



Montage eines Sumpfrohrs DN 1.200 mit Schüttkorbkragen 1.620 mm und Wickeldrahtfilterrohr mit vorbereiteten Schüttkörben

Brunnen mit außergewöhnlich großem Durchmesser und fragmentierter Filterschüttung

Wenn die hydrogeologischen Bedingungen Grundwasserleitermächtigkeit, Durchlässigkeitsbeiwert und realisierbare Brunnenabsenkung das Fassungsvermögen eines Brunnens einschränken, kann die gewünschte Förderrate durch eine Vergrößerung des Bohrdurchmessers erzielt werden. Um einen Großlochbrunnen wirksam entwickeln und gegebenenfalls regenerieren zu können, ist der Ausbaudurchmesser ausreichend groß und die Ringraumdicke der Filterschüttung hinreichend klein zu wählen. Die hydraulische Beherrschbarkeit der Filterschüttung kann durch ihre Fragmentierung erreicht werden.

Die Stadtwerke Barsinghausen betreiben als kommunaler Wasserversorger das Wasserwerk Eckerde, das aus sechs Vertikalfilterbrunnen dem Grundwasserleiter im Deistervorland maximal 490 m³/h entnehmen darf. Für den Betrieb der Brunnen liegen eigene Wasserrechte vor. Fünf der sechs Brunnen dürfen 70 m³/h, der Brunnen 4 bis zu 140 m³/h fördern. Zur Aufrechterhaltung der Versorgungssicherheit waren die Stadtwerke Barsinghausen gezwungen, den in der Leistung stark zurückgegangenen Brunnen 4 durch einen Neubau ersetzen zu lassen.

Der 1977 mit 1.800 mm Durchmesser gebohrte und mit OBO-Filterrohren NW 800 mm ausgebaute Altbrunnen 4 konnte aufgrund des Filtermaterials und der hydraulisch nicht realisierbaren Anforderungen nicht mehr regeneriert werden. Die erlaubte Entnahme von bis zu 140 m³/h sollte trotz dafür ungünstiger hydrogeologischer Standortbedingungen durch den Ersatzneubau nur eines Brunnens gewährleistet werden. Die Aufteilung des Wasserrechts auf eine Brunnendoublette war aufgrund der begrenzten Flächenverhältnisse in der Schutzzone I bei Einhaltung des erforderlichen räumlichen Abstands der neu zu errichtenden Brunnen zueinander und zum Altbrunnen nicht umsetzbar.

Der von Auelehm und Schluff bedeckte, oberflächennahe Lockergesteinsgrundwasserleiter ist am Standort nur rund 12,5 m mächtig und in den oberen 2,5 m überwiegend feinsandig ausgebildet. Darunter lagern weitgestufte quartäre sandige Kiese und kiesige Sande mit Ungleichkörnigkeiten C_q im zweistelligen Bereich.

Den Liegendstauer bildet ab 16 m unter Gelände ein kompakter Schluff. Der Brunnenbetrieb geht stets mit dem Übergang von gespannten zu ungespannten Druckverhältnissen und einer Reduzierung der durchströmten Mächtigkeit einher.

Planung

Mit der Planung des Ersatzbrunnens wurde die GCI GmbH, unterstützt von BRUNI PLAN Dr. Peter Nillert, beauftragt. Als Grundlage der Brunnenbemessung wurde eine Aufschlusskernbohrung mit durchgehendem Kerngewinn in dem zu erschließenden Grundwasserleiter durchgeführt und die Kornverteilung von schichtweise entnommenen Sedimentproben siebanalytisch mit einem erweiterten Siebsatz nach DIN ISO 11277 bestimmt.

Die aus Siebanalysen nach BEYER abgeleitete und anhand der Schichtmächtigkeit gewichtete mittlere hydraulische Durchlässigkeit des Grundwasserleiters (GWL) liegt bei $7,8 \times 10^{-4}$ m/s. Aus dem Fassungsvermögen nach SICHARDT, HUISMAN und dem Wasserandrang nach DUPUIT, THIEM ließen sich unter Ansatz der Grundwasserleiterparameter und der Nennleistung des Brunnens von 140 m³/h

- ein erwartbarer Absenkungsbetrag von ca. 5 m,
- somit eine realisierbare, nicht belüftete Filterlänge von 6 bis 7 m
- und ein Mindestbohrdurchmesser von 2.000 mm ableiten.

Die erforderliche Dimension eines solchen Brunnens wurde demzufolge auch bei der Planung und beim Bau des mit

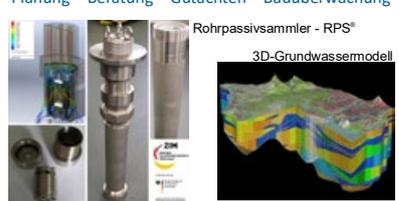
1.800 mm gebohrten Altbrunnens fachgerecht umgesetzt, der unter den gleichen Standortbedingungen trotz mangelnder Regenerierbarkeit und abnehmender Leistung über 40 Jahre wirtschaftlich betrieben werden konnte.

Im Sinne der Nachhaltigkeit, das heißt um die Brunnenalterung zu verzögern und die Regenerierbarkeit zu verbessern, sollte der Ersatzbrunnen mit einem Edelstahl-Wickeldrahtfilter und Glaskugelschüttung ausgebaut werden. Der Wickeldrahtfilter gewährt über seine – verglichen mit anderen Filterarten – große offene Filterfläche guten Zugang zu allen Bereichen →

GCI GmbH
Grundwasser Consulting Ingenieurgesellschaft

Planung * Beratung * Gutachten * Bauüberwachung

Rohrpassivsammler - RPS®
3D-Grundwassermodell



- Grundwassererkundung u. -erschließung
- Planung Brunnenbau u. -regenerierung
- Altlastenerkundung u. -sanierung
- Grundwassermodellierung
- Untersuchungen zum Klimawandel
- Bauen im Grundwasser
- Grundwassermonitoring
- Rohrpassivsammler RPS®
- Softwareentwicklung

Bahnhofstr. 19, 15711 Königs Wusterhausen
Tel: 03375-2947-85
mail@gci-kw.de, www.gci-kw.de



des dahinter befindlichen Kornfilters. Wegen schichtweise relativ feinkörniger Sedimente musste die Filterschüttung abschnittsweise mit Glaskugeln der Fraktion 1,25 bis 1,65 mm ausgeführt werden, was bei einer einfachen Schüttung Filterrohrabschnitte mit einer Spaltweite von nur 0,8 mm zur Folge gehabt hätte. Zur Gewährleistung der hydraulischen Regenerierbarkeit wurde daher ein Ausbau mit doppelter (zweischaliger) Schüttung konzipiert, der eine durchgehende Filterspaltweite von 2,0 mm ermöglicht.

