Dr. rer. nat. Frank Ingolf ENGELMANN; Lutz-Peter SCHMOLKE

Grundwasserstrombehandlung am Müggelsee

Mit dem BIOXWAND-Verfahren wird in Berlin derzeit eine Kontaminationsfahne im Abstrom ehemaliger Rieselfelder In-situ gereinigt.

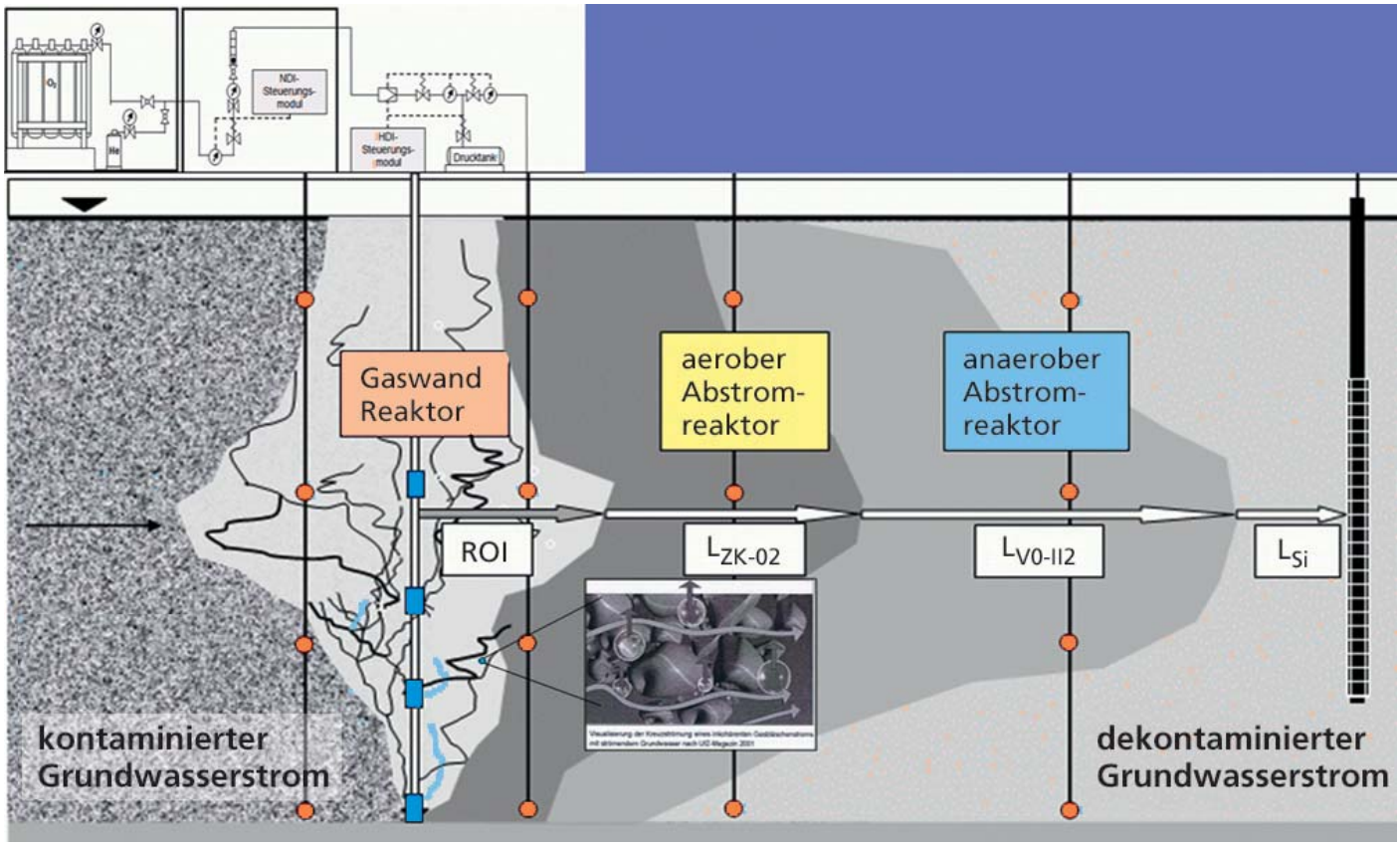

Bild 1 **BIOXWAND-Verfahren (Patent der Berliner Wasserbetriebe: EP 1550519)**

Teilbereiche eines genutzten ungespannten Grundwasserleiters nördlich des Berliner Müggelsees, gelegen im Abstrom ehemaliger Rieselfelder, sind seit Jahrzehnten mit Ammonium, erhöhten Eisen-, Natrium-, Kalium-, Sulfatgehalten und organischen Spurenstoffen belastet. Die kontaminierten Grundwasserleiterbereiche haben ein Porenvolumen von etwa 200 Mio. m³ Grundwasser und tragen eine Kontaminationslast von derzeit etwa 9.000 t Ammonium (davon 20 bis 25 % im Porenwasser gelöst). Eine Gefahr geht von der Kontaminationslast primär auf die Trinkwasserversorgung aber auch auf den Müggelsee aus /1/.

BIOXWAND-Verfahren

Zur In-situ-Reinigung der Kontaminationsfahne im Abstrom der ehemaligen Rieselfelder wird seit Anfang 2013, ca. 500 m vor den Förderbrunnen des Wasserwerkes Friedrichshagen, eine permeable Reinigungswand durch die Injektion von Sauerstoffgas formiert. Das Verfahren zeichnet sich dadurch aus, dass mit der Technologie des Gasspargings O_2-Direktgasinjektionen über Lanzen in den Grundwasserleiter erfolgen. Hierbei werden reaktive Gasbläschen als Wirkstoffdepots in der Porenmatrix des Aquifers angelegt. Bei der Passage des kontaminierten Grundwassers durch den Gasspeicher wird durch im Untergrund vorhandene Nitrifikanten Ammonium in Nitrat überfü hrt. Der Gasspeicher stellt ein langgestrecktes (800 m Länge) 2D-vertikalebenes Element (Tiefe 36 m) mit einer Dicke von ca. 25 m quer zur Strömungsrichtung dar (Bild 1).

