

EINSATZ VON GLASKUGELN IN TRINKWASSER- BRUNNEN

– bisherige
Forschungs-
ergebnisse

von: Prof. Dr. habil. Christoph Treskatis
(Bieske und Partner Beratende Ingenieure GmbH)

Filterkiese nach DIN 4924 stammen aus natürlichen Lagerstätten und unterliegen in ihrer Qualität erheblichen Schwankungen. Bruchstückbildungen, Abplatzungen und Feinstkornanteile sowie die Ummantelung der Kieskörner mit inkrustationsfördernden Ablagerungen können im Brunnen zu einer vorzeitigen Alterung und Leistungsverlusten führen. In Praxisversuchen wurden Glaskugeln als alternative Schüttmedien im Labor- und Geländemaßstab getestet. Die Labortests umfassten Untersuchungen zu den physikalischen und chemischen Materialeigenschaften sowie hydraulische Tests zur nutzbaren Porosität und zur Durchlässigkeit der Schüttgüter. Es konnte gezeigt werden, dass die Anlagerung von Eisen an den glatten Glaskugeloberflächen im Vergleich zum Filterkieskorn deutlich reduziert ist und die Nutzporosität bei den kleineren Kugeldurchmessern erheblich größer ist als bei den eng gestuften Filterkiesen vergleichbarer Korngröße. Weitere Untersuchungen am Bau-ABC in Rostrup werden derzeit durchgeführt, um die Labortests im größeren Skalenbereich und in Testbrunnen zu verifizieren.

Today, natural filter gravel according to DIN 4924 contains increasingly fine particles (autochthonous 'dust' and quartz shivers) and predominantly irregularly rounded, platy or lentil-shaped quartz gravel and stone shivers covered with mineral incrustations. In addition, quartz grains are prone to breakage when transported in big bags and built into the well. In practical well construction it could be confirmed that with the use of glass beads in the well ring space both mechanically caused fine grain and shivers can be avoided, and that a clearly lower incrustation tendency is to be expected. For the biochemical processes in a well in the natural underground, analogue results are to be expected due to the surface affinity of the incrustations. Effective porosity and hydraulic conductivity of fine and medium sized glass beads in the annulus of water wells reduce head losses and entrance velocities. Thus well desanding, operation, and rehabilitation are affected in a positive way.





Abb. 1: REM-Aufnahme einer Glaskugel im Vergleich zu einem Filterkieskorn gleicher Korngröße. Die „glatte“ Oberfläche der Glaskugel verhindert die Bildung von Zugspannungen bei Lastaufgabe und mindert die Anlagerung von Inkrustationen.

Quelle: Firma SLI

Glaskugeln werden seit 2007 als Schüttgüter zur „Verkiesung“ von Brunnenfiltern verwendet [1]. Erste Erfahrungen mit Glaskugeln aus säurebeständigem Kalk-Natronglas als Filterschüttungen wurden beim Bau von Festgesteinsbrunnen gesammelt. Anstoß für die Verwendung von Glaskugeln in Brunnen waren Erfahrungen von Brunnenbauern. Bei der Entwicklung von Brunnen mit Glaskugelschüttungen wurde im Vergleich zu Kiesschüttungsbrunnen weniger „Unterkorn“ gefördert und bei verockerungsanfälligen Brunnen wurden in Glaskugelausbauten raschere Regeneriererfolge erzielt. Wissenschaftliche Untersuchungen in den Niederlanden bestätigten Erfahrungsberichte, dass „Unterkorn“ aus Filterkiesen ebenso wie Feinpartikel aus dem Grundwasserleiter für das Verstopfen der Poren in der Bohrlochwand und im Ringraum verantwortlich sind [2,3]. Die Dauer und Kosten der Entsandung und die spezifische Brunnenleistung werden dadurch negativ beeinflusst [4].

