



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

**Stand: 09/2023**

**alte Nummer: 3.8/3 von 06/2015**

Ansprechpartner: Referat 96

# **Natürliche Schadstoffminderung bei Grundwasserverunreinigungen durch Altlasten und schädliche Bodenveränderungen**

Monitored Natural Attenuation (MNA)

### **Inhaltsverzeichnis**

<b>1</b>	<b>Allgemeine Hinweise</b>	<b>2</b>
1.1	Zielsetzungen und Inhalt	2
1.2	Qualitätssicherung	3
1.3	Begriffsbestimmungen	3
<b>2</b>	<b>Rahmenbedingungen für MNA</b>	<b>4</b>
2.1	Rechtliche Einordnung	4
2.2	Einbindung in die Einzelfallbearbeitung	4
2.3	Maßnahmenziel	5
2.4	Standortvoraussetzungen für die Umsetzung von MNA	6
2.5	Randbedingungen für nicht abbaubare Schadstoffe	6
<b>3</b>	<b>MNA-Konzept</b>	<b>7</b>
<b>4</b>	<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>11</b>
<b>Anhang 1: Natürliche Schadstoffminderungsprozesse</b>		<b>13</b>
<b>Anhang 2: MNA-Konzept (Phasen I bis IV)</b>		<b>20</b>
<b>Anhang 3: Methodische Hinweise</b>		<b>42</b>
<b>Anhang 4: Abkürzungsverzeichnis</b>		<b>55</b>

## 1 Allgemeine Hinweise

### 1.1 Zielsetzungen und Inhalt

Dieses Merkblatt gibt Hinweise für die Erkundung, Bewertung und Überwachung von im Untergrund stattfindenden Prozessen zur natürlichen Schadstoffminderung (Natural Attenuation – NA) bei Grundwasserverunreinigungen, die durch Emissionen aus Altlasten und schädlichen Bodenveränderungen hervorgerufen werden, sowie zur Einbindung dieser Prozesse in die Altlastenbearbeitung.

Das Gefahrenpotenzial von Schadstoffen bei Altlasten, schädlichen Bodenveränderungen und Grundwasserverunreinigungen hängt u. a. auch vom Umfang dieser natürlich ablaufenden Prozesse ab. Inwieweit sie die Schadstoffausbreitung verlangsamen können und unter günstigen Bedingungen zu einer Reduktion der Ausdehnung von Grundwasserverunreinigungen führen, ist im Einzelfall zu klären. Auf Basis einer ausreichenden Erkundung und Bewertung dieser Prozesse kann, insbesondere bei Vorliegen der Standortvoraussetzungen (Kap. 2.4) und günstiger Prognose des Schadstoffverhaltens in Verbindung mit der Überwachung der natürlichen Schadstoffminderung (Monitored Natural Attenuation – MNA), im Einzelfall von Sanierungsmaßnahmen abgesehen werden. Vor einer entsprechenden behördlichen Entscheidung für die Durchführung von MNA ist ein **MNA-Konzept** erforderlich (Kap. 3 und Anhang 2).

Das Merkblatt, bestehend aus einem Textteil und vier Anhängen, ergänzt die in Bayern zur Bearbeitung von Altlasten, schädlichen Bodenveränderungen und Grundwasserverunreinigungen eingeführten gesetzlichen Regelungen (Bayerisches Bodenschutzgesetz (BayBodSchG), Verwaltungsvorschrift zum Vollzug des Bodenschutz- und Altlastenrechts in Bayern (BayBodSchVwV), Bayerisches Wassergesetz (BayWG), Bundes-Bodenschutzgesetz (BBodSchG), Bundes-Bodenschutz- und Altlastenverordnung (BBodSchV)) und fachlichen Arbeitshilfen, insbesondere Merkblatt 3.8/1, Merkblatt 3.8/4, Merkblatt 3.8/5 und Merkblatt 3.8/6.

In den Kap. 1 und 2 werden Vorschläge zur Einbindung von NA in die Altlastenbearbeitung gegeben sowie die Rahmenbedingungen in rechtlicher und fachlicher Hinsicht beschrieben. Die phasenweise Durchführung der Erkundung, Bewertung und Überwachung schadstoffmindernder Prozesse ist in Kap. 3 ausgeführt. In Anhang 1 werden Grundlagen der im Untergrund stattfindenden Prozesse, deren Verständnis für die Beurteilung von NA wesentlich ist, dargestellt. Anhang 2 gibt Empfehlungen, wie nach derzeitigem Wissensstand, auf Schadstoffgruppen bezogen, durch praxisnahe Untersuchungen ein zielgerichtetes MNA-Konzept für die qualitative und quantitative Erfassung und Überwachung der Prozesse sowie zur Ermittlung der Prognose des zukünftigen Fahrenverhaltens erarbeitet werden kann. In Anhang 3 sind, tabellarisch nach Themen geordnet, Methoden und Untersuchungsverfahren aus Anhang 2 sowie ergänzend weitere typische NA-Untersuchungen zusammengestellt, die bei der Bearbeitung eines MNA-Konzepts nach derzeitigem Wissensstand geeignet erscheinen. Diese Aufstellung umfasst Untersuchungen und Methoden zur Erkundung der Schadstofffahne und -quelle, Beurteilungshilfen zum hydrochemischen Grundwassermilieu sowie Nachweismethoden zum mikrobiellen Abbau. Anhang 4 beinhaltet das Abkürzungsverzeichnis für alle Teile des Merkblatts.

Die in den Anhängen 2 und 3 aufgeführten Untersuchungen, Beurteilungshilfen, Hinweise zu rechnerischen Abschätzungsmöglichkeiten und fachlich-methodischen Empfehlungen basieren u. a. auf Vollzugserfahrungen, auf Erkenntnissen aus dem BMBF Förderschwerpunkt KORA („Kontrollierter natürlicher Rückhalt und Abbau von Schadstoffen bei der Sanierung kontaminierter Grundwässer und Böden“), auf dem LABO-Positionspapier „Berücksichtigung der natürlichen Schadstoffminderung bei der Altlastenbearbeitung“ (LABO 2015) sowie auch auf Ergebnissen und Erkenntnissen aus dem vom Bayerischen Arbeitskreis „Natürliches Reinigungsvermögen“ initiierten und fachlich begleiteten Bayerischen Forschungsverbundvorhaben „Nachhaltige Altlastenbewältigung unter Einbeziehung des natürlichen Reinigungsvermögens“ (BayFoNR, Hanauer et al. 2006; Marczinek et al. 2006; Prechtel et al. 2006; Rüttinger et al. 2006; Webert & Hauck 2006).

In Ergänzung zu diesem Merkblatt kann das LABO-Positionspapier „Berücksichtigung der natürlichen Schadstoffminderung bei der Altlastenbearbeitung“ (LABO 2015) herangezogen werden.

## 1.2 Qualitätssicherung

Sachverständige und Untersuchungsstellen, die Aufgaben nach dem BBodSchG wahrnehmen, müssen gemäß § 18 BBodSchG bestimmte Voraussetzungen erfüllen. Die entsprechende Zulassung nach der Verordnung über Sachverständige und Untersuchungsstellen für den Bodenschutz und die Altlastenbearbeitung in Bayern (VSU) erfolgt durch das Bayerische Landesamt für Umwelt (LfU). Nach § 18 BBodSchG zugelassene Sachverständige und Untersuchungsstellen sind auf der Internetseite [www.resymesa.de](http://www.resymesa.de) bekannt gegeben.

Im Rahmen der Amtsermittlung sind von den Wasserwirtschaftsämtern ausschließlich nach § 18 BBodSchG zugelassene Sachverständige und Untersuchungsstellen zu beauftragen.

Das LfU empfiehlt zur Gewährleistung einer hinreichenden Qualitätssicherung und damit eines effizienten und zügigen Verfahrens auch in den übrigen Verfahrensschritten (Detailuntersuchung, Sanierungsuntersuchung, Sanierungsplanung, Sanierung, Eigenkontrollmaßnahmen) nach § 18 BBodSchG zugelassene Sachverständige und Untersuchungsstellen zu beauftragen. Die zuständige Bodenschutzbehörde kann dies nach § 9 Abs. 2 Satz 2, § 13 Abs. 2 und § 15 Abs. 2 Satz 5 BBodSchG von der bzw. dem Pflichtigen verlangen.

Für die Erstellung, Bewertung und Durchführung eines MNA-Konzepts (Kap. 3 und Anhang 2) wird aus fachlicher Sicht grundsätzlich die Einschaltung eines Sachverständigen nach § 18 BBodSchG (Sachgebiete 2 und 5) für notwendig erachtet.

## 1.3 Begriffsbestimmungen

### Natürliche Schadstoffminderung (Natural Attenuation – NA)

Die Natürliche Schadstoffminderung ist das Ergebnis biologischer, chemischer und physikalischer Prozesse, die im Boden und Grundwasser ohne menschliches Eingreifen natürlich wirken und dort zur Reduktion der Masse, des Volumens, der Fracht, der Konzentration, der Toxizität oder der Mobilität eines Schadstoffs führen (§ 2 Nr. 17 BBodSchV).

Zu diesen schadstoffmindernden Prozessen zählen der biologische Abbau (Mineralisierung, Humifizierung, cometabolischer Abbau), Fällung, chemische Transformation, Sorption (Adsorption, Absorption), Verdünnung (Dispersion, Diffusion) und Verflüchtigung (Verdunstung, Sublimation). Weitere Erläuterungen hierzu finden sich in Anhang 1. Die vorgenannten Prozesse führen im Idealfall zur Festlegung, Zerstörung, Transformation bzw. Minderung von Schadstoffen. Die verdünnenden Prozesse dürfen im Verhältnis zu den frachtreduzierenden Prozessen nur untergeordnet an der Schadstoffminderung beteiligt sein. Eine auf Verdünnung bzw. Verflüchtigung basierende Konzentrationsabnahme von Schadstoffen stellt grundsätzlich keine akzeptable Gefahrenabwehr bzw. Schadensbeseitigung dar, da die Schadstofffracht nicht reduziert wird bzw. die Schadstoffe lediglich in andere Umweltkompartimente verlagert werden und sich dort weiter verbreiten können. Bei der Gesamtbetrachtung der Wirksamkeit (u. a. Schadstoffbilanzierung) von schadstoffmindernden Prozessen sind jedoch auch diese Vorgänge zu berücksichtigen. Die Ermittlung von NA entspricht damit einer Standortcharakterisierung und Prozessbeschreibung.

### Überwachung der natürlichen Schadstoffminderung (Monitored Natural Attenuation – MNA)

Unter der Überwachung der natürlichen Schadstoffminderung wird die dauerhafte Überwachung der zuvor eingehend untersuchten und charakterisierten schadstoffmindernden Prozesse bis zum Erreichen

des Maßnahmenziels (Kap. 2.3) verstanden. MNA dient damit der kontinuierlichen Überprüfung der prognostizierten Schadstoffminderung ohne dabei aktiv in das ablaufende Prozessgeschehen der Schadstoffminderung einzugreifen.

### **Enhanced Natural Attenuation (ENA)**

Bei Enhanced Natural Attenuation wird auf der Basis einer eingehenden Untersuchung und Charakterisierung von NA sowie der Gesamtsituation am Standort mit Hilfe von biologischen, chemischen und physikalischen technischen Verfahren aktiv in das Prozessgeschehen eingegriffen und die natürlichen Prozesse zur Schadstoffminderung aktiv unterstützt. Entsprechende Maßnahmen werden i. d. R. als in-situ-Sanierung bezeichnet (z. B. Initiierung oder Stimulation des aeroben Abbaus durch Einbringen von Sauerstoff und/oder Nährstoffen). Daher handelt es sich um in-situ-Sanierungsmaßnahmen im Sinne des § 2 Abs. 7 BBodSchG, die i. d. R. mit einer erlaubnispflichtigen Gewässerbenutzung nach § 9 Abs. 1 Nr. 4 u. Abs. 2 Nr. 2 Wasserhaushaltsgesetz (WHG) verbunden sind.

Spezielle Aspekte dieser Verfahrenstechnik werden im vorliegenden Merkblatt nicht weiter behandelt.

## **2 Rahmenbedingungen für MNA**

### **2.1 Rechtliche Einordnung**

Nach § 4 Abs. 3 BBodSchG sind schädliche Bodenveränderungen oder Altlasten sowie durch sie verursachte Verunreinigungen von Gewässern so zu sanieren, dass dauerhaft keine Gefahren, erhebliche Nachteile oder erhebliche Belästigungen für den Einzelnen oder die Allgemeinheit entstehen.

Im Sinne des § 2 Abs. 7 BBodSchG werden mit dem Sanierungsbegriff insbesondere technische Maßnahmen verknüpft, die ein aktives Handeln bedingen. NA umfasst dagegen im Untergrund selbstständig ablaufende natürliche Prozesse, die ohne äußere aktive Eingriffe zum Abbau oder Rückhalt von Schadstoffen führen. Damit entspricht die Ermittlung von NA einer Standortcharakterisierung (§ 13 BBodSchV) und stellt keine Gefahrenabwehrmaßnahme dar.

Auch bei MNA werden die Prozesse zur Schadstoffminderung im Untergrund nicht aktiv beeinflusst, sondern lediglich deren zeitliche und räumliche Wirksamkeit untersucht und überwacht.

### **2.2 Einbindung in die Einzelfallbearbeitung**

Die gesetzlich vorgegebene stufenweise Bearbeitung von Altlasten und schädlichen Bodenveränderungen bzw. der entsprechenden Verdachtsflächen und daraus resultierender Grundwasserverunreinigungen hat sich bewährt. Dieses stufenweise Vorgehen sollte unter Berücksichtigung der im Einzelfall vorliegenden Rahmenbedingungen auch bei der Einbeziehung von schadstoffmindernden Prozessen (NA) bzw. deren Umsetzung in ein MNA-Konzept beibehalten werden. Hierzu sind die grundsätzlichen Vorgaben im Merkblatt 3.8/1 insbesondere hinsichtlich der Bearbeitungsphasen Detailuntersuchung und Sanierungsuntersuchung zu berücksichtigen.

Die Aspekte der natürlichen Schadstoffminderung können prinzipiell in jeder Bearbeitungsstufe berücksichtigt werden. I. d. R. werden sie frühestens ab der Detailuntersuchung systematisch einbezogen. Sollten sich im Verlauf der Orientierenden Untersuchung jedoch Hinweise auf NA ergeben, so können diese Erkenntnisse in die Bewertung sowie in die Planung der nachfolgenden Bearbeitungsstufen einbezogen werden.

Für die abschließende Gefährdungsabschätzung und die Entscheidung über die Notwendigkeit von (Sanierungs-)Maßnahmen im Rahmen der Detailuntersuchung (siehe Merkblatt 3.8/1 Kap. 3) sind u. a. Art, Mobilität und Verhalten der Schadstoffe sowie der Schadensumfang zu ermitteln. Bei der Gefährdungsabschätzung kann die Berücksichtigung von NA von Bedeutung sein (§ 13 Abs. 6 BBodSchV). In diesem

Zusammenhang können bereits in der Detailuntersuchung im Einzelfall gezielt vertiefte Untersuchungen zu NA durchgeführt und Erkenntnisse über das Vorliegen von NA gewonnen werden.

Zur Bewertung und Auswahl geeigneter Sanierungsverfahren, zur Festlegung von Sanierungszielen und zur Verhältnismäßigkeitsprüfung sind detaillierte Kenntnisse der Standortverhältnisse notwendig. Im Rahmen der Sanierungsuntersuchung kann es daher unabhängig von einer Umsetzung von MNA sinnvoll bzw. erforderlich sein, NA vertieft zu untersuchen und zu berücksichtigen. Allgemeine Vorgaben hierzu sind in § 17 Abs. 4 BBodSchV genannt und in den folgenden Kapiteln zur Umsetzung von MNA berücksichtigt. Gegebenenfalls eröffnen sich dadurch Möglichkeiten zur Durchführung von ENA bzw. anderer in-situ-Sanierungsverfahren.

Bei der Entscheidung über die Einbindung von MNA in die Altlastbearbeitung ist zu prüfen, ob die Durchführung technischer Sanierungsmaßnahmen als alleinige Maßnahme verhältnismäßig ist. Stellt sich in den Bearbeitungsphasen Detailuntersuchung und Sanierungsuntersuchung heraus, dass NA-Prozesse am Standort stattfinden, können diese in den Entscheidungsprozess einbezogen werden. Soll als Ergebnis des Entscheidungsprozesses MNA als Teil einer Sanierungsmaßnahme oder im Einzelfall als alleinige Maßnahme umgesetzt werden, ist die standortbezogene natürliche Schadstoffminderung im Rahmen eines MNA-Konzepts (Kap. 3) zu belegen. Das MNA-Konzept erweitert die Sanierungsuntersuchung um eine detaillierte NA-spezifische Erkundung. Diese NA-spezifische Erkundung stellt zusammen mit der Variantenstudie zur Auswahl geeigneter Sanierungsverfahren unter Berücksichtigung der Verhältnismäßigkeit die Grundlage der behördlichen Entscheidung zur Umsetzung von MNA dar.

Für die Umsetzung von MNA sind die grundsätzlichen Standortvoraussetzungen einzuhalten, insbesondere ist i. d. R. eine Quellensanierung durchzuführen (siehe Kap. 2.4). Eine Quellensanierung soll die Schadstoffmenge in und/oder die Quellstärke (Austrag der Schadstoffe) aus der Quelle so weit wie möglich reduzieren. Damit sollen Gefahren für das bisher unbelastete Grundwasser und/oder für weitere Schutzgüter abgewendet werden und/oder der Zeitraum der Existenz der Grundwasserverunreinigung maßgeblich verkürzt werden.

Sind die Standortvoraussetzungen erfüllt und soll MNA aufgrund der Ergebnisse des MNA-Konzepts angewendet werden, kann dies in Kombination mit technischen Sanierungsverfahren, ggf. auch im Anschluss an eine Sanierung unter Festlegung des Maßnahmenziels (Kap. 2.3) erfolgen. Im besonders begründeten Einzelfall kann MNA auch als alleinige Maßnahme ausreichend sein. Bei der Umsetzung eines MNA-Konzepts sind alle für den jeweiligen Einzelfall notwendigen Maßnahmen in einem Gesamtmaßnahmenkonzept (einschließlich ggf. notwendiger technischer Sanierungsmaßnahmen) darzulegen.

Die grundsätzliche Pflicht zur Gefahrenabwehr bei Altlasten oder schädlichen Bodenveränderungen sowie ggf. dadurch verursachter Grundwasserverunreinigungen bleibt auch bei der Berücksichtigung von NA bzw. bei der Umsetzung von MNA bestehen. Im Rahmen der MNA-Bearbeitung sollte daher möglichst frühzeitig, spätestens vor Umsetzung von MNA, eine Alternativmaßnahme zur hinreichenden Gefahrenabwehr vorliegen, falls sich ein MNA-Konzept (Kap. 3 und Anhang 2) als nicht Erfolg versprechend erweist.

### **2.3 Maßnahmenziel**

Da MNA keine Sanierungsmaßnahme darstellt (siehe Kap. 2.1), wird für die Fälle, in denen MNA zur Anwendung kommt, der Begriff „Maßnahmenziel“, entsprechend dem Sanierungsziel bei technischen Sanierungsmaßnahmen, verwendet.

Das Maßnahmenziel beschreibt den jeweiligen zu erreichenden Zustand, ab dem MNA in Kombination mit einer technischen Sanierung oder ggf. MNA als alleinige Maßnahme beendet werden kann.

Die Festlegung des Maßnahmenziels erfolgt in Anlehnung an die Festlegung des Sanierungsziels (siehe Merkblatt 3.8/1) unter Berücksichtigung der Standortbedingungen, insbesondere der Schadstoffart, der

aktuellen und zukünftigen Konzentrationen und Frachten, des Ausbreitungsverhaltens (gesättigte und ungesättigte Zone) sowie betroffener Schutzgüter (weitere Hinweise siehe Kap. 3).

## 2.4 Standortvoraussetzungen für die Umsetzung von MNA

Für die Umsetzung von MNA sind grundsätzlich folgende Voraussetzungen zu beachten und durch die phasenweise Bearbeitung des MNA-Konzepts (Kap. 3) nachzuweisen:

- Die Dekontamination der Schadstoffquelle/n (im ungesättigten und gesättigten Bereich) soll so weit wie möglich durchgeführt worden sein und/oder die Quellstärke (Fracht pro Fläche) durch geeignete anderweitige Maßnahmen (z. B. Oberflächenabdichtung, Abstomsicherung) dauerhaft minimiert werden.
- Es dürfen keine mobilen Schadstoffphasen vorliegen.
- Die Schadstofffahne muss räumlich zumindest quasistationär sein oder sich von ihrer Ausdehnung (Reaktionsraum) her bereits verkleinern.
- Durch die Schadstofffahne dürfen keine sensiblen Nutzungen (u. a. Trink- oder Heilwasserentnahmen, private Grundwassernutzungen) bzw. weitere Schutzgüter gefährdet werden.
- Die vertikale Schadstoffverlagerung in tiefer liegende Grundwasserstockwerke muss ausgeschlossen sein.
- Es dürfen keine erheblichen zusätzlichen Gefahren, z. B. durch Anreicherung toxischer Metabolite (z. B. Vinylchlorid) oder Endprodukte, für relevante Schutzgüter vorliegen bzw. zu erwarten sein.
- Die schadstoffmindernden Prozesse in der Fahne müssen im Wesentlichen durch frachtreduzierende Prozesse (z. B. mikrobiologischer Abbau) begründet sein.
- Das gesamte Schadstoffspektrum sowie die räumliche und zeitliche Verteilung/Ausbreitung der Schadstoffe müssen bekannt sein bzw. erhoben werden.
- Die hydrogeologischen Verhältnisse müssen detailliert und plausibel nachvollziehbar erkundet sein einschließlich schlüssiger hydrogeologischer Modellvorstellungen.
- Kluft- bzw. Karstgrundwasserleiter sind i. d. R. für die Umsetzung von MNA nicht geeignet.