Bei hinreichender Einlösung des in der Porenmatrix gespeicherten Sauerstoffs ins Grundwasser findet neben biotischen Stoffumwandlungs- und Abbauprozessen (z. B. p-TSA-Verringerung) auch eine Fällung gelöster Fe(II)-Ionen (als Fe-Hydroxide/-Oxihydrate) – vorwiegend in hydraulisch immobilen Porenbereichen – statt. Es werden auch Sulfatbildungs-, Kationenaustausch- und Aufhärtungsprozesse im Grundwasser, sowie zeitlich begrenzt leichte pH-Wert-Reduzierungen ausgelöst /2/.

Nicht verbrauchter Sauerstoff im Gasspeicher gelangt mit dem Grundwasser in den Abstrom und bildet einen zusätzlichen, aeroben Festbettdurchflussreaktor, der sich permanent vergrößert und in dem ein weiterer erheblicher Stickstoffabbau (zunächst autotrophe, später heterotrophe Denitrifikationsprozesse) stattfindet. Die Länge des reaktiven Abstroms (1. Nachbehandlungsstufe) wird verfahrenstechnisch gesteuert. Der Wasserdurchsatz durch die Reaktoren definiert sich durch den natürlichen bzw. technisch manipulierbaren GW-Volumenstrom im Grundwasserleiter.

BIOXWAND-Technik

Vor Errichtung der In-situ-Reaktoren wurde ein gashydrogeologisches Strukturmodell aufgebaut. Es besteht aus einem hydrogeo-

Bild 2 **Grundwasserstrombehandlung am Berliner Müggelsee**

logischen Strukturmodell mit Verbreitung und Parametrisierung des Grundwasserleiters (horizontale und vertikale Durchlässigkeitsbeiwerte, Anisotropiefaktoren, Porositäten, Druckpotenziale, Stoffinventar gelöst und in der Feststoffmatrix) sowie Komponenten, die für die Gasspeicherung von Bedeutung sind (Gasaufstiegs-Horizonte, -Hemmer oder -Barrieren).

Der Eintrag von Sauerstoffgas in die 800 m lange Gaswand erfolgt mit Hilfe von Lanzenbündeln (Typ VIL = Vibrationssondier-Injektionslanzen /3/). Sie sind entlang der Gaswand in Reihe mit Abständen von 15 m angeordnet. 6 bis 7 Lanzenbündel bilden jeweils ein Gaswandsegment (8 Stück). Die Lanzenbündel bestehen aus 2 bis 3 Einzelfiltern, die in unterschiedlichen gashydrogeologischen Strukturen (Teufen 13–14 m, 18–19 m, 29–30 m, 35–36 m u. G.) angeordnet sind.

