

HENRY

Hydraulic Engineering Repository

Ein Service der Bundesanstalt für Wasserbau

Conference Paper, Published Version

Treskatis, Christoph

Glaskugeln im Brunnenbau: Aktuelle Forschungsergebnisse

Verfügbar unter/Available at: <https://hdl.handle.net/20.500.11970/101808>

Vorgeschlagene Zitierweise/Suggested citation:

Treskatis, Christoph (2011): Glaskugeln im Brunnenbau: Aktuelle Forschungsergebnisse. In: Bundesanstalt für Wasserbau (Hg.): Baugrundaufschlüsse: Planung, Ausschreibung, Durchführung, Überwachung und Interpretation. Karlsruhe: Bundesanstalt für Wasserbau.

Standardnutzungsbedingungen/Terms of Use:

Die Dokumente in HENRY stehen unter der Creative Commons Lizenz CC BY 4.0, sofern keine abweichenden Nutzungsbedingungen getroffen wurden. Damit ist sowohl die kommerzielle Nutzung als auch das Teilen, die Weiterbearbeitung und Speicherung erlaubt. Das Verwenden und das Bearbeiten stehen unter der Bedingung der Namensnennung. Im Einzelfall kann eine restriktivere Lizenz gelten; dann gelten abweichend von den obigen Nutzungsbedingungen die in der dort genannten Lizenz gewährten Nutzungsrechte.

Documents in HENRY are made available under the Creative Commons License CC BY 4.0, if no other license is applicable. Under CC BY 4.0 commercial use and sharing, remixing, transforming, and building upon the material of the work is permitted. In some cases a different, more restrictive license may apply; if applicable the terms of the restrictive license will be binding.





Glaskugeln im Brunnenbau: Aktuelle Forschungsergebnisse

Prof. Dr. habil. Christoph Treskatis
Dozent an der RWTH Aachen und TU Darmstadt
c/o Bieske und Partner GmbH, Im Pesch 79, 53797 Lohmar
02246 921220 c.treskatis@bup-gup.de

Zusammenfassung

Die physikalischen und hydraulischen Eigenschaften von Glaskugeln und Filterkiesen werden derzeit im Rahmen eines F&E-Vorhabens, gefördert vom Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages, untersucht. Quantifizierbare Unterschiede zwischen den Schüttmaterialien ergaben sich vor allem bei den Eigenschaften Rundheit, Bruchlast, Bruchcharakteristik, Abriebfestigkeit und beim Anlagerungsverhalten gegenüber Eisenhydroxiden. Glaskugeln haben bei nahezu idealer Rundheit eine sehr geringe spezifische, innere Oberfläche bei geringen Rauheiten und Rauhigkeiten sowie ein hohes Lastaufnahmevermögen. Filterkiese haben stark strukturierte, raue Oberflächen mit großem Anlagerungspotenzial für Verockerungsprodukte. Geringe Bruchlasten fördern dort die Unterkornbildung. Daraus wird abgeleitet, dass diese Materialeigenschaften die Regenerierhäufigkeit und die Nachhaltigkeit von Regenerierungen beeinflussen. 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. Das Setzungsmaß im Bohrlochzylinder ist bei Filterkiesen deutlich erhöht im Vergleich zu den Monokornschüttungen aus Glaskugeln. Der Einbau von Glaskugeln in Brunnen erfordert die gleichen begleitenden Maßnahmen wie der Filterkieseinbau. Mehrfachschüttungen oder vertikal differenzierte aus Glaskugeln sind aufgrund der sehr geringen inneren Reibung nicht zu empfehlen, da sie sich beim Entwickeln vermischen.

1 Einleitung

Glaskugeln werden seit 2007 als Schüttgüter zur „Verkiesung“ von Brunnenfiltern verwendet [1]. Erste Erfahrungen mit Glaskugeln aus säurebeständigem Kalk-Natronglas 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. Bei verockerungsanfälligen Brunnen wurden in Glaskugelausbauten raschere Entsandungs- und Regeneriererfolge erzielt.

Wissenschaftliche Untersuchungen in den Niederlanden bestätigten erstmals 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 durch diese mechanische Brunnenalterungsart 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 werden derzeit brunnenbauspezifische Materialcharakteristiken, das Anlage-

ungsverhalten von Eisenhydroxiden (Bild 1) und die hydraulischen Eigenschaften, wie z. B. das nutzbare Porenvolumen, von Glaskugeln und Filterkieshaufwerken in Bohrlöchern ermittelt [5].



