

Lotung der Fußzementation in einer
Trinkwasserbohrung in Massachusetts



Vorteile bei Bau und Betrieb von Hochleistungsbrunnen durch moderne Filtermedien

Die anhaltende Dürre im Südwesten der USA und die damit einhergehende Verknappung des Oberflächenwasserdargebots hat eine starke Zunahme der Grundwassernutzung zur Folge. Ein wesentliches Element zur nachhaltigen Bewirtschaftung der Grundwasservorkommen sind kombinierte Förder- und Schluckbrunnen, über die Wasser unterschiedlicher Herkunft zur unterirdischen Speicherung und späteren Entnahme in niederschlagarmen Spitzenverbrauchszeiten injiziert wird. Der ständig wechselnde Wasserchemismus und die große hydraulische Beanspruchung stellen hohe Ansprüche an den Brunnenausbau und induzieren starke Kolmations- und Ausfällungsprozesse. Wie zweijährige Messungen an einem zum Teil mit Glaskugeln hinterfüllten Brunnen zeigen, können durch dieses Filtermedium deutlich längere Standzeiten und eine anhaltend größere spezifische Leistung des Brunnens erzielt werden, was zu einer deutlichen Einsparung an Betriebs- und Wartungskosten führt.

Kombinierte Förder- und Schluckbrunnen (ASR-Brunnen) sind in den USA seit Jahrzehnten bekannt und im Einsatz. Der Zweck leitet sich aus ihrem Namen ab: ASR steht für „Aquifer Storage and Recovery“, was sich sinngemäß mit grundwasserleitergestützter Wasserspeicherung und Wiedergewinnung übersetzen lässt. Experten schätzten die Anzahl aller ASR-Brunnen in den USA in 2015 auf 500 bis 700 Stück, mit Tiefen von 35 bis 1.000 m, überwiegend genutzt für die öffentliche Trinkwasserversorgung [1]. Obwohl mit bis zu 80 % der Hauptanteil der landesweiten Grundwasserförderung für landwirtschaftliche Zwecke erfolgt, sind ASR-Brunnen in diesem Sektor kaum verbreitet. Grund dürften die hohen Kosten pro Einheit geförderten Wassers sein.

Die zunehmenden intensiveren Trockenperioden und Starkregenereignisse der letzten Jahre brachten besonders im Südwesten der USA die traditionell auf Oberflächenwasser gestützte Trinkwasserversorgung an die Grenzen der Leistungsfähigkeit. Verbote und Einschränkungen der Wassernutzung für Privathaushalte sind in Kalifornien daher seit Jahren die Regel. Als Konsequenz ist eine verstärkte Hinwendung zur Grundwassernutzung festzustellen. In diesem Zusammenhang kommt es seit gut zehn Jahren zu einem Boom von ASR-basierten Versorgungs-

konzepten. Dabei sind Brunnenfelder mit mehr als 20 Brunnen nicht ungewöhnlich. Der Autor Reinhard Klaus (RKP Consulting) ist aktuell über einen Lieferanten von innovativen Brunnenschüttgütern in ein Programm dieser Größe in Arizona involviert.

Die ASR-gestützte Grundwasserbewirtschaftung mildert vor allem in den ariden Klimazonen des amerikanischen Südwestens die Diskrepanz zwischen Spitzenbedarf und natürlichem Dargebot ab, wie es auch von oberflächennahen, quellwassergestützten Versorgungsgebieten bekannt ist. Darüber hinaus ermöglichen ASR-Brunnen die Sicherung und Speicherung des oberirdischen Wasserabflusses im Frühjahr und Herbst, wenn das Dargebot den Bedarf übersteigt und ansonsten über die Vorflut der lokalen Nutzung verloren ginge.

So verlockend diese Methode auch klingt, kann sie nicht das Allheilmittel zur Lösung der Wasserknappheit in ariden Klimazonen sein. Die wesentlichste Voraussetzung ist natürlich ausreichend verfügbares Wasser in geeigneter Qualität. Eine Aufbereitung vor der Injektion ist der Regelfall. Der Aquifer muss eine entsprechende Nutzporosität aufweisen, die eine Speicherung zulässt, diese darf wiederum nicht zu groß sein, da sonst zu viel Wasser abfließt. Wegen des natürlichen

Grundwassergefälles sind Wasserverluste unvermeidlich, das Dargebot des gespeicherten Wassers ist somit eine Funktion der Zeit.

