

# Hoch auflösende Datenerfassung

Einsatz von Sensoren zur Steuerung reaktiver *In-situ*-Sanierungsverfahren



Blick in den Steuerungscontainer mit Bioxwand-Anlagentechnik

Stephan Hüttmann,  
Frank Ingolf Engelmann

**Wichtige Prozessparameter lassen sich bei hohen Prozessgeschwindigkeiten oft nicht mehr durch ein herkömmliches wöchentliches, monatliches oder gar jährliches Grundwassermonitoring erfassen. Eine zur Prozessanalyse sowie zur Ableitung von Steuerungskriterien eingesetzte Datenerfassung muss daher in einer möglichst hohen zeitlichen Auflösung sowie in einem möglichst hoch auflösenden räumlichen Netz und in räumlicher Abhängigkeit von den Wirkstoffeintragsbereichen erfolgen.**

Reaktive Verfahren zur *In-situ*-Sanierung kontaminierter Areale kommen seit einigen Jahren in Deutschland zunehmend zum Einsatz. Teilweise werden diese Verfahren in Ergänzung oder als Ersatz der in der Vergangenheit bevorzugten Pump-and-Treat-Maßnahmen eingesetzt. Als besonders wirksam haben sich Verfahren mit biologischen Wirkmechanismen sowie Verfahren mit chemischem Wirkprinzip erwiesen. Die biologischen Verfahren nutzen die Fähigkeit standorteigener oder zugeführter Schadstoff abbauenden Mikroorganismen durch Bereitstellung von Elektronenakzeptoren (z. B. Sauerstoff, Nitrat), Elektronendonatoren (z. B. organischen Cosubstraten) und Nährstoffen. Bei den *In-situ*-chemischen Oxidationsverfahren (ISCO) werden starke chemische Oxidationsmittel in das Grundwasser eingeleitet, um dadurch die organischen Schadstoffe oxidativ zu zerstören.

All diesen Verfahren ist gemeinsam, dass Wirkstoffe in das Grundwasser eingeführt und aktiv oder passiv, d. h. mit der natürlichen Grundwasserströmung, verteilt werden müssen. Entscheidend für die Effizienz jedes dieser Verfahren ist dabei die Schaffung maximaler Kontaktflächen und Kontaktzeiten zwischen Wirk- und Schadstoffen. Das bedeutet, dass der ausreichenden Wirkstoffdosierung sowie der effizienten Wirkstoffverteilung und Wirkstoffeinspeicherung im Aquifer bei den genannten Verfahren eine entscheidende Bedeutung zukommt.

Eine Unwägbarkeit bleibt bei der Verfahrensplanung und -ausführung zumeist im

Problem der mangelnden Kenntnisse über die Heterogenität in den verschiedenen Maßstabebenen des Aquifers u. a. in Bezug auf dessen geologischen Detailaufbau, das lokale Fließgeschehen, die unterschiedlichen Leitfähigkeiten aufgrund verschiedener Lagerungsdichten sowie die heterogene stoffliche Zusammensetzung. Aus den Heterogenitäten ergeben sich komplexe dreidimensionale Ausbreitungsmuster bei der Stoffinfiltration sowie ein zeitlich und räumlich nicht konstanter Wirkstoffverbrauch. Die standortspezifischen Reaktionsmuster, Reaktionsgeschwindigkeiten und räumlich-zeitliche Ausbreitungsprozesse lassen sich demzufolge nur unzureichend über herkömmliche Prognoseinstrumente, sondern bisher oft nur empirisch durch Felddaten bestimmen. Mithilfe von Felddaten vor allem zur Bewertung der räumlichen Ausbreitung der Reaktionsfront, dessen zeitlicher Entwicklung und Intensität lassen sich wesentlich genauere Bewirtschaftungskriterien für *In-situ*-Verfahren ableiten und Wirkstoffkonzentrationen an die Standortgegebenheiten anpassen.

