

Merkblatt Nr. 3.8/3

Stand: 30. Juni 2015

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

Ansprechpartner: Referat 96

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

Inhaltsverzeichnis

1	Phase I - Prüfung der Standortvoraussetzungen und qualitative Abschätzung des NA-Potenzials	2
1.1	Erfassung der Ist-Situation und von Grundlagen zur Erarbeitung einer hydrogeologischen Modellvorstellung	3
1.2	Hinweise auf mikrobiologischen Schadstoffum- bzw. -abbau	7
2	Phase II - Quantitative Erkundung und Bewertung der schadstoffmindernden Prozesse	9
2.1	Ergänzung der Informationen zur Erfassung der Ist-Situation und zur Erarbeitung einer hydrogeologischen Modellvorstellung	9
2.2	Untersuchungen zum mikrobiologischen Schadstoffabbau	12
3	Phase III - Modellierung und Prognose mit Erstellung des MNA-spezifischen Überwachungsprogramms und behördlicher Entscheidung	13
3.1	Formulierung des Hydrogeologischen Modells	13
3.2	Quantifizierung hydro- und geochemischer sowie mikrobiologischer Prozesse	13
3.3	Modellierung und Prognose	14
3.3.1	Zielsetzung der Modellierung	14
3.3.2	Hinweise zur Modellauswahl	14
3.3.3	Umgang mit den Modellierungsergebnissen	15
3.4	Dauer von MNA	15
3.5	Festlegung von Prüf- und Bewertungskriterien für die Durchführung von MNA	15
3.6	MNA-spezifisches Überwachungsprogramm	16
3.7	Behördliche Entscheidung über die Durchführung von MNA	17
4	Phase IV - MNA-spezifische Überwachung mit Vergleich und Überprüfung der Prognose	18
4.1	Prognoseprüfung	19
4.2	Einstellung von MNA	19

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) beschrieben¹.

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 MNA-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 Forschungsschwerpunkt KORA (WABBELS ET AL. 2008, WERNER ET AL. 2008, GRANDEL ET AL. 2008, DRESDNER GRUNDWASSERFORSCHUNGSZENTRUM E.V. 2008a, JOOS ET AL. 2008, TU BERGAKADEMIE FREIBERG 2008, DRESDNER GRUNDWASSERFORSCHUNGSZENTRUM E.V. 2008b, <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 DU und SU. 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 (SU) 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-Konzeptes 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 SU) 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 (Kapitel 2.4 Textteil) sowie eine Einschätzung des möglichen 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 DU und SU). Der Bewertung des Fahnenverhaltens, d. h. die 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 ein numerisches (reaktives) Stofftransportmodell (Kapitel 3.3) eine belastbare Prognose des Fahnenverhaltens

¹ 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 Schwermetalle können ggf. auch die Ausführungen für Cu und As hilfreich sein. Zusätzliche Hinweise zur Untersuchung und Bewertung von Schwermetall - Kontaminationen können TU BERGAKADEMIE FREIBERG (2008) entnommen werden.

und damit die Eignung des Standortes für MNA belegt werden. Die Entscheidung, ob die **Einhaltung der „Quasi-Stationarität“** gegeben ist, kann abschließend i. d. R. erst am Ende der Phase III anhand aller Erkundungsergebnisse bzw. der Modellierungsergebnisse getroffen werden.

Hydrologische 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) mit erfasst 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 des Standorts (sofern nicht aus DU vorliegend)**
- **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 (Masse/Zeit) aus der ungesättigten Bodenzone in das Grundwasser (Sickerwasserprognose: siehe auch LFW-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 Fahnenverhaltens (rückläufig, quasistationär oder expandierend) sowie von Trends zum Schadstoffverhalten anhand bereits vorliegender Messreihen
- **Charakterisierung der geologischen und hydrogeologischen Verhältnisse** und der maßgeblichen Kenndaten (Bodenprofilaufnahmen, Probenahme und Untersuchung von Boden, Bodenluft und Grundwasser, Durchführung von analytisch begleiteten Pumpversuchen zur Erfassung hydraulischer Kenndaten)
- **Erarbeitung einer ersten hydrogeologischen Modellvorstellung** zur Aufstellung des Hydrogeologischen Modells (HGM)

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 für das Prozessverständnis. Das Hydrogeologische Modell 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, FH-DGG 2010, FH-DGG 2002b). 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 2002a).

