



Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft Bodenschutz

Ständiger Ausschuss Altlasten – ALA

Ad-hoc Unterausschuss „Natürliche Schadstoffminderung“

Berücksichtigung der natürlichen Schadstoffminderung bei der Altlastenbearbeitung

Positionspapier

vom 01.06.2005

1. Überarbeitung und Ergänzung vom 03.02.2009
2. **Ergänzung mit neuem Anhang II vom 10.12.2009**

Das Positionspapier vom 03.02.2009 wurde vom Ad-hoc Unterausschuss „Natürliche Schadstoffminderung“ des Altlastenausschusses (ALA) der Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft Bodenschutz (LABO) um den Anhang II ergänzt, an dem folgende Mitglieder mitgearbeitet haben:

Dr. Peter Börke	Sächsisches Staatsministerium für Umwelt und Landwirtschaft
Dr. Verena Brill	Landesamt für Landwirtschaft, Umwelt und ländliche Räume des Landes Schleswig-Holstein
Matthias Feskorn	Landesumweltamt Brandenburg
Dr. Dieter Frank	Landesamt für Umwelt- und Arbeitsschutz, Saarland
Barbara Kabardin	Umweltbundesamt
Dr. Wolfgang Kohler	Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz, Baden-Württemberg
Andreas Mitschard	Staatliches Amt für Umwelt und Natur Uecker- münde, Mecklenburg-Vorpommern
Dr. Stefan Mock	Thüringer Landesanstalt für Umwelt und Geologie
Dr. Johannes Müller (Obmann)	Landesamt für Bergbau, Energie und Geologie, Niedersachsen
Michael Odensaß	Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz, Nordrhein-Westfalen
Dr. Wilfried Pinther	Bayerisches Landesamt für Umwelt
Harald Ruland	Struktur- und Genehmigungsdirektion Süd, Rheinland-Pfalz
Dr. Hans Wirth	Behörde für Stadtentwicklung und Umwelt, Hamburg
Volker Zeisberger	Hessisches Landesamt für Umwelt und Geologie

Inhaltsverzeichnis

0	Zusammenfassung	5
1	Anlass, Arbeitsauftrag und Anwendungsbereich	7
2	Begriffsbestimmungen	8
3	Berücksichtigung der natürlichen Schadstoffminderung in bodenschutz-rechtlichen Verwaltungs-verfahren	9
4	Standortbezogene Untersuchungen und Voraus-setzungen für ein MNA-Konzept	13
4.1	Einleitung	13
4.2	Umgang mit der Schadstoffquelle	14
4.3	Betrachtung der Schadstofffahne	15
4.3.1	Zusammenhang zwischen Schadstoffquelle und Schadstofffahne	15
4.3.2	Identifizierung und Quantifizierung natürlicher Schadstoffminderungsprozesse	16
4.3.3	Bewertung der Schadstofffahne und Prognose des Fahnen-verhaltens	17
4.4	Schutz des noch nicht beeinträchtigten Grundwassers und Berücksichtigung weiterer Schutzgüter	19
4.4.1	Vorbemerkung	19
4.4.2	Schutzgüter nach dem Bodenschutz- und Wasserrecht	19
4.4.3	Betrachtung relevanter Schutzgüter	19
5	Ermessensausübung und Verhältnismäßigkeits-prüfung	20
6	Überwachung der natür-lichen Schadstoffminderung (MNA)	22
6.1	Anforderungen an das Überwachungsprogramm	22
6.2	Beurteilungskriterien für die Überwachung	22
6.3	Zeitraum für MNA	23
ANHANG 1	Empfehlungen zum Vorgehen in der Praxis	24
A1-I	Prüfung der Voraussetzungen zur Erarbeitung eines MNA-Konzeptes	26
A1-I.1	Vorgaben der Behörde zur Vereinbarung von Rahmenbedingungen mit dem Pflichtigen	26
A1-I.2	Prüfung der standortbezo-genen Voraussetzungen anhand des vorhandenen Kenntnisstandes	27
A1-II	Nachweis der Wirksamkeit von Schadstoffminde-rungsprozessen und Erstellung eines MNA-Konzeptes	28

A1-II.1	Standortuntersuchungen zum Nachweis der Wirksamkeit von Schadstoffminderungsprozessen	28
A1-II.2	Prognose der Schadstofffahnenentwicklung	30
A1-II.3	Auswertung und Beurteilung der Ergebnisse	31
A1-II.4	Erstellung eines MNA-Konzeptes und Begründung seiner Eignung	32
A1-III	Behördliche Entscheidung über die Eignung und Durchführung von MNA	33
A1-IV	Durchführung von MNA	34
ANHANG 2	Methodische Hinweise zur Prüfung der Voraussetzungen für die Durchführung von MNA	35
A2-0	Einleitung	36
A2-1	Schadstoffquelle	36
A2-1.1	Methoden und Ansätze zur Abschätzung der Schadstoffmasse	38
A2-1.2	Methoden zur Abschätzung der Freisetzungsrates	39
A2-2	Schadstofffahne	40
A2-2.1	Frachtbetrachtung an Kontrollebenen	41
A2-2.1.1	Groundwater Fence- / Transekten- Methode	41
A2-2.1.2	Immissions - Pumpversuche	42
A2-2.1.3	Isotopenmethoden	42
A2-2.2	Nachweis und Prognose der „Quasi-Stationarität“	43
A2-2.2.1	Nachweis und Prognose anhand von Messreihen und Analogiebetrachtungen	44
A2-2.2.2	Nachweis und Prognose mittels Stofftransportmodellen	44
A2-2.3	Methoden zur Abschätzung der Prozesse bzw. zur Entwicklung eines Prozess-/Systemverständnisses	47
A2-2.3.1	Mineralölkohlenwasserstoffe (MKW), Benzol, Toluol, Ethylbenzol und Xylol (BTEX)	50
A2-2.3.2	Methyltertiärbutylether (MTBE)	51
A2-2.3.3	Polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe (PAK) und NSO-Heterozyklen	52
A2-2.3.4	Leichtflüchtige chlorierte Kohlenwasserstoffe (LCKW)	53
A2-2.4	Berücksichtigung weiterer Schutzgüter	54
ANHANG 3	Quellenverzeichnis	56

0 Zusammenfassung

Die Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft Bodenschutz (LABO) hat auf Vorschlag ihres Ständigen Ausschusses 5 (Altlastenausschuss – ALA) einen Ad-hoc Unterausschuss eingesetzt, der sich mit der Berücksichtigung der natürlichen Schadstoffminderung bei der Altlastenbearbeitung beschäftigen und ein länderübergreifendes Positionspapier erstellen soll. Dieses beinhaltet

- eine Definition der Begriffe NA, MNA und ENA,
- eine Betrachtung der rechtlichen Fragen in Verbindung mit einer Einstufung in die Altlastenbearbeitung,
- Voraussetzungen für ein MNA-Konzept und
- eine Empfehlung zum Vorgehen für die Praxis.

Das Positionspapier beschränkt sich auf die Berücksichtigung der natürlichen Schadstoffminderung in der gesättigten Zone und enthält Aussagen zu Grundwasserschäden, die durch Altlasten verursacht wurden. In diesem Papier werden folgende Begriffe verwendet und definiert:

- **Natürliche Schadstoffminderungsprozesse** sind -biologische, chemische und physikalische Prozesse, die ohne menschliches Eingreifen zu einer Verringerung der Masse, der Fracht, der Toxizität, der Mobilität, des Volumens oder der Konzentration eines Stoffes im Boden oder Grundwasser führen. Zu diesen Prozessen zählen biologischer Abbau, chemische Transformation, Sorption, Dispersion, Diffusion und Verflüchtigung der Stoffe.
- **Natürliche Schadstoffminderung (Natural Attenuation – NA)** ist das Ergebnis natürlicher Schadstoffminderungsprozesse.
- **Überwachung der natürlichen Schadstoffminderung (Monitored Natural Attenuation – MNA)** sind die Überwachungsmaßnahmen zur Kontrolle der Wirksamkeit von natürlichen Schadstoffminderungsprozessen,
- **Enhanced Natural Attenuation – ENA** wird als eine „in situ“-Sanierungsmaßnahme angesehen, weil durch die Initiierung, Stimulierung oder Unterstützung von natürlichen Schadstoffminderungsprozessen mit dem Einbringen von Substanzen unter Nutzung naturgegebener Reaktionsräume aktiv in das Prozessgeschehen eingegriffen wird.

Für eine behördliche Entscheidung, die unter Berücksichtigung der natürlichen Schadstoffminderung und der Verhältnismäßigkeit ein Absehen von Sanierungsmaßnahmen in Verbindung mit MNA beinhaltet, wird der Kurzbegriff **"MNA-Konzept"**

eingeführt. Ein MNA-Konzept enthält grundsätzlich folgende Regelungsbestandteile:

- a) Festlegung von nachprüfbaren Zielvorgaben in Raum und Zeit, die auf der Basis der Prognose als notwendiges Ergebnis der natürlichen Schadstoffminderungsprozesse angesehen werden, sowie von Zwischenergebnissen für die Zeit bis zum Erreichen des festgelegten Endzustands,
- b) Festlegung von Überwachungsmaßnahmen zur Kontrolle der Wirksamkeit von natürlichen Schadstoffminderungsprozessen (MNA) und Berichtspflichten,
- c) Vorbehalt weiterer Maßnahmen, sofern sich die Prognose nachträglich als unzutreffend erweist, bis zum Erreichen des festgelegten Endzustands.

Ein solches Vorgehen setzt Untersuchungen zum Nachweis der Wirksamkeit der Schadstoffminderungsprozesse, deren Prognose sowie eine Überprüfung der standortbezogenen Voraussetzungen voraus und kann nur in Zusammenhang mit der Überprüfung der Verhältnismäßigkeit technisch in Betracht kommender Sanierungsmaßnahmen getroffen werden.

Bodenschutzrechtlich werden natürliche Schadstoffminderungsprozesse als beurteilungserhebliche Standortgegebenheiten eingestuft. Da die Überwachung der natürlichen Schadstoffminderung (MNA) nicht aktiv in das laufende Prozessgeschehen eingreift, kann sie nicht mit einer Sanierungsmaßnahme im Sinne des BBodSchG gleichgesetzt werden. Nach mehrheitlicher Auffassung kann MNA auch nicht als Schutz- und Beschränkungsmaßnahme nach § 2 Abs. 8 BBodSchG eingestuft werden, worunter gleichfalls aktive technische oder administrative Maßnahmen zu verstehen sind.

Es ist vertretbar, die vorstehend unter a) – c) beschriebenen Regelungen durch eine behördliche Anordnung, durch die Zustimmung zu einem Sanierungsplan oder durch einen öffentlich-rechtlichen Vertrag zu treffen. Sofern die Behörde einseitig hoheitliche Anordnungen trifft, bietet sich bei Altlasten als Rechtsgrundlage für die Überwachungsmaßnahmen und Mitteilungspflichten § 15 Abs. 2 BBodSchG an (insb. bei Sanierungsmaßnahmen und ergänzender Berücksichtigung der natürlichen Schadstoffminderung).

Bei der stufenweisen Altlastenbearbeitung sind spezielle Untersuchungen der natürlichen Schadstoffminderungsprozesse i. d. R. erst ab der Detailunter-

suchung sinnvoll. Die Berücksichtigung der natürlichen Schadstoffminderung kann dann bei der Gefährdungsabschätzung erfolgen, so dass über ein MNA-Konzept erst auf Basis einer Gefährdungsabschätzung entschieden werden kann. Voraussetzung für ein MNA-Konzept ist dabei, dass eine alleinige Sanierung unverhältnismäßig ist.

Weiterhin ist es notwendig, dass standortbezogene Untersuchungen durchgeführt werden, um die Voraussetzungen für ein MNA-Konzept prüfen und anschließend im Einzelfall beurteilen zu können. Hierbei spielen folgende Themen eine entscheidende Rolle

- Betrachtung der Schadstoffquelle mit der Entscheidung, wie mit ihr umgegangen werden soll,
- Betrachtung der Schadstofffahne, insbesondere die Prognose des Fahnenverhaltens,
- Ermittlung der relevanten natürlichen Schadstoffminderungsprozesse am Standort und
- Betrachtung des noch nicht beeinträchtigten Grundwassers sowie weiterer Schutzgüter.

Als Entscheidungshilfe für die Bewertung der standortbezogenen Untersuchungen und Voraussetzungen werden Empfehlungen gegeben. Diese besagen in Kürze, dass für ein MNA-Konzept

- die Schadstoffmenge in oder der Austrag von Schadstoffen aus der Quelle reduziert werden sollte, um weitere Gefahren für das Grundwasser oder weitere Schutzgüter abzuwenden und/oder um den Zeitraum der Existenz eines Grundwasserschadens zu verkürzen,
- die Gesamtheit der frachtreduzierenden Prozesse (wie biol. Abbau, chem. Transformation, Sorption) den maßgeblichen Anteil an der Schadstoffminderung darstellen sollte und verdünnende Prozesse nur eine untergeordnete Rolle spielen sollten,
- Untersuchungsergebnisse vorliegen müssen, mit denen die Fahnenentwicklung prognostiziert werden kann und
- die Prognose ergeben sollte, dass die Schadstofffahne „quasi stationär“ oder schrumpfend ist und damit eine Verunreinigung des noch nicht betroffenen Grundwassers oder eine Gefährdung weiterer Schutzgüter ausgeschlossen werden kann.

Die Durchführung von MNA als alleinige Maßnahme ist nur dann möglich, wenn nach der Gefährdungsabschätzung die standortbezogenen Voraussetzungen im Einzelfall erfüllt sind und Sanierungsmaßnahmen als unverhältnismäßig eingeschätzt werden. Ist eine Sanierung als alleinige Maßnahme verhältnismäßig, kommt ein MNA-Konzept nicht in Betracht. Die Kenntnis der Wirksamkeit von Schadstoffminderungsprozessen wird zudem im Rahmen

einer Sanierungsuntersuchung auch zur Beurteilung von Sanierungsmaßnahmen (Auswahlmessungen) und Festlegung von Sanierungszielen dienen. Die Durchführung von MNA kann dann in Verbindung mit bzw. im Anschluss an eine Sanierung angemessen sein. Es ist zu erwarten, dass MNA-Konzepte vorrangig in Verbindung mit Sanierungsmaßnahmen zum Tragen kommen.

Eine mögliche Vorgehensweise zur Erarbeitung eines MNA-Konzepts in der Praxis wird in einer gesonderten Anlage (Anhang I) skizziert. Diese beinhaltet folgende Schritte:

- Untersuchungen zur Ermittlung und Beurteilung von natürlichen Schadstoffminderungsprozessen und zur Prognose ihrer Wirksamkeit,
- die Berücksichtigung der Ergebnisse bei der Prüfung der Verhältnismäßigkeit von Maßnahmen und Maßnahmenzielen,
- die Planung und Durchführung der Überwachung zur Kontrolle der Wirksamkeit dieser Prozesse (MNA) und
- eine Kontrolle, dass die Maßnahmenziele dauerhaft eingehalten werden.

Im Positionspapier wird dargestellt, wie die natürliche Schadstoffminderung in der Praxis der Altlastenbearbeitung berücksichtigt werden kann. Die skizzierte systematische Vorgehensweise erlaubt eine nachvollziehbare Entscheidungsfindung. Es wird ein Weg aufgezeigt, wie die zuständigen Bodenschutzbehörden ihr Ermessen ausüben können und im Rahmen der Verhältnismäßigkeitsprüfung von Maßnahmen über die Durchführung von MNA auf Basis eines MNA-Konzepts entscheiden können. Es wird jedoch auch verdeutlicht, dass es sich bei der Durchführung von MNA immer um eine Einzelfallentscheidung handelt, die in enger Abstimmung zwischen Pflichtigem und Behörde getroffen werden sollte.

Der Anhang II soll als Auswahlhilfe für Methoden, Erfahrungen und Vorgehensweisen mit Blick auf die für ein MNA-Konzept zu prüfenden Voraussetzungen dienen. Er stellt eine Auswahl von Methoden bereit, welche für die jeweils zu bearbeitende Fragestellung relevant sind und als praxistauglich eingestuft werden können.

Insbesondere sind Methoden und Hinweise aus dem BMBF Förderschwerpunkt KORA „Kontrollierter natürlicher Rückhalt und Abbau von Schadstoffen bei der Sanierung kontaminierter Grundwässer und Böden“ aufgeführt. Sie werden durch weitere Erkenntnisse, Entwicklungen und Erfahrungen ergänzt

1 Anlass, Arbeitsauftrag und Anwendungsbereich

Anlass

Die Beurteilung von Altlasten erfordert die Kenntnis der räumlichen und zeitlichen Entwicklung von Kontaminationen im Boden und Grundwasser. Die im Rahmen der orientierenden Untersuchung und der Detailuntersuchung ermittelte Kontaminationssituation ist die Basis für die Gefährdungsabschätzung. Diese kann dann zu Sanierungs-, Schutz- oder Beschränkungsmaßnahmen führen.

Die Erfahrungen aus der Altlastenbearbeitung zeigen, dass der „Status quo ante“ in der Mehrzahl der schädlichen Bodenveränderungen und Altlasten durch Sanierungsmaßnahmen nur begrenzt wieder herstellbar ist und vereinbarte Sanierungsziele häufig nicht erreicht werden. Dies ist meist darauf zurückzuführen, dass die Wirkung der Prozesse, die die Schadstoffausbreitung bestimmen, im Vorfeld einer Entscheidung für eine Sanierung nicht hinreichend ermittelt werden kann. Aus diesem Grund können in der Praxis oft nur bedingt geeignete bzw. begrenzt erfolgreiche Sanierungsmaßnahmen ergriffen werden. Dies kann dazu führen, dass nach einem mehrjährigen Sanierungsverlauf trotz eines weiterhin vorhandenen Schadstoffpotentials weitere kostenintensive Maßnahmen als nicht mehr verhältnismäßig angesehen werden und die Restkontamination der natürlichen Schadstoffminderung (Natural Attenuation – NA) überlassen werden soll. Vor diesem Hintergrund wird zunehmend auch im Vorfeld einer Entscheidung über eine Sanierung diskutiert, ob die natürliche Schadstoffminderung als Ergänzung oder Alternative von Sanierungsmaßnahmen berücksichtigt werden kann. Der Kenntnis der natürlichen Schadstoffminderung, deren Beurteilung und anschließender Berücksichtigung bei der Entscheidung über Sanierungsmaßnahmen kommt damit eine zunehmende Bedeutung bei der Bearbeitung von Altlasten zu. Die aktuelle Diskussion über die natürliche Schadstoffminderung und die zunehmende Anzahl von Anfragen bei Vollzugsbehörden bei gleichzeitigem Fehlen von einheitlichen und vollzugstauglichen Grundlagen und Empfehlungen zeigt die Notwendigkeit auf, sich länderübergreifend mit diesem Thema zu beschäftigen und einheitlich

Position zu beziehen. Derzeit existieren nur in wenigen Bundesländern Regelwerke [1, 2], die die Berücksichtigung natürlicher Schadstoffminderungsprozesse im Vollzug der Altlastenbearbeitung thematisieren.

Arbeitsauftrag

Die Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft Bodenschutz (LABO) hatte auf ihrer 24. Sitzung auf Vorschlag ihres Ständigen Ausschusses 5 (Altlastenausschuss – ALA) einen Ad-hoc Unterausschuss eingesetzt, der sich mit der **Berücksichtigung der natürlichen Schadstoffminderung bei der Altlastenbearbeitung** beschäftigen und hierzu ein länderübergreifendes Positionspapier erstellen soll. Hierbei waren insbesondere eine Definition der Begriffe Natural Attenuation, Monitored Natural Attenuation und Enhanced Natural Attenuation sowie deren Einstufung in die Altlastenbearbeitung vorzunehmen, die rechtlichen Aspekte zu betrachten, die Voraussetzungen für die Berücksichtigung im Vollzug zu benennen und eine mögliche Vorgehensweise in der Praxis aufzuzeigen. Es wurde mit Stand vom 01.06.2005 von der Umweltministerkonferenz per Umlaufbeschluss Nr. 17/2005 zur Veröffentlichung freigegeben und den Ländern zur Anwendung empfohlen.

Die LABO hat auf ihrer 33. Sitzung auf Vorschlag des Altlastenausschusses erneut einen Ad-hoc Unterausschuss „Natürliche Schadstoffminderung“ eingesetzt, der die Ausführungen im Positionspapier „Berücksichtigung natürlicher Schadstoffminderungsprozesse bei der Altlastenbearbeitung“ vom 01.06.2005 überprüfen sollte. Der Unterausschuss sollte ermitteln, ob aufgrund der im BMBF Förderschwerpunkt KORA „Kontrollierter natürlicher Rückhalt und Abbau von Schadstoffen bei der Sanierung kontaminierter Grundwässer und Böden“ erarbeiteten Ergebnisse ein Änderungs- oder Ergänzungsbedarf für das Positionspapier besteht. Der Ad-hoc Unterausschuss hatte zudem die Aufgabe, die Ergebnisse des KORA-Förderschwerpunktes (Handlungsempfehlungen/Branchenleitfäden) insbesondere mit Blick auf die aus Vollzugssicht relevanten Fragen auszuwerten.

Anwendungsbereich

Dieses Positionspapier beschränkt sich in seinen Ausführungen auf die Berücksichtigung der natürlichen Schadstoffminderung in der **gesättigten Zone** und enthält Aussagen zu Grundwasserschäden, die durch Altlasten verursacht wurden. Dadurch werden zum einen Überschneidungen mit dem Ad-hoc Unterausschuss „Sickerwasserprognose in der Detailuntersuchung“ vermieden, der u. a. die Berücksichtigung der natürlichen Schadstoffminderung in der ungesättigten Zone im Rahmen der Sickerwasserprognose bearbeitet. Zum anderen beginnen die Betrachtungen erst, nachdem ein Grundwasserschaden¹ festgestellt wurde, d. h. die Beurteilung, ob ein Grundwasserschaden vorliegt, ist abgeschlossen. Für diesen Arbeitsschritt wurden in einem gemeinsamen Unterausschuss von LABO und LAWA [3] Bewertungshilfen (insbesondere für die Begriffe aus § 4 Abs. 7 Bundesbodenschutzverordnung [4] (BBodSchV) „auf Dauer“, „lokal begrenzt“² und „geringe Fracht“³) erarbeitet.

Konkrete Hilfestellungen z. B. für die Anwendung von spezifischen Untersuchungsmethoden oder die Möglichkeiten von MNA bei den verschiedenen Schadstoffgruppen sind dem Förderschwerpunkt KORA des BMBF zu entnehmen, der diese Themen in einer Handlungsempfehlung mit Methodensammlung [5] und branchenspezifischen Leitfäden [6, 7, 8, 9, 10, 11] umfassend aufgearbeitet hat.

Der Begriff Sanierung wird in diesem Papier i. S. d. § 2 Abs. 7 Bundesbodenschutzgesetz [12] (BBodSchG) verwendet, der Sanierung definiert als aktive technische Maßnahmen

- zur Beseitigung oder Verminderung der Schadstoffe (Dekontaminationsmaßnahmen),

¹ Ein Grundwasserschaden liegt dann vor, wenn im Grundwasser die Geringfügigkeitsschwelle (GFS) überschritten wird.

² Der Begriff „lokal begrenzt“ bezieht sich ausschließlich auf Stoffkonzentrationen im Sickerwasser oder andere Schadstoffausträge ins Grundwasser, die nur lokal begrenzt zu erhöhten Stoffkonzentrationen im Grundwasser führen. Er beschreibt nicht, ob die Schadstofffahne lokal begrenzt im Sinne von stationär (ortfest) ist. Zu weiteren Ausführungen siehe [3].

³ Der Begriff „geringe Fracht“ bezieht sich ausschließlich auf Stoffkonzentrationen im Sickerwasser oder andere Schadstoffausträge ins Grundwasser und nicht auf Frachten im Grundwasser selber. Zu weiteren Ausführungen siehe [3].

- die eine Ausbreitung der Schadstoffe langfristig verhindern oder vermindern, ohne die Schadstoffe zu beseitigen (Sicherungsmaßnahmen) und
- zur Beseitigung oder Verminderung schädlicher Veränderungen der physikalischen, chemischen oder biologischen Beschaffenheit des Bodens

2 Begriffsbestimmungen

Bei der Bearbeitung der Thematik ist es erforderlich, die derzeit in der Praxis verbreiteten, aber unterschiedlich verwendeten Begriffe **Natural Attenuation (NA)**, **Monitored Natural Attenuation (MNA)** und **Enhanced Natural Attenuation (ENA)** zu definieren und damit die Grundlage für ein einheitliches Begriffsverständnis zu schaffen. Hierbei wird für die aus den USA übernommenen Begriffe eine deutsche Nomenklatur eingeführt und für die zukünftige Verwendung in der Praxis vorgeschlagen.

Natürliche Schadstoffminderungsprozesse im Sinne dieses Papiers sind - in Anlehnung an die OSWER-Directive [13] der US-EPA - biologische, chemische und physikalische Prozesse, die ohne menschliches Eingreifen zu einer Verringerung der Masse, der Fracht, der Toxizität, der Mobilität, des Volumens oder der Konzentration eines Stoffes im Boden oder Grundwasser führen. Zu diesen Prozessen zählen biologischer Abbau, chemische Transformation, Sorption, Dispersion, Diffusion und Verflüchtigung der Stoffe.

Das Ergebnis dieser Prozesse ist die **natürliche Schadstoffminderung (Natural Attenuation – NA)**.

Überwachung der natürlichen Schadstoffminderung (Monitored Natural Attenuation – MNA) im Sinne dieses Papiers bezeichnet Überwachungsmaßnahmen zur Kontrolle der Wirksamkeit von natürlichen Schadstoffminderungsprozessen. Im Folgenden wird der Begriff mit **MNA** abgekürzt.

Enhanced Natural Attenuation – ENA wird hier als eine „in situ“-Sanierungsmaßnahme angesehen, weil durch die Initiierung, Stimulierung oder Unterstützung von natürlichen Schadstoffminderungsprozessen mit dem Einbringen von Substanzen unter Nutzung natur-

gegebener Reaktionsräume aktiv in das Prozessgeschehen eingegriffen wird. ENA wird in diesem Positionspapier als Sanierungsmaßnahme im Sinne des BBodSchG eingestuft. I. d. R. handelt es sich bei ENA um eine erlaubnispflichtige Gewässerbenutzung im Sinne § 3 Abs. 1 Nr. 5 u. Abs. 2 Nr. 2 WHG.

Für eine behördliche Entscheidung, die unter Berücksichtigung der natürlichen Schadstoffminderung und der Verhältnismäßigkeit ein Absehen von Sanierungsmaßnahmen (vorläufig, partiell oder ausnahmsweise vollständig) in Verbindung mit MNA beinhaltet, wird im Folgenden der Kurzbegriff "**MNA-Konzept**" benutzt. Ein MNA-Konzept enthält grundsätzlich folgende Regelungsbestandteile (Kap. 3):

- a) Festlegung von nachprüfbaren Zielvorgaben in Raum und Zeit, die auf der Basis der Prognose als notwendiges Ergebnis der natürlichen Schadstoffminderungsprozesse angesehen werden, sowie von Zwischenergebnissen für die Zeit bis zum Erreichen des festgelegten Endzustands,
- b) Festlegung von Überwachungsmaßnahmen zur Kontrolle der Wirksamkeit von natürlichen Schadstoffminderungsprozessen (MNA) und Berichtspflichten,
- c) Vorbehalt weiterer Maßnahmen, sofern sich die Prognose nachträglich als unzutreffend erweist, bis zum Erreichen des festgelegten Endzustands.

Ein solches Vorgehen setzt Untersuchungen zum Nachweis der Wirksamkeit der Schadstoffminderungsprozesse, deren Prognose sowie eine Überprüfung der standortbezogenen Voraussetzungen voraus (Kap. 4 und Anh. I) und kann nur in Zusammenhang mit der Überprüfung der Verhältnismäßigkeit technisch in Betracht kommender Sanierungsmaßnahmen (Kap. 5) getroffen werden.

3 Berücksichtigung der natürlichen Schadstoffminderung in bodenschutzrechtlichen Verwaltungsverfahren

Natürliche Schadstoffminderungsprozesse sind Teil der **beurteilungserheblichen Standortgegebenheiten** (Gegebenheiten des Einzelfalls), die bei der Durchführung und der Bewertung der Ergebnisse von orientierenden Untersuchungen und von Detailuntersuchungen zu beachten sind (§ 4 Abs. 1 und 4 BBodSchV). Eine ggf. weitergehende Untersuchung natürlicher Schadstoffminderungsprozesse kann auch Inhalt einer Sanierungsuntersuchung sein.

Bei der Ermittlung natürlicher Schadstoffminderungsprozesse handelt es sich um Untersuchungsmaßnahmen, deren Eignung, Erfordernis und Angemessenheit sich bei den verschiedenen Arbeitsschritten der orientierenden Untersuchung, der Detailuntersuchung und der Sanierungsuntersuchung nach den Umständen des Einzelfalls richtet.

In die stufenweise Bearbeitung von Altlasten sowie durch Altlasten verursachter Grundwasserschäden kann die natürliche Schadstoffminderung gemäß Abb. 1 einbezogen werden. Empfehlungen zum Vorgehen in der Praxis enthält Anhang I.

Zweck der **orientierenden Untersuchung (OU)** ist nach § 2 Nr. 3 BBodSchV die Feststellung, ob der Verdacht einer Altlast oder schädlichen Bodenveränderung ausgeräumt ist oder ein hinreichender Verdacht im Sinne des § 9 Abs. 2 Satz 1 BBodSchG besteht (etwa durch den hinreichenden Verdacht einer von der betreffenden Fläche ausgehenden Gewässerverunreinigung).

Diese Aufgabe obliegt i. d. R. der zuständigen Behörde („Amtsermittlung“). Aufgrund der Fragestellung (Gefahrenforschung, noch keine Gefahrenabwehr- bzw. Schadensbeseitigungsmaßnahmen) ist die Behörde angehalten, mit geringst möglichem Aufwand eine Klärung herbeizuführen. Deshalb ist eine Untersuchung schadstoffmindernder Prozesse grundsätzlich bei der orientierenden Untersuchung nicht erforderlich.

