

ÖVA-Nachlesepublikationen sollen wesentliche Inhalte eines ÖVA-Technologieworkshops zu einer ausgewählten innovativen Technologie zusammenfassen und sollen die Akzeptanz und den Einsatz der Technologie zum Management von kontaminierten Standorten in Österreich unterstützen. ÖVA-Nachlesepublikationen werden unter ([www.altlastenmanagement.at](http://www.altlastenmanagement.at)) der interessierten Öffentlichkeit zur Verfügung gestellt.

## Technologien zur Einbringung und Verteilung von Stoffen in den Untergrund und Möglichkeiten zum Nachweis der Verteilung und der Erfolgskontrolle am 5. November 2015 in Wien

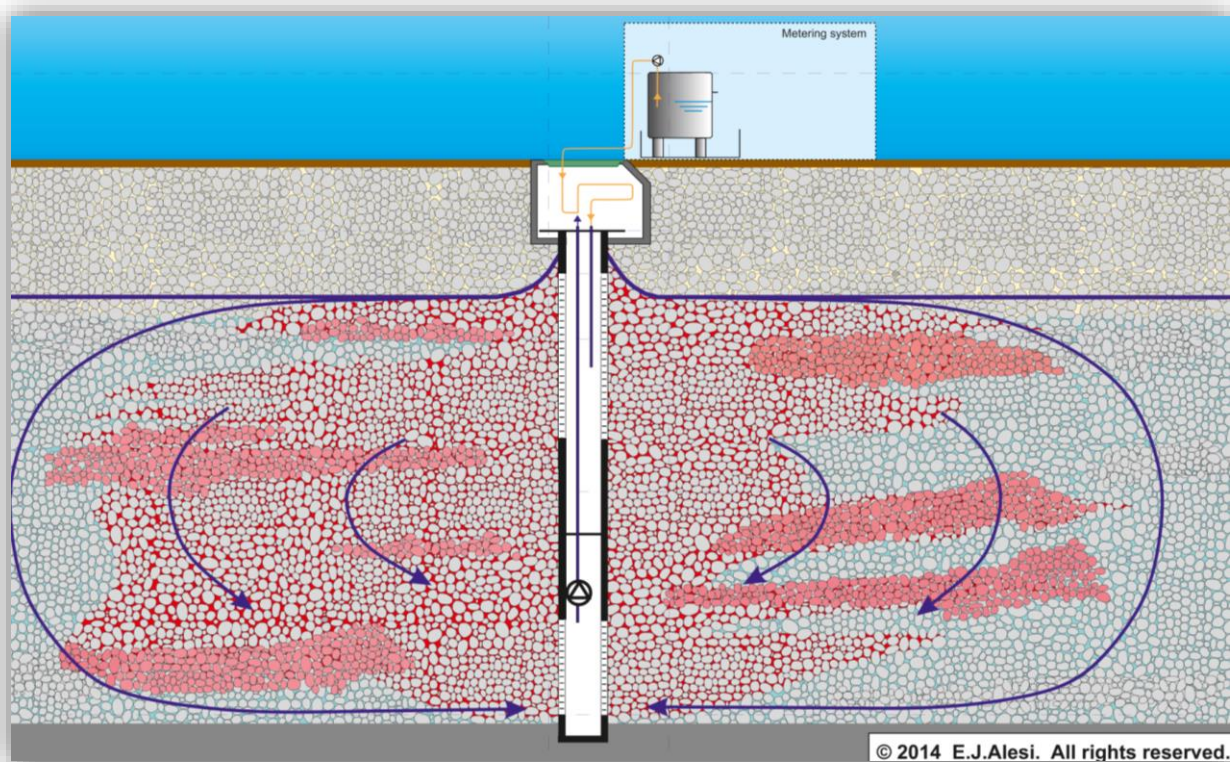


Abbildung 1: Grundwasserzirkulationsbrunnen der Firma IEG Technologie (IEG-GCW®)

### VORWORT

Der Österreichische Verein für Altlastenmanagement hat sich zum Ziel gesetzt, innovative Sanierungstechnologien, die in Österreich bisher noch nicht oder nur selten eingesetzt wurden, vorzustellen und deren Einsatzmöglichkeiten und Einsatzgrenzen zu diskutieren, um damit die Akzeptanz dieser Methoden für zukünftige Anwendungen zu erhöhen. In diesem Rahmen fand der ÖVA-Technologieworkshop "Technologien zur Einbringung und Verteilung von Stoffen in den Untergrund und Möglichkeiten zum Nachweis der Verteilung und der Erfolgskontrolle" am 5. November 2015 in Wien statt.

Diese Nachlesepublikation fasst den Inhalt der Veranstaltung sowie die wesentlichen Diskussionspunkte zusammen und will darauf aufbauend ein Fazit für die Voraussetzungen und die Machbarkeit von Technologien zur Einbringung und Verteilung von Stoffen im Zuge von In-situ-Sanierungsverfahren geben. Für eine detaillierte inhaltliche Darstellung der Tagung wird auf den Tagungsband verwiesen, der von der Homepage des ÖVA kostenlos zu beziehen ist (<http://www.altlastenmanagement.at/>). Dort finden sich auch Druckversionen von Originalvorträgen.

