

# Handbuch zur Altlastenbehandlung

## Teil 10 – Überwachung



# Handbuch zur Altlastenbehandlung

## Teil 10

### Überwachung

Sächsisches Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie

Stand: April 2024

## Inhalt

### Teil A

<b>1</b>	<b>Einführung</b> .....	<b>8</b>
<b>2</b>	<b>Rechtlicher Rahmen</b> .....	<b>9</b>
2.1	Bodenschutzrecht .....	9
2.2	Wasserrecht .....	10
2.3	Ziel des Handbuchs .....	10
<b>3</b>	<b>Begriffsbestimmungen</b> .....	<b>14</b>
<b>4</b>	<b>Anlass und Zielstellung von Überwachungen</b> .....	<b>17</b>
4.1	Überwachung nach der Orientierenden Untersuchung und der Detailuntersuchung bei unklarer Gefahrenlage .....	18
4.1.1	Überwachung nach Abschluss der Orientierenden Untersuchung .....	18
4.1.2	Überwachung nach Abschluss der Detailuntersuchung .....	18
4.2	Überwachung nach der Sanierungsuntersuchung .....	19
4.3	Überwachung während der Sanierung .....	20
4.4	Überwachung nach der Sanierung (Nachsorge) .....	20
4.5	Überwachung des natürlichen Schadstoffabbaus (MNA) .....	21
<b>5</b>	<b>Überwachung der Wirkungspfade</b> .....	<b>23</b>
5.1	Wirkungspfad Boden → Grundwasser .....	23
5.2	Wirkungspfad Boden → Mensch .....	26
5.3	Wirkungspfad Boden → (Grundwasser) → Oberflächengewässer .....	27
5.4	Wirkungspfad Boden → Nutzpflanze .....	27
<b>6</b>	<b>Vorbereitung der Überwachung</b> .....	<b>28</b>
6.1	Festlegung des Überwachungserfordernisses .....	29
6.2	Beteiligte und deren Zuständigkeiten .....	29
6.3	Organisatorische Festlegungen .....	30
6.4	Bestandsaufnahme/Ortsbegehung .....	31
6.5	Erstellung des Überwachungskonzeptes .....	33
6.6	Erstellung des Überwachungsprogrammes .....	36
6.7	Abstimmung mit der Behörde/Aufgaben und Entscheidungen der Behörde .....	38
<b>7</b>	<b>Durchführung und Auswertung der Ergebnisse eines Überwachungszyklus</b> .....	<b>39</b>
7.1	Durchführung der Überwachung .....	39
7.2	Dokumentation/Auswertung der Überwachung .....	39
7.3	Handlungsoptionen .....	41
7.4	Kontrolle und Qualitätssicherung .....	43
7.5	Aufgaben und Entscheidungen der Behörde .....	45
<b>8</b>	<b>Optimierung und Beendigung von Überwachungsmaßnahmen</b> .....	<b>46</b>
8.1	Optimierung von Überwachungsmaßnahmen .....	46
8.2	Kriterien zur Beendigung von Überwachungsmaßnahmen .....	47
8.3	Aufgaben und Entscheidungen der Behörde .....	50
<b>9</b>	<b>Behördliche Instrumente bei der Überwachung</b> .....	<b>51</b>
	<b>Literaturverzeichnis</b> .....	<b>54</b>

<b>Teil B</b>	<b>Ergänzende Hinweise zur Überwachung</b> .....	60
I	Branchenbezogene relevante Parameter .....	60
II	Hinweise zur Prozess- bzw. Erfolgsüberwachung verschiedener Sanierungsverfahren.	60
II.1	Einleitung .....	60
II.2	Bodensanierungen durch Bodenaustausch .....	60
II.3	Bodenluftsanierungen.....	61
II.4	Grundwassersanierung - Hydraulische Verfahren (Pump-and-Treat-Verfahren).....	61
II.5	Grundwassersanierung - Chemische Verfahren .....	63
II.6	Grundwassersanierung - Mikrobielle Verfahren .....	66
II.7	Grundwassersanierung - Physikalische Verfahren.....	67
II.8	Sicherungsmaßnahmen - Oberflächenabdeckung .....	68
II.9	Sicherungsmaßnahmen - Oberflächenabdichtung .....	69
II.10	Sicherungsmaßnahmen - Vertikale Dichtwände .....	72
II.11	Sicherungsmaßnahmen - Funnel-and-Gate und Reaktive Wände .....	75
II.12	Überwachung von NA-Prozessen.....	79
III	Spezielle Hinweise zur Vorbereitung einer Überwachung.....	84
III.1	Messnetz Grundwasser .....	84
III.2	Messnetz Oberflächenwasser.....	89
III.3	Messnetz Bodenluft .....	90
III.4	Analysenparameter .....	91
III.5	Überwachungszyklus.....	94
IV	Spezielle Hinweise zur Auswertung der Ergebnisse eines Überwachungszyklus.....	98
V	Spezielle Hinweise zur Optimierung und Beendigung von Überwachungsmaßnahmen.....	106
VI	Datenerhebung und Datenerfassung.....	111
VI.1	Datenerfassung als Grundlage der Informationsbereitstellung.....	111
VI.2	Austauschdatenformate.....	113
VI.3	Soft- und Hardwarenutzung bei der Datenerfassung .....	113
VI.4	Datenverwaltung.....	114
VI.5	Relationale Datenbank vs. Microsoft Excel .....	116
VI.6	Führendes System .....	116
VI.7	Mehrdimensionale Daten.....	116
VI.8	Datensicherheit .....	117
VII	Checkliste zur Standortbegehung im Rahmen der Überwachung .....	119
VIII	Trendanalysen.....	120
VIII.1	Für die Trendanalysen erforderliche Datenstruktur .....	123
VIII.2	Statistische Verfahren .....	123

## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Einordnung der Überwachung in die stufenweise Altlastenbehandlung .....	11
Abbildung 2: Prinzipieller Ablauf der Überwachung mit Kapitelangabe .....	13
Abbildung 3: Korrelation der Quellenarchitektur mit der Geometrie der Schadstofffahne [94].....	25
Abbildung 4: schematische Darstellung der Konzentrationsänderungen in der Fahne abhängig von der Quellensanierung [33], [50].....	34
Abbildung 5: Abhängigkeit der Beprobungshäufigkeit von verschiedenen Einflussfaktoren .....	38
Abbildung 6: Fließbild typischer behördlicher Tätigkeiten bei der Überwachung.....	52
Abbildung 7: Typisches Messnetz bei Pump-and-Treat-Verfahren .....	63
Abbildung 8: Typisches Messnetz bei ISCO-Verfahren (einschließlich Infiltrationsbrunnen).....	64
Abbildung 9: Prinzip einer mittels Dichtwand gesicherten Kontamination [54] .....	72
Abbildung 10: Strömungslinien und mögliche Anordnung von Überwachungsmessstellen bei einer mittels Umschließung gesicherten Kontamination.....	74
Abbildung 11: Anordnung von Überwachungsmessstellen (Aufsicht) (A: im Umfeld einer vollflächigen reaktiven Wand, B: im Umfeld eines Funnel-and-Gate, C (Detail von B): innerhalb des Reaktors (Gate) und im nahen Umfeld) [67].....	78
Abbildung 12: Anordnung von Grundwassermessstellen einer flächigen Überwachung zur Erfassung der Schadstofffahne (Aufsicht) [35].....	87
Abbildung 13: Mögliche Anordnung von drei Transekten ( $T_0$ , $T_1$ , $T_2$ ) in einer Schadstofffahne im Rahmen einer Überwachung mittels Kontrollebenen [35].....	89
Abbildung 14: Schema einer Überwachung der Bodenluft.....	90
Abbildung 15: Wirksamkeit des Rebound-Effekts .....	97
Abbildung 16: Mittels Kriging berechnete Schadstoffverteilung unter Verwendung aller Messpunkte (A), unter Vernachlässigung von Messstellen I (B) und zusätzlich von J (C) (nach [13], verändert) .....	100
Abbildung 17: Flussschema der Datenerfassung .....	112
Abbildung 18: Datenflussschema bei der Bearbeitung einer Überwachung.....	115
Abbildung 19: Grafische Auswertung eines Konzentrationsverlaufstrends einschließlich einer Anpassungskurve 2. Grades (rot gestrichelte Linie).....	120
Abbildung 20: Veranschaulichung von möglichen Konzentrationstrends (in Anlehnung an [63]) .....	121
Abbildung 21: Nach der Methode der kleinsten Quadrate entwickelte Regressionsgerade .....	126
Abbildung 22: Datenreihe mit verschiedenen Ausgleichslinien (oben polynomisch, unten linear) ....	127
Abbildung 23: Zentrierte gleitende Mittelwerte der Breite 3 im Vergleich zum Originalsignal .....	128

## Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Überwachungsmaßnahmen im Rahmen der systematischen Altlastenbehandlung (HB... Handlungsbedarf).....	17
Tabelle 2:	Vorbereitung einer Überwachung .....	28
Tabelle 3:	Fallbetrachtungen zur Beendigung einer Überwachung.....	49
Tabelle 4:	Überwachung einer Oberflächenabdichtung (in Anlehnung an [57] gemäß Teil A, 10)	69
Tabelle 5:	Fahrenverhalten in Abhängigkeit vorangegangener Sanierungsmaßnahmen .....	86
Tabelle 6:	Ökotoxikologische Testverfahren.....	93
Tabelle 7:	Bewertungsvorschläge auf Grundlage ökotoxikologischer Testverfahren [36].....	94
Tabelle 8:	Richtwerte der Einflussfaktoren für die Festlegung des Probenahmeturnus.....	96

## Abkürzungsverzeichnis

AKW	Aromatische Kohlenwasserstoffe, hier BTEX
ALF	Altlastenflächen
ALVF	altlastenverdächtige Flächen
BBergG	Bundesberggesetz
BBodSchG	Bundes-Bodenschutzgesetz
BBodSchV	Bundes-Bodenschutz- und Altlastenverordnung
BImSchG	Bundes-Immissionsschutzgesetz
BTEX	Benzol, Toluol, Ethylbenzol, Xylol
cDCE	cis-1,2-Dichlorethen
DepV	Deponieverordnung
DNAPL	Schwerphase (dense non aqueous phase liquid)
DOC	Gelöster organischer Kohlenstoff (dissolved organic carbon)
DU	Detailuntersuchung
ENA	initiiertes, stimuliertes oder unterstütztes natürliches Schadstoffabbau (Enhanced Natural Attenuation)
FIS	Fachinformationssystem
GrwV	Grundwasserverordnung
HB	Handlungsbedarf
ISCO	In-situ chemische Oxidation
KORA	Kontrollierter natürlicher Rückhalt und Abbau von Schadstoffen
KrWG	Kreislaufwirtschaftsgesetz
LCKW	Leichtflüchtige chlorierte Kohlenwasserstoffe
LNAPL	Leichtphase (light non aqueous phase liquid)
LTM	Langzeitüberwachung (long-term monitoring)
LTMO	Optimierung der Langzeitüberwachung (long-term monitoring optimization)
MNA	Überwachter natürlicher Schadstoffabbau (Monitored Natural Attenuation)
NA	natürlicher Schadstoffabbau (Natural Attenuation)
OGewV	Oberflächengewässerverordnung
OU	Orientierende Untersuchung
PCB	Polychlorierte Biphenyle
SächsWG	Sächsisches Wassergesetz
SALKA	Sächsisches Altlastenkataster
SAN	Sanierung
SU	Sanierungsuntersuchung
Ü	Überwachung
TRGS	Technische Regeln für Gefahrstoffe
US EPA	Amerikanische Umweltbehörde (United States Environmental Protection Agency)
VC	Vinylchlorid
vSZW	Vorläufige Sanierungszielwerte
WHG	Wasserhaushaltsgesetz

# Teil A

## 1 Einführung

Die Reihe „Handbuch zur Altlastenbehandlung“ des Freistaates Sachsen bestand bislang aus den Teilen 1 bis 9 und umfasst die Themen Grundsätze, Erfassung, stufenweise Gefährdungsabschätzungen der verschiedenen Umweltmedien, Sanierungsuntersuchung und Sanierung. Der hier vorliegende Teil 10 „Überwachung“ vervollständigt die Handbuchreihe. Er wurde auf der Grundlage der durch das LfULG beauftragten Arbeiten an die Arcadis Germany GmbH erstellt.

Dieses Handbuch ist kein Rechtskommentar, sondern als Arbeitshilfe konzipiert.

Das Handbuch hat die für den Vollzug relevanten Aspekte der Überwachung zum Inhalt, wobei diese in den Kontext der stufenweisen Altlastenbearbeitung eingeordnet werden. Der Begriff der Überwachung wird in diesem Handbuch wie folgt definiert:

- wiederholte Beprobungen zur Zustandskontrolle (Beobachtung),
- wiederholte Beprobungen zum Prozessverständnis (Monitoring),
- wiederholte Prüfung und ggf. Wiederherstellung der Funktionsfähigkeit technischer Sanierungselemente,
- Kontrolle des natürlichen Schadstoffabbaus (MNA),
- wiederholte Prüfung von Randbedingungen mit Einfluss auf die Gefahrenlage ohne Probe-  
nahme/Analytik (organisatorische Überwachung).

Schwerpunkte dieses Handbuches sind die Darstellung methodischer Grundlagen zur Durchführung der unterschiedlichen Überwachungsmaßnahmen, Empfehlungen zur Optimierung der Überwachung sowie Kriterien zur Beendigung. Betrachtet wird die Überwachung von:

Altlasten während einer Sanierung bzw. vor der Sanierung, sofern eine Überwachung erforderlich ist,

- sanierten Altlasten, bei denen nach Durchführung einer Sanierung aufgrund eines noch verbliebenen Schadstoffpotenzials Überwachungsmaßnahmen notwendig sind oder die Wirksamkeit von Sicherungsmaßnahmen nachgewiesen werden soll,
- natürliche Selbstreinigung (MNA) im Fall von teilsanierten Altlasten oder im Ausnahmefall von Altlasten ohne erfolgter Sanierung,
- Schutz- und Beschränkungsmaßnahmen,
- Ausnahmefall: Überwachung von altlastverdächtigen Flächen, wenn nach einer Erkundungsstufe noch eine unklare Gefahrenlage besteht und Überwachungsmaßnahmen notwendig sind, um eine Entscheidung über den weiteren Handlungsbedarf zu treffen.

Ausschließlich zum Zweck der besseren Lesbarkeit wird auf die geschlechtsspezifische Schreibweise verzichtet. Alle personenbezogenen Bezeichnungen in diesem Handbuch sind somit geschlechtsneutral zu verstehen.

## 2 Rechtlicher Rahmen

### 2.1 Bodenschutzrecht

Im Bundes-Bodenschutzgesetz (BBodSchG) und der Bundes-Bodenschutz- und Altlastenverordnung (BBodSchV) werden die Anforderungen an die Erfassung, Untersuchung, Bewertung, Sanierung und Überwachung von Altlasten und altlastenverdächtigen Flächen geregelt. Die hier vorliegende Arbeitshilfe wurde auf Grundlage der BBodSchV unter Beachtung der Novellierung von 2023 erstellt. Laut § 4 (3) BBodSchG sind Boden, Altlasten und durch schädliche Bodenveränderungen oder Altlasten verursachte Verunreinigungen von Gewässern „so zu sanieren, dass dauerhaft keine Gefahren, erheblichen Nachteile oder erheblichen Belästigungen für den Einzelnen oder die Allgemeinheit entstehen.“ Um das Sanierungsziel nach Bodenschutzrecht zu erreichen, kann im Rahmen der stufenweisen Bearbeitung eine Überwachung während oder nach den Bearbeitungsstufen *Orientierende Untersuchung*, *Detailuntersuchung*, *Sanierungsuntersuchung* und *Sanierung* (vgl. Abschnitte 4.1 – 4.4) sowie bei zeitlichen Maßnahmenverschiebungen notwendig werden (vgl. Handbuch der Altlastenbehandlung Teil 1 - „Grundsätze“). Für die Bearbeitungsstufe der Sanierungsuntersuchung ist in § 16 (2) BBodSchV ausdrücklich geregelt, dass die Wirkungsdauer der in Betracht kommenden Maßnahmen und Maßnahmenkombinationen und ihre Überwachungsmöglichkeiten zu prüfen und miteinander zu vergleichen sind. Die Art und Dauer der Überwachung ist von verschiedenen Faktoren, u. a. von den gewählten Sanierungsmaßnahmen, abhängig. Bei Beendigung der Überwachung muss sichergestellt sein, dass eine Gefahrenlage nach § 4 (3) BBodSchG für den Einzelnen oder die Allgemeinheit ausgeschlossen ist oder nicht mehr erwartet werden kann. Über die Beendigung einer Überwachung entscheidet die zuständige Behörde.

