

Merkblatt Nr. 3.8/3

Stand: 30. Juni 2015

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

Ansprechpartner: Referat 96

Anhang 3: Methodische Hinweise

Anhang 3: Methodische Hinweise

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 angewandt 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 die LfU-/LfW-Merkblätter 3.8/4, 3.8/5 und 3.8/6 bzw. andere Arbeitshilfen verwiesen.

Methoden	Kurze Beschreibung der Methode	Zielsetzung	Schadstoffe	Phase	Bemerkung
Charakterisierung der Hydrochemie und Geochemie					
Bewertung redoxsensitiver Parameter und Ermittlung der Redoxzonierung im Grundwasser	Bestimmung von Sauerstoff, Nitrat, Nitrit, Eisen(III), Eisen(II), Mangan(IV), Mangan(II), Sulfat, Sulfid, Methan	Bewertung des Abbaupotenzials: Information über die Randbedingungen des Abbaus; Verfügbarkeit von Elektronen-Akzeptoren (Sauerstoff, Nitrat, Eisen(III), Mangan(IV), Sulfat) Entstehung von Respirationsprodukten (Nitrit, Eisen(II), Mangan(II), 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 Schwer- und Halbmetallen (abhängig davon in welcher Form das Metall vorliegt)	SM, 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, SM, HM	II	anspruchsvolle Interpretation; nur bei ausgeprägter Redoxzonierung; nur qualitativ auswertbar; Detektion von 4 Redox-Milieuzonen (Mangan(II)-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	alle	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 $K_{oc} = C_{org}/\text{Wasser-Verteilungskoeffizienten}$	Abschätzung der Retardation (Adsorption) des organischen Schadstoffes im Aquifer	MKW, BTEX, PAK, LHKW	I–II	große Bandbreite der K_{oc} -Literaturwerte, daher im Sinne einer kostengünstigen Abschätzung, ggf. Worst-/Bestcase Betrachtung; C_{org} -Gehalte aus verschiedenen Aquiferbereichen erforderlich; die nicht-lineare Adsorption, die Adsorptionskinetik und Stoffgemische werden nicht berücksichtigt; ggf. Eingangsparameter 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, SM, HM	II–III	Eingangsparameter 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, SM, HM	III	Eingangsparameter 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
Sequenzielle Extraktion von Schwer- / Halbmetallen aus Boden-/Aquifermaterial	Abfolge von Extraktionen mit zunehmend stärkeren Extraktionsmitteln und jeweilige Bestimmung der freigesetzten Menge an Metallen	Bestimmung der vorliegenden Bindungsformen / -stärke Abschätzung der Verfügbarkeit bzw. Adsorption / Desorption einzelner Schwer- / Halbmetalle	SM, HM	II–III	Halbquantitative Abschätzung der an bestimmten Bodenbestandteilen gebundenen Metalle möglich

Methoden	Kurze Beschreibung der Methode	Zielsetzung	Schadstoffe	Phase	Bemerkung
Bestimmung von Eisenoxiden	I) kaltoxalatlösliche Fe-Oxide (DIN 19684-6) = Geringkristalline Eisenoxide und -hydroxide II) heißoxalatlösliche Fe-Oxide (FISCHER ET AL. 1982) = Kristalline Eisenoxide bzw. gesamte pedogene Eisenoxide III) dithionitlösliche Fe-Oxide (MEHRA ET AL. 1958) = Kristalline Eisenoxide bzw. gesamte pedogene Eisenoxide	Bewertung der Qualität der kristallinen Fe-Phasen als potenzielle Adsorber für Metalle und Halbmetalle (z. B. für As und Cu)	SM, HM	II–III	
Charakterisierung der Quelle und Fahne					
Schlauchkernbohrung (Linerbohrung)	Bohrkern wird beim Bohren durch einen Kunststoffschlauch bzw. eine Kunststoffhülse umhüllt	Gewinnung von ungestörtem Bodenmaterial mit Schutz vor Sauerstoff- und Wasserzutritt sowie Entgasung für mikrobiologische, bodenphysikalische und chem. Untersuchungen	alle	I	sehr gute Probenqualität; Möglichkeit der Entnahme von fließenden Sedimentproben; Lagerung und Beprobung ggf. unter Sauerstoffabschluss und/oder Tiefkühlen; zusätzliche Erläuterungen im LFU-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	alle	I–II	Siehe auch LFU-MERKBLATT 3.8/6; Überblick zu Direct-Push-Verfahren in LEVEN ET AL. (2010)