## INHALTLICHE ZUSAMMENFASSUNG DER EINZELVORTRÄGE UND DER DISKUSSION

### IN-SITU-SANIERUNG UND WIRKSTOFFVERTEILUNG – STRUKTURELLE HETEROGENITÄT, HYDRAULISCHE UND PNEUMATISCHE PROZESSE IM AQUIFER

*(STEPHAN HÜTTMANN, SENSATEC GMBH, KIEL)*

Im Einführungsvortrag wurde die Verteilung gasförmiger und flüssiger Wirkstoffe primär im Zuge von biologischen In-situ-Sanierungsverfahren thematisiert. Dabei wurden grundlegende Prozesse, Technologien und Herausforderungen beleuchtet.

Zunächst wurde die **Verteilung gasförmiger Wirkstoffe** anhand der Zugabe von Luftsauerstoff in kontaminierte Grundwasserleiter zur Biostimulation aerober Abbauprozesse von organischen Verbindungen erörtert. Diese relativ einfache Technologie wird schon seit den 1970er Jahren angewandt. Komplexere Prozesse, wie die Strippung leichtflüchtiger Schadstoffe oder auch dynamischen Prozesse der Gasausbreitung in heterogener Stratigraphie, werden jedoch erst in jüngerer Zeit berücksichtigt.

Weiters wurde die Dynamik der Gasausbreitung im Aquifer diskutiert. In grobporigen Strukturen lassen sich teilweise beachtliche Reichweiten insbesondere für die Sauerstoffversorgung realisieren. Dagegen ist eine Verteilung von Gasen in feinporigen Bodenstrukturen aufgrund der hohen Kapillarspannung eher begrenzt. Dementsprechend eignen sich gasförmige Wirkstoffeinträge gut zum Aufbau aerober, biologischer Barrieren, weniger gut jedoch für die Quellensanierung von geologisch stark strukturierten Aquiferen, in denen Schadstoffe bereits in feinporige Strukturen hinein diffundiert sind.

Die **Verteilung flüssiger Wirkstoffe** spielt im Grundwasserleiter insbesondere bei der Realisierung biologisch-reduktiver Verfahren, z.B. für die Biostimulation anaerober Abbauprozesse, als auch für chemisch-oxidative Verfahren (ISCO) eine wichtige Rolle. In seiner einfachsten Form erfolgt eine Eingabe flüssiger Wirkstoffe über periodische Infiltrationen in Brunnen oder Infiltrationslanzen. Die räumliche Verteilung dieser Wirkstoffe erfolgt rein passiv, d.h. ausschließlich durch die natürliche Grundwasserströmung. Die Reichweite ist selbst bei Realisierung relativ großer Injektionsvolumina meist sehr gering. In der Sanierungspraxis wurden daher verschiedene Technologien entwickelt, um die Wirkstoffinfiltration zu verbessern, wie z.B.:

- Dynamischen Druckinjektion (DDI)
- Einsatz von „sheer-thinning fluids“, wie z.B. Xanthan
- In-situ-Techniken mit aktiver, hydraulischer Verteilung der Wirkstoffe
- Grundwasserzirkulationsbrunnen

Als **Fazit** des Vortrages wurde festgehalten, dass der Frage der Wirkstoffverteilung im Rahmen von In-situ-Sanierungsverfahren eine erfolgsentscheidende Bedeutung zukommt. Dabei ist grundsätzlich zu unterscheiden zwischen der Werkstoffeinbringung zur Quellensanierung mit der Forderung zur Abreicherung aller schadstoffhaltigen Porenraumstrukturen und der Fahnensanierung mit der Forderung zur Abreicherung lediglich der gut durchlässigen, frachtwirksamen Strukturen.

Die geologische Struktur gibt den Rahmen des jeweils technisch Machbaren vor. Wirkstoffzugaben in flüssiger Form sollten technisch so realisiert werden, dass nicht nur die leicht durchströmbaren Grobporenstrukturen von den Wirkstoffen erreicht werden, um die Vorteile der In-situ-Techniken gegenüber herkömmlichen Pump-and-Treat-Strategien auszunutzen.

## ERFAHRUNGEN MIT DER IN-SITU-SANIERUNG VON LCKW-GRUNDWASSERBELASTUNGEN UNTER VERSCHIEDENEN GEOLOGISCHEN RAHMENBEDINGUNGEN

*(SASCHA WINKLER, SENSATEC GMBH, KIEL)*

Im zweiten Vortrag des Einführungsblocks wurden praktische Erfahrungen bei der In-situ-Sanierung eines LCKW-kontaminierten Aquifers aufgezeigt:

An einem Standort in Norddeutschland wurde nach mehrjähriger Infiltration einer gelösten Kohlenstoffquelle (Melasse) keine wesentliche Verbesserung bezüglich des LCKW-Abbaus mehr erzielt. Trotz geeigneter Rahmenbedingungen (Eh, pH, DOC) konnte weder eine Gesamtgehaltsabnahme noch eine Komponentenverschiebung zu niedrig chlorierten LCKW-Metaboliten erzielt werden. Daher wurden sowohl die Auswahl eines geeigneten Cosubstrates sowie dessen Einbringe- und Verteilungstechnik an die individuellen Standortbedingungen angepasst.