Berücksichtigung der natürlichen Schadstoffminderung bei der Altlastenbearbeitung

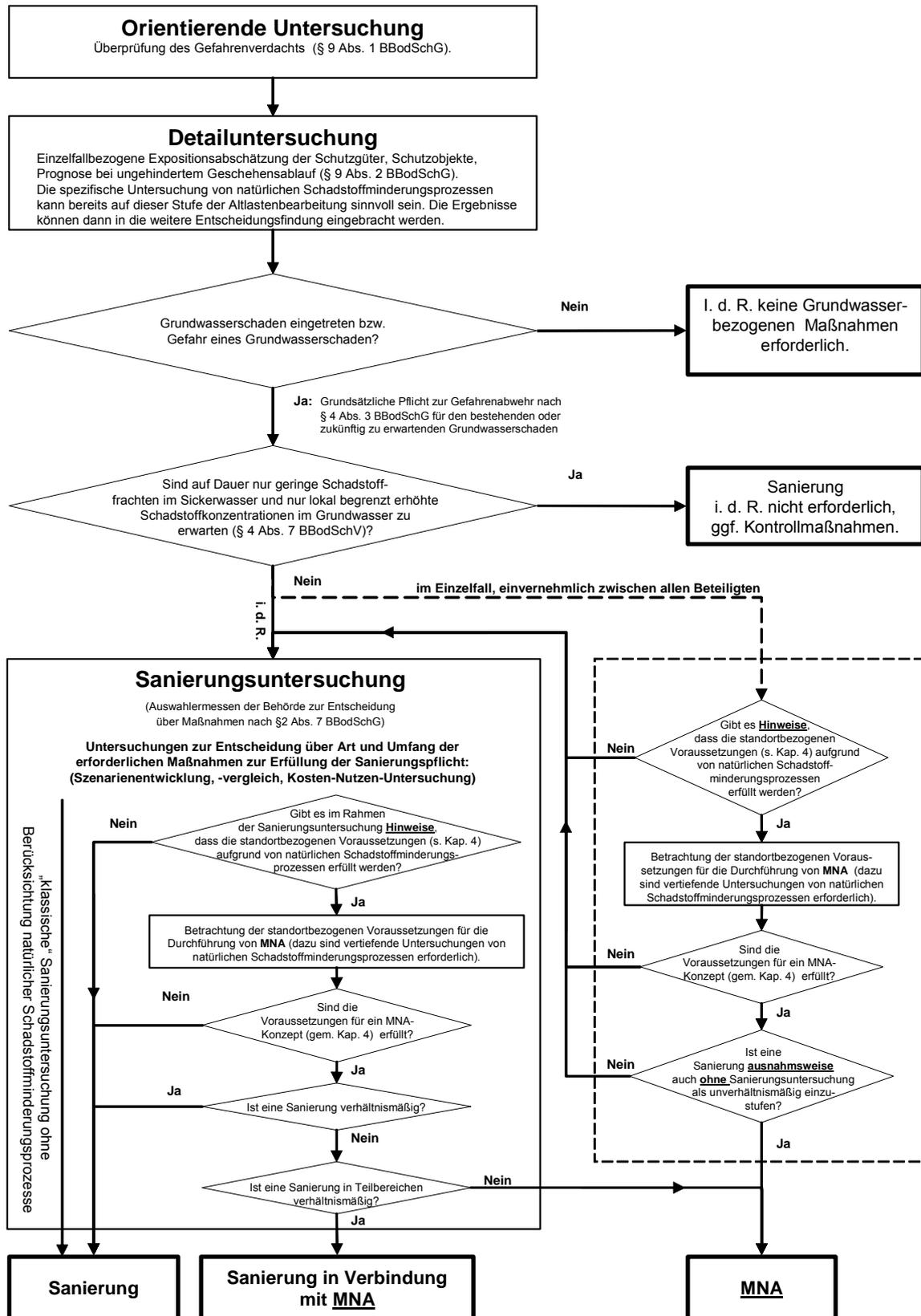


Abb. 1: Berücksichtigung der natürlichen Schadstoffminderung bei der Altlastenbearbeitung.

Ist beabsichtigt, in eine nachfolgende Untersuchungsanordnung auch die Ermittlung natürlicher Schadstoffminderungsprozesse oder dafür maßgebliche Faktoren einzubeziehen, müssen die vorliegenden Erkenntnisse jedoch eine Einschätzung der Bedeutung dieser Prozesse im betreffenden Fall erlauben.

Besteht aufgrund des Ergebnisses der orientierenden Untersuchung oder sonst ermittelter konkreter Anhaltspunkte der hinreichende Verdacht einer Altlast oder schädlichen Bodenveränderung, kann die zuständige Behörde nach § 9 Abs. 2 Satz 1 BBodSchG anordnen, dass ein Pflichtiger die notwendigen Untersuchungen zur Gefährdungsabschätzung durchzuführen hat (**Detailuntersuchung - DU**). Dies schließt Untersuchungen zur Abschätzung der Entwicklung der von einer Altlast hervorgerufenen Auswirkungen ein. Bei einem festgestellten altlastbedingten Grundwasserschaden können dem Pflichtigen auf dieser Stufe grundsätzlich auch Untersuchungen zur Ermittlung schadstoffmindernder Prozesse aufgegeben werden. Auch Untersuchungsreihen zur Ermittlung zeitlicher Verläufe von Schadstoffminderungsprozessen können Gegenstand von Untersuchungsanordnungen nach § 9 Abs. 2 Satz 1 BBodSchG sein: Nach § 3 Abs 7 BBodSchV kommen im Rahmen solcher Anordnungen „auch wiederkehrende Untersuchungen der Schadstoffausbreitung und der hierfür maßgebenden Umstände in Betracht“.

Bei der sachgerechten Ermittlung der natürlichen Schadstoffminderungsprozesse handelt es sich überwiegend um aufwändige, spezifische und über die übliche Ermittlung von Schadstoffkonzentrationen zum Teil weit hinausgehende Untersuchungen, die neben der quantitativen Abschätzung auch eine Prognose der Wirkung der Prozesse beinhalten. Eine Verpflichtung zur Abschätzung der Entwicklung der von einer Altlast oder schädlichen Bodenveränderung hervorgerufenen Auswirkungen folgt grundsätzlich aus § 9 Abs. 2 BBodSchG. Ob und bei welchem Ermittlungsstand spezielle Untersuchungen für diesen Zweck angezeigt sind und ob sie einem Pflichtigen aufgegeben werden können, lässt sich daher nur im Einzelfall und im Hinblick auf die weiteren beabsichtigten Maßnahmen entscheiden. Aus Verhältnismäßigkeitsgründen

werden entsprechende Anordnungen in einem eher geringen Anteil der Fälle in Betracht kommen. Eine Anordnung wird insbesondere dann ausscheiden, wenn bereits absehbar ist, dass die natürliche Schadstoffminderung bei der Ableitung bzw. Anordnung weiterer Maßnahmen keine maßgebende Rolle spielt.

Eine vertiefende Untersuchung der natürlichen Schadstoffminderungsprozesse setzt also ggf. voraus, dass die Behörde aufgrund von Zwischenergebnissen entsprechende Überlegungen (teilweises oder vollständiges Absehen von einer Sanierungsanordnung) anstellt und dies dem Verpflichteten mitteilt.

Es steht dem nach § 4 Abs. 3 ff. BBodSchG Verpflichteten jedoch frei, derartige Untersuchungen auf eigene Initiative durchzuführen und die Ergebnisse in die weitere Entscheidungsfindung einzubringen.

Entsprechende Ergebnisse sind bei der Entscheidung über weitere Maßnahmen zur Gefahrenabwehr zu berücksichtigen. Weiterhin dienen diese Ergebnisse der Gefährdungsabschätzung noch nicht beeinträchtigter Schutzgüter.

Bei der Ermittlung geeigneter, erforderlicher und angemessener Maßnahmen zur Erfüllung der Pflichten zur Gefahrenabwehr im Rahmen einer **Sanierungsuntersuchung (SU, § 13 Abs. 1 BBodSchG)** können natürliche Schadstoffminderungsprozesse untersucht und berücksichtigt werden, wenn die Überwachung der Wirksamkeit solcher Prozesse als Begleitmaßnahme von Sanierungsmaßnahmen in Betracht kommt. Die Ermittlung relevanter schadstoffmindernder Prozesse und die quantitative Abschätzung ihrer Wirksamkeit, die bei der behördlichen Entscheidung über Sanierungsmaßnahmen zu berücksichtigen ist, müssen spätestens auf dieser Stufe der Altlastenbearbeitung erfolgen. An dieser Stelle können insbesondere Varianten untersucht werden, nach denen Sanierungsmaßnahmen unter Berücksichtigung von nachgewiesenen natürlichen Schadstoffminderungsprozessen zum Erreichen des Sanierungszieles führen können. § 13 Abs. 1 bietet wie § 9 Abs. 2 BBodSchG eine Rechtsgrundlage dafür, dass die Bodenschutzbehörde entsprechende Untersuchungen fordert.

Die **Entscheidung der Bodenschutzbehörde**, unter Berücksichtigung von Erkenntnissen über die natürliche Schadstoffminderung teilweise oder vollständig von einer Sanierungsanordnung abzusehen (Ermessen nach § 10 Abs. 1 BBodSchG), setzt zwingend geeignete Untersuchungen über Art und Ausmaß der natürlichen Prozesse sowie eine Prognose ihrer Wirksamkeit und der künftigen Schadstoffausbreitung voraus.

Eine Berücksichtigung der natürlichen Schadstoffminderung kann nur im Zusammenhang mit der Überprüfung der standortbezogenen Voraussetzungen (Kap. 4) und im Zusammenhang mit der Überprüfung der Verhältnismäßigkeit technisch in Betracht kommender Sanierungsmaßnahmen (Kap. 5) erfolgen.

Eine behördliche Entscheidung, die unter Berücksichtigung der natürlichen Schadstoffminderung und der Verhältnismäßigkeit ein Absehen von Sanierungsmaßnahmen (vorläufig, partiell oder ausnahmsweise vollständig) in Verbindung mit MNA beinhaltet, enthält grundsätzlich folgende Regelungsbestandteile:

- a) Festlegung von nachprüfbaren Zielvorgaben in Raum und Zeit, die auf der Basis der Prognose als notwendiges Ergebnis der natürlichen Schadstoffminderungsprozesse angesehen werden, sowie von Zwischenergebnissen für die Zeit bis zum Erreichen des festgelegten Endzustands,
- b) Festlegung von Überwachungsmaßnahmen zur Kontrolle der Wirksamkeit von natürlichen Schadstoffminderungsprozessen (MNA) und Berichtspflichten,
- c) Vorbehalt weiterer Maßnahmen, sofern sich die Prognose nachträglich als unzutreffend erweist, bis zum Erreichen des festgelegten Endzustands.

Die Überwachung der natürlichen Schadstoffminderung (**MNA**) kann verschiedenste technische Schritte umfassen. Diese reichen von der Probennahme (Grundwasser, ggf. Boden oder Bodenluft), über die Analytik gefahren- und prozessbezogener Parameter und Auswertung/Beurteilung der Analysenergebnisse bis hin zur Überprüfung des prognostizierten Prozessgeschehens. Bei MNA werden im Grundsatz „nur“ noch die zuvor als relevant ermittelten Prozesse mit der Fragestellung überwacht,

ob sie weiterhin so ablaufen und zu einer Schadstoffminderung führen, wie sie zum Zeitpunkt der Entscheidung für ein MNA-Konzept festgestellt und beurteilt wurden und damit den Verzicht auf einen Teil einer Sanierungsmaßnahme ermöglicht haben.

Es ist vertretbar, die vorstehend unter a) – c) beschriebenen Regelungen durch eine behördliche Anordnung, durch die Zustimmung zu einem Sanierungsplan oder durch einen öffentlich-rechtlichen Vertrag zu treffen. Sofern die Behörde einseitig hoheitliche Anordnungen trifft, bietet sich bei Altlasten als Rechtsgrundlage für die Überwachungsmaßnahmen und Mitteilungspflichten § 15 Abs. 2 BBodSchG an (insb. bei Sanierungsmaßnahmen und ergänzender Berücksichtigung der natürlichen Schadstoffminderung). Die nach § 4 Abs. 3, 5 und 6 BBodSchG „Verpflichteten“ lassen sich als Bezeichnung eines Personenkreises interpretieren, von dem die Behörde gemäß § 15 Abs. 2 BBodSchG Eigenkontrollmaßnahmen auch dann verlangen kann, wenn sie nicht zugleich Sanierungs- oder Schutzmaßnahmen fordert. Sofern die Überwachungsmaßnahmen maßgeblich dadurch zu rechtfertigen sind, dass der Erfolg von Sanierungsmaßnahmen beobachtet werden soll, die nicht sämtliche Schadstoffe beseitigt haben, kommt eine Rechtfertigung gemäß § 15 Abs. 2 Satz 4 BBodSchG in Betracht.

Nach der Entscheidung, aufgrund von Erkenntnissen über die natürliche Schadstoffminderung teilweise oder vollständig von einer Sanierungsanordnung abzusehen, bleibt das Verwaltungsverfahren weiter anhängig, wie sich an den fortlaufenden Überwachungs- und Mitteilungspflichten sowie den entsprechenden Prüfungen durch die Behörde und ggf. eines Sachverständigen zeigt. Es ist davon auszugehen, dass natürliche Schadstoffminderungsprozesse erheblich längere Zeit benötigen, um ein definiertes Ziel der Schadstoffminderung zu erreichen, als Sanierungsmaßnahmen i. S. d. BBodSchG. Die natürlichen Schadstoffminderungsprozesse laufen auch ohne ein menschliches Eingreifen und ohne Überwachung im Sinne von MNA ab. Die Überwachungsregelungen eines MNA-Konzepts stellen „lediglich“ sicher, dass für alle Beteiligten nachvollziehbar ist, inwieweit die natürlichen

Prozesse weiterhin so ablaufen, wie sie zum Zeitpunkt der Entscheidung ermittelt wurden. Aufgrund der Möglichkeit, die Wirksamkeit der Prozesse überprüfen zu können, kann die Behörde bei nicht ausreichender Wirksamkeit z. B. einschreiten und ggf. andere Maßnahmen ergreifen.

Der nach § 4 Abs. 3 BBodSchG Verpflichtete muss also auch für sich abwägen, ob er diesen Zeitfaktor - der den Wert seines Grundstücks negativ beeinflussen kann - in Kauf nimmt. Er muss ebenso wie die Behörde daran interessiert sein, die Kriterien, unter denen das insgesamt zu erzielende Ergebnis als endgültig erreicht angesehen wird (Punkt a) der Regelungen über ein MNA-Konzept) und somit das bodenschutzrechtliche Verfahren endet, sorgfältig festzulegen.

Vieles spricht dafür, dass ein MNA-Konzept in der überwiegenden Zahl der Fälle die Berücksichtigung und Überwachung der natürlichen Schadstoffminderung als Ergänzung zu oder in Verbindung mit einer Sanierungsmaßnahme enthalten wird und sich in diesen Fällen eine gesonderte rechtliche Einstufung erübrigt.

Da die Überwachung der natürlichen Schadstoffminderungsprozesse (MNA) nicht aktiv in das laufende Prozessgeschehen der Schadstoffminderung eingreift, kann sie nicht mit einer Sanierungsmaßnahme i. S. d. BBodSchG gleichgesetzt werden.

MNA stellt nach mehrheitlicher Auffassung auch keine Schutz- und Beschränkungsmaßnahme nach § 2 Abs. 8 BBodSchG dar, worunter gleichfalls aktive technische oder administrative Maßnahmen zu verstehen sind, wie z. B. Einzäunungen, Warneinrichtungen oder Nutzungsbeschränkungen. Die Überwachung der natürlichen Schadstoffminderung ist mit aktiven Maßnahmen dieser Art nicht gleichzusetzen.

4 Standortbezogene Untersuchungen und Voraussetzungen für ein MNA-Konzept

4.1 Einleitung

Spezielle Untersuchungen zur Ermittlung der natürlichen schadstoffmindernden Prozesse sind bei der stufenweisen Altlastenbearbeitung i. d. R. erst ab der Detailuntersuchung sinnvoll. Die Berücksichtigung der natürlichen Schadstoffminderung kann dann im Rahmen der Gefährdungsabschätzung erfolgen. Folglich kann über ein MNA-Konzept erst auf Basis einer Gefährdungsabschätzung entschieden werden. Die Durchführung von MNA wird in der Mehrzahl der Fälle nach einer Sanierungsuntersuchung in Verbindung mit Sanierungsmaßnahmen zu erwarten sein und selten als alleinige Maßnahme an einem Standort durchgeführt werden.

Um eine einheitliche und nachvollziehbare Beurteilung zu ermöglichen, werden nachfolgend standortbezogene Voraussetzungen für ein MNA-Konzept aufgestellt. Damit soll geprüft werden, ob MNA in Teilbereichen eines Grundwasserschadens als Ergänzung oder Alternative zu Sanierungsmaßnahmen durchgeführt werden kann. Die Prüfung dieser Voraussetzungen stellt eine Einzelfallbetrachtung dar. Dies bedeutet einerseits, dass im Falle der Nichterfüllung einzelner Voraussetzungen nicht automatisch ein MNA-Konzept ausgeschlossen ist. Andererseits besteht bei Erfüllung der Voraussetzungen kein Anspruch auf ein MNA-Konzept. Die standortbezogenen Untersuchungen und die zu prüfenden Voraussetzungen betreffen die Themen Schadstoffquelle, Schadstofffahne, Prozessverständnis, Prognose und die Betrachtung weiterer Schutzgüter.

4.2 Umgang mit der Schadstoffquelle

Der Umgang mit der Schadstoffquelle⁴ - z. B. in Form einer vollständigen oder teilweisen Dekontamination oder Sicherung (hydraulisch oder bautechnisch) - wirkt sich auf die Verhältnisse in der Schadstofffahne⁵ aus und ist bei einem MNA-Konzept zu berücksichtigen.

Damit setzt die Durchführung von MNA grundsätzlich eine Charakterisierung der Schadstoffquelle voraus, sofern diese nicht vollständig dekontaminiert oder gesichert wird.

Die Charakterisierung sollte insbesondere Aussagen zum Schadstoffinventar (Art, Verteilung und Menge der Schadstoffe im Untergrund) und zum Austragsverhalten (Masse/ Zeit) enthalten.

Abb. 2 verdeutlicht an einem skizzierten Grundwasserschaden, wo das Austragsverhalten aus der Quelle und die Schadstofffracht in der Fahne anhand von Bilanzebenen zu betrachten sind.

Die Anforderungen an die Charakterisierung der Schadstoffquelle sind u. a. abhängig vom geplanten Sanierungsverfahren. Während z. B. bei geplanten Auskofferungsmaßnahmen die Kenntnis über die Lage der Quelle im Vordergrund steht, spielt bei hydraulischen Sicherungsmaßnahmen darüber hinaus die vorhandene Schadstoffmasse eine bedeutende Rolle, da diese den Umfang der notwendigen Sicherungsmaßnahmen mitbestimmt. Für ein MNA-Konzept ist die Charakterisierung der Schadstoffquelle unverzichtbar: Die Masse und das Austragsverhalten der Schadstoffe müssen abgeschätzt werden, denn diese beeinflussen die zeitliche und räumliche Entwicklung der Schadstofffahne.

Die Betrachtungen zur Quelle haben damit einen bedeutsamen Einfluss auf die Prognose der Wirksamkeit der Schadstoffminderungsprozesse und auf die Durchführung von MNA. Für den Fall, dass **keine** Sanierungsmaß-

nahmen durchgeführt werden sollen, ist die Frage, wie die Quelle emittieren wird, von entscheidender Bedeutung.

Dazu sind insbesondere folgende Informationen über die Schadstoffquelle erforderlich:

- Lage und Ausdehnung
- Vorhandene Schadstoffmasse
- Zustand der Schadstoffe (gelöst, fixiert, residual, mobil)
- Austragsrate (Masse/Zeit)

Eine Begrenzung der Emission durch Sanierungsmaßnahmen kann bewirken, dass anschließend der Austrag in das Grundwasser als unerheblich eingeschätzt werden kann. Dies gilt insbesondere dann, wenn prognostiziert wird, dass aufgrund natürlicher Schadstoffminderung die Schadstoffgehalte im Abstrom dauerhaft die Gefahrenschwelle unterschreiten. Durch eine Sanierung der Schadstoffquelle wird darüber hinaus der Zeitraum, in dem die Schadstofffahne existiert, verkürzt. Damit verkürzt sich auch der Überwachungszeitraum für den verbliebenen Grundwasserschaden.

Für ein MNA-Konzept ist es i. d. R. notwendig, die Schadstoffmenge in und/oder den Austrag der Schadstoffe aus der Quelle durch Sanierungsmaßnahmen zu reduzieren (Quellensanierung). Damit sollen Gefahren für das bisher unbelastete Grundwasser oder für weitere Schutzgüter abgewendet werden und/oder der Zeitraum der Existenz des Grundwasserschadens maßgeblich verkürzt werden.

⁴ Als Schadstoffquelle werden Bereiche mobiler und residual gesättigter Phase sowie die in der Bodenmatrix der ungesättigten und gesättigten Zone festgelegten Schadstoffe bezeichnet.

⁵ Als Schadstofffahne wird das Grundwasservolumen im Abstrom einer Schadstoffquelle verstanden, in dem die Stoffkonzentrationen über der jeweiligen Geringfügigkeitsschwelle liegen.

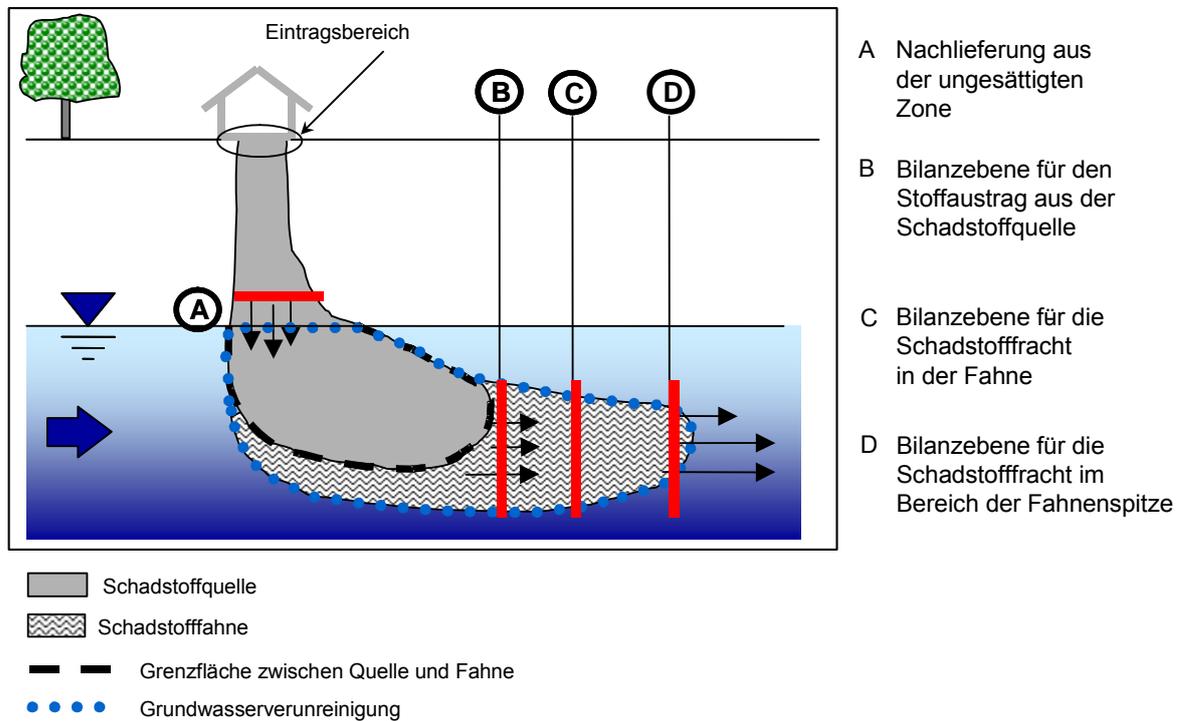


Abb. 2: Betrachtung des Stoffaustrags aus der Schadstoffquelle und der Fracht in der Fahne, verändert nach [3].

4.3 Betrachtung der Schadstofffahne

4.3.1 Zusammenhang zwischen Schadstoffquelle und Schadstofffahne

Bei Grundwasserschäden, bei denen die Schadstoffquelle noch nicht oder nur teilweise entfernt oder gesichert wurde, wirkt sich die Emission unmittelbar auf die Schadstofffahne aus. Für eine Beurteilung der Schadstofffahne müssen daher diejenigen Eigenschaften der Schadstoffquelle untersucht werden, die die Ausbildung der Schadstofffahne bestimmen.

Die Ausbildung der Schadstofffahne hängt darüber hinaus in entscheidender Weise von den Transportprozessen im Untergrund (Kap. 4.3.2) und dem hydrogeologischen Umfeld ab. Aus verschiedenen Möglichkeiten der Fahnenbildung sind einige in Abb. 3 modellhaft skizziert, die allein durch Variation hydrogeologischer Bedingungen bestimmt werden.

Zur Abgrenzung der Schadstofffahne vom noch nicht verunreinigten Grundwasser wird der Geringfügigkeitsschwellenwert (= die Geringfügigkeitsschwelle - GFS⁶) des jeweiligen Schadstoffs bzw. der Schadstoffgruppe verwendet [14].

Nachfolgend sind die wichtigsten Aspekte genannt, die im Zusammenhang mit der Charakterisierung und Bewertung einer Schadstofffahne betrachtet werden sollten:

- das Schadstoffinventar (Art, räumliche Verteilung und Masse der Schadstoffe im Untergrund) sowohl in der Schadstoffquelle als auch in der Fahne,
- das Vorkommen bzw. die Bildung von Metaboliten (z. B. bei LCKW: cis-DCE, VC und Ethen),

⁶ Die GFS ist ein stoffspezifischer Konzentrationswert im Grundwasser, der die Grenze zwischen einer geringfügig veränderten chemischen Beschaffenheit des Grundwassers und einer schädlichen Verunreinigung des Grundwassers (Grundwasserschaden) darstellt.

- die aktuelle räumliche Begrenzung der Fahne,
- das Austragsverhalten aus der Quelle, insbesondere die Schadstofffracht (Masse pro Zeiteinheit, Bilanzebene B der Abb. 2),
- das räumliche und zeitliche Ausbreitungsverhalten der Schadstofffahne, insbesondere die Schadstofffracht in mindestens 2 abstromig angeordneten Fließquerschnitten (Bilanzebene C und D der Abb. 2).

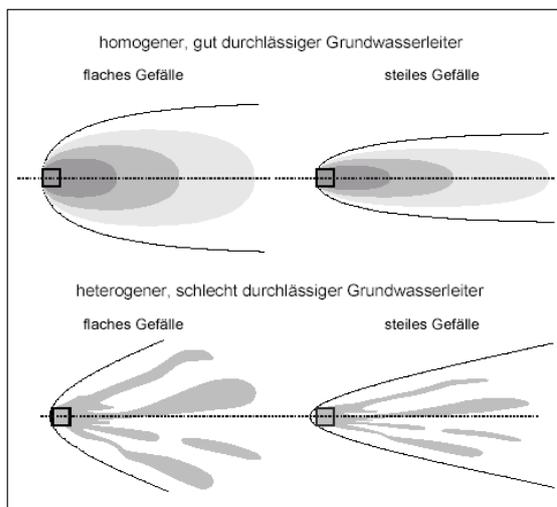


Abb. 3: Schematische Darstellung verschiedener Fahnenkonturierungen in Abhängigkeit von den hydrogeologischen Randbedingungen [15].

4.3.2 Identifizierung und Quantifizierung natürlicher Schadstoffminderungsprozesse

Eine Voraussetzung für ein MNA-Konzept ist der Nachweis natürlicher Schadstoffminderungsprozesse am Standort. Hierbei ist es notwendig, zwischen zwei Arten von Prozessen zu unterscheiden: Prozesse, bei denen die **Fracht** der Schadstoffe reduziert wird (z. B. biologischer Abbau, chemische Transformation und Sorption) und Prozessen, die **nur** die **Konzentration** von Schadstoffen verringern (hydrodynamische Dispersion). Da die Unterscheidung zwischen den einzelnen Prozessen sehr aufwändig sein kann, ist zunächst der Nachweis sinnvoll, dass die Fracht im Verlauf der Schadstofffahne reduziert wird. Hierdurch können die **frachtreduzierenden Prozesse** von den **verdünnenden Prozessen** abge-

grenzt werden. Für die anschließende Prognose ist dann eine Bestimmung der maßgebenden Einzelprozesse erforderlich. Da verdünnende Prozesse die Fracht der Schadstoffe im Grundwasser nicht vermindern, dürfen sie bei einem MNA-Konzept nur eine untergeordnete Rolle spielen. Im Folgenden werden die einzelnen Schadstoffminderungsprozesse kurz charakterisiert. Nachweismethoden und Bewertungsverfahren sind im Förderschwerpunkt KORA entwickelt und untersucht worden. Sie sind in den jeweiligen Branchenleitfäden [6, 7, 8, 9, 10, 11] und in der Methodensammlung [5] dokumentiert.

Der **biologische Abbau** ist bei vielen Grundwasserschäden der maßgebende frachtreduzierende Prozess. Daher ist der Nachweis des Abbaus ein wichtiges Kriterium für ein MNA-Konzept. Die Unterscheidung zwischen Abbauprozessen und sonstigen schadstoffmindernd wirkenden Prozessen ist indikativ bereits in einem frühen Stadium der Untersuchungen möglich. Es bietet sich derzeit an, über routinemäßig zu bestimmende Parameter des Standorts (z. B. das Redoxpotential, die Temperatur, die Konzentration von Hydrogencarbonat) oder das Auftreten von Metaboliten indirekt Hinweise auf eine biologische Abbauprozesse zu ermitteln. An der Entwicklung von Methoden, die die Abbauprozesse „in situ“ z. B. durch die Bestimmung funktionaler Gene nachweisen, wird derzeit gearbeitet.

Für die Prognose des Schadstoffabbaus (Kap. 4.3.3) werden Abbauraten (Abnahme der Schadstoffkonzentration durch biologische Aktivität pro Zeiteinheit) benötigt. Diese Raten sind derzeit schwer am Standort zu bestimmen und werden daher gegenwärtig häufig aus der Literatur übernommen oder in Mikrokosmenstudien im Labor gewonnen. Da Mikrokosmen die Realität aber nur ungenügend nachbilden können, zeigen sie lediglich ein Abbaupotential auf. Es ist deshalb anzustreben, dass die Abbauraten für die Prozessmodellierung auch „in situ“ am Standort bestimmt werden. Dazu sind derzeit verschiedene Methoden in der Entwicklung wie spezielle Probenahmetechniken (Aufwuchskörper), molekularbiologische Methoden oder die Bestimmung der Isotopenfraktionierung durch Messung der

Isotopenverhältnisse in den jeweiligen Ausgangsschadstoffen und/ oder Abbauprodukten.

Bei biologischen Prozessen muss – in Abhängigkeit von den Standortverhältnissen und von der Art und Konzentration der Schadstoffe – unter natürlichen Bedingungen auch mit der Möglichkeit eines unvollständigen Abbaus gerechnet werden. Deshalb müssen Metabolite, die sich in der Fahne anreichern, ebenfalls beurteilt werden.

Chemische Transformationsprozesse können schadstoffreduzierend wirksam sein. Unter chemischer Transformation sind alle Prozesse subsummiert, die den Schadstoff in seinen chemischen Eigenschaften verändern, ohne dass Mikroorganismen direkt daran beteiligt sind. Diese Prozesse werden vorwiegend bei anorganischen Schadstoffen zu betrachten sein (z. B. Fällung). Qualitativ können chemische Transformationsprozesse über die Untersuchung der Randbedingungen (z. B. Verfügbarkeit von Reaktanden, Bestimmung der Redoxverhältnisse) abgeschätzt werden.

