Ergebnisse experimenteller Vergleichsuntersuchungen mit Glaskugeln und Filterkiesen in Trinkwasserbrunnen

Wasserversorgung, Glaskugeln, Filterkies, spezifische Ergiebigkeit, Verockerungsverhalten

Christoph Treskatis, Lara Tholen und Reinhard Klaus

Bisherige Studien und Laborversuche zeigten, dass Glaskugeln in Trinkwasserbrunnen aufgrund ihrer Materialeigenschaften (glatte Oberflächen, gleichmäßige Kugelgrößen, sehr geringe Ungleichkörnigkeit etc.) günstige Voraussetzungen für reduzierte Eintrittsverluste und für eine Vergleichmäßigung der Anströmung haben können. In der Praxis war seit einiger Zeit bekannt, dass die Entwicklung und Regenerierung von Brunnen mit Glaskugelschüttungen an verschiedenen Standorten in Deutschland und den USA effizienter durchgeführt werden konnten. Im Rahmen von Labor- und Feldexperimenten konnten die grundlegenden Annahmen aus den bisherigen Studien und der Praxis bestätigt werden. Die Ergiebigkeit von Glaskugelbrunnen lag am Versuchsstandort in Rostrup um 15 bis 21 % über der Ergiebigkeit von vergleichbaren Kiesschüttungsbrunnen. Die Entsandungsversuche an den sechs Testbrunnen in Rostrup zeigten, dass die Trennschärfe der Glaskugelschüttungen gegenüber dem ausgetragenen Korn aus dem Grundwasserleiter größer ist als bei den vergleichbaren Kiesschüttungen. Fehlbemessungen führen wie bei Kiesschüttungen erwartungsgemäß zur Sandführung. Laborexperimente zum chemisch induzierten Verockerungsverhalten konnten Hinweise geben, dass der Druckaufbau infolge der Eisen- und Manganablagerungen in Filterkiesen wesentlich rascher erfolgte als in vergleichbaren Glaskugelpackungen. Die physikalischen Unterschiede in den Materialeigenschaften von Filterkiesen und Glaskugeln sowie das Verbandsverhalten der Schüttgüter prägen sowohl das hydraulische Verhalten als auch die Verockerungsentwicklung in Brunnen.

Results of Field and Laboratory Experiments with Glass Beads and Gravel Material in Water Wells

Former studies showed that effective porosity and hydraulic conductivity of fine and medium sized glass beads in the annulus of water wells reduce head losses and entrance velocities. Therefore well desanding, operation and rehabilitation are supposed to be affected in a positive way. Current laboratory and field experiments with natural filter gravel according to DIN 4924 and glass beads proved that glass beads are suitable to improve hydraulic conductivity in the annulus of water wells and to support yield in low to medium permeable sediments on the one hand. On the other hand desanding experiments in different wells with various gravel and glass bead packs confirm the major influence of the aquifer conductivity on well yield. Gravel material fits to the sediment in a more or less "generous" way due to its range of grain size. Compared to similar gravel packs, glass beads retain grain size strictly up to the point of inflection of the sieve curve according to DVGW W 113. Nevertheless, breakthrough of particles from the aquifer is exclusively controlled by the grain size of the gravel or glass bead pack. At the beginning of well operation, glass beads promote a better yield and a lower entrance loss due to their uniformity and homogeneous gradation. That's why accurate sampling and sizing of the glass bead pack is necessary to prevent an undesired breakthrough of sand into the well. Well ageing processes such as incrustation of iron and manganese affects well performance. Experiments show that glass beads need a longer time to develop scale and friction losses start later compared to similar gravel material. But after a certain time, friction loss rises independently from material. As a result development of incrustations within different filter materials is only delayed not prevented. In well operation, the different material properties of glass bead and gravel material in the annulus of water wells are balanced by water quality and scaling processes.

1. Einleitung und bisheriger Kenntnisstand

Glaskugeln werden seit 2007 als Schüttgüter im Brunnenbau verwendet. Erste brunnenbautechnische Erfahrungen mit Glaskugeln aus säurebeständigem Kalk-Natronglas wurden beim Bau von Festgesteinsbrunnen in Franken gesammelt [1]. Anstoß für die Verwendung von Glaskugeln als Alternative zum Filterkies waren Erfahrungen von Brunnenbauern. Diese betrafen einerseits die Entwicklung bzw. Entsandung der Brunnen, in deren Verlauf bei Brunnen mit Glaskugelschüttungen im Vergleich zu Kiesschüttungsbrunnen weniger „Unterkorn" gefördert wurde und Entsandungsarbeiten rascher abgeschlossen werden konnten. Bei Brunnen mit einer starken Verockerungsneigung wurden bei Glaskugelschüttungen ein späteres Auftreten von Ablagerungen und eine geringere Abnahme der Leistung berichtet. Quantifizierbare Nachweise dieser „Regeneriererfolge" wurden jedoch nicht publiziert.

Die physikalischen und hydraulischen Eigenschaften der beiden unterschiedlichen Schüttguttypen wurden im Rahmen eines F&E-Vorhabens untersucht [2]. Messbare Unterschiede zwischen den Materialtypen ergaben sich aus Laborversuchen bei den Eigenschaften Rundheit, Bruchlast, Bruchcharakteristik, Abriebfestigkeit und beim Anlagerungsverhalten gegenüber chemisch induzierten Eisenhydroxiden unter Laborbedingungen [3].

Zur Ermittlung der hydraulischen Eigenschaften unterschiedlicher Schüttgüter wurden am Bau-Ausbildungszentrum in Rostrup Laborversuche und Versuche an einem Teststand durchgeführt [4, 5]. 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.

Die Versuchsergebnisse zeigten, dass der Einfluss des Schüttungsmaterials auf die Brunnenergiebigkeit im Vergleich zu den Aquifereinflüssen gering ist. Voraussetzung dieser Einschätzung ist eine hydraulisch korrekte Anpassung der Schüttkorngröße an die örtlichen Grundwasserleiterverhältnisse. Diesen Zusammenhang konnten auch analytische Modellierungen und Untersuchungen an einem Aquifermodell an der RWTH Aachen bestätigten [6]. Je gröber die Schüttung desto günstiger sind die hydraulischen Eigenschaften der Materialien, die in den meisten Fällen bei den Kenngrößen „Nutzporosität" und „k_f-Wert" immer besser sind als in der geologischen Formation.

Der geologische Untergrund steuert maßgeblich die für die Brunnenergiebigkeit wichtige Systemdurchlässigkeit. Die Unterschiede zwischen den Schüttguttypen sind bei der Porosität, im Setzungsverhalten und in der Schüttgutdurchlässigkeit vor allem von der Korn- bzw. Kugelgröße abhängig. Für die Stabilität und die Entwicklung des Brunnens sowie dessen spätere Instandhaltung ist die korrekte Bestimmung der Korn- bzw. Kugelgröße von großer Bedeutung. In diesem Zusammenhang zeigten Glaskugeln im Laborversuch höhere Nutzporositäten, vor allem in den kleineren Kugelgrößen, und bei allen untersuchten Fraktionen ein geringeres Setzungsmaß [7].

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 vertieft betrachtet [8]. Der Standort Rostrup wurde gewählt, weil die Untergrundverhältnisse dort nur im geringen Umfang wechseln und somit verschiedene Brunnenausbauten bei in etwa gleichen hydrogeologischen Randbedingungen untersucht werden können. Parallel zu den insitu- und Laborversuchen wurden Untersuchungen zur Entwicklung der Leistungsfähigkeit im Zuge einer voranschreitenden chemischen Verockerung an unterschiedlich ausgebauten Brunnen eines Wasserwerkes in einem Terrassengrundwasserleiter in der Rheintalscholle eingeleitet.

Ziele der 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.