Im Rahmen einer Laboruntersuchung wurde die Reaktion der standorteigenen Mikroorganismen auf unterschiedliche Kohlenstoffquellen untersucht (**Cosubstratscreening**). Als Konsequenz dieser Versuche wurde für die Sanierung das Cosubstrat am Standort auf die C-Quelle „Molaferm“ umgestellt.

Generell ist bei der Auswahl eines geeigneten Cosubstrates neben dem mikrobiellen Nutzungsprofil auch die geologische Beschaffenheit des Grundwasserleiters zu beachten. Bei geringen GW-Fließgeschwindigkeiten kann es sinnvoll sein ein langzeitwirksames Cosubstrat einzusetzen. Sofern Residualphase vorliegt, kann ein biologischer Lösungsvermittler mit dem Cosubstrat kombiniert verwendet werden. Für die Sanierung stark bindiger Böden mittels Elektrokinetik ist der Einsatz polarer Cosubstrate erforderlich.

Neben der Auswahl des geeigneten Cosubstrates ist auch dessen **Einbringe- und Verteilungstechnik** von zentraler Bedeutung für eine erfolgreiche Sanierung. Zur besseren Einschätzung der geologischen Rahmenbedingungen am Beispielstandort wurde ein Pumpversuch inkl. Tracertest durchgeführt. Um den gesamten zu sanierenden Bereich homogen mit Wirkstoffen zu versorgen, wurde anhand der gewonnenen Daten ein detailliertes Infiltrations- und Entnahmekonzept erstellt. Durch eine aktive Zirkulation unter kontinuierlicher Kontrolle chemischer Begleitparameter (pH, Lf, O<sub>2</sub>, Eh, Fe<sub>ges</sub>, FeII<sup>+</sup>, Sulfat) konnte im o.g. Fall der gesamte Sanierungsbereich mit Wirkstoffen versorgt werden. Als Folge konnten im zu sanierenden Bereich alle

zum anaeroben mikrobiologischen LCKW-Abbau relevanten Begleitparameter auf das gewünschte Niveau eingestellt werden und es wurde ein schneller LCKW-Abbau bis zum chlorfreien Produkt Ethen erreicht.

Die Wirkstoffversorgung wurde sanierungsbegleitend überwacht (DOC-Analytik). Dadurch konnte auf Über- bzw. Unterversorgung unmittelbar mit Anpassung des Entnahme- und Reinfiltrationskonzeptes sowie der Wirkstoffeingabe reagiert werden.

**Zusammenfassend** wurde festgehalten: Um den Erfolg einer Sanierungsmaßnahme zu maximieren ist zu beachten, dass sich die Cosubstrate hinsichtlich ihrer Biostimulationswirkung und Eignung für die Anwendung am Standort unterscheiden. Daher sollten das optimale Substrat mittels Laborversuche ausgewählt werden. Des Weiteren ist die Auswahl einer geeigneten Verteilungsstrategie für einen flächendeckenden mikrobiologischen Schadstoffabbau entscheidend.

Die Sanierungsstrategie soll idealerweise im laufenden Sanierungsbetrieb immer umstell- und anpassbar sein, um auf Änderungen der Rahmenbedingungen schnell reagieren zu können.

## VERTEILUNG VON NÄHRSTOFFEN IM GRUNDWASSER MITTELS GRUNDWASSER-ZIRKULATIONS-BRUNNEN

*(GERT REHNER - IEG TECHNOLOGIE, GRUBINGEN- STUTTGART)*

In diesem anwendungsorientierten Vortrag wurden zunächst Transportprozesse im Aquifer beleuchtet. Dabei wurde unter anderem aufgezeigt, dass eine In-situ-Sanierung nur dann effektiv ist, wenn es gelingt, Reagenzien (Nährstoffe, Oxidations- oder Reduktionsmittel), Bakterien und Schadstoffe in möglichst direkten Kontakt zueinander zu bringen und die Stoffwechselprodukte abzuführen.

Im zweiten Teil wurde die Technologie des Grundwasserzirkulationsbrunnens vorgestellt. Dabei entsteht im Umfeld des Brunnens eine dreidimensionale Zwangszirkulation im Grundwasserleiter, mit der sich Reagenzien weit besser als mit anderen Systemen verteilen lassen. Die ausgeprägten vertikalen Strömungskomponenten verstärken das Konzentrationsgefälle zwischen besser und schlechter durchlässigen Bodenzonen. Zusätzlich bewirkt die Zirkulation den Transport von weiter entfernt befindlichen Schadstoffen in die reaktive Zone, wo sie einem kontinuierlichen Abbau unterzogen werden können.