Bild 1: Anlagerung von Eisenhydroxiden an Glaskugeln und Filterkies. Foto: Christian Hein, Universität Bayreuth.

DIN-Filterkiese für den Brunnenbau und Glaskugeln unterschiedlicher Korngrößen wurden im Labor der Fa. Sigmund Lindner auf ihre Materialeigenschaften hin untersucht. Parallel dazu wurde am Lehrstuhl für Hydrologie der Universität Bayreuth die chemische Verockerungsneigung von Filterkies und Glaskugeln im Labormaßstab verglichen [6]. Erste grundlegende Tests zur nutzbaren Porosität von Filterkiesen und Glaskugeln wurden an verschiedenen Kornspektren und Lagerungsformen im Bau-ABC in Rostrup durchgeführt.



2 Forschungsergebnisse

2.1 Materialeigenschaften

Die Rundheit einer Kugel ergibt sich aus dem Breiten- zu Längenverhältnis im Idealfall zu 1. Bei Glaskugeln wurde dieses Verhältnis unabhängig von der Größe zu 0,97 ermittelt. Bei Quarzkiesen werden im optimalen Fall 0,73 bis 0,78 erreicht. Dadurch werden im Filterkies heterogene Lagerungsdichten und Instabilitäten erreicht, die sich im Laufe des Einbaus, der Brunnenentwicklung und im Brunnenbetrieb verändern und oft erhebliche Setzungen bis hin zu Rohrzusammenbrüchen auslösen. Bei Monokornmischungen aus Glaskugeln wird bereits bei der Schüttung eine Lagerungsdichte erwartet, die der dichtesten Kugelpackung nahe kommt und daher im weiteren Bearbeitungsprozess und bei der Brunnenregenerierung kaum noch zu weiteren 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 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 Accelerator ermittelt. Damit sollte der Transport des Materials im Bigbag simuliert werden. Der Abrieb der Glaskugeln und Filterkieskörner < 0,2 mm wurde aus der Mühle geschwemmt. Dessen Masse wurde der Masse der Testschüttung gegenübergestellt. Die Glaskugeln erlitten einen Abriebverlust (Massenverlust) von ca. 0,5 % je Stunde Mahldauer, die Filterkiese um bis zu ca. 6% je Stunde. Insgesamt war der Massenverlust bei den Glaskugeln mit ca. 4% für den gesamten Testzeitraum (9 h) um den Faktor 13 geringer als beim Filterkies (bis zu 53 % Massenverlust). Dadurch konnte gezeigt werden, dass die Filterkiese vor allem bei den größeren Korndurchmessern beim Transport und Einbau 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.

Die Oberflächengestalt und das Oberflächenprofil von Glaskugeln und Filterkies wurden mittels Rasterelektronenmikroskop bestimmt. Die Kieskornoberfläche 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 von 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).

2.2 Chemische Beständigkeit und Anlagerungsverhalten

Die chemische Beständigkeit gegenüber pH-gesteuerten Regeneriermitteln wurde über Testlösungen prinzipiell bestätigt. Es ergaben sich jedoch materialabhängige Unterschiede bei der Lösung von Elementen aus den Schüttgütern bei verschiedenen Säurekonzentrationen.



Bild 2: Anlagerung von Eisenhydroxiden an Glaskugeln in einem Wickeldrahtfilterbrunnen. Foto: Fa. Ochs, Nürnberg

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, während bei Kies Al, Ca, und Si dominieren. Hinzu kommen 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 in Säulenversuchen untersucht. Für die Anlagerungsversuche wurde zur Simulation eines eisenhaltigen Grundwassers das 1,5-fache Porenvolumen einer entgasten Perkolationslösung mit $\text{pH} = 7$ und einem Eisengehalt von 1 mmol/l von unten durch $2,5\text{l}$ -Säulen 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. $600 \mu\text{mol Fe/Säule}$ bei den Glaskugeln und ca. $850 \mu\text{mol Fe/Säule}$ als Anlagerungsmasse festgestellt. Im Filterkies wurden im Vergleich zu den Glaskugeln ca. 40% mehr Eisenmasse retardiert.

