

# Brunnenalterung: Sind Glaskugeln eine Alternative zum Filterkies nach DIN 4924?

**Innovation im Brunnenbau** ■ Natürlicher Filterkies nach der DIN 4924 enthält heute zunehmend Feinanteile (autochtoner „Staub“ und Quarzkornbruchstücke) und überwiegend unregelmäßig gerundete, plattig oder linsenartig geformte Quarzkies- und Gesteinsbruchstücke. Hinzu kommt eine Neigung zum Bruch der Quarzkörner beim Einbau in den Brunnen. Für die Brunnenbaupraxis konnte bestätigt werden, dass bei der Verwendung von Glaskugeln im Brunnenringraum sowohl mechanisch bedingte Feinkorn- und Bruchstückbildungen vermieden werden können als auch eine deutlich geringere Inkrustationsneigung zu erwarten ist. Für die biochemischen Prozesse in einem Brunnen im natürlichen Untergrund sind aufgrund der Oberflächenaffinität der Inkrustationen analoge Ergebnisse zu erwarten.

Die Brunnenalterung ist ein häufig vorkommendes Problem bei der Gewinnung von Grundwasser und für den Brunnenbetreiber mit einem zunehmenden Leistungsverlust verbunden [1-4]. Bisher hat sich die Ursachenforschung zu dieser Thematik hauptsächlich auf (bio-)chemische und mineralogische Prozesse im Brunnenfilter und Filterkies fokussiert. Die Ursachen und Folgen von reversiblen und irreversiblen chemisch-biologischen Alterungsprozessen am Brunnenfilter und in der Kiesschüttung sind durch zahlreiche Arbeiten seit den sechziger Jahren

heute gut bekannt und aktuell in [4] zusammenfassend publiziert worden (Abb. 1).

Bei Untersuchungen in den Niederlanden wurde die mechanische Partikelfiltration als ein weiterer wichtiger Steuerprozess der irreversiblen Brunnenalterung erkannt [5]. Die Forschungen ergaben, dass etwa ein Drittel aller Brunnen in Lockergesteinsgrundwasserleitern dort von der Problematik einer mechanisch verursachten „äußeren Kolmation“ betroffen sind. Die Partikel lagern sich dabei besonders an der Bohrlochwand

und deren nächstem Umfeld (Filterkies, Grundwasserleitermaterial) ab (Abb. 1 (a)).

Von Brunnenbauunternehmen wird berichtet, dass nach einer Brunnenentsandung oft keine nennenswerte Verbesserung der Brunnenleistung im Vergleich zum konventionellen „Klarpumpen“ erreicht wurde. Untersuchungen in Festgesteinsbrunnen in Franken zeigten, dass in den Schlitzen von Schlitz- und Schlitzbrückenfiltern gebrochener Kies und Splitter von Quarzkieskörnern den freien Durchlass irreversibel verengten (Abb. 2). In einem ersten Anwendungsfall wurden im Herbst 2007 daher Glaskugeln als mechanisch stabiles Stützmedium in einem Festgesteinsbrunnen eingebaut (s. „Murmeln für den Brunnen“ – Experten-Idee soll der Verstopfung der Filter vorbeugen. in: Fürther Nachrichten vom 07.09.2007).

Die bisherigen Untersuchungsergebnisse veranlassten die Autoren, die materialtechnischen Forschungen mit den 2007 verwendeten Glaskugeln der Fa. Sigmund Lindner (Warmensteinach) fortzuführen.

## Aktuelle Problemstellungen

In der Praxis hat sich seit einiger Zeit gezeigt, dass einerseits der auf die Baustelle gelieferte Filterkies zunehmend

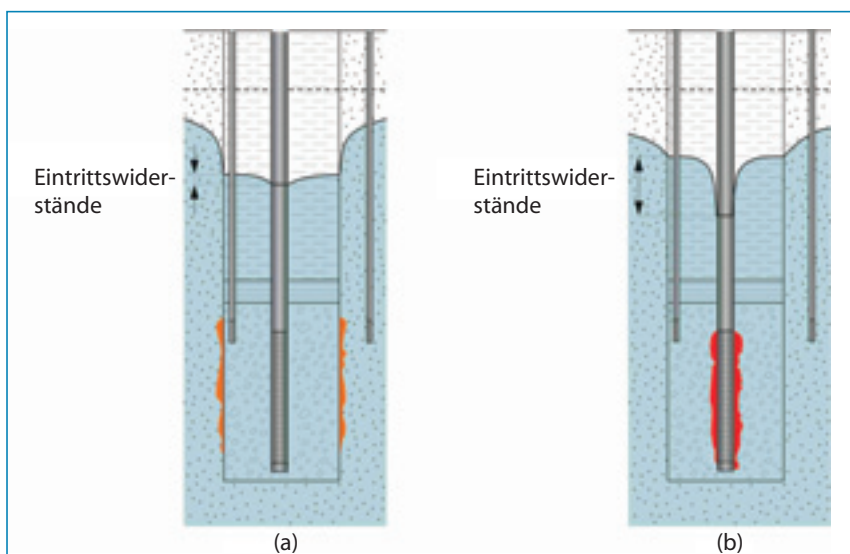


Abb. 1 Schematische Darstellung der Lage einer äußeren (a) und inneren Kolmation (b) an Brunnen.