## 2.5 Randbedingungen für nicht abbaubare Schadstoffe

Anorganische Schadstoffe unterliegen keinen natürlichen Abbauprozessen. Werden anorganische Schadstoffe durch Schadstoffminderungsprozesse wie z. B. Fällung oder Sorption festgelegt, ist durch die Prognose (Kap. 3) zu belegen, dass eine Remobilisierung auf Dauer ausgeschlossen werden kann. Die Prozesse der dauerhaften Immobilisierung müssen sicher nachgewiesen sein.

Voraussetzung für die Anwendung von MNA ist in diesen Fällen eine i. d. R. vollständige Sanierung der Schadstoffquelle. Nicht oder nur schwer abbaubare organische Schadstoffe sind analog zu betrachten.

Können diese Vorgaben nicht eingehalten werden, ist die MNA-Bearbeitung im Sinne dieses Merkblatts nicht möglich.



### 3 MNA-Konzept

Wird NA in der Altlastenbearbeitung berücksichtigt, soll die Erkundung, Bewertung und Überwachung der schadstoffmindernden Prozesse phasenweise durchgeführt werden. Diese Vorgehensweise bietet sich auf Grund des im Vergleich zur konventionellen Altlastenbearbeitung erforderlichen erhöhten Aufwandes an. Vor Beginn der MNA-Bearbeitung ist auf Basis der Variantenstudie (Sanierungsuntersuchung) eine **Alternativmaßnahme** zur hinreichenden Gefahrenabwehr (Rückfallszenario) festzulegen, falls sich die Wirkung der schadstoffmindernden Prozesse als unzureichend erweisen sollte.

Das MNA-Konzept gliedert sich grundsätzlich in eine **NA-spezifische Erkundung und Bewertung** (Phasen I – III) sowie die **MNA-spezifische Überwachung** (Monitoring, Phase IV). Im Rahmen der NA-spezifischen Erkundung und Bewertung werden die Prozesse in drei Phasen sukzessive vertiefend erkundet und bewertet. Diese Phasen umfassen alle erforderlichen Maßnahmen, die für die hinreichende qualitative Abschätzung bzw. quantitative Beschreibung und Ermittlung von NA erforderlich sind. Nähere Angaben zu Untersuchungsmethoden und weitere Erläuterungen sind den Anhängen 2 und 3 zu entnehmen. Am Ende jeder Phase wird aufgrund der Erkundungsergebnisse entschieden, ob es sinnvoll und zielführend ist, das MNA-Konzept weiterzuverfolgen.

Spätestens am Ende der Phase III ist eine behördliche Entscheidung erforderlich, ob unter Einbeziehung der Verhältnismäßigkeit auf Basis der nachgewiesenen Schadstoffminderungsprozesse, der Prognose der Fahnenentwicklung, der Variantenstudie (Sanierungsuntersuchung) und des mit den Behörden abgestimmten MNA-spezifischen Überwachungsprogramms auf zusätzliche (Sanierungs-)Maßnahmen verzichtet werden kann und ein entsprechendes Monitoring in Phase IV durchgeführt werden soll.

Für den Einstieg in die MNA-Bearbeitung ist von der bzw. dem Pflichtigen als Grundlage für die Abstimmung zwischen den Beteiligten (u. a. Behörden, Pflichtige bzw. Pflichtiger, Sachverständiger) ein auf den Einzelfall ausgerichtetes MNA-Konzept vorzulegen, das neben dem groben Handlungsrahmen auch die durchzuführenden Untersuchungsmethoden zumindest für die unmittelbar bevorstehende nächste Bearbeitungsphase enthält.

#### **Phase I: Prüfung der Standortvoraussetzungen und qualitative Abschätzung des NA-Potenzials**

Im ersten Schritt ist, sofern nicht aus bereits vorliegenden Untersuchungen bekannt, durch eine **Erkundung der Schadstoffquelle** (bzw. der ggf. verbliebenen kontaminierten Quellbereiche) und **-fahne** abzuklären, ob einerseits die in Kap. 2.4 genannten **Standortvoraussetzungen** zur Umsetzung von MNA eingehalten werden und andererseits ein **NA-Potenzial** am Standort vorliegt. Dies bezieht sich zunächst auf die qualitative Erfassung möglicher Prozesse der Schadstoffminderung und stellt somit die Erhebung des Ist-Zustandes dar.

Für diesen ersten Erkundungsschritt können i. d. R. gängige Untersuchungsverfahren der Altlastenbearbeitung angewendet werden (siehe auch Anhang 2 und 3). Am Ende von Phase I ist eine Bewertung der Ergebnisse vorzunehmen und zu entscheiden, ob das MNA-Konzept mit Phase II weiterverfolgt wird.

#### **Phase II: Quantitative Erkundung und Bewertung der schadstoffmindernden Prozesse**

Kann am Standort ein Potenzial zur natürlichen Schadstoffminderung qualitativ belegt werden, sind in dieser Untersuchungsphase im Wesentlichen die einzelnen schadstoffmindernden Prozesse zu identifizieren sowie deren Ausmaß bzw. Wirksamkeit zur Schadstoffminderung zu erheben.

Der hydrogeologische Kenntnisstand aus Phase I wird erweitert und fließt in die Entwicklung des **Hydrogeologischen Modells** (HGM, Anhang 2) ein. Dies bedeutet im Einzelnen die Ermittlung und eine detaillierte Charakterisierung des Strömungsgeschehens sowie der Grundwasserleiter/-stauerkonfiguration.

Die **Schadstofffrachten** sind an Bilanzebenen (Fließquerschnitten) zu ermitteln und die **Frachtreduktion** zu quantifizieren. Die **Verdünnung** als limitierendes Entscheidungskriterium für MNA (siehe Kap. 2.4) ist ebenfalls zu quantifizieren bzw. von anderen Schadstoffminderungsprozessen zu unterscheiden. Neben

einer vertieften Charakterisierung der Redoxverhältnisse sollen ergänzend zu den Untersuchungen in Phase I das Vorhandensein und die Aktivität von Mikroorganismen ermittelt und erste Rückschlüsse auf Abbauraten gezogen werden (siehe Anhang 2).

Zusätzlich zu den in der Altlastenbearbeitung gängigen Untersuchungsverfahren können in dieser Phase spezielle Untersuchungsmethoden (z. B. Isotopenuntersuchungen und Mikrokosmenstudien) erforderlich werden (siehe Anhang 3).

Mit Hilfe der in Phase II erfassten Informationen sollte nach der qualitativen Beurteilung (Phase I) eine quantitative Bewertung der schadstoffmindernden Prozesse möglich sein. Erscheint die Wirksamkeit der Prozesse ausreichend, kann das MNA-Konzept mit Phase III fortgeführt werden.

### **Phase III: Modellierung und Prognose mit Erstellung des MNA-spezifischen Überwachungsprogramms und behördlicher Entscheidung**

In Phase III ist die **Prognose des Schadstoffverhaltens** zu erstellen. Hierzu müssen ggf. noch fehlende Informationen erhoben werden, um ein plausibles Prozessverständnis zu erreichen. Aus den Ergebnissen der NA-spezifischen Erkundung, dem entwickelten HGM sowie allen weiteren Daten und ermittelten Prozessen, insbesondere der Schadstoffausbreitung, soll ein **konzeptionelles Standortmodell** formuliert werden. Die Prognose des Schadstoffverhaltens sollte mittels eines **numerischen Modells** (Grundwasserströmungs-, Transport- und Reaktionsmodell) erfolgen. Das konzeptionelle Standortmodell dient dabei als die nichtmathematische Vorstufe und Grundlage der numerischen Modellierung. In einfachen Fällen kann alternativ auch eine verbal-argumentative Prognose auf Basis des konzeptionellen Standortmodells und von Zeitreihenanalysen entwickelt werden.

Am Ende der Erkundungsphasen hat eine zusammenfassende Bewertung durch den Sachverständigen zu erfolgen. Diese ist der zuständigen Behörde zur Abstimmung und weiteren Entscheidung vorzulegen. Lassen alle Ergebnisse nach Abschluss der Untersuchungen in Phase III eine Umsetzung von MNA zu, sind von der Behörde entsprechende **Prüf- und Bewertungskriterien** für die Durchführung von MNA festzulegen. Diese umfassen das **Maßnahmenziel**, **Zwischenziele**, **tolerierbare Abweichungen von der Prognose** und **Abbruchkriterien**. Die Abbruchkriterien beinhalten auch die zur Umsetzung von MNA genannten Standortvoraussetzungen (Kap. 2.4, z. B. Ausschluss mobiler Schadstoffphasen).

Anschließend ist in Abstimmung mit der Behörde ein **MNA-spezifisches Überwachungsprogramm** zu erstellen. Dieses ist im Sinne eines prozessorientierten Monitorings durchzuführen und soll die Überwachung der Schadstoffverteilung (einschließlich der Begrenzung der Fahne), des Schadstoffverhaltens mit Fahnenentwicklung und der maßgeblichen prozessrelevanten Parameter beinhalten. Dadurch können frühzeitig mögliche Änderungen der Schadstoffminderungsprozesse erkannt werden, um ggf. rechtzeitig weitere Maßnahmen ergreifen zu können. Dazu müssen Leitparameter, Messstellen, Probenahme-Methodik und -Intervalle festgelegt werden.

Da bei MNA die Prozesse der Schadstoffminderung nicht beeinflussbar sind, ist die Dauer von MNA neben den Schadstoffminderungsprozessen insbesondere abhängig von

- den verbliebenen Restschadstoffmassen und
- dem festzulegenden und erforderlichen Maßnahmenziel.

Das Maßnahmenziel soll innerhalb **einer rückläufigen Entwicklung der Schadstofffahne** definiert werden und **mehrfach** anhand der Prognoseprüfung bestätigt werden. Zudem soll es in einem überschaubaren Zeitraum erreicht werden (ca. 10 bis 30 Jahre). Lässt die Prognose des Schadstoffverhaltens deutlich längere Zeiträume erwarten und sind noch Restschadstoffmassen (Schadstoffquellen) vorhanden, sind weitere Maßnahmen an der Schadstoffquelle durchzuführen (z. B. Dekontamination).



### Behördliche Entscheidung über die Durchführung von MNA

Auf Grundlage der bisherigen Erkenntnisse ist von den zuständigen Behörden abschließend zu prüfen, ob die notwendigen Standortvoraussetzungen für MNA vorliegen (Kap. 2.4) und die Entscheidung zu treffen, ob am Standort die natürliche Selbstreinigung (NA) ausreicht und das MNA-spezifische Überwachungsprogramm geeignet ist, um entweder MNA in Verbindung mit einer technischen Sanierungsmaßnahme zur Gefahrenabwehr oder im Einzelfall als alleinige Maßnahme durchzuführen. Stellt sich aufgrund der bisherigen Erkenntnisse MNA als nicht zielführend heraus, ist die zuvor festgelegte Alternativmaßnahme umzusetzen.

Ergibt die Bewertung, dass die Standortgegebenheiten eine Einbeziehung von Prozessen zur Schadstoffminderung zulassen, schließt sich die Phase der MNA-spezifischen Überwachung an.

### Phase IV: MNA-spezifische Überwachung mit Vergleich und Überprüfung der Prognose

Diese Phase umfasst das eigentliche Monitoring mit der **Prognoseprüfung** anhand der gewonnenen Monitoring-Ergebnisse (Soll-Ist-Vergleich) unter Berücksichtigung der festgelegten tolerablen Abweichungen von der Prognose und Prüfung der festgelegten Abbruchkriterien. Das Monitoring wird in Überwachungszyklen (MNA-Zyklen) unterteilt, in denen Parameterumfang, Probenahmeintervalle und -methodik sowie Messstellenauswahl bis zur erneuten Prognoseprüfung konstant bleiben. Der Parameterumfang und die Dauer dieser Zyklen richten sich nach den in Phase I bis III ermittelten Prozessen, die für die Frachtreduktion maßgeblich sind. An den Monitoring-Ergebnissen jedes MNA-Zyklus ist eine Prognoseprüfung mit Bewertung der relevanten schadstoffmindernden Prozesse und Überprüfung des Modells vorzunehmen. Je nach Ergebnis der Prüfung bzw. bei Abweichung der Ist-Werte von der Prognose und Überschreitung der tolerierbaren Abweichungen, ist eine Neubewertung der Prognose des Schadstoffverhaltens durchzuführen. Dazu soll in Abstimmung mit der Behörde ggf. das MNA-spezifische Überwachungsprogramm angepasst werden, um ergänzende Daten zu erhalten. Anschließend ist ggf. das Modell zu überarbeiten, die Prognose neu zu formulieren und das zukünftige MNA-spezifische Überwachungsprogramm anzupassen. Ergibt die Prüfung, dass das Maßnahmenziel nicht erreicht werden kann, ist die zuvor festgelegte Alternativmaßnahme anzuwenden.

Grundsätzlich ist das MNA-spezifische Überwachungsprogramm solange durchzuführen, bis das festgelegte Maßnahmenziel erreicht ist oder erkennbar ist, dass MNA nicht zum angestrebten Ziel führt bzw. Abbruchkriterien erfüllt werden und die Alternativmaßnahme des Rückfallszenarios zur Anwendung kommen muss.

In Abb. 1 sind die Phasen I bis IV des MNA-Konzepts sowie zum Vergleich die entsprechenden Schritte nach dem LABO-Positionspapier (LABO 2015) in einem Fließschema dargestellt. Detaillierte Angaben zur Vorgehensweise in den einzelnen Phasen sind im Anhang 2 enthalten.

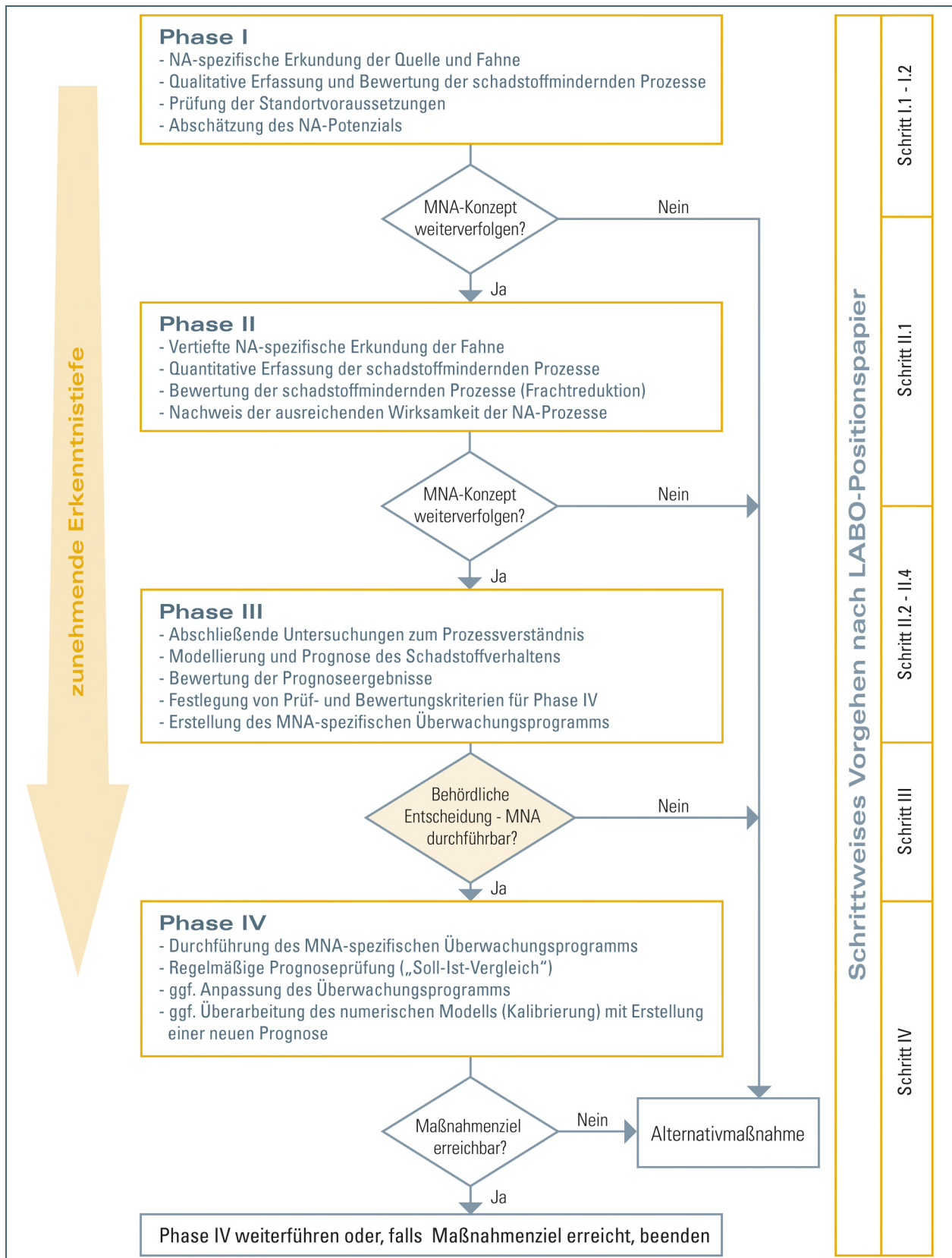


Abb. 1: Fließschema des MNA-Konzepts mit Darstellung der entsprechenden Schritte nach LABO-Positionspapier (LABO 2015)<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Zu Phase IV siehe auch Anhang 2 Abb. 1

## 4 Literaturverzeichnis

Die aktuellen Merkblätter können im Internet unter [www.lfu.bayern.de](http://www.lfu.bayern.de) heruntergeladen werden.

BayBodSchG (1999): Bayerisches Gesetz zur Ausführung des Bundes-Bodenschutzgesetzes (Bayerisches Bodenschutzgesetz – BayBodSchG) vom 23.02.1999 (GVBl. S. 36), das zuletzt durch Gesetz vom 09.12.2020 (GVBl. S. 640) geändert worden ist.

BayBodSchVwV (2023): Verwaltungsvorschrift zum Vollzug des Bodenschutz- und Altlastenrechts in Bayern (BayBodSchVwV) vom 04.09.2023 (BayMBI. 2023 Nr. 476 vom 04.10.2023).

BayWG, vom 25.02.2010 (2010): Bayerisches Wassergesetz (BayWG) vom 25. Februar 2010 (GVBl. S. 66, Ber. S. 130), das zuletzt durch § 1 des Gesetzes vom 09.11.2021 (GVBl. S. 608) geändert worden ist.

BBodSchG (1998): Gesetz zum Schutz vor schädlichen Bodenveränderungen und zur Sanierung von Altlasten (Bundes-Bodenschutzgesetz - BBodSchG) vom 17.03.1998 (BGBl. I S. 502), das zuletzt durch Artikel 7 des Gesetzes vom 25.02.2021 (BGBl. I S. 306) geändert worden ist.

BBodSchV (2021): Bundes-Bodenschutz- und Altlastenverordnung (BBodSchV) vom 9. Juli 2021 (BGBl. I S. 2598, 2716).

Hanauer, T.; Rüde, T. R.; Rietzler, J.; Wohnlich, S.; Stichler, W. (2006): Natürliche Schadstoffrückhalteprozesse für Arsen und Kupfer am Standort einer ehemaligen Buntfarbenfabrik, Grundwasser, 11, 3, S. 194–206.

LABO, Bund-/Länderarbeitsgemeinschaft Bodenschutz [Hrsg.] (2015): Berücksichtigung der natürlichen Schadstoffminderung bei der Altlastenbearbeitung, Positionspapier Stand 15.09.2015, Ständiger Ausschuss Altlasten, Ad-hoc Unterausschuss Natürliche Schadstoffminderung.

LfU, Bayerisches Landesamt für Umwelt [Hrsg.] (2023): Merkblatt 3.8/1, Untersuchung und Bewertung von Altlasten und schädlichen Bodenveränderungen - Wirkungspfad Boden-Grundwasser.

LfU, Bayerisches Landesamt für Umwelt [Hrsg.] (2023): Merkblatt 3.8/4, Probenahme von Boden und Bodenluft bei Altlasten und schädlichen Bodenveränderungen - Wirkungspfade Boden-Mensch und Boden-Grundwasser.