Im Brunnenbau sind die hydraulischen und mechanischen Eigenschaften der Einbauten von großer technischer und

wirtschaftlicher Bedeutung. Dazu gehören neben dem Anlagerungsverhalten gegenüber leistungsmindernden Ablagerungen vor allem die für die hydraulische Ergiebigkeit der Ringraumschüttung steuernden Kenngrößen mechanische Stabilität, Abriebfestigkeit, Rundheit der Schüttkörner sowie eine chemische Beständigkeit (z. B. gegenüber Regeneriermitteln). In einem Forschungsvorhaben, gefördert vom Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie auf Grund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages, werden derzeit brunnenbauspezifische Materialcharakteristiken, das Anlagerungsverhalten von Eisenhydroxiden und hydraulische Eigenschaften, wie z. B. das nutzbare Porenvolumen von Glaskugeln und Filterkiespackungen, ermittelt [5].

Untersuchte Parameter

DIN-Filterkiese für den Brunnenbau und Glaskugeln unterschiedlicher Korngrößen wurden im Labor der Fa. Sigmund Lindner untersucht. Es wurden folgende physikalische Kenngrößen bestimmt:

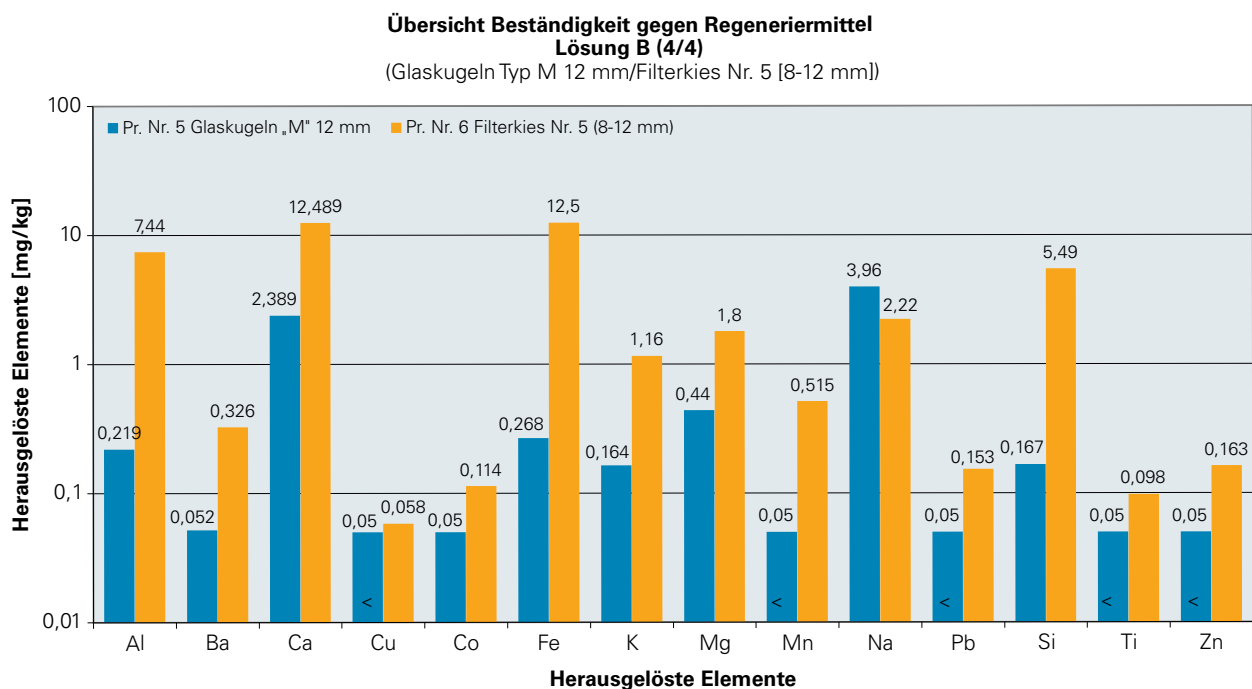


Abb. 2: Verteilung der gelösten Elemente aus Glaskugeln und Kieskörnern nach 15 h Behandlungszeit mit einer Lösung von synthetisch hergestellter Salzsäure 1:5