Die **Sorption** führt zu einer Festlegung von gelösten Schadstoffen an der Feststoffmatrix. Diese Art der Festlegung ist ein Gleichgewichtsprozess, der von der Beschaffenheit des Untergrundes und den Schadstoffeigenschaften abhängt. Je nach Lage des Gleichgewichts (oder Stärke der Wechselwirkung) sind die Stoffe schwach bis nahezu irreversibel festgelegt. Sorptionsprozesse können durch Batch- und Säulenversuche mit Standortmaterial und unter standortnahen Bedingungen (wie pH-Wert, Temperatur) quantifiziert werden. Für eine Reihe von Schadstoffen können die Sorptionsparameter näherungsweise auch aus der Literatur entnommen werden. Für die Abschätzung der Sorption organischer Schadstoffe ist es notwendig, standortspezifische Kohlenstoffgehalte im Feststoff zu ermitteln. Die Sorption kann als Prozess zur Minderung der Schadstofffracht einbezogen werden, wenn von den sorbierten Schadstoffen keine weitere Gefahr ausgeht. Dabei muss jedoch zusätzlich geprüft werden, ob durch eine Änderung der hydrochemischen und geochemischen Randbedingungen eine Desorption erfolgen kann, und wie diese zu bewerten ist.

Die **hydrodynamische Dispersion** (Summe aus Dispersion und molekularer Diffusion) ist ein Prozess, der nur die Konzentration der Schadstoffe mindert (Verdünnung), indem die Schadstoffe auf ein größeres Volumen im Grundwasser verteilt werden. Die Heterogenität in Grundwasserleitern beeinflusst dabei in hohem Maße die longitudinale und transversale Dispersion und bestimmt damit unmittelbar die Verdünnung des Schadstoffes im Untergrund. Durch die hydrodynamische Dispersion wird die Masse der Schadstoffe im Grundwasser nicht reduziert, jedoch werden frachtreduzierende Prozesse mittelbar beeinflusst. Die Abgrenzung der Verdünnung von den Prozessen, die die Masse der Schadstoffe im Grundwasser reduzieren (im Wesentlichen der biologische Abbau) oder Schadstoffe zurückhalten (im Wesentlichen die Sorption) ist oft schwierig. Deswegen kann eine Prognose der Schadstoffreduktion sich nicht allein auf den Nachweis der Abnahme der Schadstoffkonzentration in den Messstellen stützen, da dieser Nachweis noch keinen Schluss auf den Anteil der Verdünnung an der Schadstoffminderung zulässt.

Eine Abschätzung der hydrodynamischen Dispersion kann z. B. mit Hilfe von Tracerversuchen mit „konservativen“ (nicht reaktiven) Tracern erfolgen.

Für ein MNA-Konzept sind zunächst die frachtreduzierenden von den verdünnenden Prozessen zu unterscheiden; beide sollten anschließend quantifiziert werden. Die Untersuchung sollte nachweisen, dass die Frachtreduktion den maßgeblichen Anteil an der Schadstoffminderung ausmacht. Die Bestimmung der relevanten Einzelprozesse ist Voraussetzung für die anschließende Prognose des Fahnenverhaltens.

4.3.3 Bewertung der Schadstofffahne und Prognose des Fahnenverhaltens

Eine Bewertung der Schadstofffahne setzt voraus, dass die horizontale und vertikale Ausdehnung der Schadstofffahne bekannt ist. Zur Bewertung des Fahnenverhaltens ist eine Prognose der zeitlichen Veränderung auf

Grund der Wirkung natürlicher Schadstoffminderungsprozesse notwendig. Die Bewertung des Fahnenverhaltens kann dann anhand zweier Merkmale erfolgen:

- Die Schadstofffahne bildet sich zurück, ist „quasi-stationär“⁷ oder dehnt sich weiter aus. Für die beiden ersten Fallgestaltungen bedeutet dies, dass das Ausdehnungsverhalten keine weitere Grundwasserschädigung im Abstrom erwarten lässt, sofern sich die Randbedingungen für die natürlichen Schadstoffminderungsprozesse nicht ändern. Dies bedeutet, dass auch eine Verlagerung in tiefere Grundwasserleiter ausgeschlossen ist. Die dritte Fallgestaltung besagt, dass eine Gefährdung für das Grundwasser und für weitere Schutzgüter im Abstrom besteht. Eine erste worst-case Einschätzung zur Beurteilung, ob eine Schadstofffahne stationär ist, kann unter Zuhilfenahme einfacher analytischer Rechenansätze vorgenommen werden.
- Die Austragsrate der Schadstoffe aus noch vorhandenen Schadstoffquellen ist größer oder kleiner im Vergleich zur Schadstoffminderungsrate durch natürliche Prozesse in der Fahne. Sofern die Schadstoffminderungsrate größer oder gleich der Austragsrate ist, ist davon auszugehen, dass die Schadstofffahne einen „quasi-stationären“ bzw. sich zurückbildenden Zustand erreicht hat.

An die Prognose des Fahnenverhaltens werden an dieser Stelle lediglich Voraussetzungen formuliert. Es werden keine Vorgaben zum Einsatz eines mathematischen Lösungsverfahrens gemacht oder Softwareempfehlungen gegeben. Die Betrachtungen sollten jedoch auf der Basis eines konzeptionellen, hydrogeologischen Standortmodells [16] beginnen. Bei der Prognose des Fahnenverhaltens können prinzipiell folgende Möglichkeiten unterschieden werden:

- Die Prognose erfolgt auf Basis konzeptioneller Überlegungen. Dies können z. B.

⁷ Eine Schadstofffahne wird als „quasi-stationär“ verstanden, wenn sie sich auf Dauer räumlich nicht mehr ausdehnt. Das bedeutet, dass ihre räumliche Kontur, beschrieben durch die Grenze zwischen GFS-Über- bzw. -Unterschreitung sich nicht mehr ausdehnt oder in Richtung des weiteren Abstroms verschiebt. Sie muss somit im Rahmen der natürlichen Variation der Fließbedingungen (Fließgeschwindigkeit, -richtung), wie aber auch der Reaktionsbedingungen ortsfest sein.

eine Zeitreihenanalyse von Grundwasserbeschaffenheitsdaten (Schadstoffe, Metaboliten und Leitparameter) und eine Extrapolation dieser Zeitreihen in die Zukunft sein. Die Erfahrung hat jedoch bisher gezeigt, dass

- a) zuverlässig interpretierbare Zeitreihen nur im Ausnahmefall existieren und die Anzahl der Messstellen oft nicht ausreicht und
- b) eine Extrapolation schwierig und mit großen Unsicherheiten behaftet ist.

Die Extrapolation von Konzentrationszeitreihen kann jeweils nur an einzelnen Messstellen unter Berücksichtigung der hydraulischen Verhältnisse erfolgen.

- Die Prognose erfolgt zusätzlich modellgestützt. Eine solche Vorgehensweise ist aber nur dann sinnvoll, wenn
 - a) neben der Modellierung der Grundwasserströmung auch der Schadstofftransport sowie die Stofftransformationen modelliert werden,
 - b) die Randbedingungen am Standort (insbesondere Hydrogeologie, Hydrochemie, Charakteristik der Schadstoffquelle und der Schadstofffahne, der Prozesse und der Prozessräume) hinreichend genau bekannt bzw. abschätzbar sind, und
 - c) der notwendige Umfang der Parameterermittlung bzw. Parameteridentifikation für die Modellierung bekannt ist.

Hierbei werden mathematische Modelle, die mitunter komplexe physikalische, chemische und biologische Prozesse nachbilden können, eine Prognose aber immer auch nur auf Grundlage von z. T. unvollständig vorliegenden Daten bzw. vereinfachten, konzeptionellen Annahmen vornehmen können.

Aus den Untersuchungsergebnissen zur Schadstofffahne muss eine Prognose aufgestellt werden können, ob aktuell und zukünftig eine Verunreinigung des noch nicht betroffenen Grundwassers oder weiterer Schutzgüter ausgeschlossen werden kann oder zu besorgen ist.

Die Schadstofffahne sollte „quasi-stationär“ oder schrumpfend sein.

4.4 Schutz des noch nicht beeinträchtigten Grundwassers und Berücksichtigung weiterer Schutzgüter

4.4.1 Vorbemerkung

Bei der Prüfung der standortbezogenen Voraussetzungen für ein MNA-Konzept sind insbesondere das noch nicht verunreinigte Grundwasser und weitere Schutzgüter zu berücksichtigen. Es muss daher festgestellt werden, welche weiteren Schutzgüter betroffen sind oder künftig betroffen sein können.

Der Maßstab für die Gefahrenbewertung bei altlastenbedingten Grundwasserschäden ergibt sich aus dem Wasserrecht. Bei der Prüfung der Frage, ob und in welchem Umfang Gefahrenabwehrmaßnahmen durchgeführt werden sollen, ist u. a. der Verweis in § 4 Abs. 4 BBodSchG auf die wasserrechtlichen Maßstäbe zu beachten.

4.4.2 Schutzgüter nach dem Bodenschutz- und Wasserrecht

Schutzgüter werden im BBodSchG nicht explizit definiert. Der Schutzbegriff des BBodSchG ist ausgerichtet auf die Erhaltung und Wiederherstellung von Bodenfunktionen. Daher verpflichtet das BBodSchG bei schädlichen Bodenveränderungen und Altlasten sowie bei dadurch verursachten Gewässerverunreinigungen zur Gefahrenabwehr.

Aus § 1 und § 2 Abs. 2 BBodSchG lassen sich ohne Wertung und nicht abschließend folgende Schutzgüter ableiten:

- a) der Boden in seinen Nutzungsfunktionen (Rohstofflagerstätte, Fläche für Siedlung und Erholung, Standort für landwirt-/forstwirtschaftliche Nutzungen und Standort für wirtschaftliche und öffentliche Nutzungen)
- b) Gewässer.

In der BBodSchV wird über die Definition des Wirkungspfades in § 2 Zif. 8 und der (nicht abschließenden) Benennung der Wirkungspfade in Anhang 1 ff. BBodSchV unmittelbar auf folgende Schutzgüter verwiesen:

- a) Mensch (Wirkungspfad Boden-Mensch, Wirkungspfad Boden-Nutzpflanze),

- b) Grundwasser (Wirkungspfad Boden-Grundwasser).
- c) Nutzpflanze (Wirkungspfad Boden-Nutzpflanze).

Nach § 1a WHG sind die Gewässer als Bestandteil des Naturhaushaltes und als Lebensraum für Tiere und Pflanzen zu schützen. Schutzgut sind die Gewässer selbst, unabhängig von ihrer Funktion und Nutzung.

4.4.3 Betrachtung relevanter Schutzgüter

Bei der Prüfung der Voraussetzungen für ein MNA-Konzept tritt u. a. die Frage auf: Welche weiteren Schutzgüter werden durch die bereits eingetretene Schädigung des Grundwassers so betroffen bzw. in ihrer Funktion beeinträchtigt, dass eine Tolerierung dieser Belastung und damit ein MNA-Konzept nicht möglich ist.

Bei dieser vorgenannten Prüfung sind im Einzelfall insbesondere die folgenden Schutzgüter zu beachten:

- a) Der Boden in seinen natürlichen Bodenfunktionen:
z. B. Beeinträchtigung als Lebensraumfunktion auf grundwasserbeeinflussten Standorten.
- b) Der Boden in seinen Nutzungsfunktionen:
z. B. als Fläche für Siedlung und Erholung bzw. Fläche für gewerbliche Nutzung, wenn leichtflüchtige schädliche Verbindungen durch Abbauprozesse entstehen und durch Entgasung und Schadstoffanreicherung in Gebäuden eine Gefährdung hervorrufen.
- c) Oberirdische Gewässer und Grundwässer im Abstrom der belasteten Grundwasserbereiche

Für ein MNA-Konzept sollten zukünftig keine weiteren Schutzgüter beeinträchtigt werden.

5 Ermessensausübung und Verhältnismäßigkeitsprüfung

Im Rahmen der Altlastenbearbeitung übt die zuständige Behörde ihr Ermessen⁸ u. a. bei der Entscheidung zu folgenden Fragen, die insbesondere im Zusammenhang mit einem MNA-Konzept relevant sind, aus:

- a) Nach Durchführung und Bewertung der Detailuntersuchung und Feststellung der Gefahrenlage:
Ist eine Sanierungsuntersuchung und ggf. Sanierung einzuleiten oder sind andere Maßnahmen (z. B. Überwachungsmaßnahmen, Schutz- und Beschränkungsmaßnahmen) ausreichend?
- b) Bei der Auswahl der erforderlichen Maßnahmen (i. d. R. im Rahmen der Sanierungsuntersuchung):
Welche Maßnahmen zur Gefahrenabwehr sind geeignet, erforderlich und angemessen und daher durchzuführen?
- c) Bei der Festlegung der Sanierungs- bzw. Maßnahmenzielwerte:
Welche Zielwerte sind einzelfallspezifisch mit verhältnismäßigen Mitteln zu erreichen?

Zu a)

Stellt die zuständige Behörde nach Durchführung und Bewertung der Detailuntersuchung eine Gefahr für das Grundwasser bzw. einen Schaden im Grundwasser fest, entscheidet sie im Rahmen ihres Ermessens darüber, ob Maßnahmen zur Gefahrenabwehr notwendig

werden. Nach der Feststellung des Schadens ist die Behörde zum Einschreiten befugt, jedoch nicht dazu verpflichtet (§ 10 Abs. 1 Satz 1 BBodSchG: "Zur Erfüllung ... kann die zuständige Behörde die notwendigen Maßnahmen treffen").

Nach der Gefahren-/Schadensfeststellung ist daher eine Einzelfallentscheidung über die Durchführung von Gefahrenabwehrmaßnahmen erforderlich. Im Ergebnis dieser Prüfung wird die grundsätzliche Entscheidung über die Notwendigkeit von weiteren (insbesondere Sanierungs-) Maßnahmen getroffen. Dieses Entschließungsermessen beinhaltet eine Verhältnismäßigkeitsprüfung⁹ bezüglich weiterer Maßnahmen, für die z. B. § 4 Abs. 7 BBodSchV in Betracht kommende Kriterien, wie „geringe Schadstofffracht“ oder „lokal begrenzt“ erhöhte Schadstoffkonzentration beispielhaft nennt.

Dies gilt auch für ein MNA-Konzept, sofern die standortbezogenen Voraussetzungen (Kap. 4) bereits in diesem Stadium des Entscheidungsprozesses erfüllt sind. Dies setzt jedoch voraus, dass detaillierte Untersuchungen zu Schadstoffminderungsprozessen bereits in der Detailuntersuchung durchgeführt worden sind und dass abschätzbar ist, ob Sanierungsmaßnahmen für diesen Schadensbereich unverhältnismäßig sind.

⁸ **Ermessen** bedeutet, dass die Behörde einen Handlungsspielraum besitzt, weil für den konkret zu entscheidenden Fall mehrere unterschiedliche Vorgehensweisen/Bearbeitungsmöglichkeiten rechtlich zulässig wären. Bezogen auf das BBodSchG ergibt sich aus § 10 Abs. 1, dass die Behörde die notwendigen Maßnahmen ergreifen kann aber nicht muss.

Die Behörden haben bei der Ermessensausübung stets so zu entscheiden, wie der Gesetz- bzw. Verordnungsgeber selbst den konkreten Fall vermutlich geregelt hätte. Sie haben bei ihrer Entscheidung daher neben den allgemeinen Rechtsgrundsätzen (wie z. B. Angemessenheit der Mittel, Erforderlichkeit und Zumutbarkeit für den Betroffenen) immer auch den Zweck der zur Ausübung des Ermessens ermächtigenden Vorschrift und die inhaltlichen Grenzen dieser Ermächtigung zu beachten. Durch eine Verwaltungsvorschrift kann für typische Einzelfälle vorgegeben sein, wie das Ermessen zu gebrauchen ist.

Das verwaltungsrechtliche Handeln unterscheidet zwei Ermessensformen: Ist einer Behörde beim Vorliegen bestimmter Umstände ein **Entschließungsermessen** eingeräumt, so muss sie selbst pflichtgemäß entscheiden, ob sie überhaupt tätig wird. Wenn sie tätig wird, hat die Behörde dann oft mehrere in Betracht kommende Handlungsalternativen, aus denen sie im Rahmen des **Auswahlermessens** wählen kann.

⁹ Innerhalb der Ermessensausübung kommt der Prüfung der **Verhältnismäßigkeit** eine besondere Bedeutung zu: Der Grundsatz der Verhältnismäßigkeit ist aus dem im Grundgesetz verankerten Rechtsstaatsprinzip hergeleitet worden und hat daher Verfassungsrang. Der rechtliche Maßstab für die Ermessensausübung ergibt sich aus § 40 VwVfG: „Ist die Behörde ermächtigt, nach ihrem Ermessen zu handeln, hat sie ihr Ermessen entsprechend dem Zweck der Ermächtigung auszuüben und die gesetzlichen Grenzen des Ermessens einzuhalten“. Die Verhältnismäßigkeitsprüfung gliedert sich in drei Schritte:

Geeignetheit: Geeignet ist eine Maßnahme, wenn mit ihr der angestrebte Erfolg erreicht werden kann.

Erforderlichkeit: Erforderlich ist nur die Maßnahme, die im Vergleich zu anderen den gleichen Erfolg erreichen kann, aber weniger belastend für den Pflichtigen und die Allgemeinheit ist bzw. geringeren Aufwand bedingt („milderes Mittel“).

Angemessenheit: Angemessen ist eine Maßnahme, wenn der Nachteil bzw. Aufwand und der angestrebte Erfolg in einem vernünftigen Verhältnis zueinander stehen (Kosten-Nutzen-Vergleich).

Der Verhältnismäßigkeitsgrundsatz erfordert ein je nach Rechtsverstoß und Schwere des Eingriffs abgestuftes Vorgehen. Im Rahmen der Altlastenbearbeitung bedeutet dies, dass die behördlich festgelegten Maßnahmen und deren Folgen für den Pflichtigen in einem angemessenen Verhältnis zum Ausmaß der abzuwehrenden Gefahr stehen müssen.

Zu b)

Unter Berücksichtigung der festgelegten Sanierungsziele sind i. d. R. im Rahmen einer Sanierungsuntersuchung die technisch geeigneten Verfahren zu ermitteln und ein Variantenvergleich durchzuführen. Zu diesem Zeitpunkt wird der Behörde ein Auswahlermessen eingeräumt, bei dessen Ausübung insbesondere die Verhältnismäßigkeit zu berücksichtigen ist. Das Auswahlermessen bezieht sich dabei auf Maßnahmen, die

- geeignet sind, das festgelegte Sanierungsziel zu erreichen,
- das jeweils mildeste Mittel zur Erreichung des Sanierungszieles darstellen, und
- mit einem Aufwand durchzuführen sind, der in einem angemessenen Verhältnis zum angestrebten Sanierungsziel steht.

Dabei ist zu berücksichtigen, dass diese Kriterien aufeinander aufbauen, d.h. dass für das jeweilige Sanierungsziel nicht geeignete Maßnahmen aus der weiteren Betrachtung heraus fallen. Das schließt aus, dass zur Erreichung der Sanierungsziele geeignete und nicht geeignete Maßnahmen unter dem Aspekt der Kosten (milderes Mittel) verglichen werden und die ggf. geringeren Kosten den Ausschlag für eine nicht geeignete Maßnahme geben.

Sofern eine Sanierungsmaßnahme die drei o. g. Kriterien erfüllt, kommt ein MNA-Konzept als alleinige Alternative **nicht** in Betracht.

Treffen die Kriterien zunächst auf keine der untersuchten und zur Auswahl stehenden Sanierungsmaßnahmen zu, ist unter Berücksichtigung des technisch Machbaren das Sanierungsziel neu zu formulieren und die Prüfung der dafür geeigneten Maßnahmen neu durchzuführen (diese Anpassung der Sanierungsziele an das technisch Machbare erfolgt als iterative Vorgehensweise innerhalb einer Sanierungsuntersuchung, es müssen dazu nicht nacheinander mehrere Sanierungsuntersuchungen durchgeführt werden). Ein MNA-Konzept kann nur dann (im Rahmen des Auswahlermessens) in Betracht kommen, wenn durch natürliche Schadstoffminderungsprozesse das neu formulierte Ziel erreicht werden kann. Wenn die dafür erforderlichen Untersuchungen in der Detailuntersuchung nicht durchgeführt wurden, können diese vom Pflichtigen im Rahmen der Sanierungsuntersuchung

nachgeholt werden. Wichtige fachliche Aspekte bei der Verhältnismäßigkeitsprüfung in diesem Stadium sind insbesondere der Zeitpunkt, bis zu dem das Ziel erreicht werden kann, die Prognosesicherheit auf Basis der zugrundeliegenden Annahmen sowie die Sicherheit, mit der der Grundwasserschaden vom Pflichtigen bis zum Erreichen des Zieles überwacht werden kann. Dazu gehört auch die Kontrolle, dass das Ziel dauerhaft eingehalten wird.

Zu c)

Nach der Entscheidung über die standortspezifischen Maßnahmen-/Sanierungsziele werden (ggf. in einer Sanierungsuntersuchung) auch die an die Ziele zu knüpfenden Zielwerte iterativ festgelegt. Dabei sind die aus den vorangegangenen Untersuchungen bekannten natürlichen Schadstoffminderungsprozesse zu berücksichtigen. Sind die dafür erforderlichen Untersuchungen in der Detailuntersuchung nicht erfolgt, können diese vom Pflichtigen im Rahmen der Sanierungsuntersuchung verlangt bzw. nachgeholt werden.

Bei den vorstehend beschriebenen Ermessensentscheidungen ist von folgenden Grundsätzen auszugehen: Aus § 4 Abs. 3 BBodSchG ergibt sich, dass das Gesetz grundsätzlich die Durchführung von Sanierungsmaßnahmen verlangt, die auf kurze Sicht die von der schädlichen Bodenveränderung oder Altlast hervorgerufene Gefahr beseitigen. Im Gefahrenabwehrrecht sollen Gefahren generell beseitigt werden. Das Absehen von einer Durchsetzung dieser Pflicht gemäß § 10 Abs. 1 BBodSchG stellt demnach die rechtfertigungsbedürftige Ausnahme dar. Die Bodenschutzbehörde unterliegt zunächst keinem Begründungszwang, wenn sie eine über die natürliche Schadstoffminderung hinausgehende Sanierung fordert. Bei der Diskussion über die Alternative, sich für eine Berücksichtigung der natürlichen Schadstoffminderung zu entscheiden, geht es um die Frage "Ist die Einbeziehung der natürlichen Schadstoffminderung unter Berücksichtigung der künftigen Nutzung hinreichend geeignet, der zeitliche Aufschub und das verbleibende Risiko hinreichend vertretbar, um von Sanierungsmaßnahmen teilweise (ausnahmsweise ganz) abzusehen?".

Damit wird zugleich deutlich, dass das Sanierungsziel, welches sich über Sanierungsmaßnahmen i. S. d. BBodSchG erreichen lässt, die gesetzlich fundierte Leitlinie dafür bildet, was materiell erreicht werden sollte, also im Zweifel auch verhältnismäßig i. e. S. ist (vorbehaltlich der Besonderheiten beim Zustandsstörer nach der BVerfG-Rechtsprechung).

Die Durchführung von MNA als alleinige Maßnahme ist nur dann möglich, wenn nach der Gefährdungsabschätzung die standortbezogenen Voraussetzungen im Einzelfall erfüllt sind und Sanierungsmaßnahmen als unverhältnismäßig eingeschätzt werden.

Ist eine Sanierung als alleinige Maßnahme verhältnismäßig, kommt ein MNA-Konzept nicht in Betracht.

Die Kenntnis von Schadstoffminderungsprozessen dient im Rahmen einer Sanierungsuntersuchung auch zur Beurteilung von Sanierungsmaßnahmen und zur Festlegung von Sanierungszielen (Auswahl-ermessen). Ein MNA-Konzept kann dann in Verbindung mit einer Sanierung bzw. im Anschluss an eine Sanierungsmaßnahme angemessen sein. Es ist zu erwarten, dass MNA-Konzepte vorrangig in Verbindung mit Sanierungsmaßnahmen zum Tragen kommen.

6 Überwachung der natürlichen Schadstoffminderung (MNA)

Die prognostizierte Wirkung der natürlichen Schadstoffminderungsprozesse ist durch ein an den Einzelfall angepasstes Grundwasser-Überwachungsprogramm nachzuweisen. Dieses kann durch eine behördliche Anordnung, durch die Zustimmung zu einem Sanierungsplan oder durch einen öffentlich-rechtlichen Vertrag geregelt werden.

6.1 Anforderungen an das Überwachungsprogramm

Bei der Konzeption des Überwachungsprogramms ist zu berücksichtigen, dass sich das

Reaktionssystem "Schadstofffahne" über größere Zeiträume hinweg verändern kann. Deshalb müssen auch Änderungen von hydrogeologischen, geochemischen, mikrobiologischen oder anderen Rahmenbedingungen, welche die Wirksamkeit von Schadstoffminderungsprozessen beeinflussen können, erfasst werden. Das Überwachungsprogramm hat daher die kontinuierliche Aufgabe,

- die Überprüfung der Prognose zu gewährleisten,
- Änderungen bezüglich der Ausbildung der Schadstofffahne zu erfassen und
- Aussagen über die relevanten Schadstoffminderungsprozesse zu ermöglichen.

Das Überwachungsprogramm geht damit über das reine Aufzeichnen von Schadstoffkonzentrationen hinaus.

Als Ergebnis der Ermittlung natürlicher Schadstoffminderungsprozesse wurden die Prozesse selber und insbesondere deren Wirkung nachgewiesen. Anhand dieser Ergebnisse können dann auch die maßgeblichen Parameter und Messpunkte zur Überwachung dieser Wirksamkeit festgelegt werden. Sie bestimmen den Mindestumfang für das Überwachungsprogramm.

6.2 Beurteilungskriterien für die Überwachung

Grundlage für die Erfolgsbetrachtung ist die Prognose. Die Überwachung ist mindestens so lange durchzuführen, bis das vereinbarte Ziel erreicht und sichergestellt ist, dass die Schadstoffkonzentrationen dauerhaft unterhalb der Zielwerte bleiben. Sollten die Prozesse entgegen der Prognose nicht in der vorgegebenen Zeit zum Erreichen des vereinbarten Ziels beitragen, ist eine erneute Gefahrenbeurteilung durchzuführen und zu prüfen, ob Alternativmaßnahmen erforderlich werden.

Im Rahmen des MNA-Konzepts sollte der Pflichtige auch darlegen, wie die weiteren Handlungsschritte aussehen, wenn die Überwachungsergebnisse eine Abweichung von der Prognose anzeigen und damit die Schadstoffminderungsprozesse nicht in dem Maße ablaufen, wie sie ursprünglich für das MNA-Konzept angenommen wurden.

6.3 Zeitraum für MNA

Der zu erwartende Zeitraum für MNA ergibt sich zunächst aus der Prognose. Die Überwachung ist jedoch mindestens so lange durchzuführen, bis die Schadstoffkonzentrationen dauerhaft unterhalb der definierten Zielwerte bleiben.

Der Zeitraum, in dem die natürlichen Schadstoffminderungsprozesse zur Erreichung der vereinbarten Ziele führen, ist durch Beurteilung der einzelfallspezifischen Rahmenbedingungen zu ermitteln.

Eine generelle Empfehlung für einen maximalen Zeitraum, in dem MNA durchgeführt werden kann, erscheint nicht sachgerecht.

Konkrete Zeitpunkte der Überwachung (z. B. Stichtagsmessungen, Probenahmezyklus) in Verbindung mit Zwischenzielen sind festzulegen. Um sicherzustellen, dass die Durchführung der Überwachung auch langfristig gewährleistet ist und dass im Falle der Abweichung von der Prognose ggf. Alternativmaßnahmen ergriffen werden können, kommt die Auferlegung einer Sicherheitsleistung gestützt auf § 16 Abs. 1 BBodSchG in Betracht. Gerichtsentscheidungen zu dieser Frage sind bisher nicht ergangen.

ANHANG 1 Empfehlungen zum Vorgehen in der Praxis

<u>Schritt I</u>	Prüfung der Voraussetzungen zur Erarbeitung eines MNA-Konzeptes
I.1	Vorgaben der Behörde zur Vereinbarung von Rahmenbedingungen mit dem Pflichtigen
I.2	Prüfung der standortbezogenen Voraussetzungen anhand des vorhandenen Kenntnisstandes
<u>Schritt II</u>	Nachweis der Wirksamkeit von Schadstoffminderungsprozessen und Erstellung eines MNA-Konzeptes
II.1	Standortuntersuchungen zum Nachweis der Wirksamkeit von Schadstoffminderungsprozessen
II.2	Prognose der Schadstofffahnenentwicklung
II.3	Auswertung und Beurteilung Ergebnisse
II.4	Erstellung eines MNA-Konzeptes und Begründung seiner Eignung
<u>Schritt III</u>	Behördliche Entscheidung über die Eignung und Durchführung von MNA
<u>Schritt IV</u>	Durchführung von MNA

Im Folgenden wird die Berücksichtigung der natürlichen Schadstoffminderung in der Praxis der Altlastenbearbeitung anhand eines schrittweisen Vorgehens erläutert. Die wesentlichen Arbeitsschritte mit den maßgebenden Inhalten können zusammenfassend der nachfolgenden Tabelle entnommen werden. Dabei ist zu berücksichtigen, dass die Erstellung eines MNA-Konzeptes sowie die Entscheidung über die Durchführung von MNA immer eine Einzelfallentscheidung ist, die nur eingeschränkt anhand festgelegter Verfahrensabläufe getroffen werden kann.

Berücksichtigung der natürlichen Schadstoffminderung bei der Altlastenbearbeitung

Tab. A1-1: Empfehlungen zum schrittweisen Vorgehen bei der Erstellung eines MNA-Konzeptes, der Entscheidung für und Durchführung von MNA.