Als Kornfiltermaterial sind Glaskugeln gewählt worden, weil diese aufgrund der runden Kornform und der daraus resultierenden homogenen Porenkanalweiten deutlich weniger zu irreversibler hydromechanischer Kolmation durch Feststoffeinträge aus dem GWL neigen, die nie vollständig verhindert werden können. Bei sehr ungleichförmigen Filtersanden/-kiesen können in die Poren eingetragene Feststoffpartikel trotz ausreichender Strömungskräfte aufgrund von Engstellen oft nicht wieder vollständig entfernt werden.

Durch den im flachen GWL natürlichen und durch den Brunnenbetrieb noch verstärkten Sauerstoffeintrag kann es bei Anwesenheit von im Wasser gelöstem Eisen bzw. Mangan zu Ausfällungen und Anhaftungen von Eisenhydroxiden und Manganoxid am Kornfiltermaterial kommen. Die Anhaftungsrate ist bei Glaskugeln mit glatter Oberfläche gegenüber rauen Filtermaterialien geringer. Eine rechtzeitige Ausführung vorausgesetzt, können Anhaftungen durch effektive hydromechanische Regenerierverfahren zudem wieder leichter abgelöst werden.

Die Bemessung der Glaskugelschüttung wurde schichtweise für jede siebanalytisch untersuchte Sedimentprobe nach den Kriterien für stabile Kornfilter [1] vorgenommen. Anschließend wurde die Schüttfolge unter Einhaltung zulässiger Toleranzen und nach bautechnischen Gesichtspunkten vereinfacht. Berücksichtigt man Porenkanalweiten und zu erwartende Energieeinträge bei der Herstellung und Regenerierung sowie im späteren Betrieb des Brunnens, können auch vertikal abgestufte und damit an geschichtete Grundwasserleitersedimente gut angepasste Glaskugelschüttungen hergestellt werden, ohne dass es zur Vermischung von Kornfraktionen kommt.

Der Brunnen war mit zwei gleich dimensionierten, frequenzgesteuerten Unterwassermotorpumpen auszurüsten, um den Brunnen energieeffizient mit Grundlast und Spitzenlast betreiben zu können. Um auch angesichts der jahreszeitlichen Schwankungen des natürlichen Grundwasserspiegels von etwa 2 m ein Trockenlaufen der Pumpen zu verhindern und den Betriebswasserspiegel bis knapp an die Filteroberkante absenken zu können, wurde abgestimmt, die Pumpen mit einem Kühlmantel auszurüsten und unterhalb der Filterstrecke in ein 2 m langes Sumpfrohr einzuhängen. Der zum Einbau der beiden Förderpumpen mindestens erforderliche Ausbaudurchmesser liegt demnach bei DN 800. Ein Brunnen mit einer Ringraumdicke von ca. 600 mm und doppelter Schüttung könnte jedoch wegen der erforderlichen Förderrate einer Intensiventnahmekammer [2] von > 300 bis 400 m³/h nicht entwickelt und nicht regeneriert werden.

Im Hinblick auf die hydraulische Beherrschbarkeit aller drei Zonen des Filterringraums, von der inneren über die äußere Schüttung bis zur Bohraureole, wurde daher über DN 800 hinaus eine deutliche Vergrößerung des Ausbaudurchmessers angestrebt. Vorbehaltlich stati-

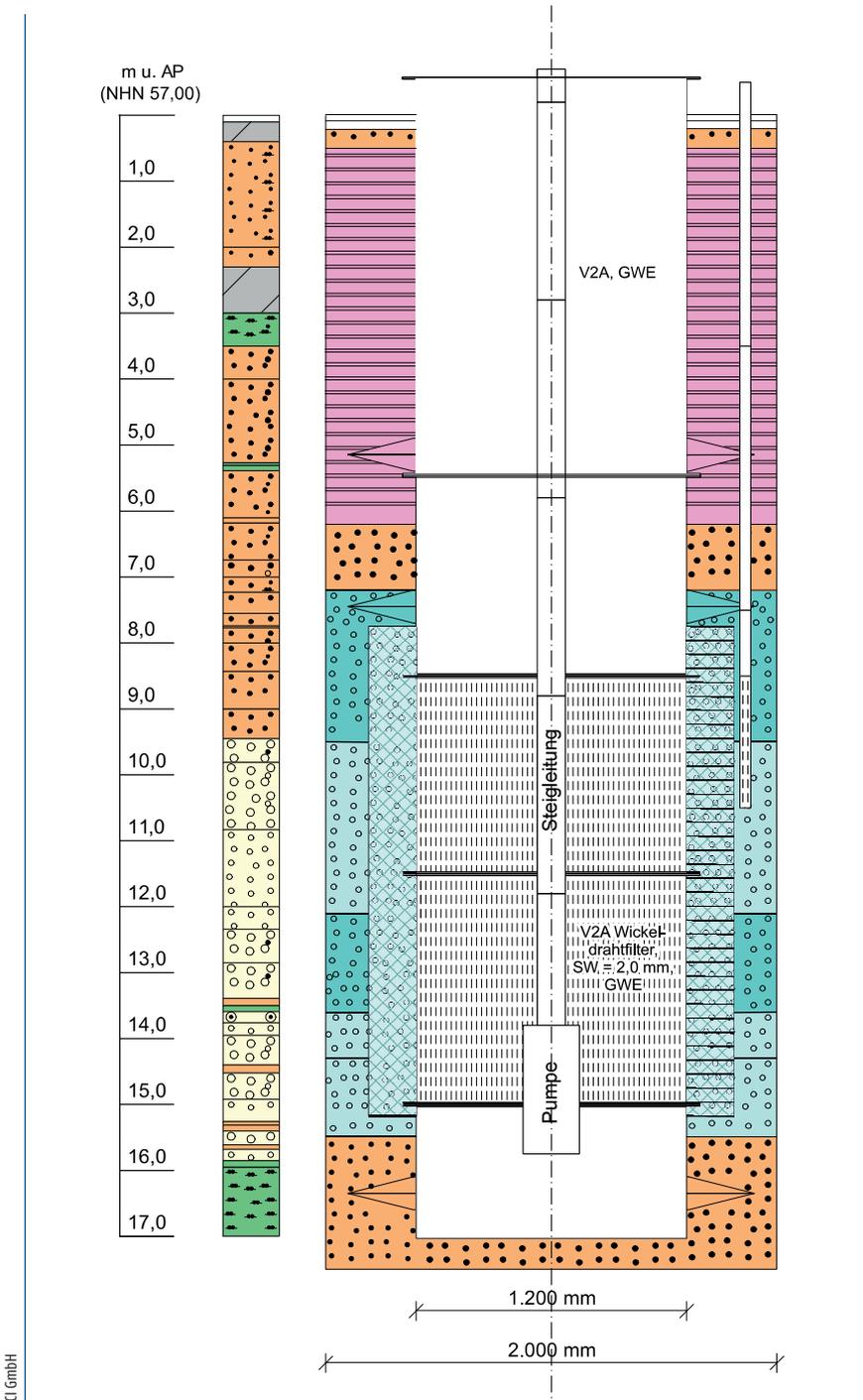


Abb. 1 – Geologisches Profil und Ausbau von Brunnen 4/20 mit doppelter Glaskugelschüttung, ohne Ringscheiben (Entwurfsplanung, links) sowie mit Ringscheiben (Bauausführung, rechts)

scher Prüfungen zur Zug- und Druckfestigkeit eines 17,5 m langen Ausbaustrangs mit befüllten Schüttkörben wurde ein Ausbaudurchmesser DN 1.200 angestrebt (Abb. 1) – dem derzeit größtmöglichen einteilig herstellbaren Wickeldrahtfilter der GWE pumpenboese GmbH, die das Ausbaumaterial für den Brunnen 4/20 technisch ausgelegt, hergestellt und geliefert hat.