In der Praxis wurden verglaste Brunnen mit Verockerungspotenzial untersucht, die ca. 2 bis 3 Jahre nach Neubau in Betrieb waren. Bild 2 zeigt ein Beispiel aus Franken, das geringe Ummantelungen der Glaskugeln mit Eisenhydroxiden hinter den Filterschlitz zeigt. In Bild 3 ist eine stärker verockerte Zone im gleichen Beispielbrunnen dargestellt. Die Ablagerungen sind hier auf die Spaltöffnungen des Wickeldrahtfilters begrenzt.



Bild 3: Anlagerung von Eisenhydroxiden an Glaskugeln und in den Schlitzen in einem Wickeldrahtfilterbrunnen. Foto: Fa. Ochs, Nürnberg

Die Entfernbarkeit dieser Ablagerungen wird derzeit mittels Proberegenerierung in der Praxis getestet.

2.3 Hydraulische Eigenschaften

2.3.1 Hohlraumanteil und Durchlässigkeit

Unter dem Hohlraumvolumen, dem Porengehalt oder der Porosität eines Sedimentes oder Schüttgutes versteht man den Gesamthalt der Hohlräume im Gefüge. Die Größe des Hohlraumvolumenanteils kann je nach Struktur und Lagerungsdichte in weiten Grenzen schwanken. Dabei steuern die Kornzusammensetzung, der Durchmesser und die Form der Partikel den Hohlraumgehalt. Rein geometrisch beträgt der Hohlraumanteil in einem Haufwerk gleichgroßer Kugeln in dichtester Lagerung $25,18\%$, in lockerster Lagerung $47,64\%$ [7]. In natürli-

chen Schüttgütern oder Sedimenten sind die Körner weder kugelförmig noch gleich groß (Bild 4). Sie sind je nach Ablagerungsmilieu sortiert und weisen mehrere Kornfraktionen auf. Die kleineren Fraktionen füllen im Gefüge die Hohlräume zwischen den größeren Körnern auf und verringern so das Hohlraumvolumen. Daher haben in der Natur gleichförmige Sedimente mit steiler Körnungskurve ein größeres Hohlraumvolumen als Sedimente mit weiter Kornverteilung. Natürliche Sedimente haben Porenvolumina zwischen 20 und 50% [7]. Bei Monokornschüttgütern mit runden Kugeln ist diese Porenraumauffüllung mit Kleinstkörnern nicht zu erwarten (Bild 5). Es stellt sich eine mehr oder weniger dichte Lagerung ein, deren Porenvolumen nur noch von internen Schichtungsanomalien an der Bohrlochwand oder am Filterrohr gesteuert wird.



Bild 4: Haufwerk eines locker gelagerten Filterkieses $5,6$ bis 8mm . Foto: Fa. Ochs, Nürnberg



Bild 5: Haufwerk von Glaskugeln 6 mm in dichter Lagerung. Foto: Fa. Ochs, Nürnberg

Für die Wasserspeicherung ist das nutzbare Porenvolumen von Bedeutung, das mit zunehmender Korngröße eines Sedimentes oder Schüttkörpers zunimmt. Daraus leitet [7] ab, dass darin eine wirtschaftliche Wasserspeicherung im Untergrund nur möglich ist, wenn das Kleinstkorn $0,2 \text{ mm}$ nicht oder nur geringfügig unterschreitet. Dies entspricht der Grenze vom Mittelsand zum Feinsand. Je höher der Kleinstkornanteil wird, desto größer ist das Wasserhaltevermögen und desto geringer der nutzbare Porenanteil.



Der nutzbare Hohlraumanteil dient in der Wassergewinnung der Abschätzung des Nutzungsgrades und der damit verbundenen Wirtschaftlichkeit einer Grundwasserleiternutzung. Die Leistung der Wasserfassung wird jedoch als Zuflussmenge pro Zeiteinheit, also als Volumenstrom bestimmt und dabei von der Durchlässigkeit des im Grundwasserleiter anstehenden Gesteins gesteuert. Die Schüttgüter im Brunnenringraum sind daher so auszulegen, dass deren Durchlässigkeit den k_f -Wert des Sedimentes nicht unterschreitet bzw. zur Schaffung einer möglichst widerstandsarmen Brunneneintrittsfläche deutlich überschreitet.