Feinanteile (autochtone „Staub“ und Quarzkornbruchstücke) enthält und andererseits überwiegend unregelmäßig gerundete, plattig oder linsenartig geformte Quarzkies- und Gesteinsbruchstücke vorgefunden werden. Beide Phänomene können im Zusammenhang mit der an Brunnen unterschiedlich rasch und intensiv ablaufenden Brunnenalterung stehen. Es ergeben sich zwei Themenkomplexe, die für die weiteren praxisnahen Forschungsarbeiten von Bedeutung sind:

- hydraulischer Effekt der Korngeometrie auf die Entsandung und Regenerierung von Brunnen,
- Anlagerungsverhalten von Inkrustationen an quasi glatten Glaskugeln und an den unebenen Oberflächen der Quarzkiesschüttgüter.

Die Entsandung von Brunnen mit Doppelpackern und der 5-fachen Zielfördermenge nach dem DVGW Arbeitsblatt W 119 stößt nach den modelltechnischen Untersuchungen von Nilbert (2008) [6] an hydraulische Grenzen, die eine Neuorientierung in den Bemessungsvorgaben für die Entsandung und die Filterkiesschüttung erfordern. Aufgrund des großen Durchlässigkeitskontrastes zwischen dem Grundwasserleiter und dem Filterkies erreichen die heute gängigen Entwicklungs- und Regeneriertechniken nur einen Teil der Kiespackung um den Brunnenfilter. Ursachen sind die geringe Schleppkraft des Wassers während des Abpumpvorganges und die heterogene Geometrie der durchlässigen Porenkanäle in der Kieschüttung. Beides verhindert eine vollständige Auswaschung von Feinkornanteilen (autochtone und allochtone) und von Inkrustationen in der Kieschüttung.

Die „innere Oberfläche“ natürlicher Kieskörner ist nach den Ergebnissen von Untersuchungen [3] in zahlreichen Lockergesteinsbrunnen am Niederrhein für die Eisenanlagerung und die katalytisch gesteuerte Wiederbelegung von zuvor gereinigten Kornoberflächen und die damit einhergehenden, irreversiblen Leistungsrückgänge mit verantwortlich. Je größer die innere



Abb. 2 Teile eines Schlitzbrückenfilters mit eingeklemmten Kiesbruchstücken und abgesplitterten Quarzkörnern in den Öffnungen

Quelle: Orchs

Oberfläche, d.h. die Unebenheit und Rauheit der Kieskörner, desto größer ist das „Wiederverockerungspotenzial“ und desto geringer ist die Nachhaltigkeit einer Brunnenregenerierung, d.h. durch die Regenerierung wird der Katalysator wieder aktiviert.

Ein einfaches Rechenbeispiel soll den Einfluss der Oberfläche auf diesen Prozess verdeutlichen (s. [3]): Der Filterkies wird vereinfacht als Ansammlung von Kugeln mit einer uniformen Korngröße von 2 mm angesehen. Aufgrund der zu erwartenden lockeren Lagerung sollen die Kugeln kubisch, d. h. in lockerster Lagerung arrangiert sein. Sie sind anfänglich von einer monomolekularen Schicht Eisenoxid von vernachlässigbarer Dicke umgeben. Ein Porenkanal von 1 mm Länge entspricht dann einer Oberfläche von  $[4 \cdot 0,25 \cdot 2 \text{ mm} \cdot \pi] = 6,28 \text{ mm}^2$ . Die Verockerung wächst zunächst in die Flaschenhäule der Pore hinein. Der dadurch entstehende röhrenförmige Porenkanal mit einem Durchmesser von 0,83 mm hat bei einer Länge von 1 mm eine Oberfläche von  $2,60 \text{ mm}^2$ , eine Verminderung um den Faktor  $\approx 2,4$ . Entfernt man nun die Inkrustation aus den Flaschenhäulen der Poren, so wird die katalytische Wirkung der Eisenoxid-Oberfläche wieder um diesen Faktor gesteigert. Auch die Besiedlungsfläche für Eisenbakterien wird um den gleichen Betrag erhöht.

### Forschungsansatz

Auf der Fachmesse „geofora 2007“ in Hof a. d. Saale wurde erstmals über den Einsatz von Glaskugeln in Brunnen als Alternative für Filterkies in besonders inkrustationsgefährdeten Brunnen Nordbayerns berichtet. Wesentliche Grundlagen dieser Anwendung, der Kugelgrößenbemessung und die Eigenschaften von Glaskugeln im Vergleich zum Filterkies während des Einbaus und bei der Brunnenentwicklung wurden in [7] veröffentlicht.

Langfristige und wissenschaftlich belastbare Praxiserfahrungen mit diesem Medium liegen noch nicht vor, werden aber bei verschiedenen Anwendungen von Brunnenbetreibern und Brunnenbauern z. Z. bei verschiedenen Projekten deutschlandweit gesammelt. Der Zusammenhang zwischen der „Rauheit“ von Kieskörnern und der oft raschen „Wiederverockerung“ von Brunnen ist Ausgangspunkt für die Frage, ob Brunnen mit glatten, nahezu gleich großen Glaskugeln im Ringraum ein geringeres oder vergleichbares Anlagerungspotenzial von Fe-Oxiden haben als Brunnen mit konventioneller Kiesschüttung nach DIN 4924.