ASR-Anlagen können zwar nicht das Gesamtwasserdargebot erhöhen, durch die Verknüpfung von Hydrologie und Hydrogeologie erhöhen sie aber das nutzbare Dargebot erheblich mit der indirekten Fassung und Speicherung des diskontinuierlichen Abflusses aus Starkregen- und anderen meteorologischen Ereignissen über die jeweiligen Vorfluter bei gleichzeitiger Vermeidung der Übernutzung von Grundwasservorkommen. ASR-Anlagen sind daher in das gesamte Wasserversorgungssystem integriert. David



Abb. 1 – Durch Sandführung zerstörtes Pumpenlaufrad

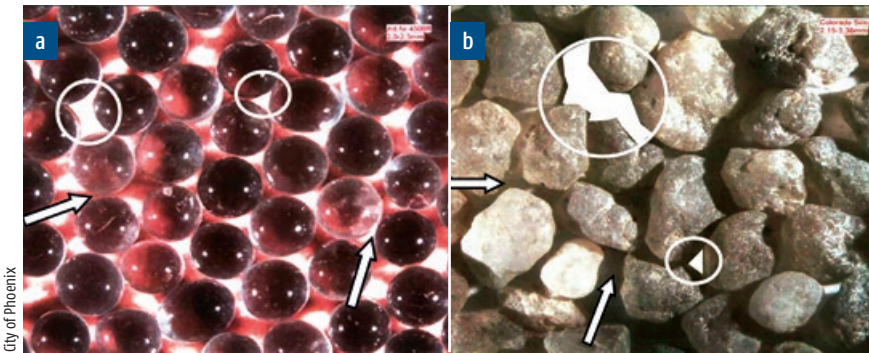


Abb. 2 – Vergleich der physikalischen und hydraulischen Eigenschaften von a) SiLibeads-Glaskugeln und b) Quarzkies: Rundheit: a) 2,4 bis 2,9 mm: 0,95 bis 0,98, b) 2,2 bis 3,4 mm: 0,77; hydraulische Durchlässigkeit: a) k_v vert. = k_v hor., b) k_v vert. < k_v hor.; Lagerung und Rundheit sind hierbei entscheidend für die hydraulische Durchlässigkeit.