Das nutzbare Porenvolumen ist somit von Bedeutung bei der Erkundung geeigneter Grundwasserleiter und der anschließenden Planung der Wasserfassung, während für den Betrieb einer Wasserfassung und die Grundwassernutzung die Durchlässigkeit des Untergrundes und der Schüttgüter im Brunnen von ausschlaggebender Bedeutung sind [7]. Die Durchlässigkeit beeinflusst die Bewegung des Grundwassers im Untergrund, der nutzbare Porenanteil bestimmt die Fließgeschwindigkeit und den Widerstand, den das Grundwasser beim Anströmen eines Brunnens überwinden muss. Die Bewegung des Wassers im Grundwasserraum ist eine Potenzialströmung, d.h. sie unterliegt i.w.S. dem Darcy'schen Filtergesetz. Das besagt, dass der Förderstrom gleich dem Produkt aus Druckgefälle und Fließgeschwindigkeit ist und proportional damit ansteigt. Die Durchlässigkeit ist als Durchlässigkeitsbeiwert k_f eine Materialkonstante und ermöglicht die Ermittlung der Grundwasserführung in einem Gesteinskörper.

Die Durchlässigkeitsbeiwerte der Sedimente nehmen mit der Korngröße ab und liegen bei Feinsanden im Mittel bei $< 0,0001$ m/s und steigen in Kiesen auf 0,1 bis 1,0 m/s an [7], [8]. Der k_f -Wert und der nutzbare Porenanteil n_{sp} eines natürlichen Sediments sind empirisch über die Gleichung nach [7] verknüpft:

$$n_{sp} = 25,5 + 4,5 \ln k_f$$

Der k_f -Wert ist im Umkehrschluss aber über den nutzbaren Porenanteil aufgrund der Gleichungsstruktur nicht direkt ermittelbar.

Im Brunnenringraum übernimmt die Filterkies- oder Glaskugelpackung die Funktion des wasserführenden Untergrundes. Die Bestimmung der Schüttkorngröße orientiert sich an den Vorgaben des DVGW-Arbeitsblattes W 113, welches aus der Kornverteilung der Sieblinie eines Sedimentes ein Kennkorn bestimmt und über die Ungleichförmigkeit einen Filterfaktor als Multiplikator nutzt. Das Produkt daraus ergibt das Schüttkorn. Das Kennkorn stellt in diesem Modellansatz die Kornfraktion dar, die aus dem Sediment in den Schüttkörper eindringen und im Brunnen über Entsan-

ungsverfahrens nach DVGW-Arbeitsblatt W 119 entfernt werden kann. Die Unterkornentfernung ist jedoch vor allem von der Öffnungsweite und Geometrie der Porenkanäle im Schüttkörper und des nutzbaren Porengehaltes abhängig. Diese Parameter werden von der Kornform, der Lagerungsdichte und der Kornverteilung bestimmt. In Laborversuchen wurden daher zunächst die Kennwerte der Schüttgüter zum Wasserhaltevermögen, nutzbaren Porenvolumen und Setzungsverhalten ermittelt.

2.3.2 Untersuchungen zum Hohlraumanteil und Setzungsverhalten

Eine Methode zur direkten Bestimmung des gebundenen Wasseranteils in einem Schüttkörper ist die Bestimmung des Wasserhaltevermögens.



Bild 6: Versuchsanordnung zur Ermittlung des Gesamtporenvolumens in Schüttgütern. Hier ist die Befüllung einer Filterkiesschüttung in einem 1 Liter-Gefäß abgebildet. Foto: Lothar Schoka, Bau-ABC Rostrup.

Unter dem Wasserhaltevermögen oder der Wasserkapazität eines Schüttkörpers versteht man den höchsten Wassergehalt, den ein in natürlicher oder verdichteter Lagerung entnommene Schüttgutprobe bei freiem Abzug nach unten durch ihre Oberflächenkräfte entgegen



der Schwerkraft längere Zeit hindurch festzuhalten vermag.

Hierbei handelt es sich um die Summe aus hygroskopischem Wasser, Kapillarwasser und Haftwasser. Je höher das Wasserhaltevermögen des Schüttgutes desto geringer ist der speichernutzbare Porenanteil. So kann das Wasserhaltevermögen eines homogenen Sandes zwischen 7 und 16% ausmachen, was rechnerisch bei einem Gesamthohlraumvolumen von 38 bis 42% zu einem nutzbaren Porenvolumen von 22 bis 26% führt [7], [8].

