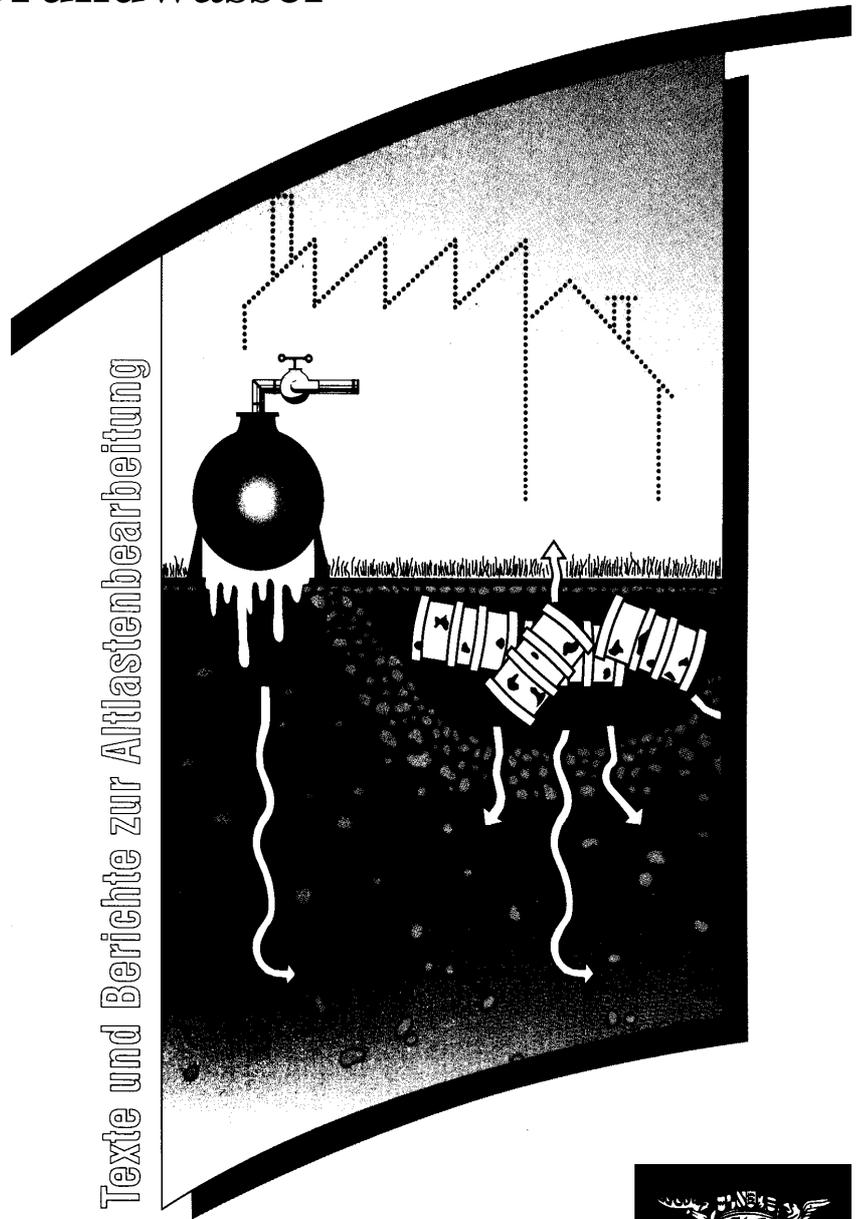


Zentraler Fachdienst Wasser - Boden - Abfall - Altlasten bei
der Landesanstalt für Umweltschutz Baden-Württemberg

**Handbuch Altlasten
und Grundwasserschadensfälle**

**Literaturstudie zum natürlichen
Rückhalt / Abbau von Schadstoffen
im Grundwasser**

Texte und Berichte zur Altlastenbearbeitung

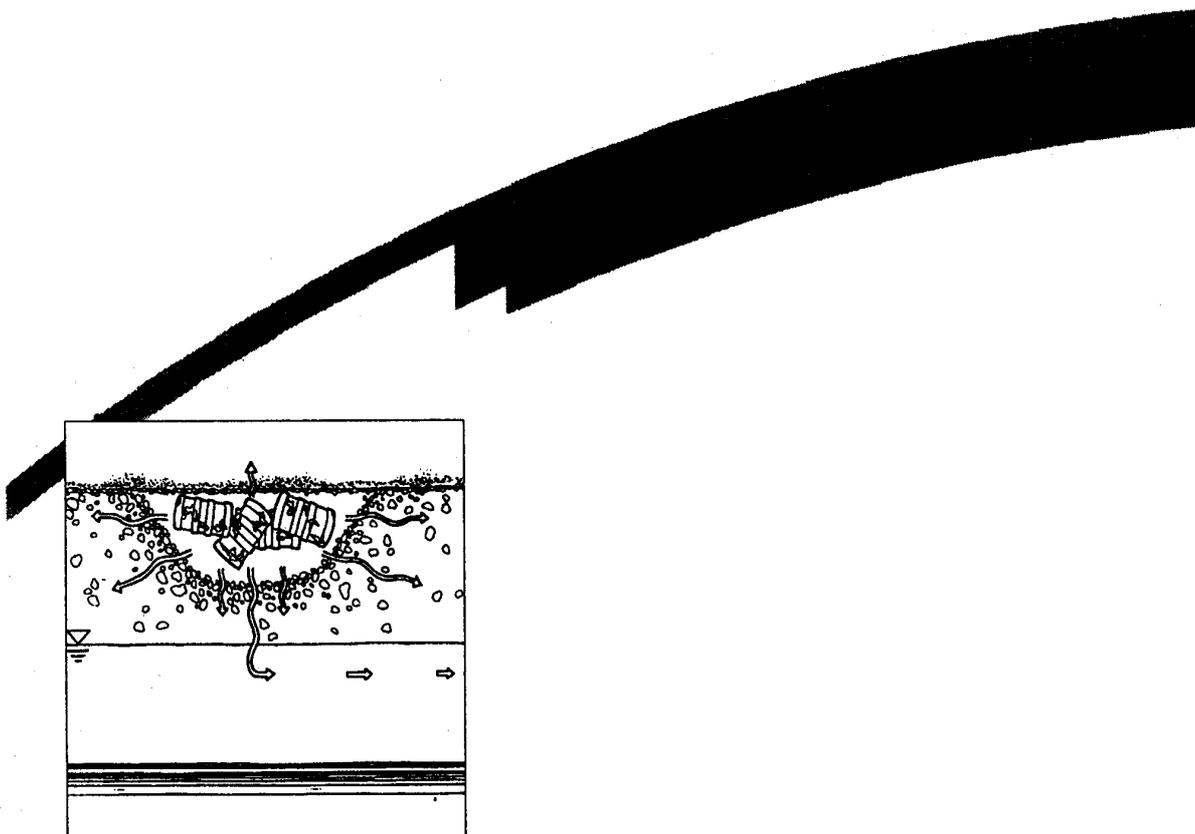


**BODEN
ABFALL
ALLASTEN**



**MINISTERIUM
FÜR UMWELT
UND VERKEHR**

Literaturstudie zum natürlichen Rückhalt / Abbau von Schadstoffen im Grundwasser



Herausgegeben von der
Landesanstalt für Umweltschutz
Baden-Württemberg
1. Auflage

Karlsruhe 1997



Altlastenfachinformation im WWW

Impressum

Herausgeber: Landesanstalt für Umweltschutz
Baden-Württemberg
Griesbachstr. 1
76185 Karlsruhe

Redaktion: Landesanstalt für Umweltschutz Baden-Württemberg
Abteilung 5 Boden, Abfall, Altlasten
Ernst Schmid

Verfasser: Prof. Dr. Georg Teutsch
Prof. Dr. Peter Gratwohl
Dr. Thomas Schiedik

Karlsruhe 1997

Bei diesem Ausdruck handelt es sich um eine Adobe Acrobat Druckvorlage. Abweichungen im Layout vom Original sind rein technisch bedingt. Der Ausdruck sowie Veröffentlichungen sind -auch auszugsweise- nur für eigene Zwecke und unter Quellenangabe des Herausgebers gestattet.

Inhaltsverzeichnis

ZUSAMMENFASSUNG	1
1. EINLEITUNG.....	2
2. ZIELSETZUNG.....	3
3. GRUNDLAGEN	4
3.1 RELEVANTE SCHADSTOFFE IM GRUNDWASSER.....	4
3.2 ENTWICKLUNG VON SCHADSTOFFFAHNEN IM GRUNDWASSER.....	5
3.3 MIKROBIELLER ABBAU UND NATÜRLICHER RÜCKHALT ORGANISCHER SCHADSTOFFE IM GRUNDWASSER	7
4. VORGEHENSWEISE.....	10
4.1 SCHRIFTLICHE/MÜNDLICHE KONTAKTAUFNAHME	10
4.2 DATENBANKABFRAGEN	11
4.3 INTERNETANFRAGE.....	11
4.4 ZEITSCHRIFTEN UND TAGUNGSBÄNDE.....	12
5. ERGEBNISSE DER LITERATURAUSWERTUNG	14
5.1 AUSWERTUNG DER DATEN	14
5.2 ANDERE LITERATURAUSWERTUNGEN.....	17
6. BISHERIGE AKZEPTANZ VON "NATÜRLICHEM RÜCKHALT/ABBAU" IN DER SANIERUNGSPRAXIS	19
7. SCHLUßFOLGERUNGEN UND AUSBLICK.....	20
ANHANG A: TABELLE DER WICHTIGSTEN LITERATURZITATE ZU ORGANISCHEN SCHADSTOFFFAHNEN.....	21
ANHANG B: LITERATURZITATE.....	35
ABBILDUNGSVERZEICHNIS	51
TABELLENVERZEICHNIS.....	51

Zusammenfassung

Die Begriffe "Natürlicher Rückhalt" (Natural Attenuation) und "Natürlicher Abbau" (Intrinsic Bioremediation) von Schadstoffen im Aquifer sind in letzter Zeit in Deutschland nicht zuletzt aufgrund der knapp gewordenen Mittel für die Sanierung in den Vordergrund der Diskussion gerückt. Die Nutzung des natürlichen Rückhalte/Abbaupotentials eines Aquifers kann potentiell die Sanierung selbst ersetzen, und würde dann nur noch Kosten für die Erkundungs- und Monitoring-Maßnahmen verursachen.

Um zu vermeiden, daß mit Blick auf die Kosten kontaminierte Standorte "gesundgebetet" werden, aber auch um zu zeigen, daß eine standort- und schadstoffspezifische Vorgehensweise u.U. von Vorteil sein kann, ist es notwendig, die Diskussion auf eine objektive wissenschaftliche Grundlage zu stellen. Ein Weg dies zu tun besteht darin, die bisher in der Praxis oder an Versuchsfeldern beobachteten und publizierten Transportweiten von Schadstoffen im Grundwasser (Fahnenlänge) zusammenzutragen und auszuwerten. Da mehr als 95% der Grundwasserschadensfälle auf organische Verbindungen zurückzuführen sind, beschränkt sich die vorliegende Studie auf diese Schadstoffgruppen.

Die Ergebnisse der Auswertung zeigen, daß Schadstoffe mit guter Wasserlöslichkeit, geringer Sorption/Retardation und langsamem Abbau, wie z.B. die Stoffgruppe der aliphatischen chlorierten Kohlenwasserstoffe (CKW) Transportweiten bis mehrere Kilometer erreichen (< 2100 m in 75% der publizierten Fälle), während gut wasserlösliche Verbindungen mit geringer Sorption/Retardation und schnellem Abbau (Phenole und BTEX) deutlich kürzere Transportweiten weit unter 1 Kilometer aufweisen (< 600 m in 75% der publizierten Fälle). Für bestimmte organische Schadstoffe können daher stoffspezifisch charakteristische Transportweiten im Grundwasser abgeleitet werden: CKW ca. 2000 m, Phenole ca. 600 m und BTEX ca. 300 m (Benzol < 375 m).

Bei anderen wichtigen Schadstoffgruppen wie z.B. den PAK variiert je nach Verbindung die Wasserlöslichkeit, Sorption/Retardation und Abbau um mehrere Größenordnungen. Hier fehlen bisher noch gut dokumentierte Schadensfälle.

Da die in der Literatur dokumentierten Transportweiten auch innerhalb der jeweiligen Schadstoffgruppe stark variieren, ist es erforderlich standortspezifische Quantifizierungen des natürlichen Rückhalts eines Aquifers durchzuführen. Hierfür müssen allerdings die notwendigen (angepaßten) Erkundungs- und Monitoring-Systeme z.T. noch entwickelt werden.

1. Einleitung

Die Begriffe "Natürlicher Rückhalt" (Natural Attenuation) und "Natürlicher Abbau" (Intrinsic Bioremediation) von organischen Schadstoffen in Aquiferen sind in den letzten Jahren vor allem in den USA (z.B. Hadley & Armstrong, 1991; Rice, 1995) und in letzter Zeit auch in Deutschland in den Vordergrund der Diskussion gerückt (Held, 1996; Wienberg, 1997). Dabei wird "Natural Attenuation" in der deutschen Literatur häufig mit "Natürlicher Rückhalt von (organischen) Schadstoffen" in Aquiferen gleichgesetzt. Da es im deutschen Sprachgebrauch bisher keine eindeutige Definition gibt, wird in diesem Bericht unter dem natürlichen Rückhalt von organischen Schadstoffen die amerikanische Definition verstanden, die nach dem *US EPA Office of Research and Development* und dem *Office of Solid Waste and Energy Response* wie folgt umschrieben wird (Nyer & Duffin, 1997):

"The term natural attenuation can be defined as the biodegradation, dispersion, dilution, sorption, volatilization, and/or chemical and biochemical stabilization of contaminants to effectively reduce contaminant toxicity, mobility, or volume to levels that are protective of human health and the ecosystem."

Damit ist das natürliche Rückhaltevermögen eines Aquifers definiert als die Eigenschaft eines Aquifers durch Prozesse wie Bioabbau, Dispersion, Verdünnung, Sorption, Verflüchtigung und/oder chemischer und biochemischer Stabilisierung (Immobilisierung) von Schadstoffen, die Toxizität, Mobilität oder das Volumen von Schadstoffen effektiv so weit zu reduzieren, daß die menschliche Gesundheit und das Ökosystem nicht gefährdet sind.

Das Interesse an der Nutzung der natürlichen Rückhalte- und Abbauprozesse bei der Sicherung bzw. Sanierung von kontaminierten Standorten ist vor allem deshalb stark angestiegen, weil die augenblicklich verfügbaren Sanierungstechniken i.A. über viele Jahre bis Jahrzehnte hohe Kosten verursachen und das Sanierungsziel trotzdem vielfach nicht annähernd erreicht wird. In den USA z.B. konnte bis 1990 nach 10 Jahren Sanierungspraxis mit aktiven Methoden (z.B. "pump-and-treat") keiner der Superfund-Sites (Modellstandorte) der amerikanischen Umweltbehörde EPA als saniert betrachtet werden (Travis & Doty, 1990).

Um einen Überblick zu den derzeitigen Felderfahrungen bei der "Grundwassersanierung" durch natürliche Rückhalte/Abbauprozesse zu bekommen, wurde in Kooperation zwischen der Landesanstalt für Umweltschutz LFU Baden-Württemberg (Karlsruhe) und dem Lehrstuhl für Angewandte Geologie (LAG) der Universität Tübingen eine Literaturstudie zu diesem Themenbereich initiiert, die in zwei Projektphasen durchgeführt wird.

In Projektphase I (vorliegender Bericht) werden die bisher in der Praxis oder an Versuchsfeldern beobachteten und publizierten Transportweiten von organischen Schadstoffen im Grundwasser aus der Literatur zusammengetragen und ausgewertet (siehe auch Anhang). Anschließend sollen in der Projektphase II nicht veröffentlichte Unterlagen der Environmental Protection Agency (EPA, USA) und anderer Umweltbehörden soweit wie möglich in die Auswertung mit einbezogen werden.

2. Zielsetzung

Ziel dieser Studie ist die Ermittlung der Transportweiten relevanter organischer Schadstoffe im Grundwasser (Fahnenlängen) anhand publizierter Felddaten. Der vorliegende Bericht soll daher im wesentlichen über die folgenden Fragen und Problemstellungen Aufschluß geben:

- Welche organischen Schadstoffe sind für Risikobetrachtungen des Grundwasserschutzes in der Praxis als relevant einzuschätzen ?
- Kann anhand der publizierten Felddaten das natürliche Rückhaltevermögen von Aquiferen gegenüber organischen Schadstoffen stoffspezifisch durch charakteristische Transportweiten quantifiziert werden ?
- Welche Auswertungen usw. existieren bereits zu diesem Thema ?

3. Grundlagen

3.1 Relevante Schadstoffe im Grundwasser

Durch den jahrzehntelangen, z.T. sorglosen Umgang mit organischen Schadstoffen (vor allem mit Lösemitteln), werden diese Verbindungen an sehr vielen Stellen im Grundwasser z.T. in signifikanten Mengen gefunden. In hohen Konzentrationen treten organische Schadstoffe überwiegend im Abstrom von Altablagerungen, Altstandorten und anderen Schadensfällen auf (z.B. Brill et al., 1986).

Nach einer Studie von Arneth et al. (1989) zählen die chlorierten Kohlenwasserstoffe (CKW, nur aliphatische Verbindungen, LCKW) zu den am häufigsten vorkommenden organischen Schadstoffen im Grundwasserabstrom von Schadensfällen in Deutschland (Abbildung 1, links). Untergeordnet sind auch aromatische Verbindungen, wie z.B. Benzol, Toluol, Ethylbenzol und Xylol (BTEX) aber auch Chlorbenzole, häufig im Abstrom von Altstandorten u.ä. zu finden (z.B. Gaswerke, undichte Lagertanks mit Betriebsstoffen u.ä.). Eine ähnliche Studie, die von Plumb & Pitchford (1985) in den USA durchgeführt wurde (Abbildung 1, rechts) kommt zu vergleichbaren Ergebnissen, wobei gewisse Unterschiede in der Platzierung und auch der untersuchten Schadstoffe zu verzeichnen sind.

Generell gilt, daß von den aliphatischen chlorierten Kohlenwasserstoffen Trichlorethen (C_2Cl_3H) und Tetrachlorethen (C_2Cl_4) in Deutschland aber auch in den USA zu den mit Abstand am häufigsten auftretenden Schadstoffen zählen. Auffällig ist, daß in den USA auch Azeton, Phenol und DEHP (Plastikweichmacher) auf der Liste der 15 häufigsten organischen Schadstoffe stehen, während diese Substanzen in der deutschen Liste nicht zu finden sind. Dies und die tendenziell höhere Anzahl von Befunden organischer Schadstoffe im Grundwasser ist vor allem auf die detaillierteren Analytikprogramme in den USA zurückzuführen.