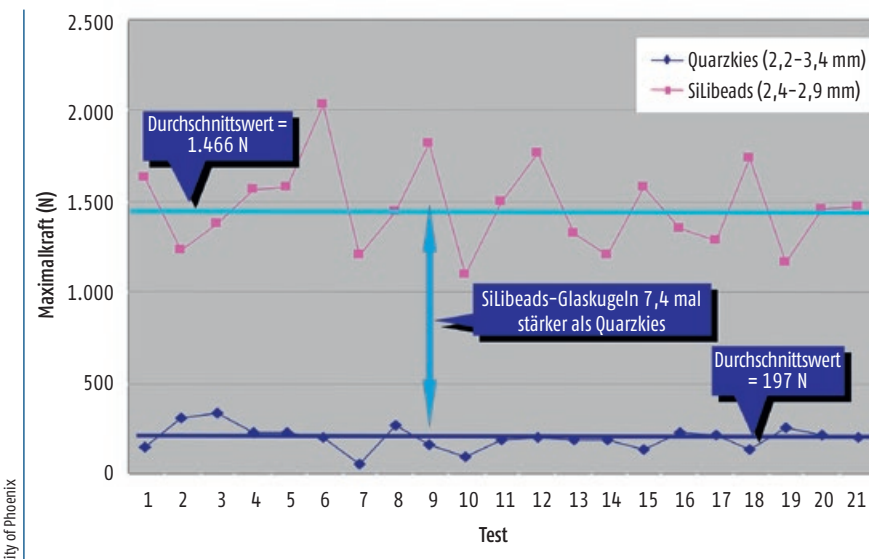


Abb. 3 – Bruchfestigkeitstests von Glaskugeln und Filterkies

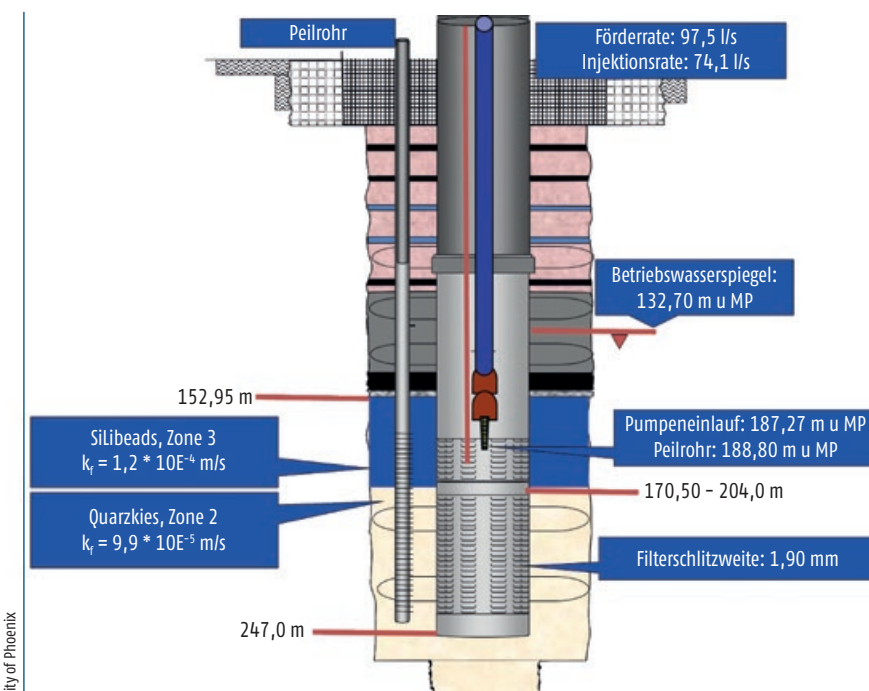


Abb. 4 – Ausbauplan des ASR-Brunnens in Cave Creek mit Darstellung der Untersuchungsbereiche

Pyne und Peter Scott, zwei Pioniere dieser Technik, zeigen dazu noch folgende Vorteile auf [1]:

- Vermeidung erheblicher Evapotranspirationsverluste durch die unterirdische Speicherung gegenüber Oberflächenreservoirs.
- ASR-Anlagen sind einfach anzupassen oder zu erweitern. Bei steigendem Bedarf kann ein weiterer Brunnen hinzugefügt werden, statt einer erheblichen Anfangsinvestition in eine Gesamtanlage, die auf einen prognostizierten Spitzenbedarf ausgelegt sein muss.
- Entnahmen aus ASR-Brunnen sind wasserrechtlich privilegiert gegenüber anderen Grundwassernutzern im gleichen Aquifer.

Nach [1] sind aktuell 28 verschiedene Anwendungsformen bekannt, die vier wesentlichen sind:

- saisonale Speicherung,
- Langzeitspeicherung,
- Notfallspeicherung,
- Gewährleistung der Versorgungssicherheit.

Erwähnenswert ist zudem die große Bedeutung von ASR-Anlagen als hydraulische Barriere gegen die Intrusion von Salzwasser entlang der Küsten in Kalifornien.

Die meisten ASR-Anlagen stützen sich auf kombinierte Förder- und Schluckbrunnen. Diese sind jedoch nur Teil einer komplexen Infrastruktur mit anspruchsvoller Steuer- und Regeltechnik. Auch an die Brunnen selbst werden durch den bimodalen Betrieb und die komplexen variierenden hydrochemischen Verhältnisse deutlich höhere Anforderungen für die Konstruktion und Wartung gestellt als bei herkömmlichen Förder- und Schluckbrunnen. ASR-Brunnen in Lockersedimenten kolmatieren sehr schnell durch Feinteile und mineralische Ausfällungen, regelmäßige Regenerierungs- und Entsandungsmaßnahmen in kurzen Abständen sind deshalb unerlässlich und stellen den größten Betriebskostenfaktor dar.

Die folgenden Ausführungen basieren auf dem letzten Teil des insgesamt dreiteiligen, englischsprachigen Internetblogs des Mit-Autors Gary M. Gin, Geschäftsführer bei Leonard Rice Engineers in Phoenix, Arizona [2]. In der Genealogie der ASR-Experten gehört dieser zur nächsten Generation, den „jungen Wilden“, die mit innovativen Ideen dieser jahrzehntelangen Technik wichtige Impulse zur Verbesserung der Wirtschaftlichkeit, Effizienz und Betriebssicherheit geben.

