

Biologische Verfahren zur Sanierung von CKW-Grundwasserschäden

- Systematik und Beschreibung der In-Situ-Techniken -

H.D. Stupp, A. Bakenhus, M. Gass, S. Hüttmann, F.I. Engelmann

1. Einleitung

Verschmutzungen des Grundwassers haben weitreichende Folgen. Einmal eingetretene Verunreinigungen können häufig nur über sehr lange Zeiträume beseitigt werden. In Deutschland weisen ca. 2/3 aller oberflächennahen Grundwasservorkommen anthropogene Veränderungen auf, d. h. dass ca. 66 % der Grundwasservorkommen Spuren menschlicher Einwirkungen zeigen. Dabei stehen Auswirkungen der Landwirtschaft mit weitem Abstand an erster Stelle, gefolgt von Folgen des Verkehrs und der Industrie. Vor diesem Hintergrund ist der präventiv ausgerichtete Grundwasserschutz von herausragender Bedeutung, um die allgemeinen Lebensgrundlagen für Natur und Mensch nachhaltig zu wahren.

Aufgrund der in den letzten 25 Jahren gewonnenen Erfahrungen besitzen die leichtflüchtigen chlorierten Kohlenwasserstoffe (CKW) von allen Schadstoffgruppen das stärkste Gefährdungspotential für das Grundwasser. In der Reihenfolge der in Grundwässern auftretenden Kontaminanten stehen CKW an erster Stelle (1). Darüber hinaus werden mit Abstand die meisten Grundwassersanierungen durch CKW ausgelöst. Wie der Abbildung 1 zu entnehmen ist, beträgt auf der Grundlage von 110 ausgewerteten Sanierungsvorhaben der Anteil der CKW-Fälle 62 %, gefolgt von BTEX (14 %) und MKW und Schwermetallen (jeweils 8 %). Die Dominanz der CKW wird ebenfalls durch eine aktuelle Auswertung von Sanierungsprojekten durch den Arbeitskreis der

Altlastensanierungsgesellschaften der Länder deutlich (2). Die Gründe für das hohe Gefährdungspotential sind in den stoffspezifischen und toxikologischen Eigenschaften der CKW zu sehen. CKW können unter den entsprechenden Bedingungen in Aquiferen wesentlich längere Kontaminationsfahnen entwickeln als MKW, PAK, BTEX oder Schwermetalle (3).

Bei der Sanierung von CKW-Grundwasserschäden wird am häufigsten die hydraulische Sanierung mit anschließender Reinigung des Förderwassers (Pump-and-Treat) eingesetzt. Dieses Verfahren zeichnet sich zwar durch eine hohe Verfahrenssicherheit aus, nachteilig wirken sich jedoch bei der Existenz von größeren CKW-Mengen im Untergrund die sehr langen Sanierungszeiträume bis zum Erreichen der Sanierungsziele aus. Bei vielen Sanierungsvorhaben stellen sich nach einigen Jahren Gleichgewichtszustände zwischen den in der Feststoffmatrix fixierten und den im Grundwasser gelösten Stoffkonzentrationen ein, die zu einem sog. „Tailing“ führen. Hierunter versteht man die Einstellung von quasi konstanten oder nur geringfügig abnehmenden CKW-Konzentrationen im Förderwasser der zur Sanierung eingesetzten Brunnen. Es ist davon auszugehen, dass derartige Sanierungen ohne die Ergreifung von zusätzlichen Maßnahmen noch Jahre bis Jahrzehnte benötigen werden. Die Fortführung derartiger Pump-and-Treat-Maßnahmen wäre naturgemäß mit hohen Sanierungskosten behaftet.

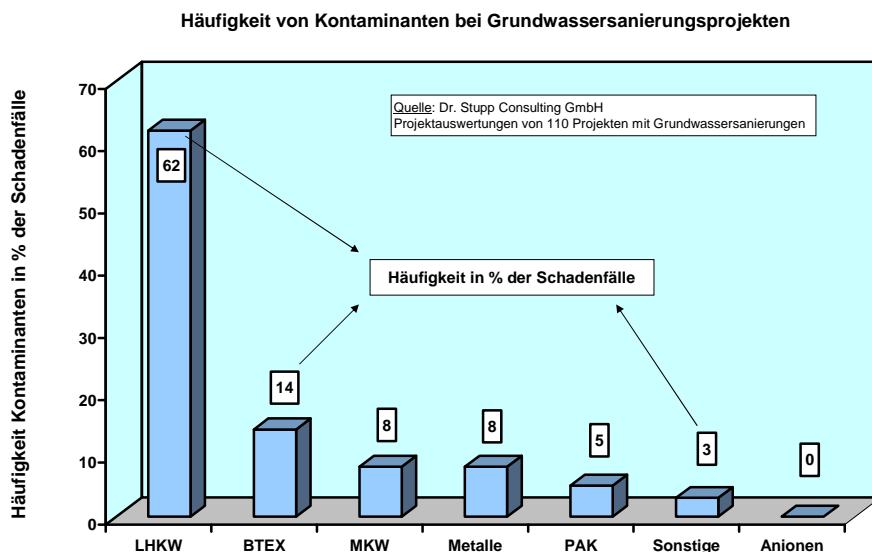


Abbildung 1:

Vor diesem Hintergrund besteht ein wachsendes Interesse an der Entwicklung von Sanierungsverfahren, die eine Beschleunigung der Sanierungen bewirken und die Gesamtsanierungskosten reduzieren. Zur Erreichung dieser Ziele stehen heute die nachfolgend aufgeführten innovativen In-Situ-Verfahren zur Verfügung:

- Biologische Verfahren
- Tensid-Spülung
- In-Situ chemische Oxidation/Reduktion
- Nano-Eisen
- Thermische Verfahren
- Alkohol-Spülung

Zur Information über die aufgeführten Verfahren steht eine umfangreiche Literatur zur Verfügung (4). Die nachfolgenden Ausführungen beschäftigen sich ausschließlich mit den biologischen Verfahren. In den letzten Jahren ist das Wissen über den biologischen Abbau der CKW stark gewachsen. Darüber hinaus wurden aus durchgeführten Projekten wichtige Erfahrungen gewonnen, die für die Optimierung biologischer Sanierungen von großer Bedeutung sind.

Dieser Beitrag hat zum Inhalt, die heute zur Verfügung stehenden biologischen Verfahren zu beschreiben. Darüber hinaus wird vor dem Hintergrund der gestiegenen Anforderungen an eine transparente und nachvollziehbare Einteilung ein Vorschlag zu einer Systematik der biologischen Verfahren unterbreitet. Es ist vorgesehen, in einem zweiten Beitrag die biologischen Verfahren anhand von Praxisbeispielen vertiefend zu beschreiben und über die Erfahrungen aus der Sanierungspraxis zu berichten.

