgewählter Materialcharakteristiken von Glaskugeln und Filterkiesen für den Einsatz in Trinkwasserbrunnen. DVGW energie|wasser-praxis (ewp) 1/2010: 26 – 32.
[2] Treskatis, C. (2011): Einsatz von Glaskugeln in Trinkwasserbrunnen – bisherige Forschungsergebnisse. – in: bluefacts – International Journal of Water-Management: 110-116.
[3] Treskatis, C., Tholen, L. & Klaus, R. (2011): Hydraulische Merkmale von Filterkies und Glaskugelschüttungen im Brunnenbau – Teil 1. DVGW energie|wasser-praxis (ewp) 12/2011: 58 – 65.
[4] Treskatis, C., Tholen, L. & Klaus, R. (2012): Hydraulische Merkmale von Filterkies und Glaskugelschüttungen im Brunnenbau – Teil 2. DVGW energie|wasser-praxis (ewp) 01/2012: 40 – 43.
[5] Tholen, L. (2013): Vergleichende Untersuchungen an Filterkies- und Glaskugelschüttungsbrunnen. – Masterarbeit an der Jade Hochschule: 94 S., Oldenburg (unveröffentlicht).
[6] Klaus, R., (2013): Glass bead filter packs in water wells for higher efficiency and reduced O & M costs. - in: Brown, A., Figueroa, L., Wolkersdorfer, Ch. (eds) (2013): Reliable Mine Water Technology (Vol II): 783–1263.
[7] Treskatis, C., Tholen, L. & Klaus, R. (2013): Ergebnisse experimenteller Vergleichsuntersuchungen mit Glaskugeln und Filterkiesen. – in: gwf Wasser Abwasser (im Review-Verfahren); München.
[8] Schwarzmüller, H., Taute, T. & Dlubek, H. (2013): Auswirkung unterschiedlicher Schüttmaterialien auf die Verockerung und Regenerierbarkeit von Brunnen. bbr 04/2013: 56 – 63.

Autoren

Dipl.-Geol., MBA Reinhard Klaus
RKP Consulting
Mögeldorfer Hauptstr. 31A
90482 Nürnberg
Tel.: 0911 5703596
mail@reinhard-klaus.de

Prof. Dr. habil. Christoph Treskatis
Bieske und Partner
Beratende Ingenieure GmbH
Im Pesch 79
53797 Lohmar
Tel.: 02246 9212-22
Fax: 02246 9212-99
c.treskatis@bup-gup.de

Lara Tholen, M. eng.
CONSULAQUA Hamburg
Beratungsgesellschaft mbH
Ausschläger Elbdeich 2
20539 Hamburg
Tel.: 040 7888-82342
ltholen@consulaqua.de
www.consulaqua.de