Die Grundwasserzirkulationsbrunnen der Firma IEG Technologie (GCW®) wurden ursprünglich für die Strippung von flüchtigen Schadstoffen entwickelt, lassen sich mittlerweile jedoch mit allen möglichen Anwendungen kombinieren (Adsorption, Ionenaustausch, Elektrochemie, ISCO, Verteilung von Nährstoffen, Milieuänderung etc.).

Im abschließenden Teil des Vortrages wurden 3 Fallbeispiele mit dieser Technologie gezeigt:

- Bei einem LHKW-Schadensfall in Niedersachsen wurde zunächst das direkte Umfeld des Schadensherdes mittels GCW® und Satellitenbrunnen saniert. Bei weiteren Erkundungen zeigte sich ein bislang unbekannter, stark kontaminierter Fahnenbereich. Die ursprüngliche Herdzone ließ sich innerhalb weniger Jahren komplett abreinigen. Für den Fahnenbereich kam eine biologische in-situ-Sanierung mit einem speziellen Mix aus Kohlenhydraten, Eiweißverbindungen, Mineralstoffen und Vitaminzusätzen zum Einsatz.



- Bei einem großflächigen LHKW-Schadensfall in Berlin wurden insgesamt 33 GCW® in hexagonaler Gitteranordnung installiert. Die Feld- und Laboruntersuchungen zeigten, dass die reduktive und die oxidative Dechlorierung simultan im Aquifer ablaufen. Dabei dient das anaerob erzeugte Ethen als Auxiliärsubstrat für ethenoxidierende Mikroorganismen in den mehr aeroben Bereichen. Die Systeme wirken als Verteiler. In einigen überwiegend im anaeroben Milieu arbeitenden Brunnen wurden Nährstoffe eingegeben. Es ließen sich insgesamt rd. 142 t LHKW und BTEX aus dem Grundwasser entfernen. In 95 % der Messstellen wurde der behördlich festgelegte Sanierungszielwert erreicht.
- Ein LHKW-Schadensfall in Südostasien wurde zunächst mit 8 GCW® als hydraulische Barriere abgesichert. Dort erfolgte die Reinigung des Wassers mittels Kompaktstrippereinheiten und nachfolgender Abluftreinigung mittels Luft-Aktivkohle. Später wurden weitere 9 Zirkulationssysteme zur anaerob-reduktiven Dechlorierung in den stark belasteten Kernzonen installiert. Insgesamt wurden ca. 180 t Nährstoffe infiltriert. Das Porenwasser der belasteten Bereiche wurde durchschnittlich etwa 16-mal ausgetauscht. Mikrobiologische Untersuchungen belegen eine intensive biologische Aktivität, die zu nachhaltigen Konzentrationsabnahmen aller LHKW-Komponenten führt.

## DIE EINBRINGUNG VON STOFFEN IN DEN UNTERGRUND MITTELS VERFAHREN AUS DEM SPEZIALTIEFBAU

*(PETER FREITAG - KELLER GRUNDBAU GES.MBH, WIEN)*

Nicht nur im Fachgebiet der Altlastensanierung, auch in der Geotechnik ist man häufig mit der Aufgabenstellung konfrontiert, unterschiedliche Substanzen effektiv in den Boden einbringen zu müssen. In diesem Vortrag wurden Verfahren aus dem Spezialtiefbau und deren Anwendungsmöglichkeiten im Altlastenbereich vorgestellt.

Die Verfahrensgruppe der **Niederdruckinjektionen** ist wohl die im Altlastenmanagement am häufigsten anzutreffende, wobei anstatt von Suspensionen meist verschiedenste Arten von Lösungen (z.B. Permanganat, Melasse) injiziert werden. In der Geotechnik werden Niederdruckinjektionen für Abdichtungsaufgaben (Dichtschirme) und für die Erhöhung der Bodensteifigkeit (z.B. für Gründungen und Gründungsverstärkungen) verwendet. In der Anwendung unterscheiden sie sich untereinander vor allem hinsichtlich der eingesetzten Injektionsgüter, die je nach Anwendungszweck und Bodenverhältnissen speziell ausgewählt werden.

**Hochdruckinjektionen** kommen überall dort zum Einsatz, wo klassische Niederdruckinjektionen aus bodenmechanischen Gründen nicht einsetzbar sind. In der Geotechnik wurde das Verfahren adaptiert, um Injektionsgut auch in feinkörnigen Böden einbringen zu können. Durch mehrmaliges Verpressen entstehen jeweils neue Wegigkeiten, in die die Suspension eindringen kann und dort erhärtet. Es bilden sich somit verfestigte Bodenbereiche. Im Altlastenbereich wurde das Verfahren in Österreich bisher nur vereinzelt, z.B. bei der Räumung einer Deponie eingesetzt, um angrenzende Bebauung zu sichern. Genauso denkbar wäre auch eine Anwendung, um in Ton- und Schluffhorizonten durch die Einbringung von Sanden in die Fracks, Wegigkeiten für eine weitere Behandlung zu schaffen.