Statische Auslegung des Filterrohres

In speziellen Anwendungen wie dieser ist für GWE wichtig, die Auslegung der Wickeldrahtfilter-Konstruktion u. a. mit einer

Der zu prüfende Ausbaustrang besteht aus drei Vollroherelementen mit einer Gesamtlänge von 11 m sowie zwei Filterelementen von insgesamt 6,5 m Länge, womit sich eine Gesamtlänge des Ausbaurohres von 17,5 m mit einem Gewicht von 15,3 t ergibt, das sich zusammensetzt aus 12 t Wickeldrahtfilter inklusive innerer Glasgugelschüttung (1.850 kg/m) und 3,3 t Vollwandrohr (300 kg/m). Aus den genannten Kenngrößen ergibt sich für die axiale Zugbelastung F_z ein Wert von 150 kN. Wird der Ausbaustrang auf der Bohrlochsohle abgestellt, unterliegt das unterste Element einer axialen Druckbelastung in Folge

belastung die Gefahr des seitlichen Ausknickens der Stützstäbe. Dieser Tatsache wird in der Berechnung der axialen Druckfestigkeit durch einen Sicherheitsbeiwert Rechnung getragen, der hier mit der Größe 4 angesetzt wurde. Dadurch wird eine gesonderte Betrachtung des Knickverhaltens oder ein zusätzlicher Verschwächungsbeiwert überflüssig.

Im konkreten Fall kam ein Wickeldrahtfilter mit 180 Stützstäben mit 5 mm Durchmesser zum Einsatz. Unter Berücksichtigung der Materialstreckgrenze K von 190 N/mm² ergibt sich für die axiale Zugfestigkeit $F_{Zzul} = 571$ kN und für die axiale

» Axiale Belastungen werden in Wickeldrahtfiltern ausschließlich von den parallel zur Rohrachse verlaufenden Stützstäben aufgenommen, die an den Enden mit den Verbindungsflanschen verschweißt sind. «

FEM zu flankieren, um eine effiziente Realisierung sicherstellen zu können.

Bedingt durch das Gewicht der Bohrrohre konnte vorab nicht ausgeschlossen werden, dass zum Ziehen, Lösen und Abnehmen von Bohrrohren beide Winden des Seilbaggers benötigt werden. Es war demnach nicht garantiert, dass der am Seil der einen Winde hängende Ausbaustrang mittels Abfangschelle in hängender Lage gesichert werden kann, um das darüber an der anderen Winde hängende Bohrrohr zu entfernen, und dass der Ausbaustrang nicht temporär auf der Bohrlochsohle bzw. der eingebrachten Unterschüttung abgesetzt werden muss. Beim Absetzen treten zusätzlich zu den Belastungen durch axiale Zugkräfte und radiale Druckkräfte noch axiale Druckkräfte auf. Die axialen Kräfte werden durch das Stranggewicht ausgelöst. Während die Zugkräfte bei Überschreiten der Belastungsgrenze zu einem Abriss der Filterrohrkörbe führen können, spielt bei der Einwirkung der axialen Druckkräfte das Knick- bzw. Beulverhalten eine wesentliche Rolle für die Bewertung der konstruktiven Auslegung. Die radialen Druckkräfte werden durch den Druck, den die Kieschüttung während des Einbringungs Vorgangs verursacht, erzeugt und können ebenfalls zu einem Beulverhalten führen. Da die Filterelemente im Ausbaustrang im Vergleich zu den Vollwandrohren die deutlich schwächeren Bestandteile sind, wird hier lediglich die Berechnung der Wickeldrahtfilter skizziert.

des gesamten Stranggewichts einer Druckbelastung von ebenfalls 150 kN.

Axiale Belastungen werden in Wickeldrahtfiltern ausschließlich von den parallel zur Rohrachse verlaufenden Stützstäben aufgenommen, die an den Enden mit den Verbindungsflanschen verschweißt sind. Daraus resultierend wird die axiale Zugfestigkeit von Wickeldrahtfiltern F_{Zzul} aus der gesamten Querschnittsfläche der Stützstäbe A_{St} , multipliziert mit der Materialstreckgrenze K der Stützstäbe, berechnet. Zusätzlich wird der Wert mit einem Verschwächungsbeiwert v für das Schweißen reduziert. Auftriebskräfte bleiben rechnerisch unberücksichtigt und bieten zusätzliche Sicherheit.

Im Unterschied zu der axialen Zugbelastung besteht bei der axialen Druck-

Druckfestigkeit $F_{Dzul} = 168$ kN, womit der Ausbaustrang den zu erwartenden Belastungen sicher standhalten wird.

Die beim Einbau der inneren Schüttung mithilfe von Schüttkörben zu erwartende radiale Außendruckbelastung auf das Filterrohr ist relativ gering und kann mit Methoden der Erddruck- und Silodrucktheorie berechnet werden. Diese sind dadurch charakterisiert, dass nach einem Anfangswert und einem linearen oder exponentiellen Anstieg in asymptotischer Näherung ein Maximalwert für die radiale Druckbelastung erreicht wird.

In Abbildung 2 sind die sich nach der Erddrucktheorie von BERESANZEV ergebenden Grenzwerte der radialen Druckbelastung für unterschiedliche Reibungswinkel φ für Kies grafisch dargestellt. Das

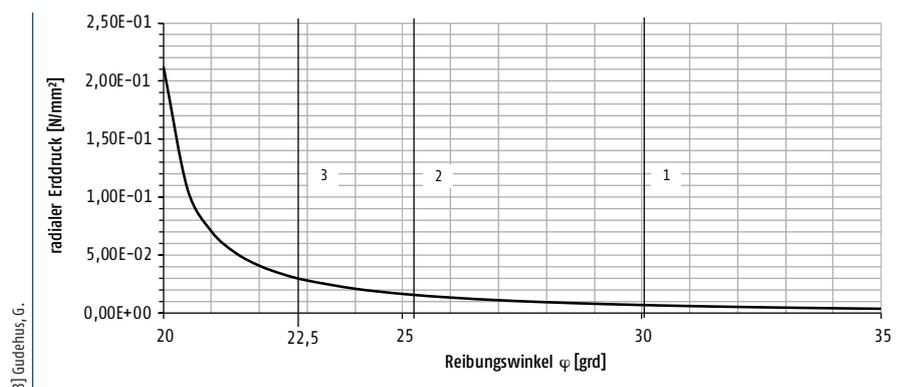


Abb. 2 – Radiale Druckbelastung in Abhängigkeit des Reibungswinkels nach Erddrucktheorie von BERESANZEV aus [3]; Linie 1: Erddruck 0,0069 N/mm² (0,07 bar), Linie 2: Erddruck 0,0165 N/mm² (0,17 bar), Linie 3: Erddruck 0,0334 N/mm² (0,33 bar)