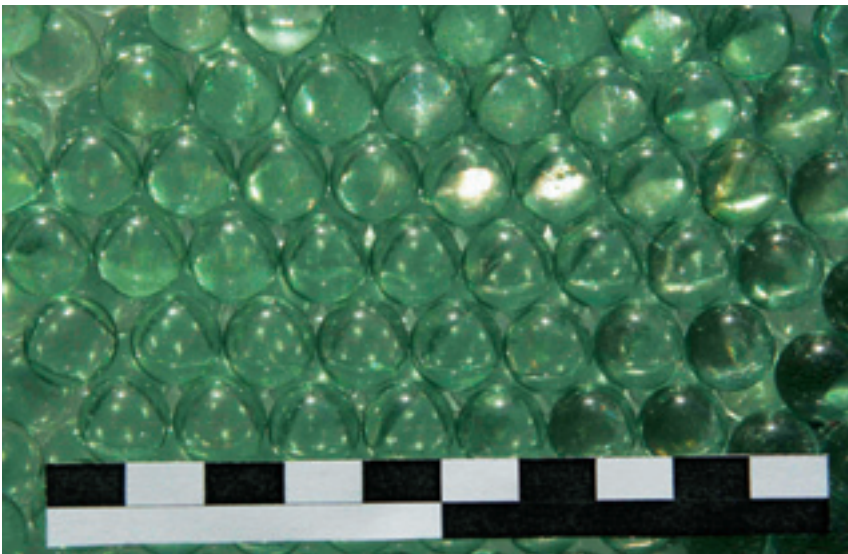
Im Nachfolgenden wird über die Ergebnisse grundlegender Forschungen an der Universität Bayreuth berichtet, die sich mit dem zweiten Themenkomplex des Anlagerungsverhaltens von Eisen-





Quelle: Ochs

**Abb. 3a** Filterkies mit unregelmäßig geformten Körnern und mit Fe- und Schichtsilikat-Ablagerungen in den Vertiefungen der Kornoberflächen



Quelle: Ochs

**Abb. 3b** Silikat-Glaskugeln mit glatter Oberfläche in dichtester Lagerung

Eigenschaft des Materials	Qualitätsziele
Gewaschen und frei von „Unterkorn“	Geringe Materialverluste frei von „Unterkorn“ und Kompaktion beim Entwickeln des Brunnens; Reduktion der Entwicklungszeit
Gut gerundete Kieskörner	Erhöhung der Porosität und hydraulischen Durchlässigkeit gegenüber dem Grundwasserleiter; Reduktion der Absenkung und Druckverluste; Verbesserung der Entwicklungsfähigkeit und Ergiebigkeit
Hoher Quarzanteil	Vermeidung von Volumenveränderungen durch quellfähige oder zerbrochene Mineralien
Glatte Oberfläche	Verringerung von Ablagerungen
Geringe Ungleichförmigkeit	Geringe Entmischung beim Schütten Vermeidung von Druckverlusten durch Kolmation

**Tabelle 1** Allgemeine für den Brunnenbau vorteilhafte Materialeigenschaften und Qualitätsziele für Kies (außerhalb der aktuell gültigen DIN 4924)

hydroxiden an glatten Glaskugeln und konventionellem Filterkies im Labormaßstab beschäftigten.

**Standard und Anforderungen an die Filterkiespackung in Brunnen**

Die Filterkiespackung ist die wichtigste Schnittstelle zwischen dem Grundwasserleiter und dem Brunnenfilter. Bereits beim Bau eines Brunnens muss die Versandung und die Kolmation verhindert und eine Regenerierung oder Sanierung des Bauwerkes in die Bemessung der Filterkies Korngröße berücksichtigt werden. Dieser Grundsatz ist nach grundlegenden Forschungsvorhaben (z.B. [8]) und Praxistests in der Fachwelt als „Stand der Technik“ verankert und in die brunnenbaubezogenen Arbeitsblätter des DVGW-Regelwerkes eingeflossen.

Seit den sechziger Jahren befassten sich zahlreiche Autoren immer wieder mit dem Thema „Versandung und Entsandung“ sowie mit den Themen „Regenerierung und Sanierung“ von Brunnen. Daraus lassen sich die „Grundforderungen“ und „Leitparameter“ an die Bemessung von Brunnenfilterkiesen wie folgt ableiten:

- Anpassung der Fördermenge an die Leistungsfähigkeit des erschlossenen Grundwasserleiters, Vermeidung einer zu „hohen Absenkung“ und dadurch ausgelöste Turbulenzen und Eintrittsverluste (Leitparameter: spezifische Ergiebigkeit),
- Verfilterung nur eines hydraulisch und hydrochemisch homogenen Grundwasserleiters in einer Bohrung zur Vermeidung von vertikalen Kurzschlüssen und einer beschleunigten Brunnenalterung (Leitparameter: Redoxverhältnisse und hydraulische Durchlässigkeit der Schichtenfolge),
- möglichst großes, durchflussfähiges Porenvolumen in der Filterkiespackung mit Abstimmung auf das Kennkorn des Grundwasserleiters; Anpassung des Filterschlitzes an das Schüttkorn (Leitparameter, Kennkorn, Filterfaktor, Schlitzweiten nach DVGW-Arbeitsblättern W 113 und W 118).

In der **Tabelle 1** sind die heute, unabhängig von DIN 4924, als Quali-

tätziele definierten allgemeinen Anforderungen an den Filterkies im Brunnenbau zusammengestellt.

Die oben genannten Materialeigenschaften wurden in der alten DIN 4924 Filtersande und Filterkiese für Brunnenfilter, Ausgabe 1972/02 unter dem Punkt Lieferbedingungen im Einzelnen aufgeführt und verlangt. U. a. legte die „alte“ DIN 4924 unter dem Punkt „Lieferbedingungen“ folgende Materialeigenschaften fest:

- Es dürfen keine gequetschten oder gebrochenen Gesteinstrümmel geliefert werden,
- die Form der einzelnen Körner soll der Kugelform nahe kommen,
- die Oberfläche der Körner soll glatt sein,
- Filtersand- und -kies soll aus reinem Quarz (96 % SiO<sub>2</sub>) bestehen und
- Unter- und Überkornmassenanteil dürfen maximal 10 % betragen.