2. Insitu-Versuche zur Brunnenergiebigkeit

Im Bau-Ausbildungszentrum in Rostrup wurden sechs Vertikalfilterbrunnen in die quartären Fein- bis Mittelsande unter dem örtlich als Grundwasserstauer fungierenden Geschiebemergel abgeteuft. Der örtliche 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}). Die Brunnen wurden in einer Reihe im Abstand von 5 m bis auf etwa 20 m unter Gelände im Trockenbohrverfahren abgeteuft. Der Aus-

Tabelle 1. Ausbaukenngrößen der Versuchsbrunnen 1 bis 6 auf dem Gelände des Bau-Ausbildungszentrums Rostrup (Länge der Filterstrecke DN 125 jeweils 4 m).

Brunnen-nummer	Ausbautyp	Körnung/Kugelgröße [mm]	Schüttungs-länge [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

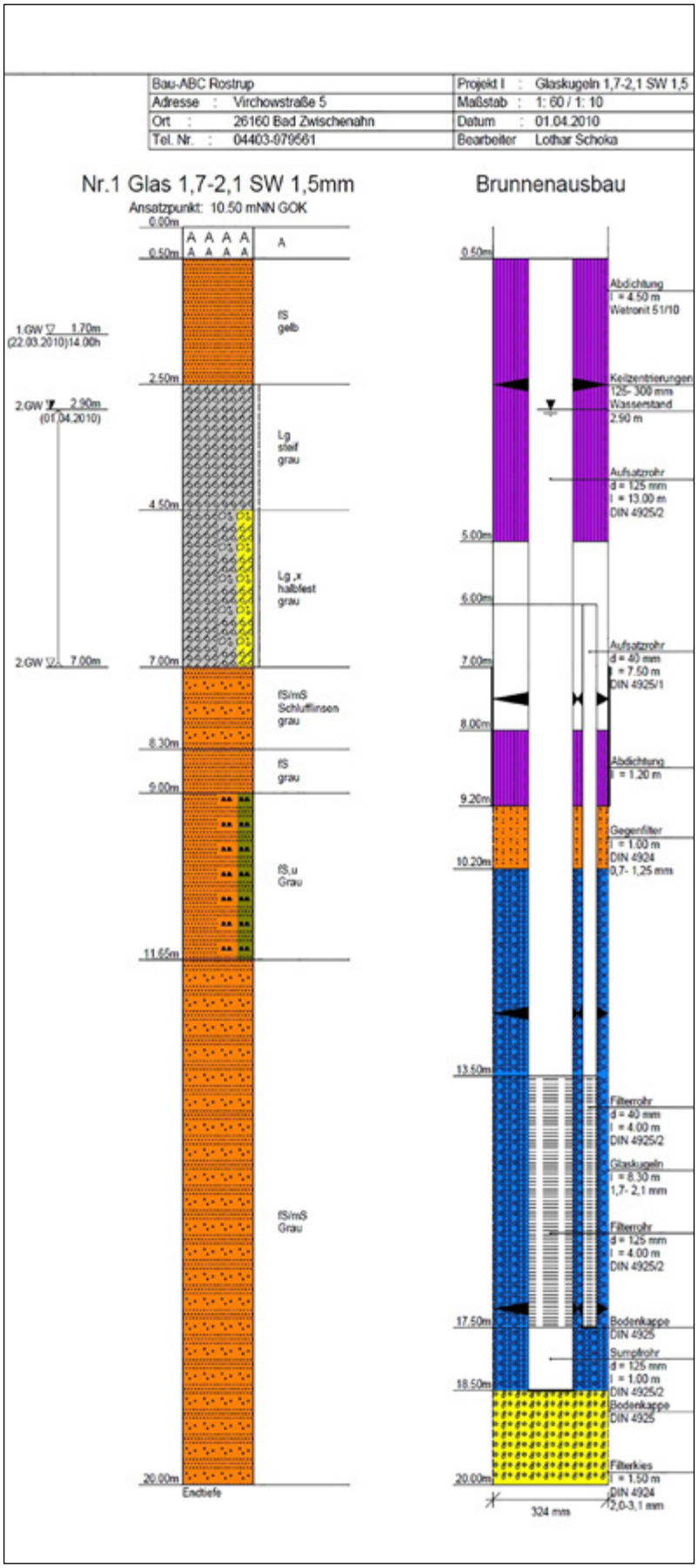

Bild 1. Ausbauzeichnung und geologische Schichtenfolge am Standort der Bohrung zum Versuchsbrunnen 1 (Glaskugeln 1,7 bis 2,1 mm).

bau der Brunnenbohrungen, die mit einem Durchmesser von 324 mm hergestellt wurden, erfolgte 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 **(Tabelle 1)**.

Bild 1 zeigt beispielhaft den Ausbau des Brunnens 1. Das Kennkorn des Bodens innerhalb der Brunnenreihe liegt im Bereich des Wendepunktes der Kornverteilungskurve bei etwa 0,36 mm, wobei DIN-Siebsätze ohne eine Erweiterung der feineren Körnungsstufen bis 2 mm benutzt wurden (Abstufung: 0,2–0,6 mm; 0,1–0,2 mm und 0,071-0,1 mm). Die Ungleichkörnigkeitsgrade betrugen weniger als 2. Das Schüttkorn liegt nach der DIN 4924 für diese Siebanalysen im Wertebereich von 2 bis 3,15 mm.

Einzelne Schichten der Versuchsbrunnenbohrungen und benachbarte Bohrungen auf dem Versuchsgelände ergaben jedoch bei einem erweiterten Siebsatz (Abstufung 0,63-1,0 mm; 0,5-0,63 mm; 0,4-0,5 mm; 0,25-0,4 mm; 0,2-0,25 mm; 0,125-0,2 mm; 0,1-0,125 mm und 0,063-0,1 mm) Schüttkorngrößen ≤ 2 mm, für die eine DIN-Schüttung von 1 bis 2 mm abgeleitet wurde. Diese wurde als Bemessungsgröße für die Versuche angesetzt. Die Untergrunddurchlässigkeit wurde aus den Siebanalysen nach Hazen errechnet und beträgt für alle sechs Brunnen im Mittel $5{,}3 \cdot 10^{-4}$ m/s. Die Bemessungsfördermenge wurde zu 12 m^3/h bestimmt.

Die Brunnen wurden im Jahr 2010 errichtet, klar gepumpt und geophysikalisch vermessen. Danach wurden die Brunnen nicht weiter entwickelt sondern stehen gelassen und im Jahr 2012 einer Kamerabefahrung unterzogen.

Die Kamerabefahrungen zeigten, dass die Brunnen während ihrer 2-jährigen Standzeit Inkrustationen aufwiesen, die optisch im oberen Filtersegment dominierten und als weiche, braune Beläge über die Schlitze in die Filterstrecke einwuchsen (**Bild 2**). Die Brunnen wur-

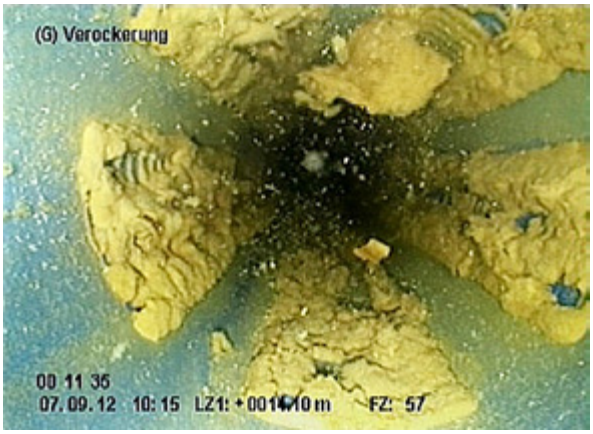

Bild 2. Blick in den Brunnen 4 (Glaskugelausbau 2,4 bis 2,9 mm) nach etwa zwei Jahren Standzeit ohne Förderung und Entwicklung. © Lara Tholen

den nach der Kamerabefahrung durch einen dreistufigen Pumpversuch nach DVGW-AB W 111 getestet und einer Entwicklung mittels Doppelkolbenkammer (Packerabstand 0,60 m) unterzogen. Danach wurde ein weiterer Pumpversuch mit den gleichen Förderstufen von 8, 12 und 16 m^3/h durchgeführt.