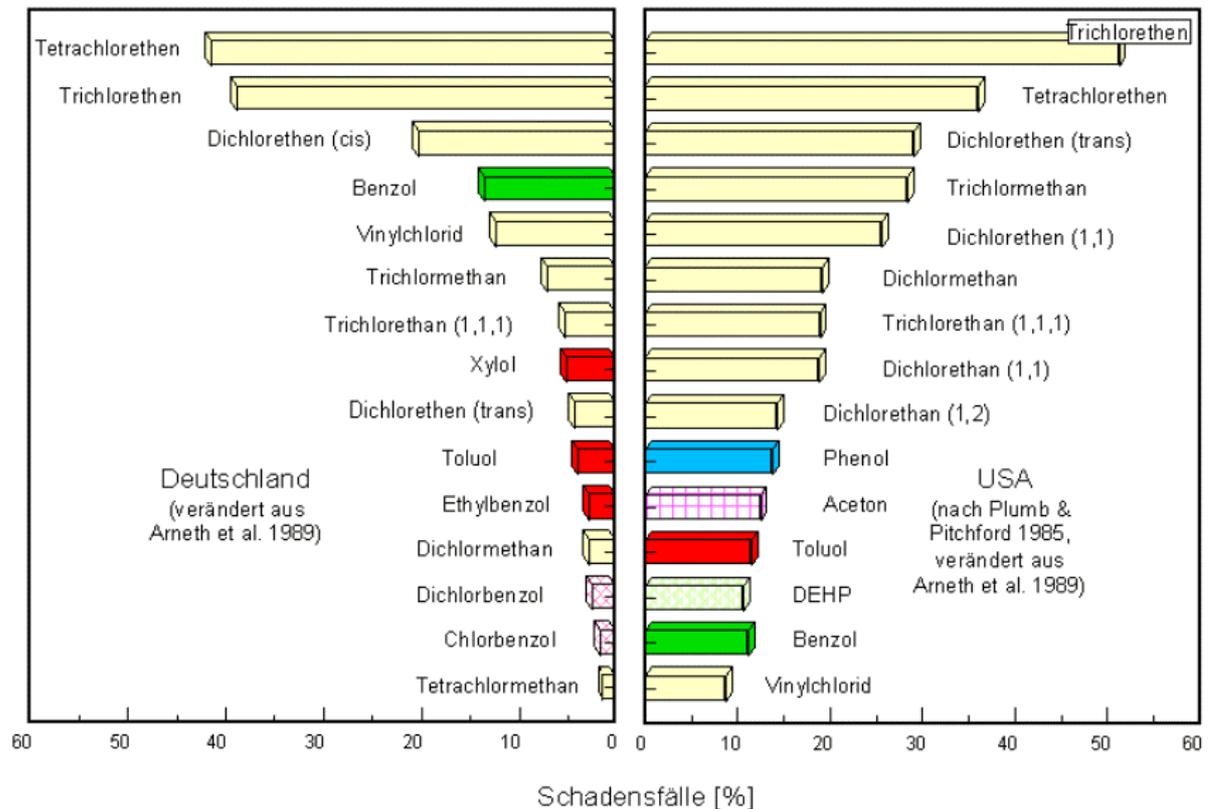


Abbildung 1: Häufigkeit organischer Schadstoffe im Abstrom von Schadensfällen.

3.2 Entwicklung von Schadstofffahnen im Grundwasser

Der Transport und die Verteilung von chemischen (Schad-) Stoffen und damit die räumliche Entwicklung von Schadstofffahnen im Grundwasser werden im wesentlichen durch die Prozesse Advektion, Dispersion, Diffusion, Sorption, Verflüchtigung und Abbau gesteuert. Der Schadstofftransport (gelöste Schadstoffe) erfolgt generell durch Advektion und hydrodynamische Dispersion (Dispersion und Diffusion). Diese Prozesse bewirken eine Migration ("Fort-schreiten") der gelösten Schadstoffe im Aquifer in Grundwasserfließrichtung und können damit zur Ausbildung von Schadstofffahnen im Abstrom von Schadensfällen führen (Abbildung 2, Beispiel 1 und 2).

Die Schadstoffmasse im Wasser wird im allgemeinen durch die Freisetzungsrates aus dem Schadstoffherd bestimmt (Lösung aus dem Schadstoffherd in Abhängigkeit von Wasserlöslichkeit und Lösungskinetik; z.B. Grathwohl, 1997). Eine Schadstofffahne wird sich daher solange ausdehnen (z.B. durch Lösung aus residualer Phase), bis der Schadstoffherd aufgelöst ist bzw. entfernt wird (z.B. durch Ausbaggern des Schadstoffherdes). Durch Dispersion und Diffusion (sowie unter bestimmten Randbedingungen auch durch Grundwasserneubildung) erfolgt vor allem in den peripheren Bereichen einer Fahne eine Verdünnung der Schadstoffkonzentration (z.B. Hadley & Armstrong, 1991; Rifai et al., 1995). Das bedeutet, daß die Ausdehnung einer Fahne zunächst durch Verdünnungsprozesse bestimmt wird. Darüber hinaus sind aber auch die Bestimmungs- und Nachweisgrenzen der chemischen Analysemethoden und nicht zuletzt die Anzahl und Positionierung der Grundwassermeßstellen für die Definition einer Schadstofffahne von wesentlicher Bedeutung.

Das Fortschreiten der gelösten Schadstoffe (Schadstofffahne) im Aquifer wird durch Sorptionsprozesse (Sorption und Desorption) mehr oder weniger stark verzögert (Abbildung 2, Beispiel 3). Sorption, d.h. Wechselwirkungen zwischen den im Wasser gelösten Stoffen mit der Aquifermatrix, tritt jedoch nicht bei allen Stoffen gleichermaßen auf. Gering lösliche Verbindungen sorbieren im allgemeinen relativ stark und werden dadurch auch entsprechend stark retardiert (z.B. Schwarzenbach et al., 1993).

Darüber hinaus kann eine Schadstofffahne durch biotischen und/oder abiotischen Abbau sowie durch Verflüchtigung der Schadstoffe in die in vielen Fällen angrenzende wasserungesättigte Zone einen räumlich/zeitlich mehr oder weniger stationären Zustand erreichen. Das bedeutet, daß die Transportrate der Schadstoffe, die von Advektion, Dispersion/Diffusion und Sorption im Aquifer abhängt, durch den gleichzeitig stattfindenden Abbau und/oder durch Verflüchtigung der Stoffe kompensiert wird (Abbildung 2, Beispiel 4). Da der chemische Abbau von organischen Schadstoffen im Grundwasser im allgemeinen sehr langsam verläuft und die Verflüchtigung im allgemeinen nur zu einem geringen Anteil zur Entfernung von Schadstoffen aus dem Grundwasser beiträgt (z.B. Chiang et al., 1989; McAllister & Chiang, 1994), kommt dem biologischen Abbau unter natürlichen Bedingungen die größte Bedeutung zu.

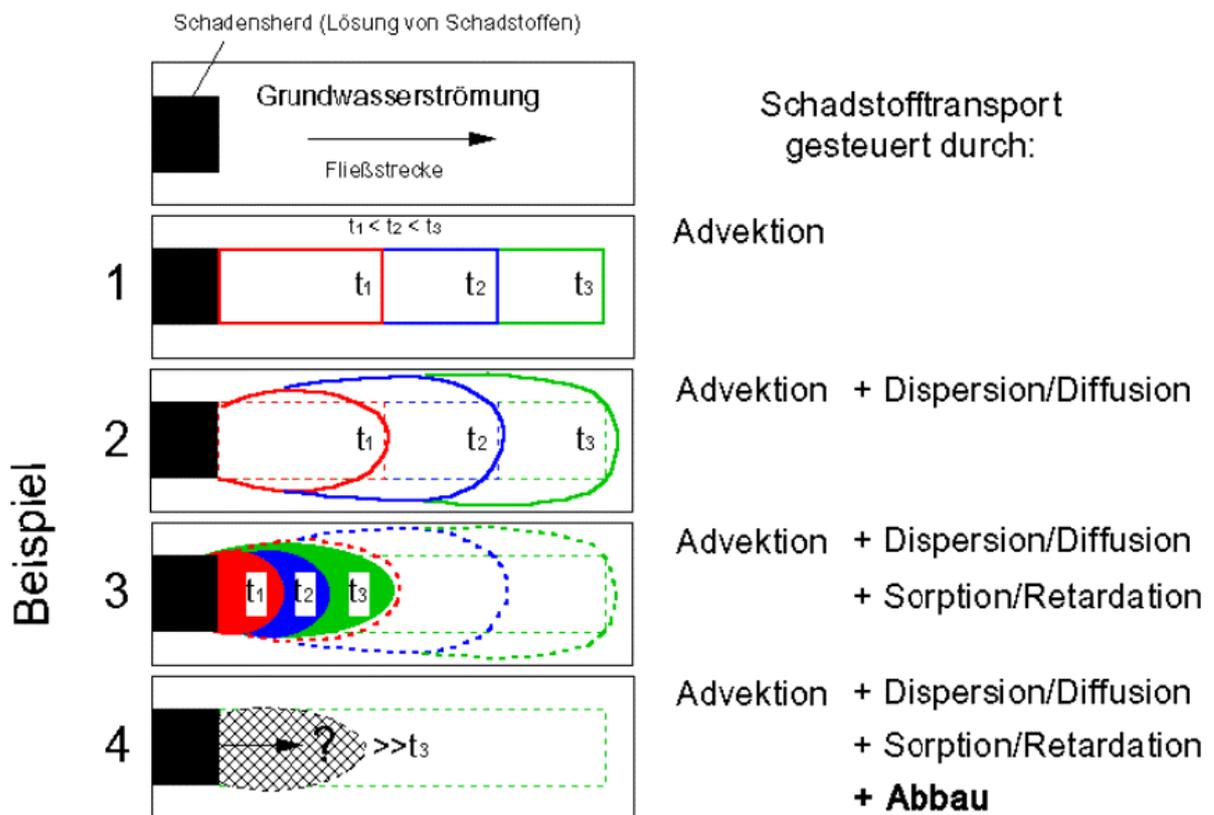


Abbildung 2: Entwicklung von Schadstofffahnen im Grundwasser über die Zeit ($t_1 - t_3$: verschiedene Zeitpunkte).

3.3 Mikrobieller Abbau und natürlicher Rückhalt organischer Schadstoffe im Grundwasser

Nur im Falle eines mikrobiologischen Abbaus wird die im Aquifer vorhandene Schadstoffmasse tatsächlich reduziert. Jedoch können organische Verbindungen im Grundwasser nur dann mikrobiell abgebaut werden, wenn sie im Wasser gelöst und damit bioverfügbar sind. An der Aquifermatrix sorbierte Schadstoffe können daher erst dann abgebaut werden, wenn sie wieder in das Grundwasser desorbieren (z.B. Alvarez-Cohen et al., 1993). Der Abbau ist somit direkt von der Desorptionskinetik bzw. Freisetzungsrates der Schadstoffe abhängig, die wiederum durch die molekulare Diffusion bestimmt wird und deshalb im allgemeinen über sehr lange Zeiträume abläuft. (z.B. Ghoshal & Luthy, 1996; Grathwohl, 1997). Diese Limitierung wird im allgemeinen als die Bioverfügbarkeit der Schadstoffe bezeichnet.

Da in natürlichen Aquiferen Bakterien immer in genügender Anzahl vorhanden sind (z.B. Harvey & Barber, 1992; Christensen et al., 1994), werden, falls sie bioverfügbar sind, unter aeroben Bedingungen sehr viele organische Verbindungen relativ schnell mikrobiell abgebaut (Überblick z.B. bei Nyer et al., 1991; Mackenbrock et al., 1994). Die organischen Verbindungen werden oxidiert und von den Mikroorganismen als kohlenstoff- und energielieferndes Substrat benutzt (z.B. Kreysa & Wiesner, 1997). Sauerstoff wird dabei als Elektronenakzeptor zu H₂O umgesetzt. Ist der zur Verfügung stehende Sauerstoff verbraucht (anaerobe Bedingungen), werden (soweit vorhanden) zunächst Nitrat, dann Eisen- und Manganoxide und Sulfat reduziert. Als letzte Phase, wenn alle anderen Elektronenakzeptoren verbraucht sind, findet die methanogene Umsetzung von organischen Verbindungen statt. Dabei wird H₂O als Elektronenakzeptor benutzt; die organischen Verbindungen werden zu CO₂ und Methan umgesetzt (z.B. Wiedemeier et al., 1995). Überwiegend sind die Abbauraten unter anaeroben Bedingungen jedoch sehr viel geringer als unter aeroben Bedingungen (z.B. Sturman et al., 1995b).

Eine besondere Rolle beim biologischen Abbau von organischen Verbindungen kommt den chlorierten Kohlenwasserstoffen (CKW) zu. Diese können in ihrer Eigenschaft als Elektronendonator und/oder als Elektronenakzeptor (reduktive Dechlorierung) abgebaut werden, wobei die reduktive Dechlorierung den wirkungsvollsten Abbauprozess darstellt (Überblick bei Rifai et al., 1995, oder Nyer & Duffin, 1997). Die CKW werden dabei überwiegend durch Co-Metabolismus abgebaut (z.B. Vogel et al., 1987; Reineke & Schlömann, 1997), d.h. im Zuge des Abbaus einer organischen Verbindung (z.B. mit Phenol, Hopkins et al., 1993) werden CKW nebenbei durch entstehende Enzyme mit umgesetzt. Eine Pilotstudie (kombinierte Labor- und Feldversuche) zum co-metabolischen Abbau von leichtflüchtigen aliphatischen CKW mittels Phenol wird z.Zt. in den Niederlanden an einem kontaminierten Standort (ehemalige Wäscherei) durchgeführt (Alphenaar et al., 1997).

Die generellen Abbauprozesse organischer Schadstoffe im Grundwasser sind in Tabelle 1 am Beispiel von Benzol noch einmal zusammengefaßt. Eine detaillierte Darstellung der wichtigsten biologischen Abbauprozesse organischer Schadstoffe geben auch Knorr & von Schell (1997).

Die hier nur summarisch beschriebenen Prozesse verlaufen im Untergrund nicht nur in einer zeitlichen Abfolge, sondern können auch räumlich nebeneinander in kontaminierten Aquiferen beobachtet werden (z.B. Vroblesky & Chapelle, 1994; Christensen et al., 1994; Borden et

al., 1995; Hernon et al., 1995; Ludvigsen et al., 1995; Wiedemeier et al., 1995; Daniel & Borden, 1997).

Tabelle 1: Generelle Abbauwege von organischen Schadstoffen am Beispiel von Benzol (nach Wiedemeier et al. 1995).

Oxidation/aerobe Respiration	$15 \text{ O}_2 + \text{C}_6\text{H}_6 \Rightarrow 12 \text{ CO}_2 + 3 \text{ H}_2\text{O}$
Denitrifikation	$6 \text{ NO}_3^- + 6 \text{ H}^+ + \text{C}_6\text{H}_6 \Rightarrow 6 \text{ CO}_2 + 6 \text{ H}_2\text{O} + 3 \text{ N}_2$
Eisenreduktion	$60 \text{ H}^+ + 30 \text{ Fe}(\text{OH})_3 + \text{C}_6\text{H}_6 \Rightarrow 6 \text{ CO}_2 + 30 \text{ Fe}_2^{2+} + 78 \text{ H}_2\text{O}$
Sulfatreduktion	$7,5 \text{ H}^+ + 3,75 \text{ SO}_4^{2-} + \text{C}_6\text{H}_6 \Rightarrow 6 \text{ CO}_2 + 3,75 \text{ H}_2\text{S} + 3 \text{ H}_2\text{O}$
Methanogener Abbau	$4,5 \text{ H}_2\text{O} + \text{C}_6\text{H}_6 \Rightarrow 2,25 \text{ CO}_2 + 3,75 \text{ CH}_4$

Bjerg et al. (1995) konnten anhand von geochemischen Untersuchungen im Abstrom einer Mülldeponie die räumliche Ausdehnung und eine scharfe Abgrenzung der verschiedenen Redoxzonen nachweisen. In unmittelbarer Nähe der Deponie liegen methanogene Bedingungen vor. Unterstromig folgen Bereiche mit Sulfid-, Sulfat- und Nitrat-reduzierendem Milieu. Die Eisen-(II)-Konzentration im Grundwasser konnte auf die Reduktion von Eisen-(III)-Mineralien, die als Beläge auf der Aquifermatrix vorhanden sind, zurückgeführt werden. In einer Entfernung zwischen 50-300 m von der Deponie (in Abhängigkeit vom Abstand zur Oberfläche) werden im Grundwasser aerobe Bedingungen vorgefunden. Ähnliche Beobachtungen beschreiben auch Lyngkilde & Christensen (1992).

Die Einstellung und Aufrechterhaltung der speziellen Milieubedingungen (aerob oder anaerob) in einem kontaminierten Aquifer werden im natürlichen System durch die Nachlieferung der Elektronenakzeptoren durch Advektion und Dispersion/Diffusion im Grundwasser bzw. dem vorhandenen Reservoir an Elektronenakzeptoren limitiert (z.B. Sturman et al., 1995a; Borden et al., 1995). Fehlen in einem Aquifer z.B. Eisen- oder Manganmineralien bzw. sind diese aufgebraucht kann keine Eisen/Manganreduktion stattfinden. Durch den Transport von Reaktionsprodukten mit dem Grundwasser können sich aber auch einzelne Redoxzonen zueinander verschieben. So konnten z.B. Vroblesky & Chapelle (1994) in einem kontaminierten Aquifer feststellen, daß sich die Redoxbedingungen in einer Meßstelle nach starken Niederschlägen durch erhöhte Grundwasserneubildung von einem sulfatreduzierenden Milieu zu einem aeroben Milieu hin veränderten (O_2 -Nachlieferung durch Grundwasserneubildung). Die anschließende Oxidation von Eisen-(II) führte zu einer Ausfällung von Eisen-(III)-Hydroxiden. Nach dem Aufbrauch des gesamten Sauerstoffs, stellten sich eisenreduzierende Bedingungen ein. In einem Beobachtungszeitraum von ca. 6 Monaten konnten die Autoren auch in anderen Meßstellen eine dynamische Entwicklung der räumlichen Ausdehnung der Redoxzonen innerhalb der Schadstofffahne beobachten.

Da unter Feldbedingungen die Sauerstoffnachlieferung in das Fahneninnere limitiert ist und unter anaeroben Bedingungen die Abbauraten relativ niedrig sind, werden in Feldexperimenten häufig am aeroben Rand einer Schadstofffahne höhere Abbauraten beobachtet als in der Fahne (Chiang et al., 1989a, zitiert in Sturman et al., 1995b; Borden et al., 1995). Durch den

heterogenen Aufbau fluviatiler Aquifere kann die räumliche Nachlieferung von Elektronenakzeptoren auch durch unterschiedliche Porositäten und Durchlässigkeiten der Aquifermatrix verursacht werden (z.B. Sturman et al., 1995b).

Da die komplexen Wechselwirkungen und Reaktionen zwischen Aquifermatrix und Schadstoffen, Schadstoffen und deren Abbauprodukten untereinander usw., bei Felduntersuchungen im Detail häufig nicht ohne weiteres zu unterscheiden und nachweisbar sind, werden die folgenden Kriterien als Anzeichen für einen etablierten natürlichen Rückhalt/Abbau und als Sanierungskontrolle empfohlen (z.B. Rifai et al., 1995; Nyer & Duffin, 1997):

1. Abnahme der Konzentration der Schadstoffe im Grundwasser im unterstromigen Bereich des Schadenherdes. Dies kann z.B. im Vergleich mit der Konzentration einer nichtreaktiven und nichtabbaubaren Substanz erfolgen (z.B. Wiedemeier et al., 1995). Steht jedoch keine Vergleichssubstanz zur Verfügung kann auch über eine Abnahme der Konzentration über die Zeit der Massenverlust abgeschätzt werden (z.B. Rifai et al., 1995).
2. Abnahme der Konzentration von potentiellen Elektronenakzeptoren (O_2 , NO_3 , SO_4) im Vergleich zu den Konzentrationen in unbelasteten Bereichen des Aquifers (natürlicher Hintergrundwert) und das Auftreten von erhöhten Konzentrationen von Abbauprodukten wie z.B. CO_2 , Eisen-(II) oder Methan (z.B. Rifai et al., 1995; Bjerg et al., 1995).
3. Nachweis der mikrobiellen Aktivität in-situ durch Laborversuche mit Originalmaterial aus dem kontaminierten Aquiferbereich.