Je Segment sind alle Gaslanzen teufenorientiert mit Gasleitungen (max. 3 Stück je Gaswandsegment) verbunden. Sie führen zu zwei Kompaktbegasungsanlagen (KBA) auf der Gaswandtrasse (KBA1 – Segment 1, KBA2 – Segment 5). In den KBA sind die Gasleitungen (24 Stück) an Gasdosier- und Gasmischvorrichtungen angeschlossen. Hier erfolgt über Volumenstromregler (0-2 Nm³ Sauerstoff pro Stunde, 0–2 Nm³ Luft pro Stunde) und Druckminderer sowie eine Zeitschaltung für Magnetventile auf den Lanzenköpfen die Steuerung der In-situ-Grundwasserbehandlung.

Die Gasspeicherformierung wird sowohl über den Einsatz von Reinsauerstoffgas, als auch über Mischgas vorgenommen. Als Trägergas zur Erzeugung großer Reichweiten wird Luft eingesetzt. Die Vorhaltung des Sauerstoffs erfolgt, ausgehend von einem Gasversorgungsfeld, über einen Flüssiggastank (20 t) mit angeschlossenem Verdampfer. Komprimierte Luft wird über leistungsstarke, ölfrei arbeitende Kompressoren mit nachgeschalteter Lufttrocknung bereitgestellt (Bild 3).

Die Einträge an den Begasungspunkten erfolgen in erster Linie über Niedrig-Druck-Injektionen mit wenigen 100 mbar über dem hydrostatischen Druck, wobei die Injektionsraten bei 2–4 Nm³/h liegen. Sie werden in der Regel intervallweise auf den Gaswandsegmenten eingesetzt. Kontinuierliche Injektionen kommen nur zum Einsatz, wenn teilweise Verblockungen des Porenraums zur Reduzierung des Grundwasserflusses benötigt werden. Nach der Einfahrphase des Gasspeichers (2013 und 2014) wird eine sukzessive Anpassung der Injektionsraten an den variierenden Gasbedarf vorgenommen, wobei sich kurze Injektionsetappen mit längeren Ruhephasen abwechseln werden.

Die In-situ-Reaktoren (Gaswand, Abstrom) werden mit GW-Aufschlüssen überwacht, die mit Hilfe der Sonic-Bohrtechnologie kiesfilterfrei im Untergrund installiert wurden. Einerseits werden aus kleinkalibrigen Gaslanzen (Di = 9 mm) Proben entnommen, andererseits werden für raumintegrierende Probenahmen 2“-Messstellen genutzt. Die Aufschlüsse dienen auch dem Einsatz eines In-Situ-Sensornetzes zur kontinuierlichen Gewinnung physikochemischer Parameter (H, Eh, Lf, O_2, pH, T). Zur Bestimmung der gespeicherten Gasmengen werden 36 m tiefe TDR-Messrohre in Kombination mit einer Tiefensonde genutzt /4/. Mit Hilfe von Gasspeicherpumpversuchen und Auffülltests werden Änderungen der hydraulischen Durchlässigkeit in der Gaswand detektiert.

BIOXWAND-Ergebnisse

Für Gaseinträge in die Porenmatrix des Grundwasserleiters mit Injektionsraten von 1–2 Nm³/h wird an den Lanzen der hydrostatische Druck am Filteraustrittspunkt mit einem Überdruck von 100–300 mbar überwunden.

Die Gasausbreitung im Untergrund erfolgt auf der Kapillarnetzskala abhängig vom Gaseintragsdruck im Filter, den Kapillar-, Gravitations-, Reibungs-, Gasauftriebskräften sowie mit zunehmender Entfernung vom Filter und der Zunahme der Heterogenität

Bild 3 **BIOXWAND-Technik Trägergaserzeugung**

des Untergrundes vom gashydrogeologischen Aufbau. Die Ausbreitung ist nicht abhängig von der Grundwasserdynamik. Auch im GW-Anstrom wird Gas in die Porenmatrix eingespeichert. Eine gezielte Kanalisierung/Prognose der Gasrichtungen ist nicht möglich. Überwiegend werden räumlich unregelmäßige Gasspeicher formiert, die ausgehend vom Injektionspunkt von einer trichterförmigen Ausbildung abweichen. Mittlere Gasreichweiten in weitgehend homogenen Sedimenten liegen bei etwa der Hälfte bis einem Drittel der wassererfüllten Mächtigkeit über dem Gasfilter. Das injizierte Gas bewegt sich entweder als zusammenhängende oder nicht zusammenhängende Phase im Porennetz des Grundwasserleiters.