Altlasten und altlastenverdächtige Flächen unterliegen - soweit erforderlich - nach § 15 Absatz 1 BBodSchG der behördlichen Überwachung.

Die Durchführung von Eigenkontrollmaßnahmen durch bodenschutzrechtlich Verpflichtete - insbesondere Boden- und Wasseruntersuchungen sowie die Einrichtung und der Betrieb von Messstellen - kann die zuständige Behörde nach § 15 Absatz 2 BBodSchG, soweit erforderlich, beim Vorliegen von Altlasten auf Grundlage von § 15 Absatz 1 verlangen. Die Anordnung von Eigenkontrollmaßnahmen steht im Ermessen der Behörde. Im Rahmen der Ermessensausübung muss die Behörde den Verhältnismäßigkeitsgrundsatz beachten, d. h. die Eigenkontrollmaßnahmen müssen geeignet, erforderlich und angemessen sein. Eigenkontrollmaßnahmen können auch nach der Durchführung von Dekontaminations-, Sicherungs- und Beschränkungsmaßnahmen angeordnet werden und sind auf Verlangen der zuständigen Behörde durch einen Sachverständigen nach § 18 BBodSchG durchzuführen.

Wird ein Sanierungsplan aufgestellt, sind die Eigenkontrollmaßnahmen nach § 16 (4) Punkt 5 BBodSchV im Sanierungsplan darzustellen. Die Ergebnisse der Eigenkontrollmaßnahmen sind durch den Verpflichteten mindestens fünf Jahre, gegebenenfalls auf Anordnung auch länger, aufzubewahren (§ 15 (2) Sätze 2 und 3 BBodSchG) und auf Verlangen der zuständigen Behörde mitzuteilen (§ 15 (3) Satz 1 BBodSchG). Die verlangten Ergebnisse der Eigenkontrollmaßnahmen und die Ergebnisse behördeninterner Überwachungsmaßnahmen sind fünf Jahre aufzubewahren (§ 15 (3) Satz 2 BBodSchG).

Erfolgt die Sanierung durch Sicherungsmaßnahmen, muss ihre Wirksamkeit nach § 17 (3) Satz 2 BBodSchV gegenüber der zuständigen Behörde belegt und über einen bestimmten Zeitraum überwacht werden, da die Schadstoffe im Boden verbleiben und bei Nachlassen der Sicherungswirkung erneut Gefahren entstehen können.

Die Eigentümer betroffener Grundstücke, sonstige betroffene Nutzungsberechtigte und die betroffene Nachbarschaft sind von den zur Untersuchung und der Sanierung der Altlast Verpflichteten von der bevorstehenden Durchführung der geplanten Maßnahmen einschließlich der geplanten Überwachungsmaßnahmen nach Maßgabe von § 12 BBodSchG zu informieren. Für die Aufrechterhaltung der Sicherungs- und Überwachungsmaßnahmen in der Zukunft kann die zuständige Behörde nach § 10 (1) Satz 2 BBodSchG vom Verpflichteten die Leistung einer Sicherheit verlangen.

Nicht Bestandteil dieses Handbuches ist die Bodenkundliche Baubegleitung nach § 4 Absatz 5 BBodSchV. Die damit verbundenen Kontroll- und Überwachungsmaßnahmen sind in der DIN 19639 sowie diversen Handlungsleitfäden der Bundesländer erläutert.

## 2.2 Wasserrecht

Bei Überwachungsmaßnahmen nach Bodenschutzrecht sind die Regelungen des Wasserhaushaltgesetzes (WHG) zum Erfordernis von Erlaubnis oder Bewilligung (§ 8 WHG) bei der Benutzung von Gewässern (§ 9 WHG, insbesondere Entnehmen, Zutagefördern, Zutageleiten und Ableiten von Grundwasser, Aufstauen, Absenken, Umleiten von Grundwasser durch Anlagen, die hierfür bestimmt oder geeignet sind) zu beachten.

Nach § 4 Absatz 4 Satz 3 BBodSchG bestimmen sich die bei der Sanierung von Gewässern zu erfüllenden Anforderungen nach dem Wasserrecht. Dabei kommt nicht das gesamte Wasserrecht zur Anwendung, sondern nur die Vorschriften, die der Gefahrenabwehr dienen, da der Verweis auf das Wasserrecht nicht losgelöst von dem Sanierungsziel Gefahrenabwehr betrachtet werden kann. Zur Festlegung des wasserrechtlich geforderten Sanierungsumfangs gehört auch die sanierungsbegleitende Überwachung. Die Überwachung der Grundwasserkörper und der Gewässer nach WHG in Umsetzung der EU-Wasserrahmenrichtlinie ist nicht Gegenstand des vorliegenden Handbuches.

## 2.3 Ziel des Handbuches

Die Einordnung der Überwachung in die stufenweise Altlastenbearbeitung ist in Abbildung 1 dargestellt. Ziel dieses Handbuches ist die Vorgabe eines methodischen Leitfadens für Überwachungsmaßnahmen bei der Altlastenbearbeitung für zuständige Behörden, Gutachter und Verpflichtete. Die Überwachung im Altlastenbereich ist nach [46] eine wissenschaftlich begründete, fortlaufende Beobachtung bzw. Messung ausgewählter dynamischer Prozessgrößen. Unter Verwendung der in der Vergangenheit erzielten Erkenntnisse zu den Prozessgrößen und deren Veränderungen mit darauf aufbauendem Prozessverständnis (Epignose) kann eine Prognose der zukünftig zu erwartenden Änderungen erstellt werden. Die Überwachung geht also über eine reine Beobachtung hinaus und erfordert die Auswertung und Interpretation der Messergebnisse sowie eine Reaktion auf die daraus gewonnenen Erkenntnisse. Da in der Altlastenbearbeitung das Verständnis der im Untergrund ablaufenden Prozesse stetig zunimmt, ist es erforderlich, dies bei den abzuleitenden Überwachungsprogrammen in besonderem Maße zu berücksichtigen.

In Abhängigkeit von der Aufgabenstellung, den zuvor getroffenen Maßnahmen und der Zielrichtung der Überwachung ergeben sich unterschiedliche fachliche Anforderungen an die **Vorbereitung, Durchführung und Auswertung der Überwachung**. Auf der Grundlage repräsentativer Messstellen (*wo?*), relevanter Parameter (*was?*) und qualitätsgerechter Beprobungen (*wie?*) sind Auswertungen hinsichtlich der Änderung der Gefahrenlage vorzunehmen und die Notwendigkeit eines weiteren Handlungsbedarfs abzuleiten.

# Altlastenbehandlung nach Bundesbodenschutzrecht - Regelablauf -

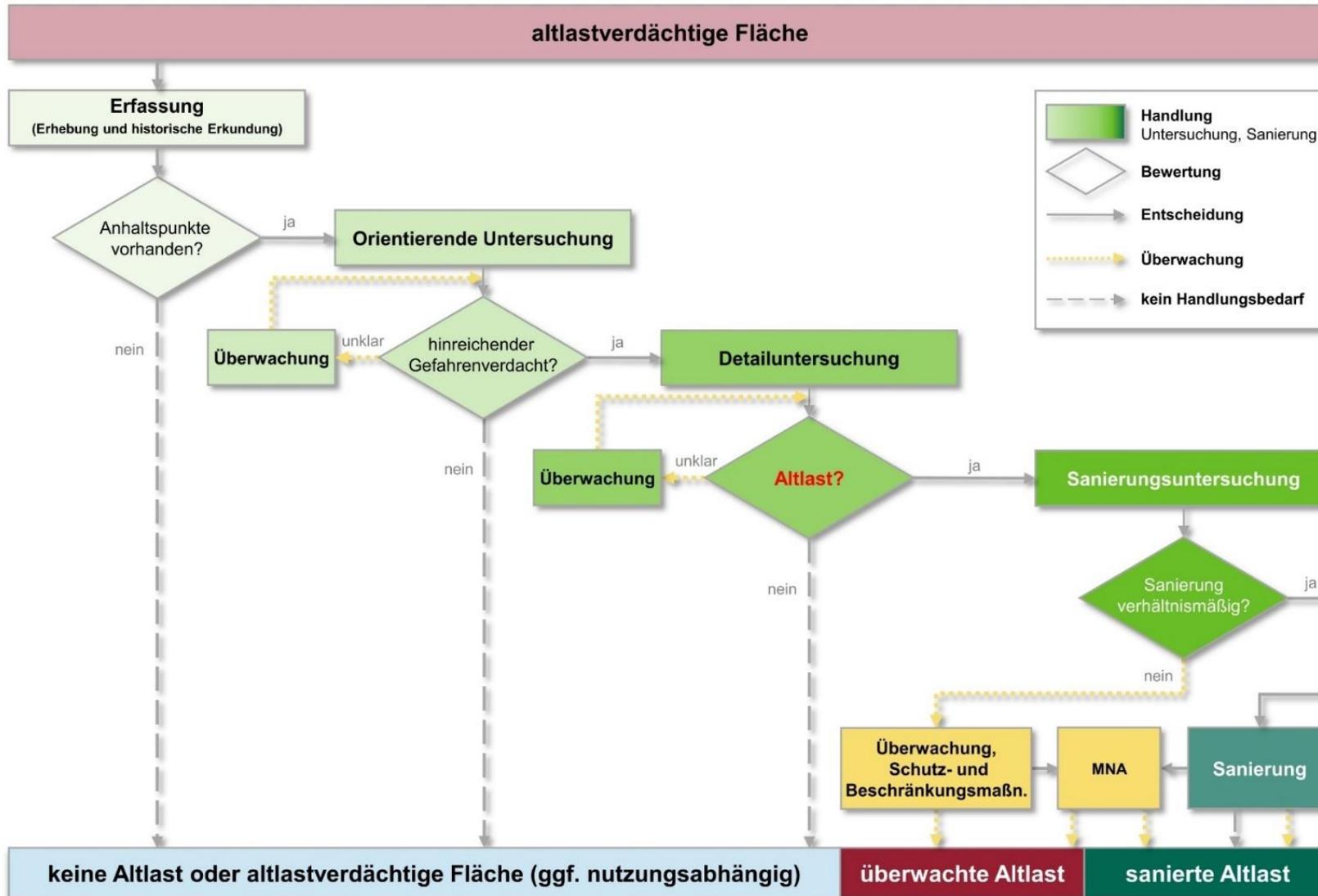


Abbildung 1: Einordnung der Überwachung in die stufenweise Altlastenbehandlung

Die Ergebnisse sollen dabei vor allem Auskunft geben über räumliche und zeitliche Änderungen in der aktuellen Schutzgutbelastung und damit auch über die Effektivität ggf. bereits durchgeführter Maßnahmen.

Gerade bei langlaufenden Überwachungsmaßnahmen, bei denen in überschaubaren Zeiträumen eine Änderung der Situation nicht zu erwarten ist und keine aktiven Maßnahmen mehr erfolgen, ist dies erforderlich.

Dies betrifft, auch unter Berücksichtigung der Verhältnismäßigkeit, die Häufigkeit der Probenahme und die zu untersuchenden Umweltmedien. Es ist neben den gegenwärtig bereits in der Überwachung befindlichen Flächen wahrscheinlich, dass nach den noch in der Altlastenbearbeitung befindlichen Standorten die Zahl der Flächen mit Überwachungsbedarf weiter steigen wird.

Der weitaus größte Überwachungsbedarf ergibt sich bezüglich des Grundwassers. Es ist ein empfindliches, kaum sichtbares, häufig betroffenes und auch hinsichtlich der Ausbreitung relevantes Schutzgut. Ein zu spät erkannter Grundwasserschaden kann gravierende Konsequenzen haben. Gleichzeitig sind Grundwasserüberwachungen oft komplex und erfordern ein hohes Maß an Sachkenntnis [11]. Das Handbuch fokussiert deshalb auf solche Überwachungssituationen, insbesondere nach erfolgten Sicherungsmaßnahmen, enthält aber auch Hinweise für andere relevante Wirkungspfade.

Wegen der Komplexität der Maßnahme „Überwachung“ ist es nicht möglich, in diesem Handbuch für jeden Fall ein detailliertes Überwachungsprogramm anzugeben. Vielmehr soll das vorliegende Handbuch die für die Überwachung erforderlichen Werkzeuge und beeinflussenden Parameter aufzeigen.

Oft sind für den Inhalt und Umfang des Überwachungsprogramms nicht nur technische Lösungen von Bedeutung, sondern es müssen auch sozioökonomische Aspekte wie Stadtentwicklungen, öffentliche Kommunikation, finanzielle und rechtliche Aspekte, Zeit, verfügbarer Raum sowie die Interessen aktiver und passiver Akteure berücksichtigt werden. Die Ausgestaltung des zu erarbeiteten Überwachungsprogramms muss nachvollziehbar begründet und mit allen relevanten Beteiligten abgestimmt werden. Im Folgenden wird der Rahmen für die grundsätzlichen Anforderungen und Arbeitsschritte einer Altlastenüberwachung dargestellt. Dieser bietet die Möglichkeit einer praxisnahen Handhabung und trägt dem Ermessensspielraum im Einzelfall Rechnung.

Das vorliegende Handbuch ist in zwei Teile untergliedert:

Der **Teil A** enthält Grundsätze zur Überwachung von Altstandorten und Altablagerungen. Abbildung 2 stellt den Ablauf der Überwachung und dessen Gliederung in Teil A dar.

Der **Teil B** enthält unterschiedliche Arbeitshilfen zur Überwachung von Schutzgütern, zu relevanten Parametern, zur Wasserhaushaltsbilanz und Trendanalysen.

**Nicht Gegenstand** des vorliegenden Handbuchteils sind grundsätzliche bzw. detailliertere Angaben zu Probenahmen, Analytik, zu technischen Überwachungseinrichtungen und zur Qualitätssicherung der Einzelschritte der Altlastenbearbeitung. Außerdem werden Überwachungen nach Abfallrecht, Strahlenschutzrecht und Wasserrahmenrichtlinie (WRRL) nicht betrachtet.



Abbildung 2: Prinzipieller Ablauf der Überwachung mit Kapitelangabe

### 3 Begriffsbestimmungen

**Eigenkontrollmaßnahmen** umfassen die Erarbeitung und Abstimmung eines geeigneten Programms (ggf. im Rahmen eines Sanierungsplanes), dessen Durchführung sowie die Dokumentation, Auswertung und Interpretation der Ergebnisse durch den Verpflichteten. Er muss sie der zuständigen Behörde auf Verlangen vorlegen. Eigenkontrollmaßnahmen nach einer Sanierung dienen dazu, die langfristige Wirksamkeit der durchgeführten Sanierungsmaßnahme, d. h. die Einhaltung der festgelegten Sanierungsziele, zu prüfen und sicherzustellen (z. B. durch Funktionskontrollen von Bauwerken und Anlagen).

**Funktionskontrollen** sind Teile der Nachsorge und dienen der Überprüfung der Sicherungssysteme und Anlagen zur dauerhaften Einhaltung der Sicherungsfunktion. Dazu sind ein ordnungsgemäßer Betrieb, die Unter- und Erhaltung einschließlich notwendiger Reparaturen der Anlagen erforderlich. Im vorliegenden Handbuch beschränken sich die Funktionskontrollen auf Maßnahmen wie Dichtigkeitsmessungen an Oberflächenabdichtungen oder Dichtwänden, Kalibrierung und Funktionskontrolle messtechnischer Einrichtungen, Durchführung der Mahd und des Entferns von ungeeignetem Bewuchs etc.

Der Begriff **Kontrollwert** wird in diesem Handbuch als Synonym für Werte verwendet, die bei Überwachungsmaßnahmen von der Bodenschutzbehörde festgelegt oder zwischen der Behörde und dem nach § 4 BBodSchG zur Sanierung Verpflichteten vereinbart werden. Sofern am Standort Sanierungszielwerte festgelegt wurden, sind die Kontrollwerte häufig mit diesen identisch bzw. von diesen abgeleitet. Als Kontrollwert wird eine maximale Konzentration verstanden, die für einen Schadstoff (oder eine Schadstoffgruppe) standortspezifisch und nutzungsabhängig ermittelt und festgelegt wird [67]. Bei deren Überschreitung können entsprechende Maßnahmen notwendig werden.

Bei der **Mineralisierung** erfolgt die natürliche Freisetzung chemischer Elemente aus organischen Verbindungen und deren Einbau in anorganische Verbindungen.