## Sensorgestützte *In-situ*-Prozessanalyse

Aufgrund hoher Prozessgeschwindigkeiten vor allem bei ISCO-Verfahren, teilweise aber auch bei biologischen Verfahren, ändern sich z. B. die Parameter Temperatur, Redoxpotenzial, Partialdrücke, Sauerstoffgehalt, pH-Wert bzw. Leitfähigkeiten teilweise bereits innerhalb weniger Minuten oder Stunden. Die relevanten Prozessparameter lassen sich bei hohen Prozessgeschwindigkeiten nicht mehr durch ein herkömmliches wöchentliches, monatliches oder gar jährliches Grundwassermonitoring erfassen. Die Datenerfassung muss zur Prozessanalyse sowie zur Ableitung von Steuerungskriterien stattdessen in einer möglichst hohen zeitlichen Auflösung mindestens stündlich – besser sogar minütlich – in einem möglichst hoch auflösenden räumlichen Netz, d. h. teufenorientiert und in räumlicher Abhängigkeit von den Wirkstoffeintragsbereichen erfolgen (**Bild 1**).

Zur Erfassung von chemischer, physikalischer bzw. biologischer Zustandsgrößen im Aquifer steht eine ganze Reihe von Technologien zur Verfügung:

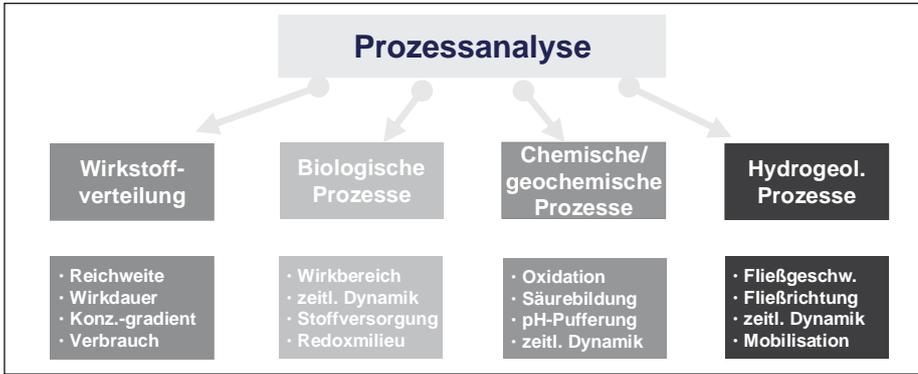


Bild 1: Zentrale Elemente der *In-situ*-Prozessanalyse

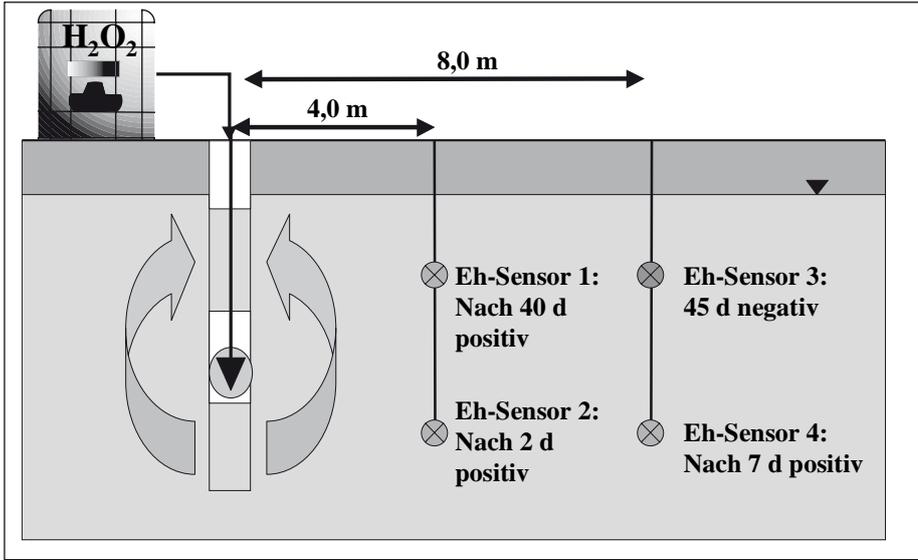


Bild 2: Sensorgestützte Reichweitenanalyse für die Zirkulationsbrunnentechnik

- DIN-gerechte Entnahme von Wasserproben aus konventionellen Messstellen
  - Multilevel-Grundwasserbeprobungssysteme (z. B. CMT-Messstellen)
  - sensorgestützte Sondierverfahren (MIP, CPT, Sonic-Drill u. a.)
  - Feststoffprobennahmen, klassische Sondierverfahren
  - messstellenintegrierte Sensorketten (MISK)
  - aquiferintegrierte Sensorketten, d. h. direkt in den Aquifer installierte Sensoren (AISK)
- Die Forderung nach einer Erhebung Prozess bestimmender Steuerungsparameter mit hoher zeitlicher und räumlicher Auflösung lässt sich mit einem vertretbaren Aufwand lediglich mit sensorgestützten Messverfahren realisieren. Dazu stehen inzwischen Technologien zur *In-situ*-Datenerfassung mittels *In-situ*-Sensoren zur Verfügung, die