Ein zusammenhängender Gastransport findet sowohl in feinkörnigen als auch in grobkörnigen Sedimenten statt. In Grobsanden und Kiesen werden, wegen des höheren Anteils an Grobporen, häufig einzelne weniger stark verzweigte Gaskanäle beobachtet. In feinkörnigen Sedimenten bildet sich hingegen ein räumlich engmaschiges Porennetzwerk aus.

Die Gas-Ausbreitungsgeschwindigkeit des injizierten Gases im Porennetzwerk der Feststoffmatrix des Grundwasserleiters ist in erster Linie von der Gaseintragsrate abhängig. In Fein- bis Mittelsanden wurden bei Eintragsraten von 1–2 Nm³/h Ausbreitungsgeschwindigkeiten von 5 bis 10 m/h erzielt. Damit das injizierte Gas, bei im Profil fehlenden Gasbarrieren, nicht aus der Saturationszone in die Aerationszone übertritt, wird der Eintrag zeitlich begrenzt und die Gaseintragsrate bei Bedarf reduziert (häufiges Bewirtschaftungsregime: 1 h Injektionsphase, 5 h Ruhephase).

Auf die Gasverteilung und Speicherung haben Gasaufstiegsbarrieren oder gasaufstiegshemmende Strukturen einen großen Einfluss. Sie werden hervorgerufen durch hohe Anisotropien der hydraulischen Leitfähigkeit, in Form räumlich aushaltender häufiger Schichtwechsel aus feinkörnigen und grobkörnigen Sedimenten, aber auch durch geologische Ablagerungsprozesse entstandene, vertikal variierende Lagerungsdichteänderungen innerhalb lithologisch weitgehend homogener Sande.

Unter gasaufstiegshemmenden Strukturen kommt es zur horizontalen Ablenkung des Gastransports und somit zur Erhöhung der lateralen Reichweite bzw. zur verstärkten Gaseinspeicherung in die vergleichsweise besser durchlässige Porenmatrix. In der Gaswand wurden in einzelnen Segmenten, insbesondere in Teufen größer 30 m u. G. laterale Reichweiten gemessen, die vergleichbar sind mit der Einbautiefe des Eintragsfilters bzw. diese sogar um einen Faktor von 1,5 überschritten. Insbesondere Grobsande/Kiese erhöhen die laterale Reichweite, da sie bevorzugt Gas in Form größerer Gaslinsen speichern. Wenn sie unter Druck stehen, neigen sie zur Selbstausgasung. Vertikal besser durchlässige GW-Leiterbereiche oder Auflockerungsstrukturen im Umfeld von GW-Messstellen bewirken hingegen einen präferentiellen Vertikalgasaufstieg und haben Ausgasungsverluste sowie Verringerungen der lateralen Reichweite zur Folge.

Die Gassättigungen sind sehr heterogen und schwanken in großen Spannen von 2 bis 20 %. Am häufigsten werden Werte von 3 bis 7 % gemessen. Neben Bereichen hoher Sättigung, treten oft auch deutlich geringer gesättigte Areale auf. Mit zunehmender Entfernung von den Gaslanzen nimmt die mittlere Gassättigung in der Regel ab. Die Lanzen wurden deshalb so angeordnet, dass sich ihre Gas-Reichweiten – sowohl in horizontaler als auch in vertikaler Richtung – leicht überlappen.

Die Minimierung der Grenzflächenenergien im Mehrphasensystem GW-Leiter bewirkt, dass Gase als nichtbenetzende Fluide stets die Raumanteile mit den größten freien Porenradien okkupieren. Hierdurch verringert sich die hydraulische Leitfähigkeit, die nun unter homogenen Bedingungen analog der Aerationszone als relative Permeabilität angesehen werden kann. Verbunden mit einer Absenkung der Permeabilität tritt eine Verringerung der Fließgeschwindigkeit des Grundwassers auf, was eine Verlängerung der Aufenthaltszeit im Gaswandreaktor bedeutet. Durch kleinere relative Permeabilitäten werden im Bereich der Gaswand bei aktiver Begasung leichte GW-Spiegelanstiege (1 bis 2 cm) beobachtet. Durch Änderungen der GW-Druckhöhen im Speicher kommt es durch hydraulisch selbstregulierende Prozesse zu lokalen Fließrichtungsänderungen. Die Verteilung der ins Grundwasser eingelösten Gase verbessert sich. Durch eine gezielte Steuerung der eingespeicherten Gasmenge wird einer Umströmung der Gaswand entgegengewirkt.