Diagramm basiert auf der von BERESAN-ZEV formulierten Formel für den lotrecht auf eine senkrechte Rohrwand wirkenden radialen Erddruck σ_r :

$$\sigma_r = \gamma \times r_0 \times \frac{\tan\left(\frac{\pi}{4} - \frac{\varphi}{2}\right)}{2 \times \tan \varphi \times \tan\left(\frac{\pi}{4} + \frac{\varphi}{2}\right) - 1}$$

mit: Wichte Kies γ : 20 kN/m³
 Radius Brunnenrohr r_0 : 0,61 m
 Reibungswinkel Kies φ : 22,5°;
 25°; 30°

Demnach ist für diese Einbaumethode, bei einem Reibungswinkel des Filterkieses von 22,5°, ein radialer Außendruck von maximal 0,33 bar zu erwarten.

Bei der Verwendung von Glaskugeln, die aufgrund ihres deutlich geringeren Reibungswinkels eher eine mit der Einbauteufe linear ansteigende Außendruckbelastung auf das Filterrohr und die Bohrlochwand ausüben, empfiehlt es sich, in erster Näherung, ähnlich wie bei Spülbohrungen, in einer Art Worst-Case-Betrachtung von hydrostatischen Druckverhältnissen auszugehen. Demnach errechnet sich die hydrostatische Außendruckbelastung P_{hyd} zu

$$P_{hyd} = \rho \times h \times g = 0,96 \text{ bar}$$

mit: Dichte Glaskugeln ρ : 1,5 t/m³
 Erdbeschleunigung g : 9,81 m/s²
 Schütthöhe h : 6,5 m

Die Außendruckfestigkeit von Wickeldrahtfiltern wird gemäß DIN 4900-2 nach der Methode AD-B6 eines unter Außendruck stehenden Druckbehälters berechnet. Dabei werden über die Flächenträgheitsmomente der Stützstäbe und Wickelprofildrähte unter Berücksichtigung der Spaltweite äquivalente Ersatzwandstärken von Rohren gleichen Durchmessers berechnet, die dann mit entsprechenden Sicherheitsfaktoren in die oben genannte Berechnungsmethode zur Bestimmung der Außendruckfestigkeit eingefügt werden. Daraus resultieren Werte der Außendruckfestigkeit für das reversible elastische Einbeulen P_e von 2,22 bar und für das bleibende plastische Einbeulen P_p von 7,23 bar.

Beide Werte liegen deutlich oberhalb des zu erwartenden Außendrucks von 0,33 bar für normale Kiesschüttungen und auch oberhalb der als Worst Case berechneten 0,96 bar für die Glaskugelschüttung.

Darüber hinaus wurde die Außendruckfestigkeit auch mit dem von GWE entwickelten Berechnungsverfahren bestimmt, welches in diversen praktischen Außendruckversuchen an kleineren Filterdurch-

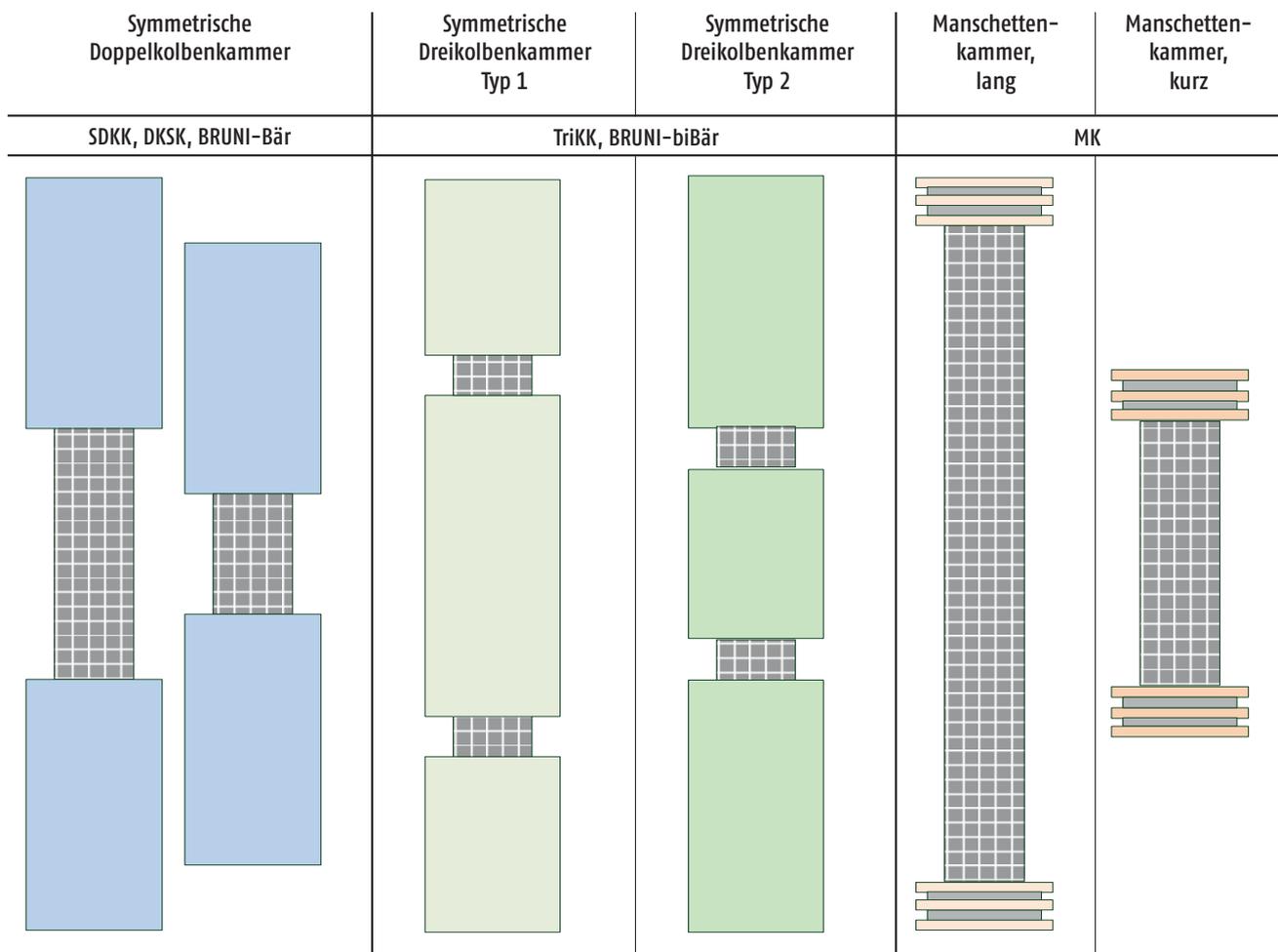
messern validiert werden konnte und üblicherweise bei kritischen Einsatzfällen angewendet wird. Bei diesem werden zur Ermittlung der Außendruckfestigkeit P_{krit} nur die äußeren Wickelprofildrähte zur Aufnahme der radialen Außendrucke berücksichtigt, womit ein konservativer Wert ermittelt wird. Dieser beträgt bei der vorliegenden Filterkonstruktion 0,83 bar und liegt damit nur geringfügig unterhalb der kalkulierten Worst-Case-Betrachtung der Glaskugelschüttung. Die in diesem Bauvorhaben umgesetzte doppelte Glaskugelschüttung mit am Filterrohrstrang befestigten und obertätig befüllten Schüttkörben lässt jedoch eine deutlich geringere Außendruckbelastung erwarten und legitimiert die Verwendung der Filterkonstruktion in DN 1.200 (Abb. 3).