Die Beibehaltung dieser, für den Brunnenbau unabdingbaren Forderungen an die Materialeigenschaften der Sande und Kiese, hätte zu einer gravierenden Materialverknappung geführt. Deshalb wurde die derzeit aktuelle DIN 4924 Ausgabe 1998-08 als allgemein anerkannte Regel der Technik für Sande und Kiese für den Brunnenbau entsprechend überarbei-

tet und die Anforderungen an das Brunnenbaumaterial reduziert:

- Die zulässigen Massenanteile an Unter- und Überkorn wurden für die Korngruppen über 2,0 mm Durchmesser stark erhöht,
- die glatte Oberfläche der Körner wurde nicht mehr gefordert und
- in den Korngruppen bis 5,6 mm braucht die Form der einzelnen Körner nicht mehr rund, sondern nur noch kantengerundet sein.

### Filterkiesbeschaffenheit als Alterungsfaktor

Als poröses Medium aus einem natürlichen Korngemisch ist die geschüttete Filterkiespackung mit ihren Grenzflächen zum Brunnenfilter und zum Grundwasserleiter der entscheidende Reaktionsraum für Brunnenalterungsprozesse und die hydraulische Leistungsfähigkeit eines Brunnens. Folgende Eigenschaften des Filterkieses und dessen Grenzmedien beeinflussen auch die Brunnenalterung:

- Kornform (Abweichung von der idealen Kugelform),
- innere Oberfläche der Körner (Rauigkeit),
- Bemessung des passierbaren Lückenvolumens und der aus der Kornform und Lagerungsdichte resultierenden Geometrie der Porenkanäle,

- suspendierter Feinstkornanteil im Wasser aus dem Grundwasserleiter, und untergeordnet aus dem Schüttgut, der sich in den Porenkanälen entweder außerhalb der Reichweite der Entsandungs- und Regeneriertechniken oder aufgrund der gerichteten Brunnenanströmung akkumulieren kann.

Die Anwesenheit von Partikeln und Kolloiden im Grundwasser ist bereits seit Längerem bekannt. Es handelt sich dabei um suspendierte Feststoffe, die aufgrund ihrer geringen Größe die im Brunnenbau eingesetzten porösen Medien in der Regel passieren können. Eine Ablagerung der Feinpartikel im Porenraum kann die Durchlässigkeit dort stark vermindern, sodass die Brunnenleistung reduziert wird. Das Phänomen ist z. B. in Infiltrationsbrunnen bekannt, bei denen eine erhöhte Feststoffkonzentration sehr schnell zur Verstopfung des brunnen-nahen Porenraumes führt. Der Ablagerung der Partikel liegen verschiedene physikalische und physikochemische Prozesse zugrunde. In jüngster Zeit wurden solche Filtrationsprozesse auch als Ursache für den Leistungsrückgang von Förderbrunnen identifiziert [9,10].

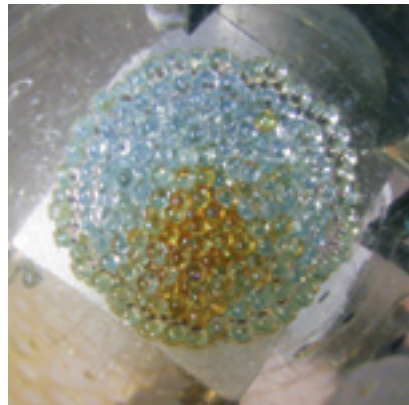
Filterkies wird nach DIN 4924 in definierten Kornfraktionen und mit ►





Quelle: Hein (2008)

**Abb. 4a+b** Versuchssäulen mit Filterkies und Glaskugeln vor Versuchsbeginn



Quelle: Hein (2008)

**Abb. 5a+b** Versuchssäulen geöffnet mit Filterkies (links) und Glaskugeln (rechts) nach Versuchsende

Durchmesser der Kugeln d [mm]	Volumen der Kugelpackung [mm <sup>3</sup> ]	Anzahl der Kugeln je m <sup>3</sup> [-] · 10 <sup>6</sup>	Feststoffvolumen [%]	Porenvolumen [%]
2	4,189	125	52,4	47,6
5	65,45	8	52,4	47,6
10	523,60	1	52,4	47,6

**Tabelle 2** Anzahl der Kugeln und Porenvolumina bei einem Gemisch ideal runder, gleichkörniger Kugeln in lockerster Lagerung

einem Quarzgehalt von meist > 96% geliefert. Er besteht jedoch bei genauerer Betrachtung je nach Lagerstätte aus kantengerundetem Quarzkies, Gesteinsbruchstücken wie Grauwacken oder Quarziten sowie aus Splintern gebrochener Gangquarze oder Quarze metamorpher oder magmatischer Gesteine. Eigene Untersuchungen der Autoren belegen, dass der Feinkornanteil < 5 µm in den auf die Baustelle gelieferten Bigbags bis zu 10% des Gesamtgewichtes betragen kann.

Bei der optischen Betrachtung verschiedener Materialproben von handelsüblichen Filterkiesen war eine z. T. intensive gelb-bräunliche Färbung besonders auffällig. Sie rührt von einer feinen oberflächlichen Belegung der einzelnen Körner mit Eisenoxiden und FeOOH her. Diese ist vor allem auf Körnern zu beobachten, die aus verwitterten magmatischen oder metamorphen Quarzen bestehen. Eine Belegung der Kornoberflächen mit Tonmineralien wurde bei Quarzkiesen aus Lagerstätten im Umfeld von kaolinreichen Gesteinen beobachtet. Ein Grund für die Erhöhung des genannten Feinkornanteils in den untersuchten Filterkiesproben ist mit der mechanischer Beanspruchung und der dadurch hervorgerufenen Ablösung des „FeO/FeOOH-“ oder „Tonmineralstaubes“ von den Einzelkörnern erklärbar. Eine mechanische Veränderung der Einzelkörner war in vielen Proben erkennbar, die sich in der Körnungsanalyse ohne eine signifikante Steigerung des Kleinkornanteils, bzw. eine Abnahme des Großkornanteils manifestierte. Es wurden Quarzsplinter in den Feinkornanteilen optisch erkannt, die aus der verwitterungsbedingten Zerlegung von Quarzen beim Ablagerungs- und Umlagerungsprozess in der Lagerstätte stammen können und beim Sieben und Waschen nicht vollständig entfernt wurden. Entlang dieser Strukturen können die Quarzkörner beim Einbau in den Brunnen zerbrechen (**Abb. 3a + 3b**).