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

- Geologischer Aufbau mit 3-dimensionaler 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

Die hydrogeologische Modellvorstellung 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).

Bei der Erhebung der hydrogeologischen Verhältnisse, insbesondere bei der Beprobung und Untersuchung von Grundwasser, Boden und Bodenluft sind die Vorgaben in den LfU-LfW-Merkblättern 3.8/1, 3.8/4, 3.8/5 und 3.8/6 (LFW-MERKBLATT 3.8/1, LFU-MERKBLATT 3.8/4, LFU-LFW-MERKBLATT 3.8/5, LFU-MERKBLATT 3.8/6) sowie die Empfehlungen der DVGW-Richtlinien W115 und W121 (DVGW W 115, 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 Tabelle 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.

Tabelle 1: Untersuchung von Boden-/Aquifermaterial, Bodenluft und Grundwasser

Untersuchung	Schadensfall mit Schadstoff					Bemerkungen
	MKW	BTEX	LHKW	PAK	Cu/As	
Untersuchungen von Boden-/Aquifermaterial						
Bodenansprache (bei Verunreinigung in der Bodenzone)	+++	+++	+++	+++	+++	Hydroxidüberzüge/Coatings, C _{org} -, Schluff- und Ton- Gehalt relevant bzgl. Sorpti- on; Durchführung gemäß reduziertem Umfang der Bo- denkundlichen Kartieranlei- tung (AD-HOC-AG BODEN 2005)
Korngrößenverteilung	+++	+++	+++	+++	+++	Ton- und Schluffanteile (rele- vant bzgl. Sorption), ggf. k _f - Wert-Bestimmung; Durchfüh- rung mittels Siebung oder Schlammanalyse
Glühverlust/TOC	++	++	++	++	+	Hinweis auf organisches Material; Sorption von Schadstoffen an C _{org}
Kaltoxalatlösliche und heißoxalatlösliche bzw. dithionitlösliche Eisenoxide					++	Hinweis auf Qualität von Ad- sorberoberflächen
MKW	(+++)	++	++	++		ggf. Lösungsvermittler; ggf. zusätzliche C-Quelle
BTEX	++	(+++)	+	++		ggf. Lösungsvermittler; ggf. zusätzliche C-Quelle
LHKW	++	++	(+++)	+		ggf. Lösungsvermittler; ggf. zusätzliche C-Quelle
PAK (zzgl. Methyl- naphthaline)	++	++		(+++)		mögl. Begleitkontaminanten
Elution mit Wasser (Eluatherstellung) und Analyse des Haupt- schadstoffs	++	++	++	++	++	Abschätzung der Mobilität und des wasserlöslichen Anteils
Königswasserextrak- tion und Analyse des Hauptschadstoffs					++	Gesamtgehalte im Boden- und Aquifermaterial