» Das Wasser fließt bevorzugt durch die Glaskugelschüttung, was zu einem entsprechend höheren Volumenstrom in diesem Bereich führt. «

Ziel der dreiteiligen Blog-Serie von Gin war es, die Fortschritte in der ASR-Brunnentechnologie aufzuzeigen und darzulegen, wie diese Fortschritte die Effizienz von ASR-Brunnenanlagen verbessern können. In der Einleitung zum Blog diskutierte der Autor die Entwicklung der ASR-Brunnentechnologien und die in der Industrie angewandten Methoden zur Injektion von Wasser mit ihren Vor- und Nachteilen. In Teil 1 folgte die Beschreibung der alternativen Injektionsmethode „Reverse Siphon“, bei der sich die hydraulischen Steuerungen zur Verhinderung von Lufteinschlüssen und zur Einleitung der Injektion an der Oberfläche am Bohrlochkopf befinden, anstatt an der Pumpengruppe unten im Bohrloch angeschlossen zu sein. Im zweiten Teil des Blogs wird die Verwendung einer Epoxidbeschichtung beschrieben, um zu verhindern, dass Eisenoxidpartikel die Schnittstelle zwischen Filterrohr und Filterschüttung verstopfen. Im letzten Teil wurde der Einsatz von Glaskugeln als Filtermedium zur Optimierung der Injektionsleistung und Produktivität diskutiert. Diese Diskussion wird im Folgenden aufgenommen und wiedergegeben.

Verwendung von Filterschüttungen

Zunächst ist der Zweck eines zwischen Bohrlochwand und Filterrohr installierten Filtermediums zu untersuchen. Gemäß [3] wird eine Filterschüttung installiert, um einerseits den größten Teil des grobkörnigeren Formationsmaterials hinter dem Filterrohr zurückhalten, um andererseits die Menge an Feinteilen, die in den Brunnen gelangen können (Sandförderung), zu reduzieren und ebenso um die Brunnenhydraulik zu verbessern.

Das Filtermaterial sollte abgerundet und gut sortiert sein, um eine gute Porosität und eine hohe hydraulische Leitfähigkeit (verbesserte Durchfluss zum Brunnen) in der Nähe des Filterrohres zu gewährleisten [3]. Herkömmliche Schüttgüter bestehen meist aus Quarz- und Feldspatkörnern, die durch Wasserverwitterungsprozesse durch Wind und Wasser abgerundet werden. Die Körner sollten nicht aus Gesteinsbruchstücken und/oder Calciumcarbonat bestehen. Immer wieder hört man von Brunnen, die große Mengen Sand fördern, der die Laufräder und Förderstufen der Pumpen zerstört (Abb. 1).


Im Allgemeinen ist das Pumpen von Sand auf einen oder mehrere Faktoren zurückzuführen: mangelhafte Installation der Filterschüttung, falsche Dimensionierung der Schüttgüter und Filterschlitzweiten oder schlechte Auswahl der Filtermedien. Gin nimmt im Rahmen seines Blogbeitrags an, dass der Brunnenausbau richtig gestaltet und die Filterschüttung qualifiziert installiert wurde. Die große Frage ist: Gibt es eine Filterschüttung, die eine bessere Hydraulik liefert und das Potenzial, Sandpartikel in den Brunnen zu pumpen, reduziert?

Die Auswahl der Filterschüttung ist für ASR-Brunnen besonders kritisch, da diese häufiger verstopfen, was zu sinkenden Injektions- und Förderraten im Laufe der Zeit führt. Um die obige Frage zu beantworten, wurde eine Reihe von Tests durchgeführt, in denen der Grad der Rundheit (Sphärizität), die Sortierung und die Bruchfestigkeit von Glaskugeln (2,4 bis 2,9 mm) und Quarzkies (2,2 bis 3,4 mm) gemessen wurden (Abb. 2 & 3).

