

## **Merkblatt Nr. 3.8/3**

**Stand: 30. Juni 2015**

**alte Nummer: 3.8/3 vom 05. Nov. 2004**

Ansprechpartner: Referat 96

# **Anhang 1: Natürliche Schadstoff- minderungsprozesse**

### **Inhaltsverzeichnis**

|          |                                                          |          |
|----------|----------------------------------------------------------|----------|
| <b>1</b> | <b>Einführung</b>                                        | <b>2</b> |
| <b>2</b> | <b>Mikrobieller Abbau</b>                                | <b>3</b> |
| <b>3</b> | <b>Abiotischer Abbau und physikochemische Zersetzung</b> | <b>4</b> |
| <b>4</b> | <b>Fällung</b>                                           | <b>4</b> |
| <b>5</b> | <b>Sorption</b>                                          | <b>4</b> |
| <b>6</b> | <b>Verflüchtigung</b>                                    | <b>4</b> |
| <b>7</b> | <b>Verdünnung</b>                                        | <b>5</b> |

## 1 Einführung

Die im Untergrund natürlich ablaufenden Prozesse zur Schadstoffminderung<sup>1</sup> umfassen laut Definition den biologischen Abbau (z. B. Mineralisierung, Humifizierung, reduktive Dechlorierung), die chemische Fällung, Zersetzungsvorgänge, Sorption, Verdünnung (Dispersion, Diffusion) und Verflüchtigung (Verdunstung, Sublimation). In den nachfolgenden Kapiteln werden hierzu die grundlegenden Aspekte kurz beschrieben.

In Tabelle 1 sind die dominierenden Prozesse für verschiedene Schadstoffgruppen in einer schematisierten Übersicht dargestellt. Die relevanten Prozesse hängen im Einzelfall insbesondere von den hydrogeologischen und hydrochemischen Standortbedingungen ab. Bei der Beurteilung von NA sind vor allem bei organischen Schadstoffen auch mögliche Metabolite sowie deren Toxizität und Mobilität zu berücksichtigen. Die nachfolgenden Ausführungen und Hinweise sind bezüglich der anorganischen Schadstoffe auf Arsen und Kupfer beschränkt, da hierzu durch die Umsetzung von MNA in Bayern sowie durch das Bayerische Forschungsverbundvorhaben "Nachhaltige Altlastenbewältigung unter Einbeziehung des natürlichen Reinigungsvermögens" (BayFoNR) Ergebnisse und Erfahrungen vorliegen. Weitere Schwer- und Halbmetalle können analog bearbeitet werden. Hierzu können auch Hilfestellungen aus dem KORA Themenverbund 6 (TU BERGAKADEMIE FREIBERG 2008) entnommen werden.

Tabelle 1: Relevanz fracht- bzw. konzentrationsmindernder Prozesse

| Prozess / Schadstoff | MKW                            | MKW                              | BTEX | LHKW     | PAK | NSO-HET | SM, HM |
|----------------------|--------------------------------|----------------------------------|------|----------|-----|---------|--------|
|                      | C <sub>5</sub> -C <sub>9</sub> | C <sub>10</sub> -C <sub>40</sub> |      |          |     |         |        |
| Mikrobieller Abbau   | ++                             | +                                | ++   | + bis ++ | +   | +       | o      |
| Sorption             | +                              | +                                | +    | o        | ++  | +       | ++     |
| Fällung              | o                              | o                                | o    | o        | o   | o       | ++     |
| Verflüchtigung       | +                              | o                                | +    | +        | o   | o       | o      |
| Verdünnung           | ++                             | +                                | ++   | ++       | +   | + / ++  | o / +  |

++ sehr relevanter Prozess;

+ relevanter Prozess;

o stark untergeordneter Prozess oder irrelevant

Das Zusammenspiel der o. g. Prozesse beeinflusst das Ausbreitungsverhalten von Schadstofffahnen im Grundwasser. Durch die Erkundung der Prozesse lässt sich der Zustand einer Fahne ermitteln sowie deren zukünftige Entwicklung prognostizieren. Je nach Ausmaß bzw. Wirksamkeit von NA und der Nachlieferung aus der Schadstoffquelle kann sich die Schadstofffahne im Grundwasser ausdehnen, stabil bzw. quasistationär sein oder zurückgehen.

