

2.2 Bestimmung des Leistungspotentials der autochthonen Bakteriozönose für den Abbau von Chloraromaten in kontaminiertem Grundwasser

J. DERMIETZEL*, A. VIETH*, K. SEIFERT**

* UFZ-Umweltforschungszentrum Leipzig-Halle GmbH, Sektion Hydrogeologie, Theodor-Lieser-Str. 4, 06120 Halle/Saale

** Universität Leipzig-Fakultät für Biowissenschaften, Interdisziplinäre Isotopenforschung, Permoserstr. 15, 04318 Leipzig

Einleitung

Der mikrobielle Abbau von Chlorbenzenen mit Rein- und Mischkulturen ist seit den achtziger Jahren sowohl unter aeroben [1, 2] als auch unter anaeroben [3, 4, 5] Bedingungen untersucht worden. Voraussetzung für die vollständige Mineralisierung von Chloraromaten ist die Spaltung der C-Cl-Bindung(en). Nach gegenwärtigem Kenntnisstand über den Reaktionsmechanismus [8] erfolgt die Dechlorierung in Gegenwart von Sauerstoff **nach** der Spaltung des aromatischen Ringes. Mit steigendem Chlorierungsgrad steigt die Stabilität des π -Elektronensystems gegen oxidativen Abbau. Dagegen werden reduktive enzymatische Angriffe durch anaerobe Mikroorganismen zunehmend begünstigt. Beim anaeroben Abbau von Chloraromaten findet eine schrittweise reduktive Dechlorierung statt, die beim Monochlorbenzen endet [9].

Folgerichtig sollte für ein kontaminiertes Wasser, das ein Gemisch aus höher und niedrig chlorierten Benzenen enthält, eine zweistufige Behandlung mit anaerober Dechlorierung und einer nachgeschalteten aeroben Stufe zum Abbau der niedrig chlorierten Benzene das Verfahren der Wahl sein.

Die praktische Umsetzung dieses Verfahrensprinzips in Wirbelschichtreaktoren ist sowohl mit Modellwässern [6] als auch mit real kontaminiertem Grundwasser [7] erfolgreich demonstriert worden.

Mit den vorliegenden Untersuchungen sollte geprüft werden, ob diese Strategie auch auf die *in situ*-Sanierung des Bitterfelder Grundwassers übertragbar ist.

Erste Untersuchungen haben gezeigt, daß die Grundwässer bis 10^5 KBE pro Milliliter und die Sedimente bis zu 10^6 KBE pro Gramm Trockengewicht mit autochthonen Bakterien besiedelt sind [10]. Neben aeroben Bakterien dominieren denitrifizierende, eisen- sowie manganreduzierende Bakterien bei den ökophysiologischen Gruppen.

Das Konzentrationsverhältnis der Aromaten im quartären Grundwasser des Untersuchungsgebietes - viel Monochlorbenzen (MCB) neben wenig Dichlorbenzenen (DCB) und Benzen - legt den Schluß nahe, daß im Aquifer ein anaerober Abbauprozess stattfindet, der auf der Stufe des MCB einen vorläufigen Abschluß erreicht. Bei dieser Ausgangssituation sollte folglich die Stimulation des aeroben Abbaupotentials gute Erfolgsaussichten haben.

Versuchsdurchführung

Die Untersuchungen zur aeroben Degradation der Schadstoffe im Bitterfelder Grundwasser, vorzugsweise von Chlorbenzen, erfolgte durch Bestimmung des biologischen Sauerstoffbedarfs BSB₅ bei 20°C mit dem Gerät OxiTop Control der Firma WTW. Dabei wird der Sauerstoffverbrauch einer Wasserprobe mit einem Volumen von 365 oder 432 ml respirometrisch ermittelt und in Zeitabständen von einer Stunde gespeichert. Auf diese Weise kann die Kinetik der sauerstoffverbrauchenden Prozesse verfolgt werden. In geeigneten Zeitabständen wurden die Konzentrationen der organischen Kontaminanten durch Probenahme aus den BSB-Flaschen ermittelt. Nach dem Abklingen der Sauerstoffverbrauchskurve wurde den Proben erneut Chlorbenzen in definierter Menge zugefügt und Sauerstoffverbrauch sowie Konzentrationsänderungen verfolgt.

Schließlich wurde die Vollständigkeit des Abbaus von Chlorbenzen und 1,4-Dichlorbenzen durch Ermittlung von Kohlenstoff- und Chlorbilanzen überprüft. Nähere experimentelle Angaben dazu sind den entsprechenden Abschnitten zu entnehmen.

Zur Verifizierung der Laborergebnisse unter naturnahen Bedingungen stand die Säule 5 des mobilen Reaktors auf dem SAFIRA-Versuchsgelände zur Verfügung. Die Säule wurde mit erbohrten Sedimenten aus dem quartären Bitterfelder Grundwasserleiter gefüllt und mit Grundwasser aus der Meßstelle Saf Bit 7/97 durchströmt.

Die Säule wurde in der ersten Phase bis Ende 1998 als Referenzversuch betrieben, um eventuelle Veränderungen der Grundwasserqualität bei der Passage von einem Meter Sediment bei einer realitätsnahen Flußrate zu beobachten. Es wurde von der Annahme ausgegangen, daß autochthone Bakterien mit dem Grundwasser in die Säule transportiert werden und sich auf den Sedimenten ansiedeln, so daß in der auf 14°C thermostatierten Säule ähnliche Bedingungen wie im realen Aquifer herrschen. Der Versuch diente damit gleichzeitig zur Absicherung der Ergebnisse aus parallel laufenden Reaktoren.

Nach Abschluß des Referenzversuches wurden mit der gleichen Säulenfüllung Versuche zum aeroben Abbau von Chloraromaten durchgeführt. Zur Herstellung von aeroben Bedingungen wurde in den Grundwasserzustrom mit Hilfe eines zweiten Dispensors Luft dosiert und das Wasser/Luft-Gemisch ohne weitere Vorbehandlung dem Säuleneinlaß zugeführt.