Das Düsenstrahlverfahren (DSV) ist der wichtigste Vertreter der **hydraulischen Bodenmischverfahren**. Dabei wird der Boden mittels eines Schneidstrahls aus Wasser oder Zementsuspension, der am unteren Ende eines Bohrgestänges austritt, unter hohem Druck aufgeschnitten und mit der Suspension vermischt. Eingesetzt wurde dieses Verfahren bereits einige Male, um Altölschäden zu immobilisieren. Auch die Herstellung einfacher Funnel

and Gate Systeme ist durch die Anpassung der Suspensionsrezeptur (Einmischung durchlässigkeitserhaltende Füllstoffe) möglich. Eine Adaptierung für den Einsatz zur In-situ-Sanierung von CKW-Schäden mittels Einbringung eines Reduktionsmittels ist im Rahmen des Forschungsprojekts HALOCRETE erfolgt.

Auch bei den **mechanischen Mischverfahren** wird eine Suspension mit dem anstehenden Boden vermischt. Diese Vermischung geschieht aber durch mechanische Werkzeuge wie Paddel oder Schnecken, die an einem Gestänge angebracht sind. In den USA gibt es auch Erfahrungen bei der Sanierung von CKW-Altlasten durch das Einmischen von nullwertigem Eisen und Ton.

**Zusammenfassend** wurde festgehalten, dass alle hier vorgestellten Verfahren bereits seit vielen Jahren in der Geotechnik erfolgreich im Einsatz und erprobt sind. Ob eine Adaptierung zum Einsatz abseits bekannter Pfade für die In-situ-Sanierung von kontaminierten Standorten machbar und sinnvoll ist, muss von Fall zu Fall entschieden werden. Das Potential für innovative Anwendungen wäre jedenfalls vorhanden.

## KONZEPTION, KONTROLLE UND ERFOLG BEI ALTLASTENMAßNAHMEN

*(DIETMAR MÜLLER-GRABHERR - UMWELTBUNDESAMT, WIEN)*

Für die Wirksamkeit und damit den Erfolg von Maßnahmen bei Altlasten sind drei Prozesse entscheidend,

- (i) die Konzeption (Planungsphase),
- (ii) die Ausführung (Errichtung und Betrieb) und
- (iii) Kontrolle (Überwachung von Prozessen und Emissionen).

In Bezug auf In-situ-Maßnahmen und insbesondere Technologien zur Einbringung und Verteilung von Stoffen im Untergrund kommt einer guten (komplementär!) Abstimmung dieser drei Prozesse besondere Bedeutung zu. Umfassendes technisch-naturwissenschaftliches Know-how einerseits muss auf standortspezifische Informationen andererseits abgestimmt werden.

Entscheidend für die **Konzeption** sind die Schlagworte „Standortmodell“ und „Maßnahmenziel“. Für die Erstellung von Standortmodellen ist auf das entsprechende Kapitel in ÖNORM S 2088-2 zu verweisen. Vereinfacht zusammengefasst geht es dabei um die Definition des Problems, v.a. der „Quellarchitektur“ (Wo „sitzen“ die Schadstoffe?) bzw. dem Aufbau eines guten Prozess- und Systemverständnisses. Für die Verteilung von Stoffen im Untergrund von besonderer Bedeutung ist die Identifikation von „hot-spots“, von feinkörnigen und gering durchlässigen Schichten sowie von Grenzflächen, z.B. Schichtgrenzen oder auch zwischen Redoxzonen. Da im allgemeinen Bohr- und Analytikdaten nur in begrenztem Umfang vorliegen, ist die Beschreibung und Qualifizierung von Unsicherheiten nachvollziehbar zu dokumentieren.

Unmittelbar auf das Standortmodell setzt dann auch die Definition von „Maßnahmenzielen“ auf, die in Form von 2 Schritten erfolgt: der allgemeinen Beschreibung des Ziels als „notwendige“ Umweltqualität in Boden und Grundwasser sowie der Zielkriterien/-werte als messbare, quantitative Kontrollgrößen (als Funktion der Zeit).

In Bezug auf **Kontrolle** kann eine Unterscheidung zwischen dem Standort (als „Reaktionsraum“) und der Umgebung zweckmäßig sein. Am Standort steht dabei die Überwachung von Prozessen, ihrer Stabilität und Entwicklung im Vordergrund. Um relevante Parameter und Prozessparameter bei In-situ-Maßnahmen effizient

zu überwachen, besteht Bedarf neue Monitoringansätze zu diskutieren und in den letzten Jahren entwickelte Technologien für die Anwendung im Feld zu prüfen. Die Überwachung in der Umgebung wird weiterhin oft in der Form eines klassischen Monitorings (z.B. Grundwasser oder Bodenluft) ausgeführt werden können und im Wesentlichen die Funktion einer Erfolgskontrolle erfüllen.