**MNA** (*Monitored Natural Attenuation*) bezeichnet die Überwachung der Wirksamkeit von natürlichen Schadstoffminderungsprozessen, die ohne menschliches Eingreifen zu einer Verringerung der Masse, des Volumens, der Fracht, der Konzentration, der Toxizität oder der Mobilität eines Schadstoffes im Boden oder im Grundwasser führen. Analog dem Sanierungszielwert bei Sanierungsmaßnahmen wird im Falle der Anwendung von MNA der zu erreichende Zielwert Maßnahmenzielwert genannt (vgl. [50]).

**Nachsorge** umfasst die Überwachung von Umweltmedien (z. B. Bodenluft, Grund- oder Oberflächenwasser) sowie die Gewährleistung und Kontrolle der Funktionsfähigkeit von Sicherungssystemen. Sie findet i. d. R. nach Abschluss einer Sanierungsmaßnahme oder Sanierungsteilleistung statt, wenn sich die veränderten hydraulischen, chemischen und biogeochemischen Verhältnisse auf einen durch die Maßnahmen nicht mehr beeinflussten Zustand (vgl. Rebound) zurückgebildet haben.

Nachsorgemaßnahmen werden immer dann erforderlich, wenn aufgrund verbliebener Schadstoffpotenziale nach der Sanierung eine langfristige Instandhaltung der Sanierungsbauwerke und -anlagen und/oder eine Überwachung der Wirkungspfade notwendig sind.

Bei Sicherungssystemen beginnt die Nachsorgephase unmittelbar nach der Vollendung und Abnahme eines Sicherungssystems (Dichtwand, Oberflächenabdichtung o. ä.). Hier verbleibt das Schadstoffinventar dauerhaft im Untergrund. Es steht die langfristige Überwachung der Wirkungspfade gemäß § 2 Nr. 13 BBodSchV sowie der Funktionsfähigkeit der Bauwerke und Anlagen im Vordergrund der Nachsorge. Ge-

nerell werden im BBodSchG Regelungen zur Überwachung, Nachsorge und durchzuführenden Eigenkontrollmaßnahmen getroffen. Nach § 15 Abs. 2 BBodSchG können Überwachungsmaßnahmen angeordnet werden, deren Anforderungen in § 16 BBodSchV geregelt sind.

Der in diesem Handbuch verwendete Begriff der Nachsorge bezieht sich auf o. g. Regelungen des BBodSchG und der BBodSchV. Er ist im betrachteten Zusammenhang der Altlastenbearbeitung nicht mit dem Nachsorgebegriff aus dem Abfallrecht (KrWG; DepV) gleichzusetzen.

Eine **organisatorische Überwachung** ist eine Überwachung von Randbedingungen (ohne Probenahme/Analytik) durch die Behörde oder den Eigentümer, die zu einer Änderung der Gefahrenlage bei Altlasten oder altlastenverdächtigen Flächen führen können. Bei den Änderungen von relevanten Randbedingungen kann es sich um Nutzungsänderungen oder aktive Maßnahmen im Bereich kontaminierter Standorte (z. B. Wasserentnahmen) handeln. Flächen, die im Sächsischen Altlastenkataster mit „Belassen“ eingestuft wurden, bedürfen einer organisatorischen Überwachung.

Ein **Rebound** im Altlastenbereich ist ein Wiederanstieg der Schadstoffkonzentrationen im Grundwasser oder der Bodenluft nach Abschluss aktiver Sanierungsmaßnahmen. Ursache dafür sind verschiedene Effekte, z. B. die Desorption bodengebundener Schadstoffe, die Rückdiffusion von Schadstoffen aus gering durchlässigen Bereichen oder die Verflüchtigung von Schadstoffresidualphasen. Da die gelösten oder gasförmigen Schadstoffe nicht mehr aktiv entfernt werden, steigt deren Konzentration.

Unter der **Retardation** (Verzögerung) versteht man die verringerte Transportgeschwindigkeit von Stoffen durch Sorptionsvorgänge im Untergrund (z. B. gegenüber Wasser). Die Retardation ist stoffspezifisch und wird in Form eines Retardationsfaktors angegeben. So breiten sich als Gemisch eingetragene Schadstoffe im Untergrund unterschiedlich schnell aus, so dass es zu einer Schadstoffauftrennung kommen kann.

Ein **Sanierungsaudit** bezeichnet nach [42] die Überprüfung einer laufenden Sanierungsmaßnahme bzw. eines Sanierungsvorhabens. Dies betrifft insbesondere langlaufende hydraulische Maßnahmen (Pump-and-Treat), bei denen absehbar ist, dass das Sanierungsziel in den nächsten Jahren nicht erreicht wird. Das Sanierungsaudit kann in regelmäßigen Abständen (z. B. nach jeweils 5 Jahren) oder anlassbezogen erfolgen. Es kann eine Aktualisierung der vorliegenden Information zur Schadstoffsituation (Frachten, Verteilung), Gefährdungslage aber auch eine Prüfung der Verhältnismäßigkeit oder eine Anpassung der Sanierungsziele bzw. Sanierungszielwerte vorgenommen werden. Im Ergebnis der Bewertung kann es zur Fortführung der bestehenden Sanierung, einer Optimierung der bestehenden Sanierung, der Fortführung der Sanierung mit einer anderen Sanierungsmethode oder zur (vorläufigen) Beendigung kommen.

Der **Sanierungszielwert** stellt die anzustrebende (Rest-)Schadstoffkonzentration bzw. -menge im Boden, im Wasser oder in der Luft für ein Sanierungsziel dar. Der Sanierungszielwert ist stets einzelfallbezogen anzugeben. **Vorläufige Sanierungszielwerte** (vSZW) sind im Rahmen der Detailuntersuchung ebenfalls einzelfallbezogen festzulegen. Vorliegende, stoffbezogene **Geringfügigkeitsschwellenwerte** (GFS-Werte) der jeweils aktuellen LAWA-Empfehlung sind nicht synonym als vSZW oder Überwachungsziele zu verwenden.

Unter der **Solubilisierung** versteht man die Erhöhung der Löslichkeit eines Stoffes in einem Lösungsmittel.

Die **Tolerierbarkeit einer Grundwasserverunreinigung** bezeichnet die Schadstoffkonzentration bzw. Menge/Fracht, bis zu der keine Maßnahmen zur Gefahrenabwehr erforderlich sind. Die Tolerierbarkeit ist im Einzelfall zu prüfen (vgl. Kapitel 8.2).

Das **Überwachungskonzept** stellt die organisatorische und fachliche Grundlage der durchzuführenden Maßnahme dar und beschreibt die inhaltlichen Maßnahmen sowie Randbedingungen/Verantwortlichkeiten zur Überwachung einer Altlast/altlastenverdächtigen Fläche und deren zeitliche Einordnung von der Vorbereitung bis zur Auswertung/Dokumentation.

Das **Überwachungsprogramm** ist Teil des Überwachungskonzepts und beinhaltet die konkreten technischen und analytischen Leistungen sowie die einzuhaltenden fachlichen und gesetzlichen Vorgaben zur Überwachung einer Altlast/altlastenverdächtigen Fläche.

Als **Überwachungszyklus** bezeichnet man eine festgelegte Zeitspanne, in der wiederkehrende Überwachungen von altlastverdächtigen Flächen und Altlasten erfolgen. Der nach Abschluss eines Überwachungszyklus erarbeitete Ergebnisbericht wird von der zuständigen Behörde bewertet. Diese entscheidet über das weitere Vorgehen. Die Entscheidung kann zum Abschluss der Überwachung, zur Festlegung eines weiteren Überwachungszyklus oder zu einer Anpassung des Überwachungszyklus führen. Ziel der Festlegung von Überwachungszyklen ist eine Eingrenzung der im Einzelnen durchzuführenden Maßnahmen und Beprobungen auf einen zunächst überschaubaren Zeitraum und damit eine größere planerische Sicherheit [67].

Eine Überwachung kann in Abhängigkeit von der Zielstellung unterschiedliche Inhalte haben. Es ist dabei zwischen der **informationsorientierten** und **prozessorientierten** Überwachung zu unterscheiden. Die informationsorientierte Überwachung dient dem Erkenntnisgewinn, der Dokumentation der Entwicklung und der Beweissicherung als Grundlage für eine Entscheidung zum weiteren Vorgehen. Die prozessorientierte Überwachung (insbesondere bei MNA) dient dem Verständnis der ablaufenden hydrogeochemischen und mikro-biologischen Prozesse als Grundlage für den Nachweis des Schadstoffabbaus und den Ausschluss der Gefährdung (vgl. [22]). Bei der Bearbeitung kleinerer Altlastenfälle ist oftmals eine ausschließlich informationsorientierte Überwachung ausreichend, wohingegen bei größeren, komplexen Altlasten ein vertieftes Prozessverständnis erforderlich ist und somit Maßnahmen der prozessorientierten Überwachung zum Einsatz kommen.

## 4 Anlass und Zielstellung von Überwachungen

Grundsätzliches Ziel von Überwachungsmaßnahmen im Rahmen der Altlastenbehandlung ist das Erkennen von relevanten Veränderungen und daraus ggf. resultierender Gefahr und die Entscheidung zum weiteren Vorgehen. Tabelle 1 gibt einen Überblick über relevante Anlässe und Ziele von Überwachungsmaßnahmen in den verschiedenen Stufen der Altlastenbehandlung.

Sofortmaßnahmen zur Gefahrenabwehr bzw. Schutz- und Beschränkungsmaßnahmen (§ 2 Abs. 8 BBodSchG) können generell in jeder Bearbeitungsstufe angeordnet werden. Deren Einhaltung ist zu kontrollieren und zu dokumentieren. Im vorliegenden Handbuch wird darauf nicht detailliert eingegangen.

**Tabelle 1: Überwachungsmaßnahmen im Rahmen der systematischen Altlastenbehandlung (HB...Handlungsbedarf)**

Stufe	HB	Anlass	Zielstellung
Nach OU	Ü	Ausnahmefall: Die im Rahmen der Amtsermittlung gewonnenen Erkenntnisse genügen noch nicht zur Bestätigung oder des Ausschlusses eines hinreichenden Gefahrenverdachts	Überwachung der weiteren Entwicklung der Schadstoffausbreitung als Grundlage der Entscheidung zum weiteren Vorgehen (DU ja/nein) und Abschluss der Amtsermittlung
Nach DU	Ü	Ausnahmefall: eine Gefahr konnte für die relevanten Schutzgüter aufgrund des derzeitigen Kenntnisstandes noch nicht bestätigt oder ausgeschlossen werden	Überwachung der weiteren Entwicklung der Schadstoffausbreitung als Grundlage der Entscheidung zum weiteren Vorgehen (Altlast ja/nein)
	Ü	tolerabler Grundwasserschaden	Überwachung des tolerablen Grundwasserschadens zur Vermeidung nichttolerabler Schäden und Gefährdungen von Schutzgütern
	SU	Gefahr wurde bestätigt, keine Sofortmaßnahmen notwendig aufgrund der Sachlage ist eine zeitnahe Sanierungsuntersuchung/ Sanierung nicht möglich	Überwachung der Gefahr bzw. des festgestellten Schadens, um weitere Gefährdungen von Schutzgütern zu vermeiden, ggf. Kontrolle von Schutz- und Beschränkungsmaßnahmen
Nach SU	Ü	Sanierungsmaßnahmen sind unverhältnismäßig die Standortvoraussetzungen erlauben MNA als alleinige Maßnahme	Langfristige Überwachung der Entwicklung der Schadstofffahne und relevanter Schutzgüter mit Nachweis des Schadstoffabbaus zum Ausschluss der Gefährdung
	Ü	Sanierungsmaßnahmen sind unverhältnismäßig Anordnung von Schutz- und Beschränkungsmaßnahmen	Kontrolle der Schutz- und Beschränkungsmaßnahmen zur Vermeidung konkreter Gefährdungen
	SAN	Gefahr wurde bestätigt, keine Sofortmaßnahmen notwendig zeitnahe Sanierung nicht möglich	Überwachung des festgestellten Schadens, um weitere Gefährdungen von Schutzgütern zu vermeiden
Laufende Sanierung		Prozesskontrolle	Eigenkontrolle zur Überprüfung der sachgerechten Ausführung und Steuerung

Stufe	HB	Anlass	Zielstellung
		Erfolgskontrolle	Nachweis der Wirksamkeit der Maßnahme (BBodSchV § 16 (4) Punkt 5)
Nach SAN	Ü	Abschluss Dekontaminationsmaßnahme und relevante Restkontaminationen	Nachsorge <sup>1</sup> , Überwachung der Restkontaminationen und Nachweis der Dauerhaftigkeit des Sanierungserfolges
		Abschluss Sicherungsmaßnahme	Nachsorge <sup>1</sup> , Nachweis der Sicherungswirkung über einen von der Behörde festgelegten Zeitraum
		MNA nach (Teil-)Sanierung	Langfristige Überwachung der Schadstofffahne und relevanter Schutzgüter mit Nachweis des Schadstoffabbaus

#### 4.1 Überwachung nach der Orientierenden Untersuchung und der Detailuntersuchung bei unklarer Gefahrenlage

Eine Überwachung nach Abschluss von Erkundungsmaßnahmen bei unklarer Gefahrenlage ist i. d. R. zeitlich befristet durchzuführen. Dabei beschränkt sich die Überwachung auf die im Rahmen der Untersuchung identifizierten und als relevant definierten Schadstoffe sowie auf die Wirkungspfade, bei denen Schadstoffkonzentrationsänderungen in vergleichsweise kurzen Zeiträumen zu erwarten sind. Dafür typische Wirkungspfade sind **Bodenluft** → **Innenraumluft** und **Boden** → **Grundwasser** bzw. **Grundwasser** → **Oberflächenwasser**.

##### 4.1.1 Überwachung nach Abschluss der Orientierenden Untersuchung

In der Orientierenden Untersuchung erfolgt die Ermittlung von konkreten Anhaltspunkten im Regelfall im Rahmen der Amtsermittlung durch die zuständige Bodenschutzbehörde. Überwachungsmaßnahmen können erforderlich werden, wenn die Ergebnisse der durchgeführten Untersuchungen nicht ausreichen, um konkrete Anhaltspunkte für einen hinreichenden Verdacht einer schädlichen Bodenveränderung oder einer Altlast festzustellen und somit dem Verpflichteten weitere Maßnahmen anzuordnen. Diese Überwachungsmaßnahmen sind nur in Ausnahmefällen durchzuführen.

Ziel dieser Überwachung ist die Beobachtung der weiteren Entwicklung der Schadstoffausbreitung und ihrer Bewertung als Grundlage für die Entscheidung zum weiteren Vorgehen (Anordnung einer Detailuntersuchung oder Ausscheiden aus dem Altlastenverdacht bzw. „Belassen“ im SALKKA) und der Abschluss der Amtsermittlung. Eine zukünftige, sensiblere Nutzung kann erneut einen Überwachungsbedarf auslösen.

##### 4.1.2 Überwachung nach Abschluss der Detailuntersuchung

In der Detailuntersuchung erfolgt die abschließende Gefährdungsabschätzung, d. h. der Verdacht des Vorliegens einer Altlast wird ausgeräumt oder bestätigt. Dafür ist die räumliche Abgrenzung der kontaminierten Bereiche und das Ausmaß der davon ausgehenden aktuellen und zukünftigen Gefährdung festzu-

---

<sup>1</sup> Der Begriff der Nachsorge bezieht sich auf die Regelungen des BBodSchG und der BBodSchV. Er ist im betrachteten Zusammenhang der Altlastenbearbeitung nicht mit dem Nachsorgebegriff aus dem Abfallrecht (KrWG; DepV) gleichzusetzen.

stellen. Überwachungsmaßnahmen können bereits während der Detailuntersuchung durchgeführt werden, insbesondere zur Prognose der Schadstoffausbreitung und deren Überprüfung (siehe Kapitel 7 im HB Teil 7 - Detailuntersuchung).