Probenahmen zur Bestimmung der Zulauf- und Ablaufkonzentrationen des Grundwassers erfolgten in regelmäßigen Abständen wöchentlich. Während der aeroben Fahrweise wurden zusätzlich Analysenproben aus den seitlichen Ventilen entnommen, um das vertikale Konzentrationsprofil innerhalb der Säule zu erfassen.

Ergebnisse

BSB-Versuche mit Grundwasser aus unterschiedlichen Pegeln

Die Untersuchungen konzentrierten sich auf den Chloraromaten-Abbaus im quartären Grundwasserleiter. Dabei sollte die Frage beantwortet werden, ob ein Zusammenhang zwischen dem Abbaupotential an der jeweiligen Meßstelle und deren Vorbelastung besteht. Im Ergebnis dieser Versuchsreihe mit Grundwasser-

proben aus zehn Meßstellen wurde festgestellt, daß in allen mit Chloraromaten belasteten Meßstellen mit Ausnahme der GWM 19/91 ein mikrobiologisches Abbaupotential für Chlorbenzen vorhanden ist.

Im Randbereich der Schadstoff-Fahne mit MCB-Konzentrationen nahe oder unterhalb der Nachweisgrenze (0,002 mg/l) ergab sich ein differenziertes Bild. In den Meßstellen Saf Bit 21/97 und 25/98 setzte nach Zugabe von MCB (30 mg/l) keine relevante Sauerstoffzehrung ein, während mit Wasserproben der ebenfalls kaum belasteten Meßstellen Saf Bit 18/97 und 26/98 der zum Abbau einer MCB-Konzentration von 30 mg/l erforderliche Sauerstoffverbrauch erreicht oder übertroffen wurde. Die Ergebnisse können als Hinweis darauf verstanden werden, daß ein Abbaupotential für Chloraromaten nicht *a priori* vorhanden ist, sondern sich in der autochthonen Bakteriozönose erst unter dem Anpassungsdruck einer längeren Belastung entwickelt. Diese Anpassung könnte durch Austausch und Neukombination von Genen unterschiedlicher Mikroorganismen erfolgen, wie das aus neuen Ergebnissen genetischer Analysen abgeleitet wird [11,12].

Kohlenstoffbilanz des Chloraromaten-Abbaus

Das Verschwinden von Schadstoffen innerhalb eines Betrachtungsraumes ist eine notwendige, aber keinesfalls hinreichende Bedingung für ihren Abbau. Die vollständige Umwandlung zu mineralischen Endprodukten kann nur durch den Nachweis dieser Reaktionsprodukte bewiesen werden.

Mit Hilfe von Isotopen-Tracermethoden ist es möglich, die Reaktionswege von Einzelstoffen in einem Vielstoffgemisch aufzuklären. Als Tracer zur Ermittlung der Kohlenstoffbilanz beim aeroben Abbau von Chloraromaten diente ¹⁴C-Chlorbenzen (uniform markiert). Die Durchführung der Tracerversuche und der Aktivitätsmessungen erfolgte in enger Zusammenarbeit mit der Universität Leipzig, Fakultät für Biowissenschaften, Pharmazie und Psychologie - Interdisziplinäre Isotopenforschung. Die pro Versuch eingesetzte Aktivität lag fast zwei Größenordnungen unter der zulässigen Freigrenze (für C-14: 500.000 Bq).

Die Tracerversuche erfolgten mit Grundwasser aus der Meßstelle Saf Bit 7/97, das vor Ort in sterilisierte Flaschen abgefüllt wurde. Damit wurden BSB5-Versuchsreihen bei 20°C mit je 365 ml Wasser in zwei bis vier parallelen Ansätzen pro Pegel durchgeführt. Es wurde der Sauerstoffverbrauch respirometrisch bestimmt und im 5-Tage-Rhythmus Analysen-Proben, die ^{14}C -Aktivität im Wasser und in dem absorbierten Kohlendioxid mittels Flüssigszintillationstechnik (LSC) gemessen. Am Versuchsende erfolgte eine vollständige Bilanzierung der ^{14}C -Aktivitätsverteilung in den Kompartimenten Wasser, Kohlendioxid und Biomasse.

Abbildung 1 zeigt die Sauerstoffverbrauchskinetik für die original belastete Probe (a: 23 mg/l Chlorbenzen + 0,3 mg/l Dichlorbenzene) und nach neuer Zugabe von Chlorbenzen (b: 30 mg/l). Es konnten 91% der eingesetzten ^{14}C -Aktivität wiedergefunden werden, davon 68% im CO_2 , 16% in der Lösung und 7% im Bioschlamm. Bei dem in Lösung befindlichen Anteil handelt es sich nicht um die Ausgangssubstanz.

