Direktgasinjektionen zur In-Situ-Reinigung kontaminierter GW-Ströme: Verfahren / Techniken / Kosten / Genehmigung / Monitoring

Dr. rer. nat. Frank Ingolf Engelmann, Sensatec GmbH Büro Brandenburg

- 1. Verfahrensmerkmale von Direktgasinjektionen
- 2. Techniken zur Formierung von Gasspeichern
- 3. Kosten
- 4. Erfahrungen zur Genehmigung
- 5. Monitoring permeabler In-Situ-Durchflußreaktoren

1. Verfahrensmerkmale von Direktgasinjektionen (DGI)

1.1 In-Situ Reinigung kontaminierter GW-Ströme

In GW-Leitern können zur mikrobiellen In-Situ-Reinigung von Kontaminationsfahnen im Abstrom von Schadstoffquellen permeable Reinigungswände durch die Injektion reaktiver Gasgemische formiert werden. Das Verfahren zeichnet sich dadurch aus, dass mit der Technologie des Gasspargings O₂-Direktgasinjektionen über Lanzen in den Grundwasserleiter erfolgen. Hierbei werden reaktive Gasbläschen als Wirkstoffdepots in der Porenmatrix des Aquifers angelegt und so Gasspeicher mit einer etwas geringeren Durchlässigkeit aufgebaut. Die unterirdische Wasserreinigung vollzieht sich vorrangig bei der Passage des kontaminierten Grundwassers durch die Gaswand. Diese stellt in der Regel ein langgestrecktes (2D-vertikalebenes) Element mit einer definierten Dicke quer zur Strömungsrichtung dar.

Direktinjektionen sauerstoffhaltigen Gases in schadstoffbelastetes Grundwasser werden in Kombination mit der Infiltration von Mikroorganismen in einer hochkonzentrierten Lösung durch die Fa. Shell, sowohl für Schadstoff-Quellen als auch –Fahnen, angewendet (Patent EP 1 169 271 B1, DE 600 09 274 T2). Für Schadstoffquellen im Grundwasser werden Direktgasinjektionen in die Saturationszone (in Kombination mit Airsparging) auch beim Methan-Bio-Stimulationsverfahren der Fa. Biopract eingesetzt (Patent DE 102 25 100). Beide Verfahren sind nicht vorrangig auf die Formierung und Bewirtschaftung einer permeablen Gaswand ausgerichtet.

Bei hinreichender Einlösung des in der Porenmatrix gespeicherten, reaktiven Gases ins Grundwasser (überwiegend wird Sauerstoff verwendet) werden abiotische und biotische Stoffumwandlungs- und Abbauprozesse initiiert. Im Gasspeicher kommt es dabei auch zur Oxidation der Aquiferfeststoffmatrix. Im Ergebnis dieses Prozesses wird, neben dem angestrebten Abbau von Schadstoffen (BTEX, Alkylphenole, LCKW, Naphtalin, MKW, MTBE, Ammonium), häufig eine Sulfatbildung, eine Initiierung von Kationenaustauschprozessen, eine Aufhärtung des Grundwassers, eine pH-Wertreduzierung und eine Fällung von gelösten Fe(II)-Ionen als Fe-Hydroxide/-Oxihydrate, vorwiegend in den hydraulisch immobilen Porenbereichen beobachtet.

Nicht verbrauchter, ins Grundwasser eingelöster und aus der Gaswand abströmender Sauerstoff formiert im Abstrom einen zusätzlichen Festbettdurchflußreaktor, der sich mit zunehmender Zeit räumlich vergrößert und in dem auch erhebliche Stoffumsätze möglich sind.

Mehrstufige Durchflußreinigungsreaktoren, bestehend aus einer Gaswand und reaktiven Abstrombereichen (aerob und anaerob), werden ausschließlich von den Berliner Wasserbetrieben mit ihrem patentrechtlich geschützten Verfahren "BIOXWAND" genutzt (Abb. 1).

Der sich beim BIOXWAND-Verfahren ausbildende reaktive Abstromraum (1. Nachbehandlungsstufe) ist verfahrenstechnisch in seiner Länge begrenzt, wobei die poröse Feststoffmatrix aller Behandlungszonen als natürlich heterogen aufgebaute, durchlässige Festbettdurchflussreaktoren in die geochemischen und mikrobiellen Stoffabbau- und Umwandlungsprozesse integriert ist. Der Wasserdurchsatz wird durch die Reaktor-Anstromfläche und den natürlichen bzw. technisch manipulierbaren (abstromige Brunnengalerien) GW-Volumenstrom im Aquifer bestimmt. Die Bilanzierung der Stoffumsetzungen in einer BIOXWAND erfolgt unter Berücksichtigung von Aufbereitungszielwerten für die Reaktorabläufe sowie der inneren Reaktorstrukturierung. Sie beinhaltet die mit dem Grundwasser transportierten, in gasförmiger Form zudosierten und temporär an der porösen Feststoffmatrix fixierten prozessrelevanten Stoffmassen. Bilanz-Gasverluste werden durch Überwachung von Stoffaustritten über die Reaktorbegrenzungen (v.a. GW-Spiegel - Aerationszone, GW-Randstromlinien und Entnahmen) erfaßt.



Abb. 1: BIOXWAND-Verfahren (Patent EP 1550519)

Grundsätzlich erfolgt die Bewirtschaftung so, dass Gasaustritte über die GW-Oberfläche (auf der Grundlage sensorisch ermittelter Kennwerte) durch zeitlich begrenzte Niedrig-Druck-Injektionen (NDI) und Hoch-Druck-Injektionen (HDI) minimiert werden (kein Airsparging /Strippen). Mit Hilfe diskontinuierlicher Gas-Tensidschäume - die eine hohe Gas-Wasser-Schaumlamellendichte aufweisen - oder durch Tensid-Flüssiginjektionen, kann zusätzlich die Gassättigung vergrößert oder der Eintrag reaktiver Feststoffpartikel / Mikroorganismen realisiert werden. Die verfahrenstechnisch notwendigen Mengen reaktiver Gase lassen sich durch Einmischung in ein Trägergas (Luft) realisieren.