LfU, Bayerisches Landesamt für Umwelt [Hrsg.] (2023): Merkblatt 3.8/5, Untersuchung von Boden- und Bodenluftproben sowie Eluatn bei Altlasten und schädlichen Bodenveränderungen - Wirkungspfade Boden-Mensch und Boden-Grundwasser.

LfU, Bayerisches Landesamt für Umwelt [Hrsg.] (2023): Merkblatt 3.8/6, Entnahme und Untersuchung von Wasserproben bei Altlasten, schädlichen Bodenveränderungen - Wirkungspfad Boden-Grundwasser.

Marczinek, S.; Schäfer, W.; Peiffer, S. (2006): Identifizierung und Quantifizierung natürlicher Abbauprozesse in einem mit Chlorethenen kontaminierten Grundwasserleiter, Grundwasser, 11, 3, S. 207–216.

Prechtel, A.; Bitterlich, S.; Radu, F.; Knabner, P. (2006): Natural Attenuation: Hohe Anforderungen an die Modellsimulation, Grundwasser, 11, 3, S. 217–225.

Rüttinger, S.; Breiter, R.; Hirsch, K.; Salaices Avila, M. A.; Tobschall, H. J.; Neeße, T.; Bayer, M. (2006): Natural Attenuation-Untersuchungen an einem mit LCKW kontaminierten Altdeponiestandort, Grundwasser, 11, 3, S. 184–193.

VSU (2001): Verordnung über Sachverständige und Untersuchungsstellen für den Bodenschutz und die Altlastenbehandlung in Bayern (Sachverständigen- und Untersuchungsstellen-Verordnung – VSU) vom 03.12.2001 (GVBl. S. 938), die zuletzt durch Verordnung vom 16.10.2017 (GVBl. S. 508) geändert worden ist.

Webert, M.; Hauck, T. (2006): Bayerisches Forschungsverbundvorhaben „Nachhaltige Altlastenbewältigung unter Einbeziehung des natürlichen Reinigungsvermögens“, Grundwasser, 11, 3, S. 179–183.

WHG (2009): Gesetz zur Ordnung des Wasserhaushalts (Wasserhaushaltsgesetz - WHG) vom 31.07.2009 (BGBl. I S. 2585), das zuletzt durch Artikel 12 des Gesetzes vom 20.07.2022 (BGBl. I S. 1237) geändert worden ist.

## Anhang 1: Natürliche Schadstoffminderungsprozesse

### Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einführung</b>	<b>14</b>
<b>2</b>	<b>Mikrobieller Abbau</b>	<b>15</b>
<b>3</b>	<b>Abiotischer Abbau</b>	<b>16</b>
<b>4</b>	<b>Fällung</b>	<b>16</b>
<b>5</b>	<b>Sorption</b>	<b>16</b>
<b>6</b>	<b>Verflüchtigung</b>	<b>16</b>
<b>7</b>	<b>Verdünnung</b>	<b>17</b>
<b>8</b>	<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>18</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 Anhang 1 Tab. 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 umweltrelevante Metalle und Halbmetalle (M/HM) können analog bearbeitet werden. Hierzu können auch Hilfestellungen aus dem KORA Themenverbund 6 (TU Bergakademie Freiberg 2008) entnommen werden.

Anhang 1 Tab. 1: Relevanz fracht- bzw. konzentrationsmindernder Prozesse

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

++ sehr relevanter Prozess;

+ relevanter Prozess;

o stark untergeordneter Prozess oder irrelevant

Neben den in Anhang 1 Tab. 1 aufgeführten schadstoffabhängigen Prozessen ist die Verdünnung ein weiterer konzentrationsmindernder Prozess, der ausschließlich von den hydrogeologischen Gegebenheiten des Standortes abhängt (Kap. 7 in diesem Anhang).

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 (Wabbels & Teutsch 2008; Werner et al. 2008; Grandel & Dahmke 2008; DGFZ 2008; 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 Masse bzw. die aus einer Quelle emittierte Fracht (Masse pro Zeit).



## 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 2001; LfUG 2000; Fuchs 2022; Wiedemeier et al. 1999; LUBW 1997; Kern et al. 2007). Nachfolgend werden nur einige wesentliche Aspekte dargestellt.

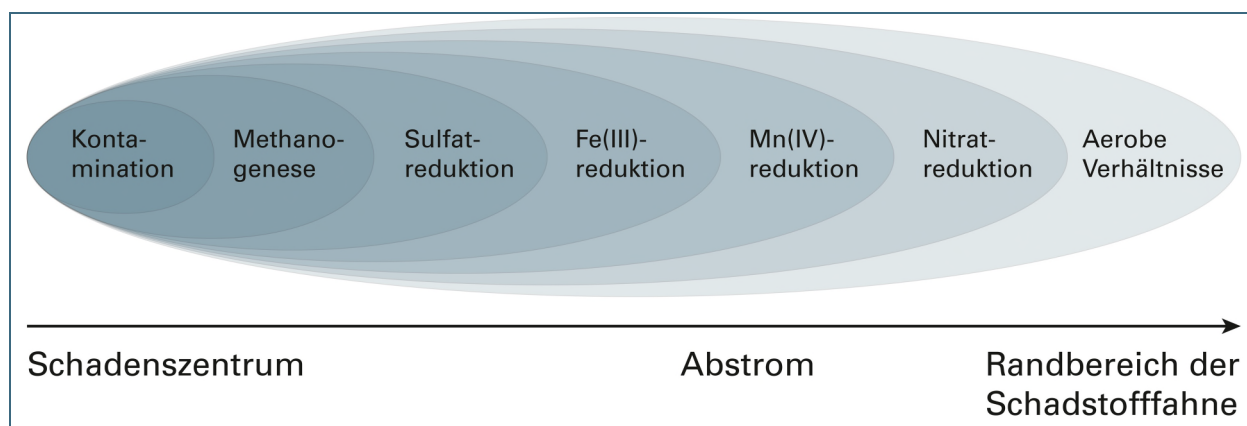
Sowohl in der ungesättigten als auch in der gesättigten Zone sind Mikroorganismen vorhanden, durch die organische Substanzen mikrobiell abgebaut werden können. Da Kohlenwasserstoffe (KW) und deren Derivate (z. B. MKW, BTEX, PAK und NSO-Heterocyclen) auch Produkte natürlicher Prozesse (z. B. Lagerstättenogenese, 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 (LfUG 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 2001). 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 & Püttmann 2001). Inhibitoren (z. B. zu hohe Gehalte an toxischen Metallen/Halbmetallen, 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(hydr)oxide, Manganoxide und Sulfat reduziert. Wenn alle vorgenannten Elektronenakzeptoren erschöpft sind, findet der methanogene Schadstoffabbau statt. Hierbei entsteht Methan, welches als wichtiger Indikator zum Nachweis der Methanogenese dient (hier dienen die organischen Schadstoffe als Elektronenakzeptoren und -donatoren). Dieser sukzessive Verbrauch verschiedener Elektronenakzeptoren führt zur sogenannten Redoxzonierung im Untergrund (idealisiert dargestellt in Anhang 1 Abb. 1).



Anhang 1 Abb. 1: Idealierte Darstellung der Redoxzonierung

### 3 Abiotischer Abbau

Der abiotische Abbau (physikalisch-chemische Zersetzung), z. B. durch Photolyse, Hydrolyse, Oxidation oder Reduktion 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 überführt. Maßgeblich ist dabei das Löslichkeitsprodukt der ausgefallenen Verbindung, welches abhängig von den Milieubedingungen (charakterisiert durch Temperatur, pH-Wert, Redoxverhältnisse) und der Ionenstärke ist.

Metalle und Halbmetalle können durch Fällung in unlösliche bzw. gering 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: Amelung et al. 2018; Wiedemeier et al. 1999; LUBW 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 adsorbierten Stoffs von der Festphase und Überführung in die freie, z. B. flüssige Phase (z. B. durch Verdrängung, Veränderung der Oberflächenladung etc.). Unter Absorption versteht man die Aufnahme von Stoffen in das Innere des Sorbenten.

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 Schad-

stoffverbleibs 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 Wirkungspfad Boden-Mensch zu berücksichtigen (siehe auch: Merkblatt 3.8/8).

## **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.

## 8 Literaturverzeichnis

Die aktuellen Merkblätter können im Internet unter [www.lfu.bayern.de](http://www.lfu.bayern.de) heruntergeladen werden.

Amelung, W.; Blume, H.-P.; Fleige, H.; Horn, R.; Kandeler, E.; Kögel-Knabner, I.; Kretzschmar, R.; Stahr, K.; Wilke, B.-M. (2018): Scheffer/Schachtschabel Lehrbuch der Bodenkunde, 17. überarbeitete und ergänzte Auflage, Springer Spektrum, Berlin, 749 S.

DGFZ, Dresdner Grundwasserforschungszentrum e. V. [Hrsg.] (2008): Leitfaden Umgang mit abfallablagungsverursachten Gewässerschäden und Gefahrensituationen unter Berücksichtigung der Wirkungen natürlicher Rückhalte- und Abbau-Prozesse, BMBF Förderschwerpunkt KORA, Themenverbund 4 - Deponien, Altablagerungen, Dresden.

Fuchs, G. [Hrsg.] (2022): Allgemeine Mikrobiologie, 11. vollständig überarbeitete Auflage, Stuttgart, New York, Georg Thieme Verlag, 880 S.

Grandel, S.; Dahmke, A. (2008): Leitfaden Natürliche Schadstoffminderungsprozesse bei LCKW-kontaminierten Standorten - Methoden, Empfehlungen und Hinweise zur Untersuchung und Beurteilung, BMBF Förderschwerpunkt KORA, Themenverbund 3 - Chemische Industrie, Metallverarbeitung, Christian-Albrechts-Universität zu Kiel.

Joos, A.; Knackmuss, H. J.; Spyra, W. (2008): Leitfaden Natürliche Schadstoffminderung bei sprengstofftypischen Verbindungen, BMBF-Förderschwerpunkt KORA, Themenverbund 5 - Rüstungsalasten, I-ABG mbH [Hrsg.], Berlin.

Kern, F.; Möhser, H.; Reinhard, M.; Sagner, A.; Sorg, K.-P.; Tiehm, A. (2007): NSO-Heterozyklen, Vorkommen, Analytik, Beurteilung - Hinweise für die Praxis, Altlastenforum Baden-Württemberg, Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung (in Komm.), Stuttgart, Schriftenreihe Altlastenforum Baden-Württemberg e.V, Heft 12, 32 S.

LfU, Bayerisches Landesamt für Umwelt [Hrsg.] (2023): Merkblatt 3.8/8, Untersuchung und Bewertung von Altlasten und schädlichen Bodenveränderungen - Wirkungspfad Boden-Mensch (direkter Kontakt) und Expositionsszenario Boden-Bodenluft-Innenraumluft.

LfUG, Sächsisches Landesamt für Umwelt und Geologie [Hrsg.] (2000): Mikrobiologische Sanierungsverfahren, Dresden, Materialien zur Altlastenbehandlung, Nr. 1/2000, 123 S.

LUBW, Landesanstalt für Umweltschutz Baden-Württemberg [Hrsg.] (1997): Stoffverhalten von gaswerk-spezifischen polycyclischen aromatischen Kohlenwasserstoffen (PAK), Karlsruhe, Texte und Berichte zur Altlastenbearbeitung, 258 S.

Stupp, H. D.; Püttmann, W. (2001): Migrationsverhalten von PAK in Grundwasserleitern - Hinweise für die Anwendung von MNA bei sanierungsbedürftigen Grundwasserverunreinigungen durch PAK, Altlasten Spektrum, 3, S. 128–136.

TU Bergakademie Freiberg [Hrsg.] (2008): Leitfaden Natürliche Schadstoffminderungsprozesse an groß-räumigen Bergbaukippen/-halden und Flussauensedimenten - Empfehlungen zur Untersuchung und Bewertung der natürlichen Quelltermminimierung, BMBF-Förderschwerpunkt KORA, Themenverbund 6 - Bergbau und Sedimente, Freiberg, 152 S.

UBA, Umweltbundesamt [Hrsg.] (2001): Leitfaden Biologische Verfahren zur Bodensanierung, im Auftrag des BMBF, Projektträger Abfallwirtschaft und Altlastensanierung (PT AWAS), Berlin.

Wabbels, D.; Teutsch, G. (2008): Leitfaden Natürliche Schadstoffminderungsprozesse bei mineralölkontaminierten Standorten, BMBF-Förderschwerpunkt KORA, Themenverbund 1 - Raffinerien, Tanklager, Kraftstoffe/Mineralöl, MTBE, Eberhard Karls Universität Tübingen, Zentrum für Angewandte Geowissenschaften (ZAG), Tübingen, 222 S.

Werner, P.; Börke, P.; Hüfers, N. (2008): Leitfaden Natürliche Schadstoffminderung bei Teerölaltlasten, BMBF-Förderschwerpunkt KORA, Themenverbund 2 - Gaswerke, Kokereien, Teerverarbeitung, (Holz-) Imprägnierung, TU Dresden, Schriftenreihe des Institutes für Abfallwirtschaft und Altlasten, Band 58, 270 S.

Wiedemeier, T. H.; Rifai, H. S.; Newell, C. J.; Wilson, J. T. (1999): Natural attenuation of fuels and chlorinated solvents in the subsurface, John Wiley & Sons, New York, 617 S.

## Anhang 2: MNA-Konzept (Phasen I bis IV)

### Inhaltsverzeichnis

<b>Einführung</b>	<b>21</b>
<b>1 Phase I – Prüfung der Standortvoraussetzungen und qualitative Abschätzung des NA-Potenzials</b>	<b>21</b>
1.1 Erfassung der Ist-Situation und von Grundlagen zur Erarbeitung einer hydrogeologischen Modellvorstellung	22
1.2 Hinweise auf mikrobiologischen Schadstoffum- bzw. -abbau	25
<b>2 Phase II – Quantitative Erkundung und Bewertung der schadstoffmindernden Prozesse</b>	<b>27</b>
2.1 Ergänzung der Informationen zur Erfassung der Ist-Situation und zur Erarbeitung des Hydrogeologischen Modells (HGM)	27
2.2 Untersuchungen zum mikrobiologischen Schadstoffabbau	31
<b>3 Phase III – Modellierung und Prognose mit Erstellung des MNA-spezifischen Überwachungsprogramms und behördlicher Entscheidung</b>	<b>32</b>
3.1 Formulierung des Hydrogeologischen Modells	32
3.2 Quantifizierung hydro- und geochemischer sowie mikrobiologischer Prozesse	32
3.3 Modellierung und Prognose	33
3.3.1 Zielsetzung der Modellierung	33
3.3.2 Hinweise zur Modellauswahl	33
3.3.3 Umgang mit den Modellierungsergebnissen	34
3.4 Dauer von MNA	34
3.5 Festlegung von Prüf- und Bewertungskriterien für die Durchführung von MNA	34
3.6 MNA-spezifisches Überwachungsprogramm	35
3.7 Behördliche Entscheidung über die Durchführung von MNA	36
<b>4 Phase IV – MNA-spezifische Überwachung mit Vergleich und Überprüfung der Prognose</b>	<b>37</b>
4.1 Prognoseprüfung	38
4.2 Einstellung von MNA	38
<b>5 Literaturverzeichnis</b>	<b>39</b>



## Einführung

Im Folgenden werden für die Schadstoffgruppen MKW, BTEX, LHKW und PAK sowie für Cu und As als Vertreter der anorganischen Schadstoffe die Untersuchungsschritte im Rahmen eines MNA-Konzepts (Phase I – IV) beschrieben<sup>1</sup>.

Die Untersuchungsmethoden und deren Phasenzuordnung haben sich in MNA-Fällen bewährt und sind als Vorschlag im Sinne einer zielgerichteten Konzeptstruktur mit zunehmender Erkenntnistiefe im Ablauf der Bearbeitung zu sehen. Eine Anpassung an den jeweiligen Einzelfall ist vorzunehmen. Weitere NA-spezifische Untersuchungsmethoden sind, soweit nicht in diesem Anhang genannt, im Anhang 3 beschrieben. Darüber hinaus können weitere Hilfestellungen u. a. der Handlungsempfehlung mit Methodensammlung (Michels et al. 2008) und den branchenspezifischen Leitfäden aus dem BMBF Förderungsschwerpunkt KORA (Wabbels & Teutsch 2008; Werner et al. 2008; Grandel & Dahmke 2008; DGFZ 2008a, 2008b; Joos et al. 2008; TU Bergakademie Freiberg 2008, zu finden unter <http://www.natural-attenuation.de/download.html>) entnommen werden.

Die Phasen I bis III umfassen die MNA-spezifische Erkundung des Standortes (Quelle und Fahne) auf Basis der Untersuchungsergebnisse aus Detailuntersuchung und Sanierungsuntersuchung. In Phase III werden zusätzlich die für die Modellierung bzw. Formulierung der Prognose der Schadstoffentwicklung notwendigen Parameter ermittelt. Am Ende jeder Phase wird aufgrund der Erkundungsergebnisse entschieden, ob es sinnvoll und zielführend ist, das MNA-Konzept weiterzuverfolgen. Nach Abschluss der Erkundung in Phase III ist eine behördliche Entscheidung erforderlich, ob unter Einbeziehung der Verhältnismäßigkeit auf Basis der nachgewiesenen Schadstoffminderungsprozesse, der Prognose der Fahnenentwicklung, der Variantenstudie (Sanierungsuntersuchung) und des vorliegenden mit den Behörden abgestimmten Überwachungsprogramms auf zusätzliche (Sanierungs-) Maßnahmen verzichtet werden kann und MNA in der abschließenden Phase IV umgesetzt werden soll. Diese beinhaltet eine prozessorientierte MNA-spezifische Überwachung und eine Prognoseprüfung (Soll-Ist-Vergleich der Prognose).

Da die Abarbeitung eines MNA-Konzepts ergebnisoffen erfolgt und eine längere Zeit in Anspruch nehmen kann, ist vor Beginn der MNA-Bearbeitung eine Alternativmaßnahme (z. B. technische Sanierungsmaßnahme aus der Variantenstudie der Sanierungsuntersuchung) festzulegen, welche im Falle des Scheiterns von MNA ersatzweise durchgeführt werden soll.

## 1 Phase I – Prüfung der Standortvoraussetzungen und qualitative Abschätzung des NA-Potenzials

In dieser Phase soll mit Hilfe einer NA-spezifischen Erkundung die Bewertung von grundsätzlichen Voraussetzungen zur Umsetzung von MNA (Kap. 2.4 Textteil) sowie eine Einschätzung des NA-Potenzials ermöglicht werden. Dies beinhaltet sowohl die Erkundung der Quelle(n) (gesättigter/ungesättigter Bereich), falls diese nicht vollständig saniert ist/sind, als auch die Erkundung der Schadstofffahne. Dazu ist auch eine ausführliche Recherche und Auswertung aller bereits erhobenen Daten erforderlich (z. B. aus Detailuntersuchung und Sanierungsuntersuchung). Der Bewertung des Fahnenverhaltens, d. h. der Prüfung der Voraussetzung einer quasistationären oder rückschreitenden Fahnenentwicklung, kommt hierbei eine besondere Bedeutung zu. Liegen langjährige Messreihen vor, kann daran die Fahnenentwicklung belegt werden. In sehr einfachen Fällen können auch Analogieschlüsse aus vergleichbaren Standorten bzw. Fallgestaltungen mit in die Bewertung einfließen. Auf eine ausreichende Anzahl, geeignete Lage und Ausbau der Grundwassermessstellen ist zu achten. In komplexen Fällen kann ggf. erst durch

<sup>1</sup> Für die Stoffgruppe PAK sind bei Teerölschäden zusätzlich die NSO-Heterocyclen (NSO-HET) zu betrachten. Hinweise zur Untersuchung und Bewertung von NSO-HET-Kontaminationen finden sich z. B. in Werner et al.(2008) und Kern et al.(2007). Für weitere umweltrelevante Metalle und Halbmetalle können ggf. auch die Ausführungen für Cu und As hilfreich sein. Zusätzliche Hinweise zur Untersuchung und Bewertung von Kontaminationen mit Metallen und Halbmetallen können TU Bergakademie Freiberg (2008) entnommen werden.

ein numerisches (reaktives) Stofftransportmodell (Kap. 3.3 in diesem Anhang) eine belastbare Prognose des Fahrenverhaltens und damit die Eignung des Standortes für MNA belegt werden. Die Entscheidung, ob die **Einhaltung der Quasistationarität** gegeben ist, kann abschließend i. d. R. erst am Ende der Phase III anhand aller Erkundungsergebnisse bzw. der Modellierungsergebnisse getroffen werden.

Hydro(geo)logische und/oder saisonale Einflüsse (z. B. Wasserstandsänderungen, jahreszeitliche Veränderungen der Grundwasserfließrichtung) sind zu berücksichtigen. Es können starke Schwankungen im Verlauf der Schadstoffkonzentrationen an einzelnen Messstellen auftreten oder die Erfassung des Abstroms kann eingeschränkt sein, so dass Trends zum Schadstoffverhalten überlagert werden. Um diese Effekte bei der Interpretation von Daten zu berücksichtigen, müssen diese stets hinsichtlich hydrologischer und saisonaler Einflüsse ausgewertet bzw. diese bei zukünftigen Beprobungen (z. B. durch Auswertung meteorologischer Informationen, Einbau von Drucksonden) miterfasst werden.