Quelle: Treskatis et al. 2009 [6]

- Rundheit
- spezifisches Gewicht
- Schüttgewicht
- Kornverteilung
- Bruchlast bei statischer Beanspruchung
- Bruchverhalten bei statischer Beanspruchung
- Bruchverhalten bei dynamischer Beanspruchung
- Abriebfestigkeit
- Oberflächengestalt
- Oberflächenprofil
- Rauhtiefen
- spezifische Oberfläche
- chemische Beständigkeit gegenüber pH-gesteuerten Regeneriermitteln

Parallel dazu wurde am Lehrstuhl für Hydrologie der Universität Bayreuth die chemische Verockerungsneigung von Filterkies und Glaskugeln im Labormaßstab verglichen [6]. Tests zur nutzbaren Porosität von Filterkiesen und Glaskugeln wurden für verschiedene Kornspektren und Lagerungsformen im Bau-ABC in Rostrup durchgeführt.

Bisherige Forschungsergebnisse

Die Rundheit einer Kugel ergibt sich aus dem Verhältnis von Breite zu Länge, welches im Idealfall 1 beträgt. Bei Glaskugeln wurde unabhängig von der Größe das Verhältnis 0,97 ermittelt. Bei Quarzkiesen werden im optimalen Fall 0,73 bis 0,78 erreicht. Dadurch werden im Filterkies heterogene Lagerungsdichten erreicht, die sich im Laufe des Einbaus, der Brunnenentwicklung und im Brunnenbetrieb verändern und oft erhebliche Setzungen auslösen. Bei Monokornmischungen aus Glaskugeln wird bereits bei der Schüttung eine Lagerungsdichte erreicht, die der dichtesten Kugelpackung nahekommt und daher im weiteren Bearbeitungsprozess und bei der Brunnenregenerierung kaum zu Setzungen und Lagerungsveränderungen führt.

Die Bruchlast bei statischer Beanspruchung und Lastaufnahme der Filterkiese nimmt von ca. 60 N bis maximal 1.620 N parallel mit der Zunahme der Korngröße zu. Glaskugeln zeigen eine analoge Zunahme der Lastaufnahme mit der Kugelgröße. Die Bruchlast steigt hier aber um eine Größenordnung höher von 455 N auf > 11.000 N an. Die Bruchcharakteristiken von Filterkies und Glaskugeln unterscheiden sich deutlich. Filterkies zerbricht bei Lasten um 700 N in kleinere Fraktionen, die bei weiterer Belastung in immer kleinere Stücke zerbrechen. Die Lastkurve einer Glaskugel zeigt dagegen das Verhalten eines amorphen Körpers, der die Last bis zur Bruchgrenze (hier ca. 4.800 N) aufnimmt und dann in feinste Partikel zerbricht, die keine weiteren Lasten aufnehmen können. Ein Bersten von Glaskugeln beim Einbau und im Brunnenbetrieb ist nicht zu erwarten.

Die Abriebfestigkeit wurde in einer Mühle mit Akzelerator ermittelt. Damit sollte der Transport des Materials im Bigbag simuliert werden. Der Abrieb der Glaskugeln und Filterkieskörner, der weniger als 0,2 mm betrug, wurde aus der Mühle geschwemmt. Dessen Masse wurde der Masse der Testkörper gegenübergestellt. Die Glaskugeln erlitten einen Abriebverlust (Massenverlust) von ca. 0,5 Prozent je Stunde Mahldauer, die Filterkiese um bis zu ca. 6 Prozent je Stunde. Insgesamt war der Massenverlust bei den Glaskugeln mit ca. 4 Prozent für den gesamten Testzeitraum (9 h) um den Faktor 13 geringer als beim Filterkies (bis zu 53 Prozent Massenverlust). Dadurch konnte gezeigt werden, dass die Filterkiese vor allem bei den größeren Korndurchmessern mechanisch zerrieben oder gespalten werden können. Der „Unterkornanteil“ wird im Gesamtvolumen einer Filterkiesschüttung durch Abrieb und mechanische Beanspruchung, z. B. bei der Brunnenregenerierung, erhöht und muss bei der Brunnenentwicklung wieder entfernt werden. Es wurde ferner festgestellt, dass die Filterkiese je nach Lagerstätte und Genese unterschiedliche Abriebeigenschaften aufwiesen. ▶