Messgröße	Untersuchter Prozess
Redoxpotenzial	Nachweis aerober bzw. anaerober Milieubedingungen zur Analyse der Elektronenakzeptor/Elektronendonatorverteilung, Detektion der oxidativen/reduktiven Wirkstoffausbreitung, ISCO-Oxidationsfront, Wirkstoffeinspeicherung von Elektronenakzeptoren
Temperatur	Reaktionstemperatur ISCO bzw. Wärmemengenbildung durch biologisch bedingte Eigenerwärmung, Reaktionswärmeentstehung bei ISCO
Sauerstoffgehalt	freier Sauerstoff im GW zur Analyse der Elektronenakzeptorausbreitung bzw. der Oxidationsfront, Nachweis des Sauerstofftransportes bei Gaswandtechnologien
pH-Wert	biologische Säurebildung bei Anaerob-Verfahren, pH-Absenkung bei Fenton's Reaktion, Pyritoxidation bei oxidativen Verfahren
Leitfähigkeit	Zunahme gelöster Salze z. B. durch Pyritoxidation
Druck	schnelle Druckzunahme durch Gasentstehung im Grundwasser bei ISCO-Reaktion, Analyse der Grundwasserfließrichtung in dynamischen Systemen
selektive Ionensensoren	Verwendung in Tracertests, Analyse des Schadstoffabbaus (z. B. Ammonium), Analyse der Elektronenakzeptorzehrung (z. B. Nitrat)

Tabelle 1: Verfügbare sensorisch erfassbare Messgrößen und deren Einsatzmöglichkeiten in der *In-situ*-Sanierung/Grundwassermonitoring

mit moderner Datenbustechnologie digital erfasst werden und, wenn gewünscht, in Sekundentaktung erhoben und per Funk fernübertragen werden können (Tabelle 1).

Anhand der folgenden Praxisbeispiele wird der Einsatz von *In-situ*-Sensormessnetzen zur Prozessanalyse und Verfahrenssteuerung von *In-situ*-Prozessen veranschaulicht.

### Analyse des Wirkungsradius einer Zirkulationsbrunnentechnik (ROI-Analyse)

An einem Standort, der ausschließlich mit den LCKW-Komponenten cis-Dichlorethen (cDCE) und Vinylchlorid (VC) verunreinigt war, kam eine *In-situ*-Grundwassersanierung mit biologischem Wirkprinzip zum Einsatz. Biologische Laboruntersuchungen an diesem Standort hatten gezeigt, dass sich die Komponenten cDCE und VC durch Stimulation methylotherer Mikroorganismen unter Zugabe von Sauerstoff und Methanol als Kohlenstoffquelle effizient abbauen ließen. Um am stark überbauten Standort bei der *In-situ*-Behandlung Austritte leichtflüchtiger Schadstoffe cDCE und VC in die ungesättigte Bodenzone weitestgehend zu minimieren, war vorgesehen, die zuzuführenden Wirkstoffe Sauerstoff und Methanol mithilfe einer Zirkulationsbrunnentechnik effizient im Feld zu verteilen. Eine in einen Brunnen (DN 100) installierte Umwälzpumpe förderte Wasser aus dem oberen Teil des Brunnens in den unteren Teil des Brunnens. Aus zwei Dosierpumpen wurde dem Förderstrom zusätzlich Wasserstoffperoxid sowie Methanol zugesetzt. Zur Erhöhung der hydraulischen Wirksamkeit dieses Verfahrens wurde der mittlere Filterbereich in einer Tiefe zwischen 6,0 und 8,0 m u. GOK durch eine Packertechnik hydraulisch abgedichtet. Zur Reichweitenanalyse dienten im Umfeld des Zirkulationsbrunnens in unterschiedlichen Teufenbereichen kombinierte Redox-/Temperatursensoren als aquiferintegrierte Sensorketten (AISK). Mithilfe der stündlich aufgezeichneten Daten erfolgte anschließend die Analyse der Reichweite der Wirkstoffverteilung in Form des Redoxpotenzialanstiegs durch die Wasserstoffperoxidzugabe bzw. dessen Sauerstofffreisetzung (Bild 2).