## 1.1 Erfassung der Ist-Situation und von Grundlagen zur Erarbeitung einer hydrogeologischen Modellvorstellung

### Ziele der Untersuchungen in Phase I:

- **Detaillierte geologische/hydrogeologische Erfassung und Charakterisierung des Standorts** (sofern nicht aus **Detailuntersuchung vorliegend**) unter Ermittlung der maßgeblichen Kenndaten (Bodenprofilaufnahmen, Probenahme und Untersuchung von Boden, Bodenluft und Grundwasser, Durchführung von analytisch begleiteten Pumpversuchen zur Erfassung hydraulischer Kenndaten)
- **Erkundung der Schadstoffquelle** (soweit nicht vollständig entfernt):
  - Lage, Ausdehnung und Schadstoffspektrum
  - Bestimmung der (Rest-)Schadstoffmasse
  - Mobilität der Schadstoffe (mobil, fixiert, in Phase)
  - Abschätzung des Schadstoffaustrags (Fracht) aus der ungesättigten Bodenzone in das Grundwasser (Sickerwasserprognose: siehe auch Merkblatt 3.8/1, LABO 2006)
  - Abschätzung der Emissionsdauer der jeweiligen Schadstoffe/Schadstoffgruppen
- **Erkundung der Schadstofffahne**:
  - Lage, Ausdehnung und Schadstoffspektrum
  - Ermittlung des Grundwasserchemismus und der Redoxverhältnisse (anhand redoxsensitiver Wasserinhaltsstoffe) jeweils im Zustrom, Schadenszentrum und Abstrom über eine ausreichende Zahl repräsentativer Grundwassermessstellen
  - Identifikation potenzieller Sorbenten
  - Abschätzung des derzeitigen Fahrenverhaltens (rückläufig, quasistationär oder expandierend) sowie von Trends zum Schadstoffverhalten anhand bereits vorliegender Messreihen
- **Erarbeitung einer ersten hydrogeologischen Modellvorstellung**: Zur Beurteilung des Schadstofftransports und möglicher schadstoffmindernder Prozesse im Untergrund ist das Verständnis der hydrogeologischen Situation am Standort und hier insbesondere der Strömungs- und Fließverhältnisse eine wesentliche Voraussetzung insbesondere für die Aufstellung des Hydrogeologischen Modells (HGM, siehe Kap. 2.1 in diesem Anhang).

Bei der Erhebung der hydrogeologischen Verhältnisse, insbesondere bei der Beprobung und Untersuchung von Grundwasser, Boden und Bodenluft sind die Vorgaben in Merkblatt 3.8/1, Merkblatt 3.8/4, Merkblatt 3.8/5 und Merkblatt 3.8/6 sowie die Empfehlungen der DVGW-Richtlinien DVGW W 115 und DVGW W 121 zu beachten.

### Untersuchungen in Phase I:

Der Untersuchungsumfang in Phase I umfasst die jeweiligen Hauptschadstoffe, wobei zunächst grundlegende Informationen zu Schadstoffgehalten, deren Verteilung, dem Vorliegen potenzieller Sorbenten und Kohlenstoffquellen sowie der Redoxchemie zu erheben sind. Die Erfassung möglicher Begleitkontaminanten ist erforderlich, da sie u. a. als Lösungsvermittler, Cosubstrat oder Hemmstoff wirken können.

Die folgende Anhang 2 Tab. 1 stellt mögliche Untersuchungsparameter für die Festphase (Boden-/Aquifermaterial), das Grundwasser und die Bodenluft in Phase I dar. Der Untersuchungsumfang richtet sich nach den vorliegenden Schadstoffen. Die Parameter für die Grundwasseruntersuchungen sollen insbesondere hinsichtlich möglicher Veränderungen auf der Fließstrecke von Zustrom über das Schadenszentrum bis zum Abstrom bewertet werden. Der Untersuchungsumfang ist jeweils an den Einzelfall und die Fragestellung anzupassen.

Anhang 2 Tab. 1: Untersuchung von Boden-/Aquifermaterial, Bodenluft und Grundwasser

Untersuchung	Schadensfall mit Schadstoff					Bemerkungen
	MKW	BTEX	LHKW	PAK	Cu/As	
<b>Untersuchungen von Boden-/Aquifermaterial</b>						
Bodenansprache (bei Verunreinigung in der Bodenzone)	+++	+++	+++	+++	+++	Hydroxidüberzüge/Coatings, C <sub>org.</sub> -, Schluff- und Ton-Gehalt relevant bzgl. Sorption; Durchführung gemäß reduziertem Umfang der Bodenkundlichen Kartieranleitung KA5 (Ad-hoc-Arbeitsgruppe Boden 2005)
Korngrößenverteilung	+++	+++	+++	+++	+++	Ton- und Schluffanteile (relevant bzgl. Sorption), ggf. κf-Wert-Bestimmung; Durchführung mittels Siebung oder Schlämmanalyse
Glühverlust/TOC	++	++	++	++	+ As +++ Cu	Hinweis auf organisches Material; Sorption von Schadstoffen an C <sub>org</sub>
Kaltoxalatlösliche und heißoxalatlösliche bzw. dithionitlösliche Eisen(hydr)oxide					++	Hinweis auf Qualität von Adsorberoberflächen
MKW	+++	++	++	++		ggf. Lösungsvermittler; ggf. zusätzliche C-Quelle
BTEX	++	+++	+	++		ggf. Lösungsvermittler; ggf. zusätzliche C-Quelle
LHKW	++	++	+++	+		ggf. Lösungsvermittler; ggf. zusätzliche C-Quelle
PAK (zzgl. Methylnaphthaline)	++	++		+++		mögl. Begleitkontaminanten

Fortsetzung Anhang 2 Tab. 1

Untersuchung	Schadensfall mit Schadstoff					Bemerkungen
	MKW	BTEX	LHKW	PAK	Cu/As	
Elution mit Wasser (Eluatherstellung) und Analyse des Hauptschadstoffs	++	++	++	++	++	Abschätzung der Mobilität und des wasserlöslichen Anteils
Königwasserextraktion und Analyse des Hauptschadstoffs					++	Gesamtgehalte im Boden- und Aquifermaterial
<b>Untersuchungen der Bodenluft</b>						
Vor-Ort-Parameter O <sub>2</sub> , CO <sub>2</sub> , CH <sub>4</sub> , H <sub>2</sub> S	+++	+++	+++	+++	+	Beprobung aus Grundwassermessstellen möglich; Charakterisierung der Redoxbedingungen
Leichtflüchtige Schadstoffe (MKW (C <sub>5</sub> -C <sub>9</sub> ), BTEX, LHKW)	++	+++	+++	++		Nachweis der Schadstoffe und deren Abbauprodukte (z. B. Vinylchlorid); bei PAK-Schäden können Schadstoffe als Lösungsvermittler fungieren
<b>Untersuchungen des Grundwassers</b>						
Vor-Ort- und Basisparameter zzgl. Redoxpotenzial	+++	+++	+++	+++	+++	Chemische Charakterisierung gemäß Merkblatt 3.8/1
Nitrat	+++	+++	+++	+++	+	Elektronen-Akzeptor, Abnahme zeigt Denitrifikation an
Sulfat	+++	+++	+++	+++	+	Elektronen-Akzeptor, Abnahme zeigt Sulfat-Reduktion an
Sulfid	+	+	++	+	+++	Redox-Anzeiger und Fällung von Cu/As
Mn <sup>II</sup>	+++	+++	+++	+++	++	Redox-Anzeiger, Zunahme zeigt Mangan-Reduktion an
Fe <sup>II</sup>	+++	+++	+++	+++	+++	Redox-Anzeiger, Zunahme zeigt Eisen-Reduktion an
umweltrelevante Metalle und Halbmetalle					+++	
As <sub>ges</sub> : aus ungefilterten, mit 450 nm und 20 nm Filter gefilterten Proben					+++	Ermittlung und Prüfung, in welcher Fraktion As vorliegt (partikulär, gelöst)

Fortsetzung Anhang 2 Tab. 1

Untersuchung	Schadensfall mit Schadstoff					Bemerkungen
	MKW	BTEX	LHKW	PAK	Cu/As	
Phosphat					++	Bindungskonkurrenz für As <sup>V</sup>
MKW	+++	+	+	+		ggf. Lösungsvermittler oder zusätzliche C-Quelle
BTEX	+	+++	+	+		ggf. Lösungsvermittler oder zusätzliche C-Quelle
LHKW			+++			ggf. Lösungsvermittler oder zusätzliche C-Quelle
VC			+++			toxischer Metabolit beim LHKW-Abbau
PAK	+	+		+++		mögl. Begleitkontaminanten
NSO-Heterocyclen				+++		mögl. Begleitkontaminanten

+++ in jedem Fall durchzuführen

++ Durchführung empfohlen

+ zusätzlicher Erkenntnisgewinn

## 1.2 Hinweise auf mikrobiologischen Schadstoffum- bzw. -abbau

Für eine erste qualitative Abschätzung sind die Ermittlung der Redoxzonierung und eine Erhebung der Hinweise auf mikrobielle Stoffwechselprozesse erforderlich. Dazu sind in Phase I die Parameter der hydrochemischen Untersuchung (Anhang 2 Tab. 1) heranzuziehen und zu beurteilen. Mikrobiologisch relevante Untersuchungsparameter für die qualitative Abschätzung des NA-Potenzials können der Anhang 2 Tab. 2 in Ergänzung zu den Grundwasseruntersuchungsparametern (Anhang 2 Tab. 1) entnommen werden. Eine Methode der Abschätzung des aktuellen Abbaus bzw. des NA-Potenzials bei organischen Schadstoffen ist die Bilanzierung der Elektronenakzeptoren und Elektronendonatoren. Daran ist erkennbar, ob für die vorhandenen Schadstoffe und einen mikrobiologischen Abbau theoretisch ausreichend Oxidationsmittel im Grundwasser zur Verfügung stehen. Zu beachten ist, dass der Abbau die gesamte vorhandene Organik (z. B. Huminstoffe) betrifft und daher keine Abbauraten ableitbar sind.

Die Parameter für die Grundwasseruntersuchungen sollen insbesondere hinsichtlich möglicher Veränderungen auf der Fließstrecke von Zustrom über das Schadenszentrum bis zum Abstrom bewertet werden.

Anhang 2 Tab. 2: Mikrobiologisch relevante Untersuchungsparameter im Grundwasser

Untersuchungsparameter	Beschreibung
Temperatur	Signifikante Erhöhung im Abstrom als Hinweis auf mikrobielle Abbauprozesse
Sauerstoff	Elektronen-Akzeptor; geringe Gehalte als Hinweis auf anaerobes Milieu als Folge aerober Abbauprozesse; oxidativer Abbau bei niedrig chlorierten LHKW (VC), MKW, BTEX und PAK, daher häufig limitierender Faktor
Redoxpotenzial (E <sub>h</sub> -Wert)	Feldparameter für Redoxmilieu, typischer Bereich + 800 mV bei aeroben und bis - 400 mV bei methanogenen Bedingungen (pH 7); Messung ist oft unzuverlässig und dient nur der groben Einordnung

Fortsetzung Anhang 2 Tab. 2

<b>Untersuchungsparameter des Grundwassers</b>	<b>Beschreibung</b>
Säurekapazität, DIC	Zunahme als Hinweis auf mikrobiellen Abbau, Hinweis auf Pufferkapazität und Gehalt an gelöstem anorganischen Kohlenstoff (CO <sub>2</sub> , HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> , CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup> )
Nitrat	Elektronen-Akzeptor und Nährstoff, Abnahme als Hinweis auf anaerobe Abbauprozesse
Nitrit	(Zwischen-)Produkt der Nitratreduktion (s. o.) oder der Nitrifizierung
Sulfat	Elektronen-Akzeptor und Nährstoff, Abnahme als Hinweis auf anaerobe Abbauprozesse
Sulfid	Entstehung durch Reduktion von Sulfat, Hinweis auf anaerobe Bedingungen bzw. sulfatreduzierende Zone – nur bei LHKW relevant; ggf. werden Eisen- und/oder sonstige (Halb-)Metallsulfide ausgefällt
Phosphat	Nährstoff, evtl. limitierender Faktor für Mikroorganismenwachstum
Fe <sup>III</sup> , Mn <sup>IV</sup>	in der bioverfügbaren Form unter anaeroben Bedingungen als Elektronen-Akzeptoren
Fe <sup>II</sup> , Mn <sup>II</sup>	Entstehung durch Reduktion, Hinweis auf mikrobielle Abbauprozesse unter anaeroben Bedingungen
Ammonium	Abbauprodukt N-haltiger Verbindungen, Entstehung durch Reduktion von Nitrat unter anaeroben Bedingungen; Nährstoff
Methan*	Entstehung durch Reduktion von CO <sub>2</sub> oder einfachen organischen Verbindungen unter anaeroben Bedingungen, Hinweis auf methanogene, stark reduzierende Bedingungen
Kohlenstoffdioxid*	Endprodukt des mikrobiellen aeroben Abbaus, Elektronen-Akzeptor unter methanogenen Bedingungen
DOC	Organischer Summenparameter; Änderung weist evtl. auf mikrobielle Abbauprozesse hin
Zellzahlbestimmung	Gesamtzellzahl, Vorhandensein von Mikroorganismen mittels DAPI
Toxizitätstest	Hinweise auf Entstehung und Anreicherung toxischer Zwischen-/Abbauprodukte

\* Untersuchung in der Bodenluft



## 2 Phase II – Quantitative Erkundung und Bewertung der schadstoffmindernden Prozesse

Nachdem in Phase I qualitative Hinweise für ein NA-Potenzial ermittelt wurden, sollen in Phase II die Erkenntnisse und das Prozessverständnis so ergänzt und vertieft werden, dass sich die einzelnen schadstoffmindernden Prozesse quantifizieren lassen und Aussagen zu deren Effizienz möglich werden. Außerdem sind ggf. noch nicht hinreichend untersuchte Vorgaben der Standortvoraussetzungen (siehe Kap. 2.4 Textteil) anhand des nachfolgenden Untersuchungsprogramms zu prüfen. Dies betrifft insbesondere die Klärung der beteiligten Prozesse an der Schadstoffminderung und die Unterscheidung zwischen verdünnenden und frachtreduzierenden Prozessen.

### 2.1 Ergänzung der Informationen zur Erfassung der Ist-Situation und zur Erarbeitung des Hydrogeologischen Modells (HGM)

Das HGM ist ein wesentliches Instrument zur Beschreibung und Bewertung der Systemeigenschaften mit Darstellung und Prognose von relevanten Strömungs- und Transportmechanismen sowie zur Emissionsabschätzung (FH-DGG 2002a, 2002b, 2010). Das HGM ermöglicht eine schematisierte Darstellung der geologischen und hydrogeologischen Einflussgrößen und ihrer Zusammenhänge. In ihm sind die wesentlichen Systemeigenschaften im Untersuchungsraum für die Beschreibung und Prognose hydrogeologischer Vorgänge und der damit verbundenen Strömungsvorgänge mit Abschätzung und Prognose des reaktiven Transportverhaltens von Grundwasserverunreinigungen dargestellt (FH-DGG 2002b). Das HGM ist die Grundlage eines für die Prognose (Phase III) notwendigen konzeptionellen Standortmodells bzw. numerischen Modells. Für diese sind weitere Modellparameter mit Hilfe von Labor- oder Feldexperimenten zu ermitteln (siehe Phasen II – III).

Für die Erstellung des HGM sind folgende Informationen einzuholen bzw. die entsprechenden Untersuchungen durchzuführen:

- Geologischer Aufbau mit dreidimensionaler Beschreibung des gesamten Gesteinskörpers hinsichtlich der Lithologie und Lagerungsverhältnisse
- Tiefendifferenzierte Erhebung hydrogeologischer Daten (mit wesentlichen Parametern wie z. B. Durchlässigkeitsbeiwert, Hohlraumanteil, Grundwassergefälle und -strömungsverhältnisse, potenzielle Schadstofffahnen, Vorflutsituation, Beeinflussung durch Geologie sowie tangierende Grundwasserförderung)
- Grundwasserstockwerksbau mit Definition der Wirksamkeit horizontaler Trennschichten
- Wasserhaushaltsbilanzierung mit Abgrenzung der Modell- und Bilanzräume und Bewertung der Mobilität aus Schadstoffquellen im Untersuchungsraum sowie im Grundwasserzu- und -abstrom, insbesondere im Zusammenhang mit Grundwasserkontaminationen und möglichen Prozessen der Schadstoffminderung

Zur Erhöhung des Kenntnisstandes aus Phase I sowie zur Erstellung des HGM sind in Phase II insbesondere für die Erkundung der Fahne folgende Maßnahmen durchzuführen:

- Verdichtung des Messstellennetzes (inkl. Profilaufnahmen, Pumpversuchen etc. mit Funktionsprüfung der Grundwassermessstellen) zur dreidimensionalen Erkundung bzw. Erfassung der gesamten räumlichen Ausdehnung der Schadstofffahne über ausreichende, repräsentative Messstellen im Zustrom, Abstrom und im Schadenszentrum und zur Erstellung von Kontrollebenen (Transecte senkrecht zur Grundwasserfließrichtung) wie folgt:
  - mindestens eine Messstelle im Zustrom in Abhängigkeit von Ausmaß und Lage des Schadenszentrums
  - eine Kontrollebene im nahen Abstrom des Schadenszentrums

- Kontrollebenen im weiteren Abstrom und zusätzlich in einer Entfernung zur Fahnen Spitze, die das Grundwasser in ein bis zwei Jahren zurücklegt
- die Entnahmebereiche der Messstellen in einer Kontrollebene sollen sich überlappen. Jede Kontrollebene muss die Schadstofffahne möglichst vollständig lateral wie vertikal erfassen
- ggf. zur tiefendifferenzierten Grundwasserprobenahme Errichtung von Mehrfach- bzw. Multilevel- oder weiterer Sondermessstellen (z. B. beim Vorliegen mehrerer Grundwasserstockwerke, bei mächtigen Aquiferen sowie ausgeprägt heterogener Sedimentologie)
- Ermittlung der Schadstofffrachten an den jeweiligen Kontrollebenen zur Ermittlung der **Frachtreduktion** und deren Unterscheidung von der **Verdünnung**; geeignet dazu sind die Groundwater Fence- / Transekten-Methode (nähere Ausführungen in Wabbels & Teutsch 2008: Kap. B3.3.2.1.1) oder Immissionspumpversuche (Wabbels & Teutsch 2008: Kap. B3.3.2.1.2, M1.2.1; Ptak et al. 2013). Ziel ist es, die Frage zu klären, ob die Schadstoffreduktion im Wesentlichen durch frachtreduzierende Prozesse (Voraussetzung für die Durchführung von MNA) oder durch verdünnende Prozesse begründet ist. Die Frachtreduktion soll entlang der Fahne durch Ermittlung der Frachtdifferenzen an den einzelnen Kontrollebenen festgestellt werden.
- detaillierte Charakterisierung des Strömungsgeschehens im Grundwasser (FH-DGG 2002b) und dessen zeitliche Schwankungen (z. B. regelmäßige Grundwasserstandmessungen durch den Einbau von Drucksonden zur Ermittlung saisonaler Einflüsse) sowie Überprüfung von Quereinflüssen (ggf. zuströmendes Grundwasser aus unterlagernden Stockwerken, Vorfluteinflüsse etc.)

Je nach Fragestellung des jeweiligen Einzelfalls sind ggf. folgende weitere Untersuchungen durchzuführen:

- Bestimmung der Grundwasserneubildung aus Wasserhaushaltsdaten und meteorologischen Daten (FH-DGG 2002b, 2002a)
- horizontierte Erfassung des Durchlässigkeitsbeiwerts durch Siebung, Bestimmung der Korngrößenverteilung und des Hohlraumanteils (Merkblatt 3.8/5, FH-DGG 2002a)
- Grundwasserherkunfts- und -altersbestimmungen
- geophysikalische Methoden im Bohrloch zur Erfassung von gesteinspezifischen Eigenschaften (z. B. mittels Gamma-Ray- oder Neutronlog)

Bei stark unterschiedlichen  $k_f$ -Werten entlang eines Bohrprofils oder im Fall mächtiger Grundwasserleiter kann es zu Vertikalströmungen in Messstellen kommen (Barczewski et al. 1996). Durch geeigneten Messstellenausbau ist sicherzustellen, dass hierdurch keine Schadstoffverlagerungen erfolgen. Grundsätzlich ist auch sicherzustellen, dass es durch Vertikalströmungen zu keiner Verfälschung der Messergebnisse kommt.

Zeigt das Relief des Grundwasserstauers ausgeprägte morphologische Unterschiede, kann die Kartierung der Staueroberfläche z. B. mittels geophysikalischer Methoden erforderlich sein. Sie liefert Informationen zu kleinräumig abweichenden Fließrichtungen oder Senken, die zu einer Ansammlung von Schadstoffphasen (DNAPL) auf dem Grundwasserstauer führen können.