Fragmentierte Filterschüttung

Um den im 400 mm dicken Ringraum doppelt geschütteten Glaskugelfilter des Brunnens optimal entwickeln und gegebenenfalls später hydraulisch regenerieren zu können, muss eine Intensiventnahmekammer (IEK) mit ausreichend großer Förderrate zum Einsatz kommen. Dabei ist zu gewährleisten, dass die erzeugte Strömungsgeschwindigkeit in den Poren des Kornfilters und der Bohraureole eine ausreichend große Schleppkraft erzeugt, um die größten in den Porenkanälen transportablen Partikel auszuspülen. Die erforderliche Förderrate wurde nach [2] in Abhängigkeit von der Geometrie des Kornfilters und dem Durchlässigkeitsbeiwert der Filterschüttung sowie auch von der Geometrie der IEK für jede ausgewiesene Sedimentschicht berechnet. Für den Brunnen 4/20 wurde für die Sedimentschicht mit der größten erforderlichen Strömungsgeschwindigkeit bei Anwendung einer Doppelkolbenspaltkammer (Abb. 4) die kleinste erforderliche Kammerförderrate mit 260 m³/h ermittelt. Da die Größe der Kammerförderrate auch wesentlich von der Relation des Durchmessers der inneren Schüttung zur Größe des Durchmessers von Filterrohr (1.200 mm) und Bohrloch (2.000 mm) abhängig ist, wurde diesbezüglich die minimal erforderliche Förderrate für einen Durchmesser der inneren Schüttung von 1.620 mm ermittelt. Da bei Realisierung der größtmöglichen Brunnenabsenkung die maximal erwartbare Förderrate kleiner als etwa 150 m³/h ist, kann der in Abbildung 1 auf der linken Seite skizzierte Kornfilter nicht optimal entwickelt und nicht ausreichend effektiv regeneriert werden.



Abb. 3 – Wickeldrahtfilterrohr DN 1.200



BRUNI PLAN

Abb. 4 – Typen von Intensiventnahmekammern

Weil der Brunnendurchmesser bei Gewährleistung der Betriebsförderrate nicht verringert werden kann, ist eine weitere Reduzierung der erforderlichen Kammerförderrate nur durch Modifizierung der Filterschüttung erreichbar. Dabei ist die

Praktisch ist dies erreichbar, wenn die Filterkonstruktion bei der Anwendung einer IEK wie ein Brunnen wirkt, der einen Filter mit dem Durchmesser der Größe des Durchmessers der inneren Schüttung hat. Damit wäre zur Herstellung des Stütz-

gebaut werden, die die innere Schüttung vertikal in Kornfilterfragmente mit oberer und unterer undurchlässiger Grenzfläche gliedern. Dadurch werden relativ geringmächtige ringzylinderförmige Filterkornfragmente der inneren Schüttung erzeugt,

» Die Einschränkung der Vertikalströmung gelingt, indem in den Ringraum im Abstand von etwa 0,2 bis 0,3 m Ringscheiben eingebaut werden, die die innere Schüttung vertikal in Kornfilterfragmente gliedern. «

Reduzierung der erforderlichen Kammerförderrate infolge Verringerung des Durchlässigkeitsbeiwertes durch Wahl kleinerer Schüttkorngrößen nicht in Betracht zu ziehen.

Der Lösungsansatz besteht darin, die doppelte Filterschüttung so zu modifizieren, dass sie bei Anwendung einer IEK mit einer kleineren Förderrate optimal gespült werden kann, wobei die Eigenschaften des Brunnens in der normalen Betriebsituation nicht beeinträchtigt werden dürfen.

korngerüsts in der Bohraureole und zur Spülung der äußeren einfachen Filterschüttung ein Brunnen mit fiktivem Filterdurchmesser 1.620 mm im Bohrloch mit 2.000 mm Durchmesser zu behandeln. Dafür wäre eine maximale Förderrate von nur 45 bis 90 m³/h erforderlich.

Um solch eine Strömungssituation herzustellen, ist die Vertikalströmung in der inneren Schüttung weitgehend einzuschränken. Das gelingt, wenn in den Ringraum der inneren Schüttung im Abstand von etwa 0,2 bis 0,3 m Ringscheiben ein-

die praktisch nur horizontal durchströmt werden können. Die äußere Filterschüttung wird über die gesamte Filterlänge wie üblich als durchgehender Schüttkornringzylinder mit abschnittsweise an das Sediment angepassten Schüttkorngrößen hergestellt.

¹ Hinweis
SDKK®, DKSK®, hypop® und TriKK® sind eingetragene Markenzeichen der Hölscher Wasserbau GmbH. BRUNI-Bär® und BRUNI-biBär® sind eingetragene Markenzeichen von BRUNI SERVICE David Nillert. Auf die Verwendung des „Registered Trademark“-Zeichens wird im laufenden Text zur besseren Lesbarkeit verzichtet.

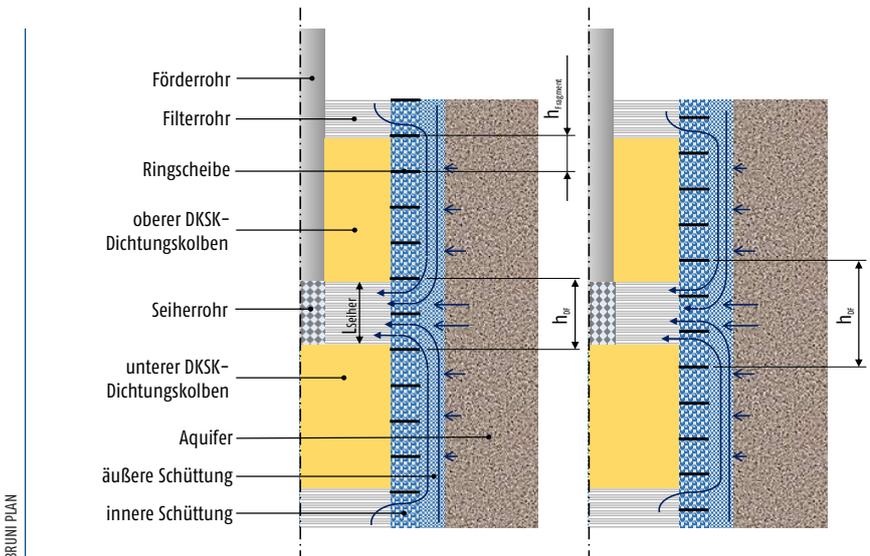


Abb. 5 – Grundwasserströmung im fragmentierten, doppelt geschütteten Kornfilter für unterschiedliche Positionen an einer Doppelkolbenspaltkammer

Praktisch bedeutet das, dass bei der Anwendung einer IEK vom Typ DKSK¹ die vertikale Umströmung der Begrenzungskolben nur in der äußeren Filterschüttung stattfinden kann, weil die vertikale Strömung in der inneren Schüttung durch die Ringscheiben verhindert wird (Abb. 5).