Untersuchung	Schadensfall mit Schadstoff					Bemerkungen
	MKW	BTEX	LHKW	PAK	Cu/As	
Untersuchungen der Bodenluft						
Vor-Ort-Parameter O ₂ , CO ₂ , CH ₄ , H ₂ S	+++	+++	+++	+++		Beprobung aus Grundwasser messstellen möglich; Charakterisierung der Redoxbedingungen
Leichtflüchtige Schadstoffe (MKW (C ₁ -C ₉), BTEX, LHKW)	++	+++	+++	++		Nachweis der Schadstoffe und deren Abbauprodukte (z. B. Vinylchlorid); bei PAK Schäden können Schadstoffe als Lösungsvermittler fungieren
Untersuchungen des Grundwassers						
Vor-Ort- und Basisparameter zzgl. Redoxpotenzial	+++	+++	+++	+++	+++	Chemische Charakterisierung gemäß LFW-MERKBLATT 3.8/1
Nitrat	+++	+++	+++	+++	+	Elektronen-Akzeptor, Abnahme zeigt Denitrifikation an
Sulfat	+++	+++	+++	+++	+	Elektronen-Akzeptor, Abnahme zeigt Sulfat Reduktion an
Mangan(II)	+++	+++	+++	+++	++	Redox-Anzeiger, Zunahme zeigt Mangan Reduktion an
Eisen(II)	+++	+++	+++	+++	+++	Redox-Anzeiger, Zunahme zeigt Eisen Reduktion an
Schwer- und Halbmetalle					(+++)	
As _{ges} : aus ungefilterten, mit 450 nm und 20 nm Filter gefilterten Proben					+++	Ermittlung und Prüfung in welcher Fraktion As vorliegt (partikulär, gelöst)
MKW	(+++)	+	+	+		ggf. Lösungsvermittler oder zusätzliche C-Quelle
BTEX	+	(+++)	+	+		ggf. Lösungsvermittler oder zusätzliche C-Quelle
LHKW			(+++)			ggf. Lösungsvermittler oder zusätzliche C-Quelle

Untersuchung	Schadensfall mit Schadstoff					Bemerkungen
	MKW	BTEX	LHKW	PAK	Cu/As	
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 (Tabelle 1) heranzuziehen und zu beurteilen. Mikrobiologisch relevante Untersuchungsparameter für die qualitative Abschätzung des NA-Potenzials können der Tabelle 2 in Ergänzung zu den Grundwasser-Untersuchungsparametern (Tabelle 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.

Tabelle 2: Mikrobiologisch relevante Untersuchungsparameter im Grundwasser

Untersuchungsparameter des Grundwassers	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	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
Säurekapazität, DIC	Zunahme als Hinweis auf mikrobiellen Abbau, Hinweis auf Pufferkapazität und Gehalt an gelöstem anorganischen Kohlenstoff (CO ₂ , HCO ₃ ⁻ , CO ₃ ²⁻)
Nitrat	Elektronen-Akzeptor und Nährstoff, Abnahme als Hinweis auf anaerobe Abbauprozesse

Untersuchungsparameter des Grundwassers	Beschreibung
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; ggf. Fällung mit Eisen oder Schwermetallen – nur bei LHKW relevant
Phosphat	Nährstoff, evtl. limitierender Faktor für Mikroorganismenwachstum
Fe(III), Mn(IV)	in der bioverfügbaren Form unter anaeroben Bedingungen als Elektronen-Akzeptoren
Fe(II), Mn(II)	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 ₂ unter anaeroben Bedingungen, Hinweis auf methanogene, stark reduzierende Bedingungen**
Kohlendioxid	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 Kapitel 2.4 Textteil) anhand des nachfolgenden Untersuchungsprogramms zu prüfen. Dies betrifft insbesondere die Klärung der beteiligten Prozesse an der Schadstoffminderung und die Trennung und Unterscheidung zwischen verdünnenden und frachtreduzierenden Prozessen.

2.1 Ergänzung der Informationen zur Erfassung der Ist-Situation und zur Erarbeitung einer hydrogeologischen Modellvorstellung