In Phase II soll die Charakterisierung der Redoxverhältnisse (siehe Anhang 2 Tab. 1 und Anhang 2 Tab. 2) abgeschlossen werden. Bei der Entnahme von Material- oder Grundwasserproben aus Bereichen mit sub- oder anoxischen Bedingungen kann es bei Luftkontakt zu Oxidationsreaktionen kommen. Ist dadurch eine Beeinflussung des methodenspezifischen Untersuchungsziels zu befürchten (z. B. Umwandlung  $As^{III}$  zu  $As^V$ , Ausfällung von Eisen(hydr)oxiden mit Co-Fällung oder Sorption von Schadstoffen), sollte auf eine möglichst anoxische Beprobungsstrategie (z. B. Liner-Bohrung) und – bei Säulen- oder Batchversuchen – einen gasdichten Versuchsaufbau zurückgegriffen werden. Dies ist auch für Untersuchungen in der Phase III (z. B. Mikrokosmenuntersuchungen) zu berücksichtigen.

In Anhang 2 Tab. 3 sind Untersuchungen für Feststoff- und Grundwasserproben zum Schadstoff- und Ausbreitungsverhalten sowie zur quantitativen Abschätzung von Abbauprozessen (über Metaboliten und/oder Isotopenverhältnisse) aufgeführt.

Anhang 2 Tab. 3: Untersuchungsumfang Boden und Grundwasser zum Schadstoff- und Ausbreitungsverhalten

Untersuchungsparameter	Anwendung auf Schäden mit folgenden Schadstoffen	Bemerkung
<b>Untersuchung von Boden-/Aquifermaterial</b>		
Bindungsformen und Mobilität	Cu, As	Sequenzielle Extraktion an Boden- und Aquifermaterial, Untersuchung zur Bewertung des Ausbreitungsverhaltens
<b>Untersuchung des Grundwassers</b>		
Ausbreitungsverhalten	generell	ggf. Nutzung eines vorhandenen inerten Inhaltsstoffs; u. a. zur Abschätzung der Verdünnung
Isotope $^1\text{H}/^2\text{H}$ , $^3\text{H}$ , $^{16}\text{O}/^{18}\text{O}$ (Grundwasser)	generell	Wasserbilanzierung als Bestandteil des HGM (Zuströmen von Fremdwässern, Vorflutern); zuvor Typisierung und Differenzierung verschiedener Wässer durch Vergleich der Hauptkationen und -anionen; Altersdatierung von Grundwässern
Arsenspezies im Grundwasser	As	Mobilität von Arsen
Lösungsverhalten (LNAPL)	MKW, BTEX	Chemische Charakterisierung von aufschwimmenden Phasen
Lösungsverhalten (DNAPL)	LHKW, PAK/NSO-HET (schweres Teeröl)	Chemische Charakterisierung von abgesunkenen Schadstoffphasen
Schadstoffspektrum: Vergleich Schadenszentrum und Grundwasserabstrom	MKW, BTEX, LHKW, PAK/NSO-HET	Hinweis auf mikrobiellen Abbau (Fingerprint, cis-DCE, VC etc.)
Methan	BTEX, LHKW, (MKW)	Hinweis auf geeignete Redoxbedingungen und mögliches Abbaupotenzial; für LHKW stark reduzierende Verhältnisse zum Abbau von PCE erforderlich; Abbauprodukt
Wasserstoff, Ethen, Ethan, VC, cis-DCE	LHKW	VC und Ethen als direkte Metabolite am Ende der Abbaukette; hohe $\text{H}_2$ -Konzentrationen als Hinweis auf geeignete Redoxbedingungen für den Abbau
Organische Säuren	MKW, BTEX	Metabolite des MKW- und BTEX-Um-/Abbaus, Auswahl der zu analysierenden Verbindung nach bekanntem Ausgangsstoff (-gemisch) und zugehörigen Abbauwegen

Fortsetzung Anhang 2 Tab. 3

Untersuchungsparameter	Anwendung auf Schäden mit folgenden Schadstoffen	Bemerkung
PAK-Metabolite	PAK	Auswahl der zu analysierenden Verbindung nach bekanntem Ausgangsstoff (-gemisch) und zugehörigen Abbauprodukten
Isotopenfraktionierung; $\delta^{13}\text{C}$ des Schadstoffs – Fraktionierung der stabilen Kohlenstoff-Isotope	BTEX, LHKW, eingeschränkt PAK (Naphtalin, 2-Methylnaphtalin), MTBE	Qualitative (Nachweis) und ggf. quantitative Bestimmung der mikrobiellen Abbauprozesse; Schadstoffabnahme ohne Fraktionierung im Abstrom ist ein Hinweis auf Verdünnung
Isotopenfraktionierung; $\delta^{34}\text{S}$ , $\delta^{15}\text{N}$ im Grundwasser (Sulfat- und Nitratreduzierende Zonen) – Fraktionierung der stabilen Isotope in Schwefel-/Stickstoffverbindungen	BTEX, LHKW, PAK	Veränderung der Isotopensignatur durch bakterielle Sulfat- und Nitratreduktion (Anreicherungseffekt)

## 2.2 Untersuchungen zum mikrobiologischen Schadstoffabbau

Vertiefend soll das Vorhandensein von Mikroorganismen und Abbauaktivität auch direkt ermittelt und damit Rückschlüsse auf Abbauraten gezogen werden. Unter standortnahen Bedingungen erhobene Abbauraten sind lediglich als Näherungswerte zu betrachten und ermöglichen eine Bewertung des Abbaupotenzials<sup>2</sup> (Anhang 2 Tab. 4).

Anhang 2 Tab. 4: Mikrobiologische Untersuchungen (in Phase II)

Untersuchungsmethode	Anwendung auf Schadensfälle mit den Schadstoffen: MKW, BTEX, PAK, LHKW	Bemerkungen
Most Probable Number (MPN) – Keimzahlbestimmung von spezifischen stoffwechselphysiologischen Mikroorganismengruppen (Grundwasser)	+	Vergleich Anzahl Mikroorganismen im Schadensherd und Anstrom, ggf. unter Simulation der Redoxverhältnisse
Mikrokosmenstudien unter standortnahen Bedingungen im Labor	++	Näherungsweise Bestimmung des Abbaupotenzials und der Abbauaktivität der Mikroorganismen ggf. unter verschiedenen Redoxbedingungen (Erkenntnisse zu Abbauwegen und -raten, zur Toxizität von Schadstoffen und zur räumlichen Verteilung der Mikroorganismenaktivität)
Quantitative Polymerase Chain Reaction (qPCR)	++	Nachweis von spezifischen Mikroorganismen, die ein schadstoffspezifisches Abbaupotenzial haben oder an bestimmte Redoxmilieubedingungen gekoppelt sind sowie die Menge der vorhandenen Mikroorganismen

++ empfohlen

+ zusätzlicher Erkenntnisgewinn

<sup>2</sup> Eine quantitative Bewertung des mikrobiellen Schadstoffabbaus ist durch Nutzung der Isotopenfraktionierung (<sup>13</sup>C) bei BTEX, CKW und MTBE möglich, indem Labor-Mikrokosmen und <sup>13</sup>C-Isotopenuntersuchungen an Labor- und Feldproben durch Parametrisierung des mikrobiologischen Abbaus mit Hilfe der Rayleigh-Gleichung kombiniert werden ((Ertl et al. 2014; Fischer et al. 2006)).

### 3 Phase III – Modellierung und Prognose mit Erstellung des MNA-spezifischen Überwachungsprogramms und behördlicher Entscheidung

In Phase III sollen noch verbliebene Informationsdefizite eliminiert werden, um ein plausibles Prozessverständnis zu erreichen. Wesentlich ist hierbei eine umfassende qualitative und quantitative Beurteilung sowie Unterscheidung der schadstoffmindernden Prozesse (Frachtreduktion/Verdünnung). Die für eine Modellierung und Prognose des Schadstoffverhaltens erforderlichen Eingangsdaten und Modellparameter können auf dieser Grundlage definiert werden.

#### 3.1 Formulierung des Hydrogeologischen Modells

In Phase III ist das HGM abschließend zu formulieren. Es bildet die Grundlage für das konzeptionelle Standortmodell, Grundwasserströmungs-, Transport- und Reaktionsmodell. Gegebenenfalls

- ist die Messstellendichte zur abschließenden Eingrenzung der Fahne bzw. für die MNA-spezifische Überwachung (Phase IV) zu optimieren,
- sind fehlende hydraulische und hydrogeologische Parameter (Stufenpumpversuche, Immissionspumpversuche, Flowmetermessungen etc.) zu erheben sowie
- Grundwasser-Markierungsversuche (konservative Tracer) gemäß DVGW W 109 und Merkblatt 3.1/1 durchzuführen.

#### 3.2 Quantifizierung hydro- und geochemischer sowie mikrobiologischer Prozesse

Die Modelleingangsdaten sind zu vervollständigen. Prozesse wie z. B. Verdünnung, Sorption/Retardation und Transformation sind spätestens im Rahmen der Phase III zu quantifizieren (Anhang 2 Tab. 5). Literaturdaten können hierbei mit einbezogen werden. Aufgrund der räumlichen und zeitlichen Variabilität der erfassten Daten ist eine Aussage über deren Gültigkeitsbereich zu treffen.

Anhang 2 Tab. 5: Ermittlung prozessbestimmender Modellparameter

Prozessbestimmender Modellparameter	Verfahren	zu identifizierende Prozesse	Anwendung auf Schäden mit
Retardationskoeffizient <sup>1)</sup> , Parameter von Sorptionsisothermen (speziell Verteilungskoeffizient); bei Nichtgleichgewicht: Ratenparameter	Säulenversuche	Adsorption, Desorption	PAK, MKW, BTEX, LHKW <sup>2)</sup> , As, Cu
Parameter von Sorptionsisothermen (speziell Verteilungskoeffizient); bei Nichtgleichgewicht: Ratenparameter	Batch-Experimente	Adsorption, Desorption und Einfluss der Redoxbedingungen <sup>3)</sup> auf Schadstoffmobilität	PAK, MKW, BTEX, As, Cu
Hydrodynamische Dispersion (siehe auch Anhang 2 Tab. 3)	Nicht reaktiver Tracer oder inerter Wasserinhaltsstoff	Verdünnung	alle
Eigenschaften unterschiedlicher Schadstoffspezies (Anhang 2 Tab. 3)	siehe Anhang 2 Tab. 3	Chem. Transformation	Anorganische Schadstoffe

<sup>1)</sup> Auswertung mittels inverser Modellierung unter Berücksichtigung der Dispersion

<sup>2)</sup> Einsatz gasdichter Säulenversuchsanlagen

<sup>3)</sup> Untersuchung unterschiedlicher Redoxpotenziale in der Flüssigphase

In dieser Phase können ggf. mikrobiologische Untersuchungen durchgeführt werden (vgl. auch Kap. 2.2 in diesem Anhang), um Abbauewege zu verifizieren, in-situ-nahe Abbauprozesse und -raten für die Modellierung (Prognose) zu erhalten und den mikrobiologischen Abbau direkt (in-situ) nachzuweisen (z. B. Bactraps, siehe Anhang 3). Abbauraten werden benötigt, um die zukünftige Fahnenentwicklung mittels des (numerischen reaktiven Stofftransport-)Modells prognostizieren zu können. Methoden für die in-situ-Ermittlung von Abbauraten sind nach derzeitigem Stand der Technik weder praxisnah verfügbar noch standardisiert bzw. mit hohem Aufwand verbunden. In Anhang 3 ist eine Auswahl von geeigneten, mikrobiologischen Spezialuntersuchungen aufgelistet, die eine bestmögliche Erfassung der Abbauvorgänge ermöglichen.

### 3.3 Modellierung und Prognose

#### 3.3.1 Zielsetzung der Modellierung

Ziel der Modellierung in Phase III ist das Erstellen einer **Prognose zur zukünftigen Entwicklung des Schadstoffverhaltens bzw. der Schadstofffahne** z. B. mittels prognostischer Szenarien (Best-/Worst-Case). Diese Modellierungsergebnisse stellen eine wesentliche **Entscheidungsgrundlage** für oder gegen MNA im Rahmen des MNA-Konzepts dar. Zustandsmerkmale wie die räumliche Ausdehnung der Fahne, Stoffkonzentrationen bzw. Frachten an Messstellen oder Kontrollebenen sollen gegen die Zeit dargestellt werden. Die Prognose soll den gesamten Zeitraum vom derzeitigen Ist-Zustand bis zur Unterschreitung der Stufe-1-Werte gemäß Merkblatt 3.8/1 umfassen. Anhand der Prognoseergebnisse sollen **Prüf- und Bewertungskriterien** für die Durchführung von MNA abgeleitet werden (Kap. 3.5 in diesem Anhang).

Simulationsrechnungen können bereits in einer der vorhergehenden Phasen I und II als Werkzeug zum Verständnis der Einzelprozesse, zum Testen von Hypothesen, zur Einschätzung des Einflusses von Sanierungsmaßnahmen und zur Planung von Erkundungen (z. B. Platzierung von Grundwassermessstellen) eingesetzt werden. Sie können außerdem dazu dienen, über Sensitivitätsanalysen den Einfluss einzelner Modellparameter auf die Schadstoffverlagerung zu beurteilen. Ein indirekter Nachweis des Abbaus von Schadstoffen ist mittels eines Stofftransportmodells möglich, indem die gerechnete Schadstoffausbreitung mit dem Ist-Zustand der Schadstoffverteilung in der Fahne verglichen wird.

Ausschlaggebend für die **Qualität und Verlässlichkeit** der Modellierung ist neben dem für die Fragestellung geeigneten Modell die entsprechende Datengrundlage. Dazu ist frühzeitig (in Phase I oder II) eine enge Verzahnung zwischen Erkundung, Experiment und Modellerstellung zu schaffen. Die erforderliche Datengrundlage kann so vollständig und in der notwendigen Genauigkeit aufgebaut werden. Mit zunehmender Prognosegenauigkeit steigt auch die Wahrscheinlichkeit für die Durchführbarkeit von MNA bis zum Erreichen des Maßnahmenziels (siehe Kap. 3.5 in diesem Anhang). Dabei ist auch zu berücksichtigen, welcher monetäre Aufwand zur Erhöhung der Prognosesicherheit im vorliegenden Einzelfall zielführend ist.

Grundlegende Hinweise zur Modellierung sind Veröffentlichungen und Lehrbüchern zu entnehmen (z. B. Altlastenforum Baden-Württemberg e. V. 2004; DGFZ 2008b; Michels et al. 2008: Kap. 7, LANUV 2010).

#### 3.3.2 Hinweise zur Modellauswahl

Die Prognose zum zukünftigen Schadstoffverhalten soll mittels eines **numerischen Modells** (Grundwasserströmungs-, Transport- und Reaktionsmodell) ermittelt werden. Hiermit kann durch geänderte Randbedingungen (z. B. Änderung des Fließgeschehens durch Baumaßnahmen, Änderung der Grundwasserneubildungsrate und damit Änderung des Eintrages von Elektronenakzeptoren) mittels **Szenarien** die Prognose neu formuliert werden. Das **konzeptionelle Standortmodell** ist die nichtmathematische Vorstufe und Grundlage der numerischen Modellierung. Es beinhaltet das HGM und wird um das Prozess- und Systemverständnis sowie um Zeitreihenanalysen ergänzt. In sehr einfach gelagerten Fällen kann alternativ zum numerischen Modell auch eine verbal-argumentative Prognose auf Basis des **konzeptionellen**



Standortmodells und von Zeitreihenanalysen entwickelt werden. Hierbei ist zu beachten, dass Prognosen nur bei entsprechend langen Messreihen ableitbar sind und eine statistische Absicherung der Messreihen erforderlich ist.

Der Weg vom konzeptionellen Standortmodell über eine Grundwasserströmungs- bis hin zu einer reaktiven Mehrkomponenten-Stofftransportmodellierung stellt stetig wachsende Ansprüche an eine Konkretisierung von Prozessvorstellungen und deren Parametrisierung in Verbindung mit einer steigenden Anzahl erforderlicher Eingangsparameter bei steigender Unsicherheit in Bezug auf das Prognoseergebnis.

### 3.3.3 Umgang mit den Modellierungsergebnissen

Die Modellierungsergebnisse (Prognose) sind eine wesentliche Grundlage für das weitere Vorgehen. Daher sind die Ergebnisse von Modellsimulationen (auch hinsichtlich deren Unsicherheiten) stets kritisch zu hinterfragen und die Ergebnisse sowie die zu Grunde liegenden konzeptionellen Modell- und Prozessvorstellungen auf Plausibilität zu prüfen. Vor diesem Hintergrund kommt der Modellpflege große Bedeutung zu, weil diese den jeweiligen aktuellen Kenntnisstand am Standort einbezieht.

Die geforderte Plausibilitätsprüfung kann z. B. durch den Vergleich des Simulationsergebnisses mit abschätzenden analytischen Berechnungen oder durch Stoffbilanzkontrollen erfolgen. Weiterhin sind für eine Beurteilung des Modellergebnisses prognostische Szenarien mit Hilfe von Best-/Worst-Case-Annahmen hilfreich. Das Modellergebnis sollte auch dahingehend geprüft werden, ob die getroffenen Annahmen zu konservativ oder zu optimistisch gewählt wurden.

## 3.4 Dauer von MNA

Die Dauer von MNA (Phase IV) ergibt sich aus der Prognose des Schadstoffverhaltens und ist daher stark vom Einzelfall abhängig. Nach derzeitiger Einschätzung ist sie in typischen MNA-Fällen im Bereich von mehreren Jahrzehnten zu erwarten. Das Maßnahmenziel soll allerdings in einem überschaubaren Zeitraum erreicht werden (ca. 10 bis 30 Jahre). Lässt die Prognose deutlich längere Zeiträume erwarten und sind noch Restschadstoffmassen vorhanden, sind ggf. weitere technische Maßnahmen durchzuführen (z. B. Dekontamination). Dabei sollen die Zeitdauer der Stationarität der Fahne verringert und eine rückläufige Entwicklung der Fahne und damit auch das Maßnahmenziel zu einem früheren Zeitpunkt erreicht werden.

## 3.5 Festlegung von Prüf- und Bewertungskriterien für die Durchführung von MNA

Ergibt die Bewertung der Modellierung, dass die Standortgegebenheiten eine ausreichende Schadstoffminderung erwarten lassen, sind für die **MNA-spezifische Überwachung** (Phase IV Kap. 3.6 und 4 in diesem Anhang) **Prüf- und Bewertungskriterien** fest zu legen.

Von wesentlicher Bedeutung ist das zu erreichende **Maßnahmenziel**, welches den jeweiligen zu erreichenden Zustand beschreibt, ab dem MNA in Kombination mit einer technischen Sanierung oder ggf. MNA als alleinige Maßnahme beendet werden kann (Kap. 2.3 Textteil). Zudem sollen **Zwischenziele** als Erfolgskontrolle formuliert werden. Nach Beendigung der NA-spezifischen Erkundung (Phase I – III) und anhand der vorliegenden Prognose des Schadstoffverhaltens stehen belastbare Informationen über den Standort zu Verfügung, um im Hinblick auf die ermittelten NA-Prozesse ein in einem überschaubaren Zeitraum erreichbares Maßnahmenziel und entsprechende Zwischenziele festlegen zu können. Die Festlegung soll in Anlehnung an das Merkblatt 3.8/1 erfolgen und ist eng an die behördliche Entscheidung über die Durchführbarkeit von MNA gebunden. Das Maßnahmenziel und die Zwischenziele werden durch die **zu erreichende Konzentration/Fracht** an der entsprechenden **Messstelle/Kontrollebene** konkretisiert.

Die Zeitdauer für MNA ergibt sich aus den oben aufgeführten Kriterien und der Prognose des (nicht beeinflussbaren) Schadstoffverhaltens. **Das Maßnahmenziel soll grundsätzlich innerhalb einer rückläufigen Entwicklung der Schadstofffahne definiert und wiederholt anhand der Prognoseprüfung bestätigt werden.**

Bei Abweichungen vom prognostizierten zum in Phase IV gemessenen Schadstoffverhalten (z. B. für Schadstoffkonzentrationen oder prozessbestimmende Parameter) sind natürliche Schwankungsbereiche zu berücksichtigen. Diese **tolerierbaren Abweichungen** sind auf Grundlage aller Erkenntnisse aus den Phasen I bis III sowie der erstellten Prognose festzulegen.

Zusätzlich sind für den Fall des Nicht-Ereichens des Maßnahmenziels und der Zwischenziele **Abbruchkriterien** festzulegen, an denen die Erforderlichkeit zur Einleitung und Durchführung der zuvor festgelegten **Alternativmaßnahme** (Rückfalloption) zu prüfen ist (siehe Kap. 4.1 in diesem Anhang).

Sofern sich in der Phase III Hinweise ergeben, dass die ermittelten Voraussetzungen für MNA (Kap. 2.4 Textteil) nicht mehr uneingeschränkt gegeben sind (z. B. unerwartetes Auftreten von Schadstoffphase), ist eine Neubewertung der Umsetzung von MNA vorzunehmen.