4. Vorgehensweise

Die Komplexität der in Abschnitt 3 beschriebenen Prozesse verbietet es, im Detail jeden Standort zu untersuchen. Der hier gewählte Ansatz über eine statistische Auswertung publizierter Fahnenlängen kann deshalb nur generelle Trends herausarbeiten, und die Ergebnisse sollten dementsprechend nicht unüberlegt auf konkrete Sonderfälle übertragen werden. Zur Umsetzung des Vorhabens wurden verschiedene Ansätze verfolgt, um einen möglichst umfassenden Überblick über die publizierten Schadensfälle zu erhalten. Die einzelnen Schritte sind nachstehend erläutert.

4.1 Schriftliche/mündliche Kontaktaufnahme

Schriftlich oder mündlich wurden folgende Institutionen im In- und Ausland, die sich bekannterweise (durch Publikationen usw.) mit dem Problemfeld "Natürlicher Rückhalt/Abbau von Schadstoffen" beschäftigten um Mitarbeit und Unterstützung gebeten.

- EAWAG Zürich (Schweiz)
- Environmental Protection Agency, EPA Washington, (USA)
- ETH Zürich (Schweiz)
- Fa. TGU, Koblenz
- Lawrence Livermore National Laboratory, University of California, (USA)
- Lehrstuhl für Angewandte Geologie Technische Universität Darmstadt
- Lehrstuhl für Angewandte Geologie Universität Bremen
- Lehrstuhl für Angewandte Geologie Universität Karlsruhe
- Lehrstuhl für Angewandte Geologie Universität Kiel
- Lehrstuhl für Geoökologie Universität Bayreuth
- Lehrstuhl für Hydromechanik Universität Karlsruhe
- Lehrstuhl für Ökologische Chemie Universität Bayreuth
- Niedersächsisches Landesamt für Bodenforschung NLFB Hannover
- Stadtwerke Düsseldorf
- Technische Universität Lyngby (Dänemark)
- TNO (Niederlande)
- Universität Austin Texas (USA)
- Universität Stanford California (USA)
- Universität Waterloo, Center for Ground Water Studies (Kanada)

4.2 Datenbankabfragen

Um eine möglichst vollständige Liste der aktuellen nationalen/internationalen Literatur zum Thema Natürlicher Rückhalt/Abbau zu erhalten, wurden die folgenden Datenbanken mit den Schlüsselwörtern *Natural*, *In-Situ*, *Intrinsic*, *Bioremediation*, *Attenuation*, *Remediation*, *Natürliches*, *Rückhaltevermögen* und *Abbauvermögen* abgefragt. Die in Klammern angegebenen Zeiträume wurden als Vorgabe für die Suche eingesetzt.

- ACS, Datenbank der American Chemical Society (1985-1997)
- GeoLine, Datenbank der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe BGR Hannover
- GeoRef (1975-1997)
- Current Content (ISI)
- ULIDAT (Datenbank des Umweltbundesamtes, Berlin)
- OLIX (Datenbank der UB Tübingen und angeschlossener Institute)

Um die mit den Schlüsselwörtern erreichte Trefferanzahl (bis zu 600 pro Datenbank) auf das Projektthema im engeren Sinne zu beschränken, mußte aus einer ersten Auswahl mittels zusätzlicher Schlüsselwörter die Suche eingegrenzt werden. Als Zusatzschlüsselwörter wurden *contaminants*, *contaminated sites*, *organic compounds*, *test sites*, *Testfeld(er)*, *field sites*, *hydrocarbons*, *pollution*, *ground water* und *aquifer* einzeln und in Kombination mit Operatoren (UND, ODER, AND, OR, NEAR, usw.) sowie mit Trunkationen (?,*) zusammen mit den Schlüsselwörtern eingegeben. Die Ergebnisse wurden dann nochmals anhand der Zusammenfassungen (abstracts) überprüft. Dies reduzierte die Trefferanzahl auf insgesamt ca. 300 Zitate.

4.3 Internetanfrage

Vor allem im englischsprachigen Raum ist es mehr und mehr üblich wichtige Ergebnisse bzw. Berichte, wissenschaftliche Veröffentlichungen usw. auf der sogenannten "homepage" (der Öffentlichkeit zugängliche Computeradresse) einer Institution, Behörde, Firma usw. im Internet zur Verfügung zu stellen. Mit entsprechenden "Suchmaschinen" (browsern) kann ähnlich wie bei Datenbanken eine Suche nach bestimmten Begriffen durchgeführt werden. Nach mehreren Tests mit verschiedenen Suchmaschinen wurde das Internet über die Suchmaschine *InfoSeek* mit den Schlüsselwörtern *Natural Attenuation* und *Intrinsic Bioremediation* abgefragt. Interessante Treffer wurden weiterverfolgt.

Zusätzlich wurden die "homepages" des Bundesumweltministeriums, Umweltbundesamtes, des US-Geological Surveys, der US-Environmental Protection Agency (EPA) und der Universitäten Aachen, Bochum, Bremen, Berlin, Darmstadt, Erlangen, Freiberg, Karlsruhe, Kiel, Mainz, München in Deutschland sowie einiger Universitäten der Schweiz, Dänemarks, Australiens, den USA und Kanada durchgesehen.

4.4 Zeitschriften und Tagungsbände

Zur Vervollständigung der Literatursuche wurden zusätzlich die folgenden Zeitschriften (Jahrgänge in Klammern) im Detail durchsucht.

- Altlasten Spektrum (1992-1997)
- DGM, Deutsche Gewässerkundliche Mitteilungen (1980-1996)
- Environmental Science & Technology (1989-7/1997), Internetadresse: <http://acsinfo.acs.org/journals/esthag/>
- Ground Water (1980-1996)
- Grundwasser (FH-DGG, seit 1996)
- GWF, Gas-Wasserfach, Wasser, Abwasser (1986-1997)
- Journal of Contaminant Hydrology (1991-7/1997)
- Journal of Hydrology (1991-7/1997)
- Publikationen der LFU Baden-Württemberg, Karlsruhe.
- Schriftenreihe Angewandte Geologie Karlsruhe, AKG, Nr. 1 - 41
- TerraTech, Zeitschrift für Altlasten und Bodenschutz (1993-1997)
- Vom Wasser (1985-1996)
- WaBoLu-Hefte des Instituts für Wasser- Boden- und Lufthygiene des Bundesgesundheitsamtes (Berlin)
- Wasser und Boden (1994-1996), Internetadresse: <http://www.blackwis.com/wabo.htm>
- Water Research (1994-1996)
- Water Resources Research (1985-7/1997)
- Zeitschrift der Deutschen Geologischen Gesellschaft (1990-1996)
- Tagungsbände der KFK/TNO "International Conference on Contaminated Soil" 1990, 1993 und 1995, Hrsg.: Arendt et al.
- Tagungsband der IAHS
 - "Groundwater Contamination", IAHS-Publ. No. 185, 1989, Hrsg.: Abriola, L.
 - "International Conference on Groundwater Quality: Remediation and Protection (GQ95)", IAHS-Publ. No. 225, 1995 Hrsg.:
- Tagungsband der IAHR "Transport and Reactive Processes in Aquifers", No. 5, 1994, Hrsg.: Thracos, T.; Stauffer, F.
- Tagungsbände der Bioremediation-Tagungen
 - "International In-Situ and On-Site Bioreclamation Symposium" in San Diego 1991, 1993 und 1995 (Vol. 3/1, 3/6), Hrsg.: Hincee, R.E.; Wilson, J.T.; Downey, D.C.
 - "4. International In-Situ and On-Site Bioremediation Symposium" in New Orleans, 1997 (Vol. 1-5), Hrsg.: Alleman, B.C.; Leeson, A.

Durch die Auswertung von Felduntersuchungen und unter Einbeziehung statistisch abgesicherter Studien wurden insgesamt mehr als 1500 einschlägige Zitate identifiziert und überprüft (Datenbankabfragen und Zeitschriften-Screening). Im Internet wurde über 400 Querverweise zum Themenbereich *Bioremediation/Natural Attenuation* nachgegangen. Aus dieser

großen Anzahl von insgesamt ca. 2000 Treffern sind schließlich über 200 Publikationen mit Feld- und Laborversuchen ausgewertet worden (vgl. Anhang). Darin sind insgesamt 269 Fallbeispiele beschrieben, die in die Auswertung aufgenommen wurden.

In den nachfolgenden Abschnitten werden die Ergebnisse der Literaturlauswertung im Detail erläutert.

5. Ergebnisse der Literaturlauswertung

5.1 Auswertung der Daten

Die in der Literatur gefundenen Daten zur Ausbreitung von organischen Schadstoffen im Grundwasser wurden insbesondere nach der Art des Schadstoffes und der beobachteten Fahnenlänge ausgewertet (siehe auch Tabelle im Anhang A).

Die Länge einer Schadstofffahne wurde soweit wie möglich aus Konzentrations-Isolinien in Abbildungen bestimmt. Fahnen-Größenangaben der Autoren im Text wurden nur übernommen, wenn keine Abbildungen vorhanden waren. Als Anfangspunkt einer Fahne wurde die Meßstelle mit der höchsten Konzentration des Schadstoffes im Bereich des Schadensherdes angenommen. In Fällen, bei denen keine Angaben zu Konzentrationen in der Schadstoffquelle existierten, wurde der Mittelpunkt der Schadstoffquelle als Ausgangspunkt der Fahne angenommen. Die maximale Ausdehnung einer Fahne wurde anhand der niedrigsten angegebenen Stoffkonzentration bestimmt (siehe auch Tabelle im Anhang). Dadurch wird die Ausdehnung einer Fahne auch durch die unterschiedlichen Nachweis- und Bestimmungsgrenzen der jeweils verwendeten analytischen Methode definiert. Somit sind die in den nachfolgenden Abschnitten angegebenen Werte als jeweils fallspezifische minimale Transportweiten innerhalb der jeweiligen Stoffgruppe zu verstehen.

Spezielle geologische oder hydrogeologische Standortbedingungen konnten bei der Auswertung nicht berücksichtigt werden. Jedoch stammen bis auf sehr wenige Ausnahmen alle Daten aus Untersuchungen in Porengrundwasserleitern (siehe auch Tabelle im Anhang). Eine Differenzierung stoffspezifischer Fahnen nach den hydrochemischen Milieubedingungen am Standort war nicht möglich, da Informationen hierzu in den meisten Fällen fehlten.

Bei der Auswertung der so ermittelten Fahnenlänge (Abbildungen 3 und 4) wurden die 25% der Fälle mit den längsten Transportweiten herausgelassen, um insbesondere standortspezifische Sondersituationen bewußt nicht zu berücksichtigen. Ebenso wurden die ermittelten minimalen Transportweiten, weil belanglos, weggelassen. In der Tabelle 2 sind die in den Abbildungen 3 und 4 dargestellten Ergebnisse nochmals in Zahlenform zusammengefaßt.

Aus der Auswertung der Literaturdaten (Abbildung 3, Tabellen 2 und 3) geht hervor, daß die relativ schlecht abbaubaren CKW (nur aliphatische Verbindungen) am weitesten im Grundwasser transportiert werden. Demgegenüber werden besser oder sehr gut biologisch abbaubare Verbindungen, wie z.B. Phenole oder BTEX, deutlich weniger weit transportiert. In 75% aller gesichteten Fälle werden die CKW maximal ca. 2100 m weit transportiert. Die BTEX- (Benzol, Toluol, Ethylbenzol und Xylol) und Phenol-Fahnen erreichen dagegen überwiegend nur eine Transportweite von bis zu 300 m bzw. 600 m, d.h. generell liegen 75% der gesichteten Fälle dieser beiden Stoffgruppen unter 600 m Transportweite (Abbildung 3).

Zu den aus Gaswerk-Altstandorten bekannten polyzyklischen aromatischen Kohlenwasserstoffen (PAK) sind nur vergleichsweise wenige Felddaten publiziert, so daß keine statistischen Aussagen möglich sind. Praktische Erfahrungen zeigen aber, daß Verbindungen dieser Stoffgruppe mit 2-3 Ringen wie z.B. Naphthalin weiter transportiert werden (> 250 m) als

Verbindungen mit höherer Ringzahl (< 250 m). Vollständige Abbauwege konnten bisher nur für 2-3 Ring-PAK aufgeklärt werden (Bryniok, 1997). Es ist jedoch bekannt, daß PAK mit hoher Ringzahl relativ persistent sind (Knackmuss, 1996), dafür aber eine größere Sorptionsneigung besitzen als niedermolekulare PAK und auf diesem Wege dem Grundwasser entzogen werden können. Acenaphthen (3-Ring) nimmt dabei eine Sonderstellung innerhalb der Gruppe der PAK ein. Trotz geringer Ringanzahl wird diese Verbindung vergleichsweise schlecht abgebaut und zeigt außerdem eine relativ geringe Sorptionsneigung an der Aquifermatrix. Dadurch kann diese Verbindung im Vergleich mit anderen PAK im Grundwasser häufig sehr viel weiter transportiert werden (>> 250 m; Weiß, in Vorbereitung).

Tabelle 2: Ergebnisse der statistischen Auswertung.

Schadstoff (Anzahl der Fälle)	Mittlere Transportweite¹ [m] im Grundwasser	Mittlere Transportweite² [m] im Grundwasser in 75% der Fälle	Maximale Transportweite³ [m] im Grundwasser in 75% der Fälle	Maximale Transportweite⁴ [m] im Grundwasser
Aliphatische CKW	1543 (107)	654 (80)	< 2100 (107)	10000 (107)
Phenole	416 (18)	190 (12)	< 600 (18)	1600 (18)
BTEX	209 (96)	143 (73)	< 300 (96)	1500 (96)
Benzol	242 (27)	114 (21)	< 375 (27)	700 (27)
PAK (überwiegend Naphthalin)	277 (14)	200 (10)	< 300 (14)	800 (14)
Sonstige organische Schadstoffe	892 (30)	390 (19)	< 1300 (30)	3000 (30)

¹ Mittelwert aus allen Daten einer Stoffgruppe; ²Fahnenlänge, die durchschnittlich von 75% der publizierten Fälle erreicht wird; ³Fahnenlänge, die von 75% der publizierten Fälle unterschritten wird; ⁴Maximaler Wert aus allen Daten.

Schadstoff

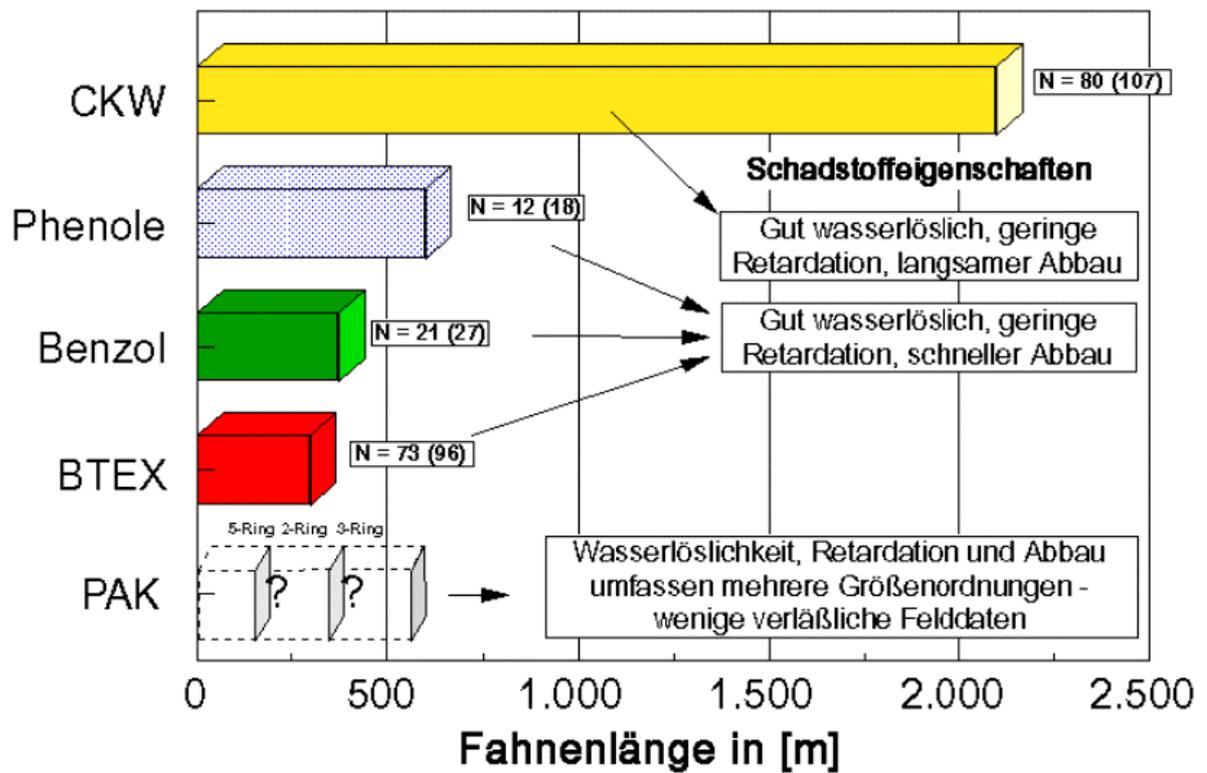


Abbildung 3: Schadstofffahnenlängen, die in 75% der publizierten Fälle unterschritten wird (N = 75% der Fälle, in Klammern die Gesamtanzahl der untersuchten Fälle).

Schadstoff

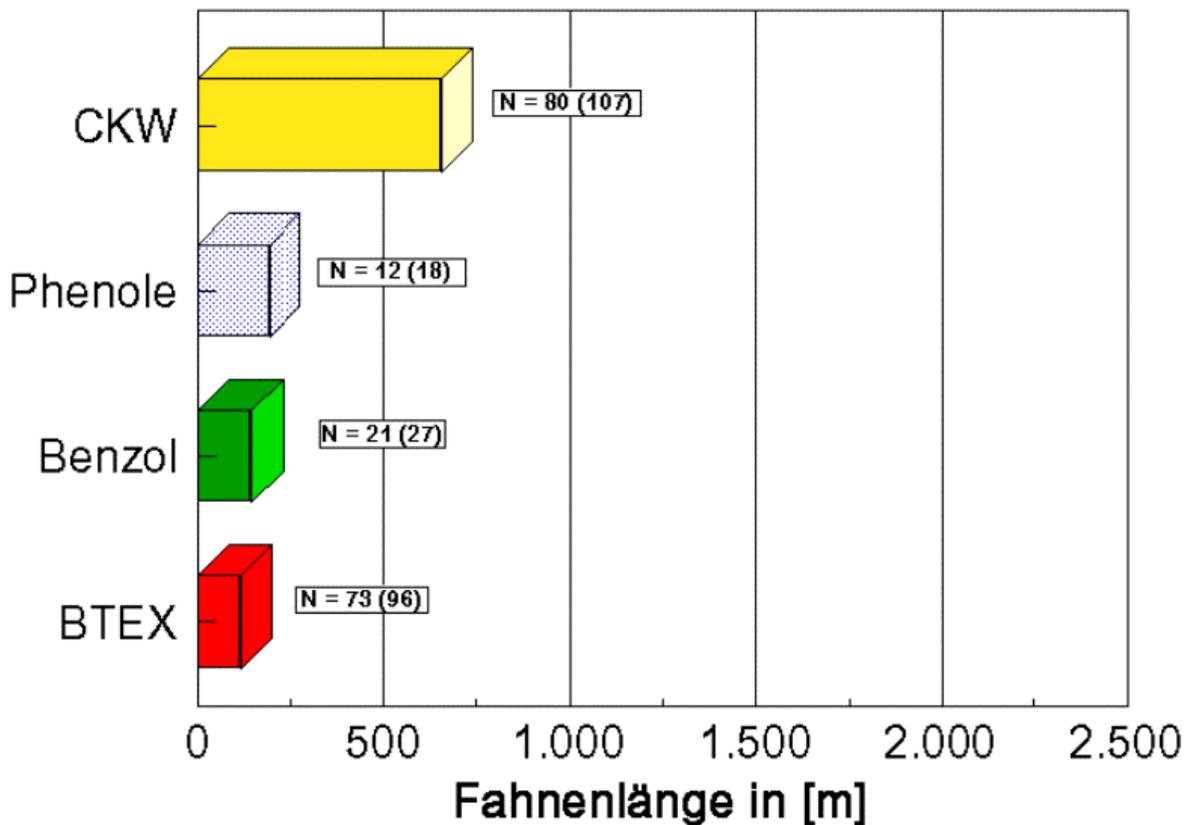


Abbildung 4: Schadstofffahnenlängen, die durchschnittlich von 75% der publizierten Fälle erreicht wird (N = 75% der Fälle, in Klammern die Gesamtanzahl der untersuchten Fälle).

