

541 Biologische In-situ-Verfahren

Im Gegensatz zu den *Ex-situ*-Verfahren verbleiben bei der *In-situ*-Sanierung der kontaminierte Boden und im Wesentlichen auch das belastete Grundwasser in ihren standortspezifischen Lagerungsverhältnissen. Ein Aushub von belastetem Bodenmaterial und ein Heben von belastetem Grundwasser sind somit nicht erforderlich. *In-situ*-Verfahren können sich daher auch für die Sanierung von Flächen eignen, bei denen die Zugänglichkeit der kontaminierten Bodenbereiche aufgrund vorhandener Gebäude, Anlagen, Ver- und Entsorgungsleitungen u. ä. stark eingeschränkt ist. Auch eine Überbauung des Sanierungsareals ist nach Errichtung der Sanierungsinfrastruktur prinzipiell möglich.

In-situ-Verfahren können sowohl zur Behandlung der ungesättigten als auch der gesättigten Bodenzone eingesetzt werden und basieren darauf, dass Stoffe ohne ein Bewegen des Bodens oder ein Heben des Grundwassers biologisch, physikalisch oder chemisch behandelt werden, um sie aus dem Boden oder dem Grundwasser zu entfernen, in unschädliche Stoffe umzuwandeln oder deren Ausbreitung zu verhindern.

Bei den biologischen *In-situ*-Sanierungen wird die Stimulierung des aeroben und des anaeroben Schadstoffabbaus unterschieden.

Aerobe biologische Verfahren in der ungesättigten Zone werden als Bioventing bezeichnet. Da eine Bodenluftabsaugung effizienter ist als die Forcierung des mikrobiellen Schadstoffabbaus in der ungesättigten Bodenzone (Bioventing) durch langsame Injektion von Luftsauerstoff, kommt Bioventing kaum zur Anwendung. Dennoch führt eine Bodenluftabsaugung auch zu einer Aerobisierung des ungesättigten Bodens und damit zu einer Forcierung des aeroben Schadstoffabbaus.

Mikrobiologische *In-situ*-Verfahren beschränken sich daher meist auf die wassergesättigte Bodenzone. Ein Beispiel für ein aerobes Verfahren im Grundwasserleiters ist Airsparging. Da damit das Grundwasser aerobisiert und somit eine aerobere Abbau forciert wird, spricht man oft auch von Biosparging. Darüber hinaus kann der Grundwasserleiter auch durch die Injektion chemisch gebundenen Sauerstoffs (allem voran H_2O_2 , das im Aquifer zu Wasser und Sauerstoff zerfällt). Zur Stimulierung des aeroben Abbaus nicht-chlorierter Schadstoffe können neben Sauerstoff auch andere Elektronenakzeptoren zudosiert werden (Kap. 541.2). Chlorierte Kohlenwasserstoffe werden lassen sich i. d. R. besser im anaeroben Milieu dechlorieren. Hier ist die Zudosierung von organischem Kohlenstoff (Elektronendonatoren) erforderlich (reduktive Dechlorierung, Kap. 541.1) (Abbildung 1).

Voraussetzung für alle *in-situ*-Sanierungsverfahren ist die (Bio)Verfügbarkeit der im Untergrund vorhandenen Schadstoffe. Dies bedeutet, dass, vereinfacht ausgedrückt, nur gelöste Schadstoffe abgebaut werden. Die Nachlösung von Schadstoffen durch Auflösung residualer Phasenkörper oder durch Desorption nach dem Ende der aktiven Maßnahmen (Rebound) muss daher bei der Planung der Sanierungsdauer berücksichtigt werden. Erst wenn das Inventar der Schadstoffe weitgehend erschöpft ist, spielt auch der Rebound keine wesentliche Rolle mehr. Um eine gleichmäßige Sauerstoff- und Nährstoffversorgung aller Bodenbereiche zu gewährleisten, ist eine ausreichende hydraulische Durchlässigkeit des Bodens erforderlich. Als Richtwert kann ein k_f -Wert $> 10^{-5}$ m/s (Feinsand) angesetzt werden.