SiLibeads® – Achieve longer lasting water well flowage
INNOVATIONS

COME & TALK to us at
WASSER BERLIN
 02. – 05.05.2011
 Hall 4.2 Stand 201

Glass beads used as borehole filter material

Cost Advantages

- Highly spherical glass beads and narrow tolerances lead to optimal pore spaces
- No filter media breakage due to higher compression strength of glass beads
- No clogging of filters as a result of iron oxide contamination
- No disinfection prior to installation
- No pump cleaning

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

SiLi®
 SIGMUND LINDNER



Quelle: Treskatis et al., 2009 [6]

▲ Abb. 3: Versuchsanordnung zur Durchführung von hydraulischen Tests und hydrochemischen Anlagerungsversuchen an Glaskugeln und Filterkiesen

Die Oberflächengestalt und das Oberflächenprofil von Glaskugeln und Filterkies wurden mittels Rasterelektronenmikroskop bestimmt (**Abb. 1**). Die Kieskoroberfläche weist eine ausgesprochen unregelmäßige Struktur mit einem ausgeprägten Relief von Hochpunkten und Vertiefungen auf, die in der Glaskugeloberfläche nur vereinzelt zu finden sind. Die spezifische Oberfläche einer Glaskugel mit einer Größe zwischen 1,25 mm und 1,5 mm (+/- 0,2 mm) beträgt weniger als 0,01 m²/g Masse. Dagegen erreicht der Filterkies eine spezifische Oberfläche von bis zu 0,95 m²/g Masse (bezogen auf eine Körnung 1,4 bis 2,2 mm).

Die chemische Beständigkeit gegenüber pH-gesteuerten Regeneriermitteln wurde prinzipiell über Testlösungen bestätigt. Es ergaben sich jedoch materialabhängige Unterschiede bei der Lösung von Elementen aus den Schüttgütern bei verschiedenen Säurekonzentrationen. **Abbildung 2** zeigt beispielhaft die Elementkonzentrationen bei einer 15-stündigen Behandlung mit einer synthetisch hergestellten, elementfreien Salzsäure (1:5 verdünnt).