Die Rundheit von Glaskugeln ist mit 0,95 bis 0,98 nahezu am theoretischen Optimum von 1, während Filterkies der höchsten Qualität mit 0,77 deutlich darunterliegt. Ein wesentlicher Unterschied besteht auch in der richtungsabhängigen Durchlässigkeit der Schüttkörper aus den jeweiligen Materialien. Während Schüttpakete aus mineralischem Kies einen deutlich schlechteren vertikalen als horizontalen Durchlässigkeitsbeiwert (k_v) aufweisen, sind Glaskugelschüttungen vollkommen isotrop.

Die Bruchfestigkeit von Glaskugeln ist 7,4-mal höher als bei dem verwendeten natürlichen Quarzkies, was bedeutet, dass die Glaskugeln mehr Abrieb aushalten und im Laufe der Zeit konstante Porenraumdurchmesser beibehalten können. Es war auch festzustellen, dass der Grad der Rundheit und Sortierung bei den Glaskugeln besser war als bei Quarzkies (Abb. 2). Die größere Bruchfestigkeit und Rundheit der Glaskugeln in Verbindung mit ihrer besseren Sortierung führt zu größerer Porosität bei regelmäßiger Porenstruktur [4, 5]. Anschließend wurde untersucht, ob diese ersten Erkenntnisse valide und messbar sind.

Prüfung der Hydraulik von Glaskugeln gegenüber Quarzkies

Um den Leistungsunterschied zwischen diesen Filtermedien in der Praxis zu testen, wurde in Cave Creek, einem Vorort von Phoenix in Arizona, ein ASR-Brunnen gebaut, der zum Teil mit Glaskugeln (2,4 bis 2,9 mm) und zum Teil mit natürlich vorkommendem Quarzkies (2,2 bis 3,4 mm) hinterfüllt wurde. Für die vergleichenden Messungen der hydraulischen Eigenschaften im Betrieb wurden ca. 7 m mächtige Intervalle von Glaskugeln und Quarzkies mit vergleichbarer hydraulischer Leitfähigkeit (k_f) ausgewählt. Im Glaskugelpaket lag diese bei $1,2 \cdot 10^{-4}$ m/s, im Kiespaket bei $9,9 \cdot 10^{-5}$ m/s (Abb. 4). 

» Durch den Einsatz von Brunnenausbaumaterial aus Edelstahl, Glaskugeln als Filtermedium und einer automatischen Brunnensteuerung ist die Wartung des Brunnens kostengünstiger und weniger aufwendig geworden. «

Die hydraulische Leitfähigkeit des Aquifers wurde durch mehrfache „slug tests“ ermittelt. Ziel der Vergleichsmessungen war, festzustellen, ob Glaskugeln bessere hydraulische Eigenschaften haben als natürlicher Quarzkies. Dazu wurden mehrere Packer-Flowmeter-Messungen in den Filterbereichen der oben genannten unter-

schiedlich hinterfüllten Zonen über einen Zeitraum von einem Jahr bei Förder- und Schluckbetrieb durchgeführt. Neben der Ermittlung und Quantifizierung der Zuflusszonen konnten auch die Unterschiede in der spezifischen Ergiebigkeit für Förder- und Schluckbetrieb in den einzelnen Zonen für die jeweiligen Schüttgüter be-

stimmt werden. Mit anderen Worten: Wie viel Wasser fließt aus und in die Glaskugeln und den Quarzkies? Die Abbildungen 5 und 6 zeigen die Ergebnisse für die spezifische Ergiebigkeit (gpm/feet) im Pump- und Schluckbetrieb und die Veränderungen über den Messzeitraum.

Gravierende Unterschiede zeigten sich auch im Regeneriervermögen des Brunnens in Cave Creek gegenüber klassischen Kiesbrunnen. Abbildung 7 zeigt den für Kiesbrunnen typischen abfallenden Verlauf der spezifischen Ergiebigkeit über die Zeit. Die Verluste sind irreversibel und führen dazu, dass der Brunnen vor Ende der kalkulierten Betriebszeit aus wirtschaftlichen Gründen, wegen zu hoher Förder- und Regenerierkosten, außer Betrieb genommen werden muss. Der in Abbildung 7 gezeigte Brunnen 299 hatte nach vier Jahren 50 % seiner spezifischen Ergiebigkeit verloren.