Die innere Schüttung wird zwischen den eingelegten Ringscheiben im Wesentlichen nur radial durchströmt. Auch für die Durchströmung der Kornfilterfragmente der inneren Schüttung ist eine ausreichend große Schleppkraft durch eine angemessen große Kammerförderrate zu gewährleisten, um die aus der äußeren Schüttung bis an die Grenzfläche zur inneren Schüttung transportierten Partikel weiter zu befördern. Während die vertikale Strömung in dem Ringzylinder zwischen der äußeren Grenzfläche der inneren Schüttung und der Bohraureole die Poren der äußeren Filterschüttung reinigt, muss das in den Fragmenten der inneren Schüttung deren radiale Durchströmung in Richtung Filterrohr leisten. Die maximal erforderliche Kammerförderrate errechnet sich aus der von der Partikelgröße abhängigen erforderlichen Strömungsgeschwindigkeit v_p und der maximalen Fläche, die durchströmt wird. Diese wird an der äußeren Grenze der inneren Schüttung von deren Durchmesser D und der Mächtigkeit eines oder mehrerer Kornfilterfragmente bestimmt. In Abhängigkeit von der Mächtigkeit eines Fragments h_{Fragment} , von der Seiherlänge L_{Seiher} der IEK und von der Stellung der IEK im Filterrohr kann die Höhe h_{DF} der durchströmten Fläche eine, zwei oder sogar drei Fragmenthöhen betragen. Um die erforderliche Kammerförderrate möglichst klein zu halten, ist eine geringe Fragmenthöhe zu wählen und die Seiherlänge entsprechend anzupassen, sodass in Abhängigkeit von der Kammerposition im Filterrohr (Abb. 5) höchstens zwei Kornfilterfragmente gleichzeitig Wasser in den Seiher liefern können, wie für Brunnen 4/20 in Tabelle 1 beispielhaft angegeben ist.

Die Herstellung der Kornfilterfragmente ist praktisch nur im Zusammenhang mit dem Einbau der inneren Schüttung in Filterdrahtkörben möglich. Die einzulegenden Ringscheiben können aus dünnem Edelstahlblech oder für Trinkwasser geeignetem Kunststoff hergestellt sein und sollten im Durchmesser etwas kleiner sein als der Durchmesser der Schüttkörbe (Abb. 6). Der Innendurchmesser der Ringscheiben sollte etwas größer als der Außendurchmesser des Filterrohres sein. Die Ringscheibe wird nicht geschlossen,



Abb. 6 – Montage und Einbau der Ringscheiben aus PE-Kunststoff

GGC GmbH / BRUNNI PLAN

sondern überlappt, sodass ausreichende Flexibilität der aus Schüttgut und Ringscheiben bestehenden Kornfilterkonstruktion bei der Konsolidierung und bei betriebsinduzierter Restsetzung gewährleistet bleibt. Die Scheiben werden bei der Füllung der Schüttkörbe sukzessive eingelegt. Anschließend wird die Schüttung in den Körben mit den Scheiben konsolidiert. Der aus den konstruktiv und einbautechnisch erforderlichen Toleranzen der Scheibenmaße resultierende unwirksame Anteil der Kammerförderrate kann durch eine Vergrößerung der berechneten Kammerförderrate um etwa 5 bis 15 % ausgeglichen werden.

Die Konstruktion fragmentierter Filterschüttungen ist nicht an die Verwendung von Glaskugeln gebunden, sondern kann ebenso mit Filterkies umgesetzt werden.

Bauausführung und Filterentwicklung

Im Hinblick darauf, dass die geplante Brunnenleistung mit auf dem Markt verfügbarer und für den Brunnenbau geeigneter Großbohrtechnik noch knapp erreicht werden konnte, waren Risiken zu reduzieren, die im Bereich der Bohraureole zu einer Verschlechterung der Zuflussbedingungen aus dem GWL führen könnten. Deshalb und aufgrund der Verwendung von kostenintensiveren Glaskugeln als Filterschüttung wurde als Bohrverfahren eine maßhaltige Trockenbohrung gewählt.

Mit der Bauausführung wurde die Hölscher Wasserbau GmbH beauftragt, die über die passende Großbohrtechnik und Erfahrungen im Großbrunnenbau verfügt, u. a. durch den Bau von Polderbrunnen für den Hochwasserschutz. Die Bohrung wurde im Trockenbohrverfahren mittels Seilbagger und Greiferbohrtechnik im Bohrdurchmesser 2.000 mm vollverbohrt bis zu einer Endteufe von 17,50 m niedergebracht. Bei ähnlichen Baugrundbedingungen können auch Bohrtiefen bis zu 30 m erreicht werden.

Bedingt durch die beengte Lage des Brunnenstandortes auf einer Waldlichtung und durch den für den Trinkwasserbrunnenbau ungewöhnlich großen Bohrdurchmesser von 2.000 mm bedurfte es eines hohen Maßes an Logistik und Koordination auf der Baustelle. Aufgrund der Erfahrung der Hölscher Wasserbau konnte trotz der Bewegung großer Bohrröhre, großer Ausbaumaterialien und großer Bohrgutmengen ein sicherer und zügiger Baustellenablauf eingehalten werden.