### 3.6 MNA-spezifisches Überwachungsprogramm

Für die Durchführung von MNA ist die Erarbeitung eines prozessorientierten MNA-spezifischen Überwachungsprogramms erforderlich. Im Rahmen dieses MNA-Programms müssen durch spezifische Beprobungen innerhalb eines **MNA-Zyklus** (siehe Phase IV Kap. 4 in diesem Anhang: Zeitraum zwischen erster Beprobung nach Erstellung der Prognose bzw. letztem MNA-Zyklus und Prognoseprüfung mit Bewertung) alle notwendigen Informationen für die Kontrolle des Schadstoffverhaltens erfasst und durch die bzw. den Pflichtigen im Rahmen der vereinbarten Berichtspflichten als Grundlage für die behördliche Prüfung bewertet werden. Die zu erhebenden Informationen, durchzuführenden Untersuchungen und Kontrollen (einschließlich aller Beprobungspunkte, -methoden und -intervalle) sind in Abstimmung mit der zuständigen Behörde festzulegen. Das Monitoring soll eine **ausreichende Überwachungsintensität** sicherstellen und ein **rechtzeitiges Eingreifen** ermöglichen. Das MNA-Programm soll umso intensiver gestaltet werden, je unsicherer die Prognose ist.

Nachfolgende Festlegungen zum MNA-Überwachungsprogramm sind zu treffen:

- Auswahl der im Monitoring zu messenden **Leitparameter** anhand der vorliegenden Erkenntnisse aus den Phasen I bis III (siehe Kap. 1 bis 3 in diesem Anhang) zur Erfassung des Schadstoffverhaltens – es sind auf den Einzelfall abgestimmte Leitparameter zu berücksichtigen, die außer einer **Konzentrationsverteilung der relevanten Schadstoffe** auch eine **Kontrolle der wesentlichen schadstoffmindernden Prozesse** ermöglichen. Die Erfassung der Leitparameter soll i. d. R. keine aufwändigen Untersuchungen (siehe Phase II und III) beinhalten, sondern soll z. B. mittels hydrochemischer Parameter (Redoxindikatoren: Nitrat, Sulfat, Mangan, Eisen) rechtzeitig Milieuänderungen oder Veränderungen wesentlicher Randbedingungen (z. B. NA-limitierende Faktoren, Verbrauch/Nachlieferung von Elektronenakzeptoren) anzeigen.
- Auswahl der einzubeziehenden Grundwassermessstellen, orientiert an den festgelegten Kontrollebenen – im Bedarfsfall sind im Verlauf des MNA-Programms zusätzliche Grundwassermessstellen zu errichten, die alle notwendigen Anforderungen erfüllen. Grundsätzlich sollen die Messstellen den Zustrom, das Schadenszentrum sowie die Schadstofffahne (horizontal und vertikal), einschließlich der Fahnen spitze erfassen. Zusätzliche Hinweise zur Lage von Messstellen für die Umsetzung von MNA sind u. a. Wiedemeier et al. (1999), Martus & Püttmann (2000) und Michels et al. (2008) zu entnehmen.
- Zeitraum, Anzahl bzw. Intervalle der Beprobungen, die für einen MNA-Zyklus erforderlich sind inkl. Anpassung an die hydrogeologischen und hydrochemischen Verhältnisse, z. B. saisonale Schwankungen, Fließgeschwindigkeiten, zu erwartender Schadstoffabbau und Rückhalt
- Probenahmemethodik

Außerdem soll das Monitoring beinhalten:

- Wasserstandsmessungen zur Kontrolle des Fließgeschehens
- Messung der vor-Ort-Parameter einschließlich Redoxpotenzial und Sauerstoffgehalt
- Überprüfung der Randbedingungen (z. B. Nutzungsänderungen)

Die Überwachung im Rahmen von MNA ist somit i. d. R. wesentlich umfangreicher als ein übliches Monitoring bei Altlasten.

### **3.7 Behördliche Entscheidung über die Durchführung von MNA**

Auf Basis

- der Gefährdungsabschätzung,
- der Variantenstudie technischer Sanierungsmaßnahmen (Sanierungsuntersuchung),
- der MNA-spezifischen Erkundung (Phase I – III),
- der Prognose über die zukünftige Entwicklung der Schadstofffahne und
- des MNA-spezifischen Überwachungsprogramms mit Prüf- und Bewertungskriterien

ist abschließend zu prüfen, ob die notwendigen Voraussetzungen für MNA vorliegen (siehe Kap. 2.4 Textteil).

Liegen die o. g. notwendigen Voraussetzungen vor, ist von der zuständigen Behörde zu entscheiden, ob MNA am Standort als alleinige Maßnahme geeignet ist oder ob MNA in Kombination mit technischen Sanierungsmaßnahmen durchgeführt werden soll. Liegen die notwendigen Voraussetzungen nicht vor, dann ist über alternative Maßnahmen (i. d. R. technische Sanierungsmaßnahmen) zu entscheiden.

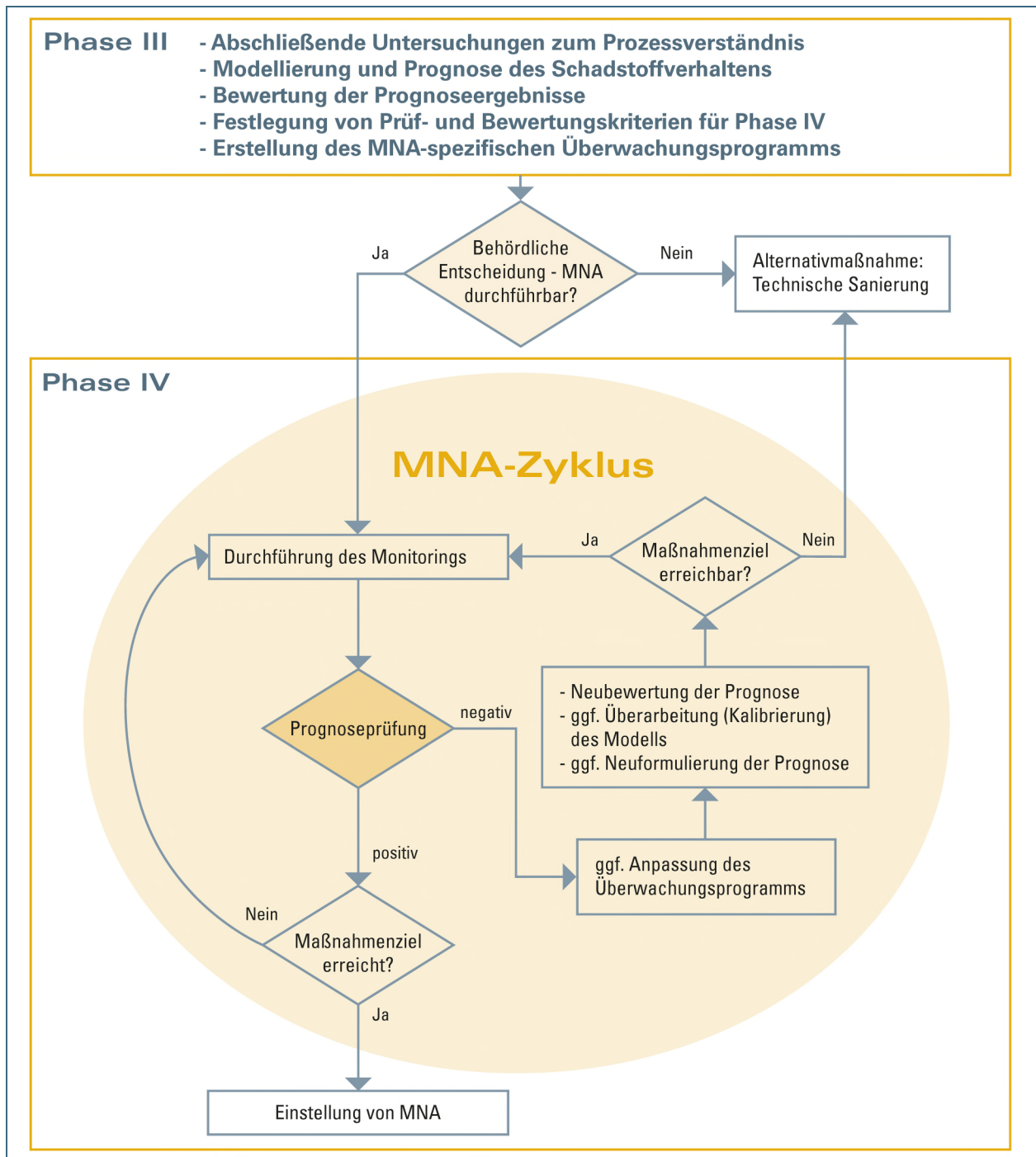
Die Regelungen zur Durchführung der MNA-spezifischen Überwachung, die durch

- das Maßnahmenziel,
- die Zwischenziele,
- die tolerierbaren Abweichungen von der Prognose,
- das MNA-spezifische Überwachungsprogramm,
- die Abbruchkriterien und
- die ggf. durchzuführende Alternativmaßnahme

beschrieben werden, müssen im MNA-Konzept verbindlich festgelegt werden.

#### 4 Phase IV – MNA-spezifische Überwachung mit Vergleich und Überprüfung der Prognose

Die Beobachtung des Schadstoffverhaltens in-situ und der Nachweis der dauerhaften Wirksamkeit der Schadstoffminderungsprozesse erfolgt mittels des erstellten prozessorientierten **MNA-spezifischen Überwachungsprogramms** (Kap. 3.6 in diesem Anhang) in **MNA-Zyklen**. Jeder Zyklus umfasst das eigentliche Monitoring mit **Messung des Schadstoffverhaltens**, die **Prognoseprüfung** sowie das Vorgehen bei nicht tolerablen Abweichungen von der Prognose (Anhang 2 Abb. 1).



Anhang 2 Abb. 1: Fließschema für die MNA-spezifische Überwachung (Phase IV)

#### 4.1 Prognoseprüfung

Die Prognoseprüfung erfolgt auf Basis der im Überwachungsprogramm ermittelten Monitoringergebnisse und ist in jedem MNA-Zyklus durchzuführen. Dabei wird das prognostizierte mit dem im Überwachungsprogramm gemessenen Schadstoffverhalten verglichen (Soll-Ist-Vergleich). Dieser Prüfschritt beinhaltet auch eine **Bewertung der Entwicklung der Schadstofffahne** und der relevanten schadstoffmindernden Prozesse. Einzubeziehungen ist hierbei auch die **Überprüfung des numerischen Modells bzw. des konzeptionellen Standortmodells**. Anhand des Ergebnisses der Prognoseprüfung unter Berücksichtigung der festgelegten tolerablen Abweichungen von der Prognose soll geprüft werden, ob mit MNA das festgelegte Maßnahmenziel erreicht werden kann bzw. das Maßnahmenziel und/oder das Zwischenziel erreicht wurde.

Wird die Prognose bestätigt (Prognoseprüfung positiv), beginnt gemäß dem vereinbarten MNA-Überwachungsprogramm der nächste MNA-Zyklus. Bei sich ändernden Randbedingungen kann auch bei Bestätigung der Prognose eine Überarbeitung des Modells erforderlich sein.

Im Falle der **Nicht-Einhaltung des prognostizierten Schadstoffverhaltens** (Prognoseprüfung negativ) und **Überschreitung der tolerablen Abweichungen** ist die nachfolgend beschriebene Vorgehensweise eine Entscheidungsgrundlage, ob MNA weiter zielführend ist und das Maßnahmenziel mit MNA erreichbar ist oder die zuvor vereinbarte Alternativmaßnahme (z. B. technische Sanierung aus der Variantenstudie der Sanierungsuntersuchung) als Rückfalloption durchzuführen ist.

1. **Anpassung des Überwachungsprogramms**, um eventuelle Einflüsse auf das Prozessgeschehen (z. B. Milieuänderungen) festzustellen.

- Verdichtung des Beprobungsnetzes
- Verkürzung des Beprobungsintervalls
- Erweiterung des Parameterumfangs

2. **Neubewertung der Prognose des Schadstoffverhaltens**

- Sind die bei der Erstellung der Prognose getroffenen fachlichen Annahmen nach wie vor gültig (z. B. Schadstoffrelevanz, hydraulische und hydrochemische Parameter, räumliche Verbreitung etc.)?
- Treffen die prognostizierten Abschätzungen bezüglich des Schadstoffabbaus zu?
- Ist die räumliche Ausdehnung der Schadstoffe im Untergrund unverändert bzw. rückläufig?
- Sind weitere standortspezifische Erkenntnisse bekannt geworden (z. B. neue Schadstoffquellen)?

3. **Neuformulierung der Prognose des Schadstoffverhaltens**, einschließlich einer **Nachkalibrierung** bzw. generellen Überarbeitung des Modells und ggf. **Anpassung des zukünftigen Überwachungsprogramms**

4. **Prüfung und Entscheidung durch die Behörde**, ob MNA weiterhin zielführend ist oder MNA durch **Sanierungsmaßnahmen zu ergänzen bzw. abzulösen** ist (Alternativmaßnahme); dabei ist auch zu berücksichtigen, ob die überarbeitete Prognose zeigt, dass das Maßnahmenziel erreichbar ist.

#### 4.2 Einstellung von MNA

Falls die Bewertung der Monitoringergebnisse (z. B. Abweichung von der Prognose, geänderte Randbedingungen, Erfüllung von Abbruchkriterien) ergibt, dass **MNA am Standort nicht zielführend** ist, ist die vorher festgelegte Alternativmaßnahme (i. a. technische Sanierungsmaßnahmen) durchzuführen.

Tritt das prognostizierte Schadstoffverhalten ein und **das festgelegte Maßnahmenziel wird dauerhaft erreicht bzw. unterschritten**, ist von der zuständigen Behörde das Maßnahmenende festzustellen und die Entlassung aus dem Altlastenkataster vorzunehmen.

## 5 Literaturverzeichnis

Die aktuellen Merkblätter können im Internet unter [www.lfu.bayern.de](http://www.lfu.bayern.de) heruntergeladen werden.

Ad-hoc-Arbeitsgruppe Boden [Hrsg.] (2005): Bodenkundliche Kartieranleitung, Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe in Zusammenarbeit mit den Staatlichen Geologischen Diensten der Bundesrepublik Deutschland, 5. Aufl. Hannover, Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung (in Komm.), 438 S.

Altlastenforum Baden-Württemberg e. V. [Hrsg.] (2004): Checkliste für Grundwassermodelle im Altlastenbereich, Herausgegeben vom Arbeitskreis Grundwassermodelle, Stuttgart.

Barczewski, B.; Kritzner, W.; Nitsche, C. (1996): Tiefenorientierte Grundwasserprobennahme zur Messung der Wasserbeschaffenheit, Wasserwirtschaft, 85, 1, S. 446–451.

DGFZ, Dresdner Grundwasserforschungszentrum e. V. [Hrsg.] (2008a): Leitfaden Umgang mit abfallablagerungsverursachten Gewässerschäden und Gefahrensituationen unter Berücksichtigung der Wirkungen natürlicher Rückhalte- und Abbau-Prozesse, BMBF Förderschwerpunkt KORA, Themenverbund 4 - Deponien, Altablagerungen, Dresden.

DGFZ, Dresdner Grundwasserforschungszentrum e. V. [Hrsg.] (2008b): Synopse Systemanalyse, Modellierung und Prognose der Wirkungen natürlicher Schadstoffminderungsprozesse – eine rezente Synopse, BMBF-Förderschwerpunkt KORA, Themenverbund 7 - Modellierung, Prognose, Dresden.

DVGW W 109:2005-12: Planung, Durchführung und Auswertung von Markierungsversuchen bei der Wassergewinnung.

DVGW W 115:2008-07: Bohrungen zur Erkundung, Beobachtung und Gewinnung von Grundwasser.

DVGW W 121:2003-07: Bau und Ausbau von Grundwassermessstellen.

Ertl, S.; Heidinger, M.; Sakaguchi-Söder, K.; Tiehm, A.; Schmidt, K.; Kranzloch, I.; Eichinger, F. (2014): Neue Isotopenmethoden: Chlor-, Kohlenstoff- und Wasserstoff - Isotopie bei der Bearbeitung von CKW-Schäden, TerraTech, 1, S. 12–16.

FH-DGG, Fachsektion Hydrogeologie in der Deutschen Geologischen Gesellschaft [Hrsg.] (2002a): Das Hydrogeologische Modell als Basis für die Bewertung von Monitored Natural Attenuation bei der Altlastenbearbeitung, Ein Leitfaden für Auftraggeber, Ingenieurbüros und Fachbehörden in der Grundwasserwirtschaft, Hannover, Schriftenreihe der Deutschen Gesellschaft für Geowissenschaften, Heft 23.

FH-DGG, Fachsektion Hydrogeologie in der Deutschen Geologischen Gesellschaft [Hrsg.] (2002b): Hydrogeologische Modelle - Ein Leitfaden mit Fallbeispielen, Hannover, Schriftenreihe der Deutschen Gesellschaft für Geowissenschaften, Heft 24.

FH-DGG, Fachsektion Hydrogeologie in der Deutschen Geologischen Gesellschaft [Hrsg.] (2010): Hydrogeologische Modelle: Bedeutung des hydrogeologischen a-priori-Wissens, Hannover, Schriftenreihe der Deutschen Gesellschaft für Geowissenschaften, Heft 70.

Fischer, A.; Stelzer, N.; Eisenmann, H.; Richnow, H. H. (2006): Nachweis des mikrobiellen Schadstoffabbaus in Grundwasserleitern, TerraTech, 1-2, S. 14–17.

Grandel, S.; Dahmke, A. (2008): Leitfaden Natürliche Schadstoffminderungsprozesse bei LCKW-kontaminierten Standorten - Methoden, Empfehlungen und Hinweise zur Untersuchung und Beurteilung, BMBF Förderschwerpunkt KORA, Themenverbund 3 - Chemische Industrie, Metallverarbeitung, Christian-Albrechts-Universität zu Kiel.

Joos, A.; Knackmuss, H. J.; Spyra, W. (2008): Leitfaden Natürliche Schadstoffminderung bei sprengstofftypischen Verbindungen, BMBF-Förderschwerpunkt KORA, Themenverbund 5 - Rüstungsaltslasten, I-ABG mbH [Hrsg.], Berlin.



Kern, F.; Möhser, H.; Reinhard, M.; Sagner, A.; Sorg, K.-P.; Tiehm, A. (2007): NSO-Heterozyklen, Vorkommen, Analytik, Beurteilung - Hinweise für die Praxis, Altlastenforum Baden-Württemberg, Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung (in Komm.), Stuttgart, Schriftenreihe Altlastenforum Baden-Württemberg e.V, Heft 12, 32 S.

LABO, Bund-/Länderarbeitsgemeinschaft Bodenschutz [Hrsg.] (2006): Arbeitshilfe Sickerwasserprognose bei Detailuntersuchungen, mit redaktionellen Anpassungen 12/2008, Altlastenausschuss, Unterausschuss Sickerwasserprognose.

LANUV, Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz Nordrhein-Westfalen [Hrsg.] (2010): Hinweise zur Erstellung und Beurteilung von Grundwassermodellen im Altlastenbereich, LANUV-Arbeitsblatt 12, Recklinghausen, 161 S.

LfU, Bayerisches Landesamt für Umwelt [Hrsg.] (2023): Merkblatt 3.8/1, Untersuchung und Bewertung von Altlasten und schädlichen Bodenveränderungen - Wirkungspfad Boden-Grundwasser.

LfU, Bayerisches Landesamt für Umwelt [Hrsg.] (2023): Merkblatt 3.8/4, Probenahme von Boden und Bodenluft bei Altlasten und schädlichen Bodenveränderungen - Wirkungspfade Boden-Mensch und Boden-Grundwasser.

LfU, Bayerisches Landesamt für Umwelt [Hrsg.] (2023): Merkblatt 3.8/5, Untersuchung von Boden- und Bodenluftproben sowie Eluaten bei Altlasten und schädlichen Bodenveränderungen - Wirkungspfade Boden-Mensch und Boden-Grundwasser.

LfU, Bayerisches Landesamt für Umwelt [Hrsg.] (2023): Merkblatt 3.8/6, Entnahme und Untersuchung von Wasserproben bei Altlasten, schädlichen Bodenveränderungen - Wirkungspfad Boden-Grundwasser.

LfW, Bayerisches Landesamt für Wasserwirtschaft [Hrsg.] (2002): Merkblatt 3.1/1, Hinweise für die Durchführung und die Begutachtung von Markierungsversuchen in Gewässern.

Martus, P.; Püttmann, W. (2000): Anforderungen bei der Anwendung von „Natural Attenuation“ zur Sanierung von Grundwasserschadensfällen, Altlasten Spektrum, 2, S. 87–106.

Michels, J.; Stuhmann, M.; Frey, C.; Koschitzky, H.-P. (2008): Handlungsempfehlungen mit Methodensammlung, Natürliche Schadstoffminderung bei der Sanierung von Altlasten, BMBF-Förderschwerpunkt KORA, VEGAS, Institut für Wasserbau, Universität Stuttgart, DECHEMA e.V. Frankfurt, 363 S.