Einen ganz anderen Verlauf zeigt der Brunnen in Cave Creek mit 50 % Glaskugelhinterfüllung, dessen spezifische Ergiebigkeit nach einem Anstieg über die Neubauleistung sich auch nach knapp zwei Jahren mühelos auf die Ausgangsleistung bringen lässt. Nach der Feinjustierung der Pump- und Entnahmezyklen steigt die spezielle Ergiebigkeit sogar weiter an. Zur vollständigen Wiederherstellung der Ausgangsleistung reicht wiederholtes Schocken mit der Betriebspumpe bei der Entsandung/Entwicklung (Abb. 8).

Schlussfolgerungen

Aus dem einjährigen ASR-Brunnenleistungstest konnten folgende Schlussfolgerungen gezogen werden:

Im Schluckbetrieb war die spezifische Ergiebigkeit der Glaskugelzone 3- bis 9-mal höher als die des Quarzkiesabschnitts. Das bedeutet, dass das Wasser bevorzugt durch die Glaskugelschüttung fließt, was zu einem entsprechend höheren Volumenstrom in diesem Bereich führt (Abb. 5).

Die spezifische Ergiebigkeit des Quarzkiesabschnitts verschlechterte sich langsam von 1,12 auf 0,44 l/s*m, was darauf hindeutet, dass die Porenräume entweder verstopft sind oder durch Abrieb an Durchmesser verlieren. Die Glaskugeln behalten ihre anfängliche spezifische

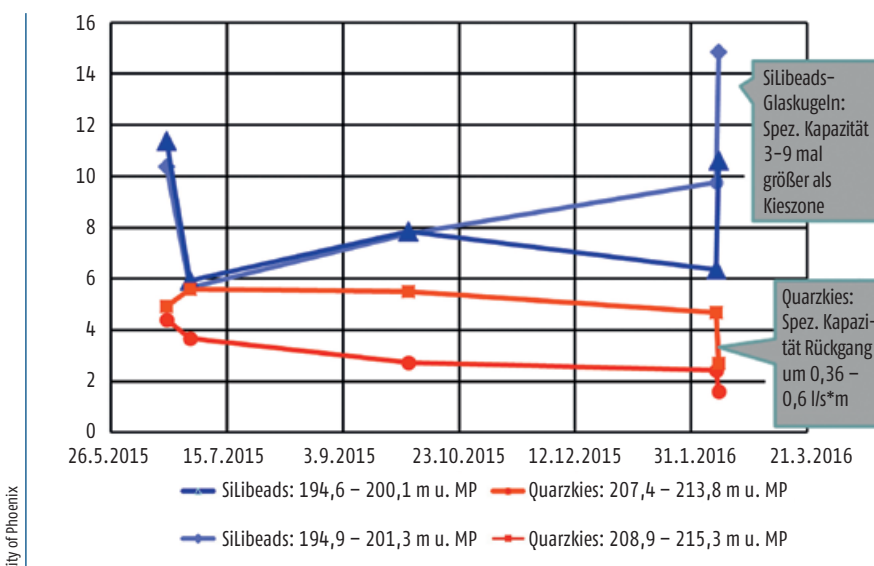


Abb. 5 – Entwicklung der spezifischen Kapazität/Ergiebigkeit im Schluck-/Injektionsbetrieb in der Glaskugel- und Kiesschüttung