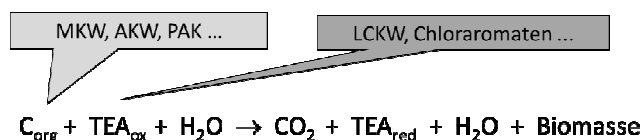


Abbildung 1 Vereinfachtes Schema des Schadstoffabbaus

In vielen Fällen finden sich die zum Abbau der Schadstoffe erforderlichen Bakterien bereits im Untergrund. Es ist dann nur noch erforderlich, die fehlenden „Substrate“ zuzusetzen. Die meisten Schadstoffe dienen den Mikroorganismen als Kohlenstoffquelle. Es werden dann zum Abbau terminale Elektronenakzeptoren (TEA) wie

Sauerstoff, Nitrat oder Sulfat benötigt. Höher chlorierte LCKW oder Chloraromaten können den Bakterien als TEA dienen; in diesem Fall muss organischer Kohlenstoff zugeführt werden.

Daneben werden Nährsalze (meist nur N- und P-Salze) benötigt. Näherungsweise erfordert der aerobe Schadstoffabbau ein C:N:P-Verhältnis von 100:10:1. Wenn die Biomasse aufgewachsen ist, geht der Bedarf an Nährsalzen auf nahezu Null zurück. Als N-Salz wird in der Regel Natriumnitrat und als P-Salz Natriumpolyphosphat verwendet. Liegt der pH-Wert deutlich außerhalb des neutralen Bereiches kann es erforderlich werden, Laugen oder Salze bzw. Puffer zuzudosieren, um einen für den Abbau geeigneten pH-Bereich (6-8) einzustellen.

Diese Supplemente werden in der Regel als wässrige Lösungen in den Grundwasserleiter infiltriert. Eine Ausnahme stellt das Airsparging dar, bei dem der Sauerstoff in Form von Luft in den Grundwasserleiter verpresst wird (Kapitel 520). Die Infiltrationen erfolgen als Pulsinfiltrationen oder mit Hilfe von hydraulischen Kreisläufen (Rezirkulationsschleifen). Bei den Pulsinjektionen ist zu beachten, dass der kontaminierte Grundwasserleiterbereich vollräumlich mit der Supplementlösung beaufschlagt wird. Der Injektionskörper strömt mit der natürlichen Grundwasserbewegung ab und versorgt auch abstromig der Injektionsstelle den Grundwasserleiter mit Supplementen. Dabei ist zu berücksichtigen, dass die Supplemente in der Regel aufgrund von Sorptions- und Zehrungsprozessen nur in einem vergleichsweise kleinräumigen Bereich um die Infiltrationsstelle wirksam sind. Die Injektion kann entweder manuell erfolgen aus manuell angesetzten Vorratslösungen oder vollautomatisiert mittel einer Anlage (Kapitel 541.3).

Der hydraulische Kreislauf wird dadurch realisiert, indem kontaminiertes Grundwasser abgepumpt und das Wasser nach Zugabe der Supplemente in die geschlossene Zirkulationsschleife in die Sanierungszone reinfiltiert wird. Dadurch wird ein Zutritt von Sauerstoff vermieden und gelöstes Eisen fällt nicht aus. Durch eine entsprechende Anordnung der Infiltrations- bzw. Entnahmebrunnen kann sowohl eine horizontale als auch eine vertikale Grundwasserströmung induziert werden. Grundsätzlich sind die Anordnung der Brunnen sowie die Entnahme- und Infiltrationsvolumina so zu gestalten, dass ein Abströmen von kontaminiertem Grundwasser aus der Sanierungszone in unbelastete Bereiche des Grundwasserleiters verhindert wird.

Alternativ kann das entnommene Grundwasser vor Zugabe der Supplemente und Reinfiltration zusätzlich in einer Aufbereitungsanlage gereinigt werden. Bei der Aufbereitung des entnommenen Grundwassers werden in der Regel neben den Schadstoffen auch Eisen und Mangan entfernt, um Verockerungsprozesse, welche die Leistungsfähigkeit nachfolgender Behandlungsstufen bzw. der Infiltrationsbrunnen beeinträchtigen können, zu vermeiden.

Das Monitoring der Abbaureaktionen sind übliche Untersuchungen im Rahmen der Probennahme und chemischen Analytik.