Im Bau-ABC Rostrup wurden im Rahmen des genannten Forschungsvorhabens Versuche zur Bestimmung des nutzbaren Porenvolumens und Setzungsverhaltens verschiedener Schüttgütertypen und -korngrößen durchgeführt.



Bild 7: Versuchsanordnung zur Ermittlung des nutzbaren Porenvolumens in Schüttgütern über die Messung des frei auslaufenden Wassers. Hier ist die Entleerung einer Filterkiesschüttung in einem 1 Liter-Gefäß abgebildet. Foto: Lothar Schoka, Bau-ABC Rostrup.

Bild 6 zeigt die Versuchsanordnung zur Bestimmung des Gesamtwassergehaltes mittels Messgefäßen; Bild 7 zeigt die Versuchsanordnung zur Bestimmung des frei auslaufenden Wassers aus dem Schüttkörper. Das Setzungsverhalten wurde in den Schüttgutproben verschiedener Korngrößen und Materialien gemäß Ver-

suchsanordnung in Bild 8 untersucht. Dazu wurden die Messzylinder mit den Schüttgütern in lockerer Lagerung befüllt und in eine Siebmaschine eingespannt. Diese wurde mit Vibrationsstufe 9 über 10 min. betrieben und im Minutentakt der Setzungsgrad [mm] an der Messskala des Gefäßes ermittelt.



Bild 9: Versuchsanordnung zur Ermittlung des Setzungsverhaltens in Schüttgütern über die Messung des Setzungsmaßes [mm]. Foto: Lothar Schoka, Bau-ABC Rostrup.

3. Erste Ergebnisse zum Hohlraumanteil und Setzungsverhalten der Schüttgüter

Die Versuchsergebnisse aus dieser Vorversuchsreihe zur Bestimmung des Nutzporenanteils von Schüttgütern wurden für Korngrößenfraktionen bis 3,15 mm grafisch aufgetragen und in den Bildern 9 bis 11 dargestellt. Die Vorversuche dienten als Vorbereitung eines Versuchszyklus in einem Versuchsstand, in dem unter gespannten Potenzialverhältnissen die Porenvolumina und Durchlässigkeitsbeiwerte des Systems Boden-Schüttgut und Filterrohr bestimmt werden sollen. Die materialabhängigen Kenngrößen im Säulenversuch sind dabei die Eingangsparameter für die nur rechnerisch zu bestimmenden Kenngrößen. In der Tabelle 1 sind die Ergebnisse von Versuchen an der Universität Bayreuth dargestellt, die im Vorfeld der Eisenanlagerungsversuche (s.



Bild 1) zur Kenngrößenbestimmung durchgeführt wurden.

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_s [cm ² * sec ⁻¹]	7,44E-05	8,67E-05	1,10E-04	8,98E-05
Abstandsgeschwindigkeit v_a [m * 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

Tab. 1: Filtermaterial, Korngrößen, Porenvolumen und Flussraten in Versuchssäulen ($V_{ges} = ca. 2,5 l$). Nach Ergebnissen von [6].

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 %, beim Filterkies mit steigender Korngröße zwischen 41 und 44%. Der Haftwasseranteil ist mit ca. 8 % bei den feinen Glaskugeln deutlich geringer als bei den feinkörnigen Filterkiesen. Dadurch ist der nutzbare, frei auslaufende Wasseranteil in den feineren Kiesschüttungen geringer als in den Glaskugelpackungen.

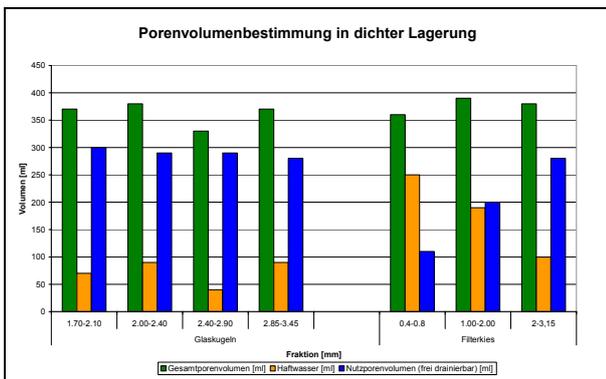


Bild 9: Ergebnisse der Porenraumbestimmung sowie der Anteile an nicht frei drainierbaren Wasseranteilen im Filterkies und in Glaskugeln mit dichter Lagerung

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.