In den Proben verschiedener Lagerstätten wich die Kornform von der Kugelform erheblich ab. Es wurden überwiegend rhomboidale und lenti-

kulare Körner beobachtet. Der Anteil an Feldspäten (z. B. brekziöse Gesteinsfragmente aus Feldspat und Glimmer sowie von Quarz und Feldspat) und Schichtsilikaten (Fe-Glimmer) ist in den meisten untersuchten Proben gering, ist aber durch deren besondere Feinkörnigkeit sowie durch die starke Belegung der Kornoberflächen mit Eisenoxiden und Eisenhydroxiden nicht eindeutig bestimmbar.

Die mechanische Brunnenalterung durch Ablagerung von Partikeln im Porenraum der Filterkiespackung steht im engen Zusammenhang mit den Prozessen ihrer Mobilisierung und Filtration. Bei der Brunnenentwicklung werden meist nur die Feinkornanteile, die mit dem Kies eingebracht wurden oder beim Einbau durch das Zerbrechen der Quarzkörner entstanden sind, entfernt. Da die hydraulische Reichweite der heute gängigen Entsandungsmethoden physikalisch limitiert ist, ist dieser Reinigungsprozess in den meisten Brunnen nur unvollkommen und ein wesentlicher Auslöser der mechanischen Brunnenalterung. Die offensichtlichste Sperrschicht ist die ehemalige Bohrlochwand, besonders wenn dort ein Filterkuchen aus feinkörnigem Material der Bohrlochspülung verblieben ist. Hinter diesem können im Lauf des Betriebes des Brunnens weitere, aus dem Grundwasserleiter erodierte Partikel akkumuliert werden (Abb. 1 (a)). Aber auch in gut entwickelten Brunnen kann eine mechanische Filtration vorkommen, die sich mit zunehmender Betriebsdauer aufbaut. Dabei sind die geologischen Gegebenheiten des Grundwasserleiters von entscheidender Bedeutung. Schlecht sortierte Grundwasserleiter mit hohem Feinkornanteil liefern besonders viele Partikel, gering durchlässige Leiter mit geringen Porenöffnungsweiten (Porositäten) sind besonders gute Filter, aber auch hydraulisch geringer durchlässig als grob sortierte Sedimente [9].

Die Porosität eines Sedimentes wird also durch dessen Ungleichförmigkeit gesteuert, sodass die „äußere Kolmation“ häufig in Brunnen mit Filtern in ungleichförmig sortierten, fluviatilen Sedimenten angetroffen wird [2].

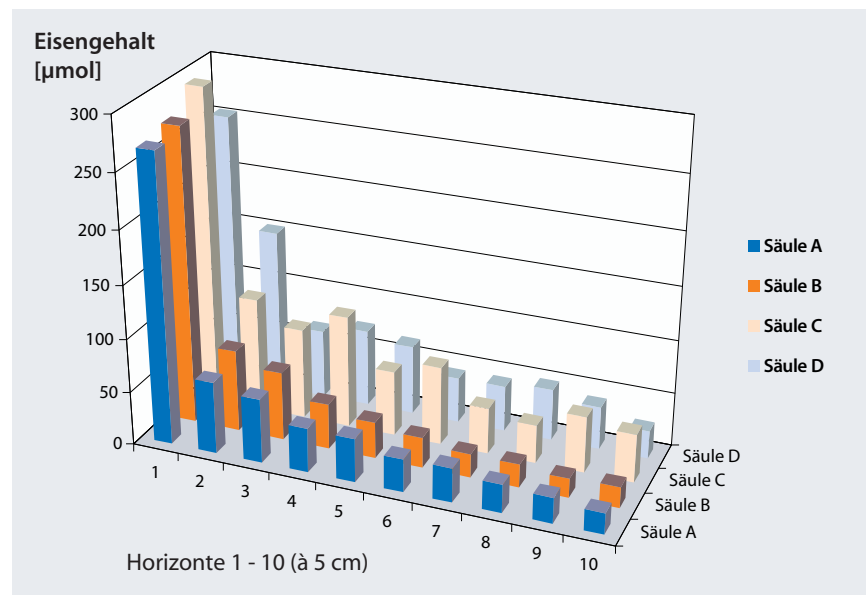


Abb. 6 Verteilung der Eisenmassen in den 10 Probennehmehorizonten der Versuchssäulen (Horizont 1 ist am Einlauf, Horizont 10 am Auslauf der Fe-Perkollationslösung)

Säulenbezeichnung	Säule A	Säule B	Säule C	Säule D
Filtermaterial	Glaskugeln (GK)		Filterkies (FK)	
Korngröße [mm]	3,8 - 4,4	6	3 - 5,6	5,6 - 8
Porenvolumen [ml]	928,9	998,9	1006,1	1006,1
durchschnittliche Flussrate [ml * min <sup>-1</sup> ]	0,60*	0,61	0,65	0,59

\*abgeschätzt

Tabelle 3 Filtermaterial, Korngrößen, Porenvolumen und Flussraten in den 4 Versuchssäulen (Hein 2008).