Ptak, T.; Kirchholtes, H.; Hiesl, E.; Holder, T.; Rothschenk, P.; Hekel, U.; Beer, H.-P.; Ertel, T.; Herold, M.; Koschitzky, H.-P. (2013): Grundwasserabstromerkundung mittels Immissionspumpversuchen, Aktualisierung, Stand der Technik, Planung, Implementierung, Anwendungsstrategien, Altlastenforum Baden-Württemberg, Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung (in Komm.), Stuttgart, Schriftenreihe Altlastenforum Baden-Württemberg e.V, Heft 16, 47 S.

TU Bergakademie Freiberg [Hrsg.] (2008): Leitfaden Natürliche Schadstoffminderungsprozesse an großräumigen Bergbaukippen/-halden und Flussauensedimenten - Empfehlungen zur Untersuchung und Bewertung der natürlichen Quelltermminimierung, BMBF-Förderschwerpunkt KORA, Themenverbund 6 - Bergbau und Sedimente, Freiberg, 152 S.

Wabbels, D.; Teutsch, G. (2008): Leitfaden Natürliche Schadstoffminderungsprozesse bei mineralölkontaminierten Standorten, BMBF-Förderschwerpunkt KORA, Themenverbund 1 - Raffinerien, Tanklager, Kraftstoffe/Mineralöl, MTBE, Eberhard Karls Universität Tübingen, Zentrum für Angewandte Geowissenschaften (ZAG), Tübingen, 222 S.

Werner, P.; Börke, P.; Hüßers, N. (2008): Leitfaden Natürliche Schadstoffminderung bei Teerölaltlasten, BMBF-Förderschwerpunkt KORA, Themenverbund 2 - Gaswerke, Kokereien, Teerverarbeitung, (Holz-) Imprägnierung, TU Dresden, Schriftenreihe des Institutes für Abfallwirtschaft und Altlasten, Band 58, 270 S.



Wiedemeier, T. H.; Rifai, H. S.; Newell, C. J.; Wilson, J. T. (1999): Natural attenuation of fuels and chlorinated solvents in the subsurface, John Wiley & Sons, New York, 617 S.

## **Anhang 3: Methodische Hinweise**

### **Inhaltsverzeichnis**

<b>1</b>	<b>Einführung</b>	<b>43</b>
<b>2</b>	<b>Methoden zur Untersuchung schadstoffmindernder Prozesse</b>	<b>44</b>
<b>3</b>	<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>53</b>

## 1 Einführung

In diesem Anhang sind tabellarisch praxistaugliche Methoden zur Untersuchung schadstoffmindernder Prozesse in den Phasen I bis III (vgl. Anhang 2) zusammengestellt. Für die einzelnen Methoden werden ergänzende Beschreibungen, Zielsetzungen, Schadstoffanwendungsspektren sowie Bemerkungen und Vorschläge zu deren Anwendung in den Bearbeitungsphasen (I – III) angegeben. Dabei handelt es sich überwiegend um Methoden, die in der normalen Altlastenerkundung nur untergeordnet zum Einsatz kommen und zu denen zum Teil wenige Erfahrungen vorliegen. Methoden, die einer bestimmten Phase zugeordnet sind, können je nach Fragestellung auch in einer anderen Phase angewendet werden.

Untersuchungsverfahren unterliegen einer ständigen Entwicklung. Die Auswahl der aufgeführten Methoden sowie die ergänzenden Hinweise zeigen den derzeitigen Stand der MNA-Untersuchungspraxis, erheben aber keinen Anspruch auf Vollständigkeit. Die Auswahl und Anwendung der Untersuchungsmethoden ist immer vom Einzelfall und der jeweiligen Zielsetzung abhängig.

Einige der Untersuchungsverfahren wurden im Rahmen des BMBF Förderschwerpunkts „KORA“ und des Bayerischen Forschungsverbundvorhabens „Nachhaltige Altlastenbewältigung unter Einbeziehung des natürlichen Reinigungsvermögens“ (BayFoNR) erprobt bzw. angewendet. Detaillierte Methodenbeschreibungen können den KORA-Handlungsempfehlungen mit Methodensammlung (Michels et al. 2008) entnommen werden. In die hier vorliegende Methodenzusammenstellung sind auch aktuelle Erfahrungen von Ingenieurbüros eingeflossen.

Auf die ausführliche Darstellung von herkömmlichen Untersuchungs- bzw. Standardmethoden zur Beprobung und Untersuchung von Boden, Bodenluft und Grundwasser wird verzichtet und auf Merkblatt 3.8/4, Merkblatt 3.8/5 und Merkblatt 3.8/6 bzw. andere Arbeitshilfen verwiesen.

## 2 Methoden zur Untersuchung schadstoffmindernder Prozesse

Methoden	Kurze Beschreibung der Methode	Zielsetzung	Schadstoffe	Phase	Bemerkung
<b>Charakterisierung der Hydrochemie und Geochemie</b>					
Bewertung redoxsensitiver Parameter und Ermittlung der Redoxzonierung im Grundwasser	Bestimmung von Sauerstoff, Nitrat, Nitrit, Ammonium, Fe <sup>III</sup> , Fe <sup>II</sup> , Mn <sup>IV</sup> , Mn <sup>II</sup> , Sulfat, Sulfid, Methan	Bewertung des Abbaupotenzials: Information über die Randbedingungen des Abbaus; Verfügbarkeit von Elektronen-Akzeptoren (Sauerstoff, Nitrat, Fe <sup>III</sup> , Mn <sup>IV</sup> , Sulfat) Entstehung von Respirationsprodukten (Nitrit, Ammonium, Fe <sup>II</sup> , Mn <sup>II</sup> , Sulfid, Methan)	MKW, BTEX, PAK, LHKW	I	Standarduntersuchung; kein allgemeiner Rückschluss auf Schadstoffabbau hinsichtlich ganzer Stoffgruppen möglich
		Rückschluss auf bestimmte Schadstoffspezies durch Redoxzonierung; Abschätzung des Sorptionsverhaltens von Metallen und Halbmetallen (abhängig davon in welcher Form das Metall vorliegt); unter sulfidischen Verhältnissen Möglichkeit der Fällung von (Halb-)Metallsulfiden	M/HM	I	
Redox-Milieu-Detektorband (RMD)	Beschreibung des Redoxmilieus durch Stabilitätsfelder von Mineralphasen; Einhängen von mit redoxsensitiven Farbpigmenten besetzten Detektorbändern in Messstellen; längerfristiger Verbleib; Reaktion der redoxsensitiven Pigmente je nach Redoxmilieu und Entwicklung eines charakteristischen Farbmusters	vertikale und hochauflösende Erfassung der Reduktionszonen im Grundwasser	MKW, BTEX, PAK, LHKW, M/HM	II	anspruchsvolle Interpretation; nur bei ausgeprägter Redoxzonierung; nur qualitativ auswertbar; Detektion von 4 Redox-Milieu zonen (Mn <sup>II</sup> -oxidierend bis Sulfat-reduzierend/methanogen)

Methoden	Kurze Beschreibung der Methode	Zielsetzung	Schadstoffe	Phase	Bemerkung
Isotopenuntersuchung $\delta^{34}\text{S}$ , $\delta^{15}\text{N}$	Untersuchung der Isotopenanreicherung von Elektronenakzeptoren	Nachweis der jeweiligen Redoxprozesse und Redoxzonen insbesondere bei Überlagerung anthropogener Einflüsse	MKW, BTEX, PAK, LHKW, M/HM	II – III	
$K_{oc}$ -Methode Abschätzung der Retardation anhand $K_{oc}$ und $C_{org}$	Abschätzung der Sorptionsneigung organischer Schadstoffe an organischem Bodenmaterial anhand des schadstoffspezifischen $K_{oc}$ ( $C_{org}$ /Wasser-Verteilungskoeffizienten)	Abschätzung der Retardation (Adsorption) des organischen Schadstoffs im Aquifer	MKW, BTEX, PAK, LHKW	I – II	große Bandbreite der $K_{oc}$ -Literaturwerte, daher im Sinne einer kostengünstigen Abschätzung, ggf. Worst-/Best-Case Betrachtung; $C_{org}$ -Gehalte aus verschiedenen Aquiferbereichen erforderlich; die nicht-lineare Adsorption, die Adsorptionskinetik und Stoffgemische werden nicht berücksichtigt; ggf. Eingangparameter für die Modellierung (Retardationsfaktor bzw. $K_d$ -Wert)
Batchversuch zur Ermittlung von Adsorptions- und Desorptionsparametern		Ermittlung der Retardation / verzögerten (Wieder-)Freisetzung der Schadstoffe	MKW, BTEX, PAK, LHKW, M/HM	II – III	Eingangparameter für die Modellierung des Schadstoffverhaltens; ggf. Überschätzung der Sorption; nur für Einzelstoffe; Unterbindung biologischer Prozesse beachten
Säulenversuch zur Ermittlung von Adsorptions- und Desorptionsparametern		Versuch der in-situ-nahen Ermittlung der Retardation / verzögerten (Wieder-)Freisetzung der Schadstoffe; ggf. auch Betrachtung von Stoffgemischen möglich	MKW, BTEX, PAK, LHKW, M/HM	III	Eingangparameter für die Modellierung des Schadstoffverhaltens; für belastbare Ergebnisse sind hohe Ansprüche an die Qualitätssicherung und die Sachkunde der Untersuchenden zu stellen; Unterbindung biologischer Prozesse beachten

Methoden	Kurze Beschreibung der Methode	Zielsetzung	Schadstoffe	Phase	Bemerkung
Sequenzielle Extraktion von Metallen/Halbmعادallen aus Boden-/Aquifermaterial	Abfolge von Extraktionen mit zunehmend stärkeren Extraktionsmitteln und jeweilige Bestimmung der freigesetzten Menge an Metallen/Halbmعادallen	Bestimmung der vorliegenden Bindungsformen/-stärke; Abschätzung der Verfügbarkeit bzw. Adsorption/Desorption einzelner Metalle/Halbmعادalle	M/HM	II – III	halbquantitative Abschätzung der an bestimmten Bodenbestandteilen gebundenen Metalle möglich
Bestimmung von Eisen(hydr)oxiden	<ul style="list-style-type: none"> <li>• kaltoalatlösliches Eisen (DIN 19684-6) = Geringkristalline Eisen(hydr)oxide</li> <li>• heißoxalatlösliches Eisen (Fischer &amp; Fechter 1982) = Kristalline Eisen(hydr)oxide bzw. gesamte pedogene Eisen(hydr)oxide</li> <li>• dithionitlösliches Eisen (DIN EN ISO 12782-2) = Kristalline Eisen(hydr)oxide bzw. gesamte pedogene Eisen(hydr)oxide</li> </ul>	Bewertung der Qualität der kristallinen Fe-Phasen als potenzielle Adsorber für Metalle und Halbmعادalle (z. B. für As und Cu)	M/HM	II – III	
<b>Charakterisierung der Quelle und Fahne</b>					
Schlauchkernbohrung (Linerbohrung)	Bohrkern wird beim Bohren durch einen Kunststoffschlauch bzw. eine Kunststoffhülle umhüllt	Gewinnung von ungestörtem Bodenmaterial mit Schutz vor Sauerstoff- und Wasserzutritt sowie Entgasung für mikrobiologische, bodenphysikalische und chem. Untersuchungen	MKW, BTEX, PAK, LHKW, M/HM	I	sehr gute Probenqualität; Möglichkeit der Beprobung von fließenden Sedimenten; Lagerung und Beprobung ggf. unter Sauerstoffabschluss und/oder Tiefkühlen; zusätzliche Erläuterungen im Merkblatt 3.8/4
Direct Push Sondierung	Sondierung zur in-situ-Bestimmung von Schadstoffgehalten und Redoxparametern; Sondierung zur Entnahme von Boden-, Grundwasser- und/oder Schadstoffproben	detaillierte tiefendifferenzierte Erkundung der Quelle und Fahne	MKW, BTEX, PAK, LHKW, M/HM	I – II	siehe auch Merkblatt 3.8/4 und Merkblatt 3.8/6

Methoden	Kurze Beschreibung der Methode	Zielsetzung	Schadstoffe	Phase	Bemerkung
Direct Push Sondierung (Fortsetzung)	LIF (Laserinduzierte Fluoreszenzspektroskopie) zur Ermittlung der Tiefenverteilung von Schadstoffen; Direkterfassung von PAK; verschiedene Systeme/ Handelsnamen, z. B.: <ul style="list-style-type: none"> <li>• ROST™ (Rapid Optical Screening Tool)</li> <li>• TarGOST® (Tar-specific Green Optical Screening Tool)</li> <li>• UVOST® (Ultra-Violet Optical Screening Tool)</li> </ul>	Direkterfassung von PAK; zur vertikalen und horizontalen Eingrenzung von Schadstoffzonen: neben PAK auch MKW und BTEX möglich über sekundäre PAK-Verunreinigungen	PAK, (MKW, BTEX)	I – II	Erfassen von Schadstoffen in Phase möglich
	MIP (Membrane Interface Probe) zur Probenahme leichtflüchtiger organischer Verbindungen und Analyse vor Ort (an der Oberfläche) mittels verschiedener Sensoren: <ul style="list-style-type: none"> <li>• PID (Photo Ionization Detector)</li> <li>• FID (Flame Ionization Detector)</li> <li>• DELCD (Dry Electrolytic Conductivity Detector)</li> </ul>	Direkterfassung leichtflüchtiger Schadstoffe	MKW, BTEX, LHKW	I – II	aufgrund des Schadstofftransports im Inneren der Sonde anfällig für Verschleppungen
Beprobung von Grundwassermessstellen	<u>tiefenspezifisch einfach verfilterte Grundwassermessstelle</u> Messstelle mit einem tiefenspezifischen Filterbereich	tiefenspezifische Grundwasserbeprobung für Erkundung und Monitoring	MKW, BTEX, PAK, LHKW, M/HM	I – II, IV	zur gezielten Beprobung bestimmter Tiefenbereiche bevorzugen
	<u>vollständig verfilterte Grundwassermessstelle</u> Messstelle mit durchgehendem Filterbereich über die gesamte erschlossene Aquifermächtigkeit	tiefenorientierte Grundwasserbeprobung für Erkundung und Monitoring	MKW, BTEX, PAK, LHKW, M/HM	I – II, IV	erlauben in erster Linie eine tiefenintegrierte Aussage zur Grundwasserbeschaffenheit



Methoden	Kurze Beschreibung der Methode	Zielsetzung	Schadstoffe	Phase	Bemerkung
Beprobung von Grundwassermessstellen (Fortsetzung)  Ausführungen zum Bau und Ausbau von Grundwassermessstellen, deren Einsatzmöglichkeiten sowie zur Durchführung der Probenahme siehe Merkblatt 3.8/6, DVGW W 121 sowie DIN 38402-13 und AQS - Merkblatt P-8/2	<u>Messstellengruppe</u> mehrere Messstellen in getrennten Bohrungen mit einem tiefenspezifischen Filterbereich	tiefenspezifische Grundwasserbeprobung für Erkundung und Monitoring	MKW, BTEX, PAK, LHKW, M/HM	I – II, IV	für die Beprobung unterschiedlicher Tiefenbereiche bevorzugen
	<u>mehrfach verfilterte Messstelle</u> Messstelle mit mehreren durch Vollrohrstrecken getrennten Filterbereichen	tiefenorientierte Grundwasserbeprobung für Erkundung und Monitoring	MKW, BTEX, PAK, LHKW, M/HM	I – II, IV	tiefenorientierte Probenahme mittels Packersystem und ggf. Schutzbeprobung möglich (siehe unten); Umläufigkeiten, Vertikalströmung und Verschleppung von Schadstoffen möglich
	<u>Messstellenbündel</u> mehrere Messstellen in einem Bohrlöcher eingerichtet, jedoch in unterschiedlichen Tiefen verfiltert	tiefenorientierte Grundwasserbeprobung für Erkundung und Monitoring	MKW, BTEX, PAK, LHKW, M/HM	I – II, IV	wegen der schwierig einzubauenden Abdichtungen und der damit verbundenen Gefahr hydraulischer Kurzschlüsse für die Altlastenerkundung nicht geeignet
	<u>Sondermessstellen</u> z. B. Multilevelmessstelle	tiefenorientierte Grundwasserbeprobung für Erkundung und Monitoring	MKW, BTEX, PAK, LHKW, M/HM	I – II, IV	
Beprobung von mehrfach verfilterten Messstellen bzw. Sondermessstellen mit Hilfe von Packersystemen	<u>Doppelpacker</u> Probenahme mittels Pumpe in einem durch zwei Packer begrenzten Bereich der Messstelle (vollverfiltert oder mehrfach verfiltert)	tiefenorientierte Grundwasserbeprobung für Erkundung und Monitoring	MKW, BTEX, PAK, LHKW, M/HM	I – II, IV	geringer Aufwand, bessere Ergebnisse bei mehrfach verfilterten Messstellen und Tonsperren im Ringraum; ggf. mit Schutzbeprobung
	<u>Mehrfachpacker mit Blindrohren</u> Probenahme mit Packersystem (verschiedener Bauart) aus mehreren Filterabschnitten mittels Pumpenkette	tiefenorientierte Grundwasserbeprobung für Erkundung und Monitoring	MKW, BTEX, PAK, LHKW, M/HM	I – II, IV	Erfassung der Anströmprofile über Flowmeter-Messungen empfehlenswert; bessere Ergebnisse bei mehrfach verfilterten Messstellen und Tonsperren im Ringraum

Methoden	Kurze Beschreibung der Methode	Zielsetzung	Schadstoffe	Phase	Bemerkung
Beprobung von mehrfach verfilterten Messstellen bzw. Sondermessstellen mit Hilfe von Packersystemen (Fortsetzung)	<u>Multi(level)-Packersysteme</u> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Multilevel-Scheibenpacker: Trennung der zu beprobenden Bereiche über Dichtungsscheiben</li> <li>• Multilevel-Schlauchpacker: Abpackern der gesamten Messstelle</li> </ul>	tiefenorientierte Grundwasserbeprobung für Erkundung und Monitoring	MKW, BTEX, PAK, LHKW, M/HM	I – II, IV	hohe Anzahl an Probenahmehorizonten; Probenahme sehr aufwändig
Tracerversuch	Hinweise zur Durchführung: Merkblatt 3.1/1 und DVGW W 109	Nachweis der Strömungsverhältnisse; Kalibrierung des numerischen Modells; in-situ-Ermittlung der Modelleingangsdaten (Advektion, Dispersion, durchströmbarer Hohlraumanteil etc.)	MKW, BTEX, PAK, LHKW, M/HM	II – III	
Immissionspumpversuch	Erfassung des schadstoffbelasteten Abstroms durch Pumpmaßnahmen an mehreren Brunnen über einen längeren Zeitraum; Messung der Konzentrationsganglinien während des Versuchs und entsprechende programmgestützte Auswertung; Hinweise zur Durchführung: Wabbers & Teutsch (2008): Kap. B3.3.2.1.2, M1.2.1; Ptak et al. (2013)	Bestimmung von Schadstofffrachten an Kontrollebenen (Abgrenzung Frachtreduktion zu Verdünnung) und Informationen über die Fahnenlage	MKW, BTEX, PAK, LHKW, M/HM	II – III	aufwändig; Störung der natürlichen Redoxzonierung; bei Grundwasserleitern mit geringer Durchlässigkeit nicht sinnvoll
Groundwater Fence / Transekten-Ansatz	entlang einer Kontrollebene werden sowohl vertikal als auch horizontal in einem dichten Raster Schadstoffkonzentrationen und spezifische Grundwasserflüsse gemessen, die dann anhand eines Polygonnetzes auf die Kontrollebenenfläche interpoliert werden	Bestimmung von Schadstofffrachten an Kontrollebenen (Abgrenzung Frachtreduktion zu Verdünnung)	MKW, BTEX, PAK, LHKW, M/HM	II – III	aufwändig; aufgrund der meist sehr heterogenen Schadstoffverteilung ist ein enges Raster an Beprobungspunkten notwendig, um eine verlässliche Aussage zur Schadstofffracht zu erhalten