In-Situ-Sanierungsmaßnahmen beinhalten i. d. R. Benutzungstatbestände, die nach § 2 Wasserhaushaltsgesetz (WHG) eine Erlaubnis oder Bewilligung erfordern. Die Infiltration von Additiven zur Optimierung der Abbaubedingungen stellt eine Gewässerbenutzung i.S. des § 3 Abs. 1 Nr. 5 WHG dar. Auch die Entnahme von Grundwasser sowie hydraulische Sicherungsmaßnahmen, die zu einem Aufstauen oder einer Veränderung der Strömungsrichtung des Grundwassers führen, stellen gemäß § 3 Abs. 1 Nr. 6 bzw. Abs. 2 Nr. 1 WHG eine erlaubnispflichtige Gewässerbenutzung dar.

541.1 Elektronendonatoren

541.1.1 Leistungsbeschreibung (rechtliche/technische Grundlagen)

Für Schadstoffe, die durch Mikroorganismen als Elektronenakzeptoren genutzt werden wie beispielsweise LCKW, ist die Zudosierung von organischem Kohlenstoff (d.h. Elektronendonatoren) erforderlich. Neben den vollständig mit Wasser mischbaren Substraten (z.B. Melasse, Lactat, Ethanol) gibt es eine Reihe von „Slow Release“-Substraten. Die meisten können nur mit der Methode des Fracturing hinreichend im Untergrund verteilt werden. Eine Ausnahme stellen Speiseölemulsionen dar. Mit diesen sind Reichweite um den Injektionsbrunnen

von mind. 3 m erreichbar. Während bei den löslichen Substraten die Konzentration des Substrates nach dem Bedarf festgelegt wird, bestimmt bei den Speiseölemulsionen die Rückhaltekapazität des Bodens die im Grundwasserleiter einzustellende Substratkonzentration. Die Rückhaltekapazität des Bodens für die Speiseölemulsion lässt sich in einfachen Laborversuchen (Säulenversuche) bestimmen.

Komplexe Substrate wie Melasse enthalten ausreichend Nährsalze, bei Reinsubstraten wie beispielsweise Lactat kann es erforderlich werden, Nährsalze (N, P) zuzusetzen.

541.1.2 Kostenermittlung

Die Gesamtkosten setzen sich zusammen aus den Substratkosten, dem Verbrauch von Strom und Wasser, der Injektion sowie dem begleitenden Monitoring. Die Kosten für Nährsalze sind deutlich untergeordnet.

Das Leistungsregister mit Positionen und Kostenangaben ist Bestandteil der internetbasierten Datenbank (LB 541).

weiterführende Leistungen:

LB 112.5 Mikrobiologische Abbauversuche (Batch-Versuche)

LB 240 Brunnenbau

LB 520.1 Aktive hydraulische Maßnahmen / Entnahme von Grundwasser

LB 520.2 Aktive hydraulische Maßnahmen / Einblasen von Luft / Dampf in den GW-Leiter

LB 530 Behandlung von Grundwasser, Prozess- oder Sickerwasser

LB 340 Eigenkontrollmaßnahmen der Überwachung und Nachsorge

541.1.3 Literatur

Leeson, A., et al. (2002). Airsparging Design Paradigm. Battelle, Columbus, Ohio 43201.

Held, T. (2014): In-situ-Verfahren zur Boden und Grundwassersanierung – Verfahren, Planung und Sanierungskontrolle. Wiley-VCH, Weinheim.

ITVA (2010): Innovative In-Situ-Verfahren, FA HI-13

LFP-Projekt B 1.07: Auswertung von internationaler Fachliteratur und durchgeführten und laufenden Fällen mit In-situ-Anwendungen

LFP-Projekt B 5.07: Auswertung von Fällen mit In-situ-Anwendungen in der gesättigten Zone bei der Altlastenbearbeitung – Teil 1

LFP-Projekt B 3.10: Auswertung von Fällen mit In-situ-Anwendungen in der gesättigten Zone bei der Altlastenbearbeitung - Teil 2

541.1.4 Information über Leistungsanbieter

Kompetente Fachunternehmen sind anhand einschlägiger Referenzen auszuwählen.