Verwendete Abkürzungen:

cis-DCE	cis-1.2-Dichlorethen
CKW	Chlorierte Kohlenwasserstoffe
DNAPL	Dense non aqueous phase liquids (Schwerphasen)
1.2-DCA	1.2-Dichlorethan
LCKW	Leichtflüchtige chlorierte Kohlenwasserstoffe
PCE	Tetrachlorethen (= Tetrachlorethylen = Perchlorethen = Perchlorethylen = Per)
TCA	1.1.1-Trichlorethan
TCE	Trichlorethen (= Trichlorethylen = Tri)
trans-DCE	trans-1.2-Dichlorethen
VC	Vinylchlorid (= Chlorethen)

2. Grundlagen des biologischen Abbaus

In den letzten Jahren hat sich bei vielen Felduntersuchungen von CKW-Grundwasserschäden herausgestellt, dass die im Untergrund vorliegenden biologischen Prozesse in starkem Maße von den jeweils an den Standorten vorliegenden Milieubedingungen bestimmt werden. In Abhängigkeit der im Untergrund vorherrschenden Milieubedingungen können die vier nachfolgend genannten Abbauprozesse auftreten:

- Direkter aerober Abbau
- Indirekter aerober Abbau
- Direkter anaerober Abbau
- Indirekter anaerober Abbau

a) Direkter aerober Abbau

Hierunter versteht man die direkte Transformation einer organischen Verbindung, wobei diese als Elektronendonator fungiert und dem Bakterium als Energiequelle dient. Die bei dieser Reaktion frei werdenden Elektronen werden auf einen Elektronenakzeptor, wie z. B. Sauerstoff, übertragen.

Aus diesem Prozess können die Mikroorganismen zusätzlich Energie für den Stoffwechsel gewinnen. Abbaubar sind die niedriger chlorierten Verbindungen wie beispielsweise Dichlorethen, VC und 1.2 Dichlorethan.

b) Indirekter aerober Abbau

Der Abbau erfolgt cometabolisch, indem der CKW-Abbau erst durch die Präsenz eines Cosubstrates ermöglicht wird. Bei diesem Abbaumechanismus können die beteiligten Mikroorganismen teilweise weder einen Energiegewinn noch Wachstumsnutzen aus dem Abbau der CKW-Komponente erzielen.

Abbaubar sind beispielsweise TCE, DCE, VC, TCA und DCA. Als Elektronendonatoren fungieren Methan, Ethan, Ethen, Propan, Butan, Toluol, Phenol und Ammonium. Die Elektronentransformation wird durch das Enzym „soluble“ Methyl-Monooxygenase (sMMO) induziert. Es entstehen instabile Epoxide, die schnell in gut abbaubare Alkohole und Fettsäuren zerfallen.

c) Direkter anaerober Abbau

Die Bakterien erzielen einen Energiegewinn unter Nutzung der CKW als Elektronenakzeptor. Die Chloratome werden sukzessiv durch Wasserstoffatome, die als Elektronendonatoren wirken, ersetzt. Der zur Reaktion benötigte Wasserstoff wird durch die Fermentierung organischer Verbindungen gebildet. Dieser Abbaumechanismus wird auch als Chloratmung, Halo-respiration oder Dehalorespiration bezeichnet.

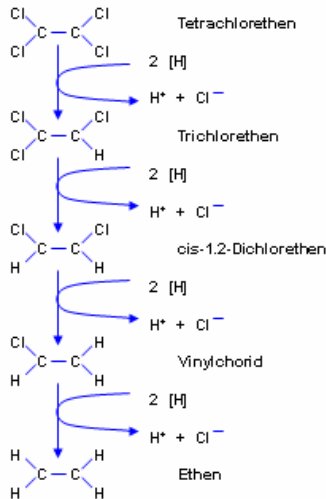
Abbaubar sind PCE, TCE, DCE, VC und DCA. Dabei läuft der Abbau der höher chlorierten Ethene PCE und TCE schneller als der der niedriger chlorierten DCE und VC ab. Als Folge hiervon können DCE und VC in Grundwasserfahnen akkumulieren. Es ist bekannt, dass die Gegenwart von PCE den Abbau von VC hemmen kann. VC ist deutlich besser durch die aeroben Prozesse abbaubar.

d) Indirekter anaerober Abbau

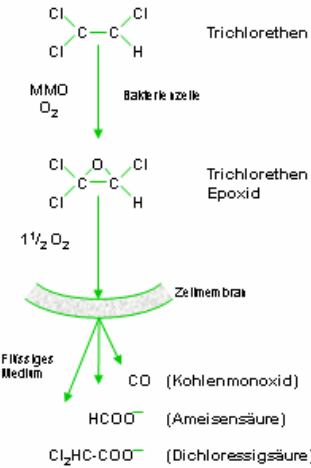
Dieser Abbaumechanismus ist der in Grundwasserleitern am weitesten verbreitet und wird nachstehend ausführlicher behandelt. Der Abbau erfolgt cometabolisch, d.h. nur unter Präsenz eines weiteren organischen Substrates, das den abbauaktiven Mikroorganismen als Energie- und Kohlenstofflieferant dient. Des weiteren werden auch die für den CKW-Abbau benötigten Enzyme durch den Abbau einer anderen organischen Verbindung bereitgestellt. Die CKW fungieren hier in Konkurrenz zu anderen Elektronenakzeptoren, wie z.B. Sulfat, als „Notelektronenakzeptor“.

Dehalogenierung von Chlorethenen unter anaeroben und aeroben Bedingungen

Anaerobe Dechlorierung von PCE (nach Freedmann & Gosset, 1989)



Aerobe Dechlorierung von TCE (nach Semprini et al., 1989)



Anmerkung:

Die beim aeroben Abbau entstehenden Stoffe Ameisensäure, Kohlenmonoxid und Dichloressigsäure können durch Bakterien weiter oxidiert werden.

TCE = Trichlorethen
PCE = Tetrachlorethen

Abbildung 2: Dehalogenierung von Chlorethenen unter anaeroben und aeroben Bedingungen

Abbaubar sind PCE, TCE, DCE, VC und DCA. Der Abbaumechanismus für PCE ist der Abbildung 2 zu entnehmen.

Da die meisten Grundwasserschäden auf den Einsatz der technischen Produkte PCE und TCE zurückzuführen sind, steht der Abbau dieser Stoffe und damit folgende Abbaukette im Vordergrund:

PCE - TCE - cis-1,2-DCE - VC - Ethen

Der Abbau von PCE erfolgt nur anaerob, wogegen TCE, cis-DCE und VC sowohl aerob als auch anaerob abbaubar sind. Dabei sind cis-DCE und VC besser aerob als anaerob abbaubar.

Da der cometabolische anaerobe Abbau nach bisheriger Kenntnis der in der Natur bedeutendste ist, wird hierauf nachfolgend näher eingegangen. Geeignete Voraussetzungen für eine vollständige reduktive Dechlorierung - ohne die Akkumulation von Zwischenprodukten - bestehen unter stark reduzierenden Bedingungen. Dabei entsteht als Schlüsselsubstanz aus der Umsetzung organischer Verbindungen Wasserstoff. Die Umsetzung ist umso effizienter, je mehr Wasserstoff zur Verfügung steht. Da H₂ auch durch andere biochemische Prozesse gezehrt wird, entstehen Konkurrenzreaktionen. Hierbei laufen prädestiniert die Vorgänge ab, die eine höhere Affinität zu H₂ aufweisen. Hieraus folgt, dass eine Schwellenkonzentration überschritten sein muss, damit die reduktive Dechlorierung abläuft. In vielen Fällen bleibt der Abbauprozess bei cis-DCE stehen, weshalb die dann nicht ablaufende Abbaureaktion cis-DCE zu VC auch als „bottleneck des natural attenuation“ bezeichnet wird (5).

Die Zuordnung von H₂-Konzentrationen zu den verschiedenen Redoxzonen sind der Tabelle 1 zu entnehmen. Hieraus geht eindeutig hervor, dass eine vollständige reduktive Dechlorierung nur unter sulfatreduzierenden und unter methanogenen Bedingungen ablaufen kann.