Die Versuchsanordnung gemäß Bild 9 erzeugte in den Schüttgütern unterschiedliche Setzungsgrößen in Funktion der Zeit. Das Setzungsmaß wurde in [mm] pro Meter Säulenlänge bei 1 Liter Füllvolumen ohne Wasserfüllung und mit Auffüllung des Porenraums mit Wasser in verschiedenen Zeitschritten untersucht. Die Ergebnisse für die untersuchten Schüttgüter zeigen die Bilder 12 und 13.

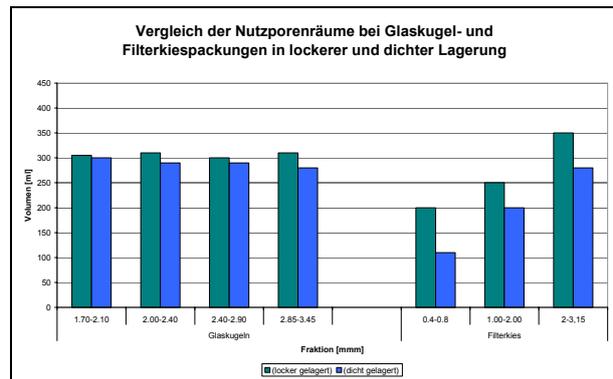


Bild 10: Ergebnisse der Nutzporenraumbestimmung an Filterkiesen und Glaskugeln in lockerer und dichter Lagerung

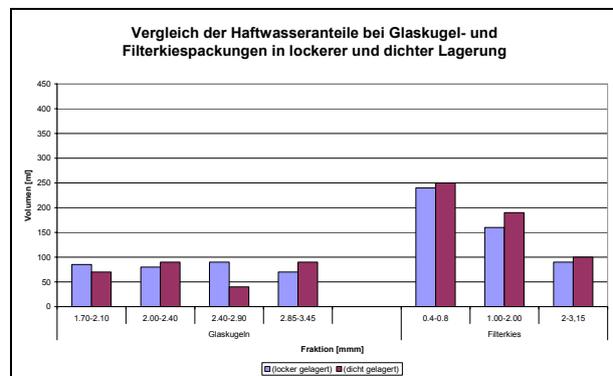


Bild 11: Ergebnisse der Bestimmung der Haftwasser- bzw. Kapillarwasseranteile in Filterkiesen und Glaskugeln in lockerer und dichter Lagerung

Die Schüttproben aus Filterkies setzten sich innerhalb des 10 minütigen Versuchszeitraums um bis zu 18%. Der Schüttgutspiegel reduziert sich um bis zu 180 mm. Dabei zeigte die feinste untersuchte Fraktionen 0,4 bis 0,8 mm bereits nach Einschalten der Siebmaschine eine vergleichsweise starke Setzung von 17%.

Das Setzungsmaß erhöhte sich im weiteren Versuchsablauf nur noch geringfügig auf 18%. Die beiden anderen untersuchten Fraktionen setzten sich im Versuchsverlauf nach einer deutlichen Anfangssetzung von 12 bis 13% bzw. 120 bis 130 mm noch um weitere 20 bis 30 mm. Die Schüttproben aus Glaskugeln setzten sich im Versuchszyklus unmittelbar nach Einschalten der Siebmaschine. Die Eingabegröße von 1.000 mm reduzierte sich innerhalb der ersten Minute um 5 bis 7 %. Der Schüttgutspiegel sank im Messzylinder um 50 bis 70 mm.