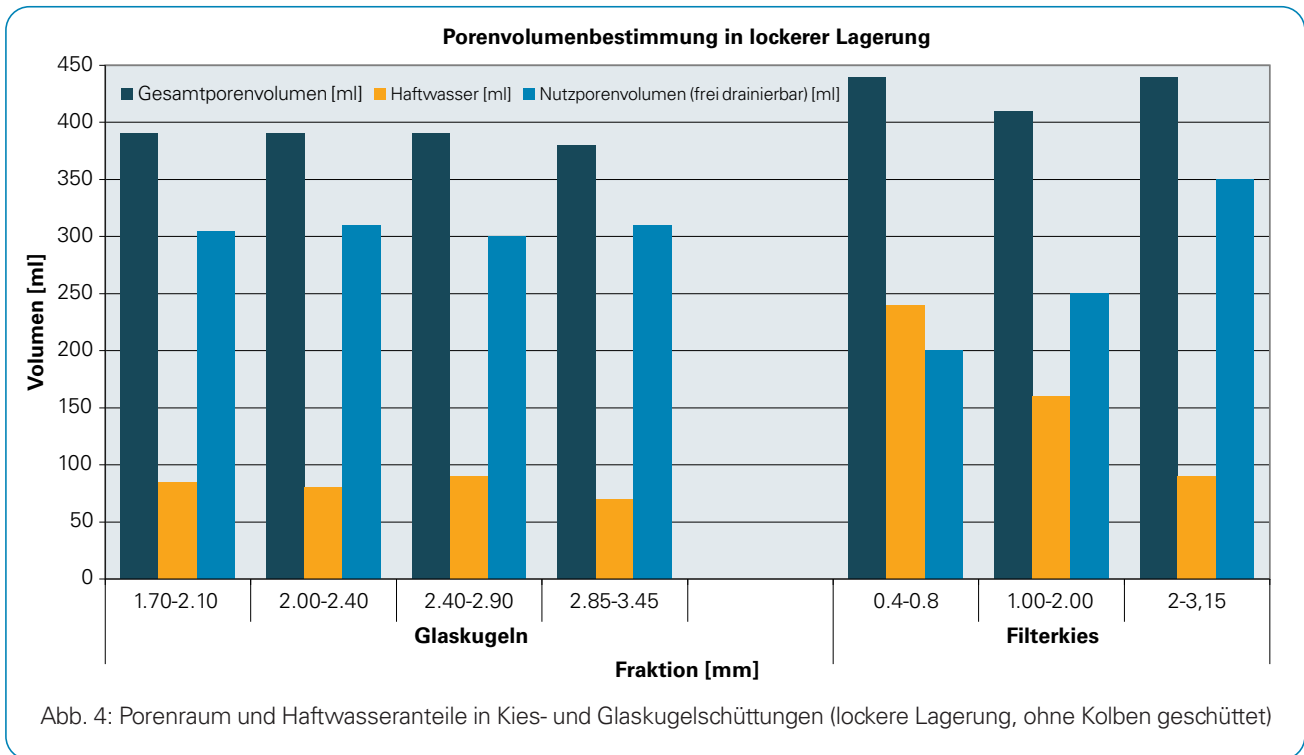
Die gelöste Menge und Art der Elemente hängt in erster Linie vom Primärmineralgehalt des Schüttgutes ab. Bei Glaskugeln aus Kalk-Natronglas werden bevorzugt die Elemente Ca, Na und Si gelöst (**Abb. 2**), während bei Kies Al, Ca und Si dominieren. Hinzukommen beim Kies Beimengungen von Schwermetallen, wie z. B. Ba, Cu und Pb, die sich aus den Nebenbeimengungen des Filterkieses und den Ablagerungen von Eisensulfiden, wie z. B. Pyrit, ergeben. Insgesamt ist die mittels pH-gesteuerten Regeneriermitteln generierte Elementkonzentration in den Testlösungen beim Filterkies größer und vielfältiger als bei den Glaskugeln. Ursachen sind die mineralischen Anlagerungen auf den katalytisch wirkenden Reaktionsoberflächen der Kieskörner, die mit zunehmender Fläche eine Verockerung beschleunigen.

Die Eisenanlagerung an Filterkiesen und Glaskugeln wurde gemäß Versuchsaufbau in **Abbildung 3** untersucht. Für die Anlagerungsversuche wurde zur Simulation eines eisenhaltigen Grundwassers das

1,5-fache Porenvolumen einer entgasten Perkolationslösung mit pH = 7 und einem Eisengehalt von 1 mmol/l von unten durch die Säulen (**Abb. 3**) geleitet. Zur Initiierung der „Verockerung“ wurden die Säulen mit 1,5-fachen Porenvolumen destilliertem, mit Luftsauerstoff gesättigtem Wasser durchströmt. In der Gesamtmassenbilanz wurden im Verlauf des Versuchs ca. 600 μmol Fe/Säule bei den Glaskugeln und ca. 850 μmol Fe/Säule als Anlagerungsmasse festgestellt. Im Filterkies wurden im Vergleich zu den Glaskugeln ca. 40 Prozent mehr Eisenmasse retardiert.