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 Erfassung der Schadstofffahne, zur Erkundung und Erfassung der gesamten räumlichen Ausdehnung der Schadstofffahne (über ausreichende repräsentative Messstellen im Zustrom, Abstrom und im Schadenszentrum) und zur Erstellung von Kontrollebenen senkrecht zur Abstromrichtung wie folgt:
 - mindestens eine Messstelle im Zustrom in Abhängigkeit von Ausmaß und Lage des Schadenszentrums
 - eine Kontrollebene im nahen Abstrom des Schadenszentrums
 - Kontrollebenen im Abstrom und zusätzlich in einer Entfernung zur Fahnenspitze, die das Grundwasser in ein bis zwei Jahren zurücklegt
 - die Entnahmebereiche der Messstellen in einer Kontrollebene (Transekt senkrecht zur Grundwasserfließrichtung) sollen sich überlappen. Jede Kontrollebene muss die Schadstofffahne 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 Frachtemission aus der Schadstoffquelle im Aquifer und der Frachtreduktion an Kontrollebenen zur Unterscheidung der **Frachtreduktion** von der **Verdünnung**; geeignet dazu sind die Groundwater Fence- / Transekten-Methode (nähere Ausführungen in WABELS ET AL. 2008: Kapitel B3.3.2.1.1) oder Immissionspumpversuche (WABELS ET AL. 2008: Kapitel B3.3.2.1.2, M1.2.1; PTAK ET AL. 2013). Ziel ist es den Nachweis zu führen, ob die Schadstoffreduktion im Wesentlichen durch frachtreduzierende Prozesse und möglicherweise nur untergeordnet durch verdünnende Prozesse begründet ist (Voraussetzung für die Durchführung von MNA). Die Frachtreduktion soll entlang der Fahne durch Ermittlung der Frachtdifferenzen an den einzelnen Kontrollebenen festgestellt werden.
- detaillierte Charakterisierung des Strömungsgeschehens im Grundwasser (FH-DGG 2002a) 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 2002a, FH-DGG 2002b)

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

Bei stark unterschiedlichen kf-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 Tabelle 1 und Tabelle 2) abgeschlossen werden.

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

Tabelle 3: Untersuchungsumfang Boden und Grundwasser zum Schadstoff- und Ausbreitungsverhalten

Untersuchungsparameter	Anwendung auf Schäden mit folgenden Schadstoffen	Bemerkung
Untersuchung von Boden-/Aquifermaterial		
Bindungsformen und Mobilität	Cu, As	Sequenzielle Extraktion an Boden- und Aquifermaterial, Untersuchung zur Bewertung des Ausbreitungsverhaltens
Untersuchung des Grundwassers		
Ausbreitungsverhalten	generell	ggf. Nutzung eines vorhandenen inerten Inhaltsstoffs; u. a. zur Abschätzung der Verdünnung
Isotope $^1\text{H}/^2\text{H}$, ^3H , $^{16}\text{O}/^{18}\text{O}$ (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

Untersuchungsparameter	Anwendung auf Schäden mit folgenden Schadstoffen	Bemerkung
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 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
PAK-Metabolite	PAK	Auswahl der zu analysierenden Verbindung nach bekanntem Ausgangsstoff (-gemisch) und zugehörigen Abbauwegen
Isotopenfraktionierung; $\delta^{13}\text{C}$ des Schadstoffes - Fraktionierung der stabilen Kohlenstoff-Isotope	BTEX, LHKW, eingeschränkt PAK (Naphtalin, 2-Methyl-Naphtalin), 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 Abbaupotenzials² (Tabelle 4):

Tabelle 4: Mikrobiologische Untersuchungen (in Phase II)

Untersuchungsmethode	Schadensfall mit Schadstoff				Bemerkungen
	MKW	BTEX	PAK	LHKW	
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 Abbauaktivität der Mikroorganismen ggf. unter verschiedenen Redoxbedingungen (Erkenntnisse zu Abbauwegen und -raten, zur Toxizität von Schadstoffen und zur räumlichen Verteilung der Mikroorganismenaktivität)
Polymerase Chain Reaction (PCR)	++	++	++	++	Nachweis von spezifischen Mikroorganismen, die ein schadstoffspezifisches Abbaupotenzial haben oder an bestimmte Redox-Milieubedingungen gekoppelt sind

++ empfohlen

+ zusätzlicher Erkenntnisgewinn

² Eine quantitative Bewertung des mikrobiellen Schadstoffabbaus ist durch Nutzung der Isotopenfraktionierung (¹³C) bei BTEX, CKW und MTBE möglich, indem Labor Mikrokosmen und ¹³C-Isotopenuntersuchungen an Labor und Feldproben durch Parametrisierung des mikrobiologischen Abbaus mit Hilfe der Rayleigh-Gleichung kombiniert werden (FISCHER ET AL. 2006, ERTL ET AL. 2014).