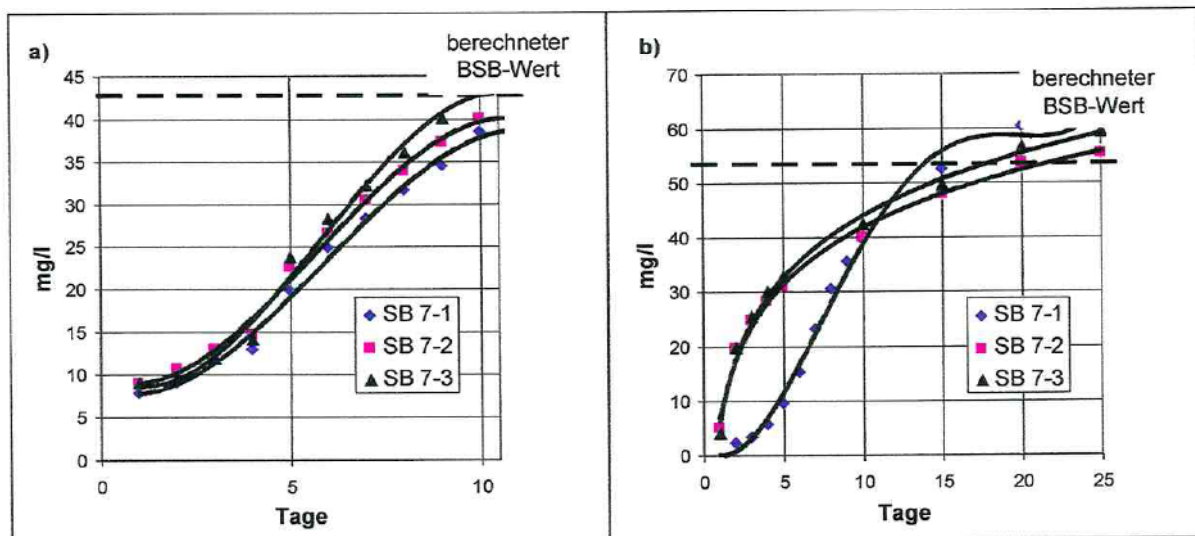


Abb. 1: Sauerstoffverbrauch der Originalprobe (a) und nach Zugabe von Chlorbenzen mit einer Anfangskonzentration von 30 mg/l (b)

Ein weiterer Tracerversuch mit dem Grundwasser der Meßstelle Saf Bit 7/97 und ^{14}C -markiertem 1,4-DCB als Tracer führte zu vergleichbaren Ergebnissen. Es wurden 66,4% der eingesetzten Aktivität am CO_2 -Fänger NaOH gebunden und 6

bzw. 2% als Metabolite im Wasser bzw. in der Biomasse wiedergefunden. Wegen der längeren Versuchszeit betrug die Wiederfindungsrate bei diesem Versuch nur 74%.

Aus Sicht der Kohlenstoffbilanz ist damit der experimentelle Nachweis für eine aerobe Degradation von Chlorbenzenen durch die im Grundwasser vorhandenen autochthonen Mikroorganismen erbracht worden.

Chlorbilanz des Chlorbenzen-Abbaus

Wegen des hohen Chlorid-Gehaltes im Grundwasser des Pegels Saf Bit 7 ist der analytische Nachweis der Chloridneubildung aus Chlorbenzen ungenau. Beim vollständigen Abbau von Chlorbenzen mit einer Konzentration von 30 mg/l liegt die theoretische Konzentrationszunahme nur in der Größenordnung von 2% des natürlichen Chloridgehaltes (450 - 470 mg/l). Deshalb erfolgte eine Absenkung des originären Chloridgehaltes auf weniger als ein Fünftel durch Verdünnung der Proben. Abbildung 2 zeigt die Ergebnisse der BSB-Messungen und der Konzentrationserhöhung von Chlorid über drei Meßperioden.

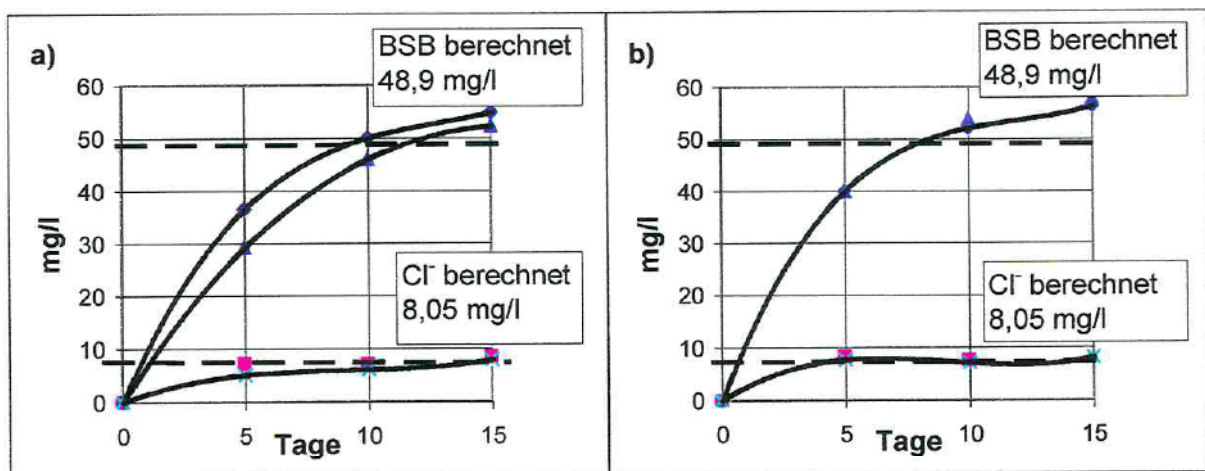


Abb. 2: BSB (obere Kurve) und Chloridbildung (untere Kurve) mit Grundwasser Saf Bit 7/97 nach Zugabe von Chlorbenzen (25,5 mg/l)
a) nach Verdünnung mit destilliertem Wasser
b) nach Verdünnung mit Nährsalzlösung

Bei vollständigem Abbau des Chlorbenzens wäre ein BSB von 48,9 mg/l und eine Chlorid-Neubildung von 8,05 mg/l zu erwarten.

In beiden Fällen erreicht die Chloridbildung schon nach fünf Tagen den theoretischen Wert, während der Sauerstoffverbrauch erst nach mehr als 15 Tagen abgeschlossen ist. Das steht in Übereinstimmung mit den einleitend zitierten reaktionsmechanistischen Vorstellungen zur oxidativen Dehalogenierung von Chloraromaten, nach denen die Dechlorierung in einem frühen Stadium des Abbaus, als erster Schritt nach der Ringspaltung stattfindet.

Es ist bemerkenswert, daß der Chlorbenzenabbau selbst nach einer Verdünnung der Originalprobe um den Faktor 5 (siehe Abb. 2a) nicht wesentlich langsamer abläuft als nach Zugabe von Nährsalzlösung (2b). Demnach ist die Degradation nicht durch den Mangel an essentiellen Elementen limitiert.