Schritt I Prüfung der Voraussetzungen zur Erstellung eines MNA-Konzeptes	
I.1 Vorgaben der Behörde zur Vereinbarung von Rahmenbedingungen	<ul style="list-style-type: none"> ○ Das MNA-Konzept ist Ergebnis einer Einzelfallprüfung ○ Art und Umfang des Nachweises der Wirksamkeit der schadstoffmindernden Prozesse sind abzustimmen. ○ Die grundsätzliche Sanierungsnotwendigkeit wird durch MNA nicht in Frage gestellt. ○ MNA als alleinige Maßnahme ist nur möglich, wenn die standortbezogenen Voraussetzungen erfüllt sind und Sanierungsmaßnahmen als unverhältnismäßig eingeschätzt werden. ○ Ist eine Sanierung als alleinige Maßnahme verhältnismäßig, kommt MNA nicht in Betracht. ○ Zur Kontrolle der Wirksamkeit der Schadstoffminderungsprozesse ist ein abgestimmtes Monitoring durchzuführen. ○ Eine alternative Handlungsoption ist vorzusehen.
I.2 Prüfung der standortbezogenen Voraussetzungen	<ul style="list-style-type: none"> • Standortpotenzial • Stoffeintrags- und Reaktionsräume • Hydrogeologische Modellvorstellung
Schritt II Nachweis der Wirksamkeit von Schadstoffminderungsprozessen und Erstellung eines MNA-Konzeptes	
II.1 Standortuntersuchungen zum Nachweis der Wirksamkeit von Schadstoffminderungsprozessen	<ul style="list-style-type: none"> ○ Räumliche Lage und Ausdehnung der Schadstofffahne ○ Untersuchungen zur Ermittlung von Schadstofffrachten an Bilanzebenen ○ Untersuchungen zur Identifikation und Quantifizierung der maßgebenden Einzelprozesse ○ Untersuchungen auf Basis einer Defizitanalyse zur Erstellung der Prognose
II.2 Prognose der Schadstofffahnenentwicklung	<ul style="list-style-type: none"> • Erstellen eines numerischen Modells (Strömungs-, Transport- und Reaktionsprozesse) • Abschätzung des langfristigen Verlaufs und der Nachhaltigkeit des Prozessgeschehens • Darstellung der Prognoseunsicherheiten anhand von Szenarienbetrachtungen und Sensitivitätsanalysen • Identifizierung der Leitparameter
II.3 Auswertung und Beurteilung der Ergebnisse	<ul style="list-style-type: none"> ○ Abschließende Auswertung und Beurteilung aller Randbedingungen und Untersuchungsergebnisse. ○ Standortspezifische Beurteilung von Sanierungsmaßnahmen (nach Abschluss der Sanierungsuntersuchung).
II.4 Erstellung eines MNA-Konzeptes und Begründung seiner Eignung	<ul style="list-style-type: none"> • Erstellung eines MNA-Konzeptes mit seinen zugehörigen Regelungsbestandteilen • Monetäre Darstellung der Maßnahmen • Begründung für die Eignung des MNA-Konzeptes
Schritt III	
Behördliche Entscheidung über die Eignung und Durchführung von MNA	<ul style="list-style-type: none"> ○ Kriterien für die Entscheidung: <ul style="list-style-type: none"> ▪ Sind und wenn ja in welchem Umfang die standortbezogenen Voraussetzungen nach Kap. 4 des Textteils erfüllt? ▪ Stellt das MNA-Konzept die notwendige Überwachungsintensität sicher und bietet es die Möglichkeit eines rechtzeitigen Eingreifens? ▪ Für welche Bereiche des Grundwasserschadens ist eine Sanierung verhältnismäßig und daher durchzuführen? ▪ Für welche Bereiche des Grundwasserschadens ist eine Sanierung allein vor dem Hintergrund nachgewiesener Schadstoffminderungsprozesse unverhältnismäßig und anstatt einer Sanierung die Durchführung von MNA eine angemessene Maßnahme? ○ Vereinbarung eines verbindlichen Regelungsinstrumentes
Schritt IV	
Durchführung von MNA	<ul style="list-style-type: none"> • Durchführung des Monitorings auf Basis des Überwachungsplans • Überprüfung der Prognose (Soll-Ist-Vergleich), ggf. Anpassung der Vorgehensweise • Bei Zielerreichung abschließende Gefahrenbewertung

A1-1 Prüfung der Voraussetzungen zur Erarbeitung eines MNA-Konzeptes

A1-1.1 Vorgaben der Behörde zur Vereinbarung von Rahmenbedingungen mit dem Pflichtigen

Schritt I Prüfung der Voraussetzungen zur Erarbeitung eines MNA-Konzeptes	
I.1 Vorgaben der Behörde zur Vereinbarung von Rahmenbedingungen	<ul style="list-style-type: none"> Das MNA-Konzept ist Ergebnis einer Einzelprüfung Art und Umfang des Nachweises der Wirksamkeit der schadstoffmindernden Prozesse sind abzustimmen Die grundsätzliche Sanierungsnotwendigkeit wird durch MNA nicht in Frage gestellt MNA als alleinige Maßnahme ist nur möglich, wenn die standortbezogenen Voraussetzungen erfüllt sind und Sanierungsmaßnahmen als unverhältnismäßig eingeschätzt werden Ist eine Sanierung als alleinige Maßnahme verhältnismäßig, kommt MNA nicht in Betracht Zur Kontrolle der Wirksamkeit der Schadstoffminderungsprozesse ist ein abgestimmtes Monitoring durchzuführen Eine alternative Handlungsoption ist vorzusehen
I.2 Prüfung der standortbezogenen Voraussetzungen	<ul style="list-style-type: none"> Standortpotenzial Stofffrage- und Reaktionsdumme Hydrogeologische Modellvorstellung
Schritt II Nachweis der Wirksamkeit von Schadstoffminderungsprozessen und Erstellung eines MNA-Konzeptes	
II.1 Standortuntersuchungen zum Nachweis der Wirksamkeit von Schadstoffminderungsprozessen	<ul style="list-style-type: none"> Räumliche Lage und Ausdehnung der Schadstofffahne Untersuchungen zur Ermittlung von Schadstofffrachten an Bioträgern Untersuchungen zur Identifikation und Quantifizierung der maßgebenden Einzelprozesse Untersuchungen auf Basis einer Defizitanalyse zur Erstellung der Prognose
II.2 Prognose der Schadstofffahnenentwicklung	<ul style="list-style-type: none"> Erstellen eines numerischen Modells (Strömungs-, Transport- und Reaktionsprozesse) Abschätzung des langfristigen Verlaufs und der Nachhaltigkeit des Prozessgeschehens Darstellung der Prozessunsicherheiten anhand von Szenarioeinschätzungen und Sensitivitätsanalysen Identifizierung der Leitparameter
II.3 Auswertung und Beurteilung der Ergebnisse	<ul style="list-style-type: none"> Abschließende Auswertung und Beurteilung aller Randbedingungen und Untersuchungsergebnisse Standortspezifische Beurteilung von Sanierungsmaßnahmen (nach Abschluss der Sanierungsuntersuchung)
II.4 Erstellung eines MNA-Konzeptes und Begründung seiner Eignung	<ul style="list-style-type: none"> Erstellung eines MNA-Konzeptes mit seinen zugehörigen Regelungsbestandteilen Monetäre Darstellung der Maßnahmen Begründung für die Eignung des MNA-Konzeptes
Schritt III	
Behördliche Entscheidung über die Eignung und Durchführung von MNA	<ul style="list-style-type: none"> Kriterien für die Entscheidung Sind und wenn ja in welchem Umfang die standortbezogenen Voraussetzungen nach Kap. 4 des Textteils erfüllt? Stellt das MNA-Konzept die notwendige Überwachungsintensität sicher und bietet es die Möglichkeit eines rechtzeitigen Eingreifens? Für welche Bereiche des Grundwasserschadens ist eine Sanierung verhältnismäßig und daher durchzuführen? Für welche Bereiche des Grundwasserschadens ist eine Sanierung allein vor dem Hintergrund nachgewiesener Schadstoffminderungsprozesse unverhältnismäßig und ersetzt einer Sanierung die Durchführung von MNA eine angemessene Maßnahme? Vereinbarung eines verbindlichen Regelungsinstrumentes
Schritt IV	
Durchführung von MNA	<ul style="list-style-type: none"> Durchführung des Monitorings auf Basis des Überwachungsplans Überprüfung der Prognose (Soll-Ist-Vergleich), ggf. Anpassung der Vorgehensweise Bei Zestreichung abschließende Gefährdungsbeurteilung

Zu Beginn der Überlegungen über eine Durchführung von MNA ist zu klären, ob die Behörde aufgrund von Standortgegebenheiten die Umsetzung eines MNA-Konzeptes als grundsätzlich möglich erachtet. Seitens des Pflichtigen muss die Bereitschaft erkennbar sein, die Nachweise (II.1) nach den Vorgaben der Behörde zu erbringen. Diese Klärung sollte i. d. R. nach der Detailuntersuchung und vor der Sanierungsuntersuchung erfolgen. Folgende Aspekte sind dabei zu beachten:

- Die Entscheidung über die Durchführung von MNA ist das Ergebnis einer Einzelfallprüfung. Hierbei werden die Ergebnisse des stufenweisen Vorgehens zur Erstellung eines MNA-Konzeptes fortlaufend beurteilt und bewertet, im Wesentlichen mit dem Ziel zu entscheiden, ob die Erstellung eines MNA-Konzeptes weiter verfolgt werden soll, oder ob MNA als alternative Handlungsoption verworfen werden muss.
- Art und Umfang des Nachweises, dass schadstoffmindernde Prozesse in relevantem

Umfang wirksam sind, sollte mit der Behörde abgestimmt werden.

- Die grundsätzliche Sanierungsnotwendigkeit wird durch die Entscheidung zur Durchführung von MNA nicht in Frage gestellt. MNA bedeutet nur die Tolerierung eines räumlich und zeitlich begrenzten Grundwasserschadens auf der Basis von nachgewiesenen und prognostizierten Schadstoffminderungsprozessen unter der Berücksichtigung des Verhältnismäßigkeitsgrundsatzes.
- Die Durchführung von MNA ist nur dann möglich, wenn die standortbezogenen Voraussetzungen (Kap. 4 des Textteils) erfüllt sind und Sanierungsmaßnahmen als unverhältnismäßig eingeschätzt werden.
- Ist eine Sanierung als alleinige Maßnahme verhältnismäßig, kommt ein MNA-Konzept nicht in Betracht.
- Im Falle einer Entscheidung für MNA ist ein auf die Kontrolle der Wirksamkeit der Schadstoffminderungsprozesse abgestimmtes Monitoring durchzuführen.
- Es ist eine alternative Handlungsoption für den Fall vorzusehen, dass die prognostizierte Wirksamkeit der Schadstoffminderungsprozesse nicht im erforderlichen Umfang stattfindet.

In der Praxis sollte der Pflichtige darlegen, warum er ganz oder teilweise auf eine Sanierung verzichten und stattdessen MNA durchführen möchte. Dabei sollte er die v. g. Randbedingungen beachten und sich hinsichtlich der erforderlichen Untersuchungen und Nachweise an den standortbezogenen Voraussetzungen (Kap. 4 des Textteils) orientieren.

Die konkrete stufenweise Bearbeitung mit dem Ziel der Erstellung eines MNA-Konzeptes sollte begonnen werden, wenn zwischen den Beteiligten (Behörde, Pflichtiger) Konsens über den Handlungs-, Untersuchungs- und Nachweisrahmen besteht.

Es wird empfohlen, die in den einzelnen Schritten erzielten Teilergebnisse der Behörde vorzulegen und darin jeweils auch die aktuelle Erfolgswahrscheinlichkeit eines MNA-Konzeptes zu beurteilen. Dies gewährleistet ein entscheidungsorientiertes und kostenoptimiertes Vorgehen und zielt auf eine einvernehmliche Lösung zwischen Pflichtigem und Behörde ab.

A1-I.2 Prüfung der standortbezogenen Voraussetzungen anhand des vorhandenen Kenntnisstandes

Schritt I Prüfung der Voraussetzungen zur Erarbeitung eines MNA-Konzeptes	
1.1 Vorgaben der Behörde zur Vereinbarung von Rahmenbedingungen	<ul style="list-style-type: none"> • Das MNA-Konzept ist Ergebnis einer Einzelbefragung • Art und Umfang des Nachweises der Wirksamkeit der schadstoffmindernden Prozesse sind abzustimmen • Die grundsätzliche Sanierungsnotwendigkeit wird durch MNA nicht in Frage gestellt • MNA als alleinige Maßnahme ist nur möglich, wenn die standortbezogenen Voraussetzungen erfüllt sind und Sanierungsmaßnahmen als unverhältnismäßig eingeschätzt werden • Ist eine Sanierung als alleinige Maßnahme verhältnismäßig, kommt MNA nicht in Betracht • Zur Kontrolle der Wirksamkeit der Schadstoffminderungsprozesse ist ein abgestimmtes Monitoring durchzuführen • Eine alternative Handlungsoption ist vorzuziehen
1.2 Prüfung der standortbezogenen Voraussetzungen	<ul style="list-style-type: none"> • Standortpotenzial • Stoffeintrags- und Reaktionsdynamik • Hydrogeologische Modellierung
Schritt II Nachweis der Wirksamkeit von Schadstoffminderungsprozessen und Erstellung eines MNA-Konzeptes	
II.1 Standortuntersuchungen zum Nachweis der Wirksamkeit von Schadstoffminderungsprozessen	<ul style="list-style-type: none"> • Räumliche Lage und Ausdehnung der Schadensfahne • Untersuchungen zur Ermittlung von Schadstofffrachten an Bilanzebenen • Untersuchungen zur Identifikation und Quantifizierung der maßgebenden Einzelprozesse • Untersuchungen auf Basis einer Defizitanalyse zur Erstellung der Prognose
II.2 Prognose der Schadstofffahnenentwicklung	<ul style="list-style-type: none"> • Erstellen eines numerischen Modells (Strömungs-, Transport- und Reaktionsprozesse) • Abschätzung des langfristigen Verlaufs und der Nachhaltigkeit des Prozessgeschehens • Darstellung der Prognoseunsicherheiten anhand von Szenarienbetrachtungen und Sensitivitätsanalysen • Identifizierung der Leitparameter
II.3 Auswertung und Beurteilung der Ergebnisse	<ul style="list-style-type: none"> • Abschließende Auswertung und Beurteilung aller Randbedingungen und Untersuchungsergebnisse • Standortpezifische Beurteilung von Sanierungsmaßnahmen (nach Abschluss der Sanierungspotenzialuntersuchung)
II.4 Erstellung eines MNA-Konzeptes und Begründung seiner Eignung	<ul style="list-style-type: none"> • Erstellung eines MNA-Konzeptes mit seinen zugehörigen Regelungsbestandteilen • Mandatäre Darstellung der Maßnahmen • Begründung für die Eignung des MNA-Konzeptes
Schritt III	
Behördliche Entscheidung über die Eignung und Durchführung von MNA	<ul style="list-style-type: none"> • Kriterien für die Entscheidung: <ul style="list-style-type: none"> • Sind und wenn ja in welchem Umfang die standortbezogenen Voraussetzungen nach Kap. 4 des Textteils erfüllt? • Stellt das MNA-Konzept die notwendige Überwachungsintensität sicher und bietet es die Möglichkeit eines rechtzeitigen Eingreifens? • Für welche Bereiche des Grundwasserschadens ist eine Sanierung verhältnismäßig und daher durchzuführen? • Für welche Bereiche des Grundwasserschadens ist eine Sanierung allein vor dem Hintergrund nachgewiesener Schadstoffminderungsprozesse unverhältnismäßig und anstatt einer Sanierung die Durchführung von MNA eine angemessene Maßnahme? • Vereinbarung eines verbindlichen Regelungsinstrumentes
Schritt IV	
Durchführung von MNA	<ul style="list-style-type: none"> • Durchführung des Monitorings auf Basis des Überwachungsplans • Überprüfung der Prognose (Soll-Ist-Vergleich), ggf. Anpassung der Vorsetzweise • Bei Zielerreichung abschließende Defizitbeseitigung

Auf Grundlage des vorhandenen Kenntnisstandes (i. d. R. Detailuntersuchung) und der vorgenannten Aspekte (I.1) wird geprüft, ob die Erstellung eines MNA-Konzeptes eine zielführende Handlungsoption ist, d.h. ob die standortbezogenen Voraussetzungen für die Durchführung von MNA erfüllt sein könnten.

Vor Beginn aufwändiger Untersuchungen zum Nachweis natürlicher Schadstoffminderungsprozesse sollten deshalb die bereits vorhandenen Daten gesichtet und aufgearbeitet werden, da die im Hinblick auf ein MNA-Konzept diskutierten Standorte häufig bereits eine umfangreiche Untersuchungshistorie bis hin zu durchgeführten oder laufenden Sanierungsmaßnahmen aufweisen. Die Beurteilung findet einerseits unter wissenschaftlich-technischen

Aspekten (Identifizierung des Prozessgeschehens), insbesondere jedoch anhand der standortbezogenen Voraussetzungen (Kap. 4 des Textteils) statt, die für ein MNA-Konzept relevant sind. Bereits in diesem Stadium kann die Anforderung, dass kein weiteres Schutzgut betroffen ist, abgeschätzt werden. Weiterhin sollte betrachtet werden, ob der vorhandene Grundwasserschaden in seiner bis dahin bekannten räumlichen Ausdehnung als Reaktionsraum toleriert werden könnte und ein MNA-Konzept prinzipiell zulassen würde, oder ob anderweitige Kriterien dem entgegenstehen.

Da zu diesem Zeitpunkt eine Abschätzung des Zeitrahmens, in dem MNA durchgeführt werden würde, noch sehr unsicher ist, sollte als „worst case“-Ansatz von einer Existenz des aktuellen Grundwasserschadens „bis auf Weiteres“ ausgegangen werden. Folgendes ist zu beachten:

Standortpotenzial

- Art und Eigenschaften der beurteilungsrelevanten Schadstoffe

Hierbei ist zu prüfen, ob diese Schadstoffe aufgrund ihrer Stoffeigenschaften Schadstoffminderungsprozessen überhaupt ausreichend zugänglich sind. Hinweise liefern u. a. Literaturrecherchen über Sorptions- und Abbaueigenschaften der Schadstoffe.

- Abbau- und Rückhaltepotenzial

Das Abbaupotenzial kann z. B. anhand der Daten zur generellen Abbaubarkeit anhand üblicherweise vorliegender Daten zur Schadstoffverteilung (Veränderung der Schadstoffmuster und Metabolitenbildung), einer vergleichenden Abschätzung der vorliegenden Fahnausbreitung zum fiktiven Schadstofftransport ohne Berücksichtigung des Abbaus sowie anhand der Daten zur Identifikation der Redoxverhältnisse beurteilt werden. Das Rückhaltepotenzial kann z. B. über den K_d -Ansatz abgeschätzt werden.

- Beschaffenheit der Quelle
Die räumliche Struktur und stoffliche Zusammensetzung der Quelle sowie das Vorliegen von Phasenkörpern haben einen maßgebenden Einfluss auf die Dauer der Emission und die Höhe der Fracht.
- Ausdehnung und Entwicklung der Fahne
Die vorliegenden Daten zur räumlichen Ausdehnung und bisherigen Entwicklung der Fahne sind mit dem Ziel auszuwerten, die Auswirkungen und den weiteren Umgang mit dem GW-Schaden abzuschätzen.
- Hydrogeochemische Randbedingungen
Die hydrogeochemischen Randbedingungen können Aufschluss darüber geben, ob im Einzelfall die maßgebenden Abbauprozesse (z. B. reduktive Dechlorierung) überhaupt stattfinden können.
- Grundwasser-Fließverhältnisse
Variierende Grundwasser-Fließverhältnisse können Schadstoffminderungsprozesse in ihrer Wirksamkeit beeinflussen.

Stoffeintrags- und Reaktionsräume

Für die weitere Betrachtung der Option MNA ist von Bedeutung, dass der Untersuchungsraum bekannt ist bzw. abgegrenzt wird. Dazu gehört, dass sowohl alle Bereiche mit Schadstoffeinträgen, die Schadstoffausbreitung als auch die Bereiche, in denen Einträge von anderen relevanten Stoffen (z. B. Elektronenakzeptoren) erfolgen, die für Abbauprozesse bedeutsam sind, erfasst werden

Hydrogeologische Modellvorstellung

Auf der Grundlage der vorhandenen (hydro-)geologischen und (hydro-)geochemischen Daten ist ein Konzeptmodell zu erstellen, in dem die wesentlichen für die Beurteilung der Schadstoffminderungsprozesse maßgebenden Standortrandbedingungen dargestellt sind. Das Konzeptmodell dient konkret der Visualisierung und Beschreibung der vorherrschenden Strömungs- und Transportverhältnisse sowie der Hydrochemie.

In diesem Stadium der Bearbeitung ist i. d. R. eine Einschätzung möglich, ob und für welche Bereiche des Grundwasserschadens ein MNA-Konzept in Frage kommen kann, und welche Bereiche saniert werden müssen. Entscheidend für die Umsetzbarkeit eines MNA-Konzeptes ist aber, ob bzw. in welchem Umfang die standortbezogenen Voraussetzungen nach Kapitel 4 des Textteils erfüllt sind.

Im Ergebnis der Prüfung der v. g. standortbezogenen Randbedingungen kann zwischen Behörde und Pflichtigem die nächste Bearbeitungsstufe vereinbart werden.

A1-II Nachweis der Wirksamkeit von Schadstoffminderungsprozessen und Erstellung eines MNA-Konzeptes

A1-II.1 Standortuntersuchungen zum Nachweis der Wirksamkeit von Schadstoffminderungsprozessen

Schritt I Prüfung der Voraussetzungen zur Erarbeitung eines MNA-Konzeptes	
1.1 Vorgaben der Behörde zur Vereinbarung von Rahmenbedingungen	<ul style="list-style-type: none"> • Das MNA-Konzept ist Ergebnis einer Einzelprüfung • Art und Umfang des Nachweises der Wirksamkeit der schadstoffmindernden Prozesse sind abzustimmen. • Die grundsätzliche Sanierungsnotwendigkeit wird durch MNA nicht in Frage gestellt. • MNA als alleinige Maßnahme ist nur möglich, wenn die standortbezogenen Voraussetzungen erfüllt sind und Sanierungsmaßnahmen als unverhältnismäßig eingeschätzt werden. • Ist eine Sanierung als alleinige Maßnahme verhältnismäßig, kommt MNA nicht in Betracht. • Zur Kontrolle der Wirksamkeit der Schadstoffminderungsprozesse ist ein abgestimmtes Monitoring durchzuführen. • Eine alternative Handlungsoption ist vorzusehen.
1.2 Prüfung der standortbezogenen Voraussetzungen	<ul style="list-style-type: none"> • Standortpotenziale • Stoffeintrags- und Reaktionsräume • Hydrogeologische Modellvorstellung
Schritt II Nachweis der Wirksamkeit von Schadstoffminderungsprozessen und Erstellung eines MNA-Konzeptes	
II.1 Standortuntersuchungen zum Nachweis der Wirksamkeit von Schadstoffminderungsprozessen	<ul style="list-style-type: none"> • Räumliche Lage und Ausdehnung der Schadstofffahne • Untersuchungen zur Ermittlung von Schadstofffrachten an Bilanzebenen • Untersuchungen zur Identifikation und Quantifizierung der maßgebenden Einzelprozesse • Untersuchungen auf Basis einer Defizitanalyse zur Erstellung der Prognose
II.2 Prognose der Schadstofffahnenentwicklung	<ul style="list-style-type: none"> • Erstellen eines numerischen Modells (Strömungs-, Transport- und Reaktionsprozesse) • Abschätzung des langfristigen Verlaufs und der Nachhaltigkeit des Prozessgeschehens • Darstellung der Prognoseunsicherheiten anhand von Szenarienbetrachtungen und Sensitivitätsanalysen • Identifizierung der Leitparameter
II.3 Auswertung und Beurteilung der Ergebnisse	<ul style="list-style-type: none"> • Abschließende Auswertung und Beurteilung aller Randbedingungen und Untersuchungsergebnisse • Standortspezifische Beurteilung von Sanierungsmaßnahmen (nach Abschluss der Sanierungsuntersuchung)
II.4 Erstellung eines MNA-Konzeptes und Begründung seiner Eignung	<ul style="list-style-type: none"> • Erstellung eines MNA-Konzeptes mit seinen zugehörigen Regelungsbestandteilen • Monetäre Darstellung der Maßnahmen • Begründung für die Eignung des MNA-Konzeptes
Schritt III	
Behördliche Entscheidung über die Eignung und Durchführung von MNA	<ul style="list-style-type: none"> • Kriterien für die Entscheidung: <ul style="list-style-type: none"> • Sind und wenn ja in welchem Umfang die standortbezogenen Voraussetzungen nach Kap. 4 des Textteils erfüllt? • Stellt das MNA-Konzept die notwendige Überwachungsintensität sicher und bietet es die Möglichkeit eines rechtzeitigen Eingreifens? • Für welche Bereiche des Grundwasserschadens ist eine Sanierung verhältnismäßig und daher durchführbar? • Für welche Bereiche des Grundwasserschadens ist eine Sanierung allein vor dem Hintergrund nachgewiesener Schadstoffminderungsprozesse unverhältnismäßig und anstatt einer Sanierung die Durchführung von MNA eine angemessene Maßnahme? • Vereinbarung eines verbindlichen Regelungsinstrumentes.
Schritt IV	
Durchführung von MNA	<ul style="list-style-type: none"> • Durchführung des Monitorings auf Basis des Überwachungsplans • Überprüfung der Prognose (Sol-Ist-Vergleich), ggf. Anpassung der Vorgehensweise • Bei Zielerreichung abschließende Geländebewertung

In diesem Teilschritt sind standortspezifisch die wissenschaftlich-technischen Daten für den Nachweis der Eignung eines MNA-Konzeptes zu erarbeiten, so dass dieser Schritt von entscheidender Bedeutung ist. Er ist auf die der Schadstofffahnenentwicklung zugrundeliegen-

den Prozesse ausgerichtet. Im Ergebnis muss geklärt sein, welche Prozesse dabei von maßgebender Bedeutung sind und in welchem Umfang sie zur Schadstoffminderung beitragen. Art und Umfang des Nachweises sind zwischen Pflichtigem und Behörde abzustimmen.

Spezifische Standortuntersuchungen erfordern ggf. die Unterstützung durch spezielle Fachgutachter z. B. im Zusammenhang mit bestimmten Methoden oder Modellierwerkzeugen.

Im Wesentlichen lassen sich bei den Untersuchungen folgende Schwerpunkte unterscheiden:

- Räumliche Lage und Ausdehnung der Schadstofffahne,
- Ermittlung von Schadstofffrachten an Bilanzebenen,
- Identifikation und Quantifizierung der maßgebenden Einzelprozesse (insbesondere Abbau und Rückhalt),
- Defizitanalyse zur Klärung/Prüfung, ob die bisherigen Untersuchungen ausreichend sind, um die Prognose der Schadstofffahnenentwicklung (Teilschritt II.2) durchführen zu können. Ggf. sind ergänzende Untersuchungen erforderlich.

Bei der Betrachtung der standortbezogenen Voraussetzungen steht zunächst die Entwicklung der Schadstofffahne im Vordergrund („Quasi-Stationarität“ und Differenzierung zwischen frachtreduzierenden und verdünnenden Prozessen). Sofern die zur Beurteilung erforderlichen Bilanzebenen im unmittelbaren Abstrom der Quelle, im Verlauf der Fahne und im Bereich der Fahnen Spitze nicht vorliegen, müssen sie im Rahmen dieses Teilschrittes eingerichtet und betrachtet werden.

Die Frachtbestimmung an Bilanzebenen zielt auf eine summarische Betrachtung der natürlichen Schadstoffminderungsprozesse ab. Hierdurch können frachtreduzierende Prozesse (i.

W. die Summe aus Sorption und Abbau) erkannt und von den verdünnenden Prozessen unterschieden werden. Wenn mehrere Einzelprozesse für die Frachtreduktion mengenmäßig verantwortlich sind und eine Summenbilanz für die Bewertung nicht ausreicht, wird in einem nächsten Schritt die Quantifizierung dieser Einzelprozesse erforderlich. Hierzu werden i. d. R. weitere prozessspezifische Untersuchungen notwendig (z. B. Isotopen-, Sorptions-, Tracer-, mikrobiologische Abbauuntersuchungen, etc.).

Die zur Verfügung stehenden Untersuchungsmethoden sind insbesondere hinsichtlich des Aufwandes und der Aussagekraft (qualitativ oder quantitativ) zu unterscheiden. Um Kosten zu optimieren, sollten zunächst weniger aufwändige Methoden mit „qualitativen Aussagen“ Anwendung finden. Qualitative Hinweise auf Schadstoffminderungsprozesse liefern z. B. das Auftreten von Abbauprodukten und der Verbrauch von Elektronenakzeptoren. Eine Quantifizierung der Prozesse sollte erst dann erfolgen, wenn es hinreichend qualitative Hinweise auf relevante Schadstoffminderungsprozesse gibt. Darüber hinaus sollte berücksichtigt werden, dass eine Quantifizierung von Einzelprozessen nicht immer möglich ist. Sie ist auch nicht immer entscheidungsrelevant.

In diesem Stadium der Bearbeitung ist es insbesondere im Hinblick auf die Erstellung einer modellgestützten Prognose i. d. R. erforderlich, eine Defizitanalyse des vorhandenen Kenntnisstandes durchzuführen. Sofern demnach beurteilungsrelevante Erkenntnisse für die Erstellung des MNA-Konzeptes fehlen, z. B. unzureichende Kenntnisse über die geologischen, hydrogeologischen und hydrochemischen Verhältnisse, das Schadstoffpotenzial, Identifikation und Quantifizierung der Einzelprozesse (sofern notwendig), die Prozessräume und insbesondere Kenntnisse für die Prognose der Schadstoffentwicklung, werden zusätzliche Untersuchungen notwendig. Dies

könnten z. B. die Vervollständigung der chemischen Analytik, detaillierte Untersuchungen der hydrogeologischen Standortgegebenheiten, die Kartierung der Schadstofffahne mit Ermittlung der maßgebenden Prozessräume, Zeitreihenuntersuchungen oder weitergehende Betrachtungen an Bilanzebenen sein.

Zudem wird für eine Bilanzierung mit Quantifizierung der Einzelprozesse i. d. R. ein reaktives Stofftransportmodell notwendig werden. Die dafür notwendige Datengrundlage ist im Rahmen der in diesem Bearbeitungsschritt durchzuführenden Untersuchungen soweit erforderlich zu ergänzen. In diesem Zusammenhang ist auch zu beurteilen, ob statt der Ermittlung standortbezogener Daten auf Literaturdaten zurückgegriffen werden kann.

Sollten bereits Sanierungsmaßnahmen an der Quelle oder an der Fahne stattgefunden haben oder geplant sein, ist dies als Randbedingung bei den Untersuchungen zum Nachweis der Wirksamkeit der Schadstoffminderungsprozesse mit Blick auf den sich neu einstellenden Gleichgewichtszustand zu beachten.

Für die Prognose der Dauer, für die ein überwachungsbedürftiger GW-Schaden vorliegt und MNA durchgeführt werden soll, sind außer den Informationen über die Schadstofffahne zusätzliche Informationen über die Schadstoffquelle notwendig, insbesondere dann, wenn die Sanierung der Schadstoffquelle nicht oder nur unvollständig erfolgen kann. Dies kann z. B. durch Untersuchungen im Bereich der Quelle und im unmittelbaren Abstrom geschehen. Ziel dieser Untersuchungen ist es, die Austragsrate und Dauer der Freisetzung sowie deren Entwicklung abzuschätzen.

Als Ergebnis dieses Teilschritts sollten die Grundlagen vorhanden sein, um eine belastbare Prognose der Schadstofffahnenentwicklung vornehmen zu können. Dazu gehört die Klärung, welche Prozesse von maßgebender Bedeutung sind und in welcher Größenordnung sie zur Schadstoffreduktion und/oder

Frachtreduktion beitragen. Je nach Standortbedingungen und Umfang der zusätzlichen Untersuchungen kann dieser Teilschritt einen längeren Zeitraum in Anspruch nehmen, insbesondere dann, wenn zur Prognose weitere bzw. längere Zeitreihenuntersuchungen benötigt werden.