Nach dem Klarpumpen und vor der Entwicklung wurden bei den Glaskugelbrunnen spezifische Ergiebigkeiten gemessen, die zwischen etwa 15 und 21 % über den Werten der Kiesschüttungsbrunnen lagen (**Bild 3**). Im direkten Vergleich wurden bei den Filterkiesbrunnen zwischen der Schüttung 1,0 bis 2,0 mm und 2,0 bis 3,15 mm Unterschiede in der spezifischen Ergiebigkeit von rund 9 % zugunsten der gröberen Schüttfraktion nachgewiesen. Diese Charakteristik bestätigte die Ergebnisse der Labor- und Technikumsversuche [4, 5].

Im Zuge der den Pumpversuchen folgenden Entwicklungsarbeiten ergaben sich folgende qualitative Erkenntnisse bei den sechs untersuchten Brunnen:

- Die bei rund 9 m^3/h über die Kammer (Kammerlänge 0,60 m; Kunststoffpackerlänge jeweils 0,75 m) geförderten Sandmengen waren im Trend bei den Filterkiesbrunnen geringer als bei den Glaskugelbrunnen (**Bilder 4** und **5**); der Sandaustrag nimmt mit der Kugel- bzw. Korngröße des jeweiligen Schüttguttyps erwartungsgemäß zu (**Bild 6**).
- 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 (siehe **Tabelle 1**) erreichten beim Pumptest nach der Entsandung erwartungsgemäß bei allen Förderstufen die vorab definierte Sandfreiheit von < 0,1 g/m^3. Am Brunnen 3 wurde erst bei der höchsten Förderstufe (16 m^3/h), die über der für den Standort definierten Betriebsförderung von 12 m^3/h lag, ein Sanddurchbruch erzielt.
- Die gröber geschütteten Glaskugelbrunnen 4 und 5 konnten nicht sandfrei hergestellt werden, da deren Schüttung erwartungsgemäß bei der Betriebsför-