Analoge Versuche mit 1,4-DCB (6 mg/l) führten ebenfalls zu der erwarteten Chloridfreisetzung, die allerdings erst nach zwei Versuchsperioden (14 Tage) abgeschlossen war. Der Zusatz einer leicht metabolisierbaren Kohlenstoffquelle verzögerte die Chlorabspaltung aus 1,4-DCB zusätzlich, weil offenbar das leicht abbaubare Substrat bevorzugt verwertet wurde.

Kinetik des Chlorbenzenabbaus

Durch den Nachweis der Metabolite des im MCB gebundenen Kohlenstoffs und Chlors ist der kausale Zusammenhang zwischen Sauerstoffzehrung (BSB) und MCB-Abbau eindeutig nachgewiesen worden. Daher ist der Zeitverlauf der BSB-Werte als Kinetik des MCB-Abbaus interpretierbar, wenn man von der begründeten Annahme ausgeht, daß im geschwindigkeitsbestimmenden Schritt der MCB-Abbausequenz Sauerstoff verbraucht wird. Die Umrechnung erfolgt mit Hilfe des stöchiometrischen Faktors: die Mineralisierung von 1 mg MCB benötigt 2 mg O₂.

Aus dem zeitlichen Verlauf des Sauerstoffverbrauchs (Abb. 3) ist ableitbar, daß MCB in Konzentrationen zwischen 30 und 100 mg/l ohne Zusatz weiterer Hilfsstoffe bei 20°C nach einem Zeitgesetz 1. Ordnung mit einer Halbwertszeit (HWZ) von 4 bis 7 Tagen abgebaut wird.

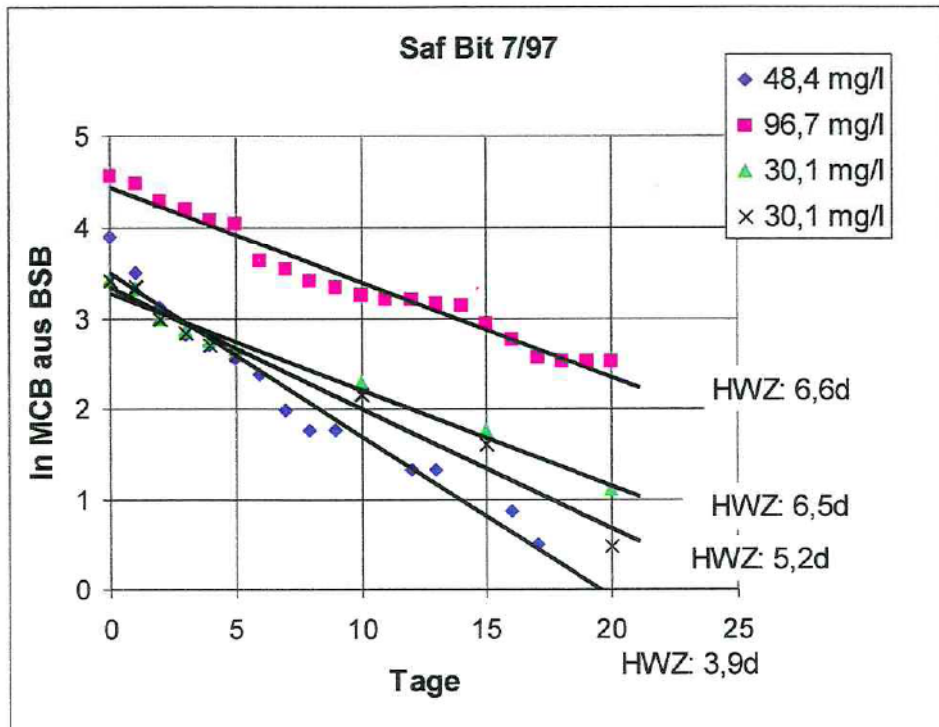


Abb. 3: Kinetik des aeroben Abbaus von MCB: Einfluß der Ausgangskonzentration

Für einen 'vollständigen' Abbau auf <1% der Ausgangskonzentration wären nach diesem Zeitgesetz sieben Halbwertszeiten, also 28 bis 49 Tage erforderlich. Versuche zum Temperatureinfluß haben gezeigt, daß die aktuelle Grundwassertemperatur von 14°C nur eine geringfügige Erniedrigung der Abbaurrate bewirkt.

Der Einfluß des Chlorierungsgrades auf den aeroben Chloraromatenabbau

Der aerobe Abbau aromatischer Verbindungen erfordert die Ringspaltung durch enzymkatalysierten elektrophilen Angriff des Sauerstoffs. Dieser Schritt wird durch die elektronenziehende Wirkung elektronegativer Substituenten wie Chlor behindert. Mit steigendem Chlorierungsgrad ergibt sich eine herabgesetzte Elektronendichte am aromatischen Ring, die mit zunehmender Persistenz der Verbindung im aeroben Milieu einhergeht. Neben der Anzahl der Chlorsubstituenten spielt auch ihre Position eine Rolle. Je näher die Nachbarschaft, desto stärker wird der stabilisierende Effekt auf den aromatischen Ring.

Diese reaktionsmechanistischen Vorstellungen erklären den experimentellen Befund, daß es zwischen der Abbaubarkeit von MCB und 1,4-DCB nur geringfügige Unterschiede gibt. Die polarisierende Wirkung der beiden Chloratome in para-Stellung wird über den Ring verteilt und damit abgeschwächt.

Eine Ausweitung der Versuche auf 1,3-DCB, 1,2-DCB und 1,2,4-TCB zeigte dagegen, daß die autochthonen Mikroorganismen des Grundwassers der Meßstelle Saf Bit 7/97 diese Verbindungen nicht oder nur unvollständig verwerten können. Geschwindigkeit und Vollständigkeit der Abbaureaktionen nahmen in dieser Reihenfolge ab. 1,2,4-Trichlorbenzen erwies sich innerhalb des Versuchszeitraumes als praktisch persistent.