Tabelle 1: Charakteristische H₂-Konzentrationen unterschiedlicher Elektronenakzeptorprozesse (5)

Redoxprozess	Redoxmilieu (mV)	Charakteristische H ₂ -Konzentration (nM)
Denitrifikation	-200	< 0,1
Fe(III)reduktion	0 - +200	0,2 - 0,8
Sulfatreduktion	-200 - 0	1,0 - 4,0
Methanogenese	< -200	5,0 - 25

In den letzten Jahren sind die Spezies aus der Dehalococcoides-Familie in den Blickpunkt des Interesses gerückt. Bakterien aus dieser Gruppe können eine vollständige Dechlorierung von PCE und TCE bewirken (6). Durch molekularbiologische Untersuchungsmethoden wurde festgestellt, dass an Standorten, an denen ein vollständiger Abbau von Chlorethenen vorlag, auch Dehalococcoides-Vertreter identifiziert werden konnten. Dagegen wurden an Standorten, die durch eine nur teilweise Dechlorierung gekennzeichnet waren, keine Dehalococcoides-Stämme gefunden (7). Weitere Untersuchungen zeigten, dass nicht alle Dehalococcoides-Arten zu einer vollständigen Dechlorierung befähigt sind. Als interessanter Stamm, der eine vollständige

Mineralisierung der Chlorethene herbeiführen kann, wurde *Dehalococcoides ethenogenes* 195 identifiziert. Dieser Stamm dechloriert PCE, TCE und cis-DCE direkt, dagegen VC zu Ethen nur indirekt (8). Da der indirekte Prozess langsamer ist als der direkte, ist dies eine mögliche Erklärung für die Anreicherung von cis-DCE und VC in CKW-haltigen Aquiferen. Des Weiteren hemmen hohe Gehalte an PCE und TCE die indirekte Transformation von VC.

3. Mögliche Grundlagen einer Systematik

Zur Strukturierung der biologischen Verfahren findet sich bisher in der Literatur kein einheitliches Vorgehen. Dies hängt damit zusammen, dass die biologischen Verfahren nur schwer zu systematisieren sind. In der Sanierungspraxis werden oft Kombinationen zwischen verschiedenen Sanierungselementen angewandt. Darüber hinaus stellt sich die Frage, nach welchen Kriterien diese Systematisierung erfolgen soll. Denkbar wäre dies nach folgenden Merkmalen:

- Injektionstechnik
- Art der Elektronendonatoren und -akzeptoren
- zusätzlicher Einsatz allochthoner Mikroorganismen
- unterstützende Verteilungstechnologien (z.B. Spülkreisläufe, Tenside etc.)
- Milieus (aerob – anaerob)

Die verschiedenen Möglichkeiten wurden von den Autoren geprüft und die Vor- und Nachteile analysiert. Im Ergebnis bietet die Einteilung nach den Milieubedingungen in Kombination mit der Art der Wirkstoffverteilung die besten Voraussetzungen für eine möglichst transparente und nachvollziehbare Einteilung der Verfahren. Dabei ist zwischen passiver und aktiver Wirkstoffverteilung zu

unterscheiden. Der Unterschied besteht darin, dass bei der aktiven Verteilung die Wirkstoffe durch unterstützende hydraulische oder pneumatische Maßnahmen (Spülkreisläufe) je nach hydrogeologischer bzw. gashydrogeologischer Ausbildung der zu sanierenden Grundwasserleiter bzw. Grundwassergeringleiter verteilt werden. Bei den passiven Verfahren erfolgt die Aktivierung der Wirkstoffe ohne Spülkreisläufe durch natürliche Lösungsvorgänge aus angelegten Wirkstoffdepots, die vorher in den Grundwasserleiter durch Injektionen eingeführt worden sind und die anschließend mit dem natürlichen Grundwasserstrom verteilt werden.

Verfahren mit Spülkreislauf (aktive Verteilung der Wirkstoffe)

Das Grundprinzip des Verfahrens ist in der Abbildung 3 dargestellt. Grundwasser wird entnommen, vorgereinigt und nach Zugabe von biologisch wirksamen Stoffen (z.B. Nährstoffe, Elektronendonatoren, Elektronenakzeptoren) wieder reinfiltriert. Die Reinfiltration kann unter Berücksichtigung der Milieuverhältnisse des Grundwassers und durch entsprechende technische Maßnahmen auch ohne Reinigung erfolgen. Die Anordnung der Grundwasserentnahmebrunnen ist so zu gestalten, dass keine Schadstoffe abströmen und zu einer Kontamination unbelasteter Areale führen. Dies kann z. B. dadurch erfolgen, dass die Infiltration am Rand des Schadenbereiches, die Entnahme in der Mitte erfolgt. Andererseits ist durch die Anordnung der Brunnen auch sicher zu stellen, dass keine infiltrierten Nährstoffe in Bereiche außerhalb des Reaktionsraumes gelangen. Unter Umständen kann dies auch mit Schutzinfiltrationen oder einem Umschließen des Aquifers mittels einer vertikalen Abschirmung erreicht werden. Zur Aufrechterhaltung geeigneter Strömungsrichtungen kann die Ableitung von Teilen des geförderten Wassers in einen Vorfluter

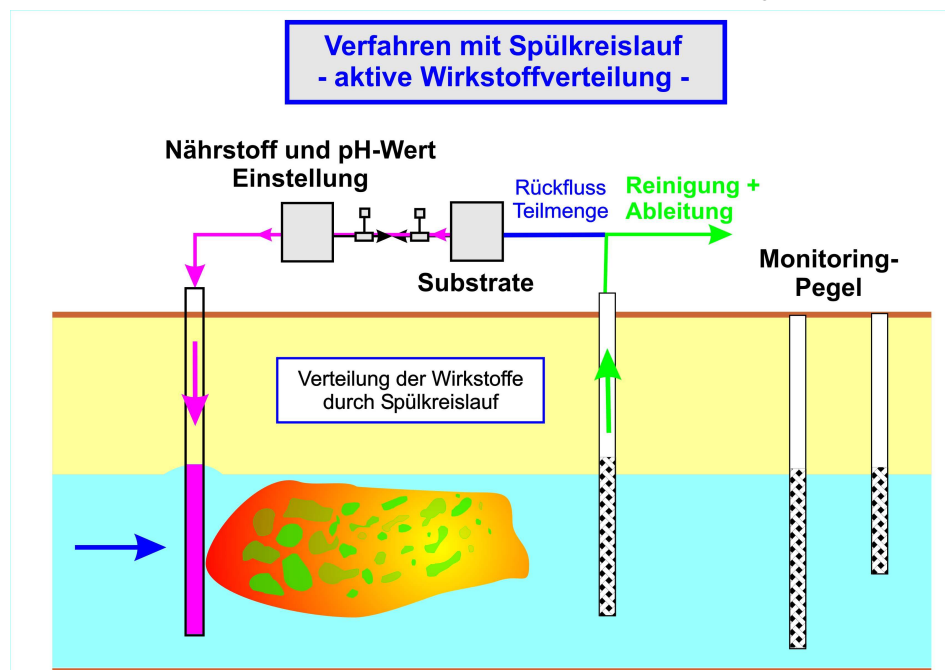


Abbildung 3:

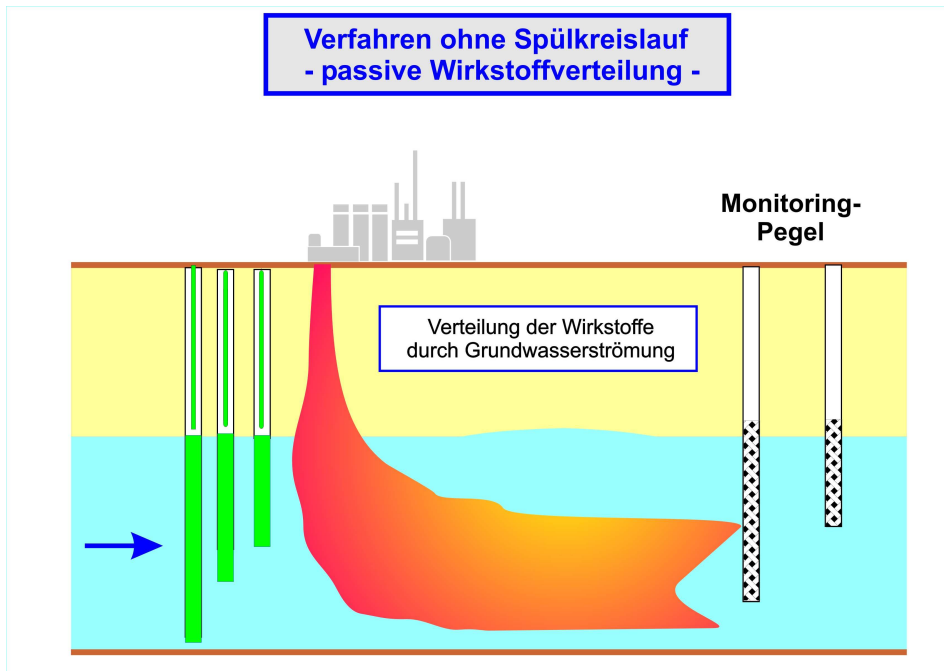


Abbildung 4:

erforderlich werden.

Aus dem abgepumpten Grundwasser müssen vor einer Reinfiltration in einer Aufbereitungsanlage üblicherweise Eisen und Mangan entfernt werden, um eine Verockerung in den nachfolgenden Aufbereitungsstufen und Infiltrationseinrichtungen zu vermeiden. Dem gereinigten Wasser werden die erforderlichen Nährsalze zugesetzt. Hierzu können beispielsweise Harnstoff und Phosphorsäure verwendet werden. Beide haben den Vorteil, dass sie zu keiner Aufsalzung des Grundwassers führen. Ist das Grundwasser zu sauer, empfiehlt sich die Dosierung von Polyphosphatsalzen anstatt Phosphorsäure. Die Spülkreisläufe müssen unter Beachtung der hydrodynamischen Standortverhältnisse so formiert werden, dass die dem Grundwasserleiter zugeführten Wirkstoffe, unabhängig von der Ausbildung der Aquiferdurchlässigkeiten des hydrogeologischen System und seines Zehr- und Transformationspotenzials, die in der Feststoffmatrix enthaltenen Schadstoffe erreichen.

Verfahren ohne Spülkreislauf (passive Verteilung der Wirkstoffe)

Im Gegensatz zum Spülkreislauf erfolgt keine durch induzierende Maßnahmen gesteuerte Durchströmung der kontaminierten Zone durch die Infiltration von Wasser mit Zuschlagsstoffen (Abbildung 4). Beim Verfahren ohne Spülkreislauf werden die Substrate sowie ggf. Elektronenakzeptoren und Nährstoffe über Fluidinfiltrations- (Brunnen, Gräben, Fluidlanzen) und Gasinjektionssysteme (Gaslanzen) in die Kontamination eingetragen. Ein wesentliches Merkmal dieses Verfahrensansatzes besteht darin, dass die Wirkstoffverteilung überwiegend mit dem natürlichen Grundwasserstrom also passiv über Konvektions- und Diffusionsprozesse erfolgt.

Zur Erhöhung der Fließgeschwindigkeiten oder zur Unterstützung der Wirkstoffverteilung innerhalb der Kontamination kann aber auch eine Entnahme von Grundwasser z.B. im Abstrom erfolgen. Das geförderte Wasser wird dann gereinigt abgeleitet.

4. Systematik der Biologischen In-Situ-Verfahren und Beschreibung

Nachfolgend wird eine Systematik zur Einteilung der biologischen Verfahren vorgestellt. Diese orientiert sich an den Kriterien Abbaumilieu und Wirkstoffverteilung. Die Systematik ist der Tabelle 2 zu entnehmen.

Tabelle 2: Systematik der biologischen Verfahren zur biologischen Sanierung von CKW-Grundwasser-verunreinigungen

A) Aerobe Verfahren		B) Anaerobe Verfahren	
Wirkstoffverteilung			
A1) Passiv	A2) Aktiv	B1) Passiv	B2) Aktiv
ORC	INSISA ^{byox}	HRC	INSISA ^{red}
ISOC	Methan-Biostimulationsverfahren Gaseinspeicherverfahren GW-Zirkulationsbrunnen Biosparging	Amteclean-Verfahren CAP 18 IRZ	Biosoil RFZ

Die anaeroben Verfahren Amteclean, CAP18 und IRZ können auch aktiv eingesetzt werden. Die Zuordnung richtet sich nach dem häufigsten Praxiseinsatz.

Es wird darauf hingewiesen, dass einige der in Tabelle 2 aufgeführten Verfahren sich eigentlich auf Wirkstoffe beziehen. Beispiele hierfür sind die Begriffe ORC, HRC, Amteclean und CAP 18. Da sich diese Begrifflichkeiten

jedoch mittlerweile etabliert haben, werden sie entsprechend im Sinne von Verfahren verwendet.

Im Gegensatz zu den reduktiven Verfahren, die das gesamte Spektrum der CKW – d. h. von PCE bis VC – abreinigen können, ist der Einsatz der oxidativen Verfahren auf den CKW-Abbau ab cis-DCE und VC beschränkt. Insofern beschränkt sich der Einsatz der oxidativen Verfahren auf CKW-Schäden, bei denen keine sanierungsbedürftigen Gehalte an TCE oder sogar PCE vorliegen. Zum effektiven Abbau der CKW ist im Einzelfall vorab zu prüfen, ob zusätzlich die Zugabe von Cosubstraten notwendig ist. In den meisten Anwendungsfällen dürfte dies der Fall sein.

In den letzten 20 Jahren wurden von verschiedenen Firmen Verfahren entwickelt, die unter den entsprechenden Bezeichnungen am Markt bekannt sind. Diese Bezeichnungen wurden in die Systematik eingearbeitet. Die einzelnen Verfahren werden nachfolgend beschrieben.

A1) Aerobe Verfahren mit passiver

Wirkstoffverteilung

ORC

Bei ORC (oxygen release compound) handelt es sich um eine patentierte Formulierung von mit Phosphat interaktiertem Magnesiumoxid, das bei der Hydratisierung Sauerstoff abgibt (9). Dabei verlaufen diese natürlichen Prozesse langsam. Es entsteht ein für den biologischen Abbau günstiges Milieu. Dies führt zum Wachstum abbauender Mikroorganismen bzw. zur Erhöhung des Stoffwechsels dieser Bakterien und so zu einer erheblichen Beschleunigung des natürlichen Schadstoffabbaus. ORC wird i. d. R. mittels vorgefertigter Schlauchsysteme in Grundwasseraufschlüsse (Brunnen, Messstellen) oder durch Bohrlochauffüllung in den Untergrund gebracht. ORC kann zur Erzeugung größerer Raumwirkungen auch durch Verpressen infiltriert werden.