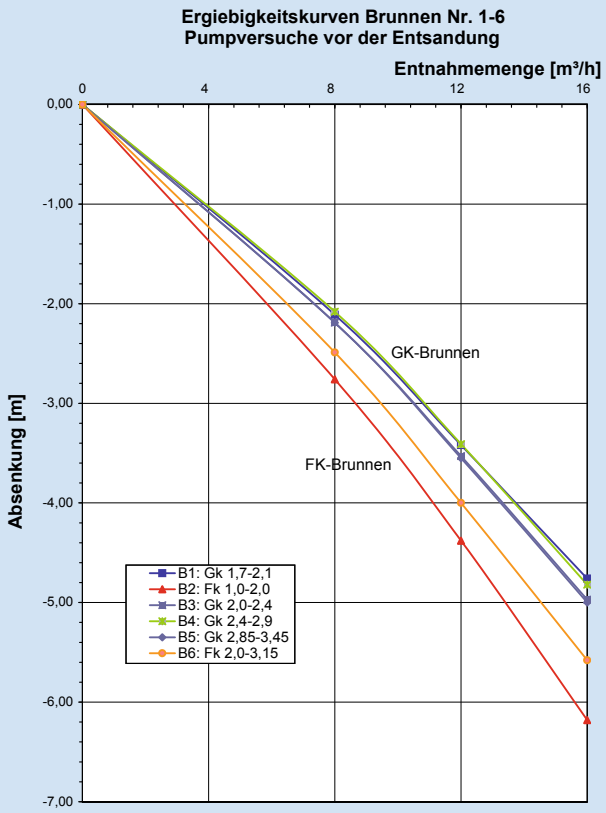

***Bild 3**. Wasserandrangkurven der sechs Versuchsbrunnen vor der Entwicklung/Entsandung.*

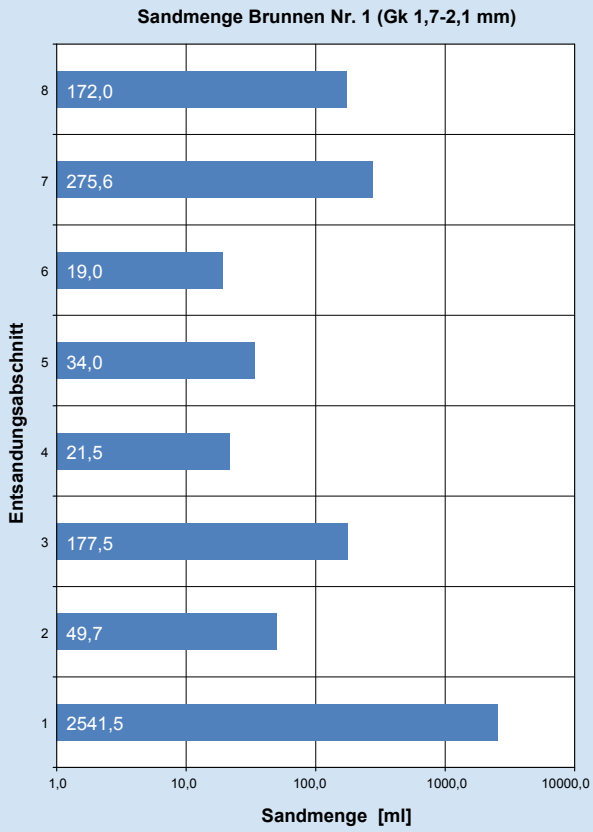

***Bild 4**. Ausgetragene Sandmengen im GK-Brunnen 1 (Schüttung 1,7 bis 2,1 mm).*

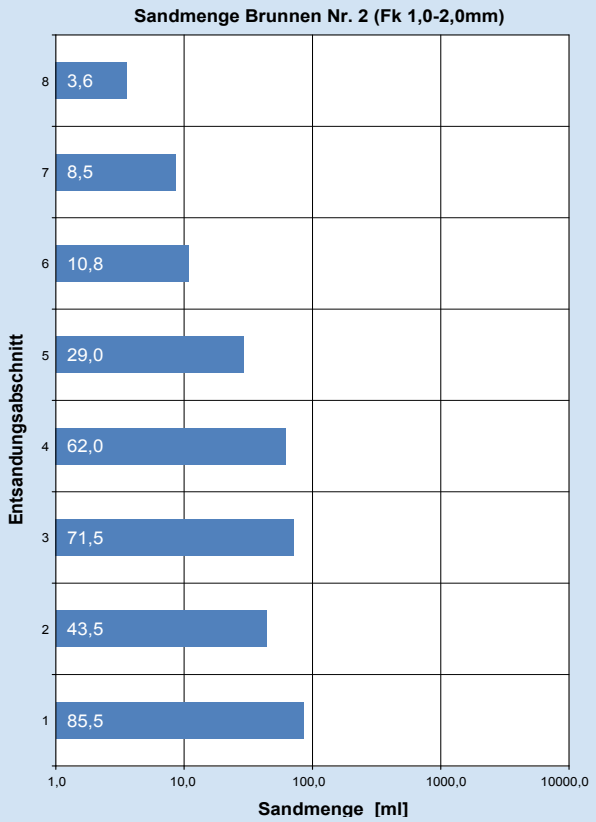

***Bild 5**. Ausgetragene Sandmengen im FK-Brunnen 2 (Schüttung 1,0 bis 2,0 mm).*

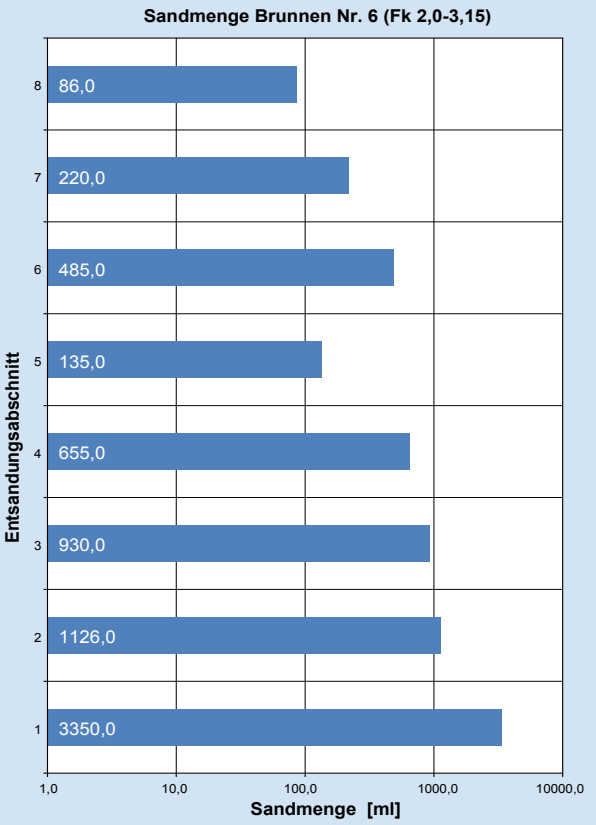

***Bild 6**. Ausgetragene Sandmengen im FK-Brunnen 6 (Schüttung 2,0 bis 3,15 mm).*

dermenge nicht stabil gegenüber Feststoffeinträgen aus dem Grundwasserleiter ist.

- Der Kiesschüttungsbrunnen 6 zeigte bei 12 m^3/h einen Sandgehalt von < 0,1 g/m^3, bei 16 m^3/h Förderleistung erfolgte analog zum Glaskugelbrunnen 3 ein Sanddurchbruch.

Nach der abschnittsweisen Entwicklung der Brunnen wurden bei allen Brunnen geringe Verbesserungen in der spezifischen Ergiebigkeit festgestellt (**Bild 7**). Ausnahme war der Brunnen 3, der fast keinen Ergiebigkeitszuwachs nach der Entsandung zeigte. Die Ursache hierfür ist aus den Versuchsdaten nicht sicher ableitbar und wird entweder auf eine Kolmation der Schüttung durch die am Brunnenstandort feststellbaren, recht hohen Feinstsandmengen oder eine unvollständige Entsandung einzelner Stufen zurückgeführt.

Die Ergiebigkeitszuwächse betrugen bei den Glaskugelbrunnen zwischen 2 und 8 %, bei den Kiesschüttungsbrunnen zwischen 3 und 13 % (**Bild 7**). Die höchsten Ergiebigkeitszuwächse erfuhren der Brunnen 2 (FK-Schüttung 1,0 bis 2,0 mm), der Brunnen 4 (GK-Schüttung 2,4 bis 2,9 mm) sowie der Brunnen 1 (GK-Schüttung 1,7 bis 2,1 mm).

3. Bewertung der Ergebnisse der Insitu-Versuche zur Brunnenergiebigkeit

Die insitu-Versuche bestätigen den im Labor bereits nachgewiesenen geringeren initialen Druckverlust der Glaskugelschüttungen in Relation zu den vergleichbaren Filterkiesschüttungen. Dieser geringere Druckverlust ist auf die im Vergleich zum Filterkies hohe Gleichkörnigkeit und Isotropie der Glaskugelschüttung zurückzuführen. Die Entwicklung der sechs Versuchsbrunnen brachte sehr unterschiedliche Einzelergebnisse und insgesamt nur geringe Ergiebigkeitszuwächse in den verschiedenen Brunnen. Ursache hierfür ist die geringe standortbedingte Ungleichkörnigkeit des anstehenden Sedimentes, das praktisch kein entsandungsfähiges Korn besitzt. Bei der Entsandung werden je nach Schüttkorngröße mehr oder weniger große Teile des Kornspektrums mobilisiert; ein echtes Stützkorngerüst ist aus diesem Sediment nicht entwickelbar. Der Standort der Testbrunnen in Rostrup ist somit aus fassungstechnischer Sicht als „schwieriger" Standort einzustufen.

Die Entsandungsförderleistung entsprach den Vorgaben des DVGW-AB W 119. Nach diesem Arbeitsblatt wäre für $Q_{Betrieb}$ = 12 m^3/h eine Kammerförderrate von 9 m^3/h bei einer Kammerlänge von 0,60 m rechnerisch korrekt. Aufgrund der geringen Ungleichkörnigkeit des Bodens ergaben sich an den Brunnen hohe mobilisierbare Sandgehalte, die nur bei den Brunnen 1 bis 3 zur praktischen Sandfreiheit bei $Q_{Betrieb}$ = 12 m^3/h führten. Am Brunnen 3 ergab sich ein Sanddurchbruch bei $Q > Q_{Betrieb}$; bei den übrigen Brunnen mit einer überbemes-

senen Schüttung wurde die technische Sandfreiheit erwartungsgemäß in keiner Pumpstufe erreicht.

Als Fazit aus den Versuchen an den sechs Brunnen ist abzuleiten, dass die spezifische Ergiebigkeit in den Glaskugelbrunnen bei den standörtlichen Bodenverhältnissen etwa 15 % höher ausfällt als bei den Vergleichskorngrößen der DIN-Filterkiese. Diese Relation ändert sich nach der Entwicklung der Brunnen nicht. Die Brunnen 1 und 2 entsprechen der Schüttkornausstattung standorttypischer Brunnen in Rostrup. Dies wurde durch die Sandfreiheit am Ende der Entwicklungsarbeiten bestätigt.

Die Brunnen 4 bis 6 sind gegenüber dieser Schüttkornausstattung für $Q_{Betrieb}$ trotz einer nach W 113 bestimmten Schüttung von 2 bis 3,15 mm als „überbemessen" einzustufen. Diese Diskrepanz wird u. a. auf die ungenauere Bestimmung des Wendepunktes in den Sieblinien der Schichten bei Verwendung des für kleine Körnungen zu weit gestuften Norm-Siebsatzes zurückgeführt.

Der geringere Ergiebigkeitszuwachs in den Brunnen 3 bis 6 zeigt im Vergleich zu den „korrekt" bemessenen Brunnen 1 und 2, dass der Einfluss der vergleichsweise geringen Untergrunddurchlässigkeit bei den in Bezug auf die Schüttkorngröße „überbemessenen" Brunnen größer wird. Die im Labor ermittelte hohe bis sehr hohe Durchlässigkeit der Schüttgüter „verbessert" die geringe Unterdurchlässigkeit nur noch im geringen Umfang. Die Durchlässigkeit des Untergrunds liegt mit rund $0{,}5 \cdot 10^{-3}$ m/s etwa eine Zehnerpotenz unter der Durchlässigkeit der Glaskugeln (Kugelgröße > 2,1 mm) bzw. des vergleichbaren Filterkieses (2,0 bis 3,15 mm) (0,5 bis $0{,}7 \cdot 10^{-2}$ m/s) [4]. Daraus kann abgeleitet werden, dass die Schüttung im Brunnenringraum bei relativ gleichkörnigen Sedimenten, unabhängig vom Material, nur einen geringen Beitrag zur Verbesserung der Systemdurchlässigkeit leistet.

Die ausgetragene Sandmenge steigt mit der Kugel- bzw. Korngröße an und erreicht in den bearbeiteten Abschnitten der jeweils 4 m langen Filterstrecken unterschiedliche Beträge. Nahe der Filterober- oder -unterkante steigt der Sandanfall tendenziell an, da über die Unter- und Überschüttung des Filterrohrs auch nicht genau definierbare Abschnitte außerhalb der Verfilterung durch die Entwicklungsarbeiten aktiviert wurden.