1.2 Gaseintrag

Für den Gaseintrag in den Untergrund werden eine Druckstation, ein Verteilungs- und Dosiersystem sowie - an den gashydrogeologischen Verhältnissen des Untergrundes orientiert – gut in der Feststoffmatrix des Grundwasserleiters verankerte Gaslanzen benötigt. Der Gaseintrag kann sowohl über kohärente (zusammenhängende) als auch inkohärente (nicht zusammenhängende) Gasströmungen realisiert werden.

Um Gas ins Grundwasser zu injizieren, muß der hydrostatische Druck am Filteraustrittspunkt überwunden werden. Im Falle von Niedrig-Druck-Injektionen ist ein Gaseintrag in rollige Sedimente mit Raten von 1-2 Nm³/h bereits bei Überdrücken von 100-300 mbar möglich (Ehbrecht, H. et al., 2004). Bei im Sekundentakt gepulsten Hoch-Druck-Injektionen mit Gaseintragsdrücken von bis zu 10 bar können Lagerungsverhältnisse im Untergrund verändert und Feinstpartikel in Poren umgelagert werden. Dies kann zur Bildung erweiterter Gasausbreitungswege führen. Das HDI-Verfahren ist deshalb auch für die Regenerierung von Gaslanzen und das an den Filter angrenzende Sediment von Bedeutung (Engelmann, F.I., 2010).

1.3 Gasausbreitung

Die *Gasausbreitung im Untergrund* ist auf der Kapillarnetzskala abhängig vom Gaseintragsdruck im Filter den Kapillar-, Gravitations-, Reibungs-, Gasauftriebskräften sowie mit zunehmender Entfernung vom Filter und Zunahme der Heterogenität des Untergrundes vom gashydrogeologischen Aufbau.

Die Gasausbreitung 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 von einer trichterförmigen Ausbildung ausgehend vom Injektionspunkt abweichen.

Laboruntersuchungen zeigen, dass das injizierte Gas sich entweder als zusammenhängende oder nicht zusammenhängende Phase im Porennetz des Grundwasserleiters ausbreitet (Geistlinger, et al., 2006). Ein zusammenhängender Gastransport findet sowohl in feinkörnigen als auch grobkörnigen Sedimenten statt. In Grobsanden und Kiesen werden häufig, wegen des höheren Anteils an Grobporen einzelne, weniger stark verzweigte Gaskanäle beobachtet. In feinkörnigen Sedimenten bildet sich hingegen ein räumlich engmaschiges Porennetzwerk aus [Ehbrecht, H. et al., 2004].

1.4 Gasausbreitungsgeschwindigkeiten

Die Ausbreitungsgeschwindigkeit des injizierten Gases im Porennetzwerk der Feststoffmatrix des Grundwasserleiters ist in erster Linie abhängig von der Gaseintragsrate. Felduntersuchungen zeigen, dass in Fein- bis Mittelsanden bei Gaseintragsraten von 1-2 Nm³/h Gasausbreitungsgeschwindigkeiten von 5 – 10 m/h auftreten können. Damit das injizierte Gas nicht aus der Saturationszone in die Aerationszone gelangt, muss bei geringen wassererfüllten Mächtigkeiten (< 10m) der Gaseintrag zeitlich stärker begrenzt und die Gaseintragsrate ggf. zusätzlich reduziert werden.

1.5 Gasverteilung und Gasspeicherung

Großen Einfluß auf die *Gasverteilung und Speicherung* haben Gasaufstiegsbarrieren oder gasausstiegshemmende Strukturen. 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 Gastransportes und somit zur Erhöhung der lateralen Reichweite bzw. zur verstärkten Gaseinspeicherung in die vergleichsweise besser durchlässige Porenmatrix. Nicht selten werden in einzelnen Gasspeicherhorizonten laterale Reichweiten gemessen, die vergleichbar sind mit der Einbautiefe des Eintragsfilters. Insbesondere Grobsande/Kiese erhöhen die laterale Reichweite, da sie bevorzugt Gas in Form größerer Gaslinsen speichern. Diese Gaslinsen können unter Druck stehen und neigen teilweise zu spontanen Selbstausgasung.

Vertikal besser durchlässige GW-Leiterbereiche oder Auflockerungsstrukturen im Umfeld von GW-Meßstellen bewirken hingegen einen präferentiellen Vertikalgasaufstieg und können Ausgasungsverluste verstärken, sowie die laterale Reichweite verringern.

Da viele GW-Leiter heterogen aufgebaut sind, ist es ein wesentliches Merkmal von Gasspeichern, dass sie heterogene Gassättigungen in Form höher mit Gas gesättigten Bereichen unmittelbar neben deutlich geringer gesättigten Arealen aufweisen. Im Ergebis der zwangsläufig geologisch geprägten Gasströmungsmuster werden in der Praxis häufig mittlere, laterale Reichweiten gefunden, die etwa bei einem Drittel der Gaseintragstiefe unter dem Grundwasserspiegel liegen. Mit zunehmender Entfernung von der Gaslanze nimmt dabei die mittlere Gassättigung ab. Aus diesem Grund sollten Gaslanzen so angeordnet werden, dass sich ihre Gas-Reichweiten sowohl in horizontaler als auch in vertikaler Richtung überlappen.

1.6 Gaseinfluß auf die hydraulische Leitfähigkeit

Die Minimierung der Grenzflächenenergien im Mehrphasensystem GW-Leiter bewirkt, dass Gase als nichtbenetzende Fluide stets die Raumanteile mit den größten freien Porenradien okkupieren (Ehbrecht, H. et al., 2004). Hierdurch verringert sich die hydraulische Leitfähigkeit, die nun analog der Aerationszone als relative Permeabilität zu betrachten ist (Abb. 2).