5.2 Andere Literaturlauswertungen

Ein Hauptaugenmerk bei der Durchführung der vorliegenden Studie wurde auf bereits existierende Statistiken oder Literaturstudien zum natürlichen Rückhalt/Abbau gelegt. Rice et al. (1995) vom Lawrence Livermore National Laboratory, University of California, legten eine statistische Studie zur Länge von Benzolfahnen in Kalifornien vor. Aus über 1000 dokumentierten Fällen konnten in dieser Studie 271 Fälle (Untergrundtanks für Betriebsmittel in Kalifornien) nach statistischen Gesichtspunkten ausgewertet werden. Die Autoren stellen fest, daß die Benzolfahnen in den meisten Fällen (90%), weitgehend unabhängig von den geologischen und hydrogeologischen Bedingungen (Ausnahme Karstgebiete), nur eine durchschnittliche Länge von ca. 100 m erreichen (10 ppb-Isolinie). Bei der Hälfte aller Benzolschadensfälle liegt die Transportweite sogar nur bei ca. 40 m. Zeitreihenuntersuchungen zeigen zudem, daß ca. 33% der Benzolfahnen eine abnehmende Tendenz aufweisen, ca. 8% der Fahnen dehnen sich noch aus, während 59% keinen signifikanten Trend aufweisen. Aus den Ergebnissen ihrer Studie konnten die Autoren vier typische Fahnenphasen ableiten.

In einer ersten Phase "wächst" eine Benzolfahne bis zu einer bestimmten Länge und verharrt dann auf diesem Niveau einige Zeit. In einer dritten Phase verkleinert sich die Fahne zunächst

langsam, während in der letzten Phase ein relativ schneller "Rückzug" beobachtet werden kann. Die Ergebnisse der Studie werden z.Zt. von den Autoren an 10 Testfeldern in Kalifornien nachgeprüft.

Eine ähnliche Studie wurde von Mace et al. (1997) mit Daten aus Texas vorgelegt. Von 605 dokumentierten Fällen wurden 217 Benzolfahnen ausgewertet. Die Autoren konnten zeigen, daß in 75% aller untersuchten Fälle in Texas die dokumentierten Benzolfahnen nur ca. 80 m weit reichen (10 ppb-Isolinie), wobei nur ca. 3% der Fahnen eine zunehmende Tendenz aufweisen (Tabelle 3).

Tabelle 3: Vergleich von Transportweiten der vorliegenden Arbeit mit anderen Studien.

Schadstoff (Anzahl der Fälle)	Maximale Transportweite¹ [m] im Grund- wasser in 50% der Fälle	Maximale Trans- portweite² [m] im Grundwasser in 75% der Fälle	Quelle
Benzol (28)	< 170	< 375	diese Studie
Benzol (271)	< 40	< 100 (90%)	Rice et al. 1995a,b
Benzol (217)		< 80	Mace et al. 1997
BTEX (96)	< 150	< 300	diese Studie

¹Fahnenlänge, die von 50% der publizierten Fälle unterschritten wird; ²Fahnenlänge, die von 75% der publizierten Fälle unterschritten wird.

Ein Vergleich der Ergebnisse der amerikanischen Studien mit der vorliegenden Studie ist in Tabellen 3 dargestellt. Der Unterschied zwischen den Werten der Studien aus den USA und den Werten der vorliegende Studie (Tabellen 3, Transportweite für Benzol ca. < 400 m in 75% aller ausgewerteten Fälle) ist vor allem auf die unterschiedliche Datenbasis zurückzuführen. Während in den amerikanischen Studien nur Schadensfälle bei undichten Lagertanks (z.B. bei Tankstellen, usw.) untersucht und ausgewertet wurden, gehen bei der vorliegenden Studie auch Transportweiten aus Altstandorten wie z.B. Benzolfabriken in die Auswertung mit ein. Die Größenordnung und die beobachteten Trends sind jedoch in beiden Studien vergleichbar.

6. Bisherige Akzeptanz von "Natürlichem Rückhalt/Abbau" in der Sanierungspraxis

Der natürliche Rückhalt/Abbau von organischen Schadstoffen in Aquiferen ist durch viele wissenschaftliche Studien belegt (vgl. auch Anhang B) und wird vor allem in den USA in der Praxis als kostengünstige, alternative "Sanierungsmethode" zu den konventionellen Techniken angesehen (vgl. Tabelle 4 und z.B. Battermann & Meier-Löhr, 1993; Borden et al., 1995; Wilson et al., 1995; Johnston et al., 1996; Rifai et al., 1995; Höhener et al., 1997; Reinhard et al., 1997). Einheitliche Richtlinien und Empfehlungen liegen jedoch bisher noch nicht vor.

In 43 US-Staaten sind Richtlinien und Gesetze zur Regelung von Bioremediation/Natural Attenuation-Sanierungen eingeführt oder in Planung. Sieben Staaten lassen eine Sanierung durch Bioremediation/Natural Attenuation nicht zu (Tulis, 1997). In New Jersey z.B. muß vor einer Sanierung des Grundwassers durch Bioremediation/Natural Attenuation die Kontaminationsquelle entfernt und der Boden im Schadensbereich abgereinigt sein. D.h., es dürfen keine freien oder residualen Phasen in Boden oder Grundwasser vorhanden sein und die Schadstoffkonzentration muß innerhalb einer bestimmten Zeitspanne nachweisbar absinken. In den Bundesstaaten Maryland, Nebraska und Wyoming wird Bioremediation/Natural Attenuation nur in industriell genutzten Arealen oder in Stadtgebieten eingesetzt, wo keine Brunnen, die gefährdet werden können im Unterstrom vorhanden sind (Friebele, 1997).

In Deutschland und anderen europäischen Ländern wird natürlicher Rückhalt/Abbau nach der hier verwendeten Definition nicht offiziell praktiziert. Bisher sind nur biologische Sanierungen erlaubt, bei denen mit aktiven Techniken der kontaminierte Bereich abgereinigt wird (pump-and-treat, Landfarming, Beetverfahren, oder in-situ).

Tabelle 4: Natural Attenuation- Sanierungsprojekte in den USA (aus BFSS-Datenbank Version 2.1, Stand 1997); In Klammern ist die Anzahl der Intrinsic Bioremediation Sanierungsprojekte angegeben, bei denen auch Elektronenakzeptoren künstlich zugeführt werden.

Schadstoff / Anzahl der Projekte	geplant	in Bearbeitung	beendet
BTEX	22 (19)	36 (39)	7 (6)
Benzol	32 (25)	75 (53)	5 (3)
PAK	18 (16)	31 (25)	keine (4)
PCB	1	keine	keine
Leichtflüchtige halogenierte Verbindungen	14 (10)	13 (9)	4 (2)
Phenole	6 (5)	keine (6)	keine
PCP (Pentachlorphenol)	keine	keine (3)	keine

7. Schlußfolgerungen und Ausblick

In der vorliegenden Studie wurde durch Auswertung publizierter Felduntersuchungen und unter Einbeziehung existierender Studien untersucht, ob organische Schadstoffe durch natürlichen Rückhalt/Abbau stoffspezifisch eine charakteristische Transportweite im Grundwasser besitzen. Aufgrund der Ergebnisse sind folgende Schlußfolgerungen möglich:

1. Für bestimmte organische Schadstoffe können stoffspezifisch charakteristische Transportweiten ("Reaktionsräume") im Grundwasser abgeleitet werden: CKW ca. 2000 m, Phenole ca. 600 m und BTEX ca. 300 m (Benzol < 375 m, < 100 m nach Rice et al., 1995a).
2. Die geringen Transportweiten für gering retardierte Verbindungen, wie z.B. die BTEX und Naphthalin gehen auf einen biologischen Abbau dieser Stoffe in-situ zurück. Die Schadstofffahnen erreichen nach der charakteristischen Transportweite einen statischen Zustand, d.h. die Abbauraten stehen \pm im Gleichgewicht zu den Freisetzungsraten im Schadensherd.
3. Es gibt jedoch Verbindungen, wie z.B. die Stoffgruppe der CKW oder das Treibstoffadditiv Methyl-tert-butyl-ether (MTBE, z.B. Cooney, 1997) aber eventuell auch unbekannte Abbauprodukte, die u.U. in geringen Konzentrationen sehr viel weiter transportiert werden können als die hier angegebenen Strecken. Diese können u.U. eine höhere Toxizität aufweisen als die Ausgangssubstanz (z.B. Bryniok, 1997).

Die großen Schwankungsbreiten der beobachteten Fahnenlängen läßt nur die Schlußfolgerung zu, daß das "Natürliche Rückhaltevermögen" jeweils standortspezifisch quantifiziert werden sollte und nicht pauschal aus der Statistik allein bestimmt werden kann. Hierzu sind angepaßte Erkundungs- und Monitoring-Systeme z.T. noch zu entwickeln.

Anhang A: Tabelle der wichtigsten Literaturzitate zu organischen Schadstofffahnen

(269 Fälle, nach Schadstoff gegliedert, Legende am Ende der Tabelle, vollständige Zitate in Anhang B)

Schadstoff	L [m]	B [m]	M [m]	Alter [a]	Konz. [µg/L]	A	Quelle
Acenaphten	400	70	3	30	50	P	Eckert et al. 1996
Acenaphten	120				500	P	Schmitt et al. 1996
Aceton	77				20	P	Abou-Rizk et al. 1995
Aceton	200				1000	K	Major et al. 1995
AKW	300			10		P	Battermann & Werner 1984
Anthracen	300				10	P	Borden et al. 1986
Benzol	200				100 (? DL)	P	Bekins et al. 1997
Benzol	350	40		5	615	P	Borden et al. 1995
Benzol	180				10	P	Borden et al. 1997a
Benzol	700			20	10	P	Broede & Passero 1988
Benzol	300				0,5	P	Brown et al. 1997
Benzol	160				0,1	P(?)	Buscheck & Alcantar 1995
Benzol	130				n.n.	P	Davis et al. 1994
Benzol	50			12		P	Devlin & Gorman 1987
Benzol	50			12		P	Devlin & Gorman 1987
Benzol	570			20	100	P	Eberle et al. 1997
Benzol	600	70	3	30	10	P	Eckert et al. 1996
Benzol	600				10	P	Eckert, P. (m.M., 1997)

Benzol	80			17		P	Eganhouse et al. 1996
Benzol	55				10	P	Johansen <i>et al.</i> 1997
Benzol	100		10	18	10	P	Lesage et al. 1990
Benzol	2340				10	K	Mace et al. 1997
Benzol	60			30	100 (?)	P	Maheux & McKee 1997
Benzol	430				3	P (?)	McAllister & Chiang 1994
Benzol	30					P(?)	Nyer et al. 1991
Benzol	50					P	Priddle & Jackson 1991
Benzol (50% quantil)	43				10	¹	Rice et al. 1995a
Benzol (90% quantil)	101				10	¹	Rice et al. 1995a
Benzol (99% quantil)	304				10	¹	Rice et al. 1995a
Benzol	175		4-8	26	10	P	Rügge et al. 1995
Benzol	420	20-40	0,5-3		10	P	Thierrin et al. 1995
Benzol	460				10	P(?)	Toze et al. 1995
Benzol	150				1	P(?)	Wilson et al. 1995
Benzol	360				5	P(?)	Wilson et al. 1995
Benzol (75%)	77				10	³	Mace et al. 1997
Benzole (C3, C4)	23-120			17		P	Eganhouse et al. 1996
Benzole (C3, C4)	130			11	10	P	Lyngkilde & Christensen 1992
BTEX	23			3		P	Adams & Golden 1991
BTEX	200			11	100	P	Adams & Golden 1991
BTEX	90			10	10	P	Alison et al. 1995
BTEX	150					P	Borden <i>et al.</i> 1997b

BTEX	105					P	Chiang et al. 1993
BTEX	100				1	P	Cho et al. 1997
BTEX	177				100	P(?)	Daniel & Borden 1997
BTEX	190			4	20	P	Herrington et al. 1997
BTEX	587				1000	P	Hunt <i>et al.</i> 1994
BTEX	200			10	1	P	Kampbell <i>et al.</i> 1996
BTEX	25				2000	P	Lahvis & Baehr 1996
BTEX	130			11	10	P	Lyngkilde & Christensen 1992
BTEX	25			20	100	P	Martin-Hayden et al. 1991
BTEX	65				1	P (?)	McAllister & Chiang 1994
BTEX	610					P	Moutoux et al. 1997
BTEX	30				55	P(?)	Murali et al. 1997
BTEX	250				2000	P	Rifai et al. 1995
BTEX	70			50	1	P/K	Risner 1995
BTEX	30			50	1	P/K	Risner 1995
BTEX	40			50	1	P/K	Risner 1995
BTEX	14				10	P	Robbins et al. 1989
BTEX	120				500	P	Schmitt et al. 1996
BTEX	60	15				P(?)	Sorge et al. 1994
BTEX	60				10	P	Sturman et al. 1995
BTEX	200				10	P	Sturman et al. 1995
BTEX	200				40	P	Vroblesky & Chapelle 1994
BTEX	70				100	P(?)	Westervelt et al. 1997

BTEX	195				1	P	Wiedemeier et al. 1995
BTEX	450				1	P	Wiedemeier et al. 1996
BTEX	540	100	5	30	10	P	Wisotzky & Eckert 1997
BTEX	330				200	P	Yang et al. 1995
BTEX	230				200	P	Yang et al. 1995
BTEX	200				200	P	Yang et al. 1995
BTEX	180				200	P	Yang et al. 1995
BTEX (?, petrol hydro-carbon)	300						Bosshard et al. 1997
BTX	220				100	P	Chiang et al. 1989
BTX	100				100	P	Chiang et al. 1989
BTX	500				1	P	Görtz 1996
BTX	350			3		P	Hinchee & Reisinger 1987
BTX	1500	300				P	Mackay & Cherry 1989
Chlorbenzol	100			12		P	Devlin & Gorman 1987
Chlorbenzol	800			30		P	Grabe 1997
Chlormethylphenol	90			11	5	P	Lyngkilde & Christensen 1992
CKW	3500			50	0,2	P	Barber et al. 1992
CKW	75			11	1000	P	Berg 1989
CKW	700			20	10	P	Broede & Passero 1988
CKW	40				10000	P	Brühl et al. (1995)
CKW	600					P	Düsseldorfer Consult GmbH 1997
CKW	3500	500	5		100	P	DVWK 1989
CKW	4000	500			100	P	DVWK 1989

CKW	4500	500			100	P	DVWK 1989
CKW	6000	1000			100	P	DVWK 1989
CKW	500				10	P	Görtz 1996 (22 Fahnen)
CKW	5000 - 7500				10	P	Görtz 1996 (6 Fahnen)
CKW	3750				1	P	Ministerium f. E.,U. u. F. Baden-Württemberg 1983
CKW	900				1	P	Ministerium f. E.,U. u. F. Baden-Württemberg 1983
CKW	5250				1	P	Ministerium f. E.,U. u. F. Baden-Württemberg 1983
CKW	6000				1	P	Ministerium f. E.,U. u. F. Baden-Württemberg 1983
CKW	1500				1	P	Ministerium f. E.,U. u. F. Baden-Württemberg 1983
CKW	2500				1	P	Ministerium f. E.,U. u. F. Baden-Württemberg 1983
CKW	1220					P	Moutoux et al. 1997
CKW	1525					P	Moutoux et al. 1997
CKW (Tri-, Tetrachlorethen; Trichlormethan, -ethan)	500				10	P	Schollenberger 1993
CKW	900				25	P	Toussaint 1987
CKW	1800				5	P	Toussaint 1989
CKW	1200				5	P	Toussaint 1989
CKW	3500				25	P	Toussaint 1989

CKW	800				25	P	Toussaint 1989
CKW (1,1,1- Trichlorethan)	2000			20	5	P/K	Kaminsky & Wylie 1995
CKW (1,1,1- Trichlorethan)	60			30	190	P	Maheux & McKee 1997
CKW (1,1,1- Trichlorethan)	86			30	26	P	Michalski et al. 1995
CKW (1,1,1 Trichlorethan)	900			23	0,1	P	Pankow et al. 1986
CKW (1,1,1 Trichlorethan)	400				25	P	Toussaint 1987
CKW (1,1,1 Trichlorethan, Trichlorethen)	4200				5	P	Thorbjarnarson & Mackay 1997
CKW (1,1,1 Trichlorethan, Trichlorethen, 1,2 Dichlorethen)	600				25	P	Toussaint 1991
CKW (1,1-Dichlorethan)	60			30	5400	P	Maheux & McKee 1997
CKW (1,1-Dichlorethan)	100			30	50	P	Michalski et al. 1995
CKW (1,1-Dichlorethen)	100			30	2	P	Michalski et al. 1995
CKW (1,2 Dichloromethan)	100			12		P	Devlin & Gorman 1987
CKW (1,2-cis-Dichlorethen)	60			30	31000	P	Maheux & McKee 1997
CKW (1,2-Dichlorethen)	460				100	P	Cox et al. 1995
CKW (1,2-Dichlorethen)	300				5	K	Major et al. 1995
CKW (1,2-Dichlorethan)	60			30	5	P	Maheux & McKee 1997
CKW (1,2-	115			30	2	P	Michalski et al. 1995