Eine umfassende Zusammenstellung hinsichtlich Stoffverhalten und möglicher Prozesse der verschiedenen Schadstoffgruppen, findet sich in den branchenspezifischen Leitfäden des Förderschwerpunkts KORA des BMBF (WABELS ET AL. 2008, WERNER ET AL. 2008, GRANDEL ET AL. 2008, DRESDNER GRUNDWASSERFORSCHUNGSZENTRUM E.V. 2008a, JOOS ET AL. 2008, TU BERGAKADEMIE FREIBERG 2008).

<sup>1</sup> Während es sich bei biologischem Abbau und chemischer Zersetzung sowie bei chemischer Fällung und Sorption um Prozesse handelt, bei denen der Schadstoff in seinem Chemismus bzw. seinem Umweltverhalten verändert (gemindert) wird, verändert sich bei Verdünnung und Verflüchtigung nur die Konzentration des Schadstoffs, nicht jedoch die in der Umwelt vorhandene Menge (Fracht). Die Frachtreduktion soll bei der Schadstoffminderung überwiegen.

## 2 Mikrobieller Abbau

Wichtigster Prozess zur Schadstoffminderung bei Verunreinigungen durch organische Schadstoffe ist der mikrobielle Abbau, weil er zur tatsächlichen Reduktion des Primärschadstoffs im Untergrund führt. Zum mikrobiellen Abbau gibt es zahlreiche Arbeiten und Veröffentlichungen (z. B. UBA 2002, SÄCHSISCHES LANDESAMT FÜR UMWELT UND GEOLOGIE 2000, SCHLEGEL ET AL. 1992, WIEDEMEIER ET AL. 1999, LANDESANSTALT FÜR UMWELTSCHUTZ BADEN-WÜRTTEMBERG 1997, KERN ET AL. 2007). Nachfolgend werden nur einige wesentliche Aspekte dargestellt:

Sowohl in der ungesättigten als auch in der gesättigten Zone sind Mikroorganismen vorhanden, durch die organische Substanzen mikrobiell abgebaut werden können. Da Kohlenwasserstoffe und deren Derivate (z. B. MKW, BTEX, PAK und NSO-Heterocyclen) auch Produkte natürlicher Prozesse (z. B. Lagerstättenogenese, Waldbrände etc.) sind, haben Mikroorganismen Mechanismen entwickelt, sie für ihren Stoffwechsel zu nutzen.

Anthropogen verursachte Verunreinigungen führen oft zu großen Mengen und/oder hohen Konzentrationen an Schadstoffen. Häufig weisen solche Verunreinigungen im Vergleich zu natürlichen Quellen (z. B. KW-Lagerstätten) eine andere Zusammensetzung der Einzelstoffe auf und beinhalten ferner mehrere Schadstoffgruppen (SÄCHSISCHES LANDESAMT FÜR UMWELT UND GEOLOGIE 2000). Hohe Schadstoffkonzentrationen können trotz prinzipieller Abbaubarkeit toxisch auf Mikroorganismen wirken, so dass ein Abbau entweder verzögert nach Adaptation der Mikroflora oder nach Verdünnung der Stoffe durch das Grund-/Sickerwasser erfolgen kann.

Substanzen, die selbst nicht als Kohlenstoff- oder Energiequelle für das mikrobielle Wachstum verwertet werden, können zum Teil auch cometabolisch, d. h. unter Miteinbindung in andere Stoffwechselumsätze (z. B. Nutzung einer anderen Kohlenstoffquelle) abgebaut werden. Bei Verunreinigungen durch LHKW kann zusätzlich reduktive Dechlorierung stattfinden.

Der mikrobielle Abbau hängt nicht nur von der Art des Schadstoffs, sondern auch insbesondere von den Milieubedingungen ab. Dazu gehören die Verfügbarkeit von Nähr-, Mineral- und Ergänzungsstoffen, die Bioverfügbarkeit des Schadstoffs (insbesondere bei PAK und hoch siedenden MKW), die Resistenz des Schadstoffs gegen mikrobiellen Abbau sowie physikalisch-chemische Parameter wie die Temperatur, der pH-Wert, der mikrobiologisch verfügbare Wassergehalt und das vorherrschende Redoxpotenzial.