A1-II.2 Prognose der Schadstofffahnenentwicklung

Schritt I Prüfung der Voraussetzungen zur Erarbeitung eines MNA-Konzeptes	
I.1 Vorgaben der Behörde zur Vereinbarung von Rahmenbedingungen	<ul style="list-style-type: none"> Das MNA-Konzept ist Ergebnis einer Einzelfallprüfung Art und Umfang des Nachweises der Wirksamkeit der schadstoffmindernden Prozesse sind abzustimmen Die grundsätzliche Sanierungsnotwendigkeit wird durch MNA nicht in Frage gestellt MNA als alleinige Maßnahme ist nur möglich, wenn die standortbezogenen Voraussetzungen erfüllt sind und Sanierungsmaßnahmen als unverhältnismäßig eingeschätzt werden Ist eine Sanierung als alleinige Maßnahme verhältnismäßig, kommt MNA nicht in Betracht Zur Kontrolle der Wirksamkeit der Schadstoffminderungsprozesse ist ein abgestimmtes Monitoring durchzuführen Eine alternative Handlungsoption ist vorzusehen
I.2 Prüfung der standortbezogenen Voraussetzungen	<ul style="list-style-type: none"> Standortpotenzial Stoffeintrags- und Reaktionsräume Hydrogeologische Modellvorstellung
Schritt II Nachweis der Wirksamkeit von Schadstoffminderungsprozessen und Erstellung eines MNA-Konzeptes	
II.1 Standortuntersuchungen zum Nachweis der Wirksamkeit von Schadstoffminderungsprozessen	<ul style="list-style-type: none"> Räumliche Lage und Ausdehnung der Schadstofffahne Untersuchungen zur Ermittlung von Schadstofffrachten an Bilanzebenen Untersuchungen zur Identifikation und Quantifizierung der maßgebenden Einzelprozesse Untersuchungen auf Basis einer Defizitanalyse zur Erstellung der Prognose
II.2 Prognose der Schadstofffahnenentwicklung	<ul style="list-style-type: none"> Erstellen eines numerischen Modells (Strömungs-, Transport- und Reaktionsprozesse) Abschätzung des langfristigen Verlaufs und der Nachhaltigkeit des Prozessgeschehens Darstellung der Prozessunsicherheiten anhand von Szenarioerwägungen und Sensitivitätsanalysen Identifizierung der Leitparameter
II.3 Auswertung und Beurteilung der Ergebnisse	<ul style="list-style-type: none"> Abschließende Auswertung und Beurteilung aller Randbedingungen und Untersuchungsergebnisse Standortspezifische Beurteilung von Sanierungsmaßnahmen (nach Abschluss der Sanierungsuntersuchung)
II.4 Erstellung eines MNA-Konzeptes und Begründung seiner Eignung	<ul style="list-style-type: none"> Erstellung eines MNA-Konzeptes mit seinen zugehörigen Regelungsbestandteilen Monetäre Darstellung der Maßnahmen Begründung für die Eignung des MNA-Konzeptes
Schritt III	
Behördliche Entscheidung über die Eignung und Durchführung von MNA	<ul style="list-style-type: none"> Kriterien für die Entscheidung Sind und wenn ja in welchem Umfang die standortbezogenen Voraussetzungen nach Kap. 4 des Textteils erfüllt? Stellt das MNA-Konzept die notwendige Überwachungsintensität sicher und bietet es die Möglichkeit eines rechtzeitigen Eingreifens? Für welche Bereiche des Grundwasserschadens ist eine Sanierung verhältnismäßig und daher durchzuführen? Für welche Bereiche des Grundwasserschadens ist eine Sanierung allein vor dem Hintergrund nachgewiesener Schadstoffminderungsprozesse unverhältnismäßig und stellt eine Sanierung die Durchführung von MNA eine angemessene Maßnahme? Vereinbarung eines verbindlichen Regelungsrahmenwertes
Schritt IV	
Durchführung von MNA	<ul style="list-style-type: none"> Durchführung des Monitorings auf Basis des Überwachungsplans Überprüfung der Prognose (Soll-Ist-Vergleich), ggf. Anpassung der Vorgehensweise Bei Zielerreichung abschließende Gefährdungsbeurteilung

Im Anschluss an die Ermittlung der Schadstoffminderungsprozesse und sonstigen standortspezifischen Randbedingungen sollen in diesem Teilschritt der langfristige Verlauf und die Nachhaltigkeit des Prozessgeschehens abgeschätzt werden. Hierbei ist insbesondere die standortbezogene Voraussetzung, dass die Schadstofffahne „quasi-stationär“ oder schrumpfend ist und damit zukünftig keine weiteren Schutzgüter gefährdet sind, zu prüfen. Die Prognose der Schadstofffahnenentwicklung ist damit eine maßgebliche Grundlage für die Entscheidung über die Eignung und Durchführung von MNA.

Für die Prognose wird i. d. R. ein numerisches Modell, das Strömungs-, Transport- und Reaktionsprozesse abbildet, erforderlich. Mittels Sensitivitätsanalysen und ggf. Szenarienbetrachtungen sollten kritische Parameter und Randbedingungen sowie Prognoseunsicherheiten herausgestellt und beurteilt werden.

Grundlage für die Erstellung des numerischen Modells ist eine hydrogeologisch-hydrogeochemische Modellvorstellung auf der Grundlage der standortspezifischen Verhältnisse. Die Anforderungen daran sind in u. a. FH-DGG 2002 [16] und in den Handlungsempfehlungen [5] und Leitfäden [6, 7, 8, 9, 10, 11 und 17] des BMBF Förderschwerpunkt KORA genannt.

Im Zuge der Modellierung sind die maßgebenden Randbedingungen, Prozesse und Parameter der Behörde darzulegen, insbesondere dann, wenn Literaturdaten verwendet und erhebliche Abstrahierungen der örtlichen Verhältnisse vorgenommen werden sollen. Die einzelnen Arbeitsschritte der Modellentwicklung (z. B. Festlegung von Randbedingungen und Parametern, verwendete Datengrundlagen, Abstrahierungen, Kalibrierung, Validierung, Sensitivitätsanalysen) sind nachvollziehbar zu dokumentieren. Für die Prognose sind i. d. R. Szenarienbetrachtungen durchzuführen. Die dabei zu betrachtenden Fallgestaltungen sollten vorab abgestimmt werden.

Bei einfachen und/oder eindeutigen Standortverhältnissen ist ein numerisches Modell zum Nachweis der „Quasi-Stationarität“ nicht immer erforderlich, wenn bspw. aus Zeitreihenauswertungen die „Quasi-Stationarität“ der Fahne belegt ist, die Prozesse bekannt und die Rahmenbedingungen als konstant anzunehmen sind.

Die Aussagesicherheit der Prognose sollte sich später im Überwachungsumfang widerspiegeln: Je unsicherer die Prognose, desto intensiver sollte überwacht werden. Ziel der Überwachung ist es, die modelltechnisch oder anderweitig erstellte Prognose anhand von im Feld erhobenen Daten zu bestätigen.

Im Zuge der Prognoseerstellung sollten bereits die für die spätere Überwachung zur Kontrolle der Wirksamkeit der natürlichen Schadstoffminderungsprozesse (MNA) relevanten Untersuchungsparameter (Leitparameter) herausgearbeitet werden. Darüber hinaus sollten

anhand der Prognose die Überwachungsstellen und Überwachungsintervalle festgelegt werden.

A1-II.3 Auswertung und Beurteilung der Ergebnisse

Schritt I Prüfung der Voraussetzungen zur Erarbeitung eines MNA-Konzeptes	
I.1 Vorgaben der Behörde zur Vereinbarung von Rahmenbedingungen	<ul style="list-style-type: none"> Das MNA-Konzept ist Ergebnis einer Einzelprüfung Art und Umfang des Nachweises der Wirksamkeit der schadstoffmindernden Prozesse sind abzustimmen Die grundsätzliche Sanierungsnotwendigkeit wird durch MNA nicht in Frage gestellt MNA als alleinige Maßnahme ist nur möglich, wenn die standortbezogenen Voraussetzungen erfüllt sind und Sanierungsmaßnahmen als unverhältnismäßig eingeschätzt werden Ist eine Sanierung als alleinige Maßnahme verhältnismäßig, kommt MNA nicht in Betracht Zur Kontrolle der Wirksamkeit der Schadstoffminderungsprozesse ist ein angemessenes Monitoring durchzuführen Eine alternative Handlungsoption ist vorzusehen
I.2 Prüfung der standortbezogenen Voraussetzungen	<ul style="list-style-type: none"> Standortpotenzial Stoffeintrags- und Reaktionsräume Hydrogeologische Modellvorstellung
Schritt II Nachweis der Wirksamkeit von Schadstoffminderungsprozessen und Erstellung eines MNA-Konzeptes	
II.1 Standortuntersuchungen zum Nachweis der Wirksamkeit von Schadstoffminderungsprozessen	<ul style="list-style-type: none"> Räumliche Lage und Ausdehnung der Schadstofffahne Untersuchungen zur Ermittlung von Schadstofffrachten an Bilanzstellen Untersuchen zur Identifikation und Quantifizierung der maßgebenden Einzelprozesse Untersuchungen auf Basis einer Defizitanalyse zur Erstellung der Prognose
II.2 Prognose der Schadstofffahnenentwicklung	<ul style="list-style-type: none"> Erstellen eines numerischen Modells (Strömungs-, Transport- und Reaktionsprozesse) Abschätzung des langfristigen Verlaufs und der Nachhaltigkeit des Prozessgeschehens Darstellung der Prozessunsicherheiten anhand von Szenariobetrachtungen und Sensitivitätsanalysen Identifizierung der Leitparameter
II.3 Auswertung und Beurteilung der Ergebnisse	<ul style="list-style-type: none"> Abschließende Auswertung und Beurteilung aller Randbedingungen und Untersuchungsergebnisse Standortspezifische Beurteilung von Sanierungsmaßnahmen (nach Abschluss der Sanierungsuntersuchung)
II.4 Erstellung eines MNA-Konzeptes und Begründung seiner Eignung	<ul style="list-style-type: none"> Erstellung eines MNA-Konzeptes mit seinen zugehörigen Regelungsbestandteilen Modelle Darstellung der Maßnahmen Begründung für die Eignung des MNA-Konzeptes
Schritt III	
Behördliche Entscheidung über die Eignung und Durchführung von MNA	<ul style="list-style-type: none"> Kriterien für die Entscheidung Sind und wenn ja in welchem Umfang die standortbezogenen Voraussetzungen nach Kap. 4 des Textteils erfüllt? Stellt das MNA-Konzept die notwendige Überwachungsintensität sicher und bietet es die Möglichkeit eines rechtzeitigen Eingreifens? Für welche Bereiche des Grundwasserschadens ist eine Sanierung verhältnismäßig und daher durchzuführen? Für welche Bereiche des Grundwasserschadens ist eine Sanierung allein vor dem Hintergrund nachgewiesener Schadstoffminderungsprozesse unverhältnismäßig und anstatt einer Sanierung die Durchführung von MNA eine angemessene Maßnahme? Vereinbarung eines verbindlichen Regelungsinstrumentes
Schritt IV	
Durchführung von MNA	<ul style="list-style-type: none"> Durchführung des Monitorings auf Basis des Überwachungsplans Überprüfung der Prognose (Soll-Ist-Vergleich) ggf. Anpassung der Vorgehensweise Bei Zielerreichung abschließende Gefährdungsbeurteilung

Nach Abschluss der Teilschritte II.1 und II.2 ist durch den Pflichtigen bzw. seinen Sachverständigen eine abschließende Auswertung und Beurteilung aller Randbedingungen und Untersuchungsergebnisse vorzunehmen. Dabei ist festzustellen, ob bzw. in welchem Umfang die standortbezogenen Voraussetzungen nach Kap. 4 des Textteils für die Durchführung von MNA erfüllt sind und ob für den Pflichtigen ein MNA-Konzept zielführend wäre. Dies betrifft auch Aussagen, ob eine Sanierung oder Teilsanierung der Quelle erfolgen soll.

Eine weitere Voraussetzung für die Durchführung von MNA ist, dass Sanierungsmaßnahmen für den Bereich des Grundwasserschadens unverhältnismäßig sind, für den der Pflichtige die Durchführung von MNA beabsichtigt. Im Hinblick auf die Verhältnismäßigkeitsprüfung in Stufe III, die von der Behörde vorgenommen wird, sind daher alle Untersuchungen durchzuführen und auszuwerten, die für eine standortspezifische Prüfung der Verhältnismäßigkeit von Sanierungsmaßnahmen erforderlich sind. Damit befindet man sich mit Blick auf die „klassischen“ Stufen der Alt-

lastenbearbeitung auf der Stufe der Sanierungsuntersuchung. Der Umfang der Sanierungsuntersuchung sollte insbesondere im Hinblick auf die Belastbarkeit der Verhältnismäßigkeitsprüfung mit der Behörde im Vorfeld abgestimmt werden. Die erforderlichen Untersuchungen hierfür sollten i. d. R. bereits parallel zu den Untersuchungen, die zum Nachweis der Eignung eines MNA-Konzeptes erfolgen, durchgeführt werden.

A1-II.4 Erstellung eines MNA-Konzeptes und Begründung seiner Eignung

Schritt I Prüfung der Voraussetzungen zur Erarbeitung eines MNA-Konzeptes	
I.1 Vorgaben der Behörde zur Vereinbarung von Rahmenbedingungen	<ul style="list-style-type: none"> Das MNA-Konzept ist Ergebnis einer Einzelprüfung Art und Umfang des Nachweises der Wirksamkeit der schadstoffmindernden Prozesse sind abzustimmen. Die grundsätzliche Sanierungsnotwendigkeit wird durch MNA nicht in Frage gestellt. MNA als alleinige Maßnahme ist nur möglich, wenn die standortbezogenen Voraussetzungen erfüllt sind und Sanierungsmaßnahmen als unverhältnismäßig eingeschätzt werden. Ist eine Sanierung als alleinige Maßnahme verhältnismäßig, kommt MNA nicht in Betracht. Zur Kontrolle der Wirksamkeit der Schadstoffminderungsprozesse ist ein abgestimmtes Monitoring durchzuführen. Eine alternative Handlungsoption ist vorzusehen.
I.2 Prüfung der standortbezogenen Voraussetzungen	<ul style="list-style-type: none"> Standortpotenziale Stoffflüsse und Reaktionskette Hydrogeologische Modellvorstellung
Schritt II Nachweis der Wirksamkeit von Schadstoffminderungsprozessen und Erstellung eines MNA-Konzeptes	
II.1 Standortuntersuchungen zum Nachweis der Wirksamkeit von Schadstoffminderungsprozessen	<ul style="list-style-type: none"> Räumliche Lage und Ausdehnung der Schadstofffahne Untersuchungen zur Ermittlung von Schadstofffrachten an Bilanzebenen Untersuchungen zur Identifikation und Quantifizierung der maßgebenden Einzelprozesse Untersuchungen auf Basis einer Defizitanalyse zur Erstellung der Prognose
II.2 Prognose der Schadstofffahnenentwicklung	<ul style="list-style-type: none"> Erstellen eines numerischen Modells (Strömungs-, Transport- und Reaktionsprozesse) Abschätzung des langfristigen Verlaufs und der Nachhaltigkeit des Prozessgeschehens Darstellung der Prognoseunsicherheiten anhand von Szenarienbetrachtungen und Sensitivitätsanalysen Identifizierung der Leitparameter
II.3 Auswertung und Beurteilung der Ergebnisse	<ul style="list-style-type: none"> Abschließende Auswertung und Beurteilung aller Randbedingungen und Untersuchungsergebnisse Standortspezifische Beurteilung von Sanierungsmaßnahmen (nach Abschluss der Sanierungsuntersuchung)
II.4 Erstellung eines MNA-Konzeptes und Begründung seiner Eignung	<ul style="list-style-type: none"> Erstellung eines MNA-Konzeptes mit seinen zugehörigen Regelungsbestandteilen Monetäre Darstellung der Maßnahmen Begründung für die Eignung des MNA-Konzeptes
Schritt III	
Behördliche Entscheidung über die Eignung und Durchführung von MNA	<ul style="list-style-type: none"> Kriterien für die Entscheidung: <ul style="list-style-type: none"> Sind und wenn ja in welchem Umfang die standortbezogenen Voraussetzungen nach Kap. 4 des Textteils erfüllt? Stellt das MNA-Konzept die notwendige Überwachungsintensität sicher und bietet es die Möglichkeit eines rechtzeitigen Eingreifens? Für welche Bereiche des Grundwasserschadens ist eine Sanierung verhältnismäßig und daher durchzuführen? Für welche Bereiche des Grundwasserschadens ist eine Sanierung allein vor dem Hintergrund nachgewiesener Schadstoffminderungsprozesse unverhältnismäßig und anstatt einer Sanierung die Durchführung von MNA eine angemessene Maßnahme? Vereinbarung eines verbindlichen Regelungsinstrumentes
Schritt IV	
Durchführung von MNA	<ul style="list-style-type: none"> Durchführung des Monitorings auf Basis des Überwachungsplans Überprüfung der Prognose (Soll-Ist-Vergleich), ggf. Anpassung der Vorgehensweise Bei Zielabweichung abschließende Gefährdungsbewertung

Die Vorstellungen des Pflichtigen zum weiteren Umgang mit dem Grundwasserschaden sollten zu diesem Zeitpunkt der Behörde vorgestellt und für den Fall, dass auch diese ein MNA-Konzept als erfolgversprechend einstuft, in die Erstellung eines MNA-Konzeptes mit seinen zugehörigen Regelungsbestandteilen münden. Dazu gehören Vorschläge für Zwischen- und Endzielvorgaben in Raum und Zeit, der Entwurf eines darauf angepassten Überwachungsplans u. a. mit Vorschlägen für Leitparameter sowie Vorschlägen für alternative Maßnahmen, falls sich bei der Umsetzung von MNA zeigt, dass die Zielvorgaben nicht erreicht werden. Hierzu wird es notwendig sein, Kriterien zu benennen, die eine Abweichung von der Prognose anzeigen.

Das MNA-Konzept sollte bei einer Kombination aus MNA und Sanierung als eigenständiger Bestandteil eines Sanierungskonzeptes erstellt werden, ansonsten als eigenständiges Konzept. Dies gewährleistet vor Erstellung des aufwändigen und schon sehr konkreten Sanierungsplans anhand frühzeitiger inhaltlicher Abstimmungen mit der Behörde ein zielgerichtetes und entscheidungsorientiertes Vorgehen.

Im MNA-Überwachungsplan als Bestandteil des MNA-Konzeptes ist das vorgesehene Überwachungsprogramm zu beschreiben, mit dem die Wirksamkeit und Nachhaltigkeit der natürlichen Schadstoffminderungsprozesse kontrolliert werden kann. Zudem sind die zugehörigen Mitteilungspflichten zu benennen. Das Überwachungsprogramm kann sich dabei nicht allein auf Konzentrationsmessungen von Schadstoffen beschränken, sondern muss auch Parameter (Leitparameter) zur Prozesskontrolle und zum Abgleich der mit Hilfe von Berechnungsmodellen aufgestellten Prognose beinhalten. Zudem können wiederholte Frachtbetrachtungen an Bilanzebenen als Bestandteile des Überwachungsprogramms notwendig werden.

Da im Zuge der Verhältnismäßigkeitsprüfung durch die Behörde auch eine monetäre Betrachtung geeigneter Maßnahmen durchgeführt werden muss, ist es erforderlich, im MNA-Konzept die für MNA anzusetzenden Kosten darzulegen.

Die Eignung des MNA-Konzeptes ist abschließend derart zu begründen, dass die Behörde anhand der vorgelegten Unterlagen über die weitere Vorgehensweise im Rahmen ihres Auswahlermessens entscheiden kann.

A1-III Behördliche Entscheidung über die Eignung und Durchführung von MNA

Schritt I Prüfung der Voraussetzungen zur Erarbeitung eines MNA-Konzeptes	
I.1 Vorgeben der Behörde zur Vereinbarung von Rahmenbedingungen	<ul style="list-style-type: none"> Das MNA-Konzept ist Ergebnis einer Einzelprüfung Art und Umfang des Nachweises der Wirksamkeit der schadstoffmindernden Prozesse sind abzustimmen Die grundsätzliche Sanierungsziele wird durch MNA nicht in Frage gestellt MNA als alleinige Maßnahme ist nur möglich, wenn die standortbezogenen Voraussetzungen erfüllt sind und Sanierungsmaßnahmen als unverhältnismäßig eingeschätzt werden Ist eine Sanierung als alleinige Maßnahme verhältnismäßig, kommt MNA nicht in Betracht Zur Kontrolle der Wirksamkeit der Schadstoffminderungsprozesse ist ein abgestimmtes Monitoring durchzuführen Eine alternative Handlungsoption ist vorzusehen
I.2 Prüfung der standortbezogenen Voraussetzungen	<ul style="list-style-type: none"> Standortpotenzial Stoffflüsse und Reaktionsdynamik Hydrogeologische Modellvorstellung
Schritt II Nachweis der Wirksamkeit von Schadstoffminderungsprozessen und Erstellung eines MNA-Konzeptes	
II.1 Standortuntersuchungen zum Nachweis der Wirksamkeit von Schadstoffminderungsprozessen	<ul style="list-style-type: none"> Räumliche Lage und Ausdehnung der Schadstofffahne Untersuchungen zur Ermittlung von Schadstoffachsen an Bilanzstellen Untersuchungen zur Identifikation und Quantifizierung der maßgebenden Einzelprozesse Untersuchungen auf Basis einer Defizitanalyse zur Erstellung der Prognose
II.2 Prognose der Schadstofffahnenentwicklung	<ul style="list-style-type: none"> Erstellen eines numerischen Modells (Strömungs-, Transport- und Reaktionsprozesse) Abschätzung des langfristigen Verlaufs und der Nachhaltigkeit des Prozessgeschehens Darstellung der Prognoseunsicherheiten anhand von Szenarienbetrachtungen und Sensitivitätsanalysen Identifizierung der Leitparameter
II.3 Auswertung und Beurteilung der Ergebnisse	<ul style="list-style-type: none"> Abschließende Auswertung und Beurteilung aller Randbedingungen und Untersuchungsergebnisse Standortspezifische Beurteilung von Sanierungsmaßnahmen (nach Abschluss der Sanierungsuntersuchung)
II.4 Erstellung eines MNA-Konzeptes und Begründung seiner Eignung	<ul style="list-style-type: none"> Erstellung eines MNA-Konzeptes mit seinen zugehörigen Regelungsbestandteilen Monetäre Darstellung der Maßnahmen Begründung für die Eignung des MNA-Konzeptes
Schritt III	
Behördliche Entscheidung über die Eignung und Durchführung von MNA	<ul style="list-style-type: none"> Kriterien für die Entscheidung: <ul style="list-style-type: none"> Ob und wenn ja in welchem Umfang die standortbezogenen Voraussetzungen nach Kap. 4 des Textteils erfüllt? Stellt das MNA-Konzept die notwendige Überwachungsintensität sicher und bietet es die Möglichkeit eines rechtzeitigen Eingreifens? Für welche Bereiche des Grundwasserschadens ist eine Sanierung verhältnismäßig und daher durchzuführen? Für welche Bereiche des Grundwasserschadens ist eine Sanierung allein vor dem Hintergrund nachgewiesener Schadstoffminderungsprozesse unverhältnismäßig und anstatt einer Sanierung die Durchführung von MNA eine angemessene Maßnahme? Vereinbarung eines verbindlichen Regelungsinstrumentes
Schritt IV	
Durchführung von MNA	<ul style="list-style-type: none"> Durchführung des Monitorings auf Basis des Überwachungsplans Überprüfung der Prognose (Soll-Ist-Vergleich), ggf. Anpassung der Vorgehensweise Bei Zielerreichung abschließende Gefährdungsbeurteilung

Die Entscheidung der Behörde über die Durchführung von MNA basiert auf

- einer Verhältnismäßigkeitsprüfung geeigneter Sanierungsvarianten, die i. d. R. das Ergebnis einer Sanierungsuntersuchung sind (Kap. 5).
 - der abschließenden Bewertung der standortbezogenen Voraussetzungen nach Kap. 4 des Textteils und
 - dem vorgelegten MNA-Konzept
- Maßgebend für die Entscheidung ist,
- für welche Bereiche des Grundwasserschadens eine Sanierung verhältnismäßig und daher durchzuführen ist,
 - ob bzw. in welchem Umfang die standortbezogenen Voraussetzungen nach Kapitel 4 erfüllt sind,
 - für welche Bereiche des Grundwasserschadens eine Sanierung allein vor dem Hintergrund nachgewiesener Schadstoffminderungsprozesse unverhältnismäßig ist und die Durchführung von MNA eine angemessene Maßnahme ist und
 - ob das MNA-Konzept die notwendige Überwachungsintensität sicherstellt und ggf. die

Möglichkeit eines rechtzeitigen Eingreifens bietet.

Die Entscheidung über die Durchführung von MNA fällt nach einer Verhältnismäßigkeitsprüfung. Hierbei sind die Maßnahmen immer mit Blick auf das Maßnahmenziel zu betrachten, wobei das Maßnahmenziel umgekehrt auch in einem iterativen Prozess auf die Verhältnismäßigkeit von Maßnahmen zurück wirkt und ggf. angepasst werden muss. Zu diesem Zeitpunkt sollte entschieden sein, wie mit der Schadstoffquelle umgegangen werden soll, da dies auch für das MNA-Konzept bedeutsam ist.

Nach der behördlichen Entscheidung für eine Durchführung von MNA sollte zwischen Pflichtigem und Behörde eine für beide Seiten verbindliche Regelung über die Durchführung von MNA getroffen werden. Diese sollte den Überwachungsplan, die Zielvorgaben, Maßnahmen bei erforderlichen Anpassungen sowie eine alternative Handlungsoption beinhalten.

Da zu erwarten ist, dass die Entscheidung über die Durchführung von MNA zumeist im Zusammenhang mit der Entscheidung über Sanierungsmaßnahmen erfolgt, kann eine solche Regelung z.B. durch die Verbindlichkeitserklärung eines Sanierungsplans oder durch einen öffentlich-rechtlichen Vertrag erfolgen.

A1-IV Durchführung von MNA

Schritt I Prüfung der Voraussetzungen zur Erarbeitung eines MNA-Konzeptes	
1.1 Vorgaben der Behörde zur Vereinbarung von Rahmenbedingungen	<ul style="list-style-type: none"> • Das MNA-Konzept ist Ergebnis einer Einzelprüfung • Art und Umfang des Nachweises der Wirksamkeit der schadstoffmindernden Prozesse sind abzustimmen • Die grundsätzliche Sanierungsnotwendigkeit wird durch MNA nicht in Frage gestellt • MNA als alleinige Maßnahme ist nur möglich, wenn die standortbezogenen Voraussetzungen erfüllt sind und Sanierungsmaßnahmen als unverhältnismäßig eingeschätzt werden • Ist eine Sanierung als alleinige Maßnahme verhältnismäßig, kommt MNA nicht in Betracht • Zur Kontrolle der Wirksamkeit der Schadstoffminderungsprozesse ist ein abgestimmtes Monitoring durchzuführen • Eine alternative Handlungsoption ist vorzusehen
1.2 Prüfung der standortbezogenen Voraussetzungen	<ul style="list-style-type: none"> • Standortbeobachtungen • Stoffeintrags- und Reaktionsdume • Hydrogeologische Modellvorstellung
Schritt II Nachweis der Wirksamkeit von Schadstoffminderungsprozessen und Erstellung eines MNA-Konzeptes	
II.1 Standortuntersuchungen zum Nachweis der Wirksamkeit von Schadstoffminderungsprozessen	<ul style="list-style-type: none"> • Räumliche Lage und Ausdehnung der Schadstofffahne • Untersuchungen zur Ermittlung von Schadstofffrachten an Bilanzebenen • Untersuchungen zur Identifikation und Quantifizierung der maßgebenden Einzelprozesse • Untersuchungen auf Basis einer Defizitanalyse zur Erstellung der Prognose
II.2 Prognose der Schadstofffahnenentwicklung	<ul style="list-style-type: none"> • Erstellen eines numerischen Modells (Strömungs-, Transport- und Reaktionsprozesse) • Abschätzung des langfristigen Verlaufs und der Nachhaltigkeit des Prozessgeschehens • Darstellung der Prognoseunsicherheiten anhand von Szenarienbetrachtungen und Sensitivitätsanalysen • Identifizierung der Leitparameter
II.3 Auswertung und Beurteilung der Ergebnisse	<ul style="list-style-type: none"> • Abschließende Auswertung und Beurteilung aller Randbedingungen und Untersuchungsergebnisse • Standortpezifische Beurteilung von Sanierungsmaßnahmen (nach Abschluss der Sanierungsuntersuchung)
II.4 Erstellung eines MNA-Konzeptes und Begründung seiner Eignung	<ul style="list-style-type: none"> • Erstellung eines MNA-Konzeptes mit seinen zugehörigen Regelungsbestandteilen • Konkrete Darstellung der Maßnahmen • Begründung für die Eignung des MNA-Konzeptes
Schritt III	
Behördliche Entscheidung über die Eignung und Durchführung von MNA	<ul style="list-style-type: none"> • Kriterien für die Entscheidung • Sind und wenn ja in welchem Umfang die standortbezogenen Voraussetzungen nach Kap. 4 des Teils III erfüllt? • Stellt das MNA-Konzept die notwendige Überwachungsintensität sicher und bietet es die Möglichkeit eines rechtzeitigen Eingreifens? • Für welche Bereiche des Grundwasserbereichs ist eine Sanierung verhältnismäßig und daher durchzuführen? • Für welche Bereiche des Grundwasserbereichs ist eine Sanierung allein vor dem Hintergrund nachgewiesener Schadstoffminderungsprozesse unverhältnismäßig und anstatt einer Sanierung die Durchführung von MNA eine angemessene Maßnahme? • Vereinbarung eines verbindlichen Regelungsinstrumentes
Schritt IV	
Durchführung von MNA	<ul style="list-style-type: none"> • Durchführung des Monitorings auf Basis des Überwachungsplans • Überprüfung der Prognose (Soll-Ist-Vergleich), ggf. Anpassung der Vorgehensweise bei Zurechnung abschließende Selbstbeurteilung

In dieser Phase des Verfahrens findet die Durchführung der Überwachung auf Basis des MNA-Überwachungsplans statt. Sie dient der Überprüfung der Prognose (Soll-Ist-Vergleich) und der Kontrolle, ob die Schadstoffminderungsprozesse dauerhaft wirken. Hervorzuheben ist, dass hierfür i. d. R. nicht nur schadstoff- und prozessbezogene Konzentrationsmessungen anhand von Leitparametern durchgeführt werden, sondern auch wiederholte Frachtbetrachtungen als Bestandteil der Kontrolle notwendig werden können. Hierbei sind Mess- und Prognoseunsicherheiten zu beachten.