Im Ergebnis zeigte sich, dass die Aerobisierung im unteren Teil des Aquifers im Infiltrationsbereich der sauerstoffhaltigen Wirkstofflösung bereits nach zwei Betriebs-tagen bis in 4 m Entfernung fortgeschritten ist. Nach sieben Tagen erreichten die Wirkstoffe bereits den unteren Redoxsensor in 8 m Entfernung zum Eintragungspunkt. Die Entwicklung der Aerobisierung im oberen Teil des Aquifers schritt dagegen deutlich langsamer voran. Erst nach 40 Betriebs-tagen wurde der obere Sensor in 4 m Entfernung zum Eintragungspunkt erreicht, der 8 m entfernte, obere Redoxsensor wurde inner-

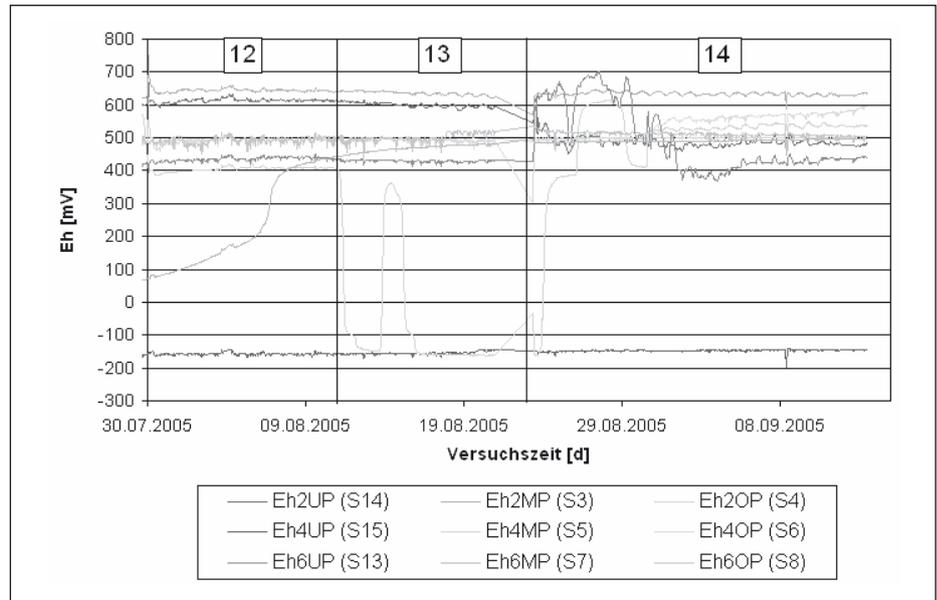
halb des Beobachtungszeitraumes von 45 Tagen nicht erreicht. Die sensorgestützte Reichweitenanalyse ergab demzufolge eine bevorzugte Ausbreitung der Wirkstoffe in der tiefer gelegenen Injektionsebene. Im oberen Teil des Aquifers wurde erst zeitverzögert eine Reichweite von ca. 4 m vom Eintrittspunkt entfernt nachgewiesen.

### Analyse von Sauerstoff-Direktgaseinträgen zur Steuerung von Gaswänden

Direktgasinjektionen von Reinsauerstoff haben sich als eine sehr effiziente und ökonomische Methode zur aeroben *In-situ*-Behandlung kontaminierter Grundwasserleiter erwiesen. Sie sind hinsichtlich der erzielbaren Wirkstoff-Reichweiten, Wirkungsgrad und Betriebskosten den reinen Luftinjektionsverfahren, wie z. B. dem klassischen Airsparging-Verfahren, überlegen. In einem Berliner Gaswandprojekt, das als Biooxidationswand betrieben wird, sollte nun durch den Einsatz eines Messnetzes von aquiferintegrierten *In-situ*-Sensoren die Gasausbreitung in einem geschichteten Aquifer in seiner räumlichen und zeitlichen Dynamik analysiert werden, um Bewirtschaftungsparameter für den Betrieb der Gaswand festzulegen (**Bild 3**).