Überwachungsmaßnahmen auf der Stufe der Detailuntersuchung können in folgenden Fällen erforderlich werden:

- Fall 1: Im Ergebnis der Gefährdungsabschätzung ist keine eindeutige Aussage zur Schadens- und Gefahrenlage sowie deren Tolerierbarkeit möglich und es besteht die Aussicht, dass eine Überwachung der Schadstoffausbreitung (z. B. Schadstofffahne im Grundwasser) in absehbarer Zeit eine Entscheidungsgrundlage liefert. Im Ergebnis der Gefährdungsabschätzung wurde der vorliegende Schaden als derzeit tolerierbar eingeschätzt. Größe und Art der Kontamination sind so beschaffen, dass aus Gründen der Verhältnismäßigkeit der Schaden nach [53] sowie [77] und [70] bzw. entsprechender Aktualisierungen und Anwendungshinweise derzeit keine Sanierung erfordert. Eine langfristige Tolerierbarkeit ist in Abhängigkeit von der Standortsituation noch nachzuweisen.
- Fall 2: Im Ergebnis der Gefährdungsabschätzung wurde die Notwendigkeit zur Durchführung von Gefahrenabwehrmaßnahmen festgestellt, eine weitere Ausbreitung der Schadstoffe ist zu erwarten, aber aufgrund konkreter Sachverhalte (z. B. Eigentumsverhältnisse, Finanzierung) ist eine zeitnahe Weiterbearbeitung (Sanierungsuntersuchung) derzeit nicht möglich. Die Gefahrenlage ist nicht akut, so dass keine Sofortmaßnahmen erforderlich sind.

Ziel der Überwachung nach der Detailuntersuchung ist die Schaffung einer ausreichenden Datengrundlage zur weiteren Schadstoffausbreitung und der Auswirkung auf relevante Schutzgüter für eine abschließende Entscheidung zum Sanierungsbedarf (Fall 1), für den abschließenden Nachweis der Tolerierbarkeit (Fall 1) und für die Erkennung akuter Gefährdungen und Vermeidung weiterer Schädigungen betroffener sensibler Schutzobjekte (beide Fälle). Soweit Schutz und Beschränkungsmaßnahmen angeordnet wurden, sind diese zu kontrollieren.

## 4.2 Überwachung nach der Sanierungsuntersuchung

In der Sanierungsuntersuchung erfolgt die auf den Einzelfall bezogene Ermittlung geeigneter Sanierungsvarianten für die dauerhafte Gefahrenabwehr. Im Regelfall wird danach die Sanierung durchgeführt. Überwachungsmaßnahmen sind zwingend erforderlich, wenn im Ergebnis der Sanierungsuntersuchung folgendes festgestellt wird:

- Fall 1: (Aktive) Sanierungsmaßnahmen sind technisch nicht möglich oder unverhältnismäßig. Aufgrund der vorliegenden Untersuchungsergebnisse und der festgestellten Gefährdung ist zu entscheiden, ob:
  - Fall 1.1: die Voraussetzungen am Standort erlauben, dass die Überwachung des natürlichen Schadstoffabbaus (MNA) als alleinige Maßnahme möglich ist (siehe auch 4.5), und/oder,
  - Fall 1.2: Schutz- und Beschränkungsmaßnahmen angeordnet werden müssen.
- Fall 2: Es wurden geeignete Maßnahmen zur Gefahrenabwehr identifiziert und ein Sanierungskonzept erstellt. Aufgrund einzelfallspezifischer Sachverhalte ist eine zeitnahe Weiterbearbeitung nicht möglich. Die Gefahrenlage ist nicht akut, so dass keine Sofortmaßnahmen erforderlich sind.

Ziel der Überwachung nach der Sanierungsuntersuchung ist immer die Beobachtung des festgestellten Schadens und seiner Bewertung zur Erkennung akuter Gefährdungen und Vermeidung weiterer Schädigungen betroffener sensibler Schutzobjekte. Wurde MNA als Sanierungsalternative favorisiert (Fall 1.1), ist das Ziel dieser Überwachung anhand eines MNA-Konzeptes langfristig den natürlichen Schadstoffabbau bis zum Ausschluss einer Gefährdung zu beobachten.

Sofern Schutz- und Beschränkungsmaßnahmen angeordnet wurden, sind diese zu kontrollieren.

### 4.3 Überwachung während der Sanierung

Mit der Sanierungsplanung sind auch die erforderlichen Eigenkontrollmaßnahmen zur Überprüfung der sachgerechten Ausführung und Wirksamkeit der vorgesehenen Sanierungsmaßnahmen in Form eines Überwachungskonzeptes darzustellen (BBodSchV § 16 (4) Punkt 5). Während der Sanierung ist zwischen Prozess- und Erfolgskontrolle zu unterscheiden.

Ziel der **Prozesskontrolle** ist es, den jeweiligen Sanierungsprozess zu überwachen und zu steuern. Umfang und Inhalt sind von dem gewählten Sanierungsverfahren abhängig. Diese Art der Überwachung wird im Rahmen des vorliegenden Handbuches, mit Ausnahme zutreffender allgemeiner Anforderungen zur Überwachung, nicht betrachtet. Details dazu sind u. a. in [33] dargestellt.

Ziel der **Erfolgskontrolle** ist der Nachweis, dass das behördlich festgelegte Sanierungsziel an definierten Orten erreicht wurde. Abhängig vom Sanierungsverfahren und speziell bei der Sanierung von Grundwasser und Bodenluft ist zum Nachweis des Sanierungserfolges abzuwarten, bis sich die durch die Sanierung veränderten hydraulischen, chemischen und biogeochemischen Verhältnisse (möglicher **Reboundeffekt**, siehe Punkt 3) auf einen nicht mehr durch die Maßnahmen beeinflussten Zustand zurückgebildet haben und ein quasi-stationärer Zustand vorliegt. Für den Nachweis der Wirkung von Sicherungsmaßnahmen ist ggf. eine Funktionskontrolle durchzuführen.

Die Ergebnisse der Erfolgskontrolle sind Grundlage für die Entscheidung der Behörde, eine Sanierung zu beenden, wenn:

- die behördlich festgelegten Sanierungsziele erreicht wurden oder
- die Weiterführung der Sanierungsmaßnahme unverhältnismäßig ist.

### 4.4 Überwachung nach der Sanierung (Nachsorge<sup>2</sup>)

Eine Überwachung nach einer Sanierung bzw. einzelnen Teilsanierungen (einschließlich dem Abschluss von Sicherungsmaßnahmen) ist immer dann erforderlich, wenn vor Ort ein Schadstoffpotenzial verblieben ist, durch das eine erneute Gefährdung von Schutzgütern eintreten kann. Nachsorge<sup>2</sup> setzt jedoch voraus, dass bei der aktuellen Nutzung keine Gefahr mehr besteht. Die nach einer Sanierung erforderlichen Überwachungsmaßnahmen sind bereits bei der Sanierungsplanung in einem Überwachungskonzept einschließlich des Qualitätssicherungsplanes darzulegen.

Ziel der Überwachung ist die Prüfung und Sicherstellung der langfristigen Wirksamkeit der durchgeführten Sanierungsmaßnahme und somit die dauerhafte Einhaltung der festgelegten Sanierungsziele.

Die technischen und administrativen Maßnahmen sind grundsätzlich auf den Einzelfall (Art der Sanierung, betroffene Schutzgüter und Wirkungspfade, Schadstoffe, Nutzung) abzustimmen und mögliche Veränderungen der Standortbedingungen zu kontrollieren, um eine erneute Schadstoffausbreitung über die maßgeblichen Wirkungspfade zu betroffenen Schutzgütern zu verhindern.

---

<sup>2</sup> Der Begriff der Nachsorge bezieht sich auf die Regelungen des BBodSchG und der BBodSchV. Er ist im betrachteten Zusammenhang der Altlastenbearbeitung nicht mit dem Nachsorgebegriff aus dem Abfallrecht (KrWG; DepV) gleichzusetzen.

Wurden Sicherungsmaßnahmen durchgeführt und dabei Bauwerke oder Anlagen errichtet, ist im Rahmen der Nachsorge<sup>2</sup> deren Betrieb und Unterhaltung sowie die Wirksamkeit und Funktionsfähigkeit zu überwachen.

Bei der Entscheidung zur Überwachung der natürlichen Selbstreinigung in Ergänzung einer partiellen oder vollständigen Quellensanierung ist für diese Art der Überwachung das auf der Stufe der Sanierungsuntersuchung erstellte MNA-Konzept zu qualifizieren und durchzuführen.

Die Nachsorge<sup>2</sup> beginnt nach der Abnahme der Sanierungsmaßnahme (z. B. fachtechnische Abnahme durch die zuständige Behörde und/oder förmliche Abnahme nach VOB/B, VOL/A). Die zuständige Behörde entscheidet, ob der Verpflichtete Eigenkontrollmaßnahmen durchzuführen hat und legt deren Art, Umfang und Dauer fest. Sie entscheidet gleichfalls, ob Eigenkontrollmaßnahmen von einem Sachverständigen nach § 18 BBodSchG durchzuführen sind. Diese Festlegungen sollten entweder durch Regelung im für verbindlich erklärten Sanierungsplan oder durch Anordnung auf der Grundlage des § 15 Abs. 2 BBodSchG erfolgen.

Die Ergebnisse der Überwachung nach der Sanierung sind Grundlage für die Entscheidung der Behörde, die Überwachung zu beenden, wenn keine relevanten Gefährdungen mehr erwartet werden.

#### **4.5 Überwachung des natürlichen Schadstoffabbaus (MNA)**

Unter einem natürlichen Schadstoffabbau sind biologische, chemische und physikalische Prozesse ohne menschliches Zutun zu verstehen, welche zu einer Verringerung von Schadstoffmasse, -fracht, -konzentration, -toxizität sowie ggf. Schadstoffmobilität führen [50].

Zur Kontrolle der Wirksamkeit des natürlichen Abbaus ist eine entsprechende Überwachung – eine überwachte natürliche Selbstreinigung (Monitored Natural Attenuation, kurz: **MNA**) – erforderlich.

Innerhalb der stufenweisen Altlastenbearbeitung ist die Wirksamkeit natürlicher Schadstoffabbauprozesse auf der Stufe der Detailuntersuchung nachzuweisen. Wird der natürliche Schadstoffabbau dort als relevant eingeschätzt, kann dieser in der Stufe der Sanierungsuntersuchung in den Variantenvergleich zur Erreichung der Sanierungsziele einbezogen werden (i. d. R. als Ergänzung einer partiellen oder vollständigen Quellensanierung). Dieser quantifizierte und prognostizierte Schadstoffabbau ist durch ein an den Einzelfall angepasstes Überwachungsprogramm nachzuweisen. Wurde unter Beachtung der Verhältnismäßigkeit ein Verzicht von Sanierungsmaßnahmen in Verbindung mit MNA behördlich entschieden, sind weitere Festlegungen in einem sog. MNA-Konzept zu treffen. Neben der Definition nachprüfbarer Zielvorgaben und der Regelung des weiteren Vorgehens bei Abweichung von den prognostizierten Zielen ist hier insbesondere die Festlegung von Überwachungsmaßnahmen zur Kontrolle der Wirksamkeit der natürlichen Abbauprozesse durchzuführen.

Ziel der Überwachung des natürlichen Schadstoffabbaus ist der Nachweis einer Zielerreichung mit Gefahrenausschluss. Dazu stehen diverse technische Maßnahmen wie Probenahme (bspw. Grundwasser, Boden, Bodenluft), Analytik gefahren- und prozessbezogener Parameter sowie die Auswertung der Analysergebnisse zur Verfügung [50]. Es ist nachzuweisen, dass die am Standort stattfindenden Schadstoffabbauprozesse prinzipiell das Unterschreiten der Sanierungszielwerte ermöglichen. Zudem ist eine Aussage über die Dauerhaftigkeit der Einhaltung der Sanierungsziele unter Einbeziehung von Prognosen zu

treffen. Dazu sind die prognostizierte Wirkung der natürlichen Schadstoffabbau- und -minderungsprozesse durch ein Überwachungsprogramm nachzuweisen. Dieses ermöglicht die kontinuierliche Kontrolle der Prognose und dient dem Erfassen von Änderungen der Schadstoffahengeometrie.

Sollten die Prozesse nicht in dem prognostizierten Maße (zeitlich bzw. räumlich) zum Erreichen des vereinbarten Zieles führen, ist eine erneute Gefahrenbeurteilung durchzuführen und zu prüfen, ob Alternativmaßnahmen erforderlich werden.

Die Ergebnisse von MNA sind Grundlage für die Entscheidung der Behörde, diese Überwachung fortzusetzen, bei Gefahrenausschluss zu beenden oder ggf. weitere Maßnahmen zu ergreifen.

## 5 Überwachung der Wirkungspfade

Im Rahmen der durchgeführten Erkundungsmaßnahmen werden die relevanten Wirkungspfade festgestellt. Überwachungsmaßnahmen sind auf die betroffenen Wirkungspfade zu beschränken.

Welche Schadstoffverteilungsprozesse in den verschiedenen Umweltmedien bei der Planung, Durchführung und Auswertung von Überwachungsmaßnahmen zu berücksichtigen sind, hängt vom konkreten Einzelfall ab. Der Nachweis der Prozesse selbst ist Aufgabe der Erkundung. Genaue Kenntnisse dieser Prozesse sind auch für deren Überwachung erforderlich.

Die Phasen Boden, Wasser, Luft sind auf kleinstem Raum miteinander verbunden und bei der Betrachtung von Prozessen im Altlastenbereich unterliegen diese unterschiedlichen Gleichgewichtsprozessen. Die Überwachung muss so ausgelegt werden, dass die wesentlichen zeitlichen und räumlichen Veränderungen und damit auch Trends erkennbar sind.

### 5.1 Wirkungspfad Boden → Grundwasser

Die Überwachung des Wirkungspfades Boden → Grundwasser kann erforderlich sein, wenn ein Grundwasserschaden festgestellt bzw. prognostiziert wurde oder nach erfolgter Sanierung wegen noch vorhandener Restkontaminationen auch weiterhin besteht und somit eine zukünftige Gefahrenlage nicht ausgeschlossen werden kann. Die Überwachung des Grundwassers dient der Ermittlung von zeitlichen Änderungen (Trends) und ist insbesondere zum Nachweis zunehmender oder abnehmender räumlicher Ausdehnung der Schadstoffe erforderlich.

Der Ort der Probenahme hängt von verschiedenen Randbedingungen (z. B. Schadstoffspektrum und dessen horizontaler und vertikaler Verbreitung im Schadensherd oder in der Schadstofffahne) ab. Nichtwässrige Produktphasen haben, soweit nicht in der Porenmatrix der ungesättigten Bodenzone gebunden, in der Regel einen direkten Kontakt mit dem Grundwasser und gehen ausgehend vom Phasenkörper in Lösung. Leichtphasen (LNAPL) wie beispielsweise Monoaromate reichern sich in der Grundwasserwechselzone an. Schwerphasen (DNAPL), wie beispielsweise LCKW können durch gravitative Prozesse bis zum Grundwasserstauer absinken. Der Eintrag der Schadstoffe kann bei Unterschreitung der Restsättigung aber auch in gelöster Form erfolgen. Das versickernde Niederschlagswasser löst die Schadstoffe in der ungesättigten Bodenzone und verfrachtet sie in das Grundwasser, wo sich das belastete Sickerwasser mit dem Grundwasser vermischt. Vermischungen finden in der Regel durch Diffusion und vor allem durch wechselnde Grundwasserniveaus statt.

#### Schadstoffverteilungsprozesse

Werden Schadstoffe in die Umwelt freigesetzt, können sie sich im Sickerwasser des ungesättigten Bodens und des Grundwasserwechselbereiches bzw. im Grundwasser lösen (beim Vorliegen von Leichtphase; LNAPL) oder als eigenständige nicht-wässrige Produktphase versickern bzw. bis zur Basis des Grundwasserleiters (beim Vorliegen von Schwerphase; DNAPL) absinken. In Abhängigkeit von den Untergrund- bzw. Schadstoffverhältnissen können abweichend davon auch horizontbezogene Phasenreicherungen auftreten. Die Schadstoffphase innerhalb des Grundwasserleiters ist solange mobil, bis die gesamte Masse durch Fixierung in der Bodenmatrix als Residualsättigung festgelegt ist. Danach ist sie immobil solange sich die Randbedingungen, insbesondere der Wassergehalt, nicht ändern. Da die maximale Residualsättigung der wassergesättigten und der wasserungesättigten Bodenzone verschieden ist, kann im Grundwasserwechselbereich ein Absinken des Grundwasserstandes zur Wiederfreisetzung von mobiler

Phase führen. Umgekehrt kann ein steigender Grundwasserstand dazu führen, dass in Messstellen festgestellte Leichtphase überströmt und als residuale Phase fixiert wird.

Mit der Schwankung der Grundwasserstände kann sich zeitweise die Grundwasserströmungsrichtung ändern, was bei der Betrachtung von Zu- und Abstrom zu berücksichtigen ist.