Die im Zuge der Entsandung ausgetragenen und mittels Partikelmessung 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 (etwa 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).

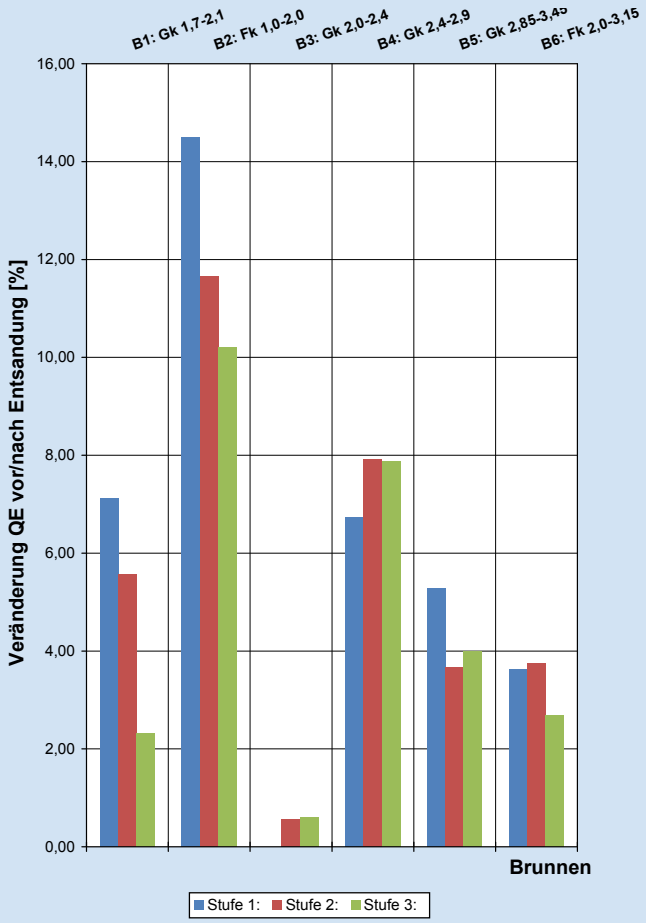

***Bild 7**. Prozentuale Veränderung der spezifischen Ergiebigkeit Q_E in den Versuchsbrunnen nach der Entwicklung/Entsandung (bezogen auf die Stufen des Leistungspumpversuchs).*

***Bild 8**. Versuchsanordnung zur Ermittlung des Verockerungsverhaltens von Glaskugel- und Filterkiesschüttungen.*
© Christoph Treskatis

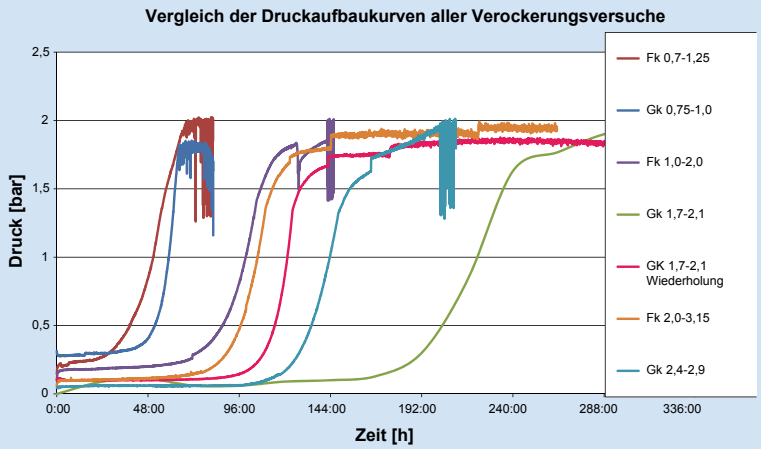

***Bild 9**. Druckaufbaukurven für die untersuchten Schüttungen (Plateauphase mit Druckmaximum 2 bar versuchstechnisch bedingt).*

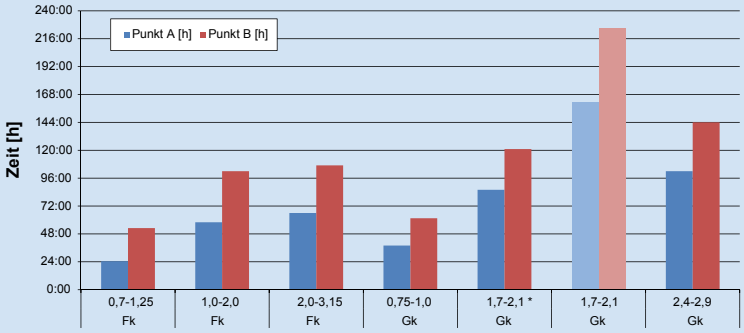

***Bild 10**. Zeitpunkte des Beginns des Druckaufbaus im Schüttgut (Punkt A) und des Wendepunktes (Punkt B) in der experimentellen Druckaufbaukurve in einem Schüttkörper.*

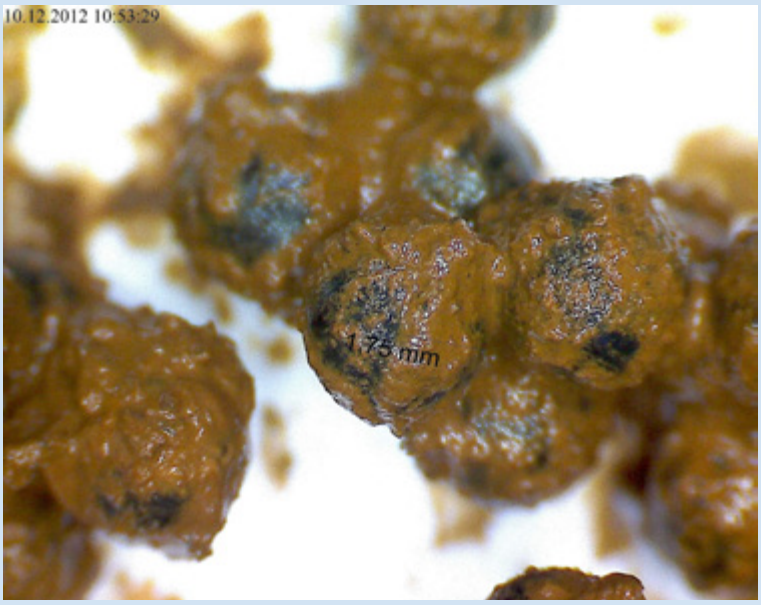

***Bild 11**. Ummantelung von Glaskugeln (1,75 mm Durchmesser) mit Mangan- (als „erste Schale") und Eisenoxiden (als schlammartige Matrix).* © Lara Tholen

Die Durchgangskorngröße steigt bei dem standörtlich bedingten, feinkörnigen Bodentyp ($C_u < 2$) in Funktion der Kugel- bzw. Korngröße der Schüttung an. Dabei ergeben sich bei den gegenüber W 113 „überbemessenen" Glaskugelschüttungen Durchbrüche von Sandkörnern, die größer als das Kennkorn sind. Diese Tendenz ist bei der gröberen Kiesschüttung nicht so deutlich erkennbar. Daraus wird abgeleitet, dass bei Glaskugelschüttungen bei „korrekter" Bemessung der Kugelgröße Durchbrüche bis zum Kennkorn der Sieblinie erwartet werden können, entsprechend der theoretischen Betrachtungen nach Nahrgang, auf denen auch die Methodik der Schüttgutbemessung im AB W 113 basiert. Fehlbemessungen und Sanddurchbrüche können nur durch möglichst exakte Probennahmen und mit einem in den feineren Korngrößen z. B. zwischen 2,0 und 0,063 mm stufenweise erweiterten Siebsatz ausgeführte Korngrößenanalysen vermieden werden. Dies gilt genauso für Kiesschüttungen, nur dort werden Sanddurchbrüche durch die Einlagerung in der Schüttung zum Teil aufgefangen bzw. verschleiert.