Methoden	Kurze Beschreibung der Methode	Zielsetzung	Schadstoffe	Phase	Bemerkung
Direct Push Sondierung	LIF (Laserinduzierte Fluoreszenzspektroskopie) zur Ermittlung der Tiefenverteilung von Schadstoffen; Direkterfassung von PAK verschiedene Systeme / Handelsnamen, z. B.: - ROST (Rapid Optical Screening Tool) - TarGOST (Tar Specific Green Optical Screening Tool) - UVOST (Ultraviolet Optical Screening Tool)	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: - PID (Photo Ionization Detector) - FID (Flame ionization detector) - DELCD (Dry Electrolytic Conductivity Detector)	Direkterfassung leichtflüchtiger Schadstoffe	MKW, BTEX, LHKW	I–II	aufgrund des Schadstofftransports durch die Sonde, anfällig für Verschleppungen
mehrfach verfilterte Messstelle	Messstellen mit mehreren durch Vollrohrstrecken getrennte Filterbereichen; Probenahme mittels Packer-Systeme	tiefendifferenzierte Grundwasserbe- probung für Erkundung und Monitoring	alle	I–II, IV	Vertikalströmungen möglich (Gefahr der Schadstoffverschleppung)
Messstellenbündel	mehrere Messstellen, die in einem Bohrloch eingerichtet, jedoch in unterschiedlich tiefen Bereichen verfiltert sind	tiefendifferenzierte Grundwasserbe- probung für Erkundung und Monitoring	alle	I–II, IV	wegen der schwierig einzubauenden Abdichtungen und der damit verbundenen Gefahr hydraulischer Kurzschlüsse sollte diese Ausbauphase nur in Ausnahmefällen zum Einsatz kommen
Messstellengruppe	mehrere Messstellen in getrennten Bohrungen mit unterschiedlich tiefen Filterbereichen	tiefendifferenzierte Grundwasserbe- probung für Erkundung und Monitoring	alle	I–II, IV	sehr gute Ergebnisse; einfache Probenahme ohne Packersystem

Methoden	Kurze Beschreibung der Methode	Zielsetzung	Schadstoffe	Phase	Bemerkung
Multilevelmessstelle	in mehreren Tiefen verfilterte Messstelle (ein Bohrloch); Filterabschnitte sind gegenüber den Vollrohrabschnitten abgedichtet	tiefendifferenzierte Grundwasserbe- probung für Erkundung und Monito- ring	alle	I–II, IV	sehr gute Ergebnisse; nur geringe Beeinflussung der GW-Strömung; Bau aufwändig, aufwändige Pro- benahme
Doppelpacker	Probenahme mittels Pumpe in ei- nem durch zwei Packer begrenzten Bereich der Messstelle (vollverfiltert oder mehrfach verfiltert)	tiefendifferenzierte Grundwasserbe- probung für Erkundung und Monito- ring	alle	I–II, IV	geringer Aufwand, sehr gute Er- gebnisse bei mehrfach verfilterten Messstellen und Tonsperren im Ringraum
Mehrfachpacker mit Blindrohren und Ton- sperren	Probenahme mit Packersystem (verschiedener Bauart) aus mehre- ren Filterabschnitten mittels Pum- penkette	tiefendifferenzierte Grundwasserbe- probung für Erkundung und Monito- ring	alle	I–II, IV	sehr gute Ergebnisse; Erfassung der Anströmprofile über Flowmeter- Messungen empfehlenswert
Multi(level)- Packersysteme	Probenahme über Mikro- oder Saugpumpe; - Multilevel-Scheibenpacker: Tren- nung der zu beprobenden Bereiche über Dichtungsscheiben - Multilevel-Schlauchpacker: Abpa- ckern der gesamten Messstelle	tiefendifferenzierte Grundwasserbe- probung für Erkundung und Monito- ring	alle	I–II, IV	sehr gute Ergebnisse, hohe Anzahl an Probenahmehorizonten; auch für kleine Bohrdurchmesser; Pro- benahme sehr aufwändig
Tracerversuch	Hinweise zur Durchführung: LFW- MERKBLATT 3.1/1 und DVGW W 109	Nachweis der Strömungsverhältnis- se; Kalibrierung des numerischen Modells; in-situ-Ermittlung der Mo- delleingangsdaten (Advektion, Dis- persion, durchströmbarer Hohl- raumanteil etc.)	alle	II–III	
Immissionspumpver- such	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: WAB- BELS ET AL. (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	alle	II–III	aufwändig; Störung der natürlichen Redoxzonierung; bei Grundwasser- leitern mit geringer Durchlässigkeit nicht sinnvoll