Dichlorethan)							
CKW (1,2-trans-Dichlorethen)	60			30	40	P	Maheux & McKee 1997
CKW (10)	1600				1	P	Hagendorf et al. 1986
CKW (Chlorethan)	300					P(?)	Nyer et al. 1991
CKW (Dichlor ethen)	350				10000	P	Rifai et al. 1995
CKW (Dichlor ethen)	700				10000	P	Rifai et al. 1995
CKW (Dichlorethen)	2000			20	5	P/K	Kaminsky & Wylie 1995
CKW (Tetrachlor ethen)	60			30	1200	P	Maheux & McKee 1997
CKW (Tetrachlorethen ,Trichlorethan, Trichlorethen)	500					P	Brill et al. 1986
CKW (Tetrachlorethen ,Trichlorethan, Trichlorethen)	500					P	Brill et al. 1986
CKW (Tetrachlorethen ,Trichlormethan, -ethan, Trichlorethen)	1300				50	K	Spayd 1985
CKW (Tetrachlorethen ,Trichlormethan, -ethan, Trichlorethen)	1300				50	K	Spayd 1985
CKW (Tetrachlorethen ,Trichlormethan, -ethan, Trichlorethen, Dichlorethen, Dibromethen)	3630	260	13	22		P	Gunderson et al. 1995
CKW (Tetrachlorethen)	3000 (2500)				0,1 (50)	P	Ala & Domenico 1992
CKW (Tetrachlorethen)	500					P	Battermann, G. (m.M., 1997)
CKW (Tetrachlorethen)	800					P	Battermann, G. (m.M., 1997)

CKW (Tetrachlorethen)	3000					K	Battermann, G. (m.M., 1997)
CKW (Tetrachlorethen)	320					P(?)	Borchardt <i>et al.</i> 1997
CKW (Tetrachlorethen)	800			45	100	P	Eckert, P. (m.M., 1997)
CKW (Tetrachlorethen)	75				1000	K	Hötzl <i>et al.</i> 1990
CKW (Tetrachlorethen)	2000			20	5	P/K	Kaminsky & Wylie 1995
CKW (Tetrachlorethen)	3900	1000	300		1	K	McBride 1990
CKW (Tetrachlorethen)	30			30	2	P	Michalski <i>et al.</i> 1995
CKW (Tetrachlorethen)	1300				50	P	Rogers 1992
CKW (Tetrachlorethen)	600				25	P	Toussaint 1987
CKW (Tetrachlorethen)	2000				25	P	Toussaint 1989
CKW (Tetrachlorethen)	500					K	Toussaint 1991
CKW (Tetrachlorethen, 1,2-Dichlorethen)	3000				100	P	Görtz 1996
CKW (Tetrachlorethen, Trichlorethan)	2200	800				P	Mackay & Cherry 1989
CKW (Tetrachlorethen, Trichlorethan, Dichlorbrompropan)	5000	700				P	Mackay & Cherry 1989
CKW (Tetrachlorethen, Trichlorethan, Trichlorethen)	1700	1000				P	Mackay & Cherry 1989
CKW (Tetrachlorethen, Trichlorethen)	2000					P	Battermann, G. (m.M., 1997)
CKW (Tetrachlorethen, Trichlorethen)	600				10	P(?)	Johnson & Rogers 1995
CKW (Tetrachlorethen, Trichlorethen)	3400	700				P	Mackay & Cherry 1989
CKW (Tri- und Dichlormethan)	1800				10	K	Rietzler 1990

CKW (Tri- und Tetrachlorethen)	4500	250-1000		25	10	P	Kauffmann & Kinzelbach 1992
CKW (Tri-, Tetrachlorethen)	10000				50	K	Ministerium f. E.,U. u. F. Baden-Württemberg 1983
CKW (Tri-, Tetrachlorethen)	2150			15	25	P	Ministerium f. E.,U. u. F. Baden-Württemberg 1983
CKW (Tri-, Tetrachlorethen; Trichlormethan, -ethan)	4500				10	P	Schollenberger 1993
CKW (Tri-, Tetrachlorethen; Trichlormethan, -ethan)	1000				10	P	Schollenberger 1993
CKW (Tri-, Tetrachlorethen; Trichlormethan, -ethan)	1300				10	P	Schollenberger 1993
CKW (Tri-, Tetrachlorethen; Trichlormethan, -ethan)	500				10	P	Schollenberger 1993
CKW (Trichlor ethen)	60			30	640	P	Maheux & McKee 1997
CKW (Trichlor ethen)	100				5	K	Major et al. 1995
CKW (Trichlor ethen)	3000				5	K	O'Connell et al. 1997
CKW (Trichlor ethen)	150				10000	P	Rifai et al. 1995
CKW (Trichlor ethen)	250				10000	P	Rifai et al. 1995
CKW (Trichlor ethen, 1,2-Dichlorethan)	140					P	Johnson et al. 1997
CKW (Trichlorethan)	3500 (1200)				0,1 (50)	P	Ala & Domenico 1992
CKW (Trichlorethan, 1,1-Dichlorethen)	4800	1300				P	Mackay & Cherry 1989
CKW (Trichlorethen)	500					K	Battermann, G. (m.M., 1997)

CKW (Trichlorethen)	160				100	K	Begor et al. 1989
CKW (Trichlorethen)	200				100	P	Cox et al. 1995
CKW (Trichlorethen)	80			12		P	Devlin & Gorman 1987
CKW (Trichlorethen)	1300				0,5	P	Duba et al. 1996
CKW (Trichlorethen)	200					P	Freeberg et al. 1987
CKW (Trichlorethen)	200			30	100	P	Hewitt & Shoop 1994
CKW (Trichlorethen)	1000			10	10	P(?)	Marrin & Thompson 1987
CKW (Trichlorethen)	80			10	100	P	Meiri et al. 1990
CKW (Trichlorethen)	366					P	Moutoux et al. 1997
CKW (Trichlorethen)	3000					P(?)	Naber et al. 1997
CKW (Trichlorethen)	300				0,1	P	Taylor & Serafini 1988
CKW (Trichlorethen)	600				25	P	Toussaint 1987
CKW (Trichlormethan, -ethan, Trichlorethen, Dichlorethen)	40		15	18	25	P	Lesage et al. 1990
Cresol (o-)	350				500	P	Schmitt et al. 1996
Di-(2-ethylhexyl)- Phthalat	1800				800	P	Schiedek 1996
Dichlorbenzol	800			30		P	Grabe 1997
Dichlorbenzol (1,2)	200			11	100	P	Adams & Golden 1991
Dichlorbenzol (1,2)	3500			50	0,01	P	Barber 1988
Dichlorbenzol (1,3)	3500			50	0,01	P	Barber 1988
Dichlorbenzol (1,4)	200			11	100	P	Adams & Golden 1991
Dichlorbenzol (1,4)	3500			50	0,01	P	Barber 1988
Dichlorphenol (2,4)	600			15	200	P	Johnson et al. 1985
Dichlorphenol (2,6)	600			15	200	P	Johnson et al. 1985

Dichlorphenol (2,6)	600			15	200	P	Pankow et al. 1986
Diethylether	150					P	Priddle & Jackson 1991
Dimethylphthalat	1800				20	P	Schiedek 1996
Di-n-butyl-Phthalat	3000				200	P	Schiedek 1996
Dinitrotoluol (2,4)	200			11	100	P	Adams & Golden 1991
Dinitrotoluol (2,4)	2300			45	3,9	P/K	Bradley et al. 1997
Dinitrotoluol (2,6)	2300			45	3,6	P/K	Bradley et al. 1997
Dioxan (1,4)	250					P	Priddle & Jackson 1991
Dioxane (1,4)	1300					P(?)	Nyer et al. 1991
Ethylbenzol	350	40		5	42	P	Borden et al. 1995
Ethylbenzol	30				10	P	Borden et al. 1997a
Ethylbenzol	80			17		P	Eganhouse et al. 1996
Ethylbenzol	60			30	220	P	Maheux & McKee 1997
Ethylbenzol	100		4-8	26	10	P	Rügge et al. 1995
Ethylbenzol	150				1	P(?)	Wilson et al. 1995
Ethylether	1000			20	100	P	Eberle et al. 1997
Flugbenzin	260	80		23		P	Ostendorf et al. 1993
Fuel Hydrocarbons	70				50	²	Rice et al. 1995b
Methylphenol	100				1	P	Klecka et al. 1990
MTBE	180				10	P	Borden et al. 1997a
MTBE	177				100	P(?)	Daniel & Borden 1997
MTBE	45				55	P(?)	Murali et al. 1997
Naphthalin	200			11	100	P	Adams & Golden 1991
Naphthalin	300				10	P	Borden et al. 1986
Naphthalin	200			35	100	P	Durant et al. 1995

Naphthalin	300	70	3	30	50	P	Eckert et al. 1996
Naphthalin	100				1	P	Klecka et al. 1990
Naphthalin	130			11	10	P	Lyngkilde & Christensen 1992
Naphthalin	400					P(?)	Madsen et al. 1996
Naphthalin	30		4-8	26	1	P	Rügge et al. 1995
NAPL	150			3		P	Hinchee & Reisinger 1987
Organische Pharmazeutika (13 Stoffe)	115			26	10-20	P	Holm et al. 1995
PAK (Naphthalin, Anthracen, Phenanthren, Fluoranthen, Pyren, Benzo(a)pyren)	800				1	P	Hoffmann 1993
PAK (Naphthalin, Anthracen, Phenanthren, Fluoranthen, Pyren, Benzo(a)pyren)	300				10	P	Hoffmann 1993
PAK (v.a. Naphthalin)	300				10	P	IMES (1996)
PCBs	90					P	Villaume 1985
Pentachlorphenol	300				10	P	Borden et al. 1986
Pentachlorphenol	25				100	P	Davis et al. 1994
Pentachlorphenol	240			15	40	P	Johnson et al. 1985
Phenol	1200			20	10	P	Broede & Passero 1988
Phenol	450				1	P	Goßel & Püttmann (1991)
Phenol	100				1	P	Klecka et al. 1990
Phenol	30					P(?)	Nyer et al. 1991
Phenol	350				500	P	Schmitt et al. 1996
Phenol, 2-Methylphenol, 3-	90			12		P	Bekins et al. 1993

Methylphenol, 4-Methylphenol							
Phenoxyphenole	200			15	100	P	Johnson et al. 1985
Tetrachlorphenol (2,3,4,6)	320			15	100	P	Johnson et al. 1985
Tetrahydrofuran	480					P(?)	Nyer et al. 1991
Toluol	350	40		5	26	P	Borden et al. 1995
Toluol	73				10	P	Borden et al. 1997a
Toluol	700			20	10	P	Broede & Passero 1988
Toluol	50			12		P	Devlin & Gorman 1987
Toluol	50			12		P	Devlin & Gorman 1987
Toluol	300	70	3	30	10	P	Eckert et al. 1996
Toluol	23			17		P	Eganhouse et al. 1996
Toluol	210				0,1	P (?)	McAllister & Chiang 1994
Toluol	40		4-8	26	5	P	Rügge et al. 1995
Toluol	250	20-40	0,5-3		10	P	Thierrin et al. 1995
Toluol	150				0,5	P(?)	Wilson et al. 1995
Triazin	1300	250-500			0,5	P	Avanzini et al. 1992
Triazin	1000				0,5	P	Schollenberger 1993
Triazin	3000				1	P	Schollenberger 1993
Trichlorbenzol	150			30		P	Grabe 1997
Trichlorphenol (2,4,6)	600			15	200	P	Johnson et al. 1985
Vinylchlorid	300				10	P	Cox et al. 1995
Vinylchlorid	300				10	K	Major et al. 1995
Vinylchlorid	650				10000	P	Rifai et al. 1995

Xylol	60			30	1700	P	Maheux & McKee 1997
Xylol	50		4-8	26	10	P	Rügge et al. 1995
Xylol (-m, -o, -p)	60				1	P(?)	Wilson et al. 1995
Xylol (-m, -p)	78				10	P	Borden et al. 1997a
Xylol (m-, p-)	350	40		5	335	P	Borden et al. 1995
Xylol (-o)	180				10	P	Borden et al. 1997a
Xylol (o-)	350	40		5	13	P	Borden et al. 1995
Xylol (o-)	23			17		P	Eganhouse et al. 1996

Legende:

L = Länge, B = Breite, M = Mächtigkeit, Konz. = Grenzkonzentration für die Bestimmung der Schadstofffahne, NAPL = Non-Aqueous-Phase-Liquid, A = Aquifertyp, P = Porengrundwasserleiter, K = Kluftgrundwasserleiter, ? = nicht eindeutig beschrieben, m.M. = freundliche mündliche Mitteilung, n.n.. = nicht nachweisbar.

1 statistisches Ergebnis aus 271 untersuchten Fällen von unterirdischen Benzintanks in Kalifornien, USA, mit unterschiedlichen geologischen Verhältnissen.

2 statistisches Ergebnis aus 51 untersuchten Fällen von unterirdischen Benzintanks in den USA mit unterschiedlichen geologischen Verhältnissen.

3 statistisches Ergebnis aus 217 untersuchten Fällen von unterirdischen Benzintanks in Texas, USA, mit unterschiedlichen geologischen Verhältnissen.

Anhang B: Literaturzitate

- Abou-Rizk, J.A.M.; Leavitt, M.E.; Graves, D.A. (1995): In-situ bioremediation of organics including cyanide and carbon disulfide.- in: Hinchee, R.E.; Wilson, J.T.; Downey, D.C. Columbus (Hrsg.): 3. International In Situ and On-Site Bioreclamation Symposium, San Diego, Ca/USA, 1995, 24.-27.Apr, Battelle Press. Oh, USA 1995, Bd 3(6): 175-183.
- Acton, D.W.; Barker, J.F. (1992): In Situ Biodegradation Potential of Aromatic Hydrocarbons in Anaerobic Groundwaters.- Journal of Contaminant Hydrology, 9(4): 325-352.
- Adams, W. D.; Golden, J. E. (1991): Comparison of the effects of geologic environment on volatile organic plume development.- Journal of Hazardous Materials, 29(1): 17-41.
- Ala, N.K.; Domenico, P.A. (1992): Inverse analytical techniques applied to coincident contaminant distributions at Otis Air Force Base, Massachusetts.- Ground Water, 30 (2): 212-218.
- Alison, T.; Hutchins, S.R.; Bedient, J.A.; Ward, C.H.; Wiesner, M.; Bantle, J.A.; Williams, S. (1995): Pilot-scale design for nitrate-based bioremediation of jet-fuel.- in: Hinchee, R.E.; Wilson, J.T.; Downey, D.C. Columbus (Hrsg.): 3. International In Situ and On-Site Bioreclamation Symposium, San Diego, Ca/USA, 1995, 24.-27.Apr, Battelle Press. Oh, USA 1995, Bd 3(6): 133-141.
- Allen-King, R.M., Barker, J.F., Gillham, R.W., and Jensen, B.K., 1994. Substrate- and nutrient-limited toluene biotransformation in sandy soil. Environmental Toxicology and Chemistry, Vol. 13, No. 5, pp. 693-705.
- Alphenaar, A.; Vijgen, J.; Gerritse, J.; Spuij, F.; Gottschal, J. (1996): In situ bioremediation of chloroethene contaminated soil.- In: Proceedings Ground Water and Subsurface Remediation: Research Strategies for In-Situ Technologies, Kobus, H., Barczewski B., Koschitzky, H.-P. (Hrsg.), Stuttgart, Germany, September 24-25, 1995, S. 310-319, Springer-Verlag (Berlin, Heidelberg).
- Alphenaar, P.A.; Marsmann, E.; Okx, J.P.; Arnz, R.; Gerritse, J.; Gottschall, J. (1997): In-Situ-Abbau von CKW.- In: Kreysa, G.; Wiesner, J. (Hrsg.): Möglichkeiten und Grenzen des Reinigungskontaminierter Grundwässer.- Resümee und Beiträge des 12. DECHEMA-Fachgesprächs Umweltschutz, Frankfurt a.M., S. 705-713.
- Alvarez-Cohen, L., McCarty, P.L.; Roberts, P.V. (1993): Sorption of trichloroethylene onto a zeolite accompanied by methanotrophic biotransformation.- Environmental Science and Technology, 27: 2141-2148.
- Arneth, J.D.; Milde, G.; Kerndorff, H.; Schleyer, R. (1989): Waste deposit influences on groundwater quality as a tool for waste type and site selection for final storage quality.- in: Baccini, P. (Hrsg.): The Landfill.- Lecture Notes in Earth Sciences, Vol. 20, Springer-Verlag, Berlin.
- Avanzini, M.; Beretta, G. P.; Francani, V. (1992): Modelling of groundwater contamination by pesticide point sources.- In: Richter, P.; Herndon, R. (Hrsg.), Proceedings of the International Symposium on Environmental Contamination in Central and Eastern Europa, Budapest, Hungary, 12.-16.10.1992 Budapest.
- Baedecker, M.J.; Cozzarelli, I.M.; Eganhouse, R.P.; Siegel, D.I.; Bennett, P.C. (1993): Crude oil in a shallow sand and gravel aquifer: III. Biochemical reactions and mass balance modeling in anoxic groundwater.- Applied Geochemistry 8: 569-586.

- Barbaro, J.R.; Barker, J.F.; Lemaon, L.A.; Mayfield, C.I. (1992): Biotransformation of BTEX under anaerobic, denitrifying conditions: Field and laboratory observations.- *Journal of Contaminant Hydrology*, 11: 245-272.
- Barbee, G.C. (1994): Fate of chlorinated aliphatic hydrocarbons in the vadose zone and ground water.- *Ground Water Monitoring and Remediation*, 14 (1): 129-140.
- Barber, L.B. II (1988): Dichlorobenzene in ground water: Evidence for long-term persistence.- *Ground Water*, 26 (6): 696-702.
- Barber, L.B. II, Thurmann, E.M.; Takahashi, Y.; Noriega, M.C. (1992): Comparison of purge and trap GC/MS and purgeable organic chloride analysis for monitoring volatile chlorinated hydrocarbons.- *Ground Water*, 30 (6): 836-842.
- Barker, J.F., 1992. Nitrate as an alternate electron acceptor for in situ bioremediation of gasoline-contaminated groundwater. In *Situ Bioremediation Symposium '92*, Lesage, S. (ed.), Niagara-on-the-Lake, Ontario, September 20-24, 1992, pp. 68-81.
- Barker, J.F., 1996. Petroleum hydrocarbons in groundwater: From natural fate processes to an intrinsic bioremediation technology. *Proceedings, Fourth International Symposium on the Geochemistry of the Earth's Surface*, Ilkley, W. (ed.), Yorkshire, UK, May 28-June 1, 1996.
- Barker, J.F.; Hubbard, C.E.; Lemon, L.A. (1990): The influence of methanol and MTBE on the fate and persistence of monoaromatic hydrocarbons in ground water. In: *Proceedings of Petroleum hydrocarbons and organic chemicals in ground water; prevention, detection, and restoration; a conference and exposition. Ground Water Management. 4; Pages 113-127. Water Well Journal Pub. Co.. Dublin, OH, United States. 1990.*
- Barker, J.F.; Patrick, G.C.; Major, D. (1987); Natural attenuation of aromatic hydrocarbons in a shallow sand aquifer.- *Ground Water Monitoring and Remediation*, 7 (1): 64-71.
- Battermann, G.; Fried, R.; Meier-Löhr, M.; (1993): In-Situ-Sanierung eines kohlenwasserstoffverunreinigten Raffineriegeländes.- *Wasser und Boden*, 2: 108-113.
- Battermann, G.; Meier-Löhr, M. (1995): Nitrate as electron acceptor in in-situ abandoned refinery site bioremediation.- in: Hincee, R.E.; Wilson, J.T.; Downey, D.C. Columbus (Hrsg.): *3. International In Situ and On-Site Bioreclamation Symposium, San Diego, Ca/USA, 1995*, 24.-27.Apr, Battelle Press. Oh, USA 1995, Bd 3(6): 155-164.
- Battermann, G.; Werner, P. (1984): Beseitigung einer Untergrundkontamination mit Kohlenwasserstoffen durch mikrobiellen Abbau.- *GWF-Wasser/Abwasser*, 125, H.8, München ; Berlin (Oldenbourg).
- Battermann, Gerhard: Freundliche mündliche Mitteilung, 1997.
- Begor, K.F.; Miller, M.A.; Sutch, R.W. (1989): Creation of an artificially produced fracture zone to prevent contaminated ground water migration.- *Ground Water*, 27 (1): 57-63.
- Bekins, B. A.; Godsy, E. M. Goerlitz, D. F. (1993): Modeling steady-state methanogenic degradation of phenols in groundwater.- *Journal of Contaminant Hydrology*, 14: 279-294.
- Bekins, B.A.; Warren, E.; Godsy, E.M. (1997): Comparing zero- and first-order approximations to the Monod model.- in: Alleman, B.C.; Leeson, A. (Hrsg.), *4. International In Situ and On-Site Bioremediation Symposium, New Orleans, La/USA, 1997*, 28.Apr. - 1 May, Battelle Press. Oh, USA 1997, Bd 5: 547-552.
- Berg, H.D. (1989): Untersuchung und Sanierung einer Bodenverunreinigung mit chlorierten Kohlenwasserstoffen.- *GWF (Das Gas- und Wasserfach) Wasser - Abwasser*, Bd 130(12) S. 27-33.