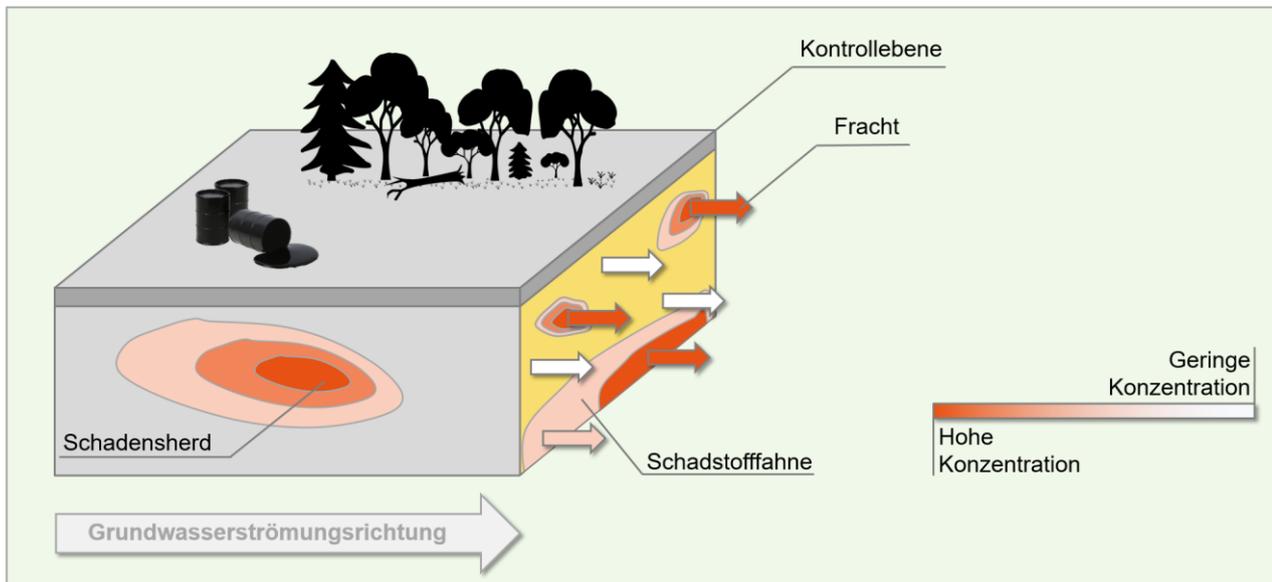
Damit wird deutlich, dass die hydrologischen Verhältnisse und die Kenntnisse bei der Bewertung der Schadstofftransportprozesse, insbesondere auch im Hinblick auf die Veränderlichkeit bzw. Stagnation der Schadstofffahne eine besondere Bedeutung besitzen.

Im Grundwasser strömen die Schadstoffe mit dem natürlichen Grundwasserstrom ab. Da sie aufgrund ihrer stoffspezifischen Eigenschaften zur Sorption an die Bodenmatrix (**Retardation**, vgl. Kapitel 3) tendieren, werden sie langsamer verfrachtet als es der natürlichen Grundwasserströmungsgeschwindigkeit entspricht. Auch die Diffusion der Schadstoffe in hydraulisch gering permeable Bereiche vermindert die Geschwindigkeit der Schadstoffausbreitung. Speziell für organische Schadstoffe besitzen mikrobielle Prozesse im Grundwasser eine besondere Bedeutung.

Für einen natürlichen mikrobiellen Schadstoffabbau (Mineralisierung) benötigen die im Grundwasserleiter vorhandenen Mikroorganismen neben einigen Nährsalzen vor allem Elektronenakzeptoren. Dies kann im einfachsten Fall Sauerstoff sein. Unter Sauerstoffmangel werden aber auch Nitrat, Mangan(IV), Eisen(III), Sulfat und CO<sub>2</sub> als Elektronenakzeptoren genutzt. Stehen ausreichend Elektronenakzeptoren zur Verfügung, so kann bei entsprechenden Standortverhältnissen ein natürlicher mikrobieller Abbau der Schadstoffe im Grundwasser stattfinden. Bei den häufig vorkommenden leichtflüchtigen chlorierten Kohlenwasserstoffen (LCKW) ist das Abbauverhalten abweichend. Da die hochchlorierten LCKW selbst (und ausschließlich) als Elektronenakzeptoren dienen, müssen Elektronendonatoren (meist organisches Material) vorliegen, damit ein natürlicher Abbau ablaufen kann. Der mikrobielle und der bei manchen Schadstoffen zusätzlich vorkommende natürliche abiotische Abbau führen dazu, dass die Schadstoffe sich nur begrenzt in Grundwasserströmungsrichtung ausbreiten.

Im Ergebnis verschiedener Prozesse kann für den Grundwasserschaden hinsichtlich seiner räumlichen Ausdehnung ein quasi-stationärer Zustand entstehen. Dies bedeutet, dass ein Gleichgewicht zwischen den aus dem Schadensherd durch Nachlösung freigesetzten Schadstoffen und der Geschwindigkeit ihres mikrobiellen Abbaus besteht. Die Länge der Schadstofffahne ändert sich dadurch nicht. Die Nettosorption ist in diesem Zustand Null und die Diffusion quasi vernachlässigbar. Bei Betrachtung einer einzelnen Messstelle bleibt die Konzentration daher über die Zeit so gut wie konstant.

Die Verteilung der Schadstoffe innerhalb der Quelle und der Schadstofffahne ist inhomogen, insbesondere dann, wenn DNAPL vorliegen. Die Heterogenität der Quelle (auch als Quellenarchitektur bezeichnet) paust sich in die Schadstofffahne durch. Damit liegt innerhalb dieser ebenfalls eine hinsichtlich der Schadstoffkonzentrationen heterogene Verteilung vor (Abbildung 3). Die gelbe Ebene stellt die Kontrollebene am Übergang Schadensherd zur Schadstofffahne dar. Deutlich erkennbar ist die heterogene Schadstoffverteilung innerhalb des Fahnenquerschnitts. Die hellen Pfeile kennzeichnen geringe, die dunkelorange hohe Schadstoffkonzentrationen im abströmenden Grundwasser.



**Abbildung 3: Korrelation der Quellenarchitektur mit der Geometrie der Schadstofffahne [93]**

Über die Zeit kann eine Einteilung der Schadstofffahne in drei Abschnitte erfolgen: zunehmende Ausdehnung, quasi-stationärer Zustand, Rückbildung.

Die Zeitdauer der räumlich zunehmenden Ausdehnung der Belastung unmittelbar nach Schadenseintritt sowie der umgekehrte Prozess nach einer Herdentfernung sind im Vergleich zur Dauer des quasi-stationären Zustands in der Regel gering. Natürliche Schwankungen im Wasserdargebot (vor allem durch Niederschläge) führen zu messbaren, aber meist nur moderaten temporären Änderungen der Ausdehnung der Belastung. Sich verändernde Grundwasserstände können dazu führen, dass die Schadstoffe über die Vertikale der Grundwasserwechselzone „verschmiert“ werden. Dieser Bereich wird daher auch als *Smear Zone* (Schmierzone) bezeichnet. Je nach Grundwasserstand werden aus dieser Zone mehr oder weniger Schadstoffe mobilisiert (Solubilisierung, vgl. Kapitel 3). Dies kann auch eine Veränderung der Konzentrationen der Elektronenakzeptoren und damit der Abbauprozesse mit sich bringen. Der gleiche Effekt kann durch Abweichungen in der Grundwasserströmungsrichtung verursacht werden. Über die Zeit hinweg heben sich diese meist saisonal auftretenden Änderungen gegenseitig auf und der Schaden ist somit quasi-stationär. Dieser quasi-stationäre Zustand bleibt solange erhalten, bis sich der Schadensherd bzw. die Restkontamination durch Nachlösung der Schadstoffe im Grundwasser (und gegebenenfalls durch Verflüchtigung in die Bodenluft) nahezu aufgelöst hat. Bleibt die kontinuierliche Nachlieferung der Schadstoffe aus, beginnen in der Schadstofffahne die Konzentrationen der Schadstoffe zu sinken, wodurch ein Konzentrationsgradient zwischen den im Grundwasser gelösten und den sorbierten bzw. den in die gering durchlässigen Bereiche hineindiffundierten Schadstoffe, entsteht. Die darauffolgende Desorption der Schadstoffe von der Bodenmatrix sowie die Rückdiffusion aus gering permeablen Bereichen führen dazu, dass auch die Rückbildung der Schadstofffahne verzögert abläuft. Selbst wenn die Schadstoffnachlieferung in die Schadstofffahne *vollständig* eliminiert wird, z. B. durch eine Dekontamination/Sicherung des Schadensherdes, baut sich die Schadstofffahne im Vergleich zur natürlichen Grundwasserabstandsgeschwindigkeit nur relativ langsam ab.

Nach dem Abschluss vieler Sanierungen kommt es zu einem Rebound-Effekt, bei dem ein Wiederanstieg von Schadstoffkonzentrationen durch stattfindende Gleichgewichtsreaktionen in der gesättigten Bodenzone erfolgt.

## 5.2 Wirkungspfad Boden → Mensch

### Oberflächennaher Boden

Die Überwachung der Belastung des oberflächennahen Bodens durch wiederholte Bodenuntersuchungen ist nur dann sinnvoll, wenn Veränderungen absehbar sind, z. B. Wind- oder Wassererosion oder wenn durch aktive Maßnahmen eine Veränderung des Bodens hervorgerufen wird (beispielsweise Geländemaßnahmen, Bodenaushub). In der Regel ändert sich die Belastung eines Bodens ohne solche genannten Einflüsse über einen begrenzten Zeitraum kaum.

### Boden → Bodenluft → Innenraum (Außen-)luft → Mensch

Die Überwachung des Wirkungspfades *Boden → Bodenluft → Innenraum (Außen-)luft → Mensch* an Hand von Bodenluft und/oder Innenraumlufthuntersuchungen kann notwendig sein, wenn flüchtige Schadstoffe eine Belastung der atmosphärischen oder Innenraumluft hervorgerufen haben oder eine Belastung erwartet wird [74]. Besonders auf diesem Wirkungspfad ist mit sich ändernden Randbedingungen zu rechnen, da die Bodenluft sehr schnell auf Änderungen wie Bodenfeuchte, Druckunterschied etc. reagiert und die Probenahme sehr sensibel ist. Auch abweichende Ausbreitungswege und -zeiten über Untergrundstrukturen wie Kanäle oder Schächte sind zu beachten.

Allgemein ist für jeden Standort und Wirkungspfad bei der Überwachung eine mögliche Änderung der Rahmenbedingungen zu berücksichtigen wie beispielsweise:

- neue oder veränderte Wasserentnahmen (Veränderung des Grundwasserstandes und/oder der Grundwasserfließrichtung),
- Gebäuderückbau oder Entsiegelung/Neuersiegelung, ggf. bauliche Maßnahmen insb. Leitungsgräben,
- Entfernung einer schützenden Vegetationsdecke,
- temporäre Baumaßnahmen (Grundwasserhaltung),
- Nutzungsänderung.

### Schadstoffverteilungsprozesse

Der Boden der ungesättigten Zone ist durch den Gleichgewichtszustand der Schadstoffe zwischen Feststoff, Bodenluft und Bodenwasser gekennzeichnet. Die Verteilung eines Schadstoffes zwischen diesen drei Phasen hängt im Wesentlichen von der Art des Schadstoffes, der Menge und Art der organischen Bodenbestandteile, der Porosität des Bodens, dem Wassergehalt sowie der Temperatur des Bodens ab.

Die leichtflüchtigen Schadstoffe in der Bodenluft verhalten sich anders als im Grundwasser. Schadstoffe mit einem hohen Dampfdruck neigen in der ungesättigten Bodenzone zu einer raschen Verflüchtigung aus der residualen Phase. Der Übergang der Schadstoffe aus der wässrigen Phase in die Bodenluft wird dagegen durch den *Henry-Koeffizienten* beschrieben. Je größer dieser Wert, desto eher neigen die Schadstoffe dazu, aus der Wasser- in die Luftphase überzutreten. Die Schadstoffausbreitung in der ungesättigten Bodenzone erfolgt, neben stattfindenden Konvektionsprozessen, im Wesentlichen durch Diffusion entlang von Konzentrationsgradienten.

Maßgebliche Konvektionsprozesse laufen bei aktiver Gasbildung und Altablagerungen mit Methangasbildung ab. Darüber hinaus spielen Luftdruckänderungen der Atmosphäre eine wesentliche Rolle. Sinkt dieser, so wird die Ausgasung aus der Bodenluft in die Atmosphäre bzw. in Innenräume, sofern ein Migrationsweg beispielsweise durch Gasgängigkeit des Gebäudebodens vorliegt, verstärkt. Umgekehrt führt ein steigender atmosphärischer Druck eher zum vertikalen Eindringen von Außenluft in den ungesättigten Bodenbereich, was bei lokalen Versiegelungen auch horizontale Luftströmungen verursachen kann. Dieser als barometrische Pumpe bezeichnete Gastransport bestimmt neben der Diffusion das Eindringen von

Schadstoffen in Innenräume. Insgesamt ist jedoch diese konvektive Schadstoffverteilung selten, so dass sich die Schadstoffe in der Bodenluft im Wesentlichen auf den Eintragsbereich beschränken. Es ist aber nicht ausgeschlossen, dass Ausgasungen aus dem Grundwasser im weiteren Verlauf der Schadstofffahne ebenfalls zu Belastungen der Bodenluft führen.

Werden flüchtige Schadstoffe aus Altlasten in die Atmosphäre emittiert, so breiten sie sich schnell und weiträumig aus. Es findet eine sehr rasche und weitgehende Verdünnung der flüchtigen Schadstoffe in der Atmosphäre statt.

### **5.3 Wirkungspfad Boden → (Grundwasser) → Oberflächengewässer**

Die Überwachung des Wirkungspfades *Boden* → (*Grundwasser*) → *Oberflächengewässer* (mit Oberflächenwasseruntersuchungen) ist wichtig, wenn ein Oberflächenwasserschaden eingetreten ist oder erwartet wird und durch den Einfluss sich ändernder Randbedingungen eine Gefahrenlage nicht ausgeschlossen werden kann. Die Randbedingungen hängen dabei von den Einflüssen auf die verschiedenen Ausprägungen des Wirkungspfades ab, die in [73] beschrieben werden (Transport der Schadstoffe direkt ins Oberflächengewässer, über Sickerwasser, über Grundwasser, über Erosion bzw. über Hochwasser).

#### **Schadstoffverteilungsprozesse**

Oberflächengewässer können durch Eintrag aus dem Grundwasser, durch laterale Abflüsse aus der ungesättigten Zone des Grundwasserleiters, Wind- oder Wassererosion, über Direkteinleiter oder durch Schadherde im Oberflächengewässer beeinträchtigt werden. Die Schadstoffe werden entweder in gelöster Form (selten in Phase) transportiert oder lagern sich im Sediment oder den Schwebstoffen an. Die Verteilung der in das Oberflächengewässer eingetragenen gelösten Schadstoffe und der Schwebstoffe folgt den durch das Gewässerbett vorgegebenen Strukturen und vermischt sich selten vollständig über den gesamten Querschnitt. Sedimente lagern sich temporär oder dauerhaft im Bereich von Querverbauungen (in Abhängigkeit von deren Passierbarkeit) an. Dabei kann es zu Rücklösevorgängen bei vorher fest an das Sediment gebundenen Schadstoffen kommen. Durch die Schwankungen des Wasserstandes/ Durchflusses aufgrund meteorologischer Bedingungen kommt es in den Uferzonen zur Interaktion zwischen Grund- und Oberflächenwasser. Zwischen Hoch- und Niedrigwasser können erhebliche Unterschiede bei den aus dem Grundwasser in das Oberflächenwasser eingetragenen Schadstofffrachten bestehen.

### **5.4 Wirkungspfad Boden → Nutzpflanze**

Die Überwachung des Wirkungspfades *Boden* → *Nutzpflanze* sollte insbesondere dann erfolgen, wenn eine Belastung der Nutzpflanze möglich erscheint und eine Gefahrenlage nicht ausgeschlossen werden kann (z. B. durch aufgebrachte Klärschlämme bzw. Altablagerungen). Um zu vermeiden, dass schadstoffbelastete landwirtschaftliche Produkte in den Handel und damit in die Nahrungskette gelangen, kann z. B. ein sogenanntes Vorerntemonitoring erfolgen. Dabei werden Pflanzenteile entnommen und analysiert. Dies ist vor allem dann erforderlich, wenn ein Übergang der Schadstoffe in die Nutzpflanzen anhand bekannter Transferfaktoren oder wegen Änderung relevanter Randbedingungen (wie z. B. Wachstum aufgrund variierender Nährstoffkonzentrationen, Wetter/Klima und Pflanzenarten) nicht hinreichend zuverlässig abgeschätzt werden kann [57].