Versuchsergebnisse im mobilen Reaktor unter anaeroben Bedingungen

Etwa sechs Wochen nach Beginn des Versuches hatten sich in der Säule stationäre Verhältnisse bezüglich der Schadstoffkonzentrationen eingestellt. Die Verringerung der Flußrate um den Faktor 3 im letzten Quartal 1998 hatte keine erkennbaren Auswirkungen. Die Zulaufkonzentrationen der Schadstoffe waren allerdings starken zeitlichen Schwankungen unterworfen (Abb. 4), so daß die Erkennung signifikanter Unterschiede zwischen den Zulauf- und Ablaufkonzentrationen erschwert war.

Die Trendlinien für die Quotienten der Ablauf-/Zulaufkonzentrationen von Benzen und Chlorbenzen zeigen einen weitgehend konstanten Verlauf und liegen

erwartungsgemäß nahe dem Wert 1 (bzw. 100%). Im Falle des 1,4-DCB stellte sich dagegen über einen Zeitraum von mehr als sechs Monaten zwischen Zulauf- und Ablaufkonzentrationen ein annähernd konstantes Verhältnis von 0,75 ein (Abb. 5).

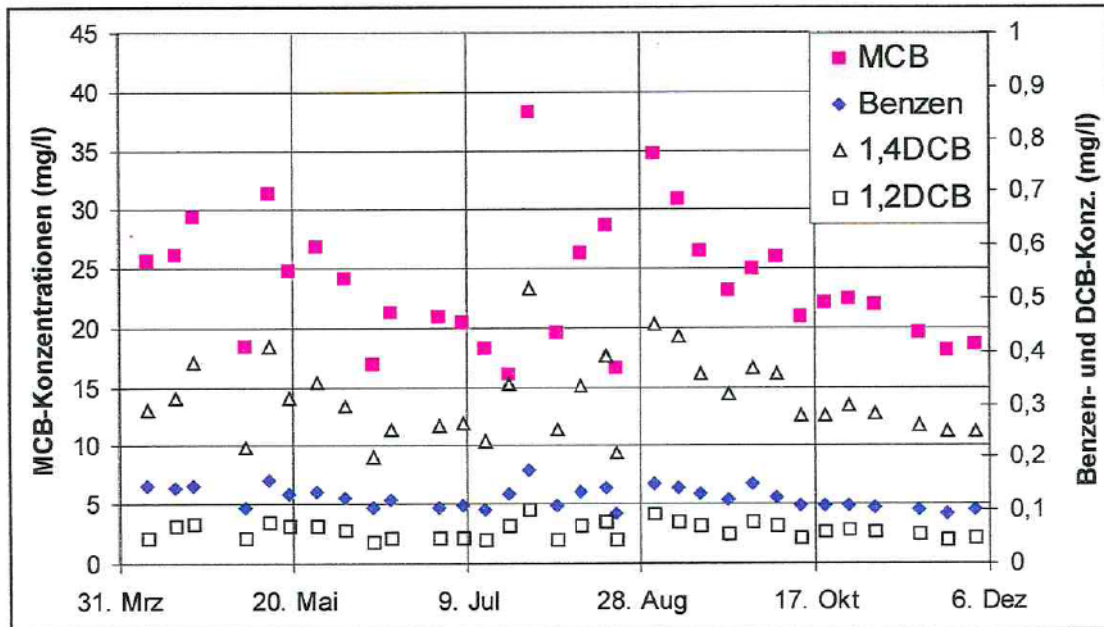


Abb. 4: Zeitverlauf der Zulaufkonzentrationen für Benzen, Monochlorbenzen und Dichlorbenzene

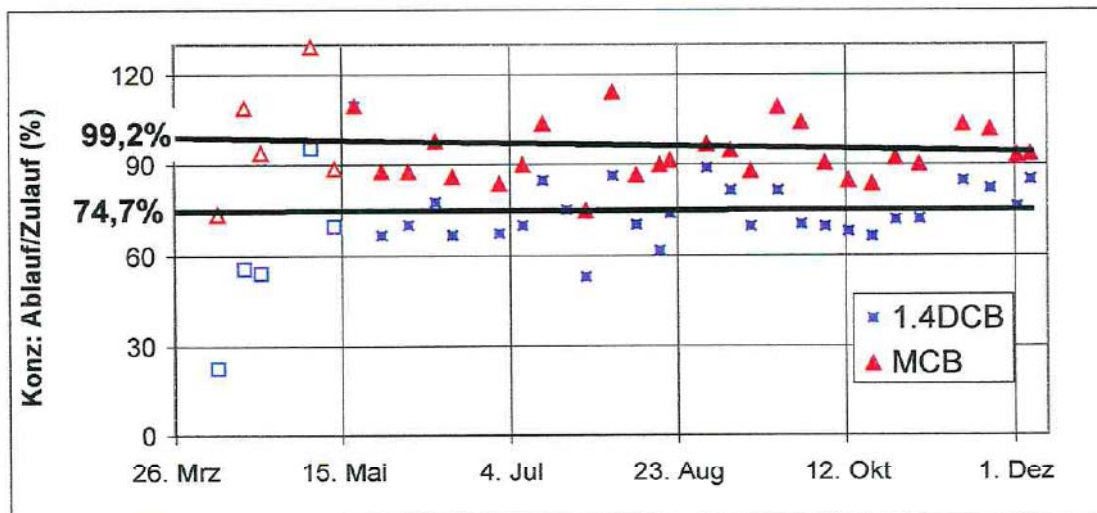


Abb. 5: Verhältnis Ablauf/Zulaufkonzentrationen für Monochlorbenzen und 1,4-Dichlorbenzen (Zulauf=100%)

Die aus unserer Sicht wahrscheinlichste Erklärung für die Abnahme der 1,4-DCB-Konzentration besteht darin, daß unter anaeroben Bedingungen im Aquifer eine Dechlorierung von Dichlorbenzenen zu Monochlorbenzen stattfindet.