- Bianchi-Mosquera, G.C., Allen-King, R.M., and Mackay, D.M., 1994. Enhanced degradation of dissolved benzene and toluene using a solid oxygen-releasing compound.- *Ground Water Monitoring and Remediation*, 14 (1): 120-128.
- Biotechnologische in-situ-Sanierung kontaminierter Standorte: Internationales Fachgespräch in Langen, 11. und 12. Mai 1987; Z. Filip. (Hrsg.); (Schriftenreihe des Vereins für Wasser-, Boden- und Lufthygiene ; 80)- Stuttgart : Fischer, 1988. - 394 S.
- Bohan, D.G; Schlett, W.S. (1997): Enhanced natural bioremediation using a time release oxygen compound.- in: Alleman, B.C.; Leeson, A. (Hrsg.), 4. International In Situ and On-Site Bioremediation Symposium, New Orleans, La/USA, 1997, 28.Apr. - 1 May, Battelle Press. Oh, USA 1997, Bd 5: 475-480.
- Borchardt, U.; Hüser, M; Renno, T. (1997): Bodenluftprobenahme - Die Fragestellung bestimmt das Verfahren.- *TerraTech* 2/97: 19-22.
- Borden, R. C.; Gomez, C. A.; Becker, M. T. (1995): Geochemical indicators of intrinsic bioremediation.- *Ground Water* , 33 (2): 180-189.
- Borden, R.C.; Bedient, P.B.; Lee, M.D.; Ward, C.H.; Wilson, J.T. (1986): Transport of dissolved hydrocarbons influenced by oxygen-limited biodegradation - 2. Field application.- *Water Resources Research*, 22 (13): 1983-1990.
- Borden, R.C.; Daniel, R.A.; LeBrun, L.E.; Davies, C.W. (1997a): Intrinsic biodegradation of MTBE and BTEX in a gasoline-contaminated aquifer.- *Water Resources Research*, 33 (5): 1105-1115.
- Borden, R.C.; Goin, R.T.; Kao, C.-M. (1997b): Control of BTEX migration using a biologically enhanced permeable barrier.- *Ground Water Monitoring and Remediation*, 17 (1): 70-80.
- Bosshard, B.; Raumin, J.; Dawson, D. (1997): In-situ remedial technology integration to lower remediation costs.- in: Alleman, B.C.; Leeson, A. (Hrsg.), 4. International In Situ and On-Site Bioremediation Symposium, New Orleans, La/USA, 1997, 28.Apr. - 1 May, Battelle Press. Oh, USA 1997, Bd 5: 445-450.
- Bradley, P. M.; Chapelle, F. H.; Landmeyer, J. E.; Schumacher, F. G. (1997): Potential for intrinsic bioremediation of a DNT-contaminated aquifer.- *Ground Water* , 35 (1): 12-17.
- Bredehoeft, F.D. (1994): Hazardous Waste Remediation: A 21st Century Problem.- *Ground Water Monitoring and Remediation*, 14 (1): 95-100.
- Brill, V.; Kerndorff, H.; Schleyer, R.; Arneht, J.-D.; Milde, G.; Friesel, P. (1986): Fallbeispiele für die Erfassung grundwassergefährdender Altablagerungen aus der Bundesrepublik Deutschland.- *WaBoLu-Hefte* 6/1986, 187 S., Institut für Wasser-, Boden- und Lufthygiene des Bundesgesundheitsamtes, Berlin.
- Broede, L.D.; Passero R.N. (1988): Spatial and temporal variations of synthetic organics in the contaminant plume from the KL Landfill, Kalamazoo County, Michigan.- In: Proceedings of the Ground water geochemistry conference. Association of Ground Water Scientists and Engineers, United States , Ground water geochemistry conference. Denver, CO, United States. Feb. 16-18, 1988, Pages 579-594. Natl. Water Well Assn.. Dublin, OH, United States. 1988.
- Broholm, K.; Christensen, T.H.; Jensen, B.K. (1993): Different abilities of eight mixed cultures of methane-oxidizing bacteria to degrade TCE.- *Water Research*, 27(2): 215-224.
- Brown, K.; Sekerka, P.; Thomas, M.; Perina, T.; Tyner, L., Sommer, B. (1997): Natural attenuation of jet-fuel impacted ground water.- in: Alleman, B.C.; Leeson, A. (Hrsg.), 4. International In Situ and On-Site Bioremediation Symposium, New Orleans, La/USA, 1997, 28.Apr. - 1 May, Battelle Press. Oh, USA 1997, Bd 1: 83-88.

- Bruce, B. W.; McMahon, P. B. (1996): Shallow ground water quality beneath a major urban center: Denver, Colorado, USA.- *Journal of Hydrology*, Nov 15 1996; 186 (1-4): 129-151.
- Bruce, B.W.; McMahon, P.B. (1996): Shallow ground water quality beneath a major urban center: Denver, Colorado, USA.- *Journal of Hydrology*, 186: 129-151.
- Brühl, H.; Ennuschat, U.; Naumann, J.; Verleger, H. (1995): In-situ-Sanierung von Grundwasser - Erfahrungen mit dem Hydro-Airlift-Brunnen.- *GWF (Das Gas- und Wasserfach) Wasser - Abwasser*, Bd 136(1) S. 25-33.
- Bryniok, D. (1997): PAK-Abbau und Freisetzung von Metaboliten.- in: Knorr, C.; von Schell T. (Hrsg.): *Mikrobieller Schadstoffabbau - Ein interdisziplinärer Ansatz.- Vieweg&Sohn, Braunschweig*, S. 118-130.
- Buscheck, T.E.; Alcantar, C.M. (1995): Regressions techniques and analytical solutions to demonstrate intrinsic bioremediation.- in: Hinchee, R.E.; Wilson, J.T.; Downey, D.C. Columbus (Hrsg.): *3. International In Situ and On-Site Bioreclamation Symposium, San Diego, Ca/USA, 1995, 24.-27.Apr, Battelle Press. Oh, USA 1995, Bd 3(1): 109-116.*
- Buscheck, T.E.; O'Reilly, K.T.; Nelson, S.N. (1993): Evaluation of intrinsic bioremediation at field sites.- In: *Proceedings from the 1993 Conference on Petroleum Hydrocarbons and Organic Chemicals in Groundwater: Prevention, Detection and Restoration: 367-381, Waer Well Journal Publishing Co., Dublin, OH, USA.*
- Butler, B.J., VanderGriendt, M., and Barker, J.F., 1992. Impact of methanol on the biodegradative activity of aquifer microorganisms. *Proceedings, SETAC 13th Annual Meeting, , Cincinnati, Ohio, November 8-12, 1992, pp. ??.*
- Caldwell, K. R.; Tarbox, D. L.; Barr, K. D.; Fiorenza, S.; Dunlap, L. E.; Thomas, S. B. (1992): Assessment of natural bioremediation as an alternative to traditional active remediation at selected Amoco Oil Company sites, Florida.- *Ground Water Management*, 14 (Proceedings of the 1992 Petroleum Hydrocarbons and Organic Chemicals in Ground Water: Prevention, Detection, and Restoration), 1992, Seite 509-525.
- Carlsen, T; Hall, L.; Rice, D. (1997): Ecological hazards of MTBE exposure: A research agenda.- Bericht-Nr. UCRL-ID-126290, Lawrence Livermore National Laboratory, University of California.
- Chapmann, S.W.; Byerley, B.T.; Smyth, D.J.A., Mackay, D.M. (1997): A pilot test of passive oxygen release for enhancement of in situ bioremediation of BTEX-contaminated ground water.- *Ground Water Monitoring and Remediation*, 17 (2): 93-105.
- Cherry, J.A., Barker, J.F., Feenstra, S., Gillham, R.W., Mackay, D.M., and Smyth, D.J.A. (1996): The Borden site for groundwater contamination experiments: 1978-1995. In: Kobus, H., Barczewski B., Koschitzky, H.-P. (Hrsg.), *Proceedings Ground Water and Subsurface Remediation: Research Strategies for In-Situ Technologies, Stuttgart, Germany, September 24-25, 1995, S. 101-127, Springer-Verlag (Berlin, Heidelberg).*
- Cherry, J.A., Feenstra, S., and Mackay, D.M., (1993): Developing a conceptual framework and rational goals for groundwater remediation at DNAPL sites. *3rd International Conference on Ground Water Quality Research, Subsurface Restoration Conference, Dallas, Texas, June 21-24, 1993, pp. 14-17.*
- Cherry, J.A., Feenstra, S., Kueper, B.H., and McWhorter, D.W., (1990): Status of in situ technologies for cleanup of aquifers contaminated by DNAPLs below the water table. *International Speciality Conference on How Clean is Clean? Cleanup Criteria for Contamiated Soil and Groundwater, November 6-9, 1990, pp. 1-17.*

- Chiang, C.; Petkovsky, P.; Beltz, M.; Rouse, S.; Boyd, T.; Newell, C.; McHugh, T. (1993): An enhanced aerobic bioremediation system at a central production facility - system design and data analysis.- *Ground Water Management*, **17** (Petroleum Hydrocarbons And Organic Chemicals In Ground Water), 1993, Seite 661-678.
- Chiang, C.Y.; Salanitro, J.P.; Chai, E.Y.; Colthart, J.D.; Klein, C.L. (1989): Aerobic biodegradation of benzene, toluene and xylene in a sandy aquifer-data - analysis and computer modeling.- *Ground Water*, **27** (6): 823-834.
- Cho, J. S.; Digiulio, D. C.; Wilson, J. T.; Vardy, J. A. (1997): In situ air injection, soil vacuum extraction and enhanced biodegradation: a case study in a jp 4 jet fuel contaminated site.- *Environmental Progress. SPR* 1997; **16** (1) : 35-42.
- Christensen, T.H.; Kjeldsen, P.; Albrechtsen, H.-J.; Gorm, H.; Nielsen, P.H.; Bjerg, P.L.; Holm P.E. (1994): Attenuation of landfill leachate pollutants in aquifers.- *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, **24** (2): 119-202.
- Conrad, M.E.; Daley, P.F.; Fischer, M.L.; Buchanan, B.B.; Leighton, T.; Kashgarian, M. (1997): Combined ^{14}C und $\delta^{13}\text{C}$ monitoring of in-situ biodegradation of petroleum hydrocarbons.- *Environmental Science & Technology*, **31** (5): 1463-1469.
- Cooney, C.M. (1997): California struggles with presence of MTBE in public drinking water wells.- *Environmental Science & Technology*, **31** (5): 269.
- Cox, E.; Edwards, E.; Lehmicke, L.; Major, D. (1995): Intrinsic biodegradation of trichloroethene and trichloroethane in a sequential anaerobic-aerobic aquifer.- in: Hinchee, R.E.; Wilson, J.T.; Downey, D.C. Columbus (Hrsg.): 3. International In Situ and On-Site Bioreclamation Symposium, San Diego, Ca/USA, 1995, 24.-27.Apr, Battelle Press. Oh, USA 1995, Bd 3(1): 223-231.
- Cozzarelli, I.M.; Baedeker, M.J. (1992): Oxidation of hydrocarbons coupled to reduction of inorganic species in groundwater.- In: Kharaka, Y.; Maest, A. (Hrsg.), *Water-Rock-Interaction*, pp. 275-278, Balkema, Rotterdam.
- Criddle, C.S.; McCarty, P.L.; Elliot, M.C.; Barker, J.F. (1986): Reduction of hexachloroethane to tetrachloroethylene in Groundwater.- *Journal of Contaminant Hydrology*, **1**: 133-142.
- Damera, R.; Hill, M.R.; Murali, D.; McDermott, R. (1997): Rapid clean-up of a multiple fuel spill.- in: Alleman, B.C.; Leeson, A. (Hrsg.), 4. International In Situ and On-Site Bioremediation Symposium, New Orleans, La/USA, 1997, 28.Apr. - 1 May, Battelle Press. Oh, USA 1997, Bd 1: 199-204.
- Daniel, R.A.; Borden, R.C. (1997): Spatial variability in intrinsic bioremediation rates: Effects on contaminant transport.- in: Alleman, B.C.; Leeson, A. (Hrsg.), 4. International In Situ and On-Site Bioremediation Symposium, New Orleans, La/USA, 1997, 28.Apr. - 1 May, Battelle Press. Oh, USA 1997, Bd 1: 29-34.
- Davis, A.; Campbell, J.; Gilbert, C.; Ruby, M.; Bennett, M; Tobin, S. (1994): Attenuation and biodegradation of chlorophenols in ground water at a former wood treating facility.- *Ground Water*, **32** (2): 248-256.
- Davis, J. W.; Klier, N. J.; Carpenter, C. L. (1994): Natural biological attenuation of benzene in ground water beneath a manufacturing facility.- *Ground Water*, **32** (2): 215-225.
- Devlin, J. F.; Gorman, W. A. (1987): The distribution of volatile organics in a leachate plume, Gloucester, Ontario.- *Water Pollution Research Journal of Canada*, **22**(1): 49-63.
- Dietzel, F. (1989): Sanierung von Grundwasserschäden in Baden-Württemberg.- *Schriftenreihe WAR*. Bd 39, 1989.; Konferenz: 17. Wassertechnisches Seminar an der Technischen Hoch-

- schule Darmstadt. Sicherstellung der Trinkwasserversorgung, Darmstadt, 1989, 1. Jun; S. 123-155.
- Duba, A. G.; Jackson, K. J.; Jovanovich, M. C.; Knapp, R. B.; Taylor, R. T. (1996): TCE remediation using in-situ resting-state bioaugmentation.- *Environmental Science & Technology*, 30(6), 1982-1989.
- Durant, N.D.; Wilson, L.P.; Bouwer, E.J. (1995): Microcosm studies of subsurface PAH-degrading bacteria from a former manufactured gas plant.- *Journal of Contaminant Hydrology*, 17: 213-237.
- Düsseldorfer Consult GmbH (1997): Leistungsspektrum Umwelttechnik Wasser und Boden.- Firmenprospekt 04/97.
- DVWK (1989): Stofftransport im Grundwasser.- Schriftenreihe des Deutschen Verbandes für Wasserwirtschaft und Kulturbau e.V., Heft 83, Hamburg, Berlin (Parey).
- Eberle, M.F.; Heukeroth, D.M.; Rykaczewski, M.J. (1997): In-situ biodegradation of a landfill benzene plume.- in: Alleman, B.C.; Leeson, A. (Hrsg.), 4. International In Situ and On-Site Bioremediation Symposium, New Orleans, La/USA, 1997, 28. Apr. - 1 May, Battelle Press. Oh, USA 1997, Bd 5: 301-306.
- Eckert, P.; Gorrhardt, J.; Schubert, J. (1996): Einsatz eines 3D- Transportmodells bei der Planung einer hydraulischen Grundwassersanierung.- In: Merkel, B.; Dietrich, P.G.; Struckmeier, W. (Hrsg.): Grundwasser und Rohstoffgewinnung.- Vortrags- und Posterkurzfassung der Tagung der Fachsektion Hydrogeologie der Deutschen Geologischen Gesellschaft, Freiberg/Sachsen, Mai 1996, Köln (Sven-von-Loga).
- Eckert, Paul: Freundliche mündliche Mitteilung, 1997.
- Edel, H.-G.; Weber, W. (1995): Kontaminationen durch petrochemische Produkte.- *TerraTech* 3/95: 65-68.
- Eganhouse, R. P.; Dorsey, T. F.; Phinney, C. S.; Westcott, A. M. (1996): Processes affecting the fate of monoaromatic hydrocarbons in an aquifer contaminated by crude oil.- *Environmental Science & Technology*, 30: 3304-3312.
- Fowler, M.G., Brooks, P.W., Northcott, M., King, M.W.G., Barker, J.F., and Snowdon, L.R., 1995. Preliminary results from a field experiment investigating the fate of some creosote components in a natural aquifer. *Organic Geochemistry*, Vol. 22, No. 3-5: 641-49.
- Franzius, V. (1994): Kosten und Finanzierungsbedarf der Altlastensanierung in den neuen Bundesländern.- in: Zimmermann, H. (Hrsg.): Altlastensanierung: Grundsatzfragen und Umsetzung in den neuen Bundesländern.- *Zeitschrift für angewandte Umweltforschung, Sonderheft 5*: 21-35.
- Freeberg, K. M.; Bedient, P. B.; Connor, J. A. (1987): Modeling of TCE contamination and recovery in a shallow sand aquifer.- *Ground Water*, 25 (1): 70-80.
- Friebele, E. (1997): Earth: Heal thyself.- *EOS Transactions, American Geophysical Union*, 20 May 1997, Washington, USA, S. 207.
- Gersberg, R.M.; Carroquino, M.J.; Fischer, D.E.; Dawsey, J. (1995): Biomonitoring of toxicity reduction during in-situ bioremediation of monoaromatic compounds in ground water.- *Water Research*: 29(2), 545-50.
- Ghoshal, S.; Luthy, R.G. (1996): Bioavailability of hydrophobic organic compounds from nonaqueous phase liquids: the biodegradation of naphthalene from coal tar.- *Environmental Toxicology And Chemistry*, 15(11): 1894-1900.