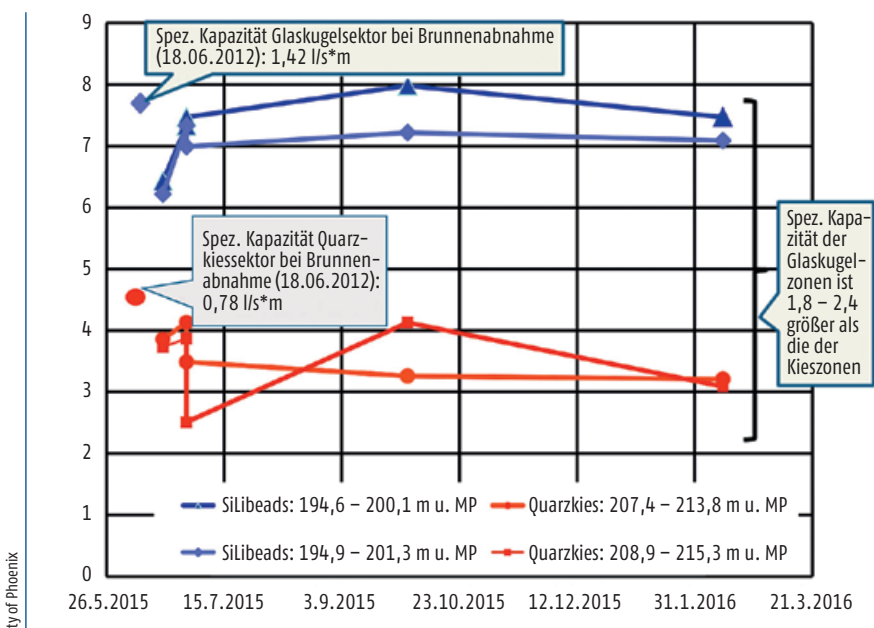


Abb. 6 – Entwicklung der spezifischen Kapazität/Ergiebigkeit im Förder-/Pumpbetrieb in der Glaskugel- und Kiesschüttung

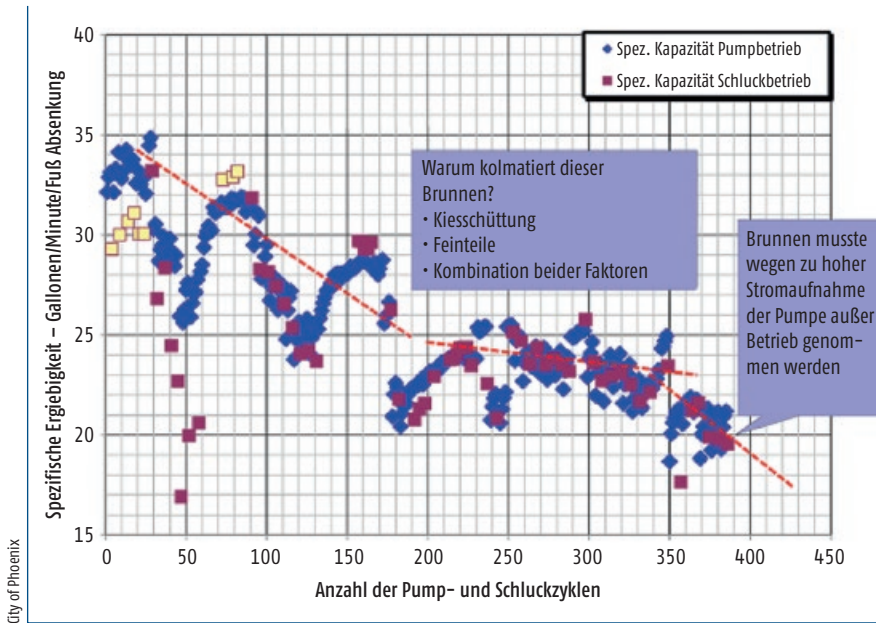


Abb. 7 – ASR-Brunnen 299 mit vollständiger Kieshinterfüllung – Entwicklung der spezifischen Kapazität/ Ergiebigkeit über vier Jahre im kontinuierlichen Pump- und Schluckbetrieb