Verbunden mit einer Reduzierung der hydraulischen Leitfähigkeit ist eine Reduzierung der Fließgeschwindigkeit des Grundwassers, was eine Verlängerung der Aufenthaltszeit im Gaswandreaktor bedeutet. Durch geringere relative Permeabilitäten sind im Feldmaßstab bei aktiver Begasung leichte GW-Spiegelanstiege (1-2 cm) im Bereich der Gaswand zu beobachten. Durch Änderungen der piezometrischen GW-Druckhöhen im Gasspeicher kommt es infolge hydraulisch selbstregulierender Prozesse zu Umverteilungen der GW-Flüsse und somit zu lokalen Fließrichtungsänderungen. Hierdurch wird die Verteilung der ins Grundwasser eingelösten Gase verbessert. Durch eine gezielte Steuerung der eingespeicherten Gasmenge können Um- bzw. Unterströmungen von Gaswänden minimiert bzw. verhindert werden.



Abb. 2: relative Permeabilitäten für Mittelsand bei geringer Gasspeicherung (Burghardt, D. et al. 2012)

1.7 Gaseinlösung

Bei hinreichendem Kontakt des eingespeicherten Gases mit dem durch die Gaswand strömenden Grundwasser wird es entsprechend seiner Lösungskinetik in die Wasserphase überführt. 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 Stoffwechselaktivitäten 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 Mittelsanden - ausgehend von Gassättigungen von 1-4% - Einlösungszeiten, die bei einem 1,5-4 fachen Austausch des Porenvolumens des Gaswandreaktors liegen. Bei Einsatz von Luft erhöhten sich die Einlösungszeiten aufgrund des Stickstoffgasanteils für Gassättigungen von 2-4% auf einen 6 bis mehr als 10 fachen Austausch des Porenvolumens (Mann, S., 2012).

Bei Behandlungen kontaminierter GW-Ströme mit dem BIOXWAND-Verfahren wurden unter dem Einfluß von O₂-Zehrprozessen in der Feststoffmatrix für Gassättigungen von ca. 6% Einlösungszeiten ermittelt, die bei einem 1,5 bis 3 fachen Austausch des Porenvolumens der Gaswand lagen.

1.8 Sauerstoffinduzierte Stoffumwandlungsprozesse

Am häufigsten werden derzeit zur GW-Behandlung Sauerstoffgaswände formiert. Nach der Einlösung des Sauerstoffgases ins Grundwasser kommt es zu abiotischen und biotischen Stoffumwandlungs- und Abbauprozessen. Da es nicht möglich ist, mit dem injizierten Sauerstoff selektiv nur Schadstoffabbauprozesse zu initiieren, müssen insbesondere bei der Errichtung von BIOXWÄNDEN

zum Schutz von Wasserwerksfassungen neben dem Abbau der im Grundwasser gelösten Schadstoffe auch alle relevanten sauerstoffinduzierten Begleitprozesse betrachtet werden. Hierzu zählt die Oxidation reduzierter Schwefelverbindungen, die mit einer Versauerung und Sulfatbildung einhergeht, die Verschiebung des Kalk-Kohlensäure-Gleichgewichtes, welches sich häufig in einer Lösung von Karbonaten und Anstiegen der Gesamthärte äußert und der mikrobielle Abbau geogener organischer Substanz im GW-Leiter. Da die sauerstoffinduzierten Stoffumwandlungsprozesse sehr komplexe Wechselwirkungen aufweisen, sind für ihre Bewertung und Prognose (Größenordnung und Dauer) in der Regel Mehrkomponentenmigrationsmodelle erforderlich, um basierend auf den Berechnungen schonende Bewirtschaftungsszenarien für Gaswandreaktoren, mit dem Ziel minimaler / tolerierbarer Beschaffenheitsänderungen im Grundwasser, abzuleiten (Horner, Ch. et al. 2009).

2. Techniken zur Formierung von Gasspeichern

2.1 Erkundung der gashydrogeologischen Verhältnisse

Vor der Errichtung reaktiver Gaswände ist unter Verwendung geeigneter hydrogeologischer Methoden/Techniken ein gashydrogeologisches Strukturmodell aufzubauen. Es besteht in seinem Kern aus einem hydrogeologischen Strukturmodell mit der Verbreitung und Parameterisierung der GW-Leiter, -Hemmer und – Nichtleiter (horizontale und vertikale Durchlässigkeitsbeiwerte, Anisotropiefaktoren, Gesamtporositäten, Druckpotentiale, Stoffinventar gelöst und in der Feststoffmatrix). Zu erweitern ist das Modell durch Komponenten, die für die Gasspeicherung von Bedeutung sind, wie z.B. die Verbreitung und Parameterisierung von Gasaufstiegs-Horizonten, -Hemmern oder -Barrieren (Lagerungsdichten, Heterogenitätsparameter).

Gewonnen werden die Zustandsparameter mit Hilfe klassischer hydrogeologischer Erkundungsmethoden (z.B. Sedimententnahmen, Siebanalysen, Pumpversuchen, Auffüllversuchen, CPT-, PWD-, L_r-Logs, Dissipationstests, Oberflächengeoelektrik, Seismik, Georadar, Bohrlochgeophysik) oder über neue innnovative Erkundungstechniken wie Thermo-Flowmeter-, Injektions-/BAT-Permeameter-Logs zur horizontbezogenen In-Situ-Bestimmung von Durchlässigkeitsbeiwerten oder schichtbezogenen TDR-Messungen zur Ermittlung von Gesamtporositäten.

2.2 Gaslanzen

Gaslanzen müssen folgende Anforderungen erfüllen: 1. Beim Bau von Lanzen dürfen keine Auflockerungen im Lanzenumfeld erzeugt werden. 2. Ringräume sind gasdicht zu verschließen (Unterbindung preferential-flow-Effekte). 3. Filter müssen auch bei schwer bohrbaren Sedimenten zuverlässig und zielgenau in > 50 m Tiefe installierbar sein. 4. Das Lanzenmaterial sollte hochdruckstabil und gasdiffusionsdicht sein. 5. Die Filter müssen großräumige, laterale, weitreichende, möglichst gleichmäßige Gasverteilungen ermöglichen.