- Gidarakos, E. (1997): Bodensanierung durch natürliche Abbauvorgänge.- TerraTech, 3: 18.
- Glass, D.J.; Raphael, T.; Valo, R.; Van Eyk, J. (1995): International activities in bioremediation: Growing markets and opportunities.- in: Hinchee, R.E.; Wilson, J.T.; Downey, D.C. Columbus (Hrsg.): 3. International In Situ and On-Site Bioreclamation Symposium, San Diego, Ca/USA, 1995, 24.-27.Apr, Battelle Press. Oh, USA 1995, Bd 3(6): 11-33.
- Görtz, W. (1996): Decontamination of abandoned hazardous sites in the city of Düsseldorf.- In: Proceedings Ground Water and Subsurface Remediation: Research Strategies for In-Situ Technologies, Kobus, H., Barczewski B., Koschitzky, H.-P. (Hrsg.), Stuttgart, Germany, September 24-25, 1995, S. 299-310, Springer-Verlag (Berlin, Heidelberg).
- Goßel, W.; Püttmann, W. (1991): Untersuchungen zum mikrobiologischen Abbau von Kohlenwasserstoffen im Grundwasserkontaktbereich.- GWF (Das Gas- und Wasserfach) Wasser - Abwasser, Bd 132(3) S. 126-131.
- Grabe, J. (1997): Sicherung des ehemaligen Werksgeländes der Firam C.H. Boehringer Sohn in Hamburg.- Altlasten Spektrum 2/97: 59-69.
- Grathwohl, P. (1997): Auswirkung der Lösungs- und Desorptionskinetik auf die Bioverfügbarkeit organischer Schadstoffe.- in: Knorr, C.; von Schell T. (Hrsg.): Mikrobieller Schadstoffabbau - Ein interdisziplinärer Ansatz.- Vieweg&Sohn, Braunschweig, S. 15-33.
- Graves, D.A.; Lang, C.A.; Rightmyer, J.N. (1994): Biodegradation of bis(2-ethylhexyl)phthalate, ethylbenzene, and xylenes in groundwater: treatability study supporting in situ aquifer bioremediation.- Applied Biotechnology for Site Remediation, [Pap. Int. Symp. In Situ On-Site Bioreclam.], 2nd (1994), Meeting Date 1993, 167-85. Editor(s): Hinchee, Robert E. Publisher: Lewis, Boca Raton, Fla.
- Gunderson, Michael J.; Breton, Nelson M.; Pesce, Edward L.; Hammons, R. Wayne (1995): Use of field screening to delineate a low-level groundwater plume of ethylene dibromide.- Hazardous and Industrial Wastes, 27th, 722-730.
- Hagendorf, U.; Leschber, R.; Milde, R.; Nerger, M. (1986): Erkennung, Ortung und Bewertung von Untergrundkontaminationen durch leichtflüchtige Chlorkohlenwasserstoffe.- WaBoLu-Hefte 7/1986, 46 S., Institut für Wasser-, Boden- und Lufthygiene des Bundesgesundheitsamtes, Berlin.
- Happel, A.M.; Beckenbach, E.; Savalin, L.; Temko, H.; Rempel, R.; Doohar, B.; Rice, D. (1996): Analysis of dissolved benzene plumes and methyl-tertiary-butyl-ether (MTBE) plumes in ground water at leaking underground fuel tank sites.- unveröffentlichter Bericht Lawrence Livermore National Laboratory, University of California.
- Harvey, R.W.; Barber, L.B. (1992): Association of free-living bacteria and dissolved organic compounds in a plume of contaminated groundwater.- Journal of Contaminant Hydrology, 9: 91-103.
- Held, T. (1996a): No-action-Variante - Selbstreinigungskraft der Natur nutzen.- Altlasten Spektrum 4/96: 176-179.
- Held, T. (1996b): Natürlicher und forcierter mikrobieller in situ-Abbau von CKW am Beispiel der Fallstudie Pintsch, Hanau.- Altlasten Spektrum 6/96: 257-265.
- Held, T. (1996b): Natürlicher und forcierter mikrobieller in situ-Abbau von CKW am Beispiel der Fallstudie Pintsch, Hanau.- Altlasten Spektrum 6/96: 257-265.

- Hernon, G.; Bjerg, P.L.; Christensen, T.H. (1995): Redox buffering in shallow aquifers contaminated by leachate.- in: Hinchee, R.E.; Wilson, J.T.; Downey, D.C. Columbus (Hrsg.): 3. International In Situ and On-Site Bioreclamation Symposium, San Diego, Ca/USA, 1995, 24.-27.Apr, Battelle Press. Oh, USA 1995, Bd 3(1): 143-151.
- Herrington, R.T.; Benson, L.; Downey, D. (1997): Validation of fuel hydrocarbon attenuation in low temperature ground water environments.- in: Alleman, B.C.; Leeson, A. (Hrsg.), 4. International In Situ and On-Site Bioremediation Symposium, New Orleans, La/USA, 1997, 28.Apr. - 1 May, Battelle Press. Oh, USA 1997, Bd 1: 303-308.
- Hess, A.; Hoehener, P.; Hunkeler, D.; Zeyer, J. (1996): Bioremediation of a diesel fuel contaminated aquifer:simulation studies in laboratory aquifer columns.- *Journal of Contaminant Hydrology*, 23(4): 329-345.
- Hewitt, A.D.; Shoop, S.A. (1994): Rapid assessment of trichloroethylene in ground water.- *Ground Water Monitoring Review*, 14 (3): 116-122.
- Hinchee, R.E.; Reisinger, H.J. (1987): A practical application of multiphase transport theory to ground water contamination problems.- *Ground Water Monitoring Review*, 7 (1): 84-92.
- Hoffmann, K. (1993): Gefährdungsabschätzung und Sanierungskonzeptionen für PAK-kontaminierte Böden.- *Altlasten Spektrum* 2/93: 93-99.
- Höhener, P., D. Hunkeler, A. Hess, T. Bregnard, A. Höner und J. Zeyer, 1997. Biologische In-situ-Sanierung eines Dieselöl-kontaminierten Grundwasserleiters: Feldstudie und Laboratoriumsexperimente. *TerraTech* 3/97: 46-49.
- Holm, J.V.; Rügge, K.; Bjerg, P.L.; Christensen, T.H. (1995): Occurrence and distribution of pharmaceutical organic compounds in the groundwater downgradient of a landfill (Grindsted, Denmark).- *Environmental Science & Technology*, 29: 1415-1420.
- Hooker, B.S.; Skeen, R.S. (1996): Intrinsic bioremediation: an environmental restoration technology.- *Current Opinion in Biotechnology*, 7(3), 317-320.
- Hopkins, Gary D.; Munakata, Junko; Semprini, Lewis; McCarty, Perry L. (1993): Trichloroethylene concentration effects on pilot field-scale in.situ ground water bioremediation by phenol-oxidizing microorganism.- *Environmental Science and Technology*, 27(12), 2542-2547.
- Hötzl, H.; Nagold, M.; Xiang, W.; Bock, P (1990): CKW-Sanierung - Erfahrungen über einen Schadensfall in Festgesteinen.- In: Czurda, K.; Hötzl, H. (Hrsg.): *Untergrundsanie rung mittels Bodenluftabsaugung und In-Situ-Strippen.- Schriftenreihe Angewandte Geologie Karlsruhe (AGK), 9: 175-186, Karlsruhe.*
- Hunt, M.J.; Barlaz, M.A.; Borden, R.C. (1994): Rate and extent of natural anaerobic bioremediation of BTEX compounds in groundwater plumes. *Proceedings Annual Meeting - Air Waste Management Association (1994), 87th (Vol. 14A, Contaminated Site Remediation Technologies), Seite 1-11.*
- Hutchins, S.R.; Sewell, G.W.; Kovacs, D.A.; Smith, G.A. (1991): Biodegradation of Aromatic Hydrocarbons by Aquifer Microorganisms under Denitrifying Conditions.- *Environmental Science and Technology*, 25(1): 68-76.
- Hutchins, S.R.; Wilson, J.T.; Kampbell, D.H. (1995): In-situ bioremediation of a pipeline spill using nitrate as the electron acceptor.- in: Hinchee, R.E.; Wilson, J.T.; Downey, D.C. Columbus (Hrsg.): 3. International In Situ and On-Site Bioreclamation Symposium, San Diego, Ca/USA, 1995, 24.-27.Apr, Battelle Press. Oh, USA 1995, Bd 3(6): 143-153.

- IMES (1996): Machbarkeitsstudie - Funnel-And-Gate am Standort Gaswerk-Ost in Karlsruhe.- unveröffentlichtes Gutachten Fa. I.M.E.S..
- Jaervinen, K.T.; Puhakka, J.A. (1994): Bioremediation of chlorophenol contaminated ground water.- Environmental technology (GBR), Band 15, Heft 9, Seite 823 - 832.
- Johansen, S.S.; Hansen, A.B.; Mosbak, H.; Arvin, E. (1997): Identification of heteroaromatic and other organic compounds in ground water at creosote-contaminated sites in Denmark.- Ground Water Monitoring and Remediation, 17 (2): 106-115.
- Johnson R. L.; Brillante S. M.; Isabelle L. M.; Houck J. E.; Pankow J. F. (1985): Migration of chlorophenolic compounds at the chemical waste disposal site at Alkali Lake Oregon; 2, Contaminant distributions, transport, and retardation.- Ground Water, 23 (5): 652-666.
- Johnson, J.A.; Chin, A.S.; Germond, B.; Dean, W.T. (1997): Heterogeneous degradation within a dissolved chlorinated solvent plume.- in: Alleman, B.C.; Leeson, A. (Hrsg.), 4. International In Situ and On-Site Bioremediation Symposium, New Orleans, La/USA, 1997, 28.Apr. - 1 May, Battelle Press. Oh, USA 1997, Bd 3: 161-166.
- Johnson, V.M.; Rogers, L.L. (1995): Location analysis in ground water remediation using neural networks.- Ground Water, 33 (5): 749-755.
- Johnston, J.J.; Borden, R.C.; Barlaz, M.A. (1996): Anaerobic biodegradation of alkylbenzenes and trichloroethylene in aquifer sediment down gradient of a sanitary landfill.- Journal of Contaminant Hydrology(1996), 23(4), 263-283.
- Kaminsky, J.F.; Wylie, A.H. (1995): Vertical contaminant profiling of volatile organics in a deep fractured basalt aquifer.- Ground Water Monitoring Review, 15 (2): 97-103.
- Kampbell, D. H.; Wiedemeier, T. H.; Hansen, J. E. (1996): Intrinsic bioremediation of fuel contamination in ground water at a field site.- Report (1996), EPA/600/A-95/141; Order No. PB96-139084GAR, 11 pp. Avail.: NTIS Gov. Rep. Announce. Index (U. S.) Abstr. No. 08-01,195; ISSN: 0097-9007.
- Kauffmann, C.; Kinzelbach, W. (1992): Modellierung des regionalen Transports von chlorierten Kohlenwasserstoffen: Fallbeispiel Lobdengau.- In: Kobus, H. (Hrsg.): Schadstoffe im Grundwasser - Band 1, Wärme- und Schadstofftransport im Grundwasser.- Deutsche Forschung Gemeinschaft (DFG-Forschungsbericht): 377-411, Weinheim (VCH).
- King, M.W.G., Maude, J.M., Barker, J.F., and Malcolmson, H., 1996. A field experiment of creosote transport and degradation in groundwater. MGP Technical Meeting and Seminar, Gentofte, Denmark, October 6, 1996.
- Klecka, G. M.; Davis, J. W.; Gray, D. R.; Madsen, S. S. (1990): Natural bioremediation of organic contaminants in ground water; Cliffs-Dow superfund site.- Ground Water, 28 (4): 534-543.
- Knackmuss, H.-J. (1996): Basic knowledge and perspectives on biodegradation of xenobiotic compounds in soil.- In: Proceedings Ground Water and Subsurface Remediation: Research Strategies for In-Situ Technologies, Kobus, H., Barczewski B., Koschitzky, H.-P. (Hrsg.), Stuttgart, Germany, September 24-25, 1995, S. 51-65, Springer-Verlag (Berlin, Heidelberg).
- Kovalick, W.W.; Steimle, R. (1996): Public and private initiatives to develop ground water remediation technologies in the U.S.- In: Proceedings Ground Water and Subsurface Remediation: Research Strategies for In-Situ Technologies, Kobus, H., Barczewski B., Koschitzky, H.-P. (Hrsg.), Stuttgart, Germany, September 24-25, 1995, S. 289-297, Springer-Verlag (Berlin, Heidelberg).

- Kreysa, G.; Wiesner, J. (1997): Möglichkeiten und Grenzen des Reinigungskontaminierter Grundwässer.- Resümee und Beiträge des 12. DECHEMA-Fachgesprächs Umweltschutz, Frankfurt a.M., 892 S.
- Kueper, B.H., Feenstra, S., Rivett, M.O., and Cherry, J.A. (1992): A series of controlled field experiments to study DNAPL behaviour: Implications for site remediation. HazMat International Conference on Hazardous Materials and Environmental Management, Atlantic City, New Jersey, June 10-12, 1992, pp. 1-17.
- Lahvis, M. A.; Baehr, A. L. (1996): Estimation of rates of aerobic hydrocarbon biodegradation by simulation of gas transport in the unsaturated zone.- *Water Resources Research*, 32 (7): 2231-2249.
- Lesage, S.; Jackson, R.E.; Priddle, M.W.; Riemann, P.G. (1990): Occurrence and fate of organic residues in anoxic groundwater at the Gloucester Landfill, Canada.- *Environmental Science & Technology*, 24 (4): 559-566.
- Ludvigsen, L.; Herson, G.; Albrechtsen H.J.; Christensen, T.H. (1995): Geomicrobial and geochemical redox processes in a landfill-polluted aquifer.- in: Hinchee, R.E.; Wilson, J.T.; Downey, D.C. Columbus (Hrsg.): 3. International In Situ and On-Site Bioreclamation Symposium, San Diego, Ca/USA, 1995, 24.-27.Apr, Battelle Press. Oh, USA 1995, Bd 3(1): 135-141.
- Lyngkilde, J.; Christensen, T. H. (1992b): Fate of organic contaminants in the redox zones of a landfill leachate pollution plume (Vejen, Denmark).- *Journal of Contaminant Hydrology*, 10 (4): 291-307.
- Macalady, D.L.; Tratnyek, P.G.; Grundl, T.J. (1986): Abiotic reductions of anthropogenic organic chemicals in anaerobic systems: A critical review.- *Journal of Contaminant Hydrology*, 1: 1-28.
- Mace, R.E.; Fisher, R.S.; Welch, D.M.; Parra, S.P. (1997): Extent, Mass, and Duration of Hydrocarbon Plumes from Leaking Petroleum Storage Tank Sites in Texas.- *Geological Circular 97-1*, University of Texas, Austin, Bureau of Economic Geology, 51 Seiten.
- MacIntyre, W.G.; Boggs, M.; Antworth, C.P.; Stauffer, T.B. (1993): Degradation kinetics of aromatic organic solutes introduced into a heterogeneous aquifer.- *Water Resources*, 29(12): 4045-4051.
- Mackay, D.M.; Cherry, J.A. (1989): Groundwater contamination: Pump-and-treat remediation.- *Environmental Science & Technology*, 23 (6): 630-636.
- Mackenbrock, U.; Kopp-Holtwiesche, B.; Blank, W. (1994): Zur biologischen Abbaubarkeit von Industriechemikalien.- *TerraTech 4/94*: 41-51.
- Madsen, E. L.; Mann, C. L.; Bilotta, S. E. (1996): Oxygen limitations and aging as explanations for the field persistence of naphthalene in coal tar contaminated surface sediments.- *Environmental Toxicology and Chemistry*, 15 (11): 1876-1882.
- Maheux, P.J.; McKee, R.C.E. (1997): An in-situ air sparging method: Contiguous belled sand columns.- in: Alleman, B.C.; Leeson, A. (Hrsg.), 4. International In Situ and On-Site Bioremediation Symposium, New Orleans, La/USA, 1997, 28.Apr. - 1 May, Battelle Press. Oh, USA 1997, Bd 1: 221-226.
- Major, D.; Cox, E.; Edwards, E.; Hare, P. (1995): Intrinsic dechlorination of trichloroethene to ethene in a bedrock aquifer.- in: Hinchee, R.E.; Wilson, J.T.; Downey, D.C. Columbus (Hrsg.): 3. International In Situ and On-Site Bioreclamation Symposium, San Diego, Ca/USA, 1995, 24.-27.Apr, Battelle Press. Oh, USA 1995, Bd 3(1): 197-203.

- Marquis, S.A. Jr.; Dineen, D. (1994): Comparison between pump-and-treat, bioremediation and bioremediation/pump-and-treat combined: Lessons from computer modeling.- *Ground Water Monitoring Review*, 14 (2): 105-119.
- Marrin, D.L.; Thompson, G.M. (1987): Gaseous behaviour of TCE overlying a contaminated Aquifer.- *Ground Water*, 25 (1): 21-27.
- Martin-Hayden, J.M.; Robbins, G.A.; Bristol, R.D. (1991): Mass balance evaluation of monitoring well purging, Part II: Field tests at a gasoline contaminations site.- *Journal of Contaminant Hydrology*, 8 (3/4): 225-241.
- McAllister, P.M.; Chiang, C.Y. (1994): A practical approach to evaluating natural attenuation of contaminants.- *Ground Water Monitoring Review*, 14 (2): 161-173.
- McBride, M. (1990): Investigating a groundwater solute plume in three dimensions.- *Journal of Hazardous Materials*, 25(3): 361-374.
- Meiri, D.; Ghiasi, M.; Patterson, R.J.; Ramanujam, N.; Tyson, M.P. (1990): Extraction of TCE-contaminated ground water by subsurface drains and a pumping well.- *Ground Water*, 28 (1): 17-24.
- Michalski, A.; Metlitz, M.N.; Whitman, I.L. (1995): A field study of enhanced recovery of DNAPL pooled below the water table.- *Ground Water Monitoring Review*, 15 (1): 90-100.
- Ministerium für Ernährung, Umwelt und Forsten, Baden-Württemberg, Wasserwirtschaftsverwaltung (1983): Leitfaden für die Beurteilung und Behandlung von Grundwasserverunreinigungen durch leichtflüchtige Chlorkohlenwasserstoffe.- *Schriftenreihe CKW-Leitfaden*, Heft 13.
- Moutoux, D.E.; Benson, L.A.; Hicks, J.R.; Wiedemeier, T.H.; Swanson, M.A.; Wilson, J.T.; Campbell, D.H.; Hansen, J.E. (1997): Patterns of reductive dehalogenation of dissolved chlorinated hydrocarbon plumes.- in: Alleman, B.C.; Leeson, A. (Hrsg.), 4. International In Situ and On-Site Bioremediation Symposium, New Orleans, La/USA, 1997, 28.Apr. - 1 May, Battelle Press. Oh, USA 1997, Bd 3: 191-196.
- Naber, S.; Buxton, B.; McMillan, N.; Soares, A. (1997): Stastical methods for assessing the effectiveness of intrinsic remediation.- in: Alleman, B.C.; Leeson, A. (Hrsg.), 4. International In Situ and On-Site Bioremediation Symposium, New Orleans, La/USA, 1997, 28.Apr. - 1 May, Battelle Press. Oh, USA 1997, Bd 5: 349-354.
- Nyer, E.; Boettcher, G.; Morelle, B. (1991): Using the properties of organic compounds to help design a treatment system.- *Ground Water Monitoring Review*, 11 (4): 81-87.
- Nyer, E.K.; Duffin, M.E. (1997): The state of art of bioremediation.- *Ground Water Monitoring and Remediation*, 17 (2): 64-69.
- Nyer, E.K.; Kramer, V.; Valkenburg, N. (1991): Biochemical effects on contaminant fate and transport.- *Ground Water Monitoring Review*, 11 (2): 80-92.
- O'Connell, S.P.; Lehmann, R.M.; Watwood, M.E. (1997): Microbiological monitoring of contaminants in a fractured basalt aquifer.- in: Alleman, B.C.; Leeson, A. (Hrsg.), 4. International In Situ and On-Site Bioremediation Symposium, New Orleans, La/USA, 1997, 28.Apr. - 1 May, Battelle Press. Oh, USA 1997, Bd 4: 111-116.
- Odenchantz, J.E.; Farr, J.M.; Robinson, C.E. (1992): Transport model parameter sensitivity for soil cleanup level determinations using SESOIL and AT123D in the context of the California Leaking Underground Fuel Tank Field Manual.- *Journal of Soil Contamination*, 1(2): 159-182.