Im Grundwasser und Boden erfolgt der Schadstoffabbau meist nicht durch eine Einzelspezies sondern vielmehr durch Konsortien. Die Einzelorganismen stehen oft in wechselseitigen Beziehungen miteinander, um eine Abbauleistung erzielen zu können (UBA 2002). Der Stoffwechsel von Mikroorganismen ist so reguliert, dass eine möglichst effiziente Substratnutzung möglich ist. Das Vorliegen alternativer, vor allem leichter abbaubarer Substrate kann den Schadstoffabbau behindern (z. B. STUPP ET AL. 2001). Inhibitoren (z. B. zu hohe Schwermetallgehalte, toxische Abbauprodukte), ungünstige pH-Werte, hohe Salzgehalte o. ä. können den Stoffwechsel und das Wachstum von Mikroorganismen und damit auch den Schadstoffabbau hemmen. Schadstoffe können durch Mikroorganismen oxidiert werden und als Kohlenstoff- und Energiequelle dienen. Unter aeroben Bedingungen fungiert Sauerstoff als Elektronenakzeptor. Ist dieser verbraucht, werden Nitrat, Eisen- und Manganoxide und Sulfat reduziert. Wenn alle vorgenannten Elektronenakzeptoren erschöpft sind, findet der methanogene Schadstoffabbau statt, bei dem CO<sub>2</sub> und Methan entsteht (hier dienen die organischen Schadstoffe als Elektronenakzeptoren und -donatoren). Dieser sukzessive Verbrauch verschiedener Elektronenakzeptoren führt zur sogenannten, idealisiert dargestellten Redoxzonierung im Untergrund (Abbildung 1).

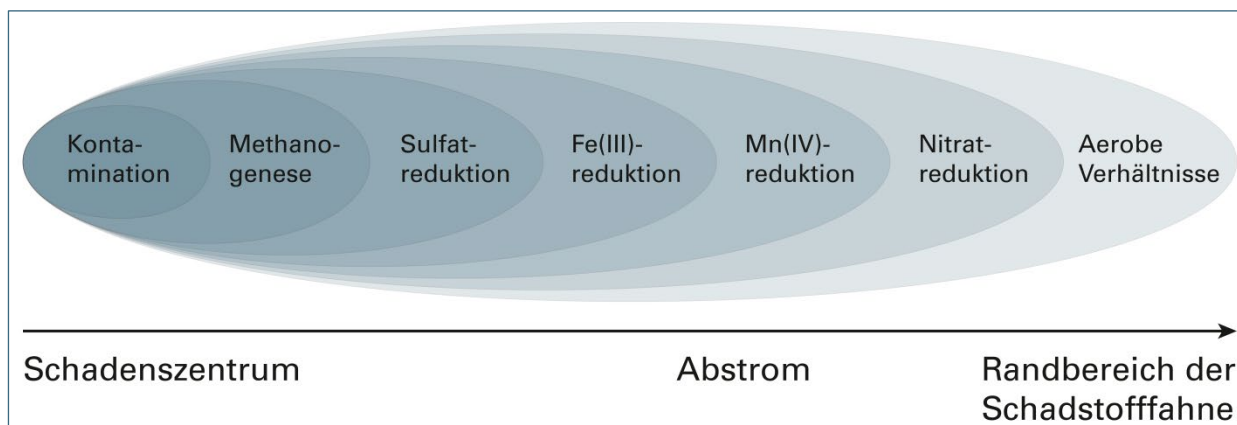


Abbildung 1: Idealierte Darstellung der Redoxzonierung

### 3 Abiotischer Abbau und physikochemische Zersetzung

Der abiotische Abbau, z. B. durch Photolyse, Hydrolyse, Oxidation oder Reduktion (z. B. Reduktion von LHKW an nullwertigem Eisen), spielt im natürlichen Aquifer eine untergeordnete Rolle (WIEDEMEIER ET AL. 1999).