Lanzen können entweder im Bohr- oder Sondierverfahren errichtet werden. Die sich jeweils ergebenden, besonderen technischen Anforderungen lassen eine Einstufung in zwei Gruppen zu (BIL = Bohrungs-Injektions-Lanzen und SIL = Sondierungs-Injektions-Lanzen).

Grundsätzlich haben sich in der Praxis HDPE/PU-Gaslanzen bewährt, die aus einem im Gaseintragshorizont perforierten dünnen Rohr/Schlauch bestehen. Die Filtergestaltung ist auf die Kornmatrix des Untergrundes abgestimmt.

Bohrungs-Injektions-Lanzen (BIL)

BIL können bis in große Tiefen abgeteuft werden, haben aber den Nachteil, dass - sowohl im Trockenals auch Spülbohrverfahren - Feststoffmaterial aus dem Untergrund ausgetragen und somit ein größerer Raum um das Bohrloch (0,5 - 2,0 m) aufgelockert wird. Um vertikale Gasaustritte zu verhindern, ist der Ringraum nach Installation der Ausbaugarnitur, sowie das anthropogen aufgelockerte Umfeld des Bohrloches, wieder vollständig zu verschließen. Während in Kluftgrundwasserleitern im Ringraum Packer gesetzt werden können, muß in Porengrundwasserleitern zunächst der Filterbereich mit Kies verfüllt und über ihm ein Gegenfilter installiert werden. Durch Einsatz von Mantelventilrohren kann der verbleibende Ringraum über Hochdruckinjektionen mit Dichtmassen (Ton-Zement-Suspensionen) verschlossen werden. Die weitgehend kaum steuerbaren Verpressmaßnahmen ins engere Bohrlochumfeld gewährleisten dabei nicht immer eine vollständige Unterbindung späterer, präferentieller, vertikaler Gasaufstiege.

Sondierungs-Injektions-Lanzen (SIL)

SIL lassen sich mit statischer oder dynamischer Sondiertechnik im Direkt-Push-Verfahren errichten. Beim Einbringen des Werkzeuges in den Untergrund wird das Aquifermaterial durch eine lose Sondenspitze und das Gestänge zur Seite verdrängt. Im Gegensatz zu den Auflockerungsprozessen bei Bohrverfahren erfolgt eine Sedimentverdichtung entlang des Sondiergestänges.

Rammsondier-Injektions-Lanzen (RIL)

RIL sind für Sande mit mitteldichter Lagerung und bis in eine Tiefe von 10 m unter Verwendung leichter Rammsondiertechnik einsetzbar. Sie bestehen aus 2"-3"-HDPE-Vollrohren mit Filterstrecke incl. Spitze, sowie gewinde-integrierten Scheibenpackern zur Ausbildung von Kammern für den Gaseintrag. Bei diesem Lanzentyp muss kein Sondiergestänge zurückgebaut oder ein Sondierkanal verfüllt werden. Die Ausbaugarnitur wird direkt in den Untergrund gerammt. Die Kammern einer RIL sind mit Kies, bzw. zur zusätzlichen vertikalen Abdichtung, mit Ton gefüllt. Eine Lanze kann mit mehreren Kammern ausgerüstet und bedarfsweise zusätzlich mit Monitoringtechnik bestückt werden.

RIL können auch in Sandschichten mit mitteldichter/dichter Lagerung bis in eine Tiefe von 20-30 m errichtet werden. Hierfür ist leistungsstärkere Rammsondiertechnik (z.B. Geoprobe) anzuwenden, wobei teilweise der Einsatz voreilender, kleinkalibriger Vollschneckenbohrungen bzw. das Abteufen von Führungshohlgestängen erforderlich ist. Die Sondiertiefe wird durch den sich an der Sondenspitze aufbauenden Spitzendruck und die Mantelreibung entlang des Sondiergestänges begrenzt. Zum Einbau der Lanze wird zunächst ein Hohlgestänge mit einer verlorenen Spitze abgeteuft. Hierbei ist darauf zu achten, dass über die Sondierspitze kein zerkleinerstes Sediment ins Gestänge eindringt. Nach dem Erreichen des Zielhorizontes wird die Ausbaugarnitur in das Hohlgestänge eingeführt und beim Zurückziehen des Hohlgestänges der Ringraum durch Verpressen einer Dichtmasse verschlossen. Das Verpressen kann, entweder über eine Verpressleitung erfolgen, oder aber direkt über das unten offene Hohlgestänge ausgeführt werden. Da Rammsondiermaterial eine gewisse Elastizität, bei vergleichsweise geringer Härte besitzt, ist es im Vergleich zu Drucksondiermaterial dickwandiger. Die Ausbaugarnitur ist deshalb schlank zu halten. Das Verpressen von Dichtmassen in den Sondierkanal kann entfallen, wenn der Untergrund hohe Lagerungsdichten aufweist und die Lanze erst nach einer Konsolidierungsphase von 1-2 Monaten in Betrieb genommen wird.

Drucksondierungs-Injektions-Lanzen (DIL)

DIL werden mit Drucksondierungen errichtet. Dabei wird die Sondenspitze mit konstanter Geschwindigkeit von 2 cm/s in den Boden gedrückt. Die max. Druckkraft von 200 kN wird hydraulisch vom Sondierfahrzeug über das Hohlgestänge auf die Spitze übertragen. Um hohe Verpreßdrücke ausüben zu können, ist das dünnwandige Drucksondiermaterial speziell gehärtet und wenig biegsam. Die Ausbaugarnituren und die Einbautiefen sind vergleichbar mit denen einer RIL, wobei auch für eine DIL teilweise der Einsatz voreilender, kleinkalibriger Vollschneckenbohrungen bzw. das Abteufen von Führungshohlgestängen erforderlich ist. Durch den im Vergleich zum Rammverfahren größeren Sondierdurchmesser lassen sich neben der Gaslanze auch noch Bentonitringe oder –dübel zur Bohrlochabdichtung einbauen. Grundsätzlich hat eine DIL gegenüber einer RIL den Vorteil, dass beim Abteufen der verlorenen Spitze kein zerkleinertes Sediment in das Hohlgestänge gelangt.