Es wurden neben den Anlagerungsmassen die hydraulischen Eigenschaften der Schüttgüter bestimmt (**Tab. 1**). Die Tracerversuche in den Versuchssäulen (Inhalt ca. 2,5 l) zeigten für die Materialien ähnliche hydraulische Eigenschaften, nachdem die Filterkiessäulen vor der Beschickung vom „Unterkorn“ befreit wurden. Die nutzbaren Porenvolumina und der Gesamtporenraum waren auf Grund der unterschiedlichen Lagerungsdichten bei den Glaskugelschüttungen etwas geringer als bei den gereinigten Filterkiesen; die Durchflussraten variierten in der gleichen Größenordnung.

Am Bau-ABC in Rostrup wurden Auslaufversuche zur Quantifizierung der Porenvolumina an verschiedenen Kornfraktionen in lockerer und verdichteter Lagerung durchgeführt (**Abb. 4 und 5**). Das Gesamtporenvolumen der Glaskugeln liegt bei den feinen bis mittleren Korngrößen, die im Brunnenbau verwendet werden, in der lockeren Lagerung ohne nachträgliche Verdichtung bei konstant 39 Prozent, beim Filterkies mit steigender Korngröße zwischen 41 und 44 Prozent. Der Haftwasseranteil ist mit ca. acht Prozent bei den kleinen Glaskugeln deutlich geringer als bei den feinkörnigen Filterkiesen. Dadurch ist der nutzbare, frei auslaufende Wasseranteil in den feineren Kiesschüttungen geringer als in den Glaskugelpackungen. In den Filterkiesen steigt der nutzbare Wasseranteil mit der Korngröße an und erreicht bei der Schüttung 2 bis 3,15 mm diesen in einer vergleichbaren Glaskugelschüttung. Analoge Unterschiede zeigen die Materialvergleiche im für den Wasserandrang wichtigen Nutzporenraum bei dichter Lagerung (**Abb. 5**).