### 4 Fällung

Bei Fällungsreaktionen werden gelöste Stoffe in eine gering lösliche oder unlösliche Form übergeführt. In Abhängigkeit von den Milieubedingungen ist dabei das Löslichkeitsprodukt der ausgefällten Verbindung maßgeblich. Dies geschieht durch Veränderung der die Gleichgewichtseinstellungen beeinflussenden Bedingungen (Temperatur, pH-Wert, Redoxverhältnisse, Ionenstärke).

Schwermetalle können durch Fällung in unlösliche bzw. wenig lösliche Verbindungen übergeführt werden (z. B. als schwerlösliches Sulfid in Sedimenten), bei Veränderungen der Milieubedingungen (z. B. pH-Wert-Erhöhung) können sie wieder in Lösung gehen. Bei den in diesem Merkblatt betrachteten organischen Schadstoffen spielen Fällungsprozesse im Untergrund keine Rolle.

### 5 Sorption

Sorption ist eine Sammelbezeichnung für alle Vorgänge, bei denen ein Stoff durch einen anderen, mit ihm in Berührung stehenden Stoff angereichert wird (z. B. Adsorption, Absorption) (siehe auch: BLUME ET AL. 2010, WIEDEMEIER ET AL. 1999, LANDESANSTALT FÜR UMWELTSCHUTZ BADEN-WÜRTTEMBERG 1997).

Bei der Adsorption werden Gase oder gelöste Stoffe an der Oberfläche von festen Stoffen angelagert und angereichert. Die Umkehr der Adsorption ist die Desorption, d. h. die Freisetzung eines sorbierten Stoffes von der Festphase und Überführung in die freie, z. B. flüssige Phase. Damit sind Sorptionsprozesse insbesondere unter dem Aspekt des Schadstoffrückhalts von Bedeutung.

### 6 Verflüchtigung

Die Verflüchtigung zählt zu den Prozessen, bei denen die Schadstoffe lediglich in ein anderes Umweltkompartiment verlagert werden. Die Verflüchtigung ist als allein wirkender Prozess nicht ausreichend für die Anwendung von MNA. Die Kenntnis der Verflüchtigung ist jedoch für eine Bilanzierung des Schadstoffverbleibs bei der Beurteilung eines Standortes hinsichtlich NA wichtig (WIEDEMEIER ET AL. 1999). Liegen flüchtige Stoffe im Untergrund vor, sind diese auch bei der Gefährdungsabschätzung für den Pfad Boden-Mensch zu berücksichtigen (siehe auch: LFU-MERKBLATT ALTLASTEN 2).

## 7 Verdünnung

Die hydrodynamische Dispersion bewirkt (bezogen auf eine definierte Betrachtungsebene im Grundwasserabstrom in hinreichendem Abstand zur Schadstoffquelle) eine Verdünnung der Schadstoffe im Grundwasser und führt zu einer Auffächerung der Schadstofffahne. Sie setzt sich aus den Einzelprozessen mechanische Dispersion und molekulare Diffusion zusammen. Dadurch nehmen die Schadstoffkonzentrationen unabhängig von eventuell vorhandenen Abbau- und Rückhalteprozessen entlang der Schadstofffahne ab, obwohl die Menge der Ausgangssubstanzen erhalten bleibt. Die Verdünnung ist somit als alleiniger Prozess für eine Gefahrenabwehr nicht ausreichend. Die Kenntnis der Verdünnung ist jedoch bei der Beurteilung eines Standorts hinsichtlich der Abschätzung des Transportverhaltens sowie für eine Bilanzierung des Schadstoffverbleibs wesentlich. Eine Quantifizierung der Verdünnung ist daher für die Ermittlung und Bewertung von schadstoffmindernden Prozessen erforderlich.

### Impressum:

#### Herausgeber:

Bayerisches Landesamt für Umwelt (LfU)  
Bürgermeister-Ulrich-Straße 160  
86179 Augsburg

Telefon: 0821 9071-0

Telefax: 0821 9071-5556

E-Mail: [poststelle@lfu.bayern.de](mailto:poststelle@lfu.bayern.de)

Internet: <http://www.lfu.bayern.de>

#### Postanschrift:

Bayerisches Landesamt für Umwelt  
86177 Augsburg

#### Bearbeitung:

Ref. 96 / Stefan Rüttinger

#### Bildnachweis:

LfU

#### Stand:

30. Juni 2015