Kenngroße	Säule A	Säule B	Säule C	Säule D
Dispersionslänge D <sub>L</sub> [cm <sup>2</sup> * sec <sup>-1</sup> ]	7,44E-05	8,67E-05	1,10E-04	8,98E-05
Abstandsgeschwindigkeit v <sub>a</sub> [m * h <sup>-1</sup> ]	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

Tabelle 4 Hydraulische Kenngroßen der vier Versuchssäulen. (Hein 2008)

Je größer die Porosität und je gleichförmiger die Lückenvolumina verteilt sind, desto geringer ist die Kolmationsgefahr durch die Tiefenfiltration der von außen eingeschleppten Feinpartikel. Gleichzeitig wird die Entsandungswirkung durch den leichteren Austrag des Unterkorns aus der Kiespackung verbessert. Die größte Porosität wird in einem porösen Medium bei gleichgroßen Kugeln in

lockerer Lagerung erreicht [8]. Die Kugelform beeinflusst dabei die Porosität, die Korngröße spielt dagegen keine Rolle, wie die Beispiele in Tabelle 2 zeigen.

Bei gleichkörnigen, gerundeten Körnern entscheidet die Lagerungsdichte über das Porenvolumen des porösen Mediums. In der lockersten Lagerung gleichgroßer Kugeln (Würfelanord-





Quelle: Hein (2008)

**Abb. 7** Optischer Vergleich des Ausgangsmaterials und des teilweise inkrustierten Materials am Versuchsende nach der Probennahme

Säulenhorizonte (Ø 5cm)	Säule A	Säule B	Säule C	Säule D
10	19,7	19,5	45,3	26,1
9	23,9	17,8	52,8	40,1
8	26,3	21,7	35,8	48,2
7	31,9	22,0	43,0	42,8
6	31,0	28,4	73,3	42,4
5	40,7	33,9	60,7	64,7
4	41,4	42,3	104,8	71,8
3	59,9	64,0	84,6	63,7
2	67,3	76,4	105,8	151,6
1	268,8	275,1	294,9	253,6
Ø-Blindwerte	3,7	3,7	14,4	14,7
Summe	<b>610,9</b>	<b>601,2</b>	<b>901,1</b>	<b>805,0</b>
%-Abweichung von B (100 %)	1,6	100 %	49,9	33,9
Ø-Gehalt pro Säule (µmol)	Ø Glaskugeln: 606,1		Ø Filterkies: 853,0	

**Tabelle 5** Eisenmassenbilanz für die Entnahmehorizonte der 4 Versuchssäulen, Werte in [µmol], (Hein 2008).

nung) besitzt ein Einheitskubus von 1 m<sup>3</sup> die größte mögliche Porosität von 47,6 %. In der dichtesten Tetraederlagerung reduziert sich die Porosität auf 25,9 % (Abb. 3b). In natürlichen Schüttmedien treten diese beiden Extrema nicht auf, da im Brunnenringraum aufgrund der Unrundheit und der inneren Reibung der Schüttgüter nur die Übergänge zwischen der dichten

testen und lockersten Lagerung realisiert werden können. Die Porosität ist somit eine Funktion der Anordnung der Körner im Raum und somit abhängig von der Kornform.

These:

„Der Filterkies fördert die Brunnenalterung aufgrund seiner heterogenen Porositätsverteilung im Brunnenring-

raum in Folge der Abweichungen der Kieskörner von der idealen Kugelform“

**Anlagerungsversuche im Labor**

Unter festgelegten Rahmenbedingungen wurde am Lehrstuhl für Hydrologie der Universität Bayreuth ein vereinfachter Vergleich der chemischen Verockerungsneigung von Filtermaterialien und somit zur Untermauerung der o. g. These durchgeführt. Zur Simulation unterschiedlicher Filtermaterialschüttungen wurden im Labor vier Säulen mit je 50 cm Länge und 8 cm Durchmesser mit zwei Materialtypen in zwei Korngrößen befüllt. In der Tabelle 3 sind die Befüllmaterialien der vier Säulen charakterisiert worden. Die Abbildungen 4a + 4b zeigen den Versuchsaufbau mit den beiden Filtermaterialien.

Beim Einbau des natürlichen Filterkiesmaterials in die Säulen C und D wurde festgestellt, dass die Filterkieskörner entlang vermutlich tektonisch vorgezeichneter Bruchflächen zerbrochen und sich dadurch das Wasser in der Säule stark trübte. Die Säulen wurden vor Versuchsbeginn daher mehrfach mit entgastem Wasser klar gespült. Dieser Vorgang ist hinsichtlich der autochtonen Materialentfernung dem Entsandungsprozess im Brunnen gleichzusetzen. Beim Einbau der Glaskugeln in die Säulen A und B wurde dieser Prozess des Zerbrechens erwartungsgemäß nicht beobachtet.

Um die vier Säulen hydraulisch vergleichen zu können, wurden die in Tabelle 4 aufgeführten hydraulischen Kenngrößen mittels Tracerversuche ermittelt.