Besonderen Aufwand erforderte die Herstellung der fragmentierten inneren Glaskugelschüttung. Hierzu wurden Edel-

Tabelle 1 – Erforderliche Förderraten über eine DKSK zur Ausspülung der größten Partikel mit $v_s = 0,0134$ m/s und Durchmesser der inneren Schüttung $D = 1.620$ mm für unterschiedliche Fragmenthöhen des Kornfilters und verschiedene Seiherlängen

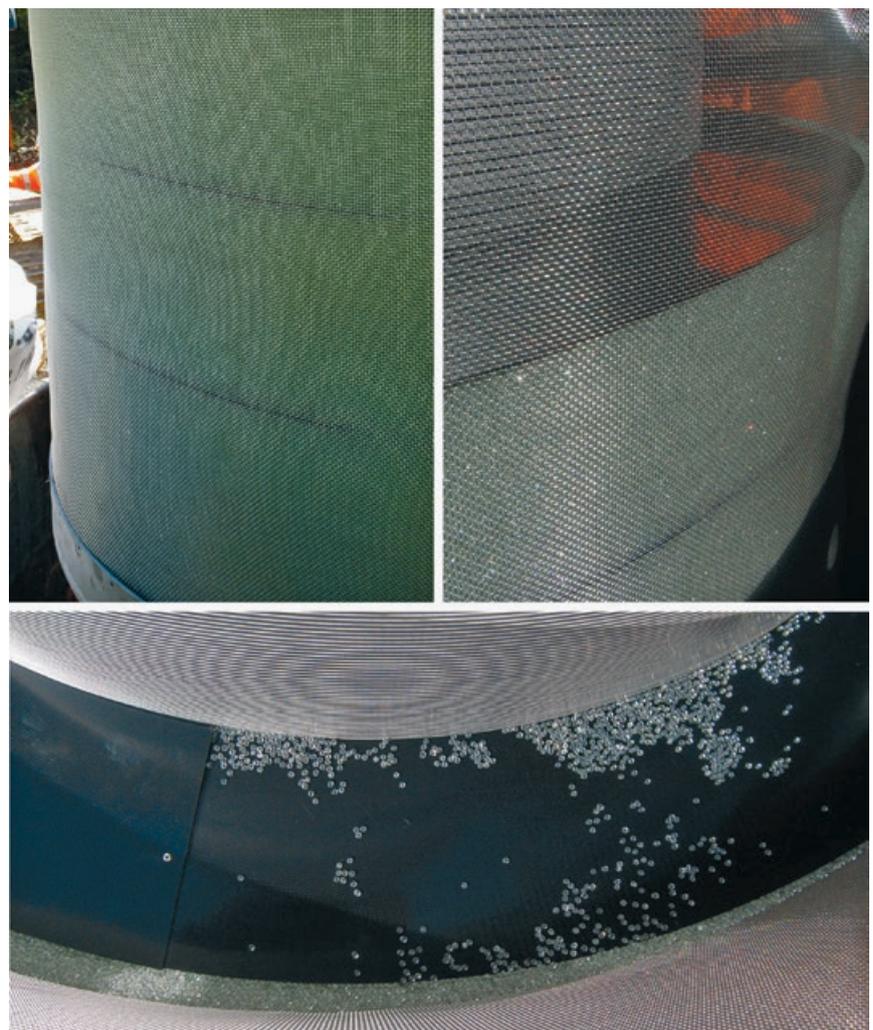
L_{Seiher} [m]	0,20	0,25	0,30	0,40	0,50
h_{Fragment} [m]					
0,15	74	74	74	110	147
0,20	98	98	147	147	196
0,25	123	123	184	184	184
0,30	147	147	147	221	221

BRUNNI PLAN

stahldrahtkörbe mit einem Durchmesser von 1.620 mm um die Filterrohre montiert und mit Glaskugeln befüllt. Im Abstand von ca. 25 cm wurden die Ringscheiben, die zur Fragmentierung der inneren Schüttung dienen, eingelegt. Sie sorgten gleichzeitig für die Zentrierung der Drahtgewebekörbe. Die Herstellung der Ringscheiben erfolgte aus überlappenden Segmenten aus 3 mm starkem, trinkwasserzugelassenem PE-Kunststoff. Die Segmente wurden an der Überlappung zweier Segmente, mit Ausnahme der letzten Ringöffnung, mit Edelstahlnieten verbunden (Abb. 6).

Befand sich die geplante Einbaulage einer Ringscheibe kurz oberhalb einer Flanschverbindung des Filterrohres, musste der Abstand unter Berücksichtigung eines Setzungsmaßes vergrößert werden, um zu verhindern, dass die Ringscheibe bei Setzungen auf dem Flanschring aufliegt. Die so hergestellte innere Schüttung (Abb. 7) wurde abschnittsweise manuell konsolidiert, bevor der nächste Schüttkorb gefüllt wurde.

Der äußere Ringraum im Filterbereich wurde, angepasst an die jeweilige Sedimentschicht, mit Glaskugeln in drei unterschiedlichen Körnungen verfüllt. Beim



GCI GmbH / BRUNNI PLAN

Abb. 7 – Mittels Ringscheiben fraktionierte innere Glaskugelfilterschüttung



GD GmbH

Abb. 8 – Intensiventnahmekammer DN 1.200 vom TYP DKSK



Andreas Kammegeßer / HAZ

Abb. 9 – Kontrolle des Brunnenabschlusses mit Brunnenkopf DN 1.400 und geteiltem Deckel durch Torsten Holzhausen (Prokurist/Technischer Leiter, links) und Heiko Bartling (Leiter technische Anlagen) der Stadtwerke Barsinghausen.

Erreichen von Schüttgrenzen war es aufgrund des Bohrdurchmessers unerlässlich, die Schütthöhe an mehreren Stellen zu kontrollieren und gegebenenfalls gezielt nachzuschütten.

Abschließend wurden die innere und äußere Schüttung mittels des hydraulischen Impulsverfahrens hypop konso-

liert. Dadurch wurde die Schüttung in eine dichtere Lagerung überführt und somit Restsetzungen der Filterschüttung bei der Brunnenentwicklung und im späteren Brunnenbetrieb weitgehend reduziert. Die reinen Bohrarbeiten inklusive Brunnenausbau und Ringraumverfüllung waren innerhalb von zwölf Arbeits-

tagen abgeschlossen. Die Entwicklung des Brunnens mit einem Filterdurchmesser DN 1.200 und einem Bohrdurchmesser von 2.000 mm sowie einem entsprechend großen Ringraum stellt nicht nur hydraulisch, sondern auch technisch eine besondere Herausforderung dar.

Zur geplanten abschnittweisen Intensiventnahme wurde von Hölscher Wasserbau eine symmetrische Doppelkolbenspaltkammer (DKSK) eingesetzt. Die Kammergeometrie der hier verwendeten DKSK wurde speziell für die Entwicklung von Großbrunnen mit Filterdurchmesser DN 1.200 konzipiert und bereits mehrfach eingesetzt. In dieser DKSK sind Förderpumpe und je nach Bedarf ein zusätzlicher Impulsgeber vom Typ hypop integriert, sodass auch Brunnenfilter in flachen Grundwasserleitern und speziell an der Filteroberkante mit geringer Grundwasserüberdeckung bestmöglich behandelt werden können.

Die hier eingesetzte DKSK besteht aus zwei 1 m langen Kolben und einem dazwischenliegenden ca. 25 bis 50 cm langen, einstellbaren Entnahmesieher (Abb. 8), sodass bei Anwendung der größten Seilherlänge im Idealfall nur zwei und ansonsten maximal drei Filterfragmente der inneren Schüttung radial durchströmt werden.