Die gezielte (und überwachte) Unterbrechung von Sanierungsmaßnahmen kann wesentliche Vorteile zur Optimierung einer Sanierung bringen. Um zeitnahe und flexible Anpassungen zu unterstützen, sollte dabei die Verantwortung in Form der Eigenkontrolle vor allem dem Sanierungsverantwortlichen übertragen sein.

Durch die laufende Überprüfung der Entwicklung und des Fortschritts von Schadstoffgehalten und Prozessen werden gleichzeitig auch qualifizierte Ausblicke auf den Erfolg, d.h. den Abschluss von Maßnahmen möglich. Die Auswertung der Daten und Diskussion der Wirksamkeit und wiederum insbesondere bei In-situ-Maßnahmen der zeitlichen Entwicklung des Wirkungsgrades sollte im Kreise der Beteiligten in Form regelmäßiger „Maßnahmenaudits“ erfolgen. Die Häufigkeit wird dabei von Komplexität und Dauer eines Vorhabens abhängen.

## VOM LABOR INS FELD: EINMISCHEN REAKTIVER STOFFE IN EINEN AQUIFER MITTELS GRUNDWASSERZIRKULATION

*(HANS-PETER KOSCHITZKY & OLIVER TRÖTSCHLER - VEGAS, STUTTGART)*

Am Beispiel des KORA-Feldstandorts „Testfeld Süd“ im Neckartal in Stuttgart wurde die Auswahl und Erprobung einer zielgerichteten und wirkungsvollen Zugabetechnik für die gleichmäßige Verteilung von Sauerstoff in einem Aquifer zur Stimulierung des natürlichen Abbaus (ENA, Enhanced Natural Attenuation) aufgezeigt.

Basierend auf den Ergebnissen einer **Literaturstudie** kamen für die Standort- und Schadstoffcharakteristik (gut durchlässiger Aquifer, BTEX, PAK und NSO Heterozyklen) für eine wirtschaftliche und weitreichende Einmischung einer Nährlösung Grundwasserzirkulationsbrunnen (GZB) und Multilevelinjektionsbrunnen (MLB) in Frage.

Die Beurteilung von GZB und MLB für die Anwendbarkeit am Standort erfolgte zunächst in kleinskaligen „**Küvettenexperimenten**“ (2-D Strömungsuntersuchungen mit Tracertests) die durch numerische Strömungsberechnungen (MODFLOW, GSM4.0) ergänzt wurden. Der direkte Vergleich beider Systeme zeigte eine deutliche Erhöhung der Quervermischung in der Grundwasserströmung (Querdispersion) durch den GZB.

Die praktische Anwendbarkeit der Injektionstechnik wurde mit dem Betrieb eines Prototyps in einem Langzeitversuch im **technischen Maßstab** in der „Großen Rinne“ (Aquiferabmessungen mehrere Meter) bei VEGAS getestet. Während des Langzeitversuchs wurde der biologische Abbau von heterozyklischen Kohlenwasserstoffen mit Zugabe von Wasserstoffperoxid stimuliert (ENA) und der Nachweis der Abbausteigerung unter naturnahen Bedingungen erbracht. Ein numerisches Modell wurde über die Tracertests in der „Großen Rinne“ parametrisiert und diente zur Auslegung einer Pilotanwendung im Feld.

Die **Pilotanwendung** am KORA-Standort „Testfeld Süd“ gliederte sich in mehrere Versuchsabschnitte. Nach Ermittlung der Schadstofffrachten und der räumlichen Konzentrationsverteilung der NSO-HET und PAK, folgten die Adaption der Standortorganismen an aerobe Verhältnisse (3 Wochen) und eine Reichweitenbestimmung über Tracertests (3 Monate). Die Initialisierung und Steigerung des aeroben biologischen Abbaus (6 Wochen) bis zu dessen Konstanz im hydraulisch kontrollierten Reaktionsraum (5 Monate) folgten. Die Ermittlung der Schadstofffrachten über Immissionspumpversuche (IPV) und Konzentrationsverteilung bildeten den Abschluss

Aus der aufgezeigten Vorgehensweise ließ sich folgendes **Fazit** ziehen: Durch die gleichmäßige Einmischung und Verbreitung von Sauerstoff in den Aquifer mittels der H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>-Zugabe über den GZB konnte das Ziel einer deutlichen und konstanten Reduzierung der Schadstofffrachten im Rahmen der Pilotanwendung am Standort innerhalb von 6 Monaten erreicht werden. Die Schadstoffkonzentrationen im Wirkungsbereich der Pilotanwendung (Fahnenbreite ca. 20 - 30 m) konnten zwischen 55 und 80% reduziert werden.