ISOC

ISOC steht für „In-Situ Submerged Oxygen Curtain“ (10). Das Verfahren basiert auf einer Gasdiffusionstechnologie, mit der durch Einsatz von Hohlfaser-Membranen (hollow fiber membranes) gelöster Sauerstoff dem Grundwasser über spezielle Sonden (Sauerstoffspender) in Brunnen und Messstellen zugeführt wird. Dazu wird der gasförmige Sauerstoff über die Sonden injiziert und über die Hohlfaser-Membranen und Diffusionsprozesse in gelösten Sauerstoff umgewandelt. Der gelöste Sauerstoff verteilt sich außerhalb der Messstelle durch die Grundwasserströmung und Diffusionsprozesse. Im Gegensatz zu anderen Technologien wird die Bildung von im Grundwasser aufsteigenden Gasblasen gezielt vermieden. Ein Vorteil des Verfahrens besteht darin, dass hohe Gehalte an gelöstem Sauerstoff im Brunnen selbst und im engeren Umfeld, je nach Partialdruck des Eintragshorizontes, erzielt werden können. Die Sauerstoffgehalte können in Abhängigkeit von der Wassersäule einige 10er mg/l erreichen, sie nehmen mit

zunehmender Wassertiefe zu. Die Einbringung des Sauerstoffs kann über voll verfilterte Messstellen erfolgen. In der Regel werden die Grundwasseraufschlüsse nach dem Design der „Bioscreens“ im direkten Abstrom des Schadenherdes zur Reinigung von Grundwasserfahnen angeordnet.

A2) Aerobe Verfahren mit aktiver

Wirkstoffverteilung

INSISA-byox Verfahren

Grundwasser wird im Abstrom des Schadenherdes entnommen, aufbereitet und kontinuierlich mit Sauerstoffträgern und Nährstoffen versetzt (11). Dieses Wasser wird zum Aufbau eines Spülkreislaufes oberstromig in den belasteten Bodenbereich infiltriert. Durch die gezielte Steuerung von Förderung und Versickerung des entnommenen Infiltrationswassers in den belasteten Bodenbereichen werden die standorteigenen Bodenorganismen zum aeroben Abbau der Schadstoffe stimuliert.

Methan-Biostimulations-Verfahren

Mit der Luft werden der zur Schaffung der aeroben Verhältnisse nötige Sauerstoff sowie die Nährstoffe für die biologischen Aktivitäten eingetragen (12). Dazu wird das Luftgemisch zyklisch mit 0,5 bis 2,0 vol-% Methan angereichert. Die Zugabe von Methan in der Infiltrationsluft induziert das selektive Wachstum methanotropher Mikroorganismen. Sie produzieren zur Verwertung des Methans das Enzym Methan – Monooxygenase, das als eine Nebenaktivität die Oxidation von CKW katalysiert. Diese werden in ein Epoxid umgewandelt, das rasch von selbst in CO₂ und Cl⁻ zerfällt. Da Methan für die methanotrophen Mikroorganismen Kohlenstoff- und Energiequelle darstellt, findet der biologische Abbau der CKW unabhängig von der Schadstoffkonzentration statt. Bei Notwendigkeit werden der Zuluft geringe Mengen Lachgas (N - Quelle) und Triethylphosphat (P - Quelle) zur Erhöhung der Abbauleistung der methanotrophen Bakterien zugesetzt. Durch den Eintrag über die Gasphase können alle Additive optimal im Kontaminationsbereich verteilt werden. In der wassergesättigten Bodenzone werden aerobe Verhältnisse geschaffen. Damit wird die Bildung von VC und anderer Produkte eines anaeroben Abbaus von PCE und TCE unterbunden. Im Boden vorhandene Zwischenprodukte werden In-Situ durch methanotrophe Organismen abgebaut.

Verfahrensbedingt erfolgt im Sanierungsgebiet keine Grundwasserentnahme. Zur Sicherung wird eine regelmäßige Beprobung angrenzender Monitoringpegel durchgeführt.

Gaseinspeicherungsverfahren

Beim Gaseinspeicherungsverfahren werden Gasbläschen (Luft, Sauerstoff, Gasgemische) als Wirkstoffdepos direkt

in die Porenmatrix des kontaminierten, hydrogeologischen Systems eingespeichert, von hier aus ins Grundwasser eingelöst und dann mit dem Grundwasserstrom verteilt sowie chemisch/mikrobiell gezehrt. Eintrag und Verteilung erfolgen als Direktgasinjektion über speziell im Untergrund verankerte Lanzen, wobei die Injektionsdrücke minimal über dem jeweiligen hydrostatischen Druck des Injektionshorizontes liegen. Somit werden Ausgasung und Wirkstoffverlust über die Grundwasseroberfläche sowie eine CKW-Strippung minimiert. Durch gezielte Nutzung gashydrogeologischer Strukturen (Gasaufstiegsbarrieren, Gasaufstiegsdome) können, bei kontinuierlichen oder gepulsten Injektionen, in kurzen Zeiträumen große Wirkstoffreichweiten erzeugt werden. Dadurch wird eine Minimierung der Anzahl der Gaseintragelemente erreicht. Kontrollierte Gaseinspeicherungen werden derzeit für Grundwassersanierungen genutzt (BIOXWAND-Verfahren (13). Hierbei formieren sauerstoffhaltige Trägergase mehrstufige, in Reihe geschaltete In-Situ durchströmte Reaktoren. Die Gassättigung im Untergrund lässt sich durch den Einsatz von Gas-Tensid-Schäumen erhöhen. Für den CKW-Abbau werden die Direktgasinjektionen mit Cosubstratdosierungen gekoppelt. Dabei werden dem Kontaminationskörper parallel Luftsauerstoff zur Aerobisierung und Cosubstrate zum Schadstoffabbau zugeführt. Der CKW-Abbau wird durch Biostimulation methylophiler Mikroorganismen erzielt.

Biosparging

Durch die Injektion von ölfreier atmosphärischer Luft in den Aquifer wird eine aerobe Zone im Grundwasserleiter aufgebaut (14). Biosparging fördert die In-situ-Strippung flüchtiger Schadstoffe, die Desorption der Schadstoffe und den mikrobiellen Abbau durch Anreicherung des Grundwassers mit Sauerstoff. Zusätzliche Nährsalze zur Forcierung des mikrobiellen Abbaus können mit den gleichen Infiltrationselementen eingebracht werden. Da die Schadstoffe in die ungesättigte Bodenzone verfrachtet werden, wird das Biosparging gewöhnlich mit einer Bodenluftabsaugung kombiniert.

Es handelt sich um ein Kombinationsverfahren, das die Prozesse Desorption (Strippung) und biologischer Abbau beinhaltet. Erfahrungsgemäß spielt bei leichtflüchtigen Stoffen wie Chlorethenen die Strippung wahrscheinlich die größte Rolle bei der Schadstoffeliminierung. Der Anteil, den biologische Prozesse einnehmen, ist schwer zu quantifizieren.