Vibrationssondier-Injektions-Lanzen (VIL)

VIL sind qualitativ hochwertige, kostengünstige Gaslanzen für Filtertiefen bis 80 m u. GOK. Sie werden mit Hilfe von Sonic-Technologie errichtet. In Analogie zu einer RIL/DIL wird eine verlorene Spitze - wahlweise mit großdimensioniertem Hohlgestänge - in den Untergrund vibriert, wobei das Sediment seitlich verdrängt und das Profil entlang des Sondiergestänges verdichtet wird. Schwer sondierbare Schichten werden mit zusätzlichen Bohrwerkzeugen durchörtert. Nach Erreichen des

Zielhorizontes wird die Ausbaugarnitur installiert. Der Einsatz eines Compact-Sonic-Rotho-Bohrgerätes gewährleistet auch das sichere Abteufen von Lanzenbündeln. Ein wesentlicher Vorteil gegenüber einer DIL ist, dass der Sondierkanal nicht mit Dichtmassen verschlossen werden muß. Durch die Nutzung von Vibrationen beim Hohlgestänge-Rückbau wird die Einbaugarnitur infolge der Rüttelverdichtung fest im Aquifer verankert. Gaslanzen vom VIL-Typ zeichnen sich durch eine vergleichsweise hohe, laterale Gasausbreitungskomponente aus. Sie sind besonders gut geeignet, um hohe Gassättigungen im Umfeld der Gasfilter, auch unter Verwendung von Hoch-Druckimpuls-Injektionen in Kombination mit vergleichsweise großen Gaslanzendurchmessern, zu erzeugen.

2.3 Vorhaltung, Mischung und Verteilung der Gase

Die Gaspeicherformierung kann sowohl über den Einsatz von Reingas aber auch über Mischgas erfolgen. Als Trägergas zur Erzeugung großer Reichweiten wird häufig Luft, aber auch Kohlendioxid eingesetzt. Die Vorhaltung der Reingase erfolgt in Flüssigtanks mit angeschlossenem Verdampfer oder bei kleineren Mengen in Flaschenbündeln. Sauerstoffgas kann auch am Ort der Verwendung hergestellt werden. Komprimierte Luft wird meistens über leistungsstarke, ölfrei arbeitende Kompressoren erzeugt. Nach der Verdichtung ist die Luft zu trocknen.

Vom Vorhaltungspunkt werden die Gase nach einer Druckreduzierung über Gasleitungen zu einer Gasdosier-/Mischanlage geführt, wo das reaktive Gas entsprechend seiner Partialeinzeldrücke gemischt wird. Hier erfolgt auch die Aufteilung des Injektionsgases zu den Gaslanzen. Sie werden entweder als Einzellanzen mit separat, unterschiedlichen Gaszusammensetzungen oder als sequentiell angeordnete, magnetventilgesteuerte Lanzen in einem Gasstrang bei gleicher Gaszusammensetzung betrieben. In der Gasdosier-/Mischstation findet im Bedarfsfall auch eine Bypassdosierung von Tensiden oder Tracergasen (He, Ar, Ne) zum reaktiven Gas/Gasgemisch statt.

2.4 Steuerung der Injektionsraten, Injektionsdauer und der Injektionsdrücke

Gaseinträge sind über Niedrig-Druck-Injektionen (NDI), Hoch-Druckimpuls-Injektionen (HDI) oder eine Kombination beider Injektionstechniken möglich.

Beim NDI-Verfahren werden Gaseintragsdrücke von wenigen 100 mBar über dem hydrostatischen Druck am Begasungspunkt erzeugt. Die Injektionsraten liegen im Intervall von 0-2 Nm³/h. Sie werden in der Regel intervallweise geschaltet. Kontinuierliche Injektionen werden nur eingesetzt, wenn ein Teilaustrag des injizierten Gases in die Aerationszone gewünscht ist, oder wenn mit Inertgas z.B. Stickstoff unter Gasaufstiegsbarrieren gezielt eine Gasverblockung des Porenraumes zur Reduzierung des Grundwasserflusses angestrebt wird. In der Einfahrphase von Gasspeichern ist eine sukzessive Anpassung der Injektionsrate an den variierenden Gas-Bedarf erforderlich. Nach dem Einfahren wird ein weitgehend konstantes Betriebsregime, bestehend aus kurzen Injektionsetappen, mit anschließend längeren Ruhephasen, angestrebt.

Beim HDI-Verfahren werden die Gase mit einem Injektionsdruck wesentlich über dem hydrostatischen Druck (mindestens plus 8-10 bar) injiziert. Die Einträge können zeitlich sehr kurz getaktet (hochfrequente, gepulste Injektionen) sein. Die Injektionsdauer wird deutlich kleiner als die Gastransportzeit bis zur Grundwasseroberfläche gewählt. Mit dem HDI-Verfahren kann die Gassättigung, insbesondere im Umfeld des Begasungsfilters, erhöht werden. Die HDI-Technik zielt auf eine zeitliche Begrenzung des kohärenten Gastransportes und durch eine Variation der Impulsstärken und -zeiten zu einer Änderung der Gasausbreitungswege und eine Erschließung ständig neuer Gaseinspeicherungsareale. Durch technogene Porenraumveränderungen infolge von Kornverlagerungen werden feinmaschigere Porennetzwerke erzeugt. Das gepulste HDI-Verfahren wird auch zur Lanzenregenerierung eingesetzt.