- O'Leary, K., Barker, J., and Gillham, R.W., 1993. Surface application of dissolved BTEX: A prototype field experiment. Proceedings, Conference on Petroleum Hydrocarbons and Organic Chemicals in Groundwater, Houston, Texas, November 10-12, 1993, pp. 149-160.
- O'Leary, K.E., Barker, J.F., and Gillham, R.W., 1995. Remediation of dissolved BTEX through surface application: A prototype field investigation.- *Ground Water Monitoring Review*, 15 (4): 99-109.
- Ostendorf, D. W.; Richards, R. J.; Beck, F. P. (1993): LNAPL retention in sandy soil.- *Ground Water*, 31 (2): 285-290.
- Pankow, J. F.; Johnson, R. L.; Hewetson, J.P.; Cherry, J. A. (1986): An evaluation of contaminant migration patterns at two waste disposal sites on fractured porous media in terms of the equivalent porous medium (EPM) model.- *Journal of Contaminant Hydrology*, 1: 65-76.
- Pardieck, D.L.; Bouwer, E.J.; Stone, A.T. (1992): Hydrogen Peroxide Use to Increase Oxidant Capacity for In Situ Bioremediation of Contaminated Soils and Aquifers: A Review.- *Journal of Contaminant Hydrology*, 9(3): 221-242.
- Paul Eckert, freundliche mündliche Mitteilung, Stadtwerke Düsseldorf AG.
- Piotrowski, M. R. (1991): U.S. EPA-approved, full-scale biological treatment for remediation of a Superfund site in Montana.- *Hydrocarbon Contaminated Soils*, 1, 433-457.
- Plumb, R.H. Jr. (1987): A comparison of ground water monitoring data from CERCLA and RCRA sites.- *Ground Water Monitoring Review*, 7 (4): 94-100.
- Priddle, M.W.; Jackson, R.E. (1991): Laboratory column measurement of VOC retardation factors and comparison with field values.- *Ground Water*, 29 (2): 260-267.
- Raphael, T.; Glass, D.J. (1995): Bioremediation in Germany: Markets, technologies, and leading companies.- in: Hinchee, R.E.; Wilson, J.T.; Downey, D.C. Columbus (Hrsg.): 3. International In Situ and On-Site Bioreclamation Symposium, San Diego, Ca/USA, 1995, 24.-27.Apr, Battelle Press. Oh, USA 1995, Bd 3(6): 35-45.
- Reineke, W.; Schlömann, M. (1997): Grundlegende Aspekte des bakteriellen Abbaus von Chloraromaten.- in: Knorr, C.; von Schell T. (Hrsg.): Mikrobieller Schadstoffabbau - Ein interdisziplinärer Ansatz.- Vieweg&Sohn, Braunschweig, S. 91-117.
- Reinhard, M.; Goodman, N.L.; Barker, J.F. (1984): Occurrence and distribution of organic chemicals in two landfill leachate plumes.- *Environmental Science & Technology*, 18: 953-961.
- Reinhardt, M.; Shang, S.; Kitanidis, P.K.; Orwin, E.; Hopkins, G.D.; Lebron, C.A. (1997): In-situ BTEX Biotransformation under enhanced nitrate- and sulfate-reducing conditions.- *Environmental Science & Technology*, 31 (1): 28-36.
- Rice, D.W.; Dooher, B.P.; Cullen, S.J.; Everett, L.G.; Kastenber, W.E.; Grose, R.D.; Marino, M.A. (1995b): Recommendations to improve the cleanup process for California's Leaking Underground Fuel Tanks (LUFTs).- Lawrence Livermore National Laboratory (LLNL), Environmental Protection Department/Environmental Restoration Division, Report submitted to the California State Water Resources Control Board and the Senate Bill 1764 Leaking Underground Fuel Tank Advisory Committee (UCRL-AR-121762; Oktober 16, 1995), Kalifornien, USA.

- Rice, D.W.; Grose, R.D.; Michaelsen, J.C.; Dooher, B.P.; MacQueen, D.H.; Cullen, S.J.; Kastenber, W.E.; Everett, L.G.; Marino, M.A. (1995a): California Leaking Underground Fuel Tank (LUFT) historical case analyses.- Lawrence Livermore National Laboratory (LLNL), Environmental Protection Department/Environmental Restoration Division, Report submitted to the California State Water Resources Control Board Underground Storage Tank Program and the Senate Bill 1764 Leaking Underground Fuel Tank Advisory Committee (UCRL-AR-122207; November 16, 1995), Kalifornien, USA.
- Rietzler, J (1990): Transport von stark belasteten Sickerwässern durch eine tonige Sohldichtung.- Z. dt. geol. Ges.; 141 (Teil 2): 263-269, Stuttgart (Enke).
- Rifai, H.S.; Borden, R.C.; Wilson, J.T.; Ward, C.H. (1995a): Intrinsic bioattenuation for subsurface restoration.- in: Hinchee, R.E.; Wilson, J.T.; Downey, D.C. Columbus (Hrsg.): 3. International In Situ and On-Site Bioreclamation Symposium, San Diego, Ca/USA, 1995, 24.-27. Apr, Battelle Press. Oh, USA 1995, Bd 3(1): 1-29.
- Rifai, H.S.; Newell, C.J.; Miller, R.N.; Taffinder, S.; Rounsaville, M. (1995b): Simulation of natural attenuation with multiple electron acceptors.- in: Hinchee, R.E.; Wilson, J.T.; Downey, D.C. Columbus (Hrsg.): 3. International In Situ and On-Site Bioreclamation Symposium, San Diego, Ca/USA, 1995, 24.-27. Apr, Battelle Press. Oh, USA 1995, Bd 3(1): 53-58.
- Risner, A.C. (1995): Investigation and monitoring of a petroleum hydrocarbon plume in the Blue Ridge Physiographic Province of Southwestern Virginia.- Hazardous and Industrial Wastes, 27th, 700-711.
- Rivett, M.O., Feenstra, S., and Cherry, J.A., 1992. Pump-and-treat remediation of a chlorinated solvent plume: A field study. 3rd International Conference on Ground Water Quality Research, Subsurface Restoration Conference, Dallas, Texas, June 21-24, 1992, pp. 257-259.
- Robbins, G.A.; Bristol, R.D.; Roe, V.D. (1989): A field screening method for gasoline contamination using a polyethylene bag sampling system.- Ground Water Monitoring Review, 9 (4): 87-97.
- Roberts, P.R.; Hopkins, G.D.; Mackay, D.M.; Semprini, L. (1990): A field evaluation of in-situ biodegradation of chlorinated ethenes: Part I, methodology and field site characterization.- Ground Water, 28 (4): 591-604.
- Roberts, P.V.; Goltz, M.N.; Mackay, D.M. (1986): A natural gradient experiment on solute transport in a sand aquifer - 3. Retardation estimates and mass balances for organic solutes.- Water Resources Research, 22(13): 2047-2058.
- Rogers, L. (1992): History matching to determine the retardation of PCE in ground water.- Ground Water, 30 (1): 50-60.
- Rügge, K.; Bjerg, P.L.; Christensen, T.H. (1995): Distribution of organic compounds from municipal solid waste in the groundwater downgradient of a landfill (Grindsted, Denmark). Environmental Science & Technology, 29: 1395-1400.
- Salanitro, J.P. (1993): The role of bioattenuation in the management of aromatic hydrocarbon plumes in aquifers.- Ground Water Monitoring Review, 13 (4): 150-161.
- Salanitro, J.P.; Dorn, P.B.; Huesemann, M.H.; Moore, K.O.; Rhodes, I.A.; Rice Jackson, L.M.; Vipond, T.E.; Western, M.M.; Wisniewski, H.L. (1997): Crude oil hydrocarbon bioremediation and soil ecotoxicity assessment.- Environmental Science & Technology, 31 (6): 1769-1776.
- Schiedek, T. (1996): Vorkommen und Verhalten von ausgewählten Phthalaten in Wasser und Boden.- Tübinger Geowissenschaftliche Arbeiten, Reihe C 33, 112 S., Tübingen.

- Schirmer, M.; Barker, J.F.; Hubbard, C.E. (1997): A study of the long-term attenuation of MTBE at the Boden Field Site, Ontario, Canada.- submitted for publication in Ground Water Monitoring And Remediation, May 1997.
- Schmitt R.; Langguth H.R.; Puttmann W.; Rohns H.P.; Eckert P.; Schubert J. (1996): Biodegradation of aromatic hydrocarbons under anoxic conditions in a shallow sand and gravel aquifer of the lower Rhine Valley, Germany.- *Organic Geochemistry*, 25 (1-2): 41-50, Great Britain (Elsevier).
- Schollenberger (1993): Beschaffenheit und Dynamik des Kiesgrundwassers im Neckartal bei Tübingen.- unveröffentlichter Abschlußbericht, Geologisches Institut Universität Tübingen.
- Schwarzenbach, R.; Gwend, P.; Imboden, D. (1993): *Environmental organic chemistry*.- Wiley & Sons, New York, USA, 861 S.
- Semprini, L.; Hopkins, G. D.; Roberts, P. V.; McCarty, P. L. (1992): Pilot scale field studies of in situ bioremediation of chlorinated solvents.- *Journal for Hazardous Material*, 32(2-3), 145-162.
- Severn, S.; Axelrod, R.; Stein, C. (1997): Natural attenuation as an effective solvent plume management strategy.- in: Alleman, B.C.; Leeson, A. (Hrsg.), 4. International In Situ and On-Site Bioremediation Symposium, New Orleans, La/USA, 1997, 28. Apr. - 1 May, Battelle Press. Oh, USA 1997, Bd 1: 111-116.
- Smyth, D.J.A., Byerley, B.T., Chapman, S.W., Wilson, R.D., Mackay, D. M. (1995): Oxygen-enhanced in situ biodegradation of petroleum hydrocarbons in groundwater using a passive interception system. Proceedings of 5th Annual Symposium on Groundwater & Soil Remediation, Toronto, Ontario, October 2-6, 1995, pp. ??.
- Sorge, H; Götzelmann, P.; Nallinger, M. (1994): Passives Adsorptionsverfahren zur Erkundung organischer Kontaminationen.- *Terratech*, 4: 26-28.
- Spayd, S. (1985): Movement of volatile organics through a fractured rock aquifer.- *Ground Water* , 23 (4): 496-502.
- Squillace, P. J.; Zogorski, J. S.; Wilber, W. G.; Price, C. V. (1996): Preliminary assessment of the occurrence and possible sources of MTBE in groundwater in the United States, 1993-1994.- *Environmental Science and Technology*, 30(5): 1721-1730.
- Squillace, P. J.; Zogorski, J. S.; Wilber, W. G.; Price, C. V. (1996): Preliminary assessment of the occurrence and possible sources of MTBE in groundwater in the United States, 1993-1994.- *Environmental Science & Technology*, 30 (5): 1721-1730.
- Sturman, P.J.; Cunningham, A.B.; Niehaus, S.L.; Wolfram, J.H. (1995a): Mass transport in physical and biological BTEX removal in a sandy aquifer.- in: Hinchee, R.E.; Wilson, J.T.; Downey, D.C. Columbus (Hrsg.): 3. International In Situ and On-Site Bioreclamation Symposium, San Diego, Ca/USA, 1995, 24.-27. Apr, Battelle Press. Oh, USA 1995, Bd 3(6): 461-466.
- Sturman, P.J.; Stewart, P.S.; Cunningham, A.B.; Bouwer, E.J.; Wolfram, J.H. (1995b): Engineering scale-up of in-situ bioremediation processes: A review.- *Journal of Contaminant Hydrology*, 19: 171-203.
- Taylor, T.W.; Serafini, M.C. (1988): Screened auger sampling: The technique and two case studies.- *Ground Water Monitoring Review*, 8 (3): 145-152.
- Testa, S. M.; Colligan, T. (1994): Cleaning up sites naturally: An often overlooked remedial alternative.- Proceedings of Petroleum hydrocarbons and organic chemicals in ground water; prevention, detection, and restoration; Ground Water Management. 1994; Pages 289-303. Water Well Journal Pub. Co.. Dublin, OH, United States.

- Thierrin, J.; Davis, G. B.; Barber, C. (1995): A ground water tracer test with deuterated compounds for monitoring in situ biodegradation and retention of aromatic hydrocarbons.- *Ground Water*, 33 (3): 469-475.
- Thierrin, J.; Davis, G.B.; Barber, C.; Patterson, B.M.; Pribac, F.; Power, T.R.; Lambert, M. (1993): Natural degradation rates of BTEX compounds and naphthalene in a sulphate reducing groundwater environment.- *Hydrological sciences journal (GBR)*, Band 38 (1993) Heft 4, Seite 309 - 322.
- Thorbjarnarson, K.W.; Mackay, D.M. (1997): A field test of tracer transport and organic contaminant elution in a stratified aquifer at the Rocky Mountain Arsenal (Denver, Colorado, USA).- *Journal of Contaminant Hydrology*, 24 (3/4): 287-312.
- Toussaint, B. (1987): Grundwasserverunreinigung durch leichtflüchtige chlorierte Kohlenwasserstoffe im Bereich Neu-Isenburg (Hessen).- *Deutsche Gewässerkundliche Mitteilungen : DGM 31, H.2/3*: 48-59, Bundesanstalt für Gewässerkunde, Koblenz.
- Toussaint, B. (1989): Die Kanalisation als Ursache von Grundwasserkontamination durch leichtflüchtige Halogenkohlenwasserstoffe - Beispiele aus Hessen.- *GWF (Das Gas- und Wasserfach) Wasser - Abwasser*, Bd 130(12) S. 299-311.
- Toussaint, B. (1991): Grundwasserkontamination durch leichtflüchtige halogenierte Kohlenwasserstoffe im hessischen Teil des Oberrheingrabens- Fallstudien.- *Deutsche Gewässerkundliche Mitteilungen : DGM 35, H.1*: 2-7, Bundesanstalt für Gewässerkunde, Koblenz.
- Toze, S.G.; Power, T.R.; Davis, G.B. (1995): Relating BTEX degradation to the biogeochemistry of an anaerobic aquifer.- in: Hinchee, R.E.; Wilson, J.T.; Downey, D.C. Columbus (Hrsg.): 3. International In Situ and On-Site Bioreclamation Symposium, San Diego, Ca/USA, 1995, 24.-27.Apr, Battelle Press. Oh, USA 1995, Bd 3(1): 117-125.
- Travis, C.C.; Doty, C.B. (1990): Can contaminated aquifers at Superfund sites be remediated?- *Environmental Science & Technology*, 24 (10): 1464-1466.
- Tschech, A.; Schwarzenbach, R. (1997): Chemische Reaktionen organischer Schadstoffe in der Umwelt.- in: Knorr, C.; von Schell T. (Hrsg.): *Mikrobieller Schadstoffabbau - Ein interdisziplinärer Ansatz*.- Vieweg&Sohn, Braunschweig, S. 52-78.
- Tulis, D.S. (1997): Issues Associated With Natural Attenuation.- unveröffentlichter Bericht, US Environmental Protection Agency, Juli 1997.
- Villaume, J.F. (1985): Investigations at sites contaminated with dense, non-aqueous phase liquids (NAPLs).- *Ground Water Monitoring Review*, 5 (2): 60-74.
- Vogel, T.M.; Criddle, C.S.; McCarty, P.L. (1987): Transformations of halogenated aliphatic compounds.- *Environmental Science and Technology*, 21(8): 722-736.
- Vroblesky, D. A.; Chapelle, F. H. (1994): Temporal and spatial changes of terminal electron-accepting processes in a petroleum hydrocarbon-contaminated aquifer and the significance for contaminant biodegradation.- *Water Resources Research*, 30 (5): 1561-1570.
- Werner, P. (1989): Experiences in the Use of Microorganisms in Soil and Aquifer Decontamination.- Contaminant Transport in Groundwater. Proceedings. Herausgeber/Bearbeiter: Kobus, H.E.; Kinzelbach, W. Rotterdam/NL; Brookfield, Vt/USA: Balkema, A.A. 1989. S. 59-63.
- Weiß, H.J. (Dissertation am Geologischen Institut Tübingen, in Vorbereitung).
- Westervelt, W.W.; Lawson, P.W.; Wallace, M.N.; Fosbrook, C. (1997): Intrinsic remediation of arctic diesel fuel near drinking water wells.- in: Alleman, B.C.; Leeson, A. (Hrsg.), 4. Interna-

- tional In Situ and On-Site Bioremediation Symposium, New Orleans, La/USA, 1997, 28. Apr. - 1 May, Battelle Press. Oh, USA 1997, Bd 1: 61-66.
- Wiedemeier, T.H.; Swanson, M.A.; Wilson, J.T.; Kampbell, D.H.; Miller, R.N.; Hansen, J.E. (1996): Approximation of biodegradation rate constants for monoaromatic hydrocarbons (BTEX) in ground water.- *Ground Water Monitoring Review*, 16 (3): 186-194.
- Wiedemeier, T.H.; Swanson, M.A.; Wilson, J.T.; Kampbell, D.H.; Miller, R.N.; Hansen, J.E. (1995): Patterns of intrinsic bioremediation at two U.S. Air Force Bases.- in: Hinchee, R.E.; Wilson, J.T.; Downey, D.C. Columbus (Hrsg.): 3. International In Situ and On-Site Bioreclamation Symposium, San Diego, Ca/USA, 1995, 24.-27. Apr, Battelle Press. Oh, USA 1995, Bd 3(1): 31-51.
- Wienberg, R. (1997): Nichtstun und beobachten - eine alternative Grundwasser-Sanierungstechnik?.- *Altlasten Spektrum*, 2: 55.
- Wilson, J.T.; Pfeffer, F.M.; Weaver, J.W.; Kampbell, D.H.; Wiedemeier, T.H.; Hansen, J.E.; Miller, R.N. (1994a): Intrinsic bioremediation of JP-4 jet fuel.- In: US Environmental Protection Agency: Proceedings of the EPA Symposium on Intrinsic Bioremediation of Ground Water, p. 189, EPA/540/R-94/515.
- Wilson, J.T.; Sewell, G.; Caron, D.; Doyle, G.; Miller, R.N. (1995): Intrinsic bioremediation of jet fuel contamination at George Air Force Base.- in: Hinchee, R.E.; Wilson, J.T.; Downey, D.C. Columbus (Hrsg.): 3. International In Situ and On-Site Bioreclamation Symposium, San Diego, Ca/USA, 1995, 24.-27. Apr, Battelle Press. Oh, USA 1995, Bd 3(1): 91-100.
- Wisotzky, F.; Eckert, P. (1997): Sulfat-dominiertes BTEX-Abbau im Grundwasser eines ehemaligen Gaswerkstandortes.- *Grundwasser*, 1(2): 11 - 20, Berlin (Springer).
- Yang, Y. Jeffrey; Spencer, Rick D.; Mersmann, Mark A.; Gates, Todd M. (1995): Ground-water contaminant plume differentiation and source determination using BTEX concentration ratios.- *Ground Water*, 33 (6): 927-935.

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Häufigkeit organischer Schadstoffe im Abstrom von Schadensfällen.....	5
Abbildung 2: Entwicklung von Schadstofffahnen im Grundwasser über die Zeit.....	6
Abbildung 3: Schadstofffahnenlängen, die in 75% der publizierten Fälle unterschritten wird....	16
Abbildung 4: Schadstofffahnenlängen, die durchschnittlich von 75% der publizierten Fälle erreicht wird	17

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Generelle Abbauwege von organischen Schadstoffen am Beispiel von Benzol	8
Tabelle 2: Ergebnisse der statistischen Auswertung.	15
Tabelle 3: Vergleich von Transportweiten der vorliegenden Arbeit mit anderen Studien.....	18
Tabelle 4: Natural Attenuation- Sanierungsprojekte in den USA	19