Aus der Literatur ist bekannt, daß halogenierte Aromaten als terminale Elektronenakzeptoren dienen können, wenn verwertbare organische Moleküle als Wachstumssubstrat zur Verfügung stehen [13, 14]. Mit fallendem Chlorierungsgrad nimmt das Oxidationspotential polychlorierter Aromaten ab, so daß Monochlorbenzen als Endprodukt dieser Reaktionssequenz angesehen wird.

Im Bitterfelder Aquifer ist jedoch auffälligerweise Benzen in geringen Konzentrationen ein ständiger Begleiter des Chlorbensens. Es ist daher nicht auszuschließen, daß es durch partielle Dechlorierung von Monochlorbenzen ständig nachgebildet wird. Der hohe Chloridgehalt des Grundwassers, für den es keine geogene Erklärung gibt, ist ein weiteres Indiz für mögliche Dechlorierungsreaktionen halogener organischer Moleküle.

Ob die postulierten Reaktionen wirklich ablaufen, kann nur durch zusätzliche Experimente entschieden werden, für die eine längere Säule erforderlich wäre.

Versuchsergebnisse im mobilen Reaktor unter aeroben Bedingungen

Wie im experimentellen Teil beschrieben, wurde Mitte Februar 1999 mit der Luftdosierung zur Herstellung aerober Bedingungen in der Säule begonnen. Um den Einfluß sauerstoffverbrauchender Konkurrenzreaktionen gering zu halten, wurde ein Volumenverhältnis Wasser/Luft=1:1, das entspricht etwa 200 ml gasförmiger Sauerstoff pro Liter Wasser, eingestellt. Nach zwei Wochen war die MCB-Konzentration im Säulenablauf auf = 0,1 mg/l und die aller übrigen Schadstoffe unter die Nachweisgrenze abgesunken. Dieser Betriebszustand wurde über acht Wochen beibehalten, ohne daß erkennbare Beeinträchtigungen des Fließregimes durch Verstopfung oder ähnliches auftraten. Das Überschußgas wurde allerdings nicht gleichmäßig, sondern schubweise mit dem Ablauf abgeführt. Nach Abstellen der Luftversorgung stellten sich wieder die ursprünglichen Konzentrationsverhältnisse im Ablaufwasser ein.

In weiteren Versuchsläufen wurde bei einem konstanten Wasser/Luft-Verhältnis (2:1) die Fließgeschwindigkeit variiert und neben den Zulauf- und Ablaufkonzentrationen, soweit möglich, das vertikale MCB-Konzentrationsprofil innerhalb der Säule gemessen. Die Ergebnisse sind in Abb. 6 sowohl im linearen als auch im halblogarithmischen Maßstab dargestellt.

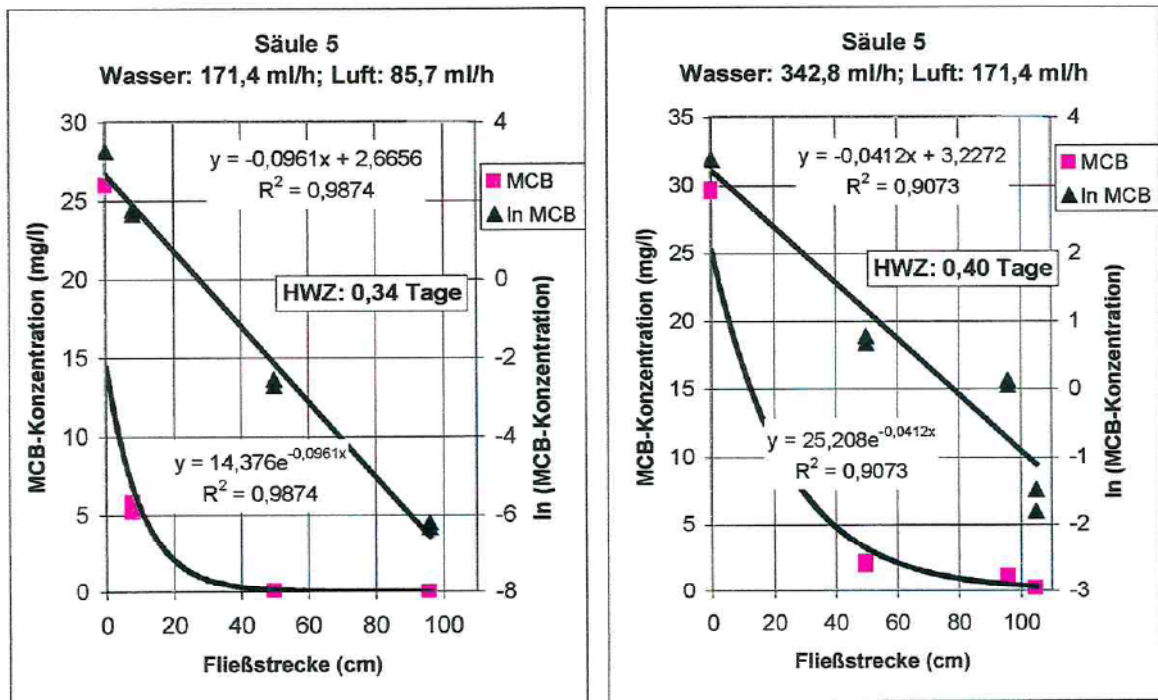


Abb. 6: Kinetik des aeroben MCB-Abbaus bei variiertem Fließgeschwindigkeit

Es ist erkennbar, daß sich das vertikale MCB-Konzentrationsprofil relativ gut durch eine Exponentialfunktion, bzw. im halblogarithmischen Maßstab durch eine Gerade anpassen läßt, das heißt, die Konzentrationsabnahme folgt, wie auch im Laborversuch, einem Zeitgesetz 1. Ordnung. Da Porenvolumen und Fließgeschwindigkeit konstant sind, entspricht jeder Punkt der Fließstrecke einer definierten mittleren Verweilzeit. Daraus lassen sich Geschwindigkeitskonstante und Halbwertszeit (HWZ) der Reaktion abschätzen. Diese Parameter blieben bei einer Verdoppelung der Fließgeschwindigkeit praktisch konstant und lieferten damit die Bestätigung für die Richtigkeit des gefundenen Zeitgesetzes.