Die Versuche zeigten, dass die Filterkiese in Bezug auf die Sandfreiheit und die Filterstabilität eine scheinbar höhere „Toleranz" gegenüber Fehlbemessungen und Ausführungsfehlern im Brunnenbau haben. 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.

4. Laborversuche zur Ermittlung des Druckverlaufs infolge einer chemischen Verockerung

Kommt im Grundwasser gelöstes zweiwertiges Eisen in Kontakt mit gelöstem Sauerstoff, führt dies zu einer Oxidation zu dreiwertigem Eisen, das aufgrund seiner geringen Löslichkeit in Wasser als Eisenoxid ausfällt. Mangan verhält sich prinzipiell ähnlich wie Eisen. Im reduzierten Wasser gelöst kommt fast ausschließlich zweiwertiges Mangan vor. Bei Kontakt mit Sauerstoff können sowohl dreiwertiges als auch vierwertiges Mangan entstehen, die in Form unlöslicher Manganoxide ausfallen [9]. Neben rein chemischen Prozessen beeinflussen an vielen Brunnenstandorten vor allem Mikroorganismen die Verockerung von Brunnen. Aufgrund der Vielzahl der Einflussgrößen ist es nach [9] fast unmöglich, pauschale Aussagen über die Verockerungsanfälligkeit und -geschwindigkeit von Brunnen zu treffen. Einige Kriterien lassen sich aber nach [9] ableiten, die – bzw. Kombinationen davon – besonders ungünstig für die Verockerung und die damit verbundenen Leistungseinbußen von Brunnen sind:

- gleichzeitige Anwesenheit von Eisen bzw. Mangan und Sauerstoff bzw. Nitrat,
- lange Filterstrecken, die mehrere hydrochemische Zonen überstrecken,

- hoher pH-Wert,
- starke Absenkung im Betrieb, besonders bei Luftzutritt in den Filterbereich,
- hohe Förderraten und Fließgeschwindigkeiten,
- nicht gewaschener Filterkies (Eisenoxidbeläge),
- ggf. häufiges An- und Ausschalten des Brunnens.

Die Folge einer „Verockerung" ist, unabhängig von ihrer Ursache, eine allmähliche Zunahme der Druckverluste am Brunnen infolge 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. Diese Abnahme ist Folge der Zunahme der Druckverluste zwischen Grundwasserleiter und Brunnen.

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 die lieferbaren Filterkiese und Glaskugelfraktionen direkt miteinander verglichen. Mikrobiologische Aspekte der Verockerung und der Entfernung der Ablagerungen durch handelsübliche Regeneriermittel wurden im Rahmen dieser Experimente nicht untersucht.

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 [4, 5]. Der Versuchszylinder wurde mit dem jeweiligen Schüttgut rund 50 cm hoch befüllt und nicht zusätzlich verdichtet (**Bild 8**). 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. Untersucht wurden bei mittlerer Lagerungsdichte die Schüttungen GK 0,75 bis 1,0 mm im Vergleich zum FK 0,7 bis 1,25 mm, GK 1,7 bis 2,1 mm im Vergleich zum FK 1,0 bis 2,0 mm und GK 2,4 bis 2,9 mm im Vergleich zum FK 2,0 bis 3,15 mm.

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. Der Druckverlauf in der Schüttung wurde bei konstantem Durchfluss mit Datenloggern aufgenommen und für die untersuchten Schüttgüter in **Bild 9** dargestellt. Der Anstieg des Drucks im Versuchskörper erfolgte in den verschiedenen Schüttgütern zu unterschiedlichen Zeitpunkten (**Bild 10**). 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 (**Bild 10**).

***Bild 12**. Agglomerat verockerter Glaskugeln (1,75 mm Durchmesser).*
© Christoph Treskatis

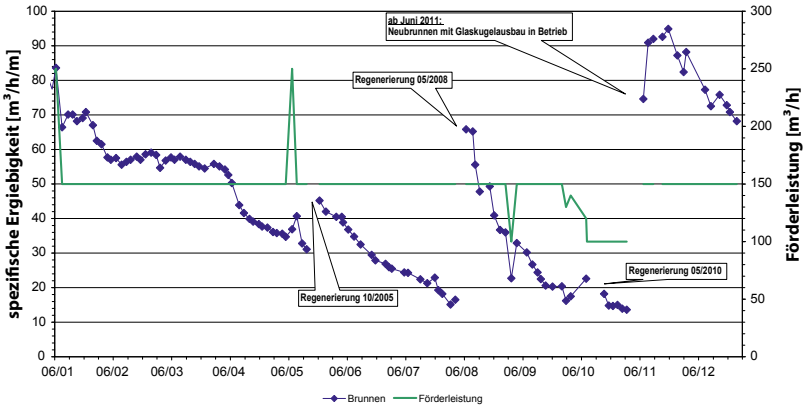

***Bild 13**. Beispielhafter Verlauf der Ergiebigkeitskurve eines Kiesschüttungsbrunnens im Rheintal, der nach Abfall der Ergiebigkeit auf < 20 m³/h/m durch einen Glaskugelbrunnen am gleichen Standort ersetzt wurde.*

5. Schlussfolgerungen aus den „Verockerungsversuchen" und Vergleich mit realen Brunnen

Zu Beginn des Versuchs wurden bereits ohne Verockerung geringe Druckunterschiede zwischen den Materialtypen festgestellt. 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 (**Bild 11**) und in einer Matrix aus Eisenoxiden eingelagert (**Bild 12**). Aus den bisher durchgeführten Versuchen ist abzuleiten, dass in den Filterkiesen ein verockerungsbedingter Druckanstieg grundsätzlich früher beginnt als in den analogen Glaskugelschüttungen.

In den Glaskugelschüttungen beginnt unter vergleichbaren Randbedingungen der Druckanstieg je nach Kugelgröße nach ca. 40 bis ca. 98 Stunden; die vergleichbaren Filterkiese zeigten einen Druckanstieg bereits nach ca. 24 bis ca. 70 Stunden (Punkte A in **Bild 10**). Die Druckaufbaukurven steigen nach Erreichen des Wendepunktes (Punkte B in der **Bild 10**) bis zur versuchsbedingten Druckbegrenzung von 2 bar bei allen Kugelgrößen nahezu parallel mit in etwa gleicher Steigung an. Die Verockerung der Glaskugeln beginnt im Labor um den Faktor 2 bis 2,5 später. Der Verlauf der Druckaufbaukurven in der ersten Phase bis zum 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 (**Bild 10**). Der Erstversuch mit der GK-Schüttgröße 1,7 bis 2,1 mm ergab einen Druckanstieg nach etwa 160 Stunden (siehe **Bild 9**). Der Wiederholungsversuch am Ende der gesamten Versuchsreihe zeigte einen Druckanstieg bereits nach etwa 80 Stunden. Eine der möglichen Ursachen dieses deutlichen zeitlichen Unterschiedes wird auf die im Versuchsablauf zunehmende Verockerung der Zuführungsleitung und die dadurch vermutlich ausgelösten Abrisse und Verlagerungen von Verockerungsprodukten in die Schüttgutzylinder gesehen, die zu einem im Vergleich zum Erstversuch frühzeitigeren Druckaufbau führten.

Eine vergleichende Analyse des Verockerungsverhaltens von Glaskugel- und Filterkiesausbauten an realen Brunnen in ausgesprochen ungleichkörnigen (C_u> 10) quartären Terrassenkiesen und -sanden ergab, dass sich das aus den Laborversuchen abzuleitende Verockerungsverhalten der beiden Schüttguttypen grundsätzlich auf die Brunnenbetriebspraxis übertragen lässt.