In regelmäßigen Abständen (z.B. alle 5 Jahre) könnten Art und Umfang des Überwachungsprogramms auf Antrag bzw. Vorschlag des Pflichtigen überprüft und angepasst werden.

In Folge der vereinbarten Mitteilungspflichten findet während der Durchführung von MNA eine kontinuierliche Beurteilung und Bewertung der Überwachungsergebnisse statt.

Sollten sich die Schadstoffminderungsprozesse nicht in der prognostizierten Weise entwickeln bzw. stattfinden, sind über die im Rahmen des MNA-Konzeptes aufgezeigten Maßnahmen bis hin zur Aufnahme von alternativen Handlungsoptionen wie z.B. Sanierungsmaßnahmen zu befinden.

Für diesen Fall kann es sinnvoll sein, insbesondere wenn MNA bereits über einen längeren Zeitraum durchgeführt wurde, zunächst eine prozessbezogene Beurteilung und erneute Bewertung durchzuführen, da zu erwarten ist, dass die Datengrundlage zur Beurteilung der Schadstoffminderungsprozesse umfangreicher geworden ist. Ggf. sollten ergänzende Untersuchungen vereinbart werden, falls die Ursache für die abweichende Entwicklung nicht eindeutig ist. Eine Fortführung von MNA kann nur dann erfolgen, wenn die Überprüfung ergibt, dass die Schadstoffminderungsprozesse weiterhin ausreichend wirksam sind. Falls für die neue Prognoseerstellung auf Basis der ergänzten Datenlage die Zuverlässigkeit des Prognosemodells nicht mehr ausreicht, ist das Modell ggf. zu überarbeiten. Zudem können ggf. auch modifizierte Zielvorgaben und ein modifiziertes Überwachungsprogramm vereinbart werden.

Sofern die Zielvorgaben auch nach Durchführung der Anpassungsmaßnahmen nicht erreicht werden, ist die bei der Vereinbarung zur Durchführung von MNA gemäß III für diesen Fall vorgesehene alternative Handlungsoption aufzugreifen.

Mit Erreichen der vereinbarten Ziele wird die Behörde abschließend prüfen, ob noch Gefahren insbesondere für das Grundwasser und Grundwassernutzungen bestehen. Diese Prüfung unterscheidet sich grundsätzlich nicht von den wirkungspfadbezogenen Untersuchungen im Rahmen der Nachsorge, die nach Schlussabnahme einer Sanierungsmaßnahme erfolgen. Falls nachgewiesen wird, dass Gefahren dauerhaft ausgeschlossen werden können, wird die Behörde auf Antrag des Pflichtigen der Beendigung von MNA zustimmen.

ANHANG 2 Methodische Hinweise zur Prüfung der Voraussetzungen für die Durchführung von MNA

Inhaltsverzeichnis

A2-0	Einleitung	36
A2-1	Schadstoffquelle	36
A2-1.1	Methoden und Ansätze zur Abschätzung der Schadstoffmasse	38
A2-1.2	Methoden zur Abschätzung der Freisetzungsrates	39
A2-2	Schadstofffahne	40
A2-2.1	Frachtbetrachtung an Kontrollebenen	41
A2-2.1.1	Groundwater Fence- / Transekten- Methode	41
A2-2.1.2	Immissions - Pumpversuche	42
A2-2.1.3	Isotopenmethoden	42
A2-2.2	Nachweis und Prognose der „Quasi-Stationarität“	43
A2-2.2.1	Nachweis und Prognose anhand von Messreihen und Analogiebetrachtungen	44
A2-2.2.2	Nachweis und Prognose mittels Stofftransportmodellen	44
A2-2.3	Methoden zur Abschätzung der Prozesse bzw. zur Entwicklung eines Prozess-/Systemverständnisses	47
A2-2.3.1	Mineralölkohlenwasserstoffe (MKW), Benzol, Toluol, Ethyl-benzol und Xylol (BTEX)	50
A2-2.3.2	Methyltertiärbutylether (MTBE)	51
A2-2.3.3	Polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe (PAK) und NSO-Heterozyklen	52
A2-2.3.4	Leichtflüchtige chlorierte Kohlenwasserstoffe (LCKW)	53
A2-2.4	Berücksichtigung weiterer Schutzgüter	54

A2-0 Einleitung

Im Positionspapier (Kap. 4) sind standortbezogene Voraussetzungen für ein MNA-Konzept genannt. Um zu entscheiden, ob im Einzelfall die standortbezogenen Voraussetzungen erfüllt sind, bedarf es geeigneter und praxistauglicher Untersuchungsmethoden und Vorgehensweisen.

Der vorliegende Anhang II soll als Auswahlhilfe für Methoden, Erfahrungen und Vorgehensweisen mit Blick auf die für ein MNA-Konzept zu prüfenden Voraussetzungen dienen. Er stellt eine Auswahl von Methoden bereit, welche für die jeweils zu bearbeitende Fragestellung relevant sind und in einem hohen Maß als praxistauglich eingestuft werden können.

Insbesondere sind Methoden und Hinweise aus dem Förderschwerpunkt KORA aufgeführt, die in den Handlungsempfehlungen, der Methodensammlung, den Leitfäden sowie den Forschungsberichten veröffentlicht sind. Sie werden durch weitere Erkenntnisse, Entwicklungen und Erfahrungen ergänzt. Die einzelnen Methoden und Hinweise werden hier nicht umfassend beschrieben, weshalb Verweise auf KORA oder entsprechende Literatur vorgenommen werden (im Fließtext in Klammern gesetzter Verweis, z.B. M 2.1.1 bedeutet KORA - Handlungsempfehlung, Methodensammlung Kapitel 2.1.1).

Im Kapitel 4 des Positionspapiers sind die standortbezogenen Voraussetzungen für ein MNA-Konzept bezüglich der Themen Schadstoffquelle (Kap. 4.2), Schadstofffahne (Kap. 4.3) sowie Schutz des noch nicht beeinträchtigten Grundwassers und Berücksichtigung weiterer Schutzgüter (Kap. 4.4) formuliert. Diese Gliederung wird im vorliegenden Anhang übernommen: Im Kapitel A2-1 „Schadstoffquelle“ werden Methoden zur Abschätzung der Schadstoffmasse und der Schadstofffreisetzungsrates behandelt. Das Kapitel A2-2 „Schadstofffahne“ enthält Methoden zur Frachtermittlung, zum Nachweis und zur Prognose der „Quasi-Stationarität“ und zur Entwicklung eines Prozess-/Systemverständnisses. Außerdem werden

methodische Ansätze zur Berücksichtigung weiterer Schutzgüter beschrieben.

Das nachfolgende Fließschema zeigt Entscheidungswege für die abschließende Bewertung der standortbezogenen Untersuchungen im Hinblick auf die Erstellung eines MNA-Konzeptes auf. Es benennt die jeweils geeigneten Methoden und Ansätze zur Prüfung der Voraussetzungen für MNA, die im Einzelfall bezogen auf die jeweilige Fragestellung angewendet werden können.

A2-1 Schadstoffquelle

Im Kapitel 4 des Positionspapiers wird als eine Voraussetzung für die Durchführung von MNA gefordert, dass die Schadstoffmenge in der Quelle und/oder der Austrag der Schadstoffe aus der Quelle durch Sanierungsmaßnahmen zu reduzieren ist.

Ist aus Gründen der Verhältnismäßigkeit oder der technischen Machbarkeit eine umfassende Sanierung der Quelle nicht möglich, erfolgt alternativ eine Teilsanierung der Quelle, im Ausnahmefall auch keine Quellensanierung. Verbleiben Schadstoffe in der Quelle, so lässt sich die Emissionsdauer (Freisetzungsdauer) bei Kenntnis der Schadstoffmasse und der Freisetzungsrates abschätzen. Dies ist insbesondere für die Fälle relevant, bei denen die Dauer des Grundwasserschadens - und damit der Zeitraum für die Durchführung von MNA - ein entscheidendes Kriterium darstellt. Je bedeutsamer bei der Entscheidung über MNA die zeitliche Perspektive eines Schadens ist, desto höher sind die Anforderungen an die Abschätzung von Schadstoffmasse und Freisetzungsrates aus der Quelle.

Für den Fall, dass die Quelle nicht saniert werden soll, sind zunächst die Ergebnisse der Detailuntersuchung dahingehend zu prüfen, ob die dort vorgenommenen Abschätzungen von Schadstoffmasse und Freisetzungsrates auch für die Entscheidung über die Durchführung eines MNA-Konzeptes hinreichend belastbar sind.

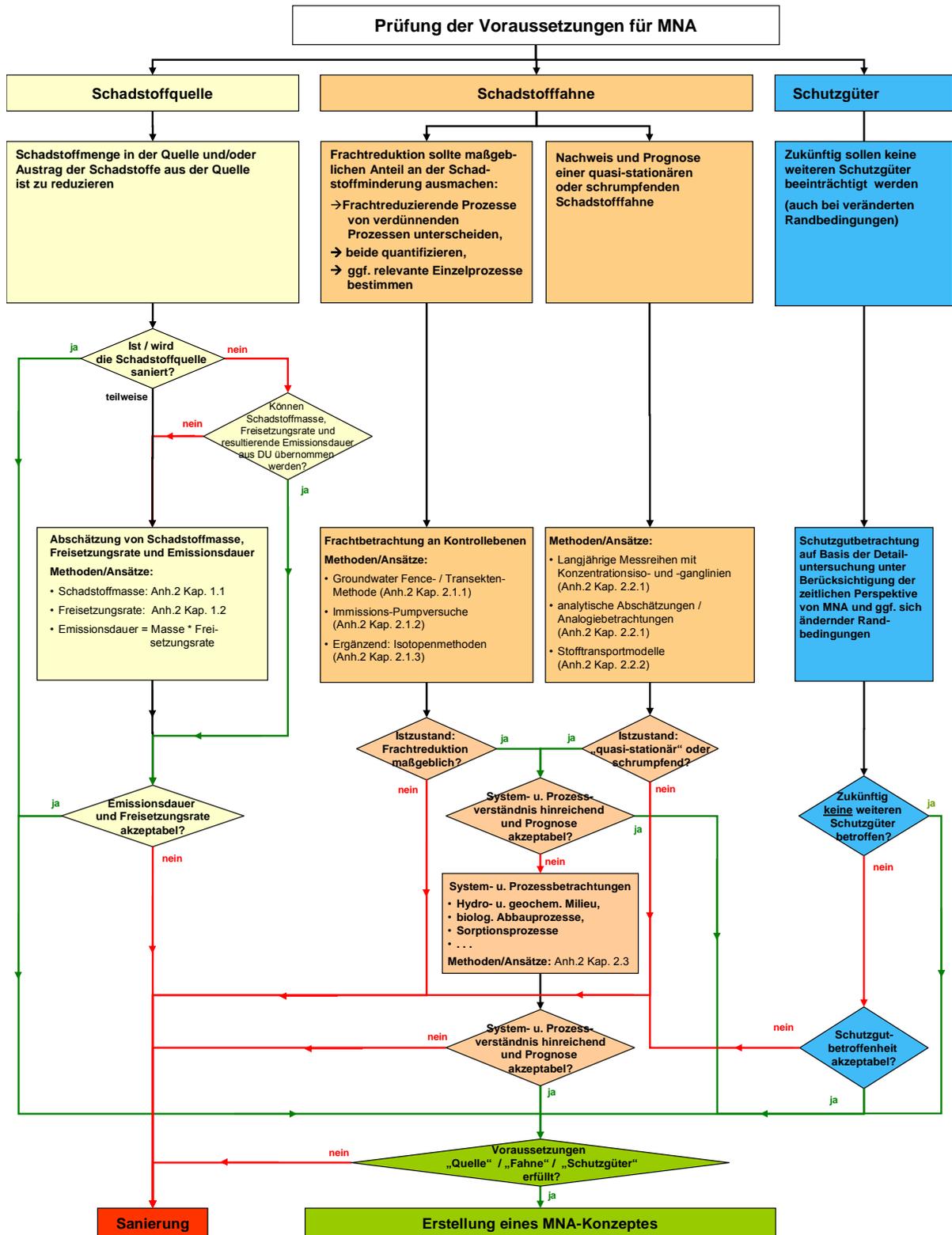


Abb. A2-1 Fließschema zur Prüfung der Voraussetzungen für MNA

Die Bestimmung der Schadstoffmasse in der Quelle und der Freisetzungsrates aus der Quelle ist auch für den Fall notwendig, in dem die Prognose der Schadstofffahnenentwicklung entscheidend auf stöchiometrischen Betrachtungen, d. h. auf quantitativen chemischen Reaktionsberechnungen basieren. Hierbei werden die freigesetzten Schadstoffe den für die Schadstoffminderung benötigten Reaktionspartnern gegenüber gestellt, um abschätzen zu können, ob bspw. ausreichend Elektronenakzeptoren für den biologischen Abbau zur Verfügung stehen.

A2-1.1 Methoden und Ansätze zur Abschätzung der Schadstoffmasse

Ausgangspunkt für die Abschätzung der Schadstoffmasse in der Quelle ist die Ermittlung von Schadstoffgehalten in der ungesättigten und der gesättigten Bodenzone einerseits sowie die Abschätzung der räumlichen Ausdehnung des kontaminierten Bodens und Grundwassers andererseits. Kernelemente dieses Ansatzes sind bereits in der Arbeitshilfe der LABO „[Sickerwasserprognose bei Detailuntersuchungen](#)“ [18] [www.labo-deutsch-land.de] beschrieben.

Die Bestimmung der räumlichen Ausdehnung der Schadstoffe beruht auf bekannten Untersuchungsmethoden, wie Boden- / Grundwasserprobennahmen aus Rammkernsondierungen oder Kernbohrungen sowie deren Analytik im Labor. Direct-Push-Sondierungen ([M1.1](#)) bieten die Möglichkeit einer halbquantitativen Untersuchung von Schadstoffgehalten im Untergrund, ohne dass Materialproben entnommen werden müssen:

- Sondierungen mit der MIP (**M**embrane **I**nterface **P**robe) - Sonde ([M1.1.1](#)) eignen sich zur halbquantitativen Bestimmung von leichtflüchtigen Schadstoffen wie BTEX, CKW und kurzkettigen MKW.
- Für schwerflüchtige Schadstoffe gibt es über LIF (**L**aser **I**nduced **F**luorescence) – Sonden ([M1.1.2](#)) die Möglichkeit, die Gehalte von PAK, die in Spuren auch in Kraftstoffen (Benzin, Diesel, Kerosin), Rohölen oder auch in Phenolschlämmen vorkommen, direkt halbquantitativ zu

bestimmen. Aussagen über Art und Umfang von Phasenbereichen sind eingeschränkt möglich.

Der Vorteil der Direct-Push-Sondierungen besteht u. a. in der höheren Arbeitgeschwindigkeit und in einer deutlich besseren Tiefendifferenzierung der Kontamination, die ein detailliertes Bild der Schadstoffverteilung im Boden ermöglicht. Andererseits sind Direct-Push-Sondierungen im Regelfall auf 30 – 50 m Bohrtiefe, auf Lockergesteine ohne grobkiesige Bestandteile und auf oberflächenverwitterte Festgesteine beschränkt. Beim Durchfahren von hoch belasteten Bereichen kann es bei den MIP-Sondierungen (im Gegensatz zur LIF-Technologie) darüber hinaus zu einer Verschleppung von Schadstoffen (Memory-Effekt) kommen, so dass das Ermitteln der Kontaminationsuntergrenze mit einer größeren Unsicherheit verbunden ist als die Bestimmung der Kontaminationsobergrenze.

Direct-Push-Sondierungen bieten zusätzlich die Möglichkeit, im Anschluss an die Messungen das Sondierloch zu einer 1“-Messstelle mit unterschiedlichster Ausgestaltung des Filter- bzw. Probennahmebereiches auszubauen ([M1.1.4](#), [24]). Diese Messstellen ermöglichen somit eine tiefendifferenzierte Probennahme des Grundwassers und der Bodenluft. Aufgrund der geringen Grundwasserentnahmerate und somit des Einzugsbereiches sind Pumpproben aus 1“-Messstellen nicht vergleichbar mit Pumpproben aus konventionellen Messstellen.

Die Ausdehnung sowohl der Schadstoffquelle als auch der Schadstofffahne kann auf diese Weise mit einem deutlich höheren Detaillierungsgrad und kostengünstiger als mit konventionellen Methoden ermittelt werden. Auf diese Weise lässt sich auch die Platzierung von konventionellen Grundwassermessstellen optimieren.

Bei leichtflüchtigen Schadstoffen lassen sich Schadstoffquellen auch über Messungen in der Bodenluft eingrenzen. In gering durchlässigen Böden kann die Diffusion allerdings stark vermindert sein.

Im Falle von auf dem Grundwasser aufschwimmender Phase (LNAPL) kann geprüft

werden, ob Radon-Messungen ([M1.1.7](#)) in der Bodenluft zur Identifikation und horizontalen Eingrenzung eines Phasenkörpers eingesetzt werden können. Die starken Einschränkungen hinsichtlich der Anwendbarkeit dieser Methode sind zu beachten.

Zur Ermittlung, ob sich eine Messstelle in hydraulischem Kontakt mit einer freien Phase befindet, können Pumpversuche zur Bestimmung der Phasenmobilität ([M1.1.6](#)) durchgeführt werden. Aus deren Ergebnissen lässt sich neben dem Rückschluss auf die Mobilität der Phase auch abschätzen, ob sich die Messstelle in einem phasenführenden Bereich befindet. Daneben können auch Hinweise gewonnen werden, ob eine Phasentnahme erfolversprechend ist.

Bei der Ermittlung von Phasenmächtigkeiten durch die Beprobung von Grundwasser-messstellen sind mehrere Fehlerquellen zu beachten:

- Die Filterlagen der Messstellen müssen auf DNAPL oder LNAPL abgestimmt sein.
- Schwankende Grundwasserstände können den Zufluss von LNAPL in die Messstellen beeinflussen. Vor diesem Hintergrund ist es wichtig, Zeitreihen von Grundwasser- und Phasenständen aufzunehmen, um die vertikale Ausdehnung des NAPL-kontaminierten Bereichs verlässlich interpretieren zu können.
- Es muss zwischen der Phasenmächtigkeit in der Messstelle (scheinbare Phasenmächtigkeit) und der Phasenmächtigkeit im angrenzenden Sediment, die im Regelfall geringer ist, unterschieden werden.

Die in der Messstelle ermittelte Phasenmächtigkeit sollte daher durch entsprechende Prüfungen (z. B. Bodenprobenahmen) vor einer Übertragung auf das angrenzende Sediment verifiziert werden.

Nach der Bestimmung der Schadstoffgehalte und der räumlichen Verteilung der Stoffe in der Quelle kann die Schadstoffmasse wie folgt abgeschätzt werden:

- durch Interpolation der Schadstoffgehalte und Multiplikation mit dem jeweiligen Volumen (s. Arbeitshilfe der LABO

„Sickerwasserprognose bei Detailuntersuchungen“) oder

- ggf. durch analytische Berechnungen der Schadstoffmasse aus der Geometrie des Phasenkörpers über räumliche Integration von Sättigungsprofilen ([TV1 Kap. B3.1.2](#)).

Bei einer Interpolation der Schadstoffgehalte hängt die Aussagesicherheit im Wesentlichen von der Repräsentativität der Datenbasis ab. Statistische Kennwerte ([TV3 Kap. B2.2.2.1](#) und [KORA Handlungsempfehlungen Kap. 7.6 „Virtueller Aquifer“](#)) zur Heterogenität des Datenbestandes können, sofern ihre Anwendungsgrenzen beachtet werden, einen Hinweis darauf geben, ob die Anzahl der Proben und Probennahmestellen für eine Abschätzung der Schadstoffmasse ausreichend ist.

Bei der Berechnung der Schadstoffmasse von Phasenkörpern über die räumliche Integration von Sättigungsprofilen ist eine Vielzahl von standortspezifischen Parametern zu ermitteln, z. B. Sieblinie, Wasserspannungskurven und Porosität. Insbesondere die u. U. hohe Sensitivität der bodenartabhängigen van Genuchten-Parameter bewirkt, dass auch diese Berechnung nur eine überschlägige Abschätzung der Schadstoffmasse ermöglicht.

Die Identifikation und Kartierung von Schadstoffen in Phase ist eine wichtige Beurteilungsgrundlage. Befinden sich die Schadstoffe als Phase in der ungesättigten oder gesättigten Zone, ist anhand der Gesamtgehalte in Bodenproben abzuschätzen, ob die Schadstoffe als residuale oder gar noch mobile Phase vorliegen. Ebenso ist zu ermitteln, ob und in welchem Umfang die Schadstoffe an die Bodenmatrix gebunden vorliegen und ob die Sorption reversibel ist [19]. Diese Informationen zur Art und räumlichen Verteilung der Schadstoffe in der Quelle sind maßgebend für die Bestimmung bzw. Abschätzung der Freisetzungsrate.

A2-1.2 Methoden zur Abschätzung der Freisetzungsrate

Die Ermittlung der Schadstofffreisetzung ist ebenfalls in der LABO „Arbeitshilfe zur Sickerwasserprognose bei

Detailuntersuchungen“ behandelt worden. Einige Auszüge hieraus:

„Zur Ermittlung der Schadstofffreisetzung ist die aktuelle Schadstoffkonzentration im Sickerwasser bzw. Kontaktgrundwasser der Quelle zu bestimmen und deren zukünftige Entwicklung abzuschätzen. Aus diesen Untersuchungen erhält man die Quellstärke des kontaminierten Materials, d. h. die von der jeweiligen Schadstoffquelle pro Zeit- und Flächeneinheit ausgehende Schadstoffmasse (Massenstromdichte). Durch Multiplikation der Quellstärke mit der Flächengröße der Schadstoffquelle errechnet sich die aus der Quelle austretende Fracht (Masse pro Zeiteinheit)“. . . . „Für Schadstoffe in Phase können näherungsweise die Wasserlöslichkeiten der Einzelstoffe als Quellkonzentration verwendet werden. Bei organischen Stoffgemischen (MKW, Teeröle) ist die Löslichkeit in Wasser gegenüber dem Einzelstoff entsprechend dem Molanteil des jeweiligen Stoffes herabgesetzt und kann mit dem Raoult'schen Gesetz berechnet werden“ . „Zur Abschätzung der Freisetzung von organischen Schadstoffen aus verunreinigten Böden können nach der BBodSchV Säulenversuche durchgeführt werden [19]. Können Säulenversuche nicht angewendet werden, sind vor allem chemisch-physikalische Daten zur Abschätzung der Sickerwasserkonzentrationen organischer Schadstoffe sinnvoll.“ „Die Emissionsdauer einer Schadstoffquelle ist direkt abhängig von der Sickerwasserkonzentration und der mobilisierbaren Masse an Schadstoffen in der Quelle). Nicht selten wird in der Praxis als worst-case-Szenario für“ anorganische Schadstoffe „eine mobilisierbare Masse von 100 % des Gesamtgehaltes (Königswasserextraktion) unterstellt. Realistischer für die „überschaubare Zukunft“ ist jedoch eine Abschätzung mit Hilfe von weniger starken Extraktionsmitteln.“

„Bei organischen Stoffen kann die mobilisierbare Masse im Sinne einer worst-case-Betrachtung mit 100 % des Gesamtgehaltes angesetzt werden.“ . . . „Aus der Schadstoffkonzentration im Sickerwasser der Quelle, der Sickerwasserrate und der mobilisierbaren Schadstoffmasse lässt sich die Mindest-Emissionsdauer der Quelle errechnen. Es wird in einem vereinfachten Ansatz unterstellt, dass die Quellkonzentration konstant ist bis zur Erschöpfung der Quelle“.

Dies tritt insbesondere bei lösungslimitierter Freisetzung von organischen Schadstoffen auf.

Die Umsetzung dieser Überlegungen in die Praxis und die konkrete Abschätzung der einzelnen Rechengrößen wird durch das Prognoseinstrument [ALTEX-1D](#) [18], welches Bestandteil der o. g. Arbeitshilfe ist, ermöglicht. Obwohl ALTEX-1D ursprünglich nur für die ungesättigte Zone entwickelt wurde, können die Berechnungsansätze auf die gesättigte Zone übertragen werden.

Die aktuelle Freisetzungsrates aus der Quelle kann – bei schlecht abbaubaren Substanzen - alternativ auch durch eine Frachtbetrachtung an der ersten Kontrollebene im unmittelbaren Abstrom der Quelle (s. Kap. A2-2.1) ermittelt werden. Bei gut abbaubaren Substanzen, wie z.B. vielen mineralölbürtigen Schadstoffen, ist der biologische Abbau im Bereich der Quelle so hoch, dass die ermittelte Fracht wenige Meter im Abstrom des Schadensherds schon signifikant geringer ist als die Freisetzungsrates aus der Quelle. Des Weiteren lässt sich die zeitliche Entwicklung der Freisetzungsrates nicht anhand einer Frachtenbestimmung prognostizieren.

A2-2 Schadstofffahne

Die nachfolgenden Betrachtungen zur Schadstofffahne setzen voraus, dass Kenntnisse über die räumliche (3D-) Verteilung der Schadstoffe vorliegen. Diese Untersuchungen sind i. d. R. bereits Gegenstand der Detailuntersuchungen gewesen. Liegen keine diesbezüglichen Kenntnisse vor, bieten sich grundsätzlich die gleichen Methoden an, die auch zur Erkundung der Schadstoffquelle genannt wurden, jedoch fokussiert auf gelöste und sorbierte Schadstoffe. Direct-Push-Sondierungen liefern im Vergleich zu konventionellen Bohrungen kostengünstig sehr detaillierte Erkenntnisse. Auf diese Weise lässt sich auch die Platzierung von konventionellen Grundwassermessstellen optimieren.

Kern der MNA-spezifischen Betrachtungen zur Schadstofffahne sind Frachtbetrachtungen an abstromig gelegenen Kontrollebenen (Abb. 2 Kap. 4.2), der Nachweis und die Prognose der „Quasi-Stationarität“ sowie die Entwicklung

eines System- und Prozessverständnisses. Darauf aufbauend muss eine Betrachtung weiterer Schutzgüter im Hinblick auf ihre mögliche zukünftige Beeinträchtigung erfolgen.

A2-2.1 Frachtbetrachtung an Kontrollebenen

Im Kapitel 4 des Positionspapiers wird als eine Voraussetzung für die Durchführung von MNA genannt, dass „die frachtreduzierenden von den verdünnenden Prozessen zu unterscheiden sind, beide sollten anschließend quantifiziert werden. Die Untersuchung sollte nachweisen, dass die Frachtreduktion den maßgeblichen Anteil an der Schadstoffminderung ausmacht.“ Da die Unterscheidung zwischen den einzelnen Prozessen sehr aufwändig sein kann, ist zunächst der Nachweis sinnvoll, dass die Fracht im Verlauf der Schadstofffahne reduziert wird. Hierdurch können die **frachtreduzierenden Prozesse** von den **verdünnenden Prozessen** abgegrenzt werden.

Der in Schadstofffahnen häufig zu beobachtende Konzentrationsrückgang (quellnahe Bereiche weisen hohe Konzentrationen auf, in zunehmender Entfernung von der Quelle sinkt die Konzentration) beruht neben den eigentlichen Abbau- und Rückhalteprozessen auch auf Verdünnungsprozessen. Für ein MNA-Konzept ist daher der Nachweis eines Konzentrationsrückgangs entlang der Schadstofffahne alleine nicht ausreichend. In jedem Fall ist zu ermitteln, ob auch eine deutliche Frachtreduktion zu beobachten ist.

In einem ersten Schritt sind entlang der Schadstofffahne Kontrollebenen zu definieren, die senkrecht zur Abstromrichtung liegen. An diesen Kontrollebenen sind die Grundwasservolumenströme (Q) und die mittlere Schadstoffkonzentrationen (C) zu ermitteln. Die Fracht (E) wird aus dem Produkt von mittlerer Konzentration und Volumenstrom an der jeweiligen Kontrollebene ermittelt ($E=C \cdot Q$). Als Methoden eignen sich der „Groundwater Fence- / Transekten“-Ansatz (Kap. A2-2.1.1) oder der Immissionspumpversuch (Kap. A2-2.1.2). Die vorliegende Frachtreduktion entlang der Schadstofffahne wird aus den Differenzen der Frachten an den jeweiligen Kontrollebenen

bestimmt. Aus dem Verhältnis der Frachten zueinander kann der Frachtreduktionsfaktor ermittelt werden.

Wesentlich hierbei ist die Platzierung der Kontrollebenen: Die 1. Kontrollebene sollte im direkten Abstrom der Schadstoffquelle liegen, um die aus der Schadstoffquelle freigesetzte Referenzfracht zu ermitteln, auf die die Frachten der abstromigen Kontrollebenen bezogen werden. Die Lage und Anzahl weiterer Kontrollebenen ergibt sich im Einzelfall. Die letzte Kontrollebene sollte im analytisch sicher erfassbaren Bereich der Fahnen Spitze liegen (Abb. 2 Kap. 4.2).

Zur Bewertung, ob die Frachtreduktion **maßgeblich** gegenüber der Verdünnung ist, reicht i. d. R. der Nachweis aus, dass die Fracht an der letzten Kontrollebene nur noch 20% der Fracht an der 1. Kontrollebene beträgt.

Bei Unsicherheiten sollte nachgewiesen werden, dass der Frachtreduktionsfaktor (E_1/E_2) zwischen den Kontrollebenen 1 und 2 größer als der zugehörige Verdünnungsfaktor (Q_2/Q_1) ist.

Einen ersten Eindruck vom Verhältnis Frachtreduktion zu Verdünnung kann man auch an einzelnen Messstellen aus dem Vergleich von abbaubaren bzw. sorbierbaren Schadstoffen mit sich „konservativ“ verhaltenden Stoffen, die weder Abbau- oder Sorptionsprozessen unterliegen, erhalten ([TV1 Kap. B3.3.1.2.1](#)).

Wenn die festgestellte Schadstoffminderung in hohem Maße auf Sorption (Retardation) beruht, sollte das Ausmaß einer möglichen Desorption bspw. anhand einer Modellierung berücksichtigt werden.