Problematisch für den Einsatz des GZB bzw. aller Injektionsmethoden von Wasserstoffperoxid (Sauerstoff) ist ein hoher Eisengehalt im Grundwasser. Die damit einhergehende Verockerung des Filternahbereichs führte zu einem starken Rückgang des infiltrierbaren, mit Wasserstoffperoxid versetzten Grundwassers. Die infiltrierbare Grundwassermenge sank stark ab. Als praktikable Methode zur Steigerung und Aufrechterhaltung der erforderlichen Mindestfördermenge hat sich neben dem Einsatz von Filterelementen die Installation bzw. Nutzung von zusätzlichen kleinskaligen Infiltrationsbrunnen im unterstromigen Bereich der Zirkulationswalze des GZB erwiesen. Der Betrieb des GZB war für den untersuchten Bereich des Testfeldes Süd in Folge der hohen Eisengehalte im Grundwasser personal- und damit auch kostenintensiv.

## STRATEGIEN UND METHODEN ZUM NACHWEIS DES SANIERUNGSERFOLGES

*(THOMAS REICHENAUER - AUSTRIAN INSTITUTE OF TECHNOLOGY, TULLN)*

Der abschließende Vortrag verdeutlichte, dass die Anwendung von In-situ-Sanierungstechnologien unweigerlich auch eine entsprechende Weiterentwicklung von spezifischen Erkundungs- und Monitoringmethoden bedingt, die sowohl auf die zu behandelnde Schadstoffgruppe wie auch auf die angewandte Sanierungstechnologie abgestimmt werden müssen. Diese Methoden liefern im Verlauf von Sanierungsmaßnahmen die Datengrundlage zur Erreichung folgender Ziele:

- Erarbeitung eines dreidimensionalen Standortmodells (z.B. Schadstoffverteilung/Quellenarchitektur)
- Festlegung und Überprüfung der Prozessparameter der Sanierung (z.B. Verteilung von Substanzen)
- Quantifizierung der Wirksamkeit der Sanierungsmaßnahmen und Nachweis des Sanierungserfolges

Alle drei Schritte sind notwendig, um einen Sanierungserfolg fundiert nachzuweisen. Im Vortrag wurde auf diese drei Punkte genauer eingegangen.

Das **dreidimensionale Schadensbild** liefert die Referenz, an der die durch die gesetzten Maßnahmen erwarteten Effekte etwa die Abnahme von Frachten und Konzentrationen im Abstrom, oder auch von Schadstoffgehalten innerhalb des Schadensbereiches zu messen sind. Es stellt somit die notwendige Basis für einen soliden Nachweis des Sanierungserfolges aber auch für die Abschätzung des Sanierungsfortschrittes dar.

Um die Machbarkeit einer vorgeschlagenen In-situ-Sanierungsmethode, aber auch die konkreten **Prozessparameter** festlegen zu können, sind Laborversuche zumeist unumgänglich. Die Messungen im Zuge des Monitorings bei In-situ-Maßnahmen dienen dem Ziel die Verteilung der eingebrachten Stoffe (bzw. Energie) und deren Wirksamkeit zu belegen bzw. zu quantifizieren.

Schließlich wird der **Erfolg einer Sanierung** an der Menge der entfernten Schadstoffe gemessen. Dies kann sowohl direkt im Schadensherd wie auch in der Fahne geschehen, je nachdem welche Sanierungsziele und Zielwerte festgelegt wurden. Dabei dient das dreidimensionale Standortmodell mit der Quellenarchitektur bzw.



das während der Sanierungsmaßnahmen möglicherweise angepasste und erweiterte Standortmodell als Referenz. Im Rahmen von Maßnahmen zur „Fahnensanierung“ im Grundwasser ist der Nachweis der Wirksamkeit meist zu erbringen, indem Schadstoffmessungen vor und nach der Maßnahme verglichen werden, die geeignet sind die räumliche Ausdehnung der Fahne zu charakterisieren. Im Falle einer Herdsanierung ist zu beachten, dass in der Regel ein nicht-linearer Zusammenhang zwischen der Verringerung der Schadstoffmasse im Schadensherd und der Verringerung der Schadstofffracht in der Fahne besteht.

Ein fundierter Nachweis des Sanierungserfolges beginnt somit im Idealfall bereits bei der möglichst genauen Erkundung des Schadensherdes und der hydrogeologischen Standortverhältnisse und wird durch ein gezieltes Monitoring der Wirksamkeit der Maßnahmen durch Messung geeigneter Parameter ergänzt. Erkundungs- und Monitoringmethoden die verlässliche Informationen über die während einer In-situ-Sanierungsmaßnahme im Untergrund ablaufenden Prozesse liefern werden daher an Bedeutung gewinnen, wenn es zur vermehrten Anwendung solcher In-situ-Sanierungen kommt.