Schlußfolgerungen

Die autochthone Biozönose des quartären Grundwasserleiters im Bitterfelder Untersuchungsgebiet enthält Spezialisten, die in der Lage sind, die dominierenden Schadstoffe Monochlorbenzen und 1,4-Dichlorbenzen aerob abzubauen.

Bei erneuter Zugabe von MCB (bis 100 mg/l) in das Grundwasser wird dieses als einzige Kohlenstoff- und Energiequelle akzeptiert und nach einem Zeitgesetz 1. Ordnung mit einer Halbwertszeit zwischen 4 und 7 Tagen quantitativ abgebaut. Der Verbleib des Kohlenstoffs konnte durch Isotopentracerexperimente nahezu vollständig aufgeklärt werden. Etwa zwei Drittel werden in Form von Kohlendioxid mineralisiert. Das organisch gebundene Chlor wurde unter den gleichen Reaktionsbedingungen im Rahmen der analytischen Fehlergrenze quantitativ als Chlorid wiedergefunden.

Der aerobe Abbau von 1,3- und 1,2- Dichlorbenzen ist bereits erschwert, während sich 1,2,4-Trichlorbenzen nahezu persistent verhält.

Die Ergebnisse des Referenzversuches im mobilen Reaktor entsprachen weitgehend den Erwartungen. Mit Ausnahme von 1,4-DCB wurden keine signifikanten Änderungen zwischen Zulauf- und Ablaufkonzentrationen beobachtet. Für 1,4-DCB konnte im Ablauf eine signifikante Konzentrationsabnahme nachgewiesen werden, die auf mikrobiologische Dechlorierungsreaktionen im Aquifermaterial schließen läßt.

Wie im Laborversuch genügte allein das Zudosieren von Luft in das belastete Grundwasser, um aerobe Abbaureaktionen zu stimulieren. Die Abnahme der MCB-Konzentration über die beobachtete Fließstrecke verläuft nach einem Zeitgesetz 1. Ordnung mit einer Halbwertszeit von etwa 0,4 Tagen. Das bedeutet, daß bereits auf einem Meter Fließstrecke nach der Luftinjektion bei realer Fließgeschwindigkeit (0,2 m/d) ein praktisch vollständiger Schadstoffabbau erreicht werden kann. Gegenüber den Laborversuchen wäre das eine Steigerung der Abbaurate um eine Größenordnung. Ein direkter Vergleich zwischen den kinetischen Daten aus Labor- und Säulenversuchen ist allerdings nicht zulässig, da im ersten Fall der Sauerstoffverbrauch und im zweiten Fall die MCB-Konzentrationsabnahme

gemessen wurden. Eine höhere Abbaurate in der Säule wäre aber durchaus plausibel, weil zwischen den auf den Sedimenten angesiedelten Bakterien und den im Porenwasser gelösten Schadstoffen ein intensiverer Stoffaustausch möglich ist als im freien Wasser.

Zusammenfassend kann festgestellt werden, daß Labor- und Säulenversuche im mobilen Reaktor zu konsistenten Ergebnissen führten. Diese lassen den Schluß zu, daß das aerobe Abbaupotential unter den realen Bedingungen im Aquifer praktisch nur durch den Mangel an Sauerstoff limitiert ist. Die Ergebnisse sind daher ermutigend für eine aerobe *in situ*-Sanierungsstrategie auf der Stufe des Chlorbenzens und (mit Einschränkungen) der Dichlorbenzene.

Literatur

- [1] REINEKE, W. & KNACKMUSS, H.-J. (1984): Microbial metabolism of haloaromatics: isolation and properties of a chlorobenzene-degrading bacterium.-Appl. Environ. Microbiol. 47, 395-402
- [2] REINEKE, W. & KNACKMUSS, H. J. (1988): Microbial degradation of haloaromatics.- Ann. Rev. Microbiol. 42, 263-287.
- [3] MOHN, W. W. & TIEDJE, J. M. (1992): Microbial reductive dehalogenation.- Microbiol. Rev. 56, 482-507
- [4] RAMANAND, K., BALBA, M. T. & DUFFY, J. (1993): Reductive dehalogenation of chlorinated benzenes and toluenes under methanogenic conditions.- Appl. Environ. Microbiol. 59, 3266-3272
- [5] SAHM, H. (1986): Anaerobic degradation of halogenated aromatic compounds.- Microbiol. Ecology 12, 147-153
- [6] NOWAK, J., SCHÄFER, M., HEGEMANN, W., DILL, S., KIRSCH, N., STAN, H.J., KÄMPFER, P., DOTT, W., SOMMER, C., SPIEB, E. & GÖRISCH, H. (1993): Abbau chlorierter Benzole in Wirbelbettreaktoren unter Berücksichtigung der Populationszusammensetzung.- gwf Wasser-Abwasser 134, 379-385
- [7] MEIERLING, L. & HEGEMANN, W. (1997): Reinigung stark belasteter Grundwässer mit immobilisierten Mischkulturen im Wirbelschichtreaktor.- Wasser & Boden 49, 47-50
- [8] FRITSCH, W. (1998): Umwelt-Mikrobiologie - Grundlagen und Anwendungen, Gustav Fischer Verlag Jena, 1998, 85
- [9] HOLLIGER, C., SCHRAA, G., STAMS, A.J.M., & ZEHNDER, A.J.B. (1992): Enrichment and properties of an anaerobic mixed culture reductively dechlorinating 1,2,3-trichlorobenzene to 1,3-dichlorobenzene.- Appl. Environ. Microbiol. 58, 1636-1644
- [10] WÜNSCHE, L., LORBEER, H., HARD, B., KRAUß, G., WENDTLAND, K. D., & FLACHOWSKY, J. (1997): Mikrobielle Besiedlungsdichten und Schadstoffabbaupotentiale autochthoner Bakterien belasteter Aquifere im Raum Bitterfeld. in Weiss, H., Teutsch,