2.5 Sicherheitstechnik

Die Sicherheitstechnik besteht in erster Linie aus gasspezifischen Sensoren in der Gasdosier- und Meß-Station, Drucksensoren zur Überwachung der Dichtheit der Gasleitungen, induktiven Durchflußmessern und Rauchsignaltechnik, kombiniert mit Magnetventilabschaltungen der Gaszuführung zur Gas-Dosier- und Meß-Station.

3. Kosten

Die Fa. Sensatec hat in den letzten 5 Jahren zehn Projekte mit Direktgasinjektionen realisiert. Die Formierung der Gaswände erfolgte bei wassererfüllten Mächtigkeiten von 6–45 m, wobei je nach Projektstruktur 2 bis 22 Gaslanzen zur Anwendung kamen. Es wurden Gaswände mit Wanddicken in GW-Stromrichtung von 4 bis 25 m formiert und unterschiedliche Schadstoffe im Grundwasserstrom insitu behandelt (MTBE, LCKW, BTEX, MCB, Alkylphenole, Desinfektionsmittel, pharmazeutische Spurenstoffe, Ammonium, Nitrat).

Die gereinigten GW-Ströme lagen je nach Projektspezifik im Intervall von 1.800 – 510.000 m³/a. Überwiegend erreichte die GW-Behandlungskapazität 50.000 m³/a. Für diese Größenordnung lagen die Aufbereitungskosten (Investions- und Betriebskosten incl. Monitoring) im Zeitraum von 2-4 Betriebsjahren bei 0,6–1,1 €/m³ kontaminiertes Grundwasser. Für etwa zehnfach höhere GW-Mengen sanken die Aufbereitungskosten auf 0,4-0,5 €/m³. Drei Projekte wurden als Pilotversuche durchgeführt. Für die hierbei gereinigten, kleinen Wassermengen von 1.800-13.000 m³/a waren, unter Beachtung von erforderlichen Eignunngstest zur Verfahrensoptimierung und Standortanpassung, Kosten in Höhe von 1,4 – 3,2 €/m³ erforderlich.

4. Erfahrungen zur Genehmigung

Im Mittelpunkt der Umsetzung von Direktgasinjektionen steht aus behördlicher Sicht eine hohe Verfahrenssicherheit zur Erreichung vorgegebener Behandlungsziele oder Zielwerte, hier entweder In-Situ-Behandlungs-Konzentrationen oder –Frachten für die Schadstofffahnen. Von besonderem Interesse ist dabei die Festlegung des Ortes der Beobachtung, der zweckmäßiger Weise entweder für den Hauptreinigungsreaktor (Gaswand) oder einen reaktiven Abstromreaktor definiert wird. In diesem Zusammenhang zeigen erste Erfahrungen, dass wegen einer längeren Einfahrphase von Gaswänden, abhängig vom Behandlungsfortschritt und der Grundwasserdynamik, die Zeitpunkte zum Erreichen der Ziele und Zielwerte standort- und gefahrenspezifisch festgelegt werden.

Vor der Umsetzung von Direktgasinjektionen zur In-Situ-Reinigung von Schadstofffahnen steht häufig die Durchführung von Pilotversuchen, mit dem Ziel eines direkten In-Situ-Nachweises zum jeweiligen Schadstoffabbau. Gleichzeitig ist zu bewerten, ob ggf. negative Beschaffenheitsänderungen im Grundwasser zu erwarten sind.

Im Rahmen verschiedener Genehmigungsstufen sind Planungsunterlagen incl. Stoffbilanzierungen und Erlaubnisbescheide zu erstellen.

Das ausführende Unternehmen wird seitens der Behörden oder Sanierungspflichtigen aufgefordert, patentrechtliche Belange zu berücksichtigen und Erfahrungen bzw. Referenzen für realisierte Direktgasinjektionen vorzulegen. Es sind immer der Nachweis von Möglichkeiten zur In-Situ-Steuerung der permeablen Durchflußreaktoren zu erbringen und Maßnahmen zur Reduzierung von Verfahrensunsicherheiten aufzuzeigen (Abb. 3).

Verfahrensunsicherheit	Risikominderung	Parameteranpassung
schlechte Wirkstoffverteilung	Lageoptimierung Gaseintragspunkte	 horizontal: L_{x-y}=ROI mit ROI=M/13
	basierend auf Erhöhung	- ROI-Überlappung
	Kenntnisstand zum	- 2 Injektionsgalerien in Fließrichtung
	gashydrogeologischen Modell	- vertikal: Anpassung an chamberflow
		- Erkundung Gasaufstiegsbarrieren (Lagerungsdichten)
		- Injektion unterhalb Kontamination
	p, Q Variation und Intervallschaltungen	- Δp, ΔQ bei NDI und HDI
	zur Schaffung neuer Kanäle	- Kombination NDI-HDI
	Einsatz von Trägergasen	- N2-Speicherformierung
		- N2-Speicherschnellbeladung mit Wirkstoffen (z.B. O2)
		- Gemischtgaseintrag (Luft-CH ₄)
	Nutzung Abstromreaktor für Abbau	- Nutzung longitudinale Makrodispersion
	, in the second s	- Vergrößerung Reaktorlängen
		Erhöhung der Standzeit
limitierte Einlösung	Injektion in feinkörnige Sedimente	- Formierung enger Gasnetze mit großen Oberflächen
	· · · · · ·	 Verbesserung der Homogenität der Gasverteilung
	Minimierung Injektion in grobe Sedimente	Verhinderung Gaskissen und kleiner Kontaktflächen
abbauhemmende	Absenkung der Wirkstoffkonzentration	Reduzierung der Gassättigung
Wirkstoffkonzentrationen	-	Variation Mischgaspartialdrücke
	Anderung hydrogeochemischer Parameter	- Aerosol-, Sorptionsträgerinjektion zur:
		- pH-, Härte-Änderung, Organikabbau
		- Wasserstoffperoxid-, Puffereinträge
	Nährstoffzugaben	- Gasinjektion (N, CH4, CO2)
Gasverblockungen	Realisierung aerob/anaerob Wechsel	- kurze Eintragszyklen, lange Ruhephasen
		- Vermeidung Inertgaseinsatz
		- Anpassung Gasbedarf an Verbrauch
Gaswandumströmung	Ontimierung hydraulische Selbstregulierung	 Kopplung BIOXWAND, Brunnenbewirtschaftung

Abb. 3: Handlungsalgorythmus zur BIOXWAND-Optimierung

Die bisherige Praxis zeigt, dass ein Kernelement für eine erfolgreiche Genehmigung von Direktgasinjektionen ein fachlich fundiertes, langfristig orientiertes Monitoringkonzept ist. Dies schließ sowohl geeignete Monitoringtechnik, als auch entsprechende Auswerteverfahren ein (Abb. 4).