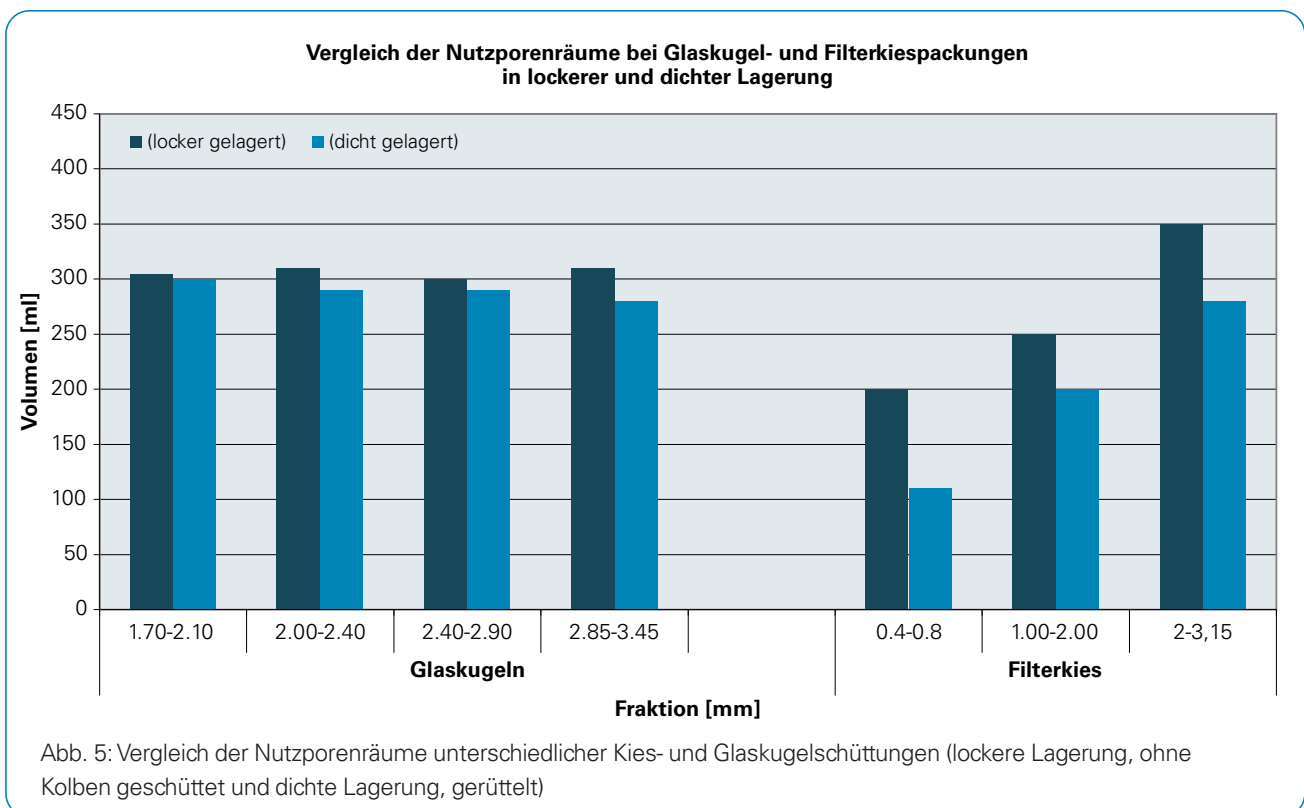


Diskussion

Glaskugeln unterscheiden sich materialtechnisch von den Filterkiesen in allen untersuchten Kenngrößen. Gesteuert werden diese Unterschiede einerseits durch die Festigkeitsunterschiede amorpher (Glas) und kristalliner (Kieskorn) Strukturen und andererseits durch das Vorhandensein von Oberflächenspannungen und Anisotropien im Materialaufbau. Daneben spielen die stofflichen Eigenschaften eine Rolle bei der Exposition der Materialien gegenüber Che-

mikalien. Bei allen untersuchten Fraktionen ergab sich bei Glaskugeln eine quantifizierbare und sichtbare Minderung der Anlagerungen von Inkrustationen.

Tests zeigten, dass Glaskugeln auf Grund ihrer Rundheit und geringen spezifischen Oberfläche vor allem bei den kleinen Kugelgrößen bis 3 mm gegenüber gleich großen Filterkiesen hydraulische Vorteile aufweisen. Feinkörnige Glaskugelschüttungen zeigten in den hydraulischen Tests



Tab. 1: Filtermaterial, Korngrößen, Porenvolumen und Flussraten in den Versuchssäulen

Parameter/Säulenbezeichnung	Säule A	Säule B	Säule C	Säule D
Ringraumfiltermaterial	Glaskugeln		Filterkies	
Korngröße [mm]	3,8-4,4	6	3-5,6	5,6-8
Nutzporenvolumen [ml]	928,9	998,9	1006,1	1006,1
Nutzporenvolumen [%]	37	39	40	40
durchschnittliche Flussrate [ml pro min]	0,60*	0,61	0,65	0,59
Dispersionslänge D_L [$\text{cm}^2 \cdot \text{sec}^{-1}$]	7,44E-05	8,67E-05	1,10E-04	8,98E-05
Abstandsgeschwindigkeit v_a [$\text{m} \cdot \text{h}^{-1}$]	0,020	0,020	0,018	0,018
Dispersivität α [m]	0,0013	0,0015	0,0021	0,0018
Porenraum n [%]	38,5	41,4	41,7	41,7

*abgeschätzt

höhere nutzbare Porenvolumina. Bei gröberen Fraktionen gleichen sich die nutzbaren Porenvolumina allmählich an. Diese Verbandseigenschaften der Schüttgüter sind für die Brunnenentwicklung und Brunnenregenerierung von Bedeutung.