A2-2.1.1 Groundwater Fence- / Transekten- Methode

Eine Methode zur Frachtbestimmungen an Kontrollebenen ist die „Groundwater Fence“-Methode (BOCKELMANN et al. 2003, KING et al. 1999, BORDEN et al. 1997). Hierzu führt der Leitfaden des [KORA- TV1 Kap. B3.3.2.1.1](#) folgendes aus:

“. . . 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. Aufgrund der meist sehr heterogenen Schadstoffverteilung ist ein enges Raster an Beprobungspunkten (z.B. durch „direct push“-Sondierungen und Messstellen) notwendig, um eine verlässliche Aussage zur Schadstofffracht zu erhalten. Hinweise und Empfehlungen:

- *Der Vorteil dieser räumlich interpolierenden Methode ist die Bilanzierung von Frachten über größere Querschnittsflächen unter Berücksichtigung der unterschiedlichen auftretenden Konzentrationsgradienten.*
- *Die Methode liefert dann verlässliche Werte, wenn der Abstand zwischen den Interpolationspunkten im Vergleich zur Korrelationslänge der heterogen verteilten Parameter gering ist. Tiefenhorizontierte Beprobungen sollten vorliegen, nach Möglichkeit eine tiefenhorizontierte Bestimmung der Kf-Werte (z.B. Injection-Logging mit DP-Technik, Slugtests, Sieb-analysen etc.). Hydraulische Gradienten können i.d.R. nur als Mittelwerte über die Kontrollebene angegeben werden.“*
- *Bei mineralölkontaminierten Standorten ist aufgrund des typischen Abbaus der Gradient der Schadstoffkonzentrationen im nahen Abstrom der Schadstoffquelle mitunter sehr steil, „was die Einrichtung einer schadstoffquellnahen Kontrollebene und die Bestimmung der Schadstofffracht, die dem Stoffaustrag aus der Schadstoffquelle entspricht,“ erschweren kann.*
- *„An heterogenen Standorten ist eine sehr hohe Messstellendichte für eine verlässliche Bestimmung der Schadstofffrachten notwendig.“*

Sofern an einem Standort mit kurzfristigen Konzentrationsschwankungen bspw. durch starke Grundwasserstandsschwankungen zu rechnen ist, die nur durch häufige Stichtagsbeprobungen erfassbar wären, können ergänzend zur Ermittlung von mittleren Konzentrationen bzw. Frachten, Passivsammlereinheiten eingesetzt werden ([M1.2.2](#)).

A2-2.1.2 Immissions - Pumpversuche

Das Grundkonzept der Immissions-Pumpversuche bzw. der integralen Grundwassererkundungsmethoden basiert darauf, dass entlang einer Kontrollebene der schadstoffbelastete Abstrom durch Pumpmaßnahmen an hierzu geeigneten Brunnen erfasst wird ([M1.2.1](#), s. a. Peter et al. 2004, Bauer et al. 2004, Teutsch et al. 2000). Während der Pumpmaßnahme werden für die relevanten Schadstoffe die Konzentrationsganglinien bestimmt. Das geförderte Grundwasser strömt dem Brunnen aus einem immer größeren Einzugsgebiet zu und integriert damit ein zunehmendes Grundwasservolumen. Aus dem zeitlichen Konzentrationsverlauf und der Fördermenge des abgepumpten Wassers lässt sich die Schadstofffracht bestimmen [25]. Voraussetzung für die Anwendbarkeit der Methode sind ausreichende hydraulische Kenntnisse über den Untergrund. Sie ist grundsätzlich für alle altlasttypischen Schadstoffgruppen geeignet. Jedoch ist die Einrichtung einer quellnahen Kontrollebene schwierig, wenn in der Schadstoffquelle mobile oder mobilisierbare Phase vorhanden ist, die durch lang anhaltendes Pumpen verlagert werden könnte.

Immissions-Pumpversuche können in Abhängigkeit von den Aufbereitungs- und Einleitungskosten sehr aufwändig werden, insbesondere wenn hierzu erst spezielle Brunnen mit den notwendigen Ergiebigkeiten errichtet werden müssen. Die Erfassung des gesamten belasteten Abstroms ist daher nicht in jedem Fall zu realisieren. Für Grundwasserleiter mit geringen Durchlässigkeiten und/oder großen Mächtigkeiten ist das Verfahren aufgrund des geringen Einzugsbereiches der Brunnen in Verbindung mit langen Pumpversuchszeiten weniger sinnvoll.

A2-2.1.3 Isotopenmethoden

Zur Klärung, ob die zwischen zwei Kontrollebenen festgestellten Frachtreduzierungen bzw. ob Konzentrationsabnahmen mit zunehmender Transportstrecke durch biologische Abbauprozesse verursacht werden, können Isotopenmethoden eingesetzt werden. Ergän-

zend oder in Kombination zu den o. g. Untersuchungsansätzen und der Bestimmung von Konzentrationen kann die Bestimmung von Isotopensignaturen ([TV1 Kap. B3.3.2.2.3](#)) eines Elements ($^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$, $^2\text{H}/^1\text{H}$), das Bestandteil des Schadstoffmoleküls ist, den eindeutigen Nachweis eines biologischen Abbaus liefern.

Der biologische Abbau eines Schadstoffes ist häufig mit einer relativen Anreicherung der schwereren Isotope (^{13}C , ^2H) innerhalb des nicht abgebauten Schadstoffes verbunden, da die Mikroorganismen Moleküle, die aus leichten Isotopen aufgebaut sind, zumeist bevorzugt verwerten. Im Ergebnis kommt es zu einer Veränderung des Isotopenverhältnisses (Isotopenfraktionierung). Andere Prozesse, denen die Schadstoffe unterliegen, wie bspw. hydrodynamische Dispersion, Sorption oder Volatilisierung führen nicht in signifikantem Maße zu einer Fraktionierung, so dass davon ausgegangen werden kann, dass eine beobachtete Anreicherung von schwereren Isotopen allein durch biologischen Abbau verursacht wurde.

Die Isotopensignaturen sollten an den verschiedenen Kontrollebenen bestimmt werden. Unter Hinzunahme von im Labor bestimmten prozessspezifischen Fraktionierungsfaktoren kann der biologische Abbau quantifiziert werden. Voraussetzung dafür ist jedoch, dass die Abbaumechanismen und Milieubedingungen im Feld bekannt sind und dafür repräsentative Fraktionierungsfaktoren vorliegen.

Umgekehrt gilt jedoch nicht, dass eine fehlende Isotopenfraktionierung einen Negativbefund für den biologischen Abbau darstellt (s. a. [Leitfaden des KORA-TV1 Kap. C4.3.1](#) und [TV3 Kap. E4.II.7.1](#)). Derzeit stehen laut KORA-TV1 Fraktionierungs- bzw. Anreicherungsfaktoren (für $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$) für etwa 20 organische Schadstoffe, darunter für alle BTEX-Komponenten, einige PAK, verschiedene chlorierte Kohlenwasserstoffe und MTBE zur Verfügung (zusammengefasst in MECKENSTOCK et al. 2004, SCHMIDT et al. 2004b).

Darüber hinaus kann man Isotopenverhältnisse auch benutzen, um verschiedene

Schadstoffquellen voneinander zu unterscheiden, sofern die Ausgangsstoffe unterschiedliche Signaturen aufweisen. Vor dem Einsatz der Isotopenmethoden sind die für die Fragestellungen relevanten Randbedingungen zu prüfen (s. a. [M2.2.4](#) und [M2.2.5](#)).

A2-2.2 Nachweis und Prognose der „Quasi-Stationarität“

Im Kapitel 4 des Positionspapiers wird als eine Voraussetzung für die Durchführung von MNA gefordert, dass es möglich sein muss, aus den Untersuchungsergebnissen zur Schadstofffahne eine Prognose aufzustellen, ob aktuell und zukünftig eine Beeinträchtigung weiterer Schutzgüter ausgeschlossen werden kann. Diese Anforderung setzt den Nachweis einer quasi-stationären oder schrumpfenden Schadstofffahne voraus.

In der Praxis werden insbesondere an der Fahnen spitze häufig erhebliche Schwankungen der Konzentrationen über die Zeit beobachtet, die unterschiedliche Ursachen haben können. Folgende mögliche Ursachen sind daher bei der Prognose der Fahnenentwicklung bzw. beim Nachweis der „Quasi-Stationarität“ in Betracht zu ziehen:

- Eine sich ändernde Grundwasserneubildungsrate (z. B. durch jahreszeitliche Schwankungen oder infolge von Oberflächenversiegelungen), temporäre Grundwasserentnahmen (z. B. aufgrund von Baumaßnahmen) sowie Einflüsse von Oberflächengewässern können natürliche Veränderungen der hydraulischen Bedingungen, wie Grundwasserstandsschwankungen oder Änderungen der Fließrichtungen, verursachen. Dies kann zur Folge haben, dass die Schadstofffahne möglicherweise nur noch unvollständig von den vorhandenen Messstellen erfasst wird.
- Unterschiedliche Probenahmebedingungen, Probenahmetechniken und Analysemethoden,
- Komplexe Schadstoffquellen mit unterschiedlichen bzw. zeitlich sich ändernden Schadstofffrachten/Quellstärken,
- Überlagerung mehrerer Schadstofffahnen.

A2-2.2.1 Nachweis und Prognose anhand von Messreihen und Analogiebetrachtungen

Mit langjährigen, geostatistisch belastbaren Messreihen an einer ausreichenden Anzahl von geeignet positionierten Grundwassermessstellen sowohl innerhalb als auch im unmittelbaren Umfeld der Schadstofffahne lässt sich die Stationarität einer Schadstofffahne am aussagekräftigsten nachweisen. Ändern sich die in den einzelnen Messstellen angetroffenen Schadstoffkonzentrationen über einen längeren Zeitraum nicht oder nur unwesentlich, so kann dies als Stationarität der Schadstofffahne interpretiert werden. Empfehlenswert ist die Darstellung der zeitlichen Entwicklung sowohl als Konzentrations-Ganglinien, die statistisch ausgewertet werden können, als auch von Konzentrations-Isolinien, die im besonderen Maße die räumliche Entwicklung der Schadstofffahne veranschaulichen können. Besonders relevant sind in diesem Zusammenhang die Messstellen an der Fahnen Spitze, da sie dort für die Beurteilung, ob sich der Grundwasserschaden ausbreitet, von größter Bedeutung sind.

Bei Altlastenuntersuchungen, die nicht unter dem Aspekt eines MNA-Konzeptes durchgeführt wurden, ist damit zu rechnen, dass statistisch auswertbare Zeitreihen an dafür geeigneten Messstellen nicht im notwendigen Umfang vorliegen, da die Lage und der Ausbau der Messstellen hierfür nur selten geeignet sind. In diesen Fällen müssten zunächst die technischen Voraussetzungen für ein solches Untersuchungsprogramm geschaffen und dies im erforderlichen Zeitumfang durchgeführt werden. Nachteilig hierbei ist, dass über diesen Zeitraum, der mehrere Jahre umfassen kann, keine Entscheidung über ein MNA-Konzept getroffen werden kann. Auf Grundlage von auf schadstoffmindernde Prozesse ausgerichteten Standortuntersuchungen (Frachtbetrachtung an Kontrollebenen, qualitativer und quantitativer Nachweis der Abbauprozesse sowie aktuelle Abgrenzung der Schadstofffahne) kann die Wahrscheinlichkeit der Stationarität einer Schadstofffahne jedoch in den meistens Fällen plausibel beurteilt werden. Für eine Abschätzung lassen sich Berechnungen

analytischer Modelle verwenden, die auf vereinfachten Standortbedingungen basieren. Beide Vorgehensweisen setzen gleich bleibende Standortbedingungen, u. a. anhaltend wirksame natürliche Schadstoffminderungsprozesse, voraus.

Bei einfachen Fallgestaltungen / hydrogeologischen und hydraulischen Standortverhältnissen können zur Prognose der „Quasi-Stationarität“ auch Analogieschlüsse von bekannten stationären Fahnen gezogen werden, ohne dass langjährige Messreihen vorliegen (< 5 Jahre). Dies betrifft jedoch im Allgemeinen nur Schadensfälle bestimmter Schadstoffgruppen mit kurzen Fahnenlängen (wie MKW) und relativ geringen Quellstärken sowie Standorte, bei denen Schutzgüter im Grundwasserabstrom nicht gefährdet werden können.

A2-2.2.2 Nachweis und Prognose mittels Stofftransportmodellen

In Fällen komplexerer Art empfiehlt sich der Einsatz eines Stofftransportmodells ([Lit. KORA-TV 7](#)). Damit können für die maßgebenden Schadstoffe unter den gegebenen hydrogeologischen und hydrogeochemischen Randbedingungen und unter Zugrundelegung der ermittelten Abbau- und Sorptionsprozesse die raumzeitliche Entwicklung der Schadstofffahne und ihre Stationarität abgeschätzt werden. Anhand von Sensitivitätsanalysen und Szenariobetrachtungen für variierende Randbedingungen in der Zukunft (z. B. Änderung der Grundwasserneubildung und damit des Eintrags von Elektronenakzeptoren durch Versiegelung oder Änderung der Grundwasserfließrichtung durch Baumaßnahmen) kann die Bandbreite der best- und worst-case-Prognosen betrachtet werden. Eine Übersicht über die in KORA für konkrete Standorte angewendete Modellsoftware enthält [Tab. 7.1](#) der KORA-Handlungsempfehlungen.

Vor jeder Modellerstellung sind die mit Hilfe des Modells zu klärenden Fragestellungen zwischen den Beteiligten abzustimmen. Bei

Stofftransportmodellen im Zusammenhang mit MNA können diese insbesondere sein:

- Bestätigung/Abschätzung der ausbreitungsrelevanten Prozesse und der sie bestimmenden Parameter,
- Abschätzung der Freisetzungsrates,
- Prognose der zukünftigen Fahnenausdehnung,
- Prognose der Konzentrationsentwicklung innerhalb der Schadstofffahne,
- Abgrenzung von Schadstofffahnen mit vergleichbaren Schadstoffspektren und unterschiedlichen Schadstoffquellen,
- Prüfung, Gegenüberstellung und Optimierung von Sanierungsvarianten,
- Optimierung des Grundwassermonitorings (z. B. Lage und Ausbau der Messstellen, Probennahmeintervall).

Voraussetzung für eine Prognose mittels eines Stofftransportmodells ist ein konzeptionelles System-/Prozessverständnis mit allen maßgebenden Merkmalen des Standortes (**Konzeptionelles Standortmodell**). Die Tabelle A2-2 gibt eine Übersicht über die jeweiligen Begrifflichkeiten und Modelltypen, die im Hinblick auf die Prognose der Fahnenentwicklung von Bedeutung sind und im Folgenden beschrieben werden.

Aufbauend auf dem **geologischen Strukturmodell** wird mittels Grundlagen-ermittlung, Datenakquisition und Erkundungen ein **hydrogeologisches Strukturmodell** erstellt ([16], [20], [21], [22]). Dieses hydrogeologische Strukturmodell bildet die Grundlage für den Aufbau eines **numerischen Grundwasserströmungsmodells**. Bereits bei der Wahl des Modellansatzes sind die zu klärenden Fragestellungen zu berücksichtigen. Daneben sind bei der Modellerstellung die Zusammenhänge zwischen Bilanz-, Modell- und Aussageraum zu beachten. Es ist u. a. zu entscheiden, ob eine stationäre oder instationäre Modellierung und ob eine 2D- oder 3D-Modellierung erforderlich ist. Letzteres setzt voraus, dass ausreichend teufendifferenzierte Daten vorliegen. Nach der Kalibrierung anhand von gemessenen Datensätzen erfolgt die Validierung durch

einen von der Kalibrierung unabhängigen Datensatz. Anhand einer Sensitivitätsanalyse sollte dargestellt werden, welchen Einfluss maßgebende Modellparameter auf das Modellergebnis ausüben.

Parallel zum Aufbau des Strömungsmodells kann die Parametrisierung der Stofftransportprozesse erfolgen. Für viele Stoffe muss in Ermangelung von Felddaten auf Literaturdaten [23] zurückgegriffen werden. Die Auswahl geeigneter Werte erfordert hohen interdisziplinären Sachverstand.

Bei der anschließenden **numerischen Stofftransportmodellierung** sind insbesondere die Angaben zu Art, Anzahl und Quellstärke der Schadstoffquellen von Bedeutung oder aber Angaben dazu, wie die Quelle im Modell implementiert wurde. Daneben sind im Stofftransportmodell die Konzentrationsrandbedingungen an den Zuflussrändern sowie die gewählten Stofftransportparameter (effektive Porosität, Dispersivität, hydrodynamische Dispersion, Retardationsfaktoren und Reaktionsparameter) zu begründen. Bei der Auswahl der Abbauparameter aus der Literatur ist darauf zu achten, dass die hydrochemischen Bedingungen im Aquifer mit denjenigen übereinstimmen, unter denen die Koeffizienten in den Literaturfällen bestimmt wurden. In der Regel werden für die Abbauparameter plausible Bandbreiten aus Feld-, Literatur- und Labordaten ermittelt, die dann im Rahmen der Stofftransportmodellierung kalibriert, d.h. durch Vergleich von gemessenen und simulierten Schadstoffkonzentrationen bestimmt werden. Dies setzt voraus, dass die übrigen Stofftransportparameter genauer abgeschätzt werden konnten, d.h. dass die zunächst definierten Bandbreiten der übrigen ggf. ebenfalls zu kalibrierenden Parameter geringer sind. Es ist zu begründen, warum der gewählte Abbauterm verwendet und welcher Wert angenommen wird.

Ggf. wird es notwendig, spezifische Untersuchungen (Tracerversuche, Sorptionsversuche) zur Bestimmung der übrigen Transportparameter durchzuführen.

Tab. A2-2: Übersicht zur Begrifflichkeit bei Modellen

Konzeptionelles Standortmodell	System-, prozess- und wirkungsbeschreibendes Modell: Darstellung einer konzeptionellen Systemvorstellung mit allen wichtigen Merkmalen des Standortes (z.B. Geologische Verhältnisse / Schichtenaufbau, Grundwasserstockwerke, Grundwasserschäden, Grundwasserfließrichtung, Stoffquellen, Stoffkonzentrationen, Schutzgüter, bekannte und /oder vermutete Wirkung natürlicher Schadstoffminderungsprozesse), Nutzungen, Anforderungen an die Modellergebnisse. Das konzeptionelle Standortmodell ist kein mathematisches Modell, sondern die gedankliche Vorstufe eines numerischen, in einfachen Fällen auch analytischen Modells.
Geologisches Strukturmodell	Beschreibung und Darstellung der geologischen Verhältnisse: Lithologie, Stratigrafie und Genese. Diese Elemente werden in ihrer räumlichen Lage zueinander als Linien, Flächen und/oder Körper dargestellt.
Hydrogeologisches Strukturmodell	Den geologischen Strukturen/Einheiten werden hydrogeologische Eigenschaften (z.B. Porosität, Speicherkoeffizient, hydraulische Durchlässigkeit) zugeordnet. Ggf. werden geologische Einheiten mit identischen hydrogeologischen Strukturen zusammengefasst oder umgekehrt auch weiter differenziert. Hierin werden die geohydraulischen und geochemischen Transfer- und Speichereigenschaften beschrieben. Das hydrogeologische Strukturmodell ist die Basis der nachfolgend genannten prozessbezogenen Modelle.
Numerisches Grundwasserströmungsmodell	Das numerische Grundwasserströmungsmodell setzt die Strömungsprozesse in mathematische Beziehungen um. Unter Angabe von Anfangs- und Randbedingungen wird entweder ein stationäres Strömungsfeld (d.h. Grundwasserstände und daraus ermittelte Fließgeschwindigkeiten) oder bei transienten (instationären) Modellsimulationen die zeitlich sich ändernden Grundwasserstände und –fließgeschwindigkeiten und - fließrichtungen errechnet.
Numerisches Stofftransportmodell	Das numerische Stofftransportmodell berechnet aufbauend auf dem errechneten Strömungsgeschwindigkeitsfeld den Transport von Stoffen im Untergrund, der durch Prozesse wie Advektion, hydrodynamische Dispersion, Diffusion, Stoffspeicherung (Sorption/Desorption, Fällung/Lösung), ggf. Volatilisierung sowie durch Reaktionsprozesse (bspw. Biologischer Abbau) bestimmt wird.
Multi-Spezies-Modell für Reaktionssysteme	Das Multi-Spezies-Modell berücksichtigt die Reaktionsprozesse mit ihren Reaktionsparametern und bilden das Transport- und Reaktionsverhalten eines Systems wechselwirkender Stoffe ab.

Bei der Kalibrierung des Stofftransportmodells werden i. d. R. die Parameter des Grundwasserströmungsmodells nicht mehr verändert. Die Ergebnisse des Stofftransportmodells sind den gestellten Anforderungen und formulierten Fragen gegenüberzustellen. Bei der Darstellung der Ergebnisse der Prognoseberechnungen sind die gewählten hydrochemischen und hydraulischen Randbedingungen zu dokumentieren und die Unsicherheiten der Prognoseergebnisse, die sich u. a. aus einer Sensitivitätsanalyse ergeben, zu diskutieren. Insbesondere bei nicht genauer vorhersehbaren Änderungen dieser Randbedingungen oder hohen Prognoseunsicherheiten bieten sich Szenarienbetrachtungen an, um die Bandbreite der möglichen Entwicklungen darzustellen.

Numerische Stofftransportmodelle können zu **Multi-Spezies-Modellen** erweitert werden. Multi-Spezies-Modelle ermöglichen im Unterschied zu Einkomponenten-Modellen eine prozessbezogenere Abbildung der Reaktionen, da sie auch die Reaktionspartner berücksichtigen, d. h. biologischer Abbau ist nur bei Anwesenheit der Reaktionspartner möglich. Die maßgebenden Prozesse sind bei der Prozesserkundung zu ermitteln. So sind an den Fahnenrändern von MKW, PAK, CKW und BTEX-Fahnen zumeist aerobe Prozesse maßgebend, während innerhalb der Fahne häufig anaerobe Bedingungen mit Nitrat-, Sulfat- oder Eisenreduktion vorherrschen.

Nur bei ausreichender Qualität und Dichte der Eingangsdaten ist eine zufriedenstellende Aussageschärfe und Prognosefähigkeit aller Modellierungen zu erwarten. Während der Erstellung und Fortentwicklung des Modells ist dieser Aspekt immer wieder zu bedenken. Bei Bedarf sind zusätzliche Daten zu erheben. Insbesondere sollte beachtet werden, dass meist kurze Monitoring-Zeiträume von mehreren Jahren als Basis dienen, um Transportmodelle für Prognosen von häufig mehreren Zehnerjahren bis zu hundert(en) Jahren zu kalibrieren. Dies bedeutet, dass eine Monitoringmaßnahme im Rahmen der Durchführung eines MNA-Konzeptes nicht nur

zur Überwachung des Standortes bzw. der Nachhaltigkeit der NA Prozesse dienen sollte, sondern ebenfalls zur fortdauernden Modellpflege, ggf. Nachkalibrierung und Fortschreibung der Prognose verwendet werden sollte.

A2-2.3 Methoden zur Abschätzung der Prozesse bzw. zur Entwicklung eines Prozess-/Systemverständnisses

In Kapitel 4 des Positionspapiers wird als eine Voraussetzung für die Durchführung von MNA genannt: *„Die Bestimmung der relevanten Einzelprozesse ist Voraussetzung für die anschließende Prognose des Fahnenverhaltens.“*

Während die methodischen Hinweise in den vorangegangenen Kapiteln weitgehend schadstoffunspezifisch waren, sind die Methoden zur Untersuchung der Prozesse i. d. R. schadstoffspezifisch.

Unabhängig von der Art der Schadstoffe ist es jedoch erforderlich, das hydro- und geochemische Milieu im Anstrom des Standorts und im Verlauf der Schadstofffahne zu ermitteln.

Bestimmung des hydro- und geochemischen Milieus

Hierzu gehören insbesondere die Bestimmung der redoxsensitiven Parameter sowie die aktuelle und zukünftige Verfügbarkeit von Elektronenakzeptoren und –donatoren, da diese i. d. R. steuernde oder anzeigende Größen für den Abbau sämtlicher organischer Stoffe darstellen. Für ein Prozess-/Systemverständnis sind sie daher unabdingbar.

Standardmäßig zu bestimmen sind:

- Physiko-chemische Parameter (Leitfähigkeit, pH-Wert, Eh-Wert, Temperatur), Gelöster organischer Kohlenstoff (DOC), Gelöster anorganischer Kohlenstoff (DIC), Säurekapazität und Hydrogencarbonat, Phosphat;
- Anzeiger von Redoxverhältnissen/-zonen (Elektronenakzeptoren und –donatoren):

gelöster Sauerstoff, Nitrat, Sulfat, Eisen(II), Mangan (II), Methan, Ammonium.

Zusätzlich kann es notwendig werden, das Redoxsystem umfassender zu betrachten: Eisen(III), Mangan(IV), Sulfid, Nitrit, Wasserstoff.

Als ergänzende Methode zur Ermittlung und langfristigen Beobachtung von Redoxzonen können „Redoxbänder“ (M1.2.10) eingesetzt werden. Bei ausgeprägten Vertikalströmungen innerhalb eines Grundwasserleiters ist diese Methode jedoch nicht zu empfehlen.

Zur Entwicklung eines Prozess-/Systemverständnisses sind neben den Hauptkontaminanten auch begleitende Schadstoffe zu betrachten, da diese den Abbau bzw. die Transformation der Hauptschadstoffe nennenswert beeinflussen können. Dasselbe gilt für die hydrogeologischen Randbedingungen, insbesondere Schwankungen des Grundwasserstandes und der -fließrichtung.

Es ist im Einzelfall zu entscheiden, welchen Umfang und Detaillierungsgrad das standort-spezifische Prozessverständnis aufweisen muss. Sofern die Frachtreduktion und die „Quasi-Stationarität“ mit hinreichender Sicherheit beurteilt und prognostiziert werden können, ist es möglich, aufwändige Prozessuntersuchungen zu reduzieren.

Nicht alle schadstoffmindernde Prozesse haben für die verschiedenen Stoffgruppen die gleiche Bedeutung. Die nachfolgende Tabelle gibt stark vereinfacht die stoffgruppenspezifische Relevanz von Abbau-, Sorptions- und Volatilisierungsprozessen in der Schadstofffahne wieder. Die Relevanz der Prozesse darf hierbei nicht mit der Effektivität der Prozesse im Einzelfall verwechselt werden. Weitergehende Informationen zu den Einzelstoffen können Stoffdatenbanken [23] entnommen werden.

Tab. A2-3: Stoffgruppenspezifische Relevanz von Abbau, Sorption und Volatilisierung in der Schastofffahne

Stoffgruppe	Abbau		Sorption*	Volatilisierung
	Aerob	Anaerob		
MKW (C5 –C9)	■■■■	■■■	■■	■■■
MKW (C10 –C40)	■■■■	■■■	■■	■
BTEX	■■■■	■■■	■■	■■
MTBE	■■	■	■	■■
LCKW	■ (außer VC)	■■■■ (außer VC)	■	■■
PAK	■■■	■■■	■■■■	■
NSO-Heterozyklen	■■■	k.A.	■■■	■

■■■■ sehr relevant ■■■ relevant ■■ weniger relevant ■ i. d. R. nicht relevant k. A. keine Angaben

*) die Relevanz nimmt zu, wenn der Untergrund Kohlepartikel, Torf bzw. hohe C_{org}-Gehalte aufweist.

Methoden und Konzepte zur Bestimmung von biologischen Abbauprozessen

Die in KORA angewandten Methoden und Verfahren zur Charakterisierung der biologischen Abbauprozesse sind in den KORA-Handlungsempfehlungen vor allem in der Methodensammlung Kap. [M2](#) zusammengefasst. Im Einzelfall können daraus je nach Fragestellung und Zielsetzung die passenden Methoden ausgewählt werden. Insbesondere erscheinen die nachfolgend genannten Methoden in der Praxis sinnvoll einsetzbar:

- Isotopenmethoden (s. a. [M2.2.4](#) und [M2.2.5](#))
- Mikrobiologische Methoden:
 - Ermittlung von stoffwechselspezifischen Keimzahlen zum Nachweis von Mikroorganismen als Ergänzung schwer interpretierbarer hydrochemischer Untersuchungen. Mit dem MPN-Verfahren zur Keimzahlbestimmung ([M2.1.1](#)) können spezifische stoffwechselphysiologische Mikroorganismengruppen detektiert werden. Bodeneluate bzw. Grundwasserproben werden auf spezielle Nährmedien, die verschiedene Schadstoffe enthalten, verteilt und inkubiert. Das Wachstum wird verfolgt und ausgewertet (qualitativ und quantitativ); es ergeben sich Erkenntnisse zum generellen Stoffabbaupotenzial für Kohlenwasserstoffe und zur Verwertung unterschiedlicher Elektronenakzeptoren.
 - Abbauversuche und Mikrokosmenstudien ([M2.2.1](#), [M2.2.9](#), [TV2 Kap. E5.3](#)) sollen Erkenntnisse liefern, welche Abbauprozesse am Standort relevant sein können. In [M2.2.1](#) (Mikrokosmenstudien) werden Laborversuche beschrieben, bei denen in Laborreaktoren mit Standortmaterial (Boden/Sediment bzw. Grundwasser) möglichst unter Beibehaltung der natürlichen Randbedingungen der LCKW-Abbau verfolgt wird. Eine direkte Übertragung der Resultate, insbesondere der Abbauraten, auf Feldbedingungen ist allerdings nicht gegeben.

Eine andere Vorgehensweise liefern „Bactraps“ ([M2.2.9](#)) v. a. für BTEX eingesetzt, mit denen die Vor-Ort-Verhältnisse direkt erkundet werden. Dabei wird mit in-situ-Mikrokosmen der Abbau von ¹³C-markierten Substraten, die auf Trägermaterial immobilisiert sind, beobachtet. Hinweise zur Anwendung finden sich in „Mikrobiologische NA-Untersuchungsmethoden“ ([M2](#)) Beide Methoden sind relativ aufwändig und liefern neben qualitativen nur eingeschränkt quantitative Aussagen.

- Untersuchung der mikrobiologischen Aktivität und Nachweis von spezifischen Abbauorganismen: Wenn im Falle von CKW-Belastungen Ethen oder Ethan nicht nachgewiesen werden können, ist der Nachweis von *Dehalococcoides* sp. mittels molekularbiologischer Verfahren sinnvoll [PCR-Nachweis von spezifischen Genen ([M2.1.6](#)); In-situ-Fluoreszenz-Sonden (fish) für spezifische Organismen, u. a. MTBE-Abbauer ([M2.2.10](#))].

Methoden und Konzepte zur Bestimmung von Sorptionsprozessen

Der Nachweis und die Quantifizierung der Sorption ist im [Anhang 2.4](#) der LABO-Arbeitshilfe „Sickerwasserprognose bei Detailuntersuchungen“ [18] detailliert beschrieben. Der Aufwand zur Bestimmung von standort-spezifischen Sorptionsisothermen ist nur dann gerechtfertigt, wenn besondere Standortverhältnisse vorliegen, die eine Übertragung von aus der Literatur bekannten Sorptionsdaten nicht ermöglichen, oder wenn die Streuung der Literaturwerte eine zuverlässige Übertragung auf den Standort nicht zulässt.

Methoden und Konzepte zur Bestimmung von Volatilierungsprozessen

Das mögliche Ausmaß der Volatilisierung kann im Rahmen von vereinfachenden 1D analytischen Modellrechnungen (Fick'sche Gesetze zur Beschreibung der Diffusion) oder im Rahmen der numerischen Transport-

modellierung unter Berücksichtigung der ungesättigten Zone berechnet werden. Die physikalischen Gesetzmäßigkeiten der Volatilisierung sind weitgehend bekannt, so dass neben Parametern zur Charakterisierung der ungesättigten Zone (Porosität, Wassergehalte) weitere spezielle Untersuchungen nicht notwendig werden und das Ausmaß der Volatilisierung hinreichend genau berechnet werden kann [[TV1 Kap. A3.5](#) und [TV3 Kap. B3.5.2](#)].