541.2 Elektronenakzeptoren

541.2.1 Leistungsbeschreibung (rechtliche/technische Grundlagen)

Für Schadstoffe, die durch Mikroorganismen als Elektronendonatoren genutzt werden wie beispielsweise BTEX oder MKW, ist die Zudosierung von Elektronenakzeptoren erforderlich. Allem voran wird Sauerstoff als Elektronenakzeptor genutzt. Dieser kann in verschiedenen Formen appliziert werden (gelöst im Wasser, gasförmig (→ Airsparging, Kapitel 520) oder als Wasserstoffperoxid (H_2O_2)). Die Injektion verdünnter wässriger Wasserstoffperoxid-Lösungen erlaubt die Zufuhr hoher Mengen an Sauerstoff. Zu beachten ist, dass das H_2O_2 im Grundwasserleiter geochemisch bzw. biologisch katalysiert zu Sauerstoff und Wasser zerfällt. Wird mehr Sauerstoff infiltriert als benötigt, kann es zu Ausgasungen und damit Verblockungen des Grundwasserleiters kommen. Der Sauerstoff dient neben der Forcierung des mikrobiellen Schadstoffabbaus auch der Oxidation reduzierter Inhaltsstoffe des Grundwasserleiters wie beispielsweise Fe-II, FeS oder Ammonium (unproduktive Zehrung).

Die Verwendung von Nitrat als Elektronenakzeptor (gegebenenfalls zusammen mit H_2O_2) kann ebenfalls zu einer unproduktiven Zehrung des Elektronenakzeptors führen. Es ist zu beachten, dass Nitrat nicht zum Abbau aller Schadstoffe als Elektronenakzeptor genutzt werden kann. Zudem sind die erreichbaren Abbaugeschwindigkeiten meist geringer als unter aeroben Bedingungen.

In letzter Zeit wurde vermehrt auch Sulfat als Elektronenakzeptor genutzt. Vorteil ist, dass das vorhandene biogeochemische Milieu kaum verändert wird und nahezu keine unproduktiven Zehrungsprozesse vorliegen. Aber auch für den Elektronenakzeptor Sulfat gilt, dass nicht alle Schadstoffe damit abgebaut werden können.

In der Regel ist es erforderlich, ausreichende Mengen an Nährsalzen (N, P) zuzusetzen.

541.2.2 Kostenermittlung

Die Gesamtkosten setzen sich zusammen aus den Substratkosten, dem Verbrauch von Strom und Wasser, der Injektion sowie dem begleitenden Monitoring. Die Kosten für Nährsalze sind deutlich untergeordnet.

Das Leistungsregister mit Positionen und Kostenangaben ist Bestandteil der internetbasierten Datenbank (LB 541).

weiterführende Leistungen:

LB 112.5 Mikrobiologische Abbauprobversuche (Batch-Versuche)

LB 240 Brunnenbau,

LB 520.1 Aktive hydraulische Maßnahmen / Entnahme von Grundwasser

LB 520.2 Aktive hydraulische Maßnahmen / Einblasen von Luft / Dampf in den GW-Leiter

LB 530 Behandlung von Grundwasser, Prozess- oder Sickerwasser

LB 340 Eigenkontrollmaßnahmen der Überwachung und Nachsorge

541.2.3 Literatur

Held, T. (2014): In-situ-Verfahren zur Boden und Grundwassersanierung – Verfahren, Planung und Sanierungskontrolle. Wiley-VCH, Weinheim.

ITVA (2010): Innovative In-Situ-Verfahren, FA HI-13

LFP-Projekt B 1.07: Auswertung von internationaler Fachliteratur und durchgeführten und laufenden Fällen mit In-situ-Anwendungen

LFP-Projekt B 5.07: Auswertung von Fällen mit In-situ-Anwendungen in der gesättigten Zone bei der Altlastenbearbeitung – Teil 1

LFP-Projekt B 3.10: Auswertung von Fällen mit In-situ-Anwendungen in der gesättigten Zone bei der Altlastenbearbeitung - Teil 2

541.2.4 Information über Leistungsanbieter

541.3 Injektionsanlage

541.3.1 Leistungsbeschreibung (rechtliche/technische Grundlagen)

Die Injektion der Supplementlösungen kann automatisiert erfolgen. Dies ist insbesondere dann von Vorteil, wenn der Injektionsvorgang (wegen großer Injektionsvolumina oder geringer hydraulischer Permeabilität des Bodens) sehr lange Zeit in Anspruch nimmt oder wenn die Injektionen häufig und/oder in kurzer Zeit wiederholt werden müssen.