Grundwasserzirkulationsbrunnen

Bis heute wurde eine Vielzahl von speziellen Grundwasserbrunnen (UVB-Brunnen, Hydro-Airlift-Brunnen, Grundwasserzirkulationsbrunnen) entwickelt, die zwei gemeinsame Merkmale aufweisen (15). Zum einen verursachen sie eine Grundwasserzirkulation in Form einer "Strömungswalze", was zu einem vertikalen Wasserdurchsatz im umgebenden Aquifer und daher zu einer besseren Zufuhr eventuell zudosierter Nährstoffe führt. Die induzierte Strömung kann vom Grundwasserspiegel aus zur Aquifersohle hin gerichtet sein

oder, bei entsprechend anderer Gestaltung des Brunnens, in umgekehrter Richtung. Zum anderen werden flüchtige Schadstoffe innerhalb des Brunnens gestrippt. Die belastete Abluft wird on site gereinigt. Wie beim Biosparging handelt es sich um ein Kombinationsverfahren, das Elemente des Strippens und des biologischen Abbaus beinhaltet.

Der biologische In-situ-Abbau im Aquifer wird über mehrere Wege gefördert. Zunächst gelangt durch das Strippen mit Sauerstoff angereichertes Wasser in die Umgebung des Brunnens. Da die Lösung von Sauerstoff aus der Luft nur zu einer erhöhten Sauerstoffkonzentration im Wasser führt, reicht dies meist nicht aus, um in einer akzeptablen Sanierungszeit ausreichende Mengen an Elektronenakzeptoren zur Verfügung zu stellen. Allerdings können H₂O₂ und/oder Nitrat noch zusätzlich zudosiert werden. Auch weitere Nährsalze können innerhalb des Brunnens eingebracht werden.

B1) Anaerobe Verfahren mit passiver

Wirkstoffverteilung

HRC (Hydrogen Release Compound) - anaerober Abbau

Da der Abbau zahlreicher Schadstoffe anaerobe Bedingungen erfordert, kann es notwendig werden, Elektronendonatoren (z. B. Wasserstoff) in passive Systeme einzubringen (9). Hierfür wurde das sog. "Hydrogen Release Compound" (HRC®) entwickelt. Dieses Produkt wird hauptsächlich zur In-Situ-Transformation von flüchtigen hochchlorierten Kohlenwasserstoffen eingesetzt. HRC® ist ein hochviskoses Sorbitpolylactat. Mit Hilfe von in Grundwasserbrunnen eingehängten perforierten, HRC®-gefüllten PVC-Kanistern wird das Substrat wegen seiner hohen Viskosität nur langsam in das Grundwasser abgegeben. Dort hydrolysiert es zu Sorbit und Lactat. Lactat wird über Pyruvat zu Acetat oxidiert. Dabei werden die zum reduktiven Abbau der CKW erforderlichen Reduktionsäquivalente gebildet. Der Zucker Sorbit und das Acetat stehen den autochthonen Mikroorganismen als Wachstumssubstrat zur Verfügung.

Amteclean-Verfahren, CAP 18, Speiseölverfahren

Bei den genannten Produkten handelt es sich um Wirkstoffe auf Pflanzenölbasis. Die Pflanzenöle werden teils direkt, teils als tensidstabilisierte Emulsionen in das Grundwasser infiltriert. Aufgrund ihrer relativ geringen Wasserlöslichkeit kommt es zu einer zeitverzögerten Einlösung der Wirkstoffe ins Grundwasser. Die sich daraus ergebende Depotwirkung ist erwünscht und führt zu einer deutlichen Herabsetzung der Injektionshäufigkeit. In Abhängigkeit von der Grundwasserströmungsgeschwindigkeit können Injektionsintervalle > 1 Jahr realisiert werden. Bei stark aeroben Grundwasserleitern kann es u. U. aufgrund der langsamen Einlösung von Ölbestandteilen in das Grundwasser mehrere Monate

dauern, bis ein ausreichend reduzierendes Milieu im Grundwasser für die reduktive Dechlorierung erreicht wird. Aus diesem Grund werden den Speiseölen teilweise auch besser bioverfügbare Cosubstrate z.B. auf Kohlenhydratbasis zugemischt. Die Wirkstoffverteilung erfolgt in der Regel passiv über die natürliche Grundwasserströmung (16).

In Situ Reaktive Zone (IRZ)

Die injizierten Substrate werden passiv mit dem natürlichen Grundwasserstrom verteilt und transportiert. Da der Abbau insbesondere der höher chlorierten CKW anaerobe Bedingungen erfordert wird als Injektionssubstrat eine organische Kohlenstoffverbindung verwendet. Deren Zehrung führt zur Ausbildung einer für die reduktive Dechlorierung von CKW günstigen biochemischen Zone. Als Substrat können lösliche Stoffe, wie z. B. Melasse, Lactat oder Ethanol oder unlösliche, langsam hydrolysierende Stoffe wie z. B. Hydrogen Release Compound (HRC) verwendet werden. Die umfangreichsten Erfahrungen liegen für Melasse als Cosubstrat vor (18). Neben anaeroben IRZ können auch aerobe Systeme angewendet werden. Hierbei wird Wasserstoffperoxid – gegebenenfalls unter Zumischung von Nitrat – als Elektronenakzeptor zur Stimulierung des aeroben mikrobiellen Schadstoffabbaus injiziert. Grundsätzlich ist beim IRZ-Verfahren auch eine Anwendung von Spülkreisläufen möglich.

B2) Anaerobe Verfahren mit aktiver

Wirkstoffverteilung

INSISA-red Verfahren

Das Verfahren besteht aus einem geschlossenen System als Kreislauf für CKW, die ohne Sauerstoff unter stark reduzierenden Bedingungen und hohem Anteil an Grundwasserinhaltsstoffen abgebaut werden (11). Teilströme des Förderwassers werden über Infiltrationssysteme in den Untergrund reinfiltriert. Zum stimulierten Abbau der CKW werden Cosubstrate zugegeben. Zur optimalen Erkundung der dreidimensionalen Verteilung von Schadstoffen und Redoxverhältnissen im Umfeld der Infiltrationselemente gibt es spezielle Multi-Level-Brunnen.

Biosoil Verfahren

Die Dehalogenierung der CKW verläuft in Gegenwart von natürlichen organischen Substanzen wie Huminsäuren und unter Zugabe von Elektronendonatoren (17). Der Abbau verläuft in zwei Stufen. Für jede dieser Stufen ist ein zusammenwirkendes Konsortium von Mikroorganismen notwendig. PCE und TCE werden während der ersten Stufe zu cis-DCE umgesetzt. Das cis-DCE wird in der zweiten Stufe weiter zu Ethen/Ethan transformiert. Zur vollständigen Dechlorierung werden in der zweiten Stufe spezifische Hilfsstoffe zugegeben. Der vollständige Abbau der CKW wird durch eine Mischung aus natürlichen leicht

abbaubaren Stoffen erreicht, die Komponenten enthalten, welche als Elektronendonatoren und Cofaktoren durch die bei der Umsetzung wirkenden Mikroorganismen verwertet werden. Die verwendete Zubereitung enthält u. a. organische Säuren, Vitamine, Cofaktoren sowie Spurenelemente. Eine Anreicherung von Vinylchlorid findet durch die Steuerung der im Untergrund ablaufenden Prozesse nicht statt.