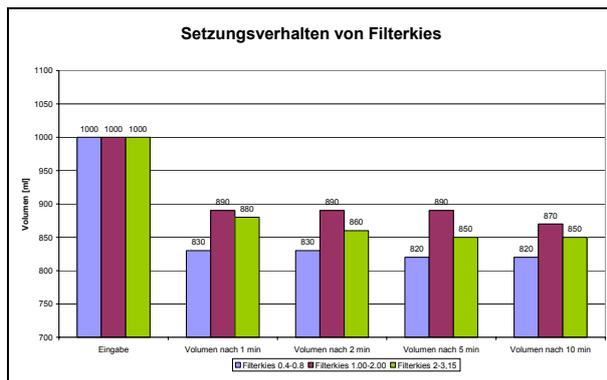


Bild 12: Setzungsverhalten und Setzungsmaß in Filterkiesen in Funktion der Zeit

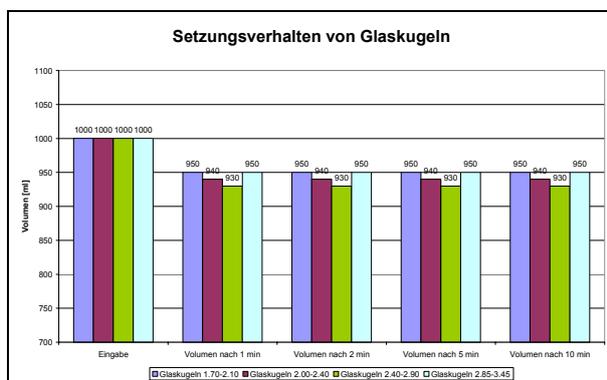


Bild 13: Setzungsverhalten und Setzungsmaß in Glaskugeln in Funktion der Zeit

Die Glaskugelschüttgüter zeigten im Vergleich zu den Filterkiesen ein deutlich geringeres Setzungsmaß und erreichten bereits nach Eingabe und Anfahren der Siebmaschine ihre „dichteste“ Lagerung. Die Filterkiese reagierten nach Beginn der Vibrationen mit einem vergleichsweise höheren Setzungsmaß, welches tendenziell mit zunehmender Korngröße erst über die Versuchszeit eine „dichte“ Packung im Schüttkörper erzeugt.

Für die Brunnenbaupraxis lässt sich daher ableiten, dass Filterkiese im Vergleich zu Monokornschüttungen aus runden Glaskugeln beim Einbau in den Brunnen höhere Setzungsmaße erwarten lassen. Für den Brunnenbetrieb und die Entsandung sowie die Regenerierung sind stabile Ringraumschüttungen wichtig, um eine dynamische Belastung der Ausbauten zu vermeiden, die z.B. durch kollabierende Kornbrücken oder spontane Setzungen lockerer Haufwerkgefüge entstehen können. Daher sind bei allen Schüttmaterialien unabhängig vom Material ein begleitendes Kolben bzw. Setzungspumpen und der Einsatz von Schüttrohren zwingend erforderlich, um die möglichst stabile Lagerung im Ringraum vor Aufbringen der Abdichtungen zu erreichen.

Glaskugeln sind, ein ordnungsgemäßer Einbau mittels Schüttrohren und in ausreichender Schüttungsstärke vorausgesetzt, im Ringraum stabil einbaubar und lassen nur geringe Setzungen erwarten. Vermischungen mit dem Gebirge und Entmischungen sind in der Praxis

bisher nur vereinzelt berichtet worden. Die aus der Praxis berichteten Probleme beim Schütten und Entwickeln von Glaskugeln sind bei einer Verwendung von Monokornmischungen und der Einbauhilfe analog zu den Filterkiesen zu beherrschen. Dabei sind bei tieferen Brunnen der Nachfall und der Spülsaustausch besonders zu beachten.

Glaskugeln verhalten sich wie eine Flüssigkeit und bilden aufgrund der sehr geringen inneren Reibung keine Schüttkegel. Die Verwendung von gemischten Glaskugelschüttungen ist grundsätzlich nicht zu empfehlen, da sich die Fraktionen beim Schütten und Entsandern entmischen und bei der Entwicklung zu Instabilitäten im Ringraum führen. Ebenso sollten zweifache Kiesschüttungen aus Glaskugeln aus den gleichen Gründen nicht eingebaut werden.

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. –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).
- [7] MAROTZ, G. (1968): Technische Grundlagen einer Wasserspeicherung im natürlichen Untergrund. - Schriftenreihe des Kuratoriums für Kulturbauwesen Heft 18: 228 S.; Hamburg.
- [8] BERTSCH, W. & SCHWILLE, F. (1971): Die hydrodynamische Dispersion in porösen Medien. – Bundesanstalt für Gewässerkunde: 20 S.