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 Hydrogeologische Modell 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 W109 und LFW-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 (Tabelle 5). Literaturdaten können hierbei mit einbezogen werden. Aufgrund der räumlichen und zeitlichen Variabilität der erfassten Daten ist eine Aussage über deren Gültigkeitsbereich zu treffen.

Tabelle 5: Ermittlung Prozess bestimmender Modellparameter

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

* Auswertung mittels inverser Modellierung unter Berücksichtigung der Dispersion

** Einsatz gasdichter Säulenversuchsanlagen

*** Untersuchung unterschiedlicher Redoxpotenziale in der Flüssigphase

In dieser Phase können ggf. mikrobiologische Untersuchungen durchgeführt werden (vgl. auch Kapitel 2.2), um Abbauewege zu verifizieren und in-situ- nahe Abbauprozesse und -raten für die Modellierung (Prognose) zu erhalten und den mikrobiologischen Abbau direkt (in-situ) nachzuweisen (z. B. Bactraps: Anhang 3). Abbauraten werden benötigt, um die zukünftige Fahnenentwicklung mittels des (numerischen reaktiven Stofftransport-) Modells prognostizieren zu können. Methoden für in-situ 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 prognostischen Szenarien (Best-/ Worst-Case). Diese Modellierungsergebnisse stellen eine wesentliche **Entscheidungsgrundlage** für oder gegen MNA im Rahmen des MNA-Konzeptes 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 LFW-MERKBLATT 3.8/1 umfassen. Anhand der Prognoseergebnisse sollen **Prüf- und Bewertungskriterien** für die Durchführung von MNA abgeleitet werden (Kapitel 3.5).

Simulationsrechnungen können bereits in einer der vorhergehenden Phasen I und II als „Denkwerkzeug“ 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 Maßnahmenzieles (siehe Kapitel 3.5). 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, DRESDNER GRUNDWASSERFORSCHUNGSZENTRUM E.V. 2008b, MICHELS ET AL. 2008: Kapitel 7, LANUV NRW 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 GW-Neubildungsrate 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 geologische/hydrogeologische Modell und wird um das Prozess- und Systemverständnis sowie um Zeitreihenanalysen ergänzt. In sehr einfach gelagerten Fällen kann alternativ zum numerischen Modell auch eine verbalargumentative 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. 10–30 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 Kapitel 3.6 und 4) **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 (Kapitel 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 LFW-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 Maßnahmenzieles und der Zwischenziele **Abbruchkriterien** festzulegen, an denen das Erfordernis zur Einleitung und Durchführung der zuvor festgelegten **Alternativmaßnahme** (Rückfalloption) zu prüfen ist (siehe Kapitel 4.1).

Sofern sich in der Phase III Hinweise ergeben, dass die ermittelten Voraussetzungen für MNA (Kapitel 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 Kapitel 4: 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 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 Kapitel 1 bis 3) 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 ET AL. (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 (SU),
- 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 Kapitel 2.4 Textteil) und von den zuständigen Behörden zu entscheiden, ob

- MNA in Kombination mit technischen Sanierungsmaßnahmen,
- MNA als alleinige Maßnahme und
- das vorliegende MNA-spezifische Überwachungsprogramm für die Erfordernisse in Phase IV geeignet ist
- oder andere Maßnahmen zur Schadstoffminderung zielführender sind.

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 verbindlich festgelegt werden.

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

Die Beobachtung des „tatsächlichen“ Schadstoffverhaltens und der Nachweis der dauerhaften Wirksamkeit der Schadstoffminderungsprozesse erfolgt mittels des erstellten prozessorientierten **MNA-spezifischen Überwachungsprogramms** (Kapitel 3.6) 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** (Abbildung 1).