## 6 Vorbereitung der Überwachung

Wesentliche Grundlage für den Erfolg einer Überwachung und der Erreichung der damit verbundenen Zielstellung ist eine umfassende und der Aufgabenstellung angepasste Vorbereitung. Unabhängig von der Art der Überwachung wird in diesem Kapitel das grundsätzliche Vorgehen bei der Vorbereitung beschrieben. Da die Überwachung des Grundwassers die häufigste Überwachungsaufgabe ist, werden die Ziele und Inhalte der Vorbereitung einer Überwachung im Folgenden an diesem Schutzgut beispielhaft dargestellt. Bei der Überwachung anderer Schutzgüter bzw. -objekte können sich ggf. spezielle Anforderungen in einzelnen Phasen der Vorbereitung ergeben, welche standortspezifisch zu berücksichtigen sind. Veranlassung, Inhalt und Umfang der Vorbereitung zur Überwachung unterliegen zwar einem allgemeinen Ablaufschema, weisen aber in Abhängigkeit von den konkreten Überwachungsanlässen in den einzelnen Phasen Unterschiede auf (vgl. Tabelle 2)

**Tabelle 2: Vorbereitung einer Überwachung**

6 Vorbereitung der Überwachung	Zuständigkeit	Überwachung vor der Sanierung	Überwachung während oder nach der Sanierung
6.1 Festlegung des Überwachungserfordernisses	Behörde	im Ergebnis der bisherigen Untersuchungen	mit rechtlicher Vorgabe zur Erstellung und Umsetzung eines Sanierungsplans
6.2 Beteiligte und deren Zuständigkeiten	Verpflichteter/ Gutachter mit Behörde	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ Beteiligte</li> <li>■ Zuständigkeiten</li> <li>■ Verantwortlichkeiten</li> </ul>	Regelungen im Rahmen der Sanierungsplanung abhängig von den geplanten Sanierungsmaßnahmen
6.3 Organisatorische Festlegungen	Verpflichteter/ Gutachter	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ Ausschreibung/Vergabe</li> <li>■ Termin- und Ablaufplan</li> <li>■ Sicherung Finanzierung</li> <li>■ Information gegenüber Beteiligten</li> </ul>	Regelungen im Rahmen der Sanierungsplanung abhängig von den geplanten Sanierungsmaßnahmen
6.4 Bestandsaufnahme / Ortsbegehung	Gutachter	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ Standortverhältnisse</li> <li>■ Kontaminationsverhältnisse</li> <li>■ Ergebnisse der Gefährdungsabschätzung</li> <li>■ Messnetz (Zustand und Eignung der Grundwassermessstellen)</li> </ul>	Regelungen im Rahmen der Sanierungsplanung abhängig von den geplanten Sanierungsmaßnahmen

6 Vorbereitung der Überwachung	Zuständigkeit	Überwachung vor der Sanierung	Überwachung während oder nach der Sanierung
6.5 Erstellen des Überwachungskonzeptes	Gutachter	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ Zielstellung, Art und Umfang der Überwachungsleistungen</li> <li>■ Überwachungsprogramm mit Vorgaben, die i. d. R. für den gesamten Überwachungszeitraum einzuhalten sind, um Vergleichbarkeit der Messergebnisse zu gewährleisten, wie: <ul style="list-style-type: none"> <li>■ Kriterien zu Optimierungen/Anpassungen der Überwachung,</li> <li>■ Kriterien zur Beendigung der Überwachung selbst oder der überwachten Sanierungsmaßnahme und</li> <li>■ Kriterien zur Einleitung ggf. weiterer Maßnahmen</li> </ul> </li> </ul>	
6.6 Erstellen des Überwachungsprogramms		Auf der Grundlage des Ü-Konzeptes wird die erforderliche Überwachungsmaßnahme konkretisiert. Das Überwachungsprogramm kann bzw. muss ständig geprüft und auf der Grundlage von Messergebnissen angepasst werden.	
6.7 behördliche Abstimmung und Entscheidung	Behörde	behördliche Bestätigung des Überwachungskonzeptes und des Überwachungsprogramms	behördliche Bestätigung des Sanierungsplans, einschließlich Anpassung

## 6.1 Festlegung des Überwachungserfordernisses

Die Festlegung eines Überwachungserfordernisses mit konkreten Überwachungsmaßnahmen basiert i. d. R. auf einer behördlichen Entscheidung oder im dokumentierten Einvernehmen aller Beteiligten. Rechtliche Grundlagen dafür können sein:

- Verbindlichkeitserklärung (z. B. im Zusammenhang mit der Bestätigung eines Sanierungsplans),
- Behördliche Anordnung,
- Öffentlich-rechtlicher Vertrag,
- Festlegungen im Überwachungserlass [78].

## 6.2 Beteiligte und deren Zuständigkeiten

Die Beteiligten an der Überwachung sind in der Regel:

- der zur Überwachung Verpflichtete oder Grundstückseigentümer bzw. Sanierungsträger,
- die zuständigen Ordnungs- und Fachbehörden,
- die mit der Durchführung beauftragten Firmen,
- ggf. andere Beteiligte/Betroffene.

Nach Festlegung des Überwachungserfordernisses obliegt es dem zur Überwachung Verpflichteten oder Grundstückseigentümer bzw. Sanierungsträger die Maßnahmen zur Vorbereitung und Durchführung einzuleiten und diese auch zu kontrollieren.

Der Verpflichtete/Auftraggeber hat sich vor Auftragsvergabe über seine Aufgaben und Pflichten zu informieren und diese bei der Bearbeitung wahrzunehmen.

Notwendige inhaltliche und zeitliche Abweichungen/Änderungen zum abgestimmten Untersuchungskonzept sind der zuständigen Behörde mitzuteilen. Der Verpflichtete/Auftraggeber sollte bei der Klärung von Zutrittsmöglichkeiten der mit der Überwachung beauftragten Firmen mitwirken.

Bei den Betroffenen handelt es sich in der Regel um Grundstückseigentümer, auf deren Grundstücken sich die zu beprobenden Überwachungsmessstellen befinden. Es ist mit diesen zu klären, was das Ziel der Überwachung ist und wie die Umsetzung realisiert werden kann.

Hinsichtlich der Einbeziehung/Information anderer Betroffener ist zu klären, welche Grundstückseigentümer von den Überwachungsmaßnahmen noch betroffen sind und damit eine Information erhalten sollten.

Wenn nicht anders vereinbart und nicht schon im Rahmen der bisherigen Bearbeitung bekannt, hat der Verpflichtete bzw. Grundstückseigentümer dem Gutachter:

- die Ziele der Überwachung und damit verbunden die Erwartungen hinsichtlich des Inhaltes und Umfang des Gutachtens klar und eindeutig zu benennen,
- die zu berücksichtigenden Gutachten, Stellungnahmen, behördlichen Bescheide (bspw. Anordnung zur Überwachung), Daten und Informationen zur Verfügung zu stellen,
- die bei der Bearbeitung zu beachtende Randbedingungen mitzuteilen und
- die Projektbeteiligten zu benennen.

### **6.3 Organisatorische Festlegungen**

Die Projektvorbereitung umfasst im Wesentlichen organisatorische Fragen zu Verantwortlichkeiten, zur Finanzierung, zur Ausschreibung und Vergabe von Leistungen und zur Einbeziehung von Beteiligten und Betroffenen. Diese stellen eine wesentliche Grundlage für die fachliche Umsetzung der Überwachung dar.

Dies betrifft u. a.

- die Beteiligten und deren Aufgaben (Klärung der Randbedingungen der Überwachung zwischen Verpflichteten und zuständigen Behörden, Art und Umfang der Unterstützung des Verpflichteten bei der Überwachung),
- Sicherung der Finanzierung,
- Ausschreibung und Vergabe mit Auswahl und vertraglicher Bindung der mit der Überwachung beauftragten Firmen (z. B. Gutachter, Labor usw.),
- Einbeziehung/Information anderer Betroffener (Dritter wie z. B. Eigentümer von Fremdgrundstücken).

#### **Ausschreibung/Vergabe**

Leistungen, die der Auftraggeber nicht selbst erbringt und die durch Zuwendungen von öffentlichen Mitteln mitfinanziert werden, sind entsprechend dem Haushaltsrecht des Bundes bzw. des Freistaates Sachsen zu vergeben.

Aufgrund der unterschiedlichen Überwachungsarten in den verschiedenen Bearbeitungsstufen ist vor Beginn der Bearbeitungsstufe die Vergabe dieser Leistungen zu prüfen und über die Notwendigkeit der Vergabe zu entscheiden. So werden Überwachungen im Rahmen der Sanierung und ggf. auch zur Nachsorge meist schon mit der Sanierungsbegleitung ausgeschrieben. Gutachterliche Leistungen zur Durchführung der Überwachung sind i. d. R. im Verhandlungsverfahren nach vorheriger Preisanfrage zu vergeben. Dies gilt nicht für technische Leistungen, welche in Abhängigkeit vom Kostenumfang anfallen.

Wenn das Auftragsvolumen die von der EU periodisch festgelegten Schwellenwerte überschreitet, sind die zutreffenden Vergabeverordnungen (z. B. VgV, VOB/A, KonzVgV, SektVO) zu berücksichtigen. Gleiches gilt auch für Vergaben unterhalb der Schwellenwerte (z. B. LandesvergabeG, VOL/A, VOB/A, UVgO).

Es wird empfohlen, das Honorar in Anlehnung an § 3 Abs. 2 HOAI zu vereinbaren. Die Vergabe der VgV/VOB-/VOL-Leistungen erfolgt entsprechend den im Gutachtervertrag festgelegten Modalitäten.

Bei der Vergabe der technischen Leistungen, insbesondere der Analytik-Leistungen aber auch bei der Probenahme, ist hinsichtlich des Umfangs der Ausschreibung und Vergabe auf eine Kontinuität in der Durchführung und der damit verbundenen Qualitätssicherung (z. B. Vorlage von Akkreditierungen/Nachweisen für die Probenahme und Analytik der Parameter, Bestimmungsverfahren, Bestimmungsgrenzen) zu achten.

### **Festlegung eines Termin- und Ablaufplanes**

Nach Festlegung des Überwachungserfordernisses ist durch den Verpflichteten in Abstimmung mit seinem Gutachter ein grober Zeitplan aufzustellen, welcher zugleich der Angebotsabforderung für die potentiell zu beauftragenden Firmen beiliegt. Der Zeitplan ist anhand des Anlasses und des Umfangs der Überwachung mit dem gutachterlichen Angebot zu verifizieren.

Überwachungen während und nach der Sanierung sind bezüglich der vorzunehmenden Überwachungszyklen im Sanierungsplan festgelegt und danach umzusetzen.

Abweichungen davon bedürfen der behördlichen Zustimmung unter Zugrundelegung der aktuellen und konkretisierten Erkenntnisse.

Eine weitere Konkretisierung erfährt der Termin- und Ablaufplan in der Regel im Ergebnis des Überwachungskonzeptes, da sich aus den konkreten Standortverhältnissen noch Abweichungen ergeben können.

## **6.4 Bestandsaufnahme/Ortsbegehung**

### **Bestandsaufnahme**

Da sich die Notwendigkeit einer Überwachung aus der vorangegangenen Stufe der Altlastenbearbeitung ableitet, liegen in der Regel bereits Berichte, Daten und Auswertungsergebnisse zum Standort vor. Abhängig von der Bearbeitungsstufe und der Zielstellung der Überwachung sind diese Unterlagen im Rahmen der Bestandsaufnahme zu sichten, für die Planung der Überwachung zusammenzustellen und bei Bedarf zu ergänzen. Zu berücksichtigen ist dabei insbesondere das konzeptionelle Standortmodell (Verknüpfung aller verfügbaren Eingangsdaten zur Charakterisierung des Standortes), da dieses wesentlich für die Fragen „wo?“ und „wie?“ zu beproben ist.

Die wesentlich zu berücksichtigenden Punkte sind:

- Lage, Besitzverhältnisse, Zugänglichkeit des Standortes, Oberflächenmorphologie (zur Lage gehören: Flurstücksnummer, Altlastenkennziffer (AKZ), Höhe – und Lagekoordinaten mit Angabe des Koordinatensystems (ETRS89/UTM-Koordinatensystem), Lagepläne,
- Geologische, hydrogeologische und hydraulische Bedingungen einschließlich Betroffenheit von Oberflächengewässern,
- zu überwachende Schadstoffe (Konzentration, Verteilung, Schadstoffinventar, Schadstoffcharakteristik),
- Biogeochemische Daten (Redoxmilieu, natürlicher Schadstoffabbau),
- Transportverhalten, Schadstoffausbreitung (stationär oder sich ausdehnend),

- zu überwachende Wirkungspfade und davon betroffene Schutzgüter (Exposition),
- derzeitige und planungsrechtlich zulässige Nutzung des Standortes,
- Ergebnisse der Gefährdungsabschätzung einschließlich ggf. vorhandener Sanierungsziele,
- optional: Art und Umfang durchgeführter Sanierungsmaßnahmen und deren Ergebnis hinsichtlich der aktuellen Schadstoffverteilung,
- vorhandenes Messnetz, Prüfung der Unterlagen auf:
  - Messstellenumfang (alle beschriebenen Messstellen vorhanden?),
  - Messstellenpässe (Schichtenverzeichnis, Ausbauezeichnung, Foto, Leitparameter, Probenahmevergaben, Lage und Höhe), ggf. Messstellenstammdatenbank,
  - vorhandene Analysedaten,
  - Eignung für Überwachung (Filterlage in zu überwachendem GWL),
  - Hinweise auf nachlassende Funktionsfähigkeit der Messstellen.

## Ortsbegehung

In Abhängigkeit vom Umfang und zeitlichen Verlauf der bisherigen Untersuchungen ist im Rahmen der Bestandsaufnahme eine Ortsbegehung vorzusehen. Im Rahmen dieser sollten vor allem folgende Punkte geprüft werden:

- Ist die Grundwassermessstelle angemessen zugänglich bzw. sind die Hindernisse ausräumbar? Entspricht die Lage den Planunterlagen? Stimmt die Beschriftung?
- Ist das Ausbaumaterial ausreichend inert gegenüber den zu überwachenden Schadstoffen, z. B. Edelstahl, HDPE, PVC-hart?
- Ist die Grundwassermessstelle äußerlich intakt und stimmt das visuelle Erscheinungsbild mit den Bestandsdaten überein (Abschluss des Schutzrohres zur Geländeoberfläche, Risse, Deformationen am Schutz- bzw. Vollrohr, Abweichungen des Schutz- bzw. Vollrohres zur Lotrechten, undichte bzw. fehlende Verschlusskappe)?
- Stimmt die gelotete Tiefe mit der angegebenen Tiefe auf  $\pm 0,5$  m überein und ist das Ein- und Ausfahren der Probenahmeeinrichtung problemlos möglich?
- Vor-Ort-Prüfung von Randbedingungen zur Durchführung der Überwachung (Betretung von Fremdgrundstücken, Sicherung der Zugänglichkeit).

Eine solche Ortsbegehung ist insbesondere bei diskontinuierlichen Überwachungen und verändertem Messnetz zu empfehlen. Eine weitergehende technische Überprüfung vor Ort ist nur dann erforderlich, wenn es Hinweise auf Fehlfunktionen der Messstelle gibt. Die Überprüfungen können folgende Maßnahmen umfassen (siehe auch Merkblatt Funktionsprüfung von Messstellen [4]):

- Pump- oder Infiltrationstest zur Prüfung, inwieweit der Filter hydraulisch ausreichend an den Grundwasserleiter angeschlossen ist bzw. ob es Hinweise auf eine Messstellenalterung gibt. Dies wird optional bereits nach Errichtung der Grundwassermessstellen (nach dem Klarpumpen) erstmals durchgeführt,
- Wasserdrucktests zur Prüfung der Dichtigkeit des Vollrohres über dem Filterrohr (Filter wird durch einen Packer verschlossen) [58],
- Kamerabefahrung,
- Geophysikalische Untersuchungen zur Überprüfung der Lage und Wirksamkeit der Dichtung.