A2-2.3.1 Mineralölkohlenwasserstoffe (MKW), Benzol, Toluol, Ethylbenzol und Xylol (BTEX)

Bei Mineralölkohlenwasserstoffen (MKW) sowie bei Benzol, Toluol, Ethylbenzol und Xylol (BTEX) handelt es sich um ausschließlich aus Kohlenstoff und Wasserstoff zusammengesetzte Verbindungen ohne spezielle funktionelle Gruppen. Ihr ähnliches physikochemisches Verhalten im Grundwasser, vergleichbare Abbauprozesse sowie das häufige Vorkommen von Mischkontaminationen legen eine gemeinsame Betrachtung dieser Stoffgruppen nahe. MKW und BTEX bilden aufgrund ihrer geringeren Dichte als Wasser aufschwimmende Phasenkörper (LNAPL).

MKW (aliphatische Kohlenwasserstoffe) können geradkettig und verzweigt sein, oder auch Ringstrukturen aufweisen. Bei den meisten Schäden dominieren gesättigte Kohlenwasserstoffe (ohne Mehrfachbindungen).

BTEX sowie Styrol und Cumol weisen eine aromatische Ringstruktur auf und werden als leichtflüchtige aromatische Kohlenwasserstoffe zusammengefasst.

MKW-Kontaminationen sind vorrangig auf Schäden mit Kerosin, Diesel und leichtem Heizöl zurückzuführen. BTEX werden vor allem als Kraftstoffkomponenten und Lösungsmittel eingesetzt (Teerölschäden werden im Kap. A2-2.3.3 gesondert betrachtet).

Bei der Mehrzahl der MKW-Schäden handelt es sich um Gemische aus zahlreichen Einzelkomponenten eines bestimmten Siede-

bereiches. Insbesondere bei Schäden durch Vergaserkraftstoffe können MKW und BTEX als Mischkontaminationen auftreten.

Die Mobilität der MKW hängt stark von der Kettenlänge und dem Molekulargewicht ab. Mit zunehmender Kettenlänge verringert sich ihre Mobilität, da die Wasserlöslichkeit abnimmt, die Viskosität und Sorption jedoch zunehmen. MKW mit Kettenlängen über 17 Kohlenstoffatomen (Schmieröle und schweres Heizöl) sind bei Raumtemperatur zähflüssig bis fest sowie gering wasserlöslich und wegen dieser Eigenschaften im Grundwasserabstrom kaum mehr relevant.

MKW und BTEX können durch Mikroorganismen oxidiert und als Kohlenstoff- und Energiequelle genutzt werden. In Abhängigkeit von den Redoxverhältnissen im Grundwasser können sie aerob oder anaerob abgebaut werden, wobei die Verfügbarkeit von Elektronenakzeptoren in vielen Fällen die limitierende Größe darstellt. Verflüchtigung kann für die kurzkettigen aliphatischen Kohlenwasserstoffe (C5-C9) eine zusätzliche Schadstoffminderung bewirken.

Der aerobe Abbau ist deutlich effektiver als der anaerobe Abbau. Bei größeren Schäden übersteigt der Bedarf von Sauerstoff dessen Nachlieferung. Dann dominiert insbesondere im Fahnenzentrum der anaerobe Abbau.

Aufgrund der genannten Stoffeigenschaften und Prozesse sind die Längen der Schadstofffahnen von MKW und BTEX in der Regel auf wenige 100 m begrenzt [[TV1 A2.5](#) - S.13 und [TV1 C1](#) - S. 111].

Zur summarischen Bestimmung von MKW steht die gaschromatographische Bestimmung nach DIN EN ISO 9377 zur Verfügung, die Verbindungen mit Kettenlängen von C10 bis C40 erfasst. Soweit kürzerkettige MKW (C5-C9) betrachtet werden müssen, ist ggf. eine zusätzliche Analyse der leicht flüchtigen Verbindungen analog zur BTEX-Analytik durchzuführen. Für die BTEX ist ebenfalls eine Standardanalytik mittels Gaschromatographie verfügbar.

Bei MKW-Schäden ist eine Berücksichtigung des Schadstoffmusters im Hinblick auf Kettenlänge, Verzweigung und evtl. den Anteil

an Mehrfachbindungen relevant. Ein erster Überblick ist durch die Auswertung des „Fingerprints“ von Gaschromatogrammen möglich. Charakteristisch ist beispielsweise das durch Abbau bedingte Fehlen von Peaks der n-Alkane im Gaschromatogramm von Diesel- und Heizölschäden. Das Optimum der Abbaubarkeit von MKW liegt bei Verbindungen mit 10-16 Kohlenstoffatomen. Kurzkettige Kohlenwasserstoffe sind aufgrund der hohen Affinität zu den mikrobiellen Zellmembranen toxisch und können nur durch spezialisierte Mikroorganismen abgebaut werden. Gesättigte (nur Einfachbindungen enthaltende) Aliphaten sind leichter abbaubar als ungesättigte mit Mehrfachbindungen. Verzweigte Aliphaten (z. B. Isooktane) sind erheblich schlechter abbaubar als unverzweigte.

MKW-Schäden altern durch Abbau und Verflüchtigung der entsprechenden Komponenten. Mit zunehmendem Alter verringern sich die Mobilität der verbliebenen Verbindungen und ihre Abbaubarkeit.

Ist das Alter des Schadens bekannt, sind Rückschlüsse auch auf das Fahrenverhalten möglich [TV1 S. 13f.]. Anhand des Vergleiches von Gaschromatogrammen (MKW) bzw. von Stoffkonzentrationen (BTEX) kann eine Abreicherung gut abbaubarer Einzelkomponenten gegenüber weniger gut abbaubaren belegt werden. Dabei ist jedoch zu beachten, dass diese Abreicherung auch durch die unterschiedliche Mobilität der einzelnen Komponenten verursacht werden kann.

Der Abbau von BTEX kann durch Messungen der Änderungen von Isotopensignaturen ($^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$) (M2.2.5), belegt werden.

Im Zentrum der prozessbezogenen Betrachtungen von MKW- und BTEX-Schäden stehen die mit dem Abbau verbundenen Redoxprozesse. Eine halbquantitative Abschätzung des Schadstoffabbaus ist durch die Ermittlung der Abnahme von Elektronenakzeptoren an Bilanzebenen möglich. Hierzu wird der Verbrauch an Redoxäquivalenten der Abnahme von MKW und BTEX unter Berücksichtigung der Sorption und Verflüchtigung gegenübergestellt.

Da der Abbau von Einzelsubstanzen nicht immer eindeutig ist, können Mikrokosmenstudien (analog M.2.2.1a-c) zur Beurteilung ergänzend herangezogen werden (z.B. bei Isooktanen).

Sofern bestimmte Prozessschritte nicht anderweitig verifiziert werden können, lässt sich ggf. über die MPN-Methode (M2.1.1) ein mikrobiologisches Potential belegen (z. B. wenn infolge Ausfällung von FeS keine Sulfatreduktion über Sulfidgehalte im Grundwasser nachweisbar ist).

Leitparameter hinsichtlich der Durchführung von MNA sind Stofffrachten der relevanten Kohlenwasserstoffe (MKW/BTEX) sowie die Stofffrachten, die sich aus dem Verbrauch von Redoxäquivalenten ergeben.

A2-2.3.2 Methyltertiärbutylether (MTBE)

MTBE (Methyl-tertiär-butyl-ether) wird neben ETBE (Ethyl-tertiär-butyl-ether) oder TAME (Tertiär-amyl-methyl-ether) als Kraftstoffzusatz zur Erhöhung der Klopfestigkeit verwendet. Es sind sogenannte Oxygenate, die aufgrund ihres Molekulaufbaus (Etherbindungen, sterische Anordnung der Substituenten) und daraus resultierenden Stoffeigenschaften in der Umwelt persistent sind.

Massive Boden- und Grundwasserverunreinigungen durch MTBE kommen z. B. bei Tanklagern vor, oder bei „klassischen“ Tankstellenfällen, wenn MTBE-haltiger Kraftstoff (vor allem Super- und Super-Plus-Benzin) den Schaden verursacht hat.

Für die Beurteilung der natürlichen Schadstoffminderung sind die physikalisch-chemischen Stoffeigenschaften [Wasserlöslichkeit 42.000 mg/L (20 °C); log Kow 1,06 (20 °C), Siedepunkt 55 °C] relevant. MTBE ist somit sehr viel wasserlöslicher als BTEX, sorbiert geringer an der Bodenmatrix und zeigt eine geringe Tendenz zur Volatilisierung.

Aufgrund der relativ stabilen Etherbindung sowie sterischer Hinderung durch tertiäre Butylgruppen ist MTBE mikrobiologisch schwer abbaubar. Im Labor konnte MTBE jedoch sowohl aerob wie auch vereinzelt unter anaeroben Bedingungen abgebaut werden.

Alle aeroben Abbaupfade gehen über TBA (Tertiärbutanol), dessen Nachweis im Grundwasser damit einen Hinweis auf einen mikrobiellen Abbau von MTBE geben kann. Allerdings kann TBA aber auch in geringen Anteilen (als Verunreinigung von MTBE) im Kraftstoff enthalten oder gezielt als Antiklopffmittel zugesetzt worden sein.

Bei der Aufstellung von MNA-Konzepten ist bei dieser Schadstoffgruppe in jedem Fall zu bestimmen, ob MTBE, TBA bzw. TBF (tert.-Butylformiat) vorliegen. Bei Unsicherheiten ist zusätzlich zu betrachten, dass der mikrobielle Abbau von MTBE zur Bildung weiterer Zwischen-, Neben- und Endprodukte führen kann, die mit Ausnahme von TBA und TBF unter Umweltbedingungen wenig persistent sind und dementsprechend in nur geringen Konzentrationen auftreten. [\[TV1 A3.3.4 S. 26ff\]](#).

Die Abbaubarkeit von MTBE ist insgesamt deutlich geringer als die von BTEX oder MKW einzustufen. Sie ist unter aeroben Bedingungen erheblich günstiger als unter anaeroben Verhältnissen.

Geringe Wachstumsraten und eine verzögerte Adaption der MTBE-verwertenden Bakteriengesellschaften sowie die o. g. Stoffeigenschaften bedingen oft weitreichende Schadstofffahnen.

Zur Betrachtung der natürlichen Schadstoffminderungsprozesse ist in KORA für mehrere Stoffgruppen als qualitative Methode (inkl. Anwendungsgrenzen) die Bestimmung von Zellpopulationen in Boden- und Aquifermaterial mittels MPN-Verfahren / Keimzahlbestimmung ([M2.1.1](#)) verwendet worden. Ferner wurden zur Bestimmung der Abbauspezialisten auch In-situ-Fluoreszenz-Sonden (fish) ([M2.2.10](#)) eingesetzt. Da derzeit allerdings nur wenige MTBE-Abbauer charakterisiert wurden, ist über den Einsatz der In-situ-Fluoreszenz-Sonden im Einzelfall zu entscheiden.

Zur Quantifizierung der Einzelprozesse stehen derzeit keine standardisierten und praxistauglichen Methoden zur Verfügung. Über die Quantifizierung von spezifischen Metaboliten des MTBE-Abbaus ([M2.2.12](#)) könnte eine Abschätzung der Abbaurate vorgenommen

werden. Beispiel hierfür ist das TBA, das in charakteristischer Weise in der Fahne akkumuliert und nachfolgend ebenfalls abgebaut wird. Beim Vorliegen kinetischer Parameter aus Laboruntersuchungen könnte die Akkumulation von TBA zur Quantifizierung des MTBE-Abbaus herangezogen werden.

A2-2.3.3 Polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe (PAK) und NSO-Heterozyklen

Typische PAK-Schäden entstanden an Holzimprägnierstandorten und ehemaligen Gaswerken/Kokereien. Neben den PAK treten NSO-Heterozyklen als weitere relevante Schadstoffe auf. Zudem sind Co-Kontaminationen mit BTEX und Phenolen von Bedeutung. Für alle genannten Schadstoffe muss die Schadstoffverteilung im Grundwasser (Ausdehnung der Schadstofffahne) untersucht sein, um über die Durchführung von MNA entscheiden zu können.

PAK und NSO-Heterozyklen unterscheiden sich hinsichtlich ihrer Wasserlöslichkeit, Sorptionsfähigkeit und Abbaubarkeit. Für den Grundwasserpfad sind nur PAK mit einem K_{ow} -Wert unter 4,5 bzw. einer Wasserlöslichkeit über 1 mg/l relevant. Von den 16 PAK nach U.S. EPA sind dies Naphthalin, Acenaphthen, Acenaphthylen, Fluoren, Anthracen und Phenanthren. Zusätzlich relevant sind Methylnaphthaline, Indan und Inden ([TV2 Kap. A3 Tab. 7 S. 13/14](#)). Die NSO-Heterozyklen sind in Teerölen zu 3 – 15% enthalten, erreichen jedoch aufgrund ihrer hohen Wasserlöslichkeit einen Anteil von bis zu 40% der teerölbürtigen Schadstoffe in der Schadstofffahne. Eine erste Prioritätenliste für NSO-Heterozyklen / -metabolite enthält [TV2 A3 Tab. 8 S. 16/17](#). Mit zunehmender Entfernung von der Schadstoffquelle nehmen die gut abbaubaren sowie die gut sorbierenden Schadstoffe deutlich ab. Daher dominieren an der Fahnen Spitze die mobileren und schlecht abbaubaren Stoffe (z. B. 3-Ring-PAK wie Acenaphthen und einzelne NSO-Heterozyklen).

Bei PAK-Schäden ist aufgrund der geringen Löslichkeit und hohen Sorptionsfähigkeit mit

einem lange andauernden Schadstoffaustrag (oft > 100 Jahre) zu rechnen, sofern die Schadstoffquelle nicht saniert wird. „Langlebige“ Schadstofffahnen sind die Folge. Gleichzeitig führen diese physiko-chemischen Eigenschaften der PAK dazu, dass die Ausbreitung i. d. R. nur langsam verläuft. Dieses äußerst langfristige Ausbreitungsverhalten ist bei der Entscheidung über ein MNA-Konzept besonders zu beachten.

Der aerobe Abbau ist deutlich effektiver als der anaerobe Abbau. Bei größeren Schäden übersteigt der Bedarf von Sauerstoff dessen Nachlieferung. Dann dominiert insbesondere im Fahnenzentrum der anaerobe Abbau.

Bei PAK und NSO-Heterozyklen wird eine Frachtreduktion sowohl durch Abbauprozesse als auch durch die hohe Sorptionsfähigkeit bewirkt. Eine Unterscheidung zwischen Abbau und Sorption und deren Quantifizierung ist erforderlich, um abschätzen zu können, welchen Anteil die jeweiligen Prozesse an der Schadstoffminderung haben.

Zur ersten Abschätzung der Abbau- und Sorptionsprozesse sind Untersuchungen des hydro- und geochemischen Milieus erforderlich (Kap. A2-2.3).

Eine halbquantitative Abschätzung des Schadstoffabbaus ist möglich, indem die Abnahme von Elektronenakzeptoren an Bilanzebenen ermittelt wird. Hierzu wird der Verbrauch an Redoxäquivalenten der Abnahme von PAK bzw. NSO-Heterozyklen gegenübergestellt. Der Einfluss der Sorption ist bei der Interpretation zu berücksichtigen.

Ist unsicher, ob unter den gegebenen Milieubedingungen ein biologischer Abbau stattfindet, können stoffwechselspezifische Keimzahlen (MPN) im Aquifermaterial ermittelt werden (M2.1.1). Weiterhin ist es bei Vielstoffgemischen, wie sie für PAK-Schäden typisch sind, i. d. R. sinnvoll, das Abbauverhalten der relevanten Komponenten genauer zu untersuchen. Mikrokosmen (analog M2.2.1) sind zur Abschätzung der Abbauraten prinzipiell geeignet. Zu beachten ist, dass die im Labor ermittelten Abbauraten nicht direkt auf Feldbedingungen übertragen werden können. Ein Vergleich der generellen Abbau-

barkeit verschiedener Stoffe ist jedoch möglich. Im Feld kann der Anteil des stattgefundenen Bioabbaus mit Isotopenmethoden ($^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$) ermittelt werden, sofern die stoffspezifischen Fraktionierungsfaktoren bekannt sind. Die Anwendbarkeit der Methode beschränkt sich derzeit auf Naphthalin (M2.2.5).

Die Bestimmung der Sorption erfolgt auf Grundlage der K_{OC} -Werte der einzelnen Schadstoffe und des Kohlenstoffgehalts des Untergrunds. Mit Hilfe analytischer Berechnungsmodelle kann abgeschätzt werden, wie sich die einzelnen Schadstoffe ausbreiten würden, wenn kein Abbau stattfände (durch Vergleich der tatsächlichen Fahnenlänge mit der theoretischen Fahnenlänge, die ohne Abbau zu erwarten wäre). Näherungsweise kann die „Bilanzlücke“ zwischen der Frachtminderung insgesamt und der ermittelten Sorption dem Abbau zugeschrieben werden (weitere Prozesse wie Verflüchtigung sind nur bei Co-Kontaminationen mit BTEX relevant).

Leitparameter hinsichtlich der Durchführung von MNA sind i. d. R. die 16 PAK nach U.S. EPA, relevante NSO-Heterozyklen, BTEX, Phenole sowie Elektronenakzeptoren und redoxsensitive Parameter.

A2-2.3.4 Leichtflüchtige chlorierte Kohlenwasserstoffe (LCKW)

Die meisten Grundwasserschäden mit leichtflüchtigen chlorierten Kohlenwasserstoffen (LCKW) resultieren aus Einträgen von Tetrachlorethen und Trichlorethen sowie chlorierten Ethanen.

In Grundwasserleitern mit aerobem Milieu finden in der Regel keine maßgebenden LCKW - Abbauprozesse der Ausgangssubstanzen statt, so dass sich überwiegend aus den Ausgangsprodukten bestehende LCKW - Fahnen mit Längen von mehreren Kilometern ausbilden können. In Grundwasserleitern mit anaerobem Milieu kann ein LCKW-Abbau durch reduktive Dechlorierung bis zum Vinylchlorid (VC) stattfinden. Der weitere Abbau von VC zum Ethen läuft im anaeroben Milieu im Vergleich zum aeroben Milieu erheblich langsamer ab. Dies führt u. a. dazu,

dass sich in anaeroben Grundwasserleitern das besonders mobile und toxische VC anreichern kann. Vor diesem Hintergrund erfordern Überlegungen zu MNA eine kritische Abwägung im Einzelfall.

Co-Kontaminationen z. B. mit BTEX und MKW können sich günstig auf den reduktiven LCKW-Abbau auswirken, da sie als Elektronen-Donatoren für den anaeroben LCKW-Abbau dienen können.

Für die Entwicklung eines Prozessverständnisses sind immer die Ausgangsstoffe und alle Metaboliten bis hin zu Ethen/Ethan zu bestimmen, sowie mögliche Elektronen-Donatoren wie MKW / BTEX oder DOC. Indikatoren für einen natürlichen Schadstoffabbau sind Konzentrationsänderungen bei den Ausgangsstoffen, die nicht auf Verdünnung oder Verflüchtigung zurückgeführt werden können sowie das Auftreten von Metaboliten. Sofern Ethen/Ethan nicht nachweisbar sind, sollte das Vorkommen von spezifischen Abbauorganismen (z. B. *Dehalococcoides* sp.) ([M2.1.6](#)) überprüft werden. Bei speziellen Fragestellungen bietet sich der Einsatz von Isotopenmethoden an.

Auf eine Unterscheidung zwischen Abbau und Rückhalt und eine Quantifizierung von Rückhalteprozessen kann bei LCKW aufgrund geringer Retardation in Grundwasserleitern mit geringen C_{org} -Gehalten in der Regel verzichtet werden. Enthält der Grundwasserleiter jedoch kohleartige Bestandteile bzw. Torf- oder Braunkohlelagen, ist die Retardation zu quantifizieren.

Zum qualitativen Nachweis von biologischen Abbauprozessen kann auf folgende Methoden zurückgegriffen werden:

- Isotopenmethoden (Kap. 2.1.3, [M2.2.4](#))
- Molekularbiologische Untersuchungen: Nachweis von *Dehalococcoides* sp. ([M2.1.6](#)).

Mikrokosmenstudien ([M 2.2.1](#)) können zur Prozessidentifikation eingesetzt werden. Ihre eingeschränkte Übertragbarkeit ist zu beachten.

Als quantitative Nachweismethoden bieten sich an:

- die Betrachtung der stöchiometrischen Verhältnisse von Ausgangsstoffen und Metaboliten
- Isotopenmethoden (Kap. 2.1.3 und [M2.2.4](#))

Für ein anschließendes Monitoring ist die Bestimmung der Ausgangsstoffe und aller Metaboliten bis hin zu Ethen/Ethan erforderlich. Außerdem sind alle relevanten Indikatoren (Kap. A2-2.3 Einleitung) sowie zusätzlich mögliche Elektronen-Donatoren wie BTEX / MKW bzw. DOC für den biologischen Abbau zu untersuchen.

A2-2.4 Berücksichtigung weiterer Schutzgüter

In Kapitel 4 des Positionspapiers wird als eine weitere Voraussetzung für die Durchführung von MNA genannt, dass durch den Grundwasserschaden zukünftig keine weiteren Schutzgüter beeinträchtigt werden sollten.

Die Betrachtung der Wirkungspfade Boden – Mensch, Boden – Nutzpflanze und Boden – Grundwasser ist Bestandteil der Detailuntersuchung / Gefährdungsabschätzung. Deren Ergebnisse sind unter Beachtung der Gegebenheiten des Einzelfalls und bezogen auf die vorherrschende oder planungsrechtlich zulässige Nutzung der altlastverdächtigen Fläche oder Verdachtsfläche daraufhin zu bewerten, inwieweit Maßnahmen nach § 2 Abs. 7 BBodSchG (Sanierungsmaßnahmen) oder § 2 Abs. 8 BBodSchG (Schutz- und Beschränkungsmaßnahmen) erforderlich sind. Zu diesem Zeitpunkt ist somit dem Grunde nach bekannt, welche Schutzgüter im Wirkungsbereich der Schadstofffahne aktuell betroffen sind bzw. zukünftig betroffen sein könnten.

Falls die erreichte oder prognostizierte „Quasi-Stationarität“ der Schadstofffahne nicht anhält oder sich Standortgegebenheiten ändern, die die Entwicklung der Schadstofffahne beeinflussen können (wie bspw. hydrochemische und hydraulische Verhältnisse, Grundwasserneubildung, Zufuhr/Wegfall von Elektronenakzeptoren oder -donatoren), kann sich das auch auf Schutzgüter und ihre Exposition auswirken.

Bei der Einzelfallabwägung hinsichtlich eines MNA-Konzeptes sollten deshalb betroffene und potenziell betroffene Schutzgüter im Wirkungsbereich der Schadstofffahne betrachtet werden, wie:

- die menschliche Gesundheit,
- der Boden in seinen natürlichen Funktionen (insbesondere als Lebensgrundlage und Lebensraum),
- der Boden in seinen Nutzungsfunktionen (z. B. als Standort für land- und forstwirtschaftliche Nutzung, als Fläche für Siedlung und Erholung oder für wirtschaftliche und öffentliche Nutzung bei Entgasung oder bei Anreicherung leicht flüchtiger Schadstoffe in Gebäuden),
- Grundwässer und oberirdische Gewässer im Abstrom der Schadstofffahne,
- Nutzpflanzen,
- Gebäude, Bauwerke, Anlagen (z. B. hinsichtlich Korrosion).

Da bei der Durchführung von MNA die zeitliche Perspektive eine entscheidende Rolle spielt und eine alternative Handlungsoption ggf. langfristig realisierbar sein muss, gilt es abzuwägen, ob innerhalb dieses Zeitraums

Betroffenheiten von Schutzgütern „akzeptabel“ sind und ob ggf. Einschränkungen im Zusammenhang mit der Flächennutzung hingenommen werden können, wie beispielsweise:

- Nutzungsänderungen oder Nutzungseinschränkungen des Standortes oder seines Umfeldes,
- planungsrechtliche Einschränkungen (z. B. hinsichtlich einer Bebauung oder Eingriffen in den Untergrund),
- Einschränkungen bei der Standortentwicklung (z. B. in Folge von planungsrechtlichen Einschränkungen oder für den Fall der Realisierung bestimmter alternativer Handlungsoptionen).

ANHANG 3 Quellenverzeichnis

- [1] Hessisches Landesamt für Umwelt und Geologie – HLUG (2004): Arbeitshilfe zu überwachten natürlichen Abbau- und Rückhalteprozessen im Grundwasser (Monitored Natural Attenuation MNA). - Handbuch Altlasten Bd. 8, Teil 1, Stand November 2004, Wiesbaden.
- [2] Bayerisches Landesamt für Wasserwirtschaft (2004): Natürliche Schadstoffminderung bei Grundwasserverunreinigungen durch Altlasten und schädliche Bodenverunreinigungen – Natural Attenuation. – LfW-Merkblatt Nr. 3.8/3, Stand 05.11.2004.
- [3] Länderarbeitsgemeinschaft Wasser (LAWA)/Länderarbeitsgemeinschaft Boden (LABO): Grundsätze des nachsorgenden Grundwasserschutzes bei punktuellen Schadstoffquellen. - Stand Mai 2005.
- [4] Bundes-Bodenschutz- und Altlastenverordnung vom 12. Juli 1999 (BGBl. I S. 1554), geändert durch Artikel 2 der Verordnung vom 23. Dezember 2004 (BGBl. I S. 3758).
- [5] KORA - Handlungsempfehlungen mit Methodensammlung, Natürliche Schadstoffminderung bei der Sanierung von Altlasten. VEGAS, Institut für Wasserbau, Universität Stuttgart, DECHEMA e.V. Frankfurt, ISBN 978-3-89746-092-0
- [6] KORA – TV 1: Wabbels, D., Teutsch G. (2008): Leitfaden Natürliche Schadstoffminderungsprozesse bei mineralöl- kontaminierten Standorten. KORA Themenverbund 1: Raffinerien, Tanklager, Kraftstoffe/Mineralöl, MTBE. ZAG Universität Tübingen, ISBN 978-3-89746-093-9
- [7] KORA – TV 2: Werner, P., Börke, P., Hüfers, N. (2008): Leitfaden Natürliche Schadstoffminderung bei Teerölaltlasten, im BMBF Förderschwerpunkt KORA. Schriftenreihe des Institutes für Abfallwirtschaft und Altlasten, TU Dresden, Band 58 ISBN 978-3-934253-50-6
- [8] KORA –TV 3: Grandel, S., Dahmke, A. (2009) Leitfaden Natürliche Schadstoffminderungsprozesse bei LCKW-kontaminierten Standorten, im BMBF Förderschwerpunkt KORA. Kiel, ISBN 978-3-00-026094-0.
- [9] KORA –TV 4: Luckner, Th., Luckner, L. (2008) Leitfaden Umgang mit abfallablagerungsverursachten Gewässerschäden und Gefahrensituationen unter Berücksichtigung der Wirkungen natürlicher Rückhalte- und Abbau-Prozesse. Schriftenreihe des Dresdner Grundwasserforschungszentrums e.V. und seiner Partner (ISSN 1611-5627, Heft 04/2008).
- [10] KORA –TV 5: Joos, A., Knackmuss, H.-J., Spyra, W. (2008): Leitfaden Natürliche Schadstoffminderung bei sprengstofftypischen Verbindungen, im BMBF-Förderschwerpunkt KORA, Themenverbund 5 Rüstungsaltslasten. IABG mbH (Hrsg.), Berlin, ISBN 978-3-00-025181-8.
- [11] KORA –TV 6: Natürliche Schadstoffminderungsprozesse an Bergbaukippen/-halden und Flussauensedimenten, ISBN 978-3-89746-098-X
- [12] Bundesbodenschutzgesetz (1998): Gesetz zum Schutz vor schädlichen Bodenveränderungen und zur Sanierung von Altlasten, Bundes-Bodenschutzgesetz vom 17. März 1998 (BGBl. I S. 502), zuletzt geändert durch Artikel 3 des Gesetzes vom 9. Dezember 2004 (BGBl. I S. 3214)
- [13] US-EPA, Office of Solid Waste and Emergency Response: Use of Monitored Natural Attenuation at Superfund, RCRA Corrective Action, and Underground Storage Tank Sites. Nr. 9200.4-17P, 1999.
- [14] Länderarbeitsgemeinschaft Wasser (LAWA): Bericht zur „Ableitung von Geringfügigkeitsschwellen für das Grundwasser“. – Stand 30.09.2004
- [15] Probenahme von Grundwasser bei belasteten Standorten, Herausgegeben vom Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft der Schweiz (BUWAL) Bern, 2003.
- [16] FH-DGG (2002): Das Hydrogeologische Modell als Basis für die Bewertung von Monitored Natural Attenuation bei der Altlastenbearbeitung: Ein Leitfaden für Auftraggeber, Ingenieurbüros und Fachbehörden. - Schriftenreihe der Deutschen Geologischen Gesellschaft, Heft 23. Dt. Geologische Gesellschaft. Hrsg.: FH-DGG. Hannover 2002.
- [17] KORA –TV 7: Luckner, Th., Luckner, L. (2008) Leitfaden Systemanalyse, Modellierung und Prognose der Wirkungen natürlicher Schadstoffminderungsprozesse – eine rezente Synopse. Schriftenreihe des Dresdner Grundwasserforschungszentrums e.V. und seiner Partner (ISSN 1611-5627, Heft 05/2008).

- [18] Bund-/Länderarbeitsgemeinschaft Bodenschutz (LABO), Arbeitshilfe „Sickerwasserprognose DU“ (10/2006) mit redaktionellen Anpassungen 12/2008
- [19] DIN 19528, Januar 2009, Elution von Feststoffen, DIN 19529, Januar 2009, Elution von Feststoffen – Schüttelverfahren (DIN 19528+19529 sind derzeit nur für anorganische Stoffe und PAK anzuwenden).
- [20] Geofakten 8, NEUSS, M. & DÖRHÖFER, G. (2009): Hinweise zur Anwendung numerischer Modelle bei der Beurteilung hydrogeologischer Sachverhalte und Prognosen in Niedersachsen. – 3. Aufl., 9 S., 4 Abb.; Hannover.
- [21] Bund-/Länderarbeitsgemeinschaft Bodenschutz (LABO), Arbeitshilfe für Qualitätsfragen bei der Altlastenbearbeitung“ 2002
- [22] Landesamtes für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz NRW (LANUV)-Arbeitshilfe „Hinweise zur Erstellung und Beurteilung von Grundwassermodellen im Altlastenbereich
- [23] Stoffdatenbank: Literaturhinweis [\[48\] der LABO Arbeitshilfe Sickerwasserprognose bei Detailuntersuchungen](#)).
- [24] Schriftenreihe des [Altlastenforum Baden-Württemberg e. V.](#)
- [25] IPV-Tool: <http://www.lubw.baden-wuerttemberg.de/servlet/is/47957/>