## **DISKUSSION**

### **WESENTLICHE UND BEMERKENSWERTE PUNKTE DER DISKUSSIONEN**

In der Diskussion wurden zunächst überwiegend anwendungsorientierte Fragestellungen erörtert, wie z.B. die Möglichkeiten der Wirkstoffzugabe und die Grenzen des Machbaren. Dabei wurde diskutiert bis zu welchen geologischen Rahmenbedingungen ein Grundwasser-Zirkulations-Brunnen funktionieren kann. Aufgrund des großen künstlich erzeugten vertikalen Differenzpotentials kann die Zirkulation um den Brunnen auch bei hoher Durchlässigkeitsanisotropie und auch bei kleinräumigen stark bindigen Sedimentschichten gut funktioniert. Die entscheidende Rolle der (hydro)geologischen Heterogenitäten wurde hier auch diskutiert.

Ein anwendungstechnisches Problem beim Einsatz von Wasserstoffperoxid als Oxidationsmittel kann bei hohen Eisengehalten im Grundwasser durch die Verockerung des Filternahbereichs entstehen. Dies kann zu einem starken Rückgang der infiltrierbaren Wassermengen führen. Diese und andere Probleme können die Einbringung von Stoffen aufwändig und kostenintensiv gestalten.

In der Diskussion herrschte Einigkeit darüber, dass mit einer geeigneten Verteilungsstrategie und aktiven Maßnahmen große Vorteile gegenüber dem herkömmlichen gravitativen Einbringen von Wirkstoffen oder auch gegenüber herkömmlichen Pump-and-Treat-Strategien erzielt werden können.

Bemerkenswert war, dass nicht nur Projekte gezeigt wurden, die wunschgemäß verlaufen sind, sondern auch jene Aspekte aufgezeigt wurden, bei denen die Einbringung oder auch die Auswirkung nicht den Erwartungen entsprochen hat. Dies wurde auch in der Diskussion positiv wahrgenommen.

Die Möglichkeiten des Spezialtiefbaues in der Altlastensanierung wurden diskutiert. Die Anwendungsbeispiele in Österreich beschränken sich derzeit überwiegend auf das Verdichten des Untergrundes (für Umschließungen oder Baugrubensicherung). Um die aufgezeigten Potentiale für das direkte Einbringen von Wirkstoffen mit Techniken aus dem Spezialtiefbau auszunutzen, ist eine Zusammenarbeit der unterschiedlichen Disziplinen erforderlich.

## FAZIT FÜR DIE ANWENDUNG

Die geologische Struktur bestimmt maßgeblich die Einsatzgrenzen der jeweiligen Einbringungstechnik. Ganz entscheidend ist dabei nicht nur die Korngröße/Durchlässigkeit selbst, sondern vor allem auch die Heterogenität (Sprünge im  $K_f$ -Wert, horizontale vs. vertikale Durchlässigkeit, bevorzugte Wegigkeiten, Schlufflinsen, etc.).

Um die Wirkstoffe effektiv zu den Schadstoffen zu bringen, sind „aktive“ Maßnahmen erforderlich, wie z.B. Druckinjektionen oder Grundwasserzirkulationsbrunnen. Ein reines „passives“ Einbringen über die Schwerkraft reicht zumeist nicht aus.

Interdisziplinäre Herangehensweisen sind für die Lösung der komplexen Fragestellungen bei In-situ-Sanierungen sehr wichtig. Zum Beispiel sollten die Möglichkeiten des Spezialtiefbaus nicht nur zum Verdichten von Untergrund oder Sichern von Baugruben Verwendung finden, sondern auch für die Einbringung von Wirkstoffen weiterentwickelt werden.

Der Erkundung des Standorts kommt bei allen In-situ-Sanierungen eine große Bedeutung zu. Dabei geht es nicht nur um die konkrete Ermittlung von geologisch/hydrogeologischen und Schadstoffdaten, sondern allgemein um den Aufbau eines guten Prozess- und Systemverständnisses („Konzeptionelles Standortmodell“).

Die laufende Überwachung der Sanierungsmaßnahmen und natürlich der Nachweis des Erfolges sind essentiell. Bei In-situ-Sanierungen wird dabei oft auch eine flexible Herangehensweise gefordert sein. Auf Basis der laufenden Auswertung der Daten sind mit allen Beteiligten Diskussionen über die Wirksamkeit der Maßnahmen (und der zeitlichen Entwicklung der Wirksamkeit) zu führen („Maßnahmenaudits“) und gegebenenfalls die Rahmenbedingungen der Sanierung anzupassen.

## LITERATUR UND WEB-LINKS

Die Literaturhinweise zu den Beiträgen können den Tagungsunterlagen entnommen werden:  
<http://www.altlastenmanagement.at/home/?p=683>

**Autor:** Roman Prantl; blp GeoServices gmbh

**Co-AutorInnen, Diskussion und Fazit:** ÖVA-Experten 2013 – 2015

Die Inhalte der Kurzfassungen zu den Einzelvorträgen wurden mit den jeweiligen Vortragenden abgestimmt und durch diese freigegeben. Eine vertiefte Prüfung der dargestellten Ergebnisse erfolgt durch den ÖVA nicht. Der ÖVA sowie die Experten übernehmen keine Verantwortung für Inhalt und Richtigkeit der Nachlese.