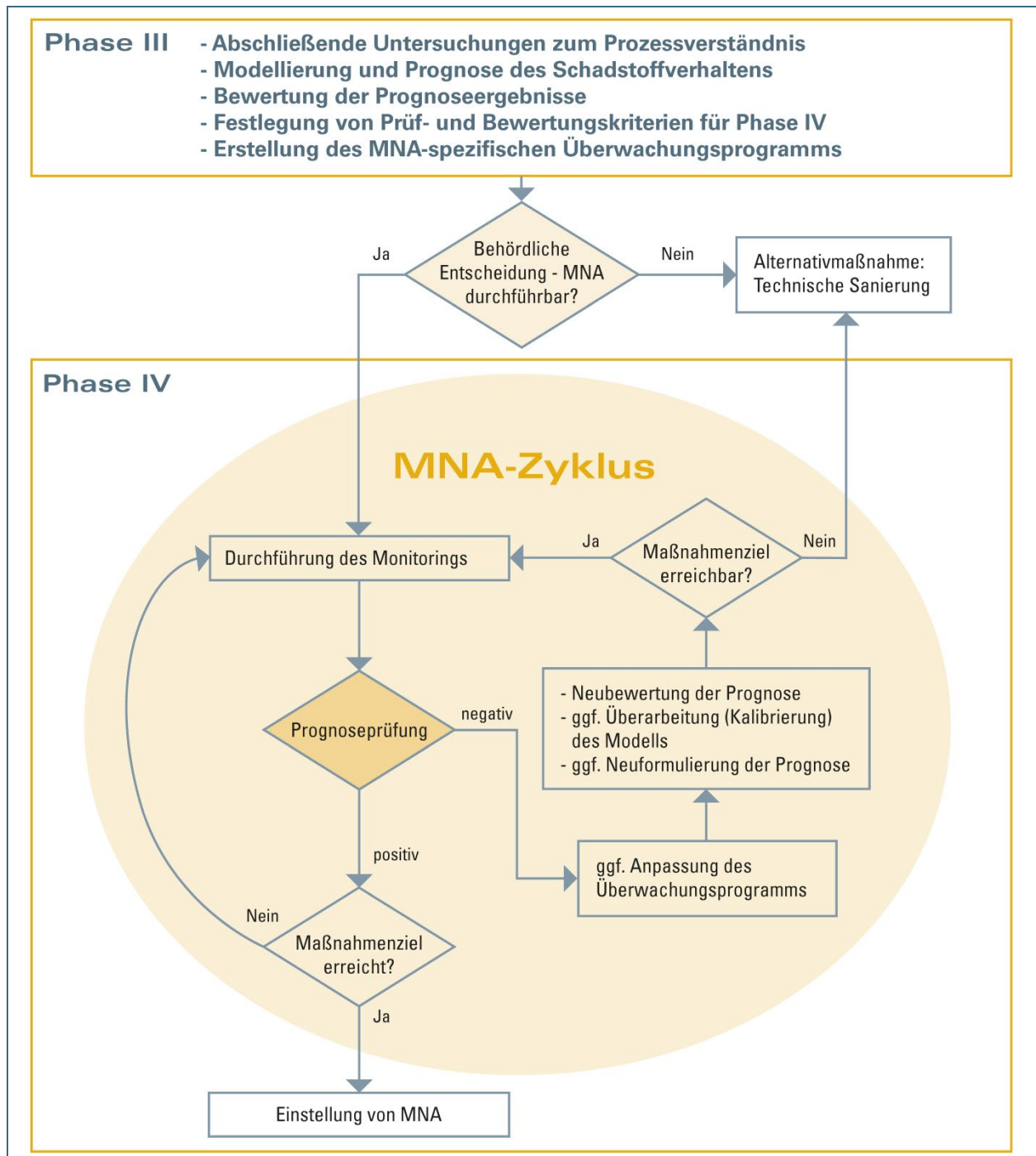


Abbildung 1: Fließschema für die MNA-spezifische Überwachung (Phase IV)

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 Prüfungsschritt beinhaltet auch eine **Bewertung der Entwicklung der Schadstofflage** und der relevanten **schadstoffmindernden Prozesse**. Einzubeziehen 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 SU) 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 Monitoring-Ergebnisse (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. technischen Sanierungsmaßnahmen) durchzuführen.

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

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>

Bearbeitung:

Ref. 96 / Stefan Rüttinger

Bildnachweis:

LfU

Stand:

30. Juni 2015

Postanschrift:

Bayerisches Landesamt für Umwelt
86177 Augsburg