Die Gaseinlösung erfolgt entsprechend seiner Lösungskinetik bei hinreichendem Kontakt des eingespeicherten Gases in das durch die Gaswand strömende Grundwasser. Hierbei wird das Grundwasser an der Kontaktfläche zum Gas entsprechend den vorliegenden Gaspartialdruckverhältnissen aufgesättigt. Zu hohe gelöste Wirkstoffkonzentrationen (z. B. Sauerstoff) können dabei auch toxisch für mikrobielle Stoffwechsel-

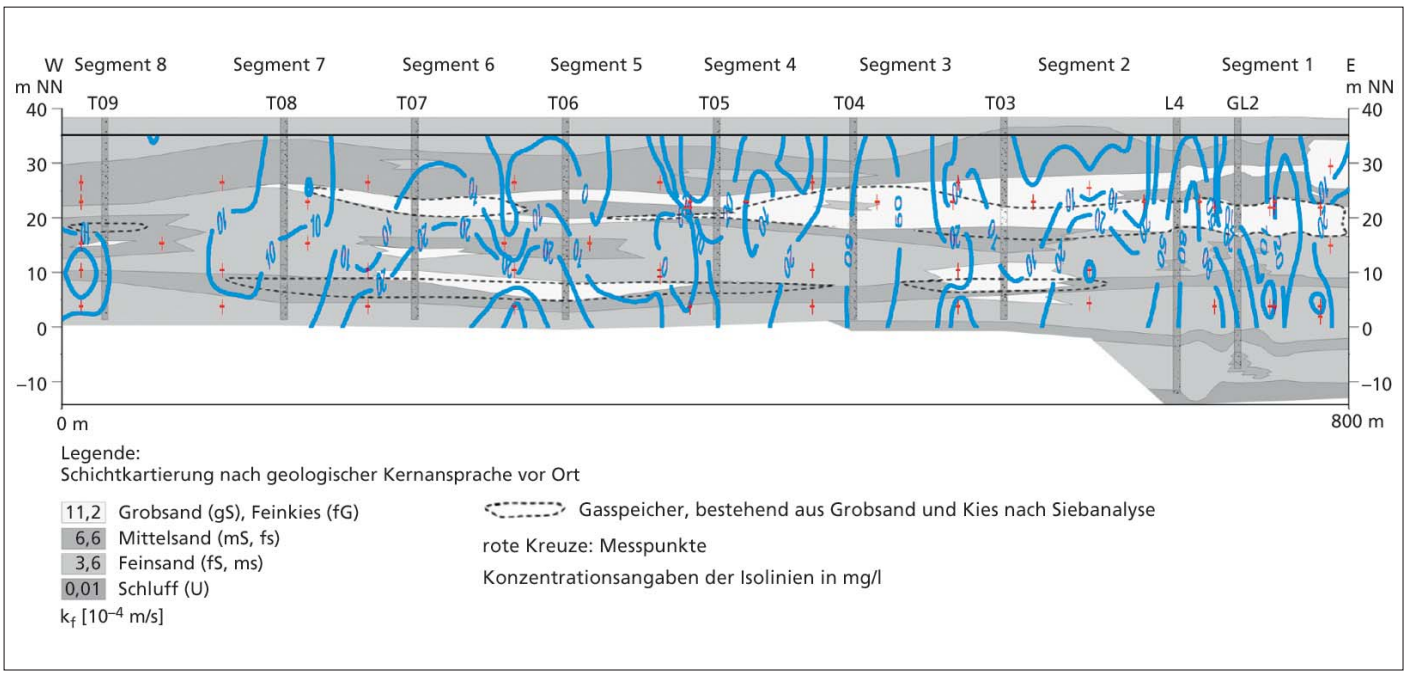

Bild 4 **Sauerstoff im Grundwasser der Gaswand (mg/l)**

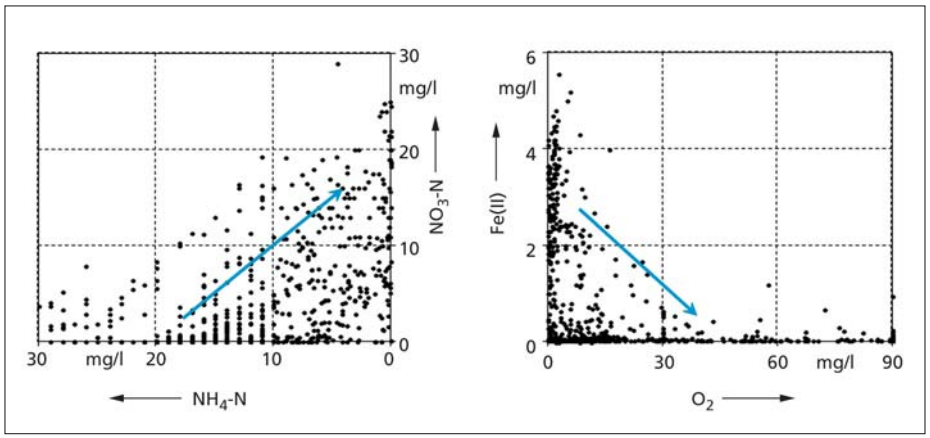

Bild 5 **Gaswandprozesse Nitrifikation und Enteisenung**

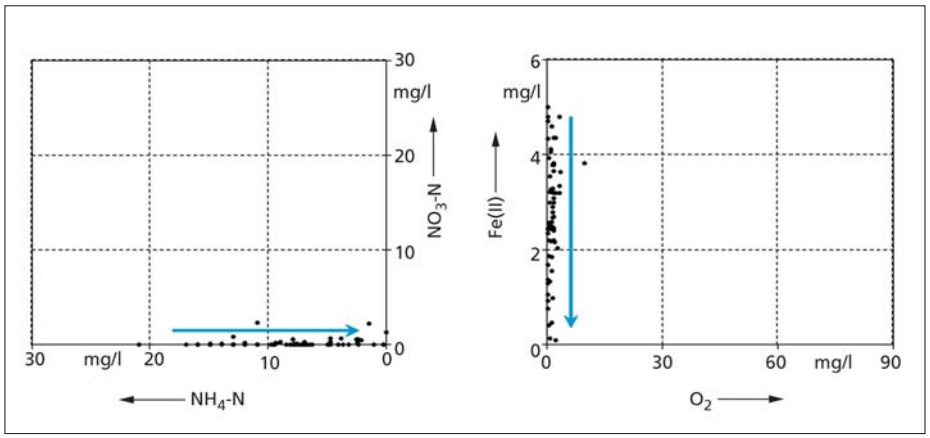

Bild 6 **Abstromprozesse Denitrifikation und Eisenreduzierung**

aktivitäten sein. Hemmende Faktoren bei der Gaseinlösung sind Gaskissenbildungen, da sich in ihnen die Kontaktfläche stark verringert und auch der mobile Wasseranteil in den Poren soweit zurückgehen kann, dass GW-Strömungsprozesse zum Erliegen kommen. Laborversuche der TU Dresden zeigen für