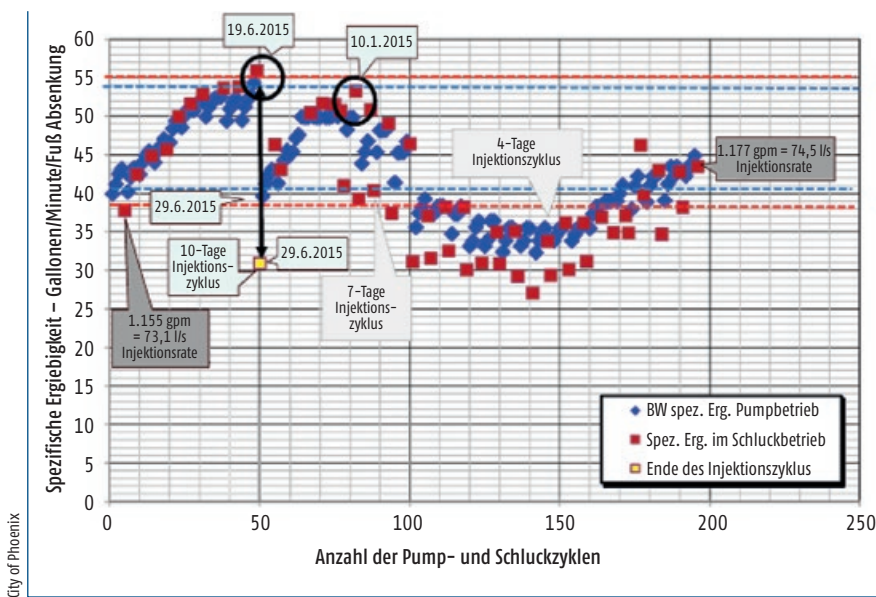


Abb. 8 – ASR-Brunnen mit Glaskugel- und Kiesschüttung in Cave Creek: Entwicklung der spezifischen Kapazität/Ergiebigkeit über zwei Jahre im kontinuierlichen Pump- und Schluckbetrieb

Kapazität von $1,9 \text{ l/s} \cdot \text{m}$ bei oder verbessern sich nach dem Entwicklungspumpen sogar (Abb. 5).

Im Pumpbetrieb war die spezifische Ergiebigkeit der Glaskugelzone um $0,34$ bis $0,46 \text{ l/s} \cdot \text{m}$ größer als die des Quarzkiesabschnitts (Abb. 6). Das bedeutet, dass deutlich mehr Wasser aus dem Aquifer durch die Glaskugelzone gepumpt wurde. Die höhere spezifische Kapazität führt dort zu flacheren Betriebswasserständen, was die Lebensdauer der Pumpenausrüstung verlängert und die Pump- und Wartungskosten im Laufe der Zeit verringert.

Sowohl im Schluck- als auch im Pumpbetrieb zeigten die Glaskugelabschnitte während des Testzeitraums keinen Leistungsabfall nach Rückspülvorgängen (Entsanden), was auf Langlebigkeit und gleichbleibende Brunnenleistung hinweist.

Durch die Auswertung und Skalierung dieser Ergebnisse konnte ein angepasster Injektionszyklus (Dauer der Injektionszyklen und Häufigkeit der Rückspülung) entwickelt werden, der die Leistung zwischen einem ASR-Brunnen mit Glaskugeln und einem Quarzkies-ASR-Brunnen vergleichbar macht. Der hydraulische Wirkungsgrad der Glaskugeln wurde um 45

bis 55 % höher gegenüber Quarzkies bestimmt.

Die Ergebnisse dieser Tests zeigen zum ersten Mal messbare Vorteile bei Betriebs- und Wartungskosten sowie Kapitalkosten im realen Brunnenbetrieb. Durch den Einsatz von Brunnenausbaumaterial aus Edelstahl, Glaskugeln als Filtermedium und einer automatischen Brunnensteuerung ist die Wartung dieses Brunnens für den Betreiber kostengünstiger und weniger aufwendig geworden.

Danksagung

Die Autoren danken der Stadt Phoenix, vertreten durch Aimee Conroy, P. E. and Darlene Helm, P. E., für die Unterstützung dieser Arbeit und Überlassung der Betriebsdaten.

Literatur

- [1] Straub, L. (2015): Saving Water for a drier Day, ASR Systems and their uses: A conversation with experts, Water Well Journal, September 2015, pp 28–29.
- [2] Gin, G (2017): Advancements in ASR Well Construction and Operations – Part 3, LRE blog, <http://lrewater.com/2018/02/06/advancements-asr-well-construction-operations-part-3>.
- [3] Driscoll, F. (1986): Groundwater and Wells, 2nd Edition, by Johnson Screen, St. Paul, Minnesota, p. 1089.
- [4] Beard, D. C.; Weyl, P. K. (1973): Influence of texture on Porosity and Permeability of Unconsolidated Sand, The American Association of Petroleum Geologist Bulletin, Volume 57, No. 2, pp. 349–369.
- [5] Nagtegaal, P. J. (1978): Sandstone Framework Instability as a Function of Burial Diagenesis, Geological Society of London, Volume 135, pp. 101–105.

Autoren

Reinhard Klaus
RKP Consulting
Mögeldorf Hauptstr. 49
90482 Nürnberg
Tel.: 0911 57035-96
mail@reinhard-klaus.de

Gary M. Gin
Leonard Rice Engineers, Inc.
11811 North Tatum Blvd.
Phoenix AZ 85028
Tel.: +1 602 296-7093
gary.gin@lrewater.com
www.lrewater.com