Die hydrogeologischen Grundlagen des hierfür ausgewählten Brunnenfeldes mit insgesamt fünf etwa 30 m tiefen Vertikalfilterbrunnen in der Rheintalscholle sind bei [10] zusammengefasst worden. Drei der fünf Brunnen sind unterschiedlich stark „verockerungsanfällig“ und liegen in einem Grundwasserleiter, der durch Aufstieg von reduziertem Tiefenwasser aus dem karbonischen Kohlenkalk in die Rheinterrassen gekennzeichnet ist [10]. Einer dieser von einer überwiegend chemisch bedingten Verockerung betroffenen Brunnen wurde seit 2001 mehrfach regeneriert und schließlich nach Abfall der spezifischen Ergiebigkeit im Jahr 2011 neu gebohrt und mit Glaskugeln im Filterbereich ausgestattet.

Die Neubauergiebigkeit des Glaskugelbrunnens betrug auf Grundlage des Inbetriebnahmepumpversuches etwa 98 m^3/h/m. Sie lag über der Neubauergiebigkeit des Altbrunnens (84 m^3/h/m). Bis etwa November 2011 blieb die Ergiebigkeit stabil, danach setzte hier ein kontinuierlicher Leistungsrückgang ein (**Bild 13**). Aktuell liegt die spezifische Ergiebigkeit zwischen rund 70 und 75 m^3/h/m. Dies entspricht einer Abnahme gegenüber dem Neubauzustand von etwa 25 %. Im Vergleich zum Kiesschüttungsbrunnen nahm die Ergiebigkeit des Glaskugelausbaus um 22 m^3/h/m pro Jahr ab. Der Kiesschüttungsbrunnen hatte nach einem Jahr einen Abfall um rund 26 m^3/h/m.

In der Praxis zeigt sich, dass die Glaskugelschüttung zwar eine anfänglich erhöhte spezifische Ergiebigkeit zur Folge hatte, deren Ursache sowohl auf brunnenbautechnische bzw. materialbedingte als auch standörtliche Effekte zurückgeführt werden kann. Die Abnahme der Ergiebigkeit ist gegenüber dem früheren Filterkiesausbau

Tabelle 2. Zusammenstellung und praxisbezogene Bewertung der Eigenschaften von Glaskugeln und Filterkiesen in Brunnen (Verhalten des Materials in Bezug auf die Beurteilungsgröße: ++ sehr gut, + gut, 0 mäßig, - schlecht).

Beurteilungsgröße	Verhalten der Glaskugeln	Verhalten des Filterkieses
Rundheit	++	0
Abrieb	++	–
Bruchfestigkeit	++	–
Unterkorn	++	0
Nutzporosität	++	+
Setzungsverhalten	++	0
Mobilisierbarer Sandaustrag bei Entsandung	++	0
Entsandungsdauer bei korrekter Bemessung	++	0
Durchlässigkeit des Materials	++	+
Ergiebigkeit des Brunnens (materialbezogen)	++	+
Ergiebigkeit des Systems Brunnen-Material-Aquifer	+	+
Durchgang von Körnern bis Kennkorngröße (Trennverhalten der Schüttung)	++	0
Auswirkungen auf die Sandführung bei einer Fehlbemessungen	–	+
Auswirkung auf die Brunnenleistung bei einer Fehlbemessung	0	–
Durchbruchgefahr bei Fehlbemessung	–	0
Druckverluste in Folge von Kolmationen und Inkrustationen (Neubrunnen)	+	0
Verhalten gegenüber zunehmender Verockerung und Ergiebigkeitsverlusten (längerer Brunnenbetrieb)	0	0

in dem nun mit Glaskugeln ausgestatteten Beispielbrunnen an diesem Standort langsamer. Für den Betreiber bedeutet dies, dass der Beginn signifikanter Leistungsrückgänge bei Glaskugeln um einen standort- und betriebsabhängigen Zeitraum verzögert wird; dieser wird aber auch, wie bei Filterkiesbrunnen, in der Praxis zu einem regelmäßigen Regenerierbedürfnis führen.

Aus den bisherigen Praxiserfahrungen, Feldstudien und Laborexperimenten ergeben sich die in der **Tabelle 2** zusammengestellten Eigenschaften der verschiedenen Schüttgutmaterialien. Aus der Gegenüberstellung zeigt sich, dass Glaskugeln vor allem materialtechnische und hydraulische Vorteile gegenüber dem „Naturprodukt" Filterkies haben. Im System Brunnen-Ringraum-Aquifer wirken diese Vorteile vor allem bei Neubrunnen durch eine verbesserte (Anfangs-)Ergiebigkeit und, bei einer korrekten Bemessung der Kugelgröße, durch eine raschere Entsandung.

Die hydraulischen Vorteile der Glaskugeln können bei einer Fehlbemessung der Schüttung zunichte gemacht werden. Filterkiese „verzeihen" Bemessungsfehler eher, da deren Ungleichkörnigkeit und ungleichen Kornformen eher eine Retention von Körnern, die kleiner als das Kennkorn des anstehenden Sedimentes sind, als deren Passage fördern. Der „Preis" dafür ist eine erhöhte Kolmationsgefahr. Die Gleichkörnigkeit der Glaskugeln unterstützt eine strikte Trennung des austragsfähigen vom retardierten Korn. Sedimente mit geringen Ungleichkörnigkeiten müssen bei der Bemessung der Schüttkorngröße gesondert betrachtet werden, da sie kein Stützkorngerüst ausbilden können und je nach Abtrennung einer Kornfraktion verstärkt entweder zur Kolmation oder zur Sandführung neigen. Daher muss bei Sedimenten mit kleinen C_u-Werten die Kugelgröße exakt auf die Bemessungskorngröße aus der Kornverteilungskurve des Sedimentes abgestimmt werden. Bei Sedimenten mit höheren Ungleichkörnigkeiten und herstellbaren Stützkorngerüsten können mithilfe der Bemessungsansätze nach DVGW W 113 die Durchmesser der zu schüttenden Glaskugeln analog zu Filterkiesen bestimmt und an die Obergrenze des äquivalenten Kiesschüttkorns angepasst werden. Die große Auswahl an lieferbaren Glaskugelgrößen ermöglicht dem Planer eine individuelle Anpassung an das jeweilige Sediment.

Eine chemische Verockerung in inkrustationsgefährdeten Grundwasserleitern wird in Glaskugelbrunnen in einer ersten Abschätzung aus den Laborexperimenten um den Faktor 2 verzögert; die Standzeit bis zur ersten Regenerierung ist demnach länger im Vergleich zur äquivalenten Kiesschüttkorngröße. Da der Alterungsprozess aber primär von der Grundwasserbeschaffenheit abhängig ist, kann keines der beiden untersuchten Schüttmaterialen eine Verockerung verhindern oder aufhalten.

Die Unterschiede in den physikalischen und hydraulischen Eigenschaften der Ringraummaterialien müssen in der Brunnenplanung und bei der Brunneninstandhaltung individuell berücksichtigt und abgewogen werden, um die Produktvorteile des jeweiligen Schüttguttyps auch wirtschaftlich und für die Standzeit des Brunnens sinnvoll auszunutzen.

6. Zusammenfassung und Ausblick

In der Praxis werden seit mehr als fünf Jahren Glaskugeln in Brunnen als Alternative zu den DIN-Filterkiesen eingebaut. Die vergleichsweise günstigen hydraulischen Eigenschaften der Glaskugeln verbessern vor allem bei feinen bis mittleren Kugelgrößen (bis 3,45 mm) die Porosität, das Setzungsverhalten und die Systemdurchlässigkeit im Ringraum des Brunnens. Gröbere Fraktionen haben mit entsprechenden Filterkiesen vergleichbare hydraulische Eigenschaften. Der Eintrittswiderstand von Glaskugelschüttungen ist aufgrund der vergleichsweise homogenen Porenräume und Porenkanalweiten bei allen untersuchten Kugelgrößen geringer als in vergleichbaren Filterkiesschüttungen.