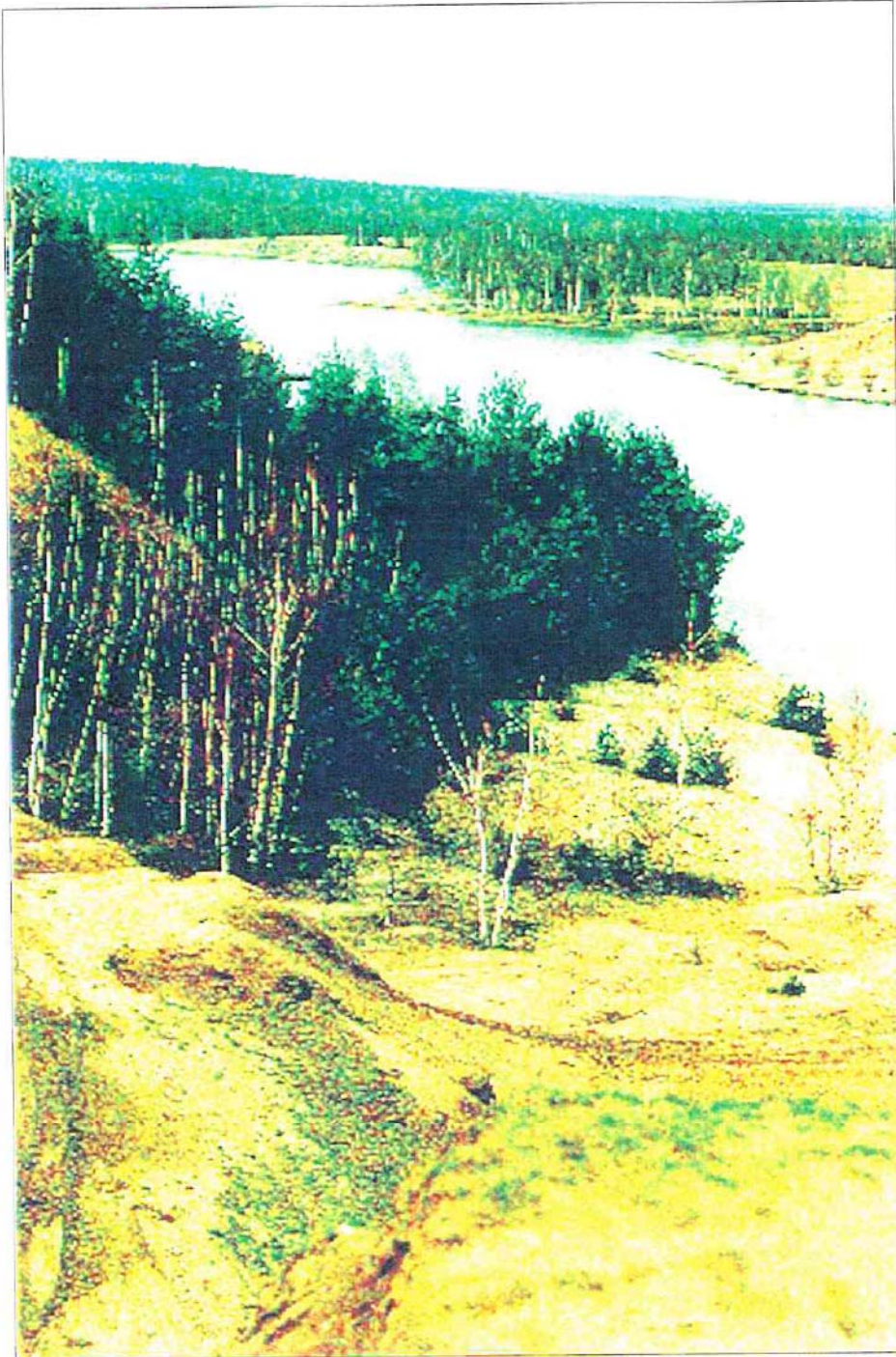
- G. & Daus, B. (eds.): Sanierungsforschung in regional kontaminierten Aquiferen (SAFIRA). UFZ-Bericht Nr.27, 118-126
- [11] VAN DER MEER, J.R. (1997): Evolution of metabolic pathway for the degradation of chloroaromatic compounds.- *Antonie van Leeuwenhoek* 71, 159-178
- [12] VAN DER MEER, J.R., WERLEN, C., NISHINO, S.F. & SPAIN, J.C. (1998): Evolution of pathway for chlorobenzene metabolism leads to natural attenuation in contaminated groundwater.- *Appl. Env. Microbiology* 64, 4185-4193
- [13] DEWEERD, K.A., MANDELCO, L., TANNER, R.S., WOESE, C.R. & SULFLITA, J.M. (1990): *Desulfomonile tiedjei* gen. nov. and sp. nov., a novel anaerobic sulfate-reducing bacterium.- *Arch. Microbiol.* 154, 23-30
- [14] SLATER, J., BULL, A.T. & HARDMAN, D.J. (1995): Microbial dehalogenation.- *Biodegradation* 6, 181-189

Zwischenbericht zum HGF-Strategiefondsprojekt

**Systemintegrierte Umweltbiotechnologie zur Sanierung von organisch
und anorganisch belasteten Grund- und Oberflächenwässern**

L. Meierling¹⁾, N. Schmidt¹⁾ (Herausgeber)

W. Babel¹⁾, W. Geller¹⁾, M. Höfle²⁾, U. Stottmeister¹⁾



1) UFZ-Umweltforschungszentrum Leipzig-Halle GmbH

2) Gesellschaft für Biotechnologische Forschung mbH, Braunschweig