Redoxgesteuerte Fluidzone (RFZ)

Über Hochdruckinjektionsbrunnen werden je nach Standortsituation verschiedene Substrate (z. B. Mikroemulsionen, Lactate, Melasse) in einem standortabhängigen Injektionsmuster in den Untergrund injiziert. Durch die Zehrung der organischen Verbindungen entsteht ein reduktives Milieu, das durch Online-Redoxmessungen mittels In-Situ-Sensoren überwacht wird und anhand dessen Signale die Injektionsintervalle und Cosubstratkonzentrationen gesteuert werden kann. Die Milieubedingungen werden durch die Online-Überwachung von Redox-, Sauerstoff-, pH- und Leitfähigkeitssonden technisch kontrolliert, Biosensoren überwachen die biologische Wirksamkeit der Cosubstratversorgung. Dadurch lassen sich optimale Bedingungen für die vollständige reduktive Dechlorierung erzeugen und aufrechterhalten (19).

Sonstiges

Im Rahmen der Sanierungsplanung ist zu entscheiden, ob der CKW-Abbau unter aeroben oder anaeroben Bedingungen sinnvoller ist. In bestimmten Fällen kann auch ein Wechsel der Milieubedingungen von anaerob zu aerob vorteilhaft sein (sog. Anaerob-Aerob-Wechselverfahren). In der ersten anaeroben Stufe werden die höher chlorierten Verbindungen PCE und TCE mit hohen Raten bis zur Stufe des cis-DCE unter Zufuhr von speziellen Substraten dechloriert. Durch Zufuhr von sauerstoffliefernden Stoffen in den Aquifer wird ein vollkommener Milieuwechsel herbeigeführt. In dieser nachgeschalteten aeroben Stufe unterliegen cis-DCE und Vinylchlorid (VC) einem cometabolischen Abbau, der zur vollständigen Mineralisation führt. Der Nachteil dieser Methode besteht darin, dass zur Erreichung des Milieuwechsels die Zugabe großer Mengen an Sauerstoffträgern notwendig ist. Bei bestimmten Projektkonstellationen kann sich dieser „Milieuswitch“ trotzdem rechnen, da der aerobe Abbau der niederen Chlorethene deutlich schneller abläuft als dies unter anaeroben Verhältnissen der Fall wäre.

Zur Vervollständigung der Verfahrenspalette sei noch auf einige in Fachkreisen verwendete Begriffe eingegangen. Angesprochen sind hier die aus dem US-amerikanischen stammenden Techniken Biofence, Bioscreen und Biobarrier. Hier handelt es sich jedoch weniger um definierte Verfahren, sondern eher um Designs, die bei Sanierungsvorhaben angewendet werden können. Allen gemeinsam ist, dass sie bevorzugt abstromig der Schadenherde in den CKW-Fahnen eingesetzt werden, so dass die Schadstoffe an der weiteren Ausbreitung gehindert

oder die CKW-Fracht auf ein verträgliches Maß reduziert wird. Sie bestehen aus definierten aktivierten Zonen (Reaktionszonen), in denen die Schadstoffe durch Zugabe von Substraten/Elektronenakzeptoren abgebaut werden. Diese Zonen können den gesamten Querschnitt der Schadstofffahne im Abstrom oder nur einen definierten Bereich mit hohen Frachten überspannen. Oft sind Schadstoffe in der CKW-Fahne über Jahrzehnte in Schlufflinsen oder Bodenmikroporen diffundiert und werden während der Sanierungsmaßnahmen nun langsam wieder in Bereiche zurück diffundieren, in denen sie bioverfügbar sind.

Zusätzlich ist noch auf die Technologie der Reaktiven Wand (Funnel and Gate, Reaktives System) hinzuweisen. Reaktive Wände sind unterirdisch vom Grundwasser durchströmt, meist quer zur Strömungsrichtung angelegte, mit Füllmaterialien (reaktive Medien) ausgestattete, durchlässige wandförmige Bauelemente. Im Hinblick auf die Nutzung von biologischen Prozessen können derartige Systeme mit Trägermaterialien für Mikroorganismen und organischen Substraten gefüllt werden. Die Substrate dienen als Nährstoffquelle. Die reaktiven Wände können für die gesamte Behandlungszeit gebaut werden. In diesem Fall muss die erforderliche Gesamtmenge an Nährstoffen auf Basis einer Massenbilanz kalkuliert werden. Dabei ist zu berücksichtigen, dass zum Abbau der Schadstoffe auch konkurrierende Prozesse ablaufen. Andererseits können reaktive Wände auch so gebaut werden, dass das Bioreaktormaterial austauschbar oder regenerierbar ist.

Phytoremediation und MNA sind ebenfalls mit biologischen Prozessen verbunden, jedoch wird nicht weiter auf diese Verfahren eingegangen. Phytoremediation stellt in i. d. R. keine Technologie zur wirksamen Reduktion von CKW-Frachten dar. MNA ist keine Sanierungsmaßnahme, sondern eine Sanierungsstrategie ohne sanierungstechnische Eingriffe in den Untergrund.

Zur Vermeidung von Missverständnissen wird nachfolgend noch auf den Begriff „Enhanced Natural Attenuation“ (ENA) eingegangen. Die Bezeichnung ENA wird in Deutschland seit ca. 12 Jahren zur Abgrenzung von der passiven „Monitored Natural Attenuation“ (MNA) benutzt. Unter ENA ist eine In-Situ Sanierungsmaßnahme zu verstehen, die durch Initiierung, Stimulierung oder Unterstützung von natürlichen Schadstoffminderungsprozessen mit dem Einbringen von Substanzen unter Nutzung naturgegebener Reaktionsräume aktiv in das Prozessgeschehen eingreift. Grundsätzlich ist damit in Bezug auf biologische Verfahrenstechniken kein Unterschied zwischen der „mikrobiologischen In-Situ-Sanierung“ und „Enhanced Natural Attenuation“ erkennbar.

5. Schlussfolgerungen und Ausblick

Die Zahl der zur Verfügung stehenden In-Situ-Verfahren zur Sanierung von CKW-Boden- und Grundwasserschäden ist in den letzten Jahren erheblich gewachsen. Hierdurch steigen die Anforderungen an eine transparente und nachvollziehbare Einteilung der verschiedenen Verfahren und eine Vereinheitlichung der zu verwendenden Begriffe.

Hierzu wurde mit der vorgestellten Systematik versucht einen Beitrag zu leisten. Darüber hinaus wurden die verschiedenen Verfahren auf der Grundlage der Systematik beschrieben.

Die aus durchgeführten Sanierungsprojekten mit biologischen In-Situ-Verfahren gewonnenen Erfahrungen haben den Blickwinkel für den Einsatz biologischer Verfahren verändert. Im Rahmen der Sanierungsplanung steht heute ein großes Spektrum von Verfahren zur Verfügung. Bei jedem zu planenden Projekt ist gefordert das für den Anwendungsfall jeweils optimale Verfahren zu identifizieren.

Im Hinblick auf die Anwendung biologischer Verfahren hat sich der Erkenntnisstand in den letzten Jahren ebenfalls verändert. Bis vor wenigen Jahren herrschte die Auffassung vor, dass ein biologischer Abbau in Anwesenheit von CKW-Phasen aufgrund der toxischen Wirkung zu hoher CKW-Konzentrationen nicht möglich wäre. Frühere Untersuchungen zeigten entsprechende Limitierungen des CKW-Abbaus bei Annäherung an die maximalen CKW-Konzentrationen von beispielsweise ca. 150 mg/l für PCE (20). Neuere Untersuchungen dagegen belegen einen noch wirksamen CKW-Abbau in Höhe der CKW-Sättigungskonzentrationen (21). Zum anderen wurde bei in den letzten Jahren durchgeführten Untersuchungen festgestellt, dass durch biologische Prozesse eine starke Mobilisierung von CKW aus der Phase erfolgt, die bei PCE bis zu einer Konzentrationssteigerung um den Faktor 14 führen kann (22). Die Erklärung hierfür liegt wahrscheinlich darin, dass bei den biologischen Prozessen Umwandlungsprodukte entstehen (Biotenside), die eine starke Mobilisierung von CKW-Phasen auslösen.