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 Säule geleitet. Zur Initiierung der „Verockerung“ wurden die Säulen mit 1,5-fachen Porenvolumen destilliertem, mit Luftsauerstoff gesättigtem Wasser durchströmt. Die Flussrate betrug 0,6 bis 0,65 ml/min (ca. 2,3 l/h), was bei der gewählten Versuchsgeometrie einer Abstandsgeschwindigkeit von 0,5 m/d

	Säule A	Säule B	Säule C	Säule D		
Horizont 10 (Ausfluss)	19,7	19,5	45,3	26,1		
Horizont 9	23,9	17,8	52,8	40,1		Die Mittelwerte der Horizonte sind:
Horizont 8	26,3	21,7	35,8	48,2	X	untereinander homogen aber signifikant verschieden von rot
Horizont 7	31,9	22	43	42,8		nicht signifikant verschieden von rot oder grün
Horizont 6	31	28,4	73,3	42,4		
Horizont 5	40,7	33,9	60,7	64,7		untereinander homogen aber signifikant verschieden von grün
Horizont 4	41,4	42,3	104,8	71,8	X	
Horizont 3	59,9	64	84,6	63,7		
Horizont 2	67,3	76,4	105,8	151,6		
Horizont 1 (Einlass)	268,8	275,1	294,9	253,6	X	

**Tabelle 6** Ergebnisse der statistischen Auswertung der Mittelwerte der Eisenmassen in den Probennahmehorizonten der Versuchssäulen [X = nicht normalverteilt]. (Hein 2008).

(0,0000057 m/s) entsprach. Die Durchströmungsgeschwindigkeit liegt somit ca. drei Zehnerpotenzen unter der maximalen Filterrohreintrittsgeschwindigkeit nach DVGW-Arbeitsblatt W 118. ( $v_{krit} = 0,002$  bis  $0,003$  m/s).

Nach Versuchsende wurde das Säulenmaterial in 5 cm-Abschnitten entnommen und zur photometrischen Eisengehaltsbestimmung mit Dithionit reduziert. **Abbildung 5** zeigt die geöffneten Säulen mit Filterkies (links) und Glaskugeln (rechts) nach Versuchsende.

### Ergebnisse und Interpretation der Laborversuche

Die Tracersuche in den vier Versuchssäulen zeigten ein ähnliches hydraulisches Verhalten, nachdem die Filterkiessäulen vom primärem und sekundärem „Unterkorn“ befreit wurden (**Tab. 3**). Der sehr kleine Dispersionskoeffizient  $D_L$  weist auf einen advektiven Transport des Wassers durch die Versuchssäulen hin. Bei der Eisenbestimmung der Probennahmehorizonte fiel auf, dass schon kurz hinter dem Einlauf, bei dem Glasfritten der

gleichmäßigen Verteilung der Perkolationslösung dienten, sich deutlich sichtbare Inkrustationen entlang eines „bevorzugten Fließweges“ in Form eines „zentralen“ Kamines ausbildeten (**s. Abb. 5**). Dieser Effekt ist aus Aufbereitungsfiltren bei der Enteisung im Wasserwerk bekannt.

Die Eisenanlagerungen am Filtermaterial nahmen in allen vier Säulen mit der Entfernung vom Einlauf stark ab, sodass am Versuchsende die Säulen an ihrem jeweiligen Auslauf frei von visuell erkennbaren Inkrustationen waren. Erst die Glasfritten am Auslauf zeigten wieder Eisenablagerungen. Ein Grund hierfür ist vermutlich die größere Oberfläche und der Druckverlust mit höheren spezifischen Geschwindigkeiten in den Austritten. Somit ist zu schlussfolgern, dass die in **Tabelle 5** angegebenen Eisenmassen an den Filterkieskörnern und an den Glaskugeln primär durch die jeweilige Oberflächengeometrie der Körner beeinflusst werden.

In der Gesamtmassenbilanz wurden im Verlauf des Versuchs ca.  $600 \mu\text{mol Fe/}$

Säule bei den Glaskugeln und ca.  $850 \mu\text{mol Fe/Säule}$  beim Filterkies festgestellt. die **Abbildung 6** zeigt die Verteilung der Eisenmassen in den vier Säulen in den insgesamt 10 Probennahmehorizonten. im Filterkies wurden im Vergleich zu den Glaskugeln ca. 40 % mehr Eisenmasse retardiert.

Generell lässt die vereinfachte Versuchsanordnung den in der Praxis erwarteten Schluss zu, dass die glatten Glaskugeln mit ihrer vergleichsweise geringeren Oberfläche deutlich weniger Eisen anlagerten, als der raue und ungleichmäßig geformte Filterkies (**Abb. 7**). Diese Feststellung gilt für die rein chemisch bedingte Inkrustation durch die Oxidation eines mit reduziertem Eisen befrachteten Grundwassers. Bei einer zusätzlich mikrobiologisch induzierten Inkrustation sind nach diesen Versuchsergebnissen ebenfalls Unterschiede im Anlagerungsverhalten zu erwarten.

In der **Tabelle 6** sind die Ergebnisse eines horizontbezogenen statistischen Vergleichs der Messwerte mit SPSS 16 (Tukey HSD PostHoc test, Signifi- ►



kanzniveau 5 %) dargestellt. Betrachtet man nur die normalverteilten Horizontergebnisse, sind die Eisengehalte bzw. deren Mittelwerte aller Glaskugelhorizonte untereinander homogen und in vier von sieben Horizonten sogar signifikant niedriger als die Mittelwerte der Filterkieshorizonte. Darüber werden die rein massenbezogenen Erkenntnisse zum Anlagerungsverhalten der beiden Materialtypen bestätigt.