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 ein erweiterter Siebsatz verwendet wurden. Um eine Sandführung zu vermeiden, ist eine exakte Kugelgrößenbestimmung nach DVG W 113 erforderlich. Das gilt auch für Kiesschüttungen, nur wird die Sandführung bei einer Fehlbemessung durch die Einlagerung bzw. Kolmation von „Unterkorn" aus dem Grundwasserleiter in die Ringraumschüttung verschleiert.

Es konnte mit den Experimenten in Rostrup gezeigt werden, dass Glaskugelbrunnen mit einer nach DVGW-AB W 113 bestimmten Kugelgröße im Pumpversuch nach der Entsandung bei der Bemessungsförderrate sandfrei waren. Dagegen nahm die Sandführung in bewusst gröber geschütteten Glaskugelbrunnen aufgrund der nur gering ungleichkörnigen Sedimente am Standort der Experimente zu, sobald die Förderung über der Bemessungsfördermenge und die Kugelgröße außerhalb des Schüttkornspektrums der äquivalenten DIN-Filterkiesbänder lagen. Dieser Effekt war auch in den Brunnen mit zu grober Kiesschüttung, wenn auch kolmationsbedingt in einem geringeren Ausmaß, zu beobachten.

Bei der Bemessung der Kugel-/Kieskorngröße ist daher unter Verwendung eines erweiterten Siebsatzes im Bereich 0,063 bis 2 mm Maschenweite vor allem bei Fein- und Mittelsanden die Schüttkugelgröße möglichst exakt an der im Sinne des DVGW-Arbeitsblattes W 113 berechneten Schüttkorngröße zu orientieren.

Die Verockerung von Glaskugelschüttungen verläuft im Labormaßstab im Vergleich zu 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 Ver-

gleich zum Filterkies relativ gleichmäßigen Porenraumgeometrie reduziert. Die weitere Druckaufbaucharakteristik der Glaskugelpackungen verläuft im Laborversuch nach Durchgang eines Wendepunktes parallel zur 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 jedoch den Druckaufbau und verzögern den Rückgang der Ergiebigkeit. Die Befunde aus den Experimenten bestätigen, dass die unterschiedlichen Materialeigenschaften der untersuchten Schüttkorntypen mit zunehmender Betriebszeit sehr stark von den individuellen Alterungsprozessen im Brunnen überlagert werden.

Die Charakteristik der Laborbefunde zum Druckaufbau in Folge von Durchströmung des Schüttgutkörpers mit eisen- und manganhaltigem Rohwasser konnten auch an Brunnen in einem verockerungsanfälligen Terrassengrundwasserleiter in der Rheintalscholle (Rohwasser mit > 5 mg/L Fe_{gesamt} und >1 mg/L Mn_{gesamt}) nachvollzogen werden. Der Glaskugelbrunnen war bei Neubau ergiebiger als der Kiesschüttungsbrunnen zum damaligen Neubaustadium. Der Verlust an Ergiebigkeit bzw. der Druckaufbau ist zeitlich verzögert und der Brunnen hat nach rund 1,5 Jahren einen etwas geringeren Ergiebigkeitsverlust pro Jahr als der Vergleichsbrunnen mit Kiesausbau.

Für die Praxis ergibt sich aus den Experimenten die Schlussfolgerung, dass bei Glaskugelbrunnen und Kiesschüttungsbrunnen Regeneriermaßnahmen vor dem Erreichen des Wendepunktes in der Druckaufbaukurve durchgeführt werden sollten, um den Anstieg der Druckdifferenzen herauszuzögern und die Ergiebigkeit auf einem möglichst hohen Niveau zu halten. Dies kann Regenerierungen bereits nach einem Jahr Betriebszeit erforderlich machen. Tendenziell können nach diesen vergleichenden Experimenten und Praxiserfahrungen in gröberen Terrassenablagerungen Glaskugelbrunnen etwas später erstmalig regeneriert werden als vergleichbare Filterkiesbrunnen an Standorten mit vergleichbarer Verockerungsneigung.

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. Dem Bau-Ausbildungszentrum in Rostrup gilt ein großer Dank für die technische und personelle Unterstützung der Arbeiten.

Literatur

[1] *Herrmann, F.* und *Stiegler, X.*: Einsatz von Glaskugeln als Ersatz für Filterkies in Brunnen. bbr (2009) Nr. 5, S. 48-53.

[2] *Treskatis, C., Danhof, M. Dressler, M.* und *Herrmann, F.*: Vergleich ausgewählter Materialcharakteristiken von Glaskugeln und Filterkiesen für den Einsatz in Trinkwasserbrunnen. Energie/Wasser Praxis (ewp) (2010) Nr. 1, S. 26 – 32.

[3] *Treskatis, C., Hein, C., Peiffer, S.* und *Herrmann, F.*: Brunnenalterung: Sind Glaskugeln eine Alternative zum Filterkies nach DIN 4924? bbr (2009) Nr. 4, S. 36-44.

[4] *Treskatis, C., Tholen, L.* und *Klaus, R.*: Hydraulische Merkmale von Filterkies und Glaskugelschüttungen im Brunnenbau – Teil 1. Energie / Wasser – Praxis (ewp) (2011) Nr. 12, S. 58 – 65.

[5] *Treskatis, C., Tholen, L.* und *Klaus, R.*: Hydraulische Merkmale von Filterkies und Glaskugelschüttungen im Brunnenbau – Teil 2. Energie/Wasser – Praxis (ewp) (2012) Nr. 1, S. 40 – 43.

[6] *Klauder, W.S.*: Experimentelle Untersuchung der Anströmung von Vertikalfilterbrunnen. Dissertation RWTH Aachen, Lehrstuhl und Institut für Wasserbau und Wasserwirtschaft, 2010.

[7] *Treskatis, C.*: Einsatz von Glaskugeln in Trinkwasserbrunnen – bisherige Forschungsergebnisse. In: Bluefacts – International Journal of Water-Management: 110-116, Bonn, 2011.

[8] *Tholen, L.*: Vergleichende Untersuchungen an Filterkies- und Glaskugelschüttungsbrunnen. Masterarbeit an der Jade Universität: 94 S; Oldenburg (unveröffentlicht), 2013.

[9] *Houben, G.* und *Treskatis, C.*: Regenerierung und Sanierung von Brunnen – Technische und naturwissenschaftliche Grundlagen der Brunnenalterung und möglicher Gegenmaßnahmen. 2. Auflage, DIV Deutscher Industrieverlag, München, 2013, 504 S.

[10] *Wilder, H.* und *Treskatis, C.*: Auswirkungen von Tiefenwasserzutritten aus dem Liegenden der pleistozänen Terrassen im Bereich des Wasserwerkes Broichhofstrasse der Stadtwerke Ratingen GmbH. Mitteilungen zur Ing.- und Hydrogeologie RWTH Aachen, Heft 89, 2004, S. 147-157.

Eingereicht: 27.08.2013
Korrektur: 08.11.2013
Im Peer-Review-Verfahren begutachtet

Autoren

Prof. Dr. habil. **Christoph Treskatis**
E-Mail: c.treskatis@bup-gup.de |
Bieske und Partner |
Beratende Ingenieure GmbH |
Im Pesch 79 |
D-53797 Lohmar

Lara Tholen, M. eng.
E-Mail: ltholen@consulaqua.de |
CONSULAQUA Hamburg |
Beratungsgesellschaft mbH |
Ausschläger Elbdeich 2 |
D-20539 Hamburg

Dipl.-Geol., MBA **Reinhard Klaus**
E-Mail: mail@reinhard-klaus.de |
RKP Consulting |
Mögeldorfer Hauptstraße 31 A |
D-90482 Nürnberg