Abb. 4: BIOXWAND der Berliner Wasserbetriebe (3 Jahre)

5. Monitoring permeabler In-Situ-Durchflußreaktoren

Für Monitoringtechnik in Gasspeichern gelten ähnlich wie für Gaslanzen folgende Anforderungen: 1. Ein Entweichen eingespeicherter Gase an den GW-Aufschlüssen über bohrtechnische Störstellen ist zu verhindern. 2. Sie muss die Entnahme repräsentativer GW-Proben ermöglichen. 3. Die Technik sollte eine Ermittlung der Gasverteilung ermöglichen, damit Speicherdimensionen definierbar und speicherbare Stoffmengen ableitbar sind. 4. Um Injektionsparameter (Gasrate, Injektionsdruck und – dauer) festzulegen müssen Gasausbreitungsgeschwindigkeiten und Gastransportmechanismen bestimmbar sein. 5. Eine Quantifizierung von Gassättigungen sowie die Einlösungskinetik der eingespeicherten Gase ermöglichen und 6. ein Bodenluft- und Sickerwassermonitoring über mögliche Auswirkungen in der Aerationszone gewährleisten.

Grundwasseraufschlüsse zur Probennahme

Innerhalb von Gasspeichern sollten GW-Aufschlüsse zur Probennahme ausschließlich mit Hilfe von Sondiertechnik errichtet werden. Wegen der sich ergebenden, schlanken Ausbaugarnitur sind fast alle Aufschlüsse dieser Art dem Typ einer Sondermeßstelle zu zuordnen. GW-Proben können bei geringen Flurabständen direkt mit Hilfe von Schlauchpumpen aus den Gaslanzen gewonnen werden. Das beprobte Raumvolumen ist wegen der geringen Förderleistung und den kurzen Gasfilterstrecken (wenige Dezimeter) jedoch klein, eine Zustandsbewertung wegen fehlender Raumintegration für den gesamten Gasspeicher schwer möglich. Bei der Probengewinnung aus Gasspeichern haben sich aquiferintegrierte Miniatur-Doppelventil-Verdrängungspumpen bewährt. Sie ermöglichen zwar ebenfalls nur die Beprobung sehr kleiner GW-Volumen, die Probennahme erfolgt aber unterdruckfrei und ist somit für leichtflüchtige Stoffe geeignet. Gelöste Gase (N₂, O₂, CO₂, N₂O, CH₄, H₂, He, Ar, Ne, NH₃) müssen mit einer druck- und massehaltenden Beprobungstechnik entnommen werden. Hierfür bieten sich BAT[®]-Messstellen oder mindestens 2"-Grundwasseraufschlüsse für mobile BAT-Technik an. Bei der Anwendung dieser Probennahmetechnik sind spezielle Qualitätskontrollen (Druckmessungen, Partialdruckberechnungen aller gelösten Gase) erforderlich (Ehbrecht et al., 2004). 2"-GW-Aufschlüsse können in Gaswandbereichen mit dem Sonic-Verfahren installiert werden. Um Ausgasungen zu verhindern sind sie durch eine gasdichte Kappe zu verschließen. Dieser Meßstellentyp bietet die Möglichkeit Gütepumpversuche/Immissionspumpversuche zur großräumigeren Beschaffenheitsanalyse in Gasspeichern durchzuführen.

In-Situ-Gassensorarrays zur Bestimmung von Gasverteilung und -geschwindigkeit

Damit ein Sensorarray möglichst die Gasausbreitung und -geschwindigkeit auf der Porenebene erfassen kann, ist es bevorzugt in die Kornmatrix - als aquiferintegrierte Sensorkombination – einzubauen. Die Einbautechnologie muß sich an der von Gaslanzen orientieren. Auf Einbaumaterial wie Kies sollte verzichtet werden, da sich in ihm Gasansammlungen bilden können. Wegen der äußerst geringen Raumauflösung müssen, den gashydrogeologischen Verhältnissen entsprechend, ausreichend viele Sensoren in Form eines Sensornetzes installiert werden. Die Gasverteilung kann im Fall von O₂-Injektionen leicht mit elektrochemischen oder optischen In-Situ-Sensoren detektiert werden. Besonders geeignet ist ein Basisnetz, bestehend aus Redox-Sensoren und O₂-Optoden, wobei die Redoxsensorik eine kürzere Ansprechzeit besitzt. Diese passiv messenden Systeme können in schluffigen Feinsanden auch mit Miniatur-Doppelventil-Verdrängungspumpen zur Erhöhung der Raumreichweite gekoppelt werden. Ergänzend können Meßsysteme zur kontinuierlichen Datenerhebung auch direkt in die Filter von Grundwasseraufschlüssen zur Probennahme eingebaut werden. Es ist jedoch sicherzustellen, dass bei der Messwertaufzeichnung die GW-Beschaffenheit außerhalb der Meßstelle aufgezeichnet wird (Nutzung intervallgesteuerter hydraulischer Anregungstechnik).