Reinsauerstoffgasinjektionen in nicht sauerstoffzehrende Mittelsande – ausgehend von Gassättigungen von 1 bis 4 % – Einlösungszeiten, die bei einem 1,5- bis 4-fachen Austausch des Porenvolumens des Gaswandreaktors liegen. Bei Einsatz von Luft erhöhten sich die Einlösungszeiten aufgrund des Stickstoffgasanteils für Gassättigungen von 2 bis 4 % auf einen 6- bis mehr als 10-fachen Austausch des Porenvolumens /5/. Infolge der längeren Gaseinlösung bietet das die Möglichkeit Luftspeicher temporär wiederholt mit Sauerstoff zu dotieren. In den bereits seit 5 Jahren betriebenen Segmenten 1 und 2 (jeweils 100 m Länge) wurden unter dem Einfluss von O_2-Zehrprozessen in der Feststoffmatrix bei mittleren Gassättigungen von ca. 6 % Einlösungszeiten ermittelt, die bei einem 1,5 bis 3 fachen Austausch des Porenvolumens der Gaswand lagen.

Nach nun ca. 9 monatigem Betrieb aller 8 Gaswandsegmente zeigt sich im Profil der Gaswand bereits eine flächenhafte gute Sauerstoffversorgung von überwiegend 10 bis 30 mg/l (Bild 4, S.45).