Methode	Kurze Beschreibung der Methode	Zielsetzung	Schadstoffe	Phase	Bemerkung
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)	alle	II–III	aufwändig; aufgrund der meist sehr heterogenen Schadstoffverteilung ist ein enges Raster an Beprobungspunkten notwendig, um eine verlässliche Aussage zur Schadstofffracht zu erhalten
Beurteilungshilfen und Nachweismethoden zum mikrobiellen Abbau					
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 Schadstoff spezifisch; aufwändig für bioverfügbares Fe(III) bzw. Mn(IV) am Sediment; 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	Aussagewert ist eingeschränkt wegen Empfindlichkeit des Tests und der unspezifischen Wirkweise (Biolumineszenz)
Respirationsversuche	einfacher summarischer Nachweis der Aktivität vorhandener Mikroorganismen; Verschiedene Methoden z. B.: - Manometrischer Respirations test gemäß OECD 301 F - DIN EN ISO 9408:1999	Nachweis von mikrobieller Aktivität am Standort	MKW, BTEX, PAK, LHKW	II	keine Aussage möglich, ob Schadstoff um-/abgebaut werden

Methoden	Kurze Beschreibung der Methode	Zielsetzung	Schadstoffe	Phase	Bemerkung
DAPI-Färbung	Anfärbung der Mikroorganismen-DNA mit 4,6-Diamidino-2-phenylindoldihydrochlorid (DAPI) und Auswertung mittels Fluoreszenzmikroskopie	Anhaltspunkte zum Vorhandensein von Mikroorganismen (ohne Aussage über deren Art und Aktivität); i. a. Vergleich zwischen Zustrom, Schadenszentrum und Abstrom; Erkennung 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 Schadstoff spezifisch; teilweise relativ lange Inkubationszeit; Aussagekraft umstritten
Polymerase Chain Reaction (PCR)	Bestimmung von am Abbau und an Redoxprozessen beteiligten Mikroorganismen und Enzymen	molekularbiologischer Nachweis abbauaktiver Mikroorganismen (schadstoffspezifisch) und Charakterisierung mikrobiologischer Gemeinschaften zur Ermittlung von Milieubedingungen	MKW, BTEX, (PAK), LHKW	II–III	für PAK/BTEX noch in der Erforschung
Labor-Mikrokosmen	Abbauversuche unter Laborbedingungen mit möglichst unveränderten Proben vom Standort (Grundwasser und/oder Sediment)	Versuch die Aktivität bzw. das Abbaupotenzial der Mikroorganismen unter standortähnlichen oder aber definierten, für den Standort relevanten Bedingungen (z. B. Zusatz von Elektronenakzeptoren oder zusätzlichen C-Quellen) zu bestimmen	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

Methode	Kurze Beschreibung der Methode	Zielsetzung	Schadstoffe	Phase	Bemerkung
Isotopenuntersuchung $^{12}\text{C}/^{13}\text{C}$	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 isotopenmarkierten Schadstoffen im Grundwasser vor Ort; Bestimmung des in-situ Abbaus anhand der Anreicherung von ^{13}C -markiertem C in der Biomasse	Quantifizierung und direkter Nachweis des mikrobiologischen Abbaus unter nahezu in-situ Bedingungen	BTEX, PAK, LHKW	II–III	aufwändig, Erfahrungen bei der Anwendung, Auswertung und Interpretation der Ergebnisse erforderlich

Impressum:

Herausgeber:

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

Telefon: 0821 9071-0

Telefax: 0821 9071-5556

E-Mail: poststelle@lfu.bayern.de

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

Postanschrift:

Bayerisches Landesamt für Umwelt
 86177 Augsburg

Bearbeitung:

Ref. 96 / Stefan Rüttinger

Bildnachweis:

LfU

Stand:

30. Juni 2015