## Zusammenfassung und Ausblick

Natürlicher Filterkies nach der DIN 4924 enthält heute zunehmend Feinanteile (autochtoner „Staub“ und Quarzkornbruchstücke) und überwiegend unregelmäßig gerundete, plattig oder linsenartig geformte Quarzkies- und Gesteinsbruchstücke. Hinzu kommt eine Neigung zum Bruch der Quarzkörner beim Einbau in den Brunnen. Beide Phänomene können die Brunnenentwicklung, die Brunnenleistung und die Brunnenalterung negativ beeinflussen. Es ergeben sich für die Brunnenbaupraxis zwei Themenkomplexe, die bereits in den achtziger Jahren im Rahmen von Forschungsarbeiten behandelt wurden. Zum einen beeinflusst die Korngeometrie die effiziente Entsandung und Regenerierung von Brunnen. Zum anderen wird ein unterschiedliches Anlagerungsverhalten von Fe-Inkrustationen an glatten Glaskugeln und an den unebenen Oberflächen der Quarzkiesschüttgüter erwartet.

Aus den Ergebnissen vereinfachter Anlagerungsversuche wurde die geringere Anlagerungsneigung für chemisch abgeschiedenes dreiwertiges Eisen aus einem reduzierten Grundwasser für Glaskugeln prinzipiell bestätigt. Daneben wurde beim Einbau der natürlichen Filterkiese festgestellt, dass die verwendeten Kiesprodukte eine geringe mechanische Stabilität aufwiesen. Dadurch werden Feinanteile und Bruchstücke beim Herstellprozess des Brunnens zusätzlich „produziert“. Die Entsandungs- und Regeneriereffizienz wird so erheblich reduziert, da die Bruchstücke in den Schlitz der Filterrohre irreversibel „Kolmationen“ erzeugen können. Diesem Kolmationstyp kann durch die höhere mechanische

Stabilität der Glaskugeln begegnet werden, wodurch die zeitaufwendige Entfernung autochtoner Feinkornanteile und Bruchstücke beim Brunnenbau vermieden werden kann.

Für die Brunnenbaupraxis konnte somit bestätigt werden, dass bei der Verwendung von Glaskugeln im Brunnenringraum sowohl mechanisch bedingte Feinkorn- und Bruchstückbildungen vermieden werden können als auch eine deutlich geringere Inkrustationsneigung zu erwarten ist. Für die biochemischen Prozesse in einem Brunnen im natürlichen Untergrund sind aufgrund der Oberflächenaffinität der Inkrustationen analoge Ergebnisse zu erwarten.

## Danksagung

Die Autoren danken der Fa. Sigmund Lindner, Warmensteinach, für die Unterstützung des F&E-Vorhabens und die Bereitstellung von Materialproben und eigener Forschungsergebnisse zum mechanischen Verhalten von Glaskugeln.

## Literatur

- [1] van Beek, C. G. E. M. & Kooper, W.F. (1980): *The clogging of shallow discharge wells in the Netherlands river region.* - *Ground Water* 18 (6): 578-586.
- [2] van Beek, C. G. E. M. (1995): *Brunnenalterung und Brunnenregenerierung in den Niederlanden.* - *gwf Wasser/Abwasser* 136 (3): S. 128-137.
- [3] Houben & Treskatis (2003): *Regenerierung und Sanierung von Brunnen.* - 280 S.; München (Oldenbourg).
- [4] Houben, G. & Treskatis, C. (2007): *Water Well Rehabilitation and Restoration.* - 391 S.; New York (Mac GrawHill).
- [5] DeZwart, B.-R. (2007): *Investigation of Clogging Prozess in Unconsolidated Aquifers near Water Supply Wells.* - 200 S., Dissertation TU Delft.
- [6] Nillert, P. (2008): *Bemessung der Kammerförderrate bei der Intensiventsandung von Brunnenfiltern.* - in: *bbr* 10: S. 52-61; Bonn (wvgw).
- [7] Herrmann, F. & Stiegler, X. (2008): *Einsatz von Glaskugeln als Ersatz für Filterkies in Brunnen.* - in: *bbr* 5: S. 48-53 ff.; Bonn (wvgw).
- [8] Nahrgang, G. & Schweizer, W. (1982): *Untersuchung über die Stabilität und das Dichtfahren von Filtern aus Sanden und Kiesen bei Bohrbrunnen: Stufe I und II.* - *DVGW-Schriftenreihe Wasser Nr. 11*; Eschborn (ZfGW-Verlag).

- [9] DeZwart, B.-R., van Beek, C. G. E. M., Houben, G. & Treskatis, C. (2006): *Mechanische Partikelfiltration als Ursache der Brunnenalterung, Teil 1.* - *bbr* 7/8/2006: S. 42-49, 8 Abb.; Bonn (wvgw).
- [10] 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, Freiburg.
- [11] Hein, C. (2008): *Untersuchung der Verockerungsintensität zweier Filtermaterialien der Ringraumschüttung eines Trinkwasserbrunnens.* - *Arbeit zur Erlangung des Bachelor of Science: 34 S.*; Universität Bayreuth (Lehrstuhl f. Hydrologie).

## Autoren:

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

Christian Hein, B.Sc.  
Dr. G. Pedall Ingenieurbüro GmbH  
Flurstr. 24  
95473 Haag/Bayreuth  
Tel.: 09201 997-0  
Fax: 09201 997-44  
E-Mail: Christian.Hein@ibpedall.de  
Internet: www.ibpedall.de

Prof. Dr. Stefan Peiffer  
Lehrstuhl für Hydrologie  
der Universität Bayreuth  
Gebäude Geowissenschaften  
95440 Bayreuth  
Tel.: 0921 55-2253  
Fax: 0921 55-2366

E-Mail: s.peiffer@uni-bayreuth.de  
Internet: www.uni-bayreuth.de

Dipl.-Ing. Frank Herrmann  
Fa. Ochs Brunnenbau  
Schieräckerstr. 32  
90431 Nürnberg  
Tel.: 0911 3243-00  
Fax: 0911 3143-02

E-Mail: Herrmann@ochs-bau.de  
Internet: www.ochs-bau.de