Für die Nitrifikationsprozesse in der Gaswand werden täglich Sauerstoffmengen von ca. 150 – 170 kg injiziert. Unter Berücksichtigung einer Lag-Phase der Nitrifikanten (50–60 Tage) lassen sich nach 9 Monaten Betrieb bereits in allen Gaswandsegmenten Nitrifikationsprozesse beobachten. Nach dem zu Beginn der Sauerstoffinjektionen im anaeroben Grundwasser kein Nitrat gefunden wurde, treten jetzt unterschiedliche Gehalte von Nitrat neben zum Teil auch noch hohen Ammoniumwerten auf (Bild 5).

Am höchsten sind die Nitratbildungen – bei gleichzeitig kaum noch existenten Ammoniumbelastungen – in den Segmenten 1 und 2, die bereits im Rahmen eines vorlaufenden mehrjährigen Pilotversuchs betrieben wurden. In beiden Segmenten ist die Feststoffmatrix bereits voroxidiert (Oxidation von Sulfiden). Somit steht dem Sauerstoff kein bedeutsamer Verbrauchskonkurrent mehr gegenüber. Durch den Sauerstoffeintrag in die Gaswand und die Umwandlung des anaeroben in ein aerobes Milieu kommt es auch zur unterirdischen Enteisenung, die im Segment 1 und 2 bereits vollständig ist. Bei hohen Sauerstoffwerten wandelt sich in der Gaswand Fe(II) in Fe(III) um und fällt aus (Bild 5).

Vollständig ablaufende Denitrifikationsprozesse liegen im Abstrom der Segmente 1 und 2 auf einer Abstromlänge von 50–75 m hinter der Gaswand vor. Obwohl in der Gaswand viel Nitrat gebildet wird, kommt es in den Abstrommessstellen nicht an (Bild 6). Bedingt durch die Ammonium- und Eisenverringerung in der Gaswand verringern sich auch die Abstrom-Konzentrationen und die Qualität des den Brunnen zuströmenden Grundwassers verbessert sich.

Die In-situ-Grundwasserbehandlung wird voraussichtlich noch in den nächsten Jahrzehnten stattfinden, wobei die Behandlungskosten durch weiterführende Optimierungsmaßnahmen zur Steuerung (Bild 1, S. 43) von derzeit etwa 0,16 €/m³ Grundwasser (Gesamtmenge 7.500 m³/d) noch weiter gesenkt werden können.

LITERATUR

/1/ Voigt, H.J.; Luckner, L.; Werner, P.; Engelmann, F.; Rößner, U.; Zarske, Ch. (1995): Konzeption zur Sanierung der Grundwasserressourcen im Gebiet zwischen dem Wasserwerk Friedrichshagen und der Kläranlage Münchehofe im Rahmen einer naturräumlichen Gesamtgebietsgestaltung. Berliner Wasserbetriebe, unveröffentlicht

/2/ Horner, Ch.; Engelmann, F.I.; Nützmann, G. (2009): Model based verification and prognosis of acidification and sulphate releasing processes downstream of a former sewage field in Berlin (Germany). Journal of Contaminant Hydrology

/3/ Engelmann, F.I.; Hopp, P.; Schmolke, L.P.; Ehbrecht, H. (2009): Vibrationseingerüttelte Gaslanzen und In-Situ-Meßnetze. Gasspeicherformierung und Monitoring zur Grundwassersanierung. TerraTech 11–12

/4/ Engelmann, F.I.; Hopp, P.; Schmolke, L.P.; Ehbrecht, H. (2011): Bewirtschaftung von Gasspeichern. Kontrollierte Steuerung basierend auf Messungen zur Gassättigung. TerraTech 11

/5/ Burghardt, D.; Krause, T.; Mann, S.; Liedl, R.; Engelmann, F.I. (2012): Einfluss des Sauerstoff-Gassättigungsgrades auf Durchlässigkeitsbeiwerte eines Porengrundwasserleiters zur Abschätzung der hydraulischen Wirksamkeit des Sanierungsverfahrens BIOXWAND. TU Dresden unveröffentlicht

KONTAKT

Sensatec GmbH
Dr. rer. nat. Frank Ingolf Engelmann
Prokurist, Büroleiter Brandenburg
16833 Fehrbellin
Ebereschenstraße 29
Tel.: 033932/60912
E-Mail: f.engelmann@sensatec.de
www.sensatec.de