Im Ergebnis der Ortsbegehung und der Funktionsprüfungen [4] sind die Angaben im Messstellenpass zu prüfen und ggf. zu aktualisieren. Ergeben die Kontrollen, dass aufgrund von Schäden am Ausbau oder Alterung die Messstelle nicht mehr zweckgemäß eingesetzt werden kann, ist zu prüfen, ob die Funktion mit einem angemessenen Regenerierungsaufwand wieder hergestellt werden kann [25]. Ist dies nicht

möglich, so ist ein Neubau vorzusehen. Aufgegebene Messstellen sind fachgerecht zurückzubauen (siehe auch Merkblatt Rückbau von Messstellen [2]).

Im Ergebnis der Bestandsaufnahme, spätestens aber mit der Vorlage des Überwachungskonzepts, ist weiterhin festzustellen, inwieweit das vorhandene Messnetz für die Anforderungen an die Überwachung und zur Erfüllung des Überwachungsziels fachlich geeignet ist und welche Defizite bestehen.

Im Rahmen der Bestandsaufnahme werden sämtliche Informationen zusammengetragen, die für ein Verständnis der Schadstoffverteilung, der Schadstoffmigration und deren Überwachung notwendig sind. Sollten sich im Ergebnis der Bestandsaufnahme/Ortsbegehung Abweichungen zum konzeptionellen Standortmodell ergeben, so wäre dies zu aktualisieren.

## 6.5 Erstellung des Überwachungskonzeptes

Das vom Gutachter zu erarbeitende **Überwachungskonzept**<sup>3</sup> (vgl. Kapitel 3) stellt die organisatorische und fachliche Grundlage der durchzuführenden Maßnahme dar und beschreibt den wesentlichen Ablauf einschließlich der Verantwortlichkeiten.

Wurde das konkrete Überwachungsziel nicht schon behördlich vorgegeben, so ist dieses konkret zu formulieren auf Grundlage von:

- Überwachungsanlass,
- Ergebnis der standortbezogenen Altlastenbearbeitung mit der vorhandenen bzw. prognostizierten Schutzgutgefährdung und
- Bestandsaufnahme.

Wesentlicher Bestandteil eines **Überwachungskonzeptes** ist das **Überwachungsprogramm** (vgl. Kapitel 3) mit der Festlegung, „wo?“ (Überwachungsstellen) soll „was?“ (Umweltmedium, Parameter, bei GW: Grundwasserleiter) „wie?“ (Probenahme und Analytik, Turnus) gemessen bzw. kontrolliert werden und welche Bewertungsmaßstäbe werden angelegt (Kontrollwerte mit Definition von Handlungserfordernissen bei deren Überschreitung).

Inhalt und Umfang der Überwachung während und nach der Sanierung sind im Sanierungsplan, einschließlich des Qualitätssicherungsplanes grundsätzlich festgelegt, welcher von der zuständigen Behörde rechtlich bestätigt bzw. angeordnet wurde.

Hinsichtlich der Überwachung während und nach einer Sanierung sollte der gemäß Sanierungsplan festgelegte Überwachungsumfang anhand der Ergebnisse der Sanierung geprüft und ggf. angepasst werden. Erforderlich ist dies insbesondere bei Abweichungen vom Sanierungsplan bezüglich:

- Nichterreicherung der Sanierungsziele,
- Verbleib von nicht geplanten Restkontaminationen am Standort,
- konzeptionelles Standortmodell.

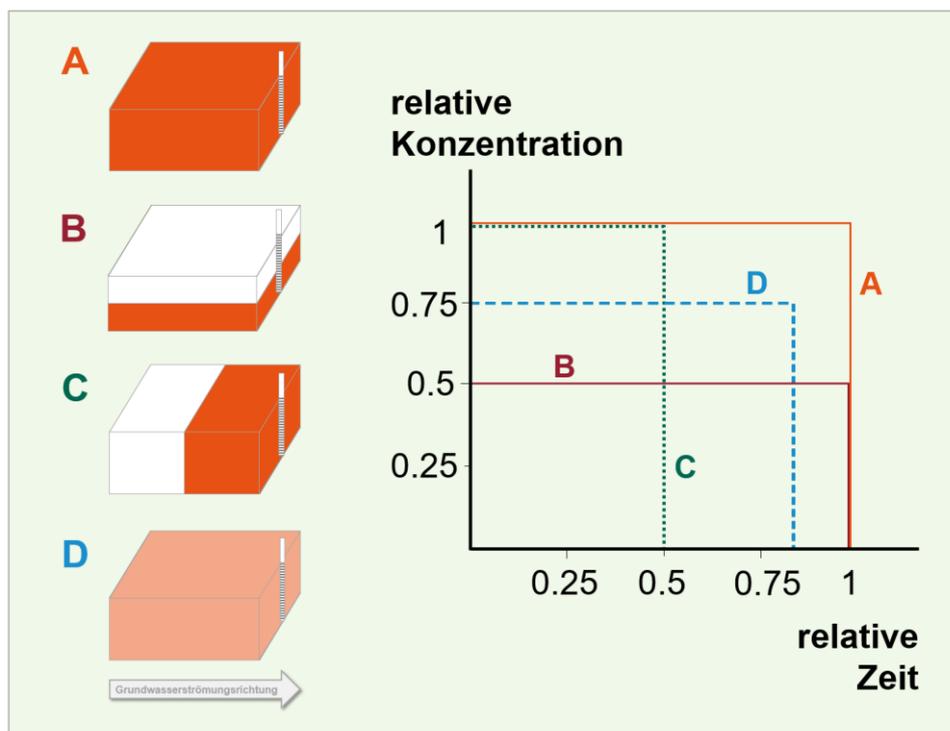
Insbesondere bei der Überwachung des Grundwassers nach einer (Teil-)Bodensanierung sind ausreichende Kenntnisse zum verbliebenen Schadstoffpotenzial und dessen Lage im Betrachtungsraum erforderlich. Abhängig davon, ob die Quelle oder Teile davon noch vorhanden sind, ist die Dauer der Emission

---

<sup>3</sup> Dieses einzelfall- und standortbezogene Überwachungskonzept ist nicht zu verwechseln mit dem Überwachungskonzept des Freistaats Sachsen [79] aus dem jährlichen Überwachungserlass.

aus dem Schadensherd unterschiedlich. Das ist in Abbildung 4 gezeigt. Der Quader stellt den Schadensherd dar. An der Abstromseite (Quellenrand) befindet sich eine Grundwassermessstelle, die – entgegen guter fachlicher Praxis – zur Veranschaulichung im Schema über die gesamte Mächtigkeit des Schadensherdes verfiltert ist. Je intensiver die Farbe, desto höher ist die Schadstoffkonzentration (weiß = nicht kontaminiert). Die rechte Seite der Grafik zeigt den normierten Konzentrationsverlauf der Schadstoffe über die Zeit für die vier Fälle A bis D.

Im Fall A, einem unbehandelten Schadensherd, emittiert dieser mit konstanter und hoher Konzentration über einen sehr langen Zeitraum Schadstoffe in die Schadstofffahne. Sowohl Konzentration als auch Emissionsdauer wurden im Fall A auf den Wert 1 normiert. Im Fall B, in dem die Ausdehnung der Quelle in der Fläche quer zur Grundwasserfließrichtung vermindert wurde, verringert sich auch die Schadstoffkonzentration an der Emissionsmessstelle (und abstromig davon innerhalb der Schadstofffahne), nicht aber die Gesamtdauer der Emission. Im Fall C, bei dem die Länge der Quelle in Fließrichtung vermindert wurde und im Fall D, bei dem die Schadstoffbelastung innerhalb des gesamten Schadensherdes vermindert wurde, verringert sich die Dauer der Emission entsprechend, während die Schadstoffkonzentrationen an der Abstromseite gleich hoch bleiben. Nur bei Fall B wird sich innerhalb der Schadstofffahne unter Berücksichtigung der Retardierung und Rückdiffusion ein neues, auf einem niedrigeren Niveau liegendes Konzentrationsgleichgewicht einstellen. Diese Verhältnisse sind bei der Planung der Überwachung nach der Sanierung zu berücksichtigen.



**Abbildung 4: schematische Darstellung der Konzentrationsänderungen in der Fahne abhängig von der Quellensanierung [33], [50]**

Basierend auf den Ergebnissen der Bestandsaufnahme/Ortsbegehung und des konzeptionellen Standortmodells beinhaltet das einzelfallbezogene Überwachungskonzept damit folgende Punkte, welche im Laufe der Bearbeitung ggf. modifiziert werden können bzw. müssen.

- Überwachungsanlass/-ziel,
- zu überwachende Wirkungspfade und die zu beprobenden Umweltkompartimente (Boden, Grundwasser, Oberflächenwasser, Bodenluft, Innenraumluft),
- Art und Umfang erforderlicher Überwachungsmaßnahmen und sonstiger Maßnahmen mit der jeweiligen Begründung,
- Überwachungsmessstellen (Mess- oder Kontrollstellen),
- Überwachungsparameter, Probenahmeverfahren, Transportbedingungen, Analyse- und Messverfahren, Kontrollwerte,
- Überwachungszyklus,
- Dauer der Überwachung,
- Kriterien zur Bewertung der Überwachungsergebnisse (z. B. Sanierungszielwerte oder Prüfwerte<sup>4</sup>),
- Kriterien zur Anpassung oder Optimierung der Überwachung,
- Kriterien zur Beendigung der Überwachung,
- Definition der Bedingungen, bei denen ein Handlungsbedarf für weitere Maßnahmen besteht (z. B. Abbruchkriterien bei MNA-Überwachungen),
- Vorgaben Arbeits- und Sicherheitsbestimmungen entsprechend der TRGS 524 [12] und den entsprechenden Unfallverhütungsvorschriften nach DGUV-Regeln<sup>5</sup>,
- Qualitätssicherung,
- Sonstige standortbezogene Randbedingungen,
- Termin- und Ablaufplan,
- Berichterstattung (Dokumentation und Bewertung der Ergebnisse).

Soweit das Überwachungskonzept nicht im Zusammenhang mit dem Sanierungsplan von der Behörde rechtlich bestätigt wird, ist es der Behörde als separates Dokument zur Bestätigung vorzulegen. Bei Abweichungen vom bestätigten Sanierungsplan ist zu prüfen, ob dies auch das Überwachungskonzept betrifft und eine erneute Bestätigung der Behörde erfordert.

Der Termin- und Ablaufplan ist unter Berücksichtigung der Zielstellung der Überwachung und bestehender Randbedingungen auszuarbeiten. Bei der zeitlichen Planung sind dabei u. a. zu berücksichtigen:

- Vorlage von erforderlichen Genehmigungen und Erlaubnissen (z. B. Betretungs- und Beprobungsgenehmigungen, wasserrechtliche Erlaubnisse, Einleitgenehmigungen bei Wasserentsorgungen), Vorgaben zu Überwachungszeitpunkten (z. B. klimatische Verhältnisse bei Luftbeprobungen, hydraulische Verhältnisse bei Grund- und Oberflächenwasserbeprobungen),
- Erforderliche Zeiträume für Probenahme und Analytik,
- Vorgaben zur Dokumentation,
- Erforderliche Zeiträume für die Bewertung der Überwachungsergebnisse durch die Beteiligten.

---

<sup>4</sup> mit Inkrafttreten der Novellierung der BBodSchV am 01.08.2023 wurden einige Prüfwerte angepasst. Die aktuellen Prüfwerte sind in BBodSchV Anlage 2 dargestellt.

<sup>5</sup> [http://www.dguv.de/de/praevention/vorschriften\\_regeln/regeln\\_infos/index.jsp](http://www.dguv.de/de/praevention/vorschriften_regeln/regeln_infos/index.jsp)

Für alle in die Überwachung einzubeziehenden Messstellen sollten neben dem Messstellenpass eine Messstellenakte (weitere relevante Informationen), Bohransprache, (s. auch Muster im Handbuch Grundwasserbeobachtung, Teil 5: Grundwasserprobenahme [1]) vorliegen bzw. erstellt werden. In diesen Dokumenten sind alle Daten und Angaben zu Messstellen (z. B. Lage, Art und Zustand, Schichtenverzeichnis und -ausbau, Probenahmevergaben) enthalten.

## 6.6 Erstellung des Überwachungsprogrammes

Anhand des Überwachungsanlasses mit dem entsprechenden Überwachungsziel und der erfolgten Bestandsaufnahme ist im Überwachungskonzept das standortkonkrete **Überwachungsprogramm** festzulegen.

Das Überwachungsprogramm als Teil des Überwachungskonzeptes beschreibt die konkreten technischen und analytischen Maßnahmen zur Umsetzung der Überwachung.

Dieses beinhaltet im Wesentlichen:

- Überwachungsmessnetz,
- Überwachungs-/Probenahmestellen,
- Überwachungsziele,
- Art und inhaltlicher Umfang der Probenahme,
- Parameter,
- Dokumentation der Probenahme,
- Besonderheiten.

Das Überwachungsprogramm ist unter Beteiligung der Projektbeteiligten anhand der jeweiligen aktuellen Ergebnisse ggf. anzupassen. Hinsichtlich der Überwachung von NA-Prozessen wird auf die Anforderungen gemäß [50] und die Ausführungen im Teil B II.12 verwiesen.

### Probenahme

Für die Probenahme von Grundwasser, Oberflächenwasser, Bodenluft und Boden sowie deren Qualitätssicherung gelten einschlägige technische Regelwerke oder bundes- bzw. landespezifische Vorgaben [56], [7], [22], [64], [19], [69], [1]. Eine repräsentative und qualitätsgerechte Probenahme hat entscheidenden Einfluss auf die Gefährdungsabschätzung. Um an Grundwassermessstellen vergleichbare Probenahmebedingungen zu gewährleisten, empfiehlt sich deren weitgehende Standardisierung (z. B. Pumprate, Pumpdauer, Einhängtiefe der Entnahmepumpe, abgepumptes Filtervolumen, etc.), so können probenahmebedingte Einflüsse minimiert werden [1].

Es ist zu beachten, dass alle Brunnen und Grundwassermessstellen einer Alterung unterliegen. Bei Überwachung über lange Zeiträume ist es daher erforderlich, die gemessenen Daten (Feld- und Probenahmeparameter, auslotbare Messstellentiefe) mit denen der Messstellendatenbank bzw. des Messstellenpasses zu vergleichen. Damit kann eine Alterung der Messstelle (Versandung, Verblockung) und damit verbunden deren hydraulische bzw. hydrochemische Funktionstüchtigkeit erkannt werden. Bei deutlichen Veränderungen sind weitere Untersuchungen und gegebenenfalls Regenerierungsmaßnahmen erforderlich.

Bei jeder Probenahme ist der innere und äußere Zustand der Messstelle festzuhalten (Verkehrssicherheit, Beschädigungen), um erforderliche Maßnahmen einzuleiten (z. B. Kamerabefahrung, Reparatur).

### Analysenparameter

Für die Analytik von Grundwasser-, Oberflächenwasser-, Bodenluft- und Bodenproben sowie deren Qualitätssicherung sind akkreditierte Labore heranzuziehen. Bei Überwachungsaufgaben mit Trendermittlung

kommt es dabei insbesondere auf die Vergleichbarkeit der Analyseergebnisse an, die durch Standardisierung (über DIN-Normen, Bestimmungsgrenzen) gewährleistet werden kann, so dass laborbedingte Einflüsse minimiert werden.

Der Parameterumfang bei Überwachungen hängt von verschiedenen Einflussfaktoren ab, insbesondere aber dem Ziel der jeweiligen Überwachung. Grundlage sind die Parameter, die in der Erkundung und ggf. Sanierung als relevant festgestellt wurden (**relevante Parameter**). Bei komplexen Kontaminationen ist es i. d. R. sinnvoll für die Überwachungen **Leitparameter** zu definieren, die eine Aussage zur Entwicklung des Gefahrenlagenpotenzials erlauben. Bei der Auswahl der Leitparameter sind insbesondere die stoffspezifischen Eigenschaften bzw. Gefährdungen (z. B. Mobilität, Abbaubarkeit, Toxizität) und deren Wirksamkeit im Überwachungsraum zu berücksichtigen, außerdem spielen bei Langzeitüberwachungen Wirtschaftlichkeitskriterien eine Rolle. Zum Nachweis des Abbaus von organischen Schadstoffen (z. B. im Rahmen von MNA) sind weitere Parameter wie Abbauprodukte bzw. Parameter zur Charakterisierung der Milieubedingungen bzw. Redoxverhältnisse notwendig. Auch im Rahmen von Sanierungen können sich spezifische Parameter z. B. aus dem Arbeitsschutz ergeben. Im Teil B, I sind gemäß den vom LfULG herausgegebenen Branchenbezogenen Merkblättern zur Altlastenbehandlung relevante Parameter angegeben. Diese Übersicht ist anhand der konkreten Standortverhältnisse anzupassen.