Aufgrund des großen Durchmessers und der Kolbenlängen erfährt die Kammer beim Ein- und Ausbau sowie beim Versetzen im Brunnen eine sehr große Reibung zwischen Brunnenwandung und Kolbenoberfläche. Daher war bei der Konstruktion der DKSK eine ausgewogene Balance zwischen einem möglichst hohen Kammergewicht zum Einsinken und einem für das Versetzen möglichst geringen Gesamtgewicht der Entsandungseinrichtung zu finden.

Die DKSK wurde beginnend an der Filterunterkante in 13 nicht überlappenden, jeweils 0,5 m langen Arbeitsabschnitten statisch eingesetzt. Zur zusätzlichen Porenraumstimulation wurde der Förderstrom regelmäßig unterbrochen und zur Strömungsumkehr ein Rücklaufen des in der Steigleitung befindlichen Wassers ermöglicht. Auf einen bekanntermaßen noch effektiveren kontinuierlich aufwärts und abwärts bewegten Einsatz der DKSK, um den Sedimentaustrag durch Änderungen der Strömungsrichtung zusätzlich zu stimulieren, musste hier aufgrund der Wandreibungskräfte verzichtet werden, um das Material der Kolbendichtungen nicht zu zerstören. Eine Beschädigung hätte entweder mehrfach wiederholte Wechsel der Kolbendichtungen nach sich gezogen oder unrepariert zu unzulässig

hoher Umströmung der Kolben innerhalb des Filterrohres und somit einer ineffektiven Filterentwicklung geführt.

Der Feststoffgehalt wurde bei der Brunnenentwicklung im Dauerdurchflussverfahren gemessen, wodurch eine ständige optische und haptische Kontrolle möglich ist. Die Messergebnisse des Feststoffaustrages sowie der Förderraten und Wasserstände werden in einem von Hölscher Wasserbau konfektionierten Messcontainer digital erfasst und für eine effektive Prozesssteuerung in Echtzeit grafisch ausgewertet.

Die Brunnenentwicklung am neuen Brunnen 4/20 wurde innerhalb von fünf Arbeitstagen und einer Netto-Pumpdauer von knapp drei Arbeitstagen durchgeführt. Obwohl hydraulisch nicht erforderlich, aber technisch möglich und durch die Bemessung nach den Kriterien für gegen Simenteintrag stabile Kornfilter unkritisch, wurden die Arbeitsabschnitte überwiegend mit Kammerförderraten von ca. 200 m³/h begonnen. Nach dem deutlichen Abflachen der Austragskurve wurde die Kammerförderrate sukzessive zuerst auf 150 m³/h und abschließend auf 130 m³/h reduziert. Lediglich in den beiden oberen Arbeitsabschnitten musste die Förderrate weiter gedrosselt werden, da es infolge zu geringer Wasserüberdeckung zum Abreißen der Strömung kam. Der großkalibrige Brunnen konnte auf diese Weise in allen Arbeitsabschnitten so entwickelt werden, dass bei einer Kammerförderrate, die etwa der Nennleistung des Brunnens entspricht, das Sandfreiheitskriterium für hohe Brunnenqualität beim Schocken nach DVGW-Merkblatt W 119 sehr sicher eingehalten wurde.

Zur Erfolgskontrolle wurden vor der Filterentwicklung ein mehrstufiger Klarpumpversuch, ein einstufiger Zwischenpumptest und abschließend der mehrstufige, 24-stündige Abnahmepumpversuch durchgeführt.

Resümee

Der mit 2.000 mm bis 17 m Tiefe gebohrte, in DN 1.200 ausgebaute und mit einer innovativen doppelten, innen fragmentierten Glaskugelschüttung hergestellte Trinkwasserbrunnen konnte in rund drei Wochen bautechnisch hergestellt, entwickelt und getestet werden (Abb. 9). Dabei entfielen jeweils rund eine Woche auf die Baustelleneinrichtung mit Abteufen der Bohrung an einem Tag, auf den Ausbau mit Ringraumverfüllung sowie auf die Filterentwicklung mit Pumpversuchen. Dies entspricht trotz der außergewöhnlichen Dimensionen des Bauwerks einer Bauzeit, wie sie sonst bei Herstellung konventioneller Trinkwasserbrunnen mit Ausbaudurchmesser DN 300 bis DN 500 üblich ist.

Die spezifische Ergiebigkeit des großkalibrigen Brunnens konnte durch die Filterentwicklung signifikant gesteigert werden, im mittleren Leistungsbereich von ca. 80 bis 120 m³/h um rund 20 %. Die Leistungssteigerung macht sich bei geringen

Förderraten (≤ 60 m³/h) noch kaum, mit zunehmender hydraulischer Belastung jedoch stärker bemerkbar. Da aus der Glaskugelschüttung kein Unterkorn zu entfernen war und die Strömungsverhältnisse innerhalb des Kornfilters kaum verändert wurden, ist die Leistungsverbesserung hauptsächlich auf eine bessere hydraulische Anbindung des Kornfilters in der Bohraureole an den Grundwasserleiter zurückzuführen. Dies zeigt anschaulich, dass auch großkalibrige Brunnen mit doppelter Schüttung und großer Ringraumdicke bei Fragmentierung der inneren Filterschüttung hydraulisch effektiv entwickelt und regeneriert werden können.

Die von den Stadtwerken Barsinghausen gewünschten Leistungsparameter des Brunnens wurden durch einen 24-stündigen Brunnentest, davon zwölf Stunden mit der Bemessungsförderrate von 140 m³/h, unter Einhaltung der hohen Sandfreiheitskriterien nach DVGW-Merkblatt W 119 nachgewiesen.

Literatur

- [1] Nillert, P.: Brunnen mit stabilen Kornfiltern im Lockergestein. *gwf Wasser | Abwasser* 153 (12), S. 1318–1326 (2012).
- [2] Nillert, P.: Bemessung der Kammerförderrate bei der Intensiventsandung von Brunnenfiltern. *bbr* (2008) Nr. 10, S. 52–61.
- [3] Gudehus, G.: *Erddruckermittlung, Grundbau-Taschenbuch*, 5. Auflage, Teil 1, Abschn. 1.10; Berlin Ernst & Sohn 1996.

Autoren

Dr. Peter Nillert
 BRUNI PLAN Dr. Peter Nillert
 An der Dahme 18
 15754 Heidesee
 mail@bruniplan.com

Michael Wegele
 GCI GmbH
 Bahnhofstr. 19
 15711 Königs Wusterhausen
 michael.wegele@gci-kw.de
 www.gci-kw.de

Hartmut Strub
 GWE pumpenboese GmbH
 Moorbeerenweg 1
 31228 Peine
 hartmut.strub@gwe-gruppe.de
 www.gwe-gruppe.de

Tobias Quante
 Hölscher Wasserbau GmbH
 Hinterm Busch 23
 49733 Haren
 brunnenbau@hoelscher-wasserbau.de
 www.hoelscher-wasserbau.de



**Wir
 bewegen
 WASSer!**

**Präzision in jeder
 Dimension –
 GWE Edelstahl-
 Wickeldrahtfilter
 DN 1200!**

www.gwe-gruppe.de