Die Gaswand wurde auf einer Breite von ca. 50 lfdm quer zur Grundwasserströmungsrichtung im Wesentlichen durch drei Stück Multilevel-Gasinjektionslanzen aufgebaut, die bis in 25 m Tiefe unter Flur ausgebaut und mithilfe spezieller Dichtmassenverpressung gasdicht abgedichtet wurden. Bedingt durch die hohen erwarteten Reichweiten der Sauerstoffausbreitung wurden *In-situ*-Redoxsensoren in Abständen von wenigen Metern bis 12 m vom Gaseintragspunkt in verschiedenen Teufenbereichen jeweils in den Gasspeicherhorizonten errichtet. Die Datenaufzeichnung erfolgte durch ein CANBUS-gestütztes, digitales Messnetz mit einer Datenaufzeichnungsfrequenz von 15 Minuten.

Nach Inbetriebnahme der Gaswandtechnik kam es bereits nach wenigen Tagen zu



**Bild 3:** Analyse des Sauerstoff-Gastransportes im Aquifer anhand von Sensorsignalen

starken Reaktionen des Redoxpotenzials in den Monitoringebenen. In einigen Gasspeicherhorizonten wurden schnelle Redoxanstiege  $> 300$  mV/d analysiert, die nicht mit dem Transport gelösten Sauerstoffs mit dem Grundwasser, sondern nur durch den Sauerstofftransport über kohärente Gaskanäle erklärbar sind. In anderen Monitoring-Bereichen stiegen die Sauerstoffgehalte dagegen langsamer ( $< 30$  mV/d) an, was auf einen inkohärenten Sauerstofftransport vorwiegend als gelöster Sauerstoff mit dem Grundwasser zurückgeführt wurde. Durch die genaue Kenntnis der räumlich/zeitlichen Sauerstoffausbreitung im Aquifer konnte eine Gewichtung der einzelnen Gaseintragspunkte hinsichtlich der Sauerstoffinjektionsraten, der Injektionsintervalle und Ruhephasen festgelegt werden. Die erfolgreichen Systemtestergebnisse der Versuchsanlage wurden umfassend bei der Konzeption der Pilotanlage berücksichtigt. Aktuell wird die Biowand-Pilotanlage auf einer Breite von ca. 100 m und einer maximalen Tiefe von 50 m im Vorfeld einer Trinkwassergewinnungsanlage betrieben. Das *In-situ*-Messnetz in der Pilotan-

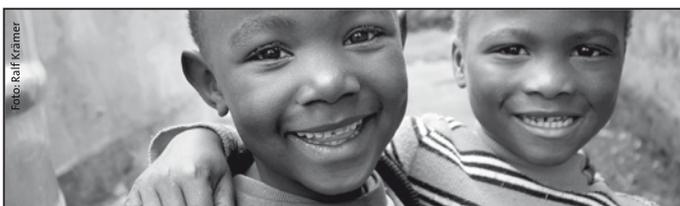
lage wird dabei als automatisiertes Online-Überwachungssystem zur räumlich-zeitlichen Analyse der Effizienz des Gaseintrages am Standort genutzt.

### Fazit

*In-situ*-Messnetze ermöglichen Prozessanalysen biologischer und chemischer *In-situ*-Reaktionen mit einer engen räumlichen und zeitlichen Auflösung. Die Wahl der jeweils geeigneten Sensorüberwachungssysteme sollte sowohl in Abhängigkeit von der Verfahrenstechnik als auch von dem spezifischen Wirkstoffverteilungsmechanismus getroffen werden. Eine sensorgestützte Prozessanalyse ist vor allem dann sinnvoll,

- wenn Prozesse in einer komplexen geologischen Struktur räumlich und zeitlich analysiert werden müssen,
- wenn dynamische Prozesse im Grundwasser besonders schnell, d. h. innerhalb weniger Tage oder schneller, ablaufen
- wenn Prozesse eine hohe Messgenauigkeit und Reproduzierbarkeit erfordern. ■

▼ Weitere Informationen [www.vfv1.de/#2338430](http://www.vfv1.de/#2338430)



## Friedensstifter

Sie für Ihr Patenkind.  
Ihr Patenkind für seine Welt.

Eine Patenschaft bewegt.  
Werden Sie Pate!

Rufen Sie uns an:  
**0180 33 33 300**  
(9 Cent/Min. aus dem dt. Festnetz,  
ggf. abweichender Mobilfunktarif)



Kindernothilfe e. V. · Düsseldorf Landstr. 180 · 47249 Duisburg · [www.kindernothilfe.de](http://www.kindernothilfe.de)