Methoden	Kurze Beschreibung der Methode	Zielsetzung	Schadstoffe	Phase	Bemerkung
<b>Beurteilungshilfen und Nachweismethoden zum mikrobiellen Abbau</b>					
Erstellen einer Elektronenakzeptoren-/ Elektronendonatoren-Bilanz – stöchiometrische Betrachtung	Betrachtung der für den Schadstoffabbau theoretisch verfügbaren Elektronenakzeptoren in Bezug auf die vorhandene Schadstoffmenge; spezifisch für jede Redoxzone getrennt durchführen	Abschätzung des aktuellen Abbaus bzw. des Abbaupotenzials	MKW, PAK, BTEX	I – II	nicht schadstoffspezifisch; neben Betrachtung im Grundwasser ggf. auch an Aquifermaterial gebundenes bioverfügbares Fe <sup>III</sup> bzw. Mn <sup>IV</sup> ; Abbau betrifft die gesamte vorhandene Organik (z. B. Huminstoffe), daher keine Abbauraten ableitbar
stöchiometrische Verhältnisse von Ausgangsstoffen und Metaboliten	Vergleich der Stoffmengen von primären LHKW-Spezies zu deren Metaboliten (z. B. VC)	Nachweis und Abschätzung des Abbaus	LHKW	II	
Bestimmung von Um- und Abbauprodukten (Metaboliten)	Bestimmung von Metaboliten, die einem spezifischen Abbauweg bzw. einem Schadstoff zugeordnet werden können	Nachweis des Abbaus	PAK, BTEX	II	Metaboliten müssen bekannt, ausreichend stabil und analytisch gut nachweisbar sein
Toxizitätstest (z. B. Leuchtbakterientest)	Abschätzung der Toxizität von Schadstoffen und deren Abbauprodukten im Aquifer	Abschätzung, ob in-situ-Abbau möglich ist	MKW, BTEX, PAK, LHKW	II	Aussagekraft ist eingeschränkt wegen Empfindlichkeit des Tests und der unspezifischen Wirkweise (Biolumineszenz)
Respirationsversuche	einfacher summarischer Nachweis der Aktivität vorhandener Mikroorganismen; Verschiedene Methoden z. B.: <ul style="list-style-type: none"> <li>• Manometrischer Respirationstest gemäß OECD 301 F (OECD 1992)</li> <li>• DIN EN ISO 9408</li> </ul>	Nachweis von mikrobieller Aktivität am Standort	MKW, BTEX, PAK, LHKW	II	keine Aussage möglich, ob Schadstoffe um-/abgebaut werden

Methoden	Kurze Beschreibung der Methode	Zielsetzung	Schadstoffe	Phase	Bemerkung
DAPI-Färbung	Anfärbung der Mikroorganismen-DNA mit 4,6-Diamidino-2-phenyl-indoldihydrochlorid (DAPI) und Auswertung mittels Fluoreszenzmikroskopie	Anhaltspunkte zum Vorhandensein von Mikroorganismen (ohne Aussage über deren Art und Aktivität); i. Allg. Vergleich zwischen Zustrom, Schadenszentrum und Abstrom; Erkennen aktiver Abbau-Zonen bzw. Zonen mit toxischen Effekten	MKW, BTEX, PAK, LHKW	II	unspezifisch; oft in Verbindung mit Bestimmung der Mikroorganismenzellzahl oder mit der Bestimmung der aeroben Gesamtkeimzahl; Aussagekraft umstritten
Most probable number (MPN) – Keimzahlbestimmung	Bestimmung der Keimzahl in Wasserproben aus den unterschiedlichen charakteristischen Redoxzonen	Nachweis und Quantifizierung von physiologischen Mikroorganismengruppen am Standort unter unterschiedlichen Rand-/Redoxbedingungen	MKW, BTEX, PAK	II	nicht schadstoffspezifisch; teilweise relativ lange Inkubationszeit; Aussagekraft umstritten
Quantitative Polymerase Chain Reaction (qPCR)	Bestimmung von am Abbau und an Redoxprozessen beteiligten Mikroorganismen und Enzymen	molekularbiologischer Nachweis abbaubarer Mikroorganismen (schadstoffspezifisch) und Charakterisierung mikrobiologischer Gemeinschaften zur Ermittlung von Milieubedingungen sowie die Menge der vorhandenen Mikroorganismen	LHKW, BTEX, (MKW, PAK)	II – III	für MKW und PAK noch in der Erforschung
Labor-Mikrokosmen	Abbauversuche unter Laborbedingungen mit möglichst unveränderten Proben vom Standort (Grundwasser und/oder Sediment)	Bestimmung der Aktivität bzw. des Abbaupotenzials der Mikroorganismen unter standortähnlichen oder aber definierten, für den Standort relevanten Bedingungen (z. B. Zusatz von Elektronenakzeptoren oder zusätzlichen C-Quellen)	MKW, BTEX, PAK, LHKW	II – III	aufwändig; ggf. lange Versuchszeiträume für schwer abbaubare Substanzen; Ableitung von Parametern für die Modellierung möglich, aber keine in-situ-Abbauraten bestimmbar (insbesondere anaerob), daher für Modellierung im Sinne einer Best- und Worst-Case-Betrachtung verwenden

Methoden	Kurze Beschreibung der Methode	Zielsetzung	Schadstoffe	Phase	Bemerkung
Isotopenuntersuchung <sup>12</sup> C/ <sup>13</sup> C	Bestimmung des Abbauverhaltens und der Abbauraten mittels der durch mikrobiellen Abbau verursachten Verschiebung der Isotopensignatur	Quantifizierung und direkter Nachweis des mikrobiologischen Abbaus	BTEX, LHKW, (PAK)	II – III	Voraussetzungen: Quelle muss eindeutig und homogen sein, Fraktionierungsfaktoren müssen bekannt sein, ausreichendes Konzentrationsgefälle in Fließrichtung; für LHKW- und BTEX-Schäden viel Praxiserfahrung; bei Molekülen mit mehr als 12 C-Atomen ist Fraktionierung kaum nachweisbar; Erfahrungen bei der Auswertung und Interpretation der Ergebnisse erforderlich
In-situ-Mikrokosmen (Bactraps)	Ausbringen von Mikrokosmen mit isotoopenmarkierten Schadstoffen im Grundwasser vor Ort; Bestimmung des in-situ-Abbaus anhand der Anreicherung von <sup>13</sup> C-markiertem C in der Biomasse	Quantifizierung und direkter Nachweis des mikrobiologischen Abbaus unter nahezu in-situ-Bedingungen	BTEX, PAK, LHKW	II – III	aufwändig in Durchführung, Auswertung und Interpretation der Ergebnisse

### 3 Literaturverzeichnis

Die aktuellen Merkblätter können im Internet unter [www.lfu.bayern.de](http://www.lfu.bayern.de) heruntergeladen werden.

DIN 19684-6:1997-12: Bodenuntersuchungsverfahren im Landwirtschaftlichen Wasserbau - Chemische Laboruntersuchungen - Teil 6: Bestimmung des Gehaltes an oxalatlöslichem Eisen.

DIN 38402-13:2021-12: Deutsche Einheitsverfahren zur Wasser-, Abwasser- und Schlammuntersuchung - Allgemeine Angaben (Gruppe A) - Teil 13: Planung und Durchführung der Probenahme von Grundwasser (A 13).

DIN EN ISO 9408:1999-12: Wasserbeschaffenheit - Bestimmung der vollständigen aeroben biologischen Abbaubarkeit organischer Stoffe im wässrigen Medium über die Bestimmung des Sauerstoffbedarfs in einem geschlossenen Respirometer, Deutsche Fassung EN ISO 9408:1999.

DIN EN ISO 12782-2:2012-09: Bodenbeschaffenheit - Parameter zur geochemischen Modellierung der Elution und Speziation von Bestandteilen in Böden und Materialien - Teil 2: Extraktion von kristallinen Eisenoxiden und -hydroxiden mittels Dithionit, Deutsche Fassung EN ISO 12782-2:2012.

DVGW W 109:2005-12: Planung, Durchführung und Auswertung von Markierungsversuchen bei der Wassergewinnung.

DVGW W 121:2003-07: Bau und Ausbau von Grundwassermessstellen.

Fischer, W. R.; Fechter, H. (1982): Analytische Bestimmung und Fraktionierung von Cu, Zn, Pb, Cd, Ni und Co in Böden und Unterwasserböden, Zeitschrift für Pflanzenernährung und Bodenkunde, 145, 2, S. 151–160.

LAWA, Bund-/Länderarbeitsgemeinschaft Wasser [Hrsg.] (1995): AQS - Merkblatt P-8/2, Probenahme von Grundwasser.

LfU, Bayerisches Landesamt für Umwelt [Hrsg.] (2023): Merkblatt 3.8/4, Probenahme von Boden und Bodenluft bei Altlasten und schädlichen Bodenveränderungen - Wirkungspfade Boden-Mensch und Boden-Grundwasser.

LfU, Bayerisches Landesamt für Umwelt [Hrsg.] (2023): Merkblatt 3.8/5, Untersuchung von Boden- und Bodenluftproben sowie Eluaten bei Altlasten und schädlichen Bodenveränderungen - Wirkungspfade Boden-Mensch und Boden-Grundwasser.

LfU, Bayerisches Landesamt für Umwelt [Hrsg.] (2023): Merkblatt 3.8/6, Entnahme und Untersuchung von Wasserproben bei Altlasten, schädlichen Bodenveränderungen - Wirkungspfad Boden-Grundwasser.

LfW, Bayerisches Landesamt für Wasserwirtschaft [Hrsg.] (2002): Merkblatt 3.1/1, Hinweise für die Durchführung und die Begutachtung von Markierungsversuchen in Gewässern.

Michels, J.; Stuhmann, M.; Frey, C.; Koschitzky, H.-P. (2008): Handlungsempfehlungen mit Methodensammlung, Natürliche Schadstoffminderung bei der Sanierung von Altlasten, BMBF-Förderschwerpunkt KORA, VEGAS, Institut für Wasserbau, Universität Stuttgart, DECHEMA e.V. Frankfurt, 363 S.

OECD, Organisation for Economic Co-operation and Development [Hrsg.] (1992): Test No. 301 F: Ready Biodegradability - Manometric Respirometry, Paris, OECD Publishing, OECD Guidelines for the Testing of Chemicals, Section 3, 62 S.

Ptak, T.; Kirchholtes, H.; Hiesl, E.; Holder, T.; Rothschink, P.; Hekel, U.; Beer, H.-P.; Ertel, T.; Herold, M.; Koschitzky, H.-P. (2013): Grundwasserabstromerkundung mittels Immissionspumpversuchen, Aktualisierung, Stand der Technik, Planung, Implementierung, Anwendungsstrategien, Altlastenforum Baden-Württemberg, Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung (in Komm.), Stuttgart, Schriftenreihe Altlastenforum Baden-Württemberg e.V, Heft 16, 47 S.

Wabbels, D.; Teutsch, G. (2008): Leitfaden Natürliche Schadstoffminderungsprozesse bei mineralölkontaminierten Standorten, BMBF-Förderschwerpunkt KORA, Themenverbund 1 - Raffinerien, Tanklager, Kraftstoffe/Mineralöl, MTBE, Eberhard Karls Universität Tübingen, Zentrum für Angewandte Geowissenschaften (ZAG), Tübingen, 222 S.



## Anhang 4: Abkürzungsverzeichnis

### Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Schadstoffe, Substanzen und Summenparameter</b>	<b>56</b>
<b>2</b>	<b>Sonstige</b>	<b>57</b>
<b>3</b>	<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>59</b>

## 1 Schadstoffe, Substanzen und Summenparameter

As	Arsen
As <sub>ges</sub>	Arsen, gesamt
As <sup>III</sup>	Arsen, dreiwertig
As <sup>V</sup>	Arsen, fünfwertig
BTEX	leichtflüchtige aromatische Kohlenwasserstoffe: Benzol, Toluol, Ethylbenzol, Xylole
C	Kohlenstoff
<sup>12</sup> C, <sup>13</sup> C	stabile Kohlenstoffisotope; ( <sup>12</sup> C 98,9 %, <sup>13</sup> C 1,1 %)
C <sub>org</sub> -Gehalt	Gehalt an organischem Kohlenstoff
CH <sub>4</sub>	Methan
cis-DCE	cis-1,2-Dichlorethen
CKW	Chlorierte Kohlenwasserstoffe
CO <sub>2</sub>	Kohlenstoffdioxid
CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup>	Carbonat-Ion
C-Quelle	Kohlenstoffquelle
Cu	Kupfer
DAPI	4,6-Diamidino-2-phenylindoldihydrochlorid
DIC	Dissolved Inorganic Carbon – gelöster anorganischer Kohlenstoff
DNAPL	Flüssigkeiten, die nicht mit Wasser mischbar sind und deren Dichte größer ist als die von Wasser ( <u>d</u> ense <u>n</u> on <u>a</u> queous <u>p</u> hase <u>l</u> iquids)
DOC	Dissolved Organic Carbon – gelöster organisch gebundener Kohlenstoff
Fe	Eisen
Fe <sup>II</sup>	Eisen, zweiwertig
Fe <sup>III</sup>	Eisen, dreiwertig
H <sub>2</sub>	Wasserstoff
<sup>1</sup> H, <sup>2</sup> H, <sup>3</sup> H	Wasserstoffisotope; Wasserstoff (stabil, 99,9885 %), Deuterium (stabil, 0,0115 %), Tritium (radioaktiv)
H <sub>2</sub> S	Schwefelwasserstoff
HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	Hydrogencarbonat-Ion
KW	Kohlenwasserstoffe
LHKW	Summe leichtflüchtiger Halogenkohlenwasserstoffe: Summe der halogenierten C- und C <sub>2</sub> -Kohlenwasserstoffe; einschließlich Trihalogenmethane
LNAPL	Flüssigkeiten, die nicht mit Wasser mischbar sind und deren Dichte kleiner ist als die von Wasser und eine aufschwimmende Phase bilden ( <u>l</u> ight <u>n</u> on <u>a</u> queous <u>p</u> hase <u>l</u> iquids)
M/HM	umweltrelevante Metalle und Halbmetalle
MKW	Mineralölbasierte Kohlenwasserstoffe
MKW C <sub>5</sub> -C <sub>9</sub>	Summe der mineralölbasierten C <sub>5</sub> – C <sub>9</sub> -Kohlenwasserstoffe

MKW C <sub>10</sub> -C <sub>40</sub>	Summe der mineralölbasierten Kohlenwasserstoffe, die zwischen n-Dekan (C <sub>10</sub> ) und n-Tetracontan (C <sub>40</sub> ) von der gaschromatografischen Säule eluieren
MTBE	Methyl-Tertiär-Butyl-Ether
Mn	Mangan
Mn <sup>II</sup>	Mangan, zweiwertig
Mn <sup>IV</sup>	Mangan, vierwertig
<sup>15</sup> N	stabiles Stickstoffisotop (0,366 %)
N-haltig	stickstoffhaltig
NSO-HET	NSO-Heterocyclen
O <sub>2</sub>	Sauerstoff
<sup>16</sup> O, <sup>18</sup> O	stabile Sauerstoffisotope; ( <sup>16</sup> O 99,762 %, <sup>18</sup> O 0,2 %)
PAK	Summe der 16 EPA-polycyclischen aromatischen Kohlenwasserstoffe (PAK) ohne Naphthalin und Methylnaphthaline sowie ohne NSO-Heterocyclen
PCE	Perchlorethen (Tetrachlorethen)
RMD	Redox-Milieu-Detektorband
<sup>34</sup> S	stabiles Schwefelisotop (4,21 %)
TOC	Total Organic Carbon – gesamter organischer Kohlenstoff
VC	Vinylchlorid

## 2 Sonstige

BayFoNR	Bayerisches Forschungsverbundvorhaben – Nachhaltige Altlastenbewältigung unter Einbeziehung des natürlichen Reinigungsvermögens (2001-2003); siehe auch: Hahnauer et al. (2006), Marczinek et al. (2006), Prechtel et al. (2006), Rüttinger et al. (2006), Webert & Hauck (2006); <a href="http://www.altlasten-bayern.de/projekte/verbundvorhaben-na">http://www.altlasten-bayern.de/projekte/verbundvorhaben-na</a> (Abruf am 25. Juli 2023)
DELCD	Dry Electrolytic Conductivity Detector
ENA	Enhanced Natural Attenuation
FID	Flammenionisationsdetektor
GC	Gaschromatografie
HGM	Hydrogeologisches Modell
K <sub>d</sub>	Sorptionskoeffizient
k <sub>r</sub>	Durchlässigkeitsbeiwert
K <sub>oc</sub>	C <sub>org</sub> /Wasser-Verteilungskoeffizient
KORA	Förderschwerpunkt KORA – Kontrollierter natürlicher Rückhalt und Abbau von Schadstoffen bei der Sanierung kontaminierter Grundwässer und Böden (2002-2008); gefördert vom Bundesministerium für Bildung und Forschung
LIF	Laserinduzierte Fluoreszenzspektroskopie

MX.X.X	in KORA erprobte und angewendete Methode; in Michels et al. (2008) im Methodenverzeichnis aufgeführt
MIP	Membran Interface Probe
MNA	Monitored Natural Attenuation
MPN	Most Probable Number
NA	Natural Attenuation
OECD	Organisation for Economic Co-operation and Development
PID	Photoionisationsdetektor
qPCR	Quantitative Polymerase Chain Reaction
ROST™	Rapid Optional Screening Tool
TarGOST®	Tar-specific Green Optical Screening Tool
UVOST®	Ultra-Violet Optical Screening Tool

### 3 Literaturverzeichnis

Hanauer, T.; Rüde, T. R.; Rietzler, J.; Wohnlich, S.; Stichler, W. (2006): Natürliche Schadstoffrückhalteprozesse für Arsen und Kupfer am Standort einer ehemaligen Buntfarbenfabrik, Grundwasser, 11, 3, S. 194–206.

Marczinek, S.; Schäfer, W.; Peiffer, S. (2006): Identifizierung und Quantifizierung natürlicher Abbauprozesse in einem mit Chlorethenen kontaminierten Grundwasserleiter, Grundwasser, 11, 3, S. 207–216.

Michels, J.; Stuhmann, M.; Frey, C.; Koschitzky, H.-P. (2008): Handlungsempfehlungen mit Methodensammlung, Natürliche Schadstoffminderung bei der Sanierung von Altlasten, BMBF-Förderschwerpunkt KORA, VEGAS, Institut für Wasserbau, Universität Stuttgart, DECHEMA e.V. Frankfurt, 363 S.

Prechtel, A.; Bitterlich, S.; Radu, F.; Knabner, P. (2006): Natural Attenuation: Hohe Anforderungen an die Modellsimulation, Grundwasser, 11, 3, S. 217–225.

Rüttinger, S.; Breiter, R.; Hirsch, K.; Salaices Avila, M. A.; Tobschall, H. J.; Neeße, T.; Bayer, M. (2006): Natural Attenuation-Untersuchungen an einem mit LCKW kontaminierten Altdeponiestandort, Grundwasser, 11, 3, S. 184–193.

Webert, M.; Hauck, T. (2006): Bayerisches Forschungsverbundvorhaben „Nachhaltige Altlastenbewältigung unter Einbeziehung des natürlichen Reinigungsvermögens“, Grundwasser, 11, 3, S. 179–183.

---

**Impressum:**

**Herausgeber:**  
Bayerisches Landesamt für Umwelt (LfU)  
Bürgermeister-Ulrich-Straße 160  
86179 Augsburg  
Telefon: 0821 9071-0  
E-Mail: [poststelle@lfu.bayern.de](mailto:poststelle@lfu.bayern.de)  
Internet: [www.lfu.bayern.de](http://www.lfu.bayern.de)

**Bearbeitung:**  
LfU, Referat 96

**Bildnachweis:**  
LfU, Albrecht Jahn

**Stand:**  
September 2023

Diese Publikation wird kostenlos im Rahmen der Öffentlichkeitsarbeit der Bayerischen Staatsregierung herausgegeben. Jede entgeltliche Weitergabe ist untersagt. Sie darf weder von den Parteien noch von Wahlwerbern oder Wahlhelfern im Zeitraum von fünf Monaten vor einer Wahl zum Zweck der Wahlwerbung verwendet werden. Dies gilt für Landtags-, Bundestags-, Kommunal- und Europawahlen. Missbräuchlich ist während dieser Zeit insbesondere die Verteilung auf Wahlveranstaltungen, an Informationsständen der Parteien sowie das Einlegen, Aufdrucken und Aufkleben parteipolitischer Informationen oder Werbemittel. Untersagt ist gleichfalls die Weitergabe an Dritte zum Zweck der Wahlwerbung. Auch ohne zeitlichen Bezug zu einer bevorstehenden Wahl darf die Publikation nicht in einer Weise verwendet werden, die als Parteinahme der Staatsregierung zugunsten einzelner politischer Gruppen verstanden werden könnte. Den Parteien ist es gestattet, die Publikation zur Unterrichtung ihrer eigenen Mitglieder zu verwenden.

Das Werk ist urheberrechtlich geschützt. Alle Rechte sind vorbehalten. Die publizistische Verwertung der Veröffentlichung – auch von Teilen – wird jedoch ausdrücklich begrüßt. Bitte nehmen Sie Kontakt mit dem Herausgeber auf, der Sie – wenn möglich – mit digitalen Daten der Inhalte und bei der Beschaffung der Wiedergaberechte unterstützt.

Diese Publikation wurde mit großer Sorgfalt zusammengestellt. Eine Gewähr für die Richtigkeit und Vollständigkeit kann dennoch nicht übernommen werden. Für die Inhalte fremder Internetangebote sind wir nicht verantwortlich.



BAYERN | DIREKT ist Ihr direkter Draht zur Bayerischen Staatsregierung. Unter Tel. 0 89 12 22 20 oder per E-Mail unter [direkt@bayern.de](mailto:direkt@bayern.de) erhalten Sie Informationsmaterial und Broschüren, Auskunft zu aktuellen Themen und Internetquellen sowie Hinweise zu Behörden, zuständigen Stellen und Ansprechpartnern bei der Bayerischen Staatsregierung.