Die materialtechnische und hydraulische Heterogenität der Filterkiese bedingen ungleichmäßige Kornformen, Porenweiten und -verteilung. Die Brunnenalterung schreitet dadurch rascher voran, da einerseits große, katalytisch wir-

rungsprodukte. Geringe Bruchlasten fördern die Unterkornbildung. Daraus wird abgeleitet, dass diese Materialeigenschaften die Regenerierhäufigkeit und die Nachhaltigkeit von Regenerierungen beeinflussen. Feinkörnige Glaskugelpackungen haben eine höhere nutzbare Porosität als vergleichbare Filterkiese, was für die Brunnenentwicklung und Regenerierung in sandigen Aquiferen von Bedeutung ist. Ab einer Korngröße von 2 bis 3,15 mm gleichen sich die durchflusswirksamen Porenraumvolumina beider Medien an.

Mit steigenden Durchmessern gleichen sich die Nutzporositäten von Kiesen und Glaskugelschüttungen an.

kende Oberflächen auf den stark strukturierten Kornoberflächen primär vorhanden sind und andererseits das ausgeprägte Relief der Kieskörner eine nachhaltige Regenerierung der Kiespackung beeinträchtigen.

Zusammenfassung

Messbare Unterschiede zwischen den Materialien ergaben sich unabhängig von der Korngröße vor allem bei den Eigenschaften Rundheit, Bruchlast, Bruchcharakteristik, Abriebfestigkeit und beim Anlagerungsverhalten gegenüber Eisenhydroxiden. Die nutzbare Porosität verändert sich dagegen in Funktion der Korngrößen und Kugeldurchmesser derart, dass sich mit steigenden Durchmessern die Nutzporositäten von Kiesen und Glaskugelschüttungen angleichen.

Glaskugeln haben bei nahezu idealer Rundheit eine sehr geringe spezifische, innere Oberfläche bei geringen Rauheiten und Rauhtiefen sowie ein hohes Lastaufnahmevermögen. Filterkiese haben stark strukturierte, raue Oberflächen mit großem Anlagerungspotenzial für Verocke-

Literatur:

- [1] Herrmann, F. & Stiegler, X. (2008): Einsatz von Glaskugeln als Ersatz für Filterkies in Brunnen. – in: bbr 05/2008: S. 48-53; Bonn (wvgw).
- [2] DeZwart, B.-R. (2007): Investigation of Clogging Process in Unconsolidated Aquifers near Water Supply Wells. – 200 S., Dissertation TU Delft.
- [3] Treskatis, C. (2007): Partikelinduzierte Kolmation von Brunnen – Identifikation und Lösungsansätze. In: Drebenstedt, C. & Struzina, M. (Hrsg.): Grundlagen und Erfahrungen der Übertragbarkeit von Modellversuchen auf großindustrielle Anwendungen, S. 59-71, Freiberg, ISBN 978-3-86012-330-0.
- [4] Houben, G. & Treskatis, C. (2003): Regenerierung und Sanierung von Brunnen – 280 S., 111 Abb., 32 Tab., Anhang und CD-ROM; München (Oldenbourg) (ISBN: 3-486-26545-8).
- [5] 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 1/2010: S. 26 – 32; Bonn (wvgw).
- [6] Treskatis, C., Hein, C., Peiffer, S. & Herrmann, F. (2009): Brunnenalterung: Sind Glaskugeln eine Alternative zum Filterkies nach DIN 4924? – in: bbr 04/2009: S. 36-44; Bonn (wvgw).

Autor:

*Prof. Dr. habil. Christoph Treskatis
Bieske und Partner Beratende Ingenieure GmbH
Im Pesch 79, 53797 Lohmar
Deutschland
Tel.: + 49 (0) 2246 9212-22
Fax: + 49 (0) 2246 9212-99
E-Mail: c.treskatis@bup-gup.de
Internet: www.bup-gup.de*