Im Wesentlichen besteht eine Dosieranlage aus den Vorratsbehältern für die Substrate (flüssige hochkonzentrierte Lieferform), einer Anmischvorrichtung (einschließlich Rührwerk) und der Injektionspumpe. In der Anmischvorrichtung (Tank) wird das Substrat (bez. die Substrate, sofern es sich um eine Mischung handelt. Dies ist beispielsweise dann der Fall, wenn zusätzlich zum Substrat noch Nährstoffe infiltriert werden müssen) mit in der Regel Trinkwasser auf die gewünschte Infiltrationskonzentration verdünnt. Aus diesem Tank heraus wird die Supplementlösung solange in einen Infiltrationsbrunnen gepumpt bis das gewünschte Volumen infiltriert ist. Danach wird reines Trinkwasser zum Spülen der Leitungen nachgepumpt und infiltriert. Anschließend schaltet die Anlage auf den nächsten Brunnen weiter. Dies erfolgt solange bis alle Brunnen eines Standortes beaufschlagt sind. Die Infiltrationsrate richtet sich nach der Aufnahmefähigkeit des jeweiligen Brunnens. Für diese komplexen Aufgaben ist eine entsprechende Mess- und Steuereinrichtung (SPS; Systemprogrammierbare Steuerung) erforderlich.

Die Vorrattanks werden aus Tankwagen heraus nachgefüllt. Sie können in die Anlage integriert sein oder als separate Tanks (meist Hochtanks) aufgestellt werden. Alternativ werden die Substrate bereits in den Vorrattanks (meist IBC) angeliefert. In diesem Fall werden die Leitungen lediglich vom leeren auf den vollen IBC umgeklemmt.

541.3.2 Kostenermittlung

Zu den Kosten für die Anlage und deren Betrieb addieren sich Verbrauchskosten wie Strom und Wasser sowie Kosten für eine analytische Überwachung der Anlage.

Das Leistungsregister mit Positionen und Kostenangaben ist Bestandteil der internetbasierten Datenbank (LB 541).

weiterführende Leistungen:

LB 240 Brunnen- / Grundwassermessstellenbau, Pumpversuche.

LB 540 Drainage

541.3.3 Literatur

Held, T. (2014), In-situ-Verfahren zur Boden und Grundwassersanierung – Verfahren, Planung und Sanierungskontrolle. Wiley-VCH, Weinheim.

541.3.4 Information über Leistungsanbieter

541.4 Durchführung der manuellen Injektionen

541.4.1 Leistungsbeschreibung (rechtliche/technische Grundlagen)

In einigen Fällen ist es ausreichend, die Infiltrationen manuell durchzuführen. Meist wird ein Vorratstank einschließlich Rührwerk, in dem die Supplementlösung angemischt wurde, einer regelbaren Infiltrationspumpe und der Zuleitung zum Infiltrationsbrunnen verwendet. Um ein Überlaufen des Infiltrationsbrunnens zu vermeiden, kann die Zuleitung mit Hilfe eines Packers abgedichtet werden. Ein Manometer in der Zuleitung erlaubt die Überwachung des Infiltrationsdrucks.

Alternativ können mehrere Brunnen gleichzeitig beaufschlagt werden. Hierzu ist ein Leitungsverteiler erforderlich. In jeder Infiltrationsleitung muss ein manuelles Stellventil vorhanden sein sowie eine Wasseruhr und ein Durchflussmesser. Damit kann manuell eine näherungsweise gleichmäßige Infiltration in alle Brunnen eingestellt werden.

541.4.2 Kostenermittlung

Zu den Kosten für die Injektion addieren sich Kosten für die Mobilisierung, Verbrauchskosten wie Strom und Wasser sowie eine anschließende Reinigung der mobilen Anlage.

Das Leistungsregister mit Positionen und Kostenangaben ist Bestandteil der internetbasierten Datenbank (LB 541).

541.4.3 Literatur

Held, T., (2014), In-situ-Verfahren zur Boden und Grundwassersanierung – Verfahren, Planung und Sanierungskontrolle. Wiley-VCH, Weinheim.

541.4.4 Information über Leistungsanbieter

Kompetente Fachunternehmen sind anhand einschlägiger Referenzen auszuwählen.