Messungen der Gassättigung

Zur gezielten Bewirtschaftung eines Gasspeichers müssen die Gassättigungen unter den jeweiligen Druckbedingungen analysiert werden. Auf ihrer Grundlage kann teufenorientiert eine Quantifizierung der eingespeicherten Stoffmengen vorgenommen werden. Sie sind der zentrale Bewirtschaftungsparameter für Gasspeicher. Grundsätzlich eignen sich folgende Messverfahren. Wassergehalte können über eine Bestimmung der Wärmekapazität ermittelt werden. Zur Aufnahme des Temperarturverhaltens gasgesättigter Aquiferbereiche muß der Aquifer aufgeheizt werden. Auch die Messung der elektrischen Leitfähigkeit ist grundsätzlich geeignet Gassättigungen zu bestimmen, allerdings nicht hinreichend genau in einer Größenordnung von 2 %. Beide Meßverfahren haben zudem den Nachteil, dass nur punktuelle Messungen möglich sind. Kernphysikalische Bohrlochmethoden sind gut geeignet zur Aufnahme von Gassättigungsprofilen (S_G -Logs). Durch Einleiten von Gamma- oder Neutronenstrahlen in den Untergrund kann der Feuchtegehalt in den Poren des Aquifers indirekt bestimmt werden. Die räumliche Eindringtiefe in den Untergrund liegt bei 12-15 cm. Mit dem Neutron-Neutron Meßverfahren kann, nach materialspezifischen Kalibrierungen, eine etwas kleinere Nachweisgrenze ($S_G = 2-4\%$) als mit dem Gamma Gamma Verfahren ($S_G = 4-8\%$) erzielt werden. Ein wesentlicher Nachteil der Kernverfahren liegt im hohen Aufwand erforderlicher Kalibrierungen, in Kombination mit geringen Halbwertszeiten der Strahlungsquelle (Cf = 2,65 a). Die höchste Messgenauigkeit zur Bestimmung der Gassättigung wird durch den Einsatz der Time Domain Reflectometry (TDR) erzielt. Hierbei handelt es sich um ein dielektrisches Meßverfahren, bei dem anhand der Laufzeiten elektromagnetischer Impulse Dielektrizitätskonstanten bestimmt werden (Fundinger, R. et al., 1996). Hierbei wirkt der Boden zwischen zwei Meßstäben als Dielektrikum. Eine Veränderung des Wassergehaltes führt zu einer Veränderung der Dielektrizitätskonstante, was auf den volumetrischen Wassergehalt schließen läßt. Die Meßgenauigkeit des Verfahrens liegt unter den Bedingungen der Saturationszone bei 2 Vol. %. Die Messtechnik ist als TDR-Rohrsonde verfügbar und kann in speziellen, wasserfrei zu errichtenden 2"-TDR-Rohren eingesetzt werden (Engelmann, F.I. et al., 2010). Der Einbau der 2"-TDR-Rohre erfolgt mit voreilender Sedimentkernentnahme im Sonic-Verfahren.

raumintegrierende Parameteridentifikation

Wegen der hohen Heterogenität der Parameterfelder in Gaswänden haben raumintegrierende Monitoringverfahren, auch zur Einordnung punktuell gewonnener Informationen, eine große Bedeutung. Mit Hilfe von Gasspeicherpumpversuchen und Auffülltests können in-situ Reduzierungen der geohydraulischen Leitfähigkeit ermittelt werden. Hierfür sind hochauflösende Drucksensoren erforderlich. Einbohrlochmarkierungstests liefern Informationen zu Änderungen der Porosität, Dispersion oder Retardation bzgl. der Ausbreitung von GW-Inhaltsstoffen. Für die Aufzeichnung von Verdünnungskurven im Filter von Meßstellen eignen sich In-Situ-Sensoren (z.B. L_f-, Chlorid-, Nitrat-Sensoren oder In-Situ-ISA-Spektrometer für Ammonium, organische Spurenstoffe, Sulfat, Fe(II), u.a). Die genannten Sensoren finden auch bei der Datenerhebung im Rahmen von Gütepumpversuchen und somit bei der Bewertung von Heterogenitäten im Parameterfeld Anwendung. Mit Hilfe von Gastracertests lassen sich kohärente Gasausbreitungsmechanismen und Geschwindigkeiten im Gasspeicher während seiner Formierung nachweisen.

- 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 unveröff.
- Ehbrecht, H. et. al (2004): FuE Vorhaben BIOXWAND, Entwicklung und Erprobung einer Bio-Oxidationswand im Abstrom eines hoch mit Ammonium kontaminierten Grundwasserleiters, Förderkennzeichen 02 WT 0091, unveröff. Berlin
- Engelmann, F.I. (2010): Abschlußbericht: Modellgestützte Hoch-Druck-Impulsgasinjektion (HDI) zur in-situ Sanierung kontaminierter Grundwässer. Technologie und Messtechnikentwicklung. Entwicklung eines In-Situ-Gaseintragssystems und einer Gaseintragstechnologie zur HDI und kontrollierten Bewirtschaftung unterirdischer Gasspeicher. Förderkennzeichen KF001101SB7, Projektlaufzeit 01.10.08 – 31.12.09
- Engelmann, F.I., P. Hopp, L.P. Schmolke, H. Ehbrecht (2010): Bewirtschaftung von Gasspeichern. Kontrollierte Steuerung basierend auf Messungen zur Gassättigung. TerraTech 2011
- Fundinger, R., Köhler, K., Stacheder, M. (1996): Messung der Material- und Bodenfeuchte mit der TRIME-Methode. In: VDI/VDE Gesellschaft (Hrsg.): Sensoren und Meßsysteme.- VDI-Bericht, 1255: 417-422.
- Geistlinger, H., Krauss, G., Lazik, D. & Luckner, L. (2006): Direct gas injection into saturated glass beads: Transition from incoherent to coherent gas flow pattern. Water Resources Research, 42, W07403.
- 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.
- Mann, S., (2012): Laborative Untersuchungen zum Einfluss des Sauerstoffgas-Sättigungsgrades auf die geohydraulische Leitfähigkeit. Bachelorarbeit, TU Dresden, Institut für GW-Wirtschaft