Nach dem heutigen Kenntnisstand können somit in Aquiferen vorliegende Restphasen durch biologische Prozesse mobilisiert und dem biologischen Abbau zugänglich gemacht werden. Hiermit bestehen entgegen der früheren Ansichten jedoch Möglichkeiten zur biologischen Sanierung der Restphasen bei bereits in Sanierung befindlichen Vorhaben oder bei noch nicht in Angriff genommenen CKW-Kontaminationen entsprechender Ausbildung.

Schlussfolgernd können biologische In-Situ-Verfahren nach heutigem Kenntnisstand somit wirksame Techniken zur Beseitigung von CKW-Grundwasserschäden darstellen. Mit der vorliegenden Vielfalt der zur Verfügung stehenden Verfahren bestehen gute Voraussetzungen, um in Bezug auf die jeweiligen Standortverhältnisse die Verfahrensauslegungen variabel zu gestalten und die optimale Sanierungskonzeption zu identifizieren. Die Entscheidung darüber welches der biologischen Verfahren oder welche Verfahrenskombination letztendlich die besten Voraussetzungen für eine effiziente und kostengünstige Sanierung bietet, kann nur durch eine fundierte Analyse des Einzelfalles getroffen werden.

Literaturverzeichnis

- (1) Bayerisches Landesamt für Wasserwirtschaft (2001): Häufigkeiten von Schadstoffgruppen auf Altstandorten <http://www.bayern.de/lfw/welcome.htm>

- (2) Naumann, J. & Rauch, F. (2006): Einsatz innovativer Verfahren zur Sanierung von Grundwasserschäden in Deutschland – Ergebnisse einer Umfrage des Arbeitskreises der Altlastensanierungsgesellschaften der Länder (AKASG) Altlasten 2006, Beiträge zum Seminar, Herausgeber: Egloffstein, Burkhardt, Czurda, 17.-18.05.2006, Universität Karlsruhe, Forschungszentrum Umwelt, Band 11, pp. 33-44
- (3) Stupp, H. D. & Paus, L. (1999): Migrationsverhalten organischer Grundwasser-Inhaltsstoffe und Ansätze zur Beurteilung von MNA
TERRA TECH 5/1999, S. 32 – 37
- (4) Stupp, H.D.; Bakenhus, A.; Stauffer, R. & Lorenz, D. (2006): Sanierungsoptimierung von CKW-Grundwasserschäden - Möglichkeiten zur Reduzierung der Sanierungskosten -
Altlasten Spektrum 6/2006, S. 313-323
- (5) Löffler, F.E.; Tiedje, J.M.; Fathepure, B.Z.; Hayes, K.F., Abriola, M.A.; Pennell, K.D. & Adriaens, P. (1998): Remediation of chlorinated Solvents at the Bachman Road Site Using Innovative Technologies
Abbau chlorierter Kohlenwasserstoffe, Tagungsband zum Workshop am 28./29.09.1998 in Stuttgart
Frauenhofer-Institutszentrum Stuttgart
Hrsg.: Dieter Bryniok, Petra Koziollek
- (6) Young, Y. & McCarthy, P.L. (1998): Reductive Dechlorination of cis-1,2-Dichlorethene and Vinyl Chloride by „Dehalococcoides ethogenes“.
Environmental Science and Technology. Vol. 35, pp. 516-521
- (7) Maymo-Gatell, Nijenhuis, I. & Zinder, S. (2001): Reductive Dechlorination of cis-1,2-Dichlorethene and Vinyl Chloride by „Dehalococcoides ethogenes“.
Environmental Science and Technology. Vol. 35, pp. 516-521
- (8) Hendrickson, E.R.; Payne, J.A.; Young, R.M.; Starr, M.G.; Perry, M.P.; Fahnestock, S., Ellies, D.D. & Ebersole, R.C. (2002): Molecular Analysis of Dehalococcoides 168S Ribosomal DNA from Chloroethene contaminated sites throughout North America and Europe., Applied Environmental Microbiology, Vol. 68, pp. 485-495
- (9) <http://www.regenesis.com/>
- (10) <http://www.gasinfusion.com/en/iSOC/default.asp>
- (11) <http://www.umweltfactory.de/deutsch/sanierung/insisa.htm>
- (12) <http://www.biopract.de/>
- (13) F. I. Engelmann; H. Ehbrecht; Dr. R. Giese und C. Roscher (2004): Formierung durchlässiger Reinigungswände in Grundwasserleitern durch Injektion reaktiver Gase am Beispiel der BIOX-WAND Berlin. Proceedings des Dresdner Grundwasserforschungszentrums e.V. Fachtagung Innovative Verfahren und Techniken zur In-situ-Grundwasseranierung. 9. Dresdner Grundwasserforschungstage.
(14) http://clu-in.org/techfocus/default.focus/sec/Bioventing_and_Biosparging/cat/Overview/
- (15) <http://www.ieg-technologie.de/html/grundwasserzirkulationsbrunnen.html>
- (16) <http://dbiproducts.com/>
- (17) <http://www.biosoil.com/site/de/biosoilbv/index.html>
- (18) Held, T.; Blotevogel, H.J.; Dörr, H.; Schorke, N. & Gödel, H.-U. (2006): In-situ Reaktive Zone (IRZ) – Einsatz von Melasse zur mikrobiellen In-situ-Sanierung einer CKW-Kontamination im Grundwasser
Altlasten spektrum, 4/2006, pp. 208-215
- (19) <http://www.sensatec.de/>
- (20) Smatlak, C.R., Gossett, J.M. & Zinder, S.H. (1996): Comparative Kinetics of Hydrogen Utilization for Reductive Dechlorination of Tetrachloroethene and Methanogenesis in an Anaerobic Enrichment Culture
Environmental Science and Technology, Vol. 30, pp. 2850-2858
- (21) Young, Y. & McCarthy, P.L. (2000): Biologically Enhanced Dissolution of Tetrachloroethene DNAPL.
Environmental Science and Technology, Vol. 34, No. 14, pp. 2979-2984
- (22) Cope, N. & Hughes, J.B. (2001): Biologically-enhanced removal of PCE from NAPL source zones.
Environmental Science and Technology, Vol. 35, No. 10, pp. 2014-2021



Dr. Stupp Consulting GmbH

Grundwasser-Consulting und
Risiko-Services

Hans Dieter Stupp,
Albrecht Bakenhus,

Michael Gass: Dr. Stupp Consulting GmbH
Hauptstraße 206
51469 Bergisch Gladbach

Tel.: 02202-2809-11
Fax.: 02202-2809-28
Email: info@dscweb.de
Homepage: www.dscweb.de
Domainpages: www.mtbe.de
www.altlastenrisiko.de
www.sanierungsverfahren.de

Stephan Hüttmann Sensatec GmbH
Wischofstraße 1-3
24148 Kiel

Tel.: 00431-389009-0
Fax.: 00431-389009-19
Email: s.huettmann@sensatec.de
Homepage: www.sensatec.de

Frank Ingolf Engelmann Sensatec GmbH
Büro Berlin Brandenburg
Ebereschenstrasse 29
16833 Fehrbellin

veröffentlicht im Altlastenspektrum, 03/2007