Neben Einzel- bzw. Leitparametern ist der Einsatz von **biologisch-ökotoxikologischen Untersuchungen** (kurz: Biotests) zu prüfen, die insbesondere bei komplexen Kontaminationen eine Aussage zur summarischen Wirkung der Schadstoffe ermöglichen. Ergänzende Ausführungen zu den Analysenparametern erfolgen im Teil B, III.4.

### Überwachungsturnus

Die erforderliche Häufigkeit der Beprobungen hängt von einer Reihe von wesentlichen Einflussgrößen ab (vgl. Abbildung 5), deren Ausmaß zu Beginn der Überwachung aus den vorangegangenen Untersuchungen bekannt sein sollte:

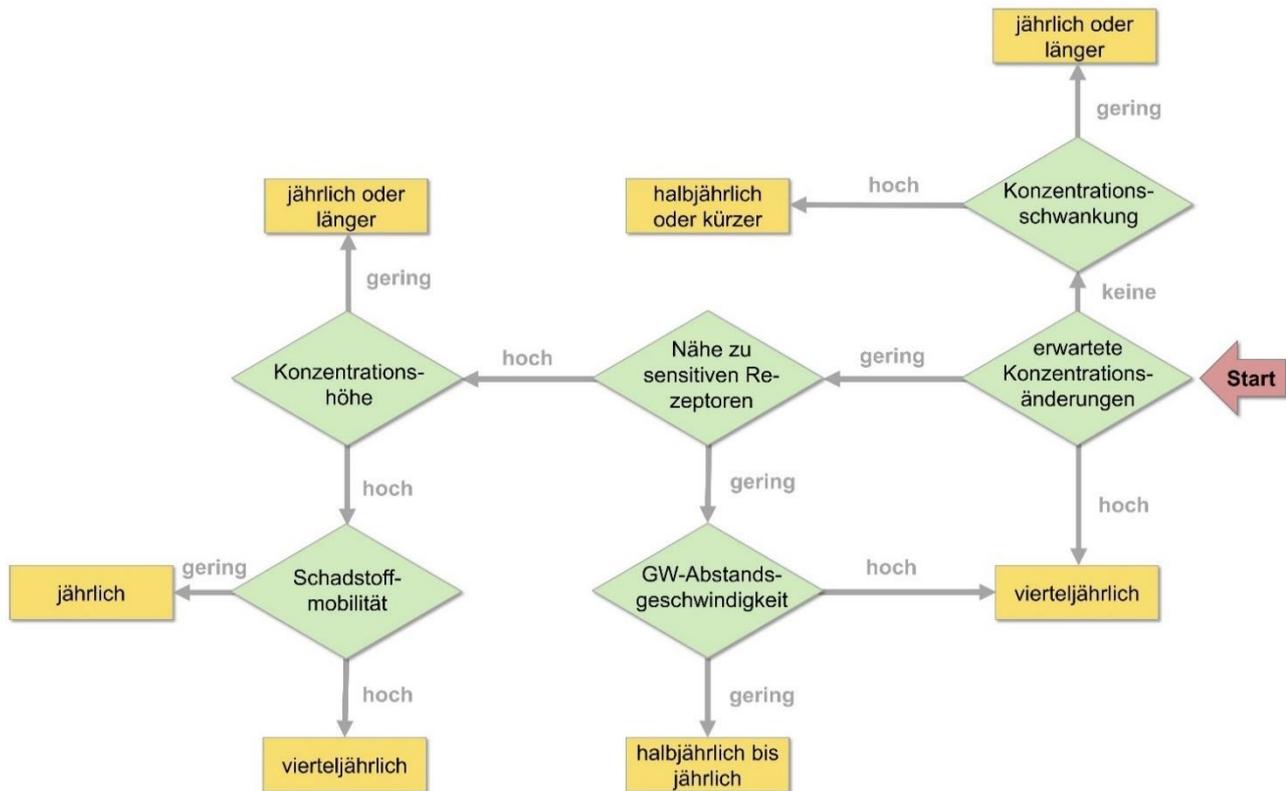
- Mobilität der Schadstoffe,
- Höhe der Schadstoffkonzentrationen,
- Grundwasserabstandsgeschwindigkeit,
- Konzentrationsschwankungen,
- Rate der Konzentrationsänderung,
- Nähe zu sensiblen Schutzobjekten.

Diese Angaben sind vor Festlegung der Überwachungszyklen zu prüfen und im Untersuchungskonzept anzugeben. Die Beprobungshäufigkeit innerhalb eines Überwachungszyklus ist unter Berücksichtigung der

- hydrologischen Verhältnisse (z. B. Grund- und Oberflächenwasserstände, Grundwasserneubildung),
- hydrochemischen Verhältnisse (Orte der Retardation/Akkumulation),
- nutzungsabhängigen Verhältnisse/Bedingungen (z. B. Aussaat, Ernte)

auszurichten.

Insgesamt muss die Überwachung umso intensiver gestaltet werden, je unsicherer die Prognose der künftigen Schadstoffausbreitung ist [6]. Bei langen Überwachungszyklen (> 2 Jahre) ist die Prüfung der Funktionsfähigkeit der Messstellen zu beachten.



**Abbildung 5: Abhängigkeit der Beprobungshäufigkeit von verschiedenen Einflussfaktoren**

Bei Unsicherheiten ist für den Beprobungsturnus zunächst ein fester zeitlicher Abstand zu wählen, der dann in Abhängigkeit von den Ergebnissen anzupassen ist. Untersetzende Ausführungen zu den einen Überwachungsturnus beeinflussenden relevanten Faktoren erfolgen im Teil B, III.5, Tabelle 8.

### Messnetze

In einem Überwachungskonzept werden entsprechend der Aufgabenstellung Messnetze für Grundwasser, Oberflächenwasser bzw. Bodenluft festgelegt in Abhängigkeit von den Wirkungspfaden, Schadstoffen und hydrogeologischen Gegebenheiten eines konkreten Standortes. Die vom Standort stammenden Schadstoffemissionen müssen durch das Messnetz repräsentativ erfasst werden. Dafür sind in erster Linie Messstellen zu berücksichtigen, welche relevante Schadstoffbelastungen aufweisen. Spezielle Hinweise zu den verschiedenen Messnetzen sind im Teil B III.1– III.3 zu finden.

## 6.7 Abstimmung mit der Behörde/Aufgaben und Entscheidungen der Behörde

Im Rahmen der Vorbereitung der Überwachung sollte insbesondere bei umfangreichen oder langlaufenden Überwachungsmaßnahmen geplant werden, regelmäßige Absprachen zwischen Verpflichteten, Gutachtern und zuständigen Behörden durchzuführen.

Entscheidungen, die von der zuständigen Behörde zu treffen sind, müssen verhältnismäßig sein. Im Rahmen der Planung von Überwachungsmaßnahmen beinhalten diese schwerpunktmäßig:

- Entscheidung zur Durchführung der Überwachung in den verschiedenen Bearbeitungsstufen,
- Festlegung der Aufgaben und Tätigkeiten von Verpflichteten als Eigenkontrollmaßnahmen nach § 15, Abs. 2 BBodSchG,
- Festlegung der Überwachungsziele und Vorgaben zu standortbezogenen Bewertungen,
- Prüfung und Bestätigung des Überwachungskonzeptes mit Untersuchungsprogramm auf Vollständigkeit und Eignung.

Die behördlichen Vorgaben, Prüfungen und Entscheidungen sind schriftlich zu dokumentieren – siehe auch Kap. 9.

## 7 Durchführung und Auswertung der Ergebnisse eines Überwachungszyklus

Im Folgenden sind Hinweise zur Durchführung und Auswertung von Überwachungsmaßnahmen dargestellt. Ferner wird auf Handlungsoptionen und Qualitätssicherung innerhalb der Arbeitsschritte und die Aufgaben der zuständigen Behörden eingegangen.

### 7.1 Durchführung der Überwachung

Nach Abschluss der Vorbereitung erfolgt die Durchführung der Überwachung gemäß Überwachungskonzept bzw. Sanierungsplan, einschließlich Qualitätssicherungsplan.

Wesentliche Schwerpunkte bei der Durchführung der Überwachung sind dabei:

- Mitteilung an die Beteiligten zu Beginn und Abschluss der Überwachung,
- Verwendung funktionstüchtiger Probenahmesysteme und Messgeräte,
- Einhaltung der fachlichen Vorgaben zur Überwachung (z. B. Probenahme und Analytik) gemäß der o. g. Planung bzw. Konzepte,
- Einhaltung qualitätssichernder Maßnahmen (Kapitel 7.4),
- Einhaltung Gesundheits- und Arbeitsschutz,
- Mitteilung an den Auftraggeber bzw. die Behörde bei Abweichungen der Überwachung im Vergleich zur Planung und Abstimmung zum weiteren Vorgehen (Fortsetzung, Anpassung oder Abbruch).

Während der Überwachung ist eine Dokumentation der durchgeführten Maßnahmen mit begründeter Darstellung von Abweichungen vorzunehmen.

### 7.2 Dokumentation/Auswertung der Überwachung

Am Ende jedes Überwachungszyklus bzw. nach Abschluss der Überwachung sind die Ergebnisse in geeigneter Form zu dokumentieren. In der Regel erfolgt dies im Rahmen eines Zwischen- oder Abschlussberichts.

Die im Rahmen der Vorbereitung vorzugebenden Inhalte der Dokumentation haben sich an Aufgabenstellung und Zielsetzung zu orientieren. Die ermittelten Ergebnisse sind in geeigneter Form darzustellen und auszuwerten sowie nachfolgend anhand der Sanierungs- bzw. Überwachungsziele (Bewertungsgrundlagen) zu bewerten. Die relevanten Fakten sind unter Einbeziehung von bereits vorliegenden Erkenntnissen darzustellen und zu bewerten. Bei der Überwachung (Nachsorge<sup>6</sup>) einer durchgeführten Sanierungsmaßnahme, ist der Nachweis des Sanierungserfolges zu diskutieren.

---

<sup>6</sup> Der Begriff der Nachsorge bezieht sich auf die Regelungen des BBodSchG und der BBodSchV. Er ist im betrachteten Zusammenhang der Altlastenbearbeitung nicht mit dem Nachsorgebegriff aus dem Abfallrecht (KrWG; DepV) gleichzusetzen.

Der Bericht sollte folgende Schwerpunkte enthalten:

- Zusammenfassung,
- Anlass und Ziel,
- Verwendete Unterlagen,
- Standortbeschreibung (Historie, Geologie/Hydrologie/relevante Zonen, Visualisierung (Rest)schaden, Ergebnis der bisherigen Untersuchungen),
- Überwachungskonzept mit geplantem Untersuchungsprogramm,
- Realisiertes Untersuchungsprogramm der Überwachung,
- Darstellung und Auswertung der Ergebnisse der Überwachung,
- Bewertung,
- Handlungsempfehlungen.

Weiterhin sind die Daten für SALKA und UHYDRO an die zuständigen Behörden zu übergeben.

Um eine zeitnahe Information über den aktuellen Sachstand zur Standortsituation sowie dessen Bewertung zu erhalten und damit verbunden auch die Möglichkeit einer Anpassung des Überwachungsprogramms, können Zwischenberichte zweckmäßig sein.

Die beizulegenden Anlagen sind so auszuwählen, dass die textlichen Aussagen prüfbar und nachvollziehbar sind. In der Regel kann dies neben den Probenahmeprotokollen und Prüfberichten des Labors in Form von tabellarischen Übersichten, Lageplänen und Graphiken erfolgen. Der Umfang ist im Rahmen der Auftragserteilung abzustimmen, sollte jedoch einen möglichst vollständigen Überblick über den Standort ermöglichen und relevante Kernaussagen von vorangegangenen Gutachten enthalten.

Die Auswertung der Überwachungsergebnisse kann anhand:

- tabellarischer und graphischer Darstellungen zur zeitlichen und räumlichen Schadstoffentwicklung,
- Trendanalysen (vgl. Teil B, VIII),
- Frachtberechnungen (vgl. Teil B, IV) und
- vergleichender Betrachtungen zur Prognose

durchgeführt werden.

Ist in der Phase der Gefährdungsabschätzung oder Sanierungsuntersuchung ein hydraulisches und/oder Stofftransportmodell entwickelt und eingesetzt worden, sollte dies auch während der Überwachungsphase zur Datenauswertung und Darstellung der Gefahrensituation verwendet werden. Werden während der Überwachung signifikante neue Erkenntnisse gewonnen, kann eine Aktualisierung des Modells erforderlich sein. Da sich die Nachsorge<sup>6</sup> über einen sehr langen Zeitraum erstrecken kann, muss das verwendete Modell zur Wahrung der Kontinuität auch für eventuell nachfolgende Bearbeitungen verfügbar bleiben und bei entsprechender Fortentwicklung der Software aktualisiert werden können.

Am Ende der Bewertung steht die Entscheidung, inwieweit bzw. ob

- die Überwachung unverändert fortgesetzt werden muss,
- die Überwachung mit entsprechenden Optimierungen oder Anpassungen fortgesetzt werden kann bzw. muss,
- die Überwachung beendet werden kann oder ob
- ggf. weitere Maßnahmen, z. B. Sanierungsmaßnahmen oder Schutz- und Beschränkungsmaßnahmen ergriffen werden müssen (z. B. Rückfalloptionen bei MNA-Überwachungen).

Die Ergebnisse sind so zu dokumentieren und fachlich zu bewerten, dass die Behörde in die Lage versetzt wird, in Abhängigkeit von den Zielstellungen, Festlegungen zur Fortsetzung, Anpassung/Optimierung bzw.

Beendigung der Überwachung und den damit im Zusammenhang stehenden Maßnahmenentscheidungen (z. B. Anpassung/Beendigung von Sanierungsmaßnahmen, Abbruch MNA-Überwachung bei Nichterfüllung der Prognose) zu treffen.

Eine Neubewertung der Gefahrenlage ist bei erheblichen Abweichungen zwischen den Überwachungsergebnissen und der Prognose und bei Änderungen der Rahmenbedingungen (beispielsweise Änderung der Nutzung, neue Grundwasserentnahmen in der Nähe) erforderlich. Gegebenenfalls muss der Umfang des Überwachungsprogrammes an die veränderte Sachlage angepasst werden.

### 7.3 Handlungsoptionen

Nach Abschluss eines Überwachungszyklus gemäß Sanierungsplan bzw. Überwachungskonzept sind anhand der Ergebnisse Festlegungen zum weiteren Vorgehen zu treffen (Entscheidungsfenster). Eine Überwachung soll bis zur Klärung der Gefahrenlage (sofern nicht im Rahmen der Erkundungsstufen bereits erfolgt) bzw. bis zum Erreichen der Sanierungsziele bzw. Überwachungsziele weitergeführt und danach beendet werden. Ist das Erreichen des Sanierungs- bzw. Überwachungszieles unwahrscheinlich bzw. unverhältnismäßig (Abgleich der Schadstoffentwicklung zwischen Prognose und Realität), sind die folgenden prinzipiellen Möglichkeiten zu prüfen und zu entscheiden:

- erneuter Handlungsbedarf (aktive Sanierung oder Schutz- und Beschränkungsmaßnahmen),
- Prüfung und ggf. Anpassung des Überwachungszieles (d. h. der Sanierungsziele bzw. anderer Zielwerte bzw. Kontrollwerte),
- vorübergehende Einstellung der Überwachung,
- endgültige, vorzeitige Beendigung (Abbruch) der Überwachung.

Nachfolgend werden für die einzelnen Überwachungsanlässe mögliche Handlungsoptionen dargestellt. Im Ausnahmefall kann im Ergebnis einer **Orientierenden Untersuchung (OU)** eine Überwachung notwendig werden. Es können sich aus der Überwachung folgende Handlungsoptionen ergeben:

- Überschreitung von Kontrollwerten und Nachweis einer sich ausdehnenden Kontamination bzw. konkrete Anhaltspunkte für eine Gefahrenlage auch anderer Schutzgüter als Grundwasser und damit die Notwendigkeit der zeitnahen Durchführung einer Detailuntersuchung.
- Nachweis einer ortsstabilen Belastung und kalkulierbaren Gefahrenlage und damit die Möglichkeit einer (vorübergehenden) Einstellung der Überwachung. Weiterbearbeitung des Standortes als Detailuntersuchung ist nicht dringlich.
- Ausschluss einer Gefahr und damit Beendigung der Überwachung.

Im Ausnahmefall kann im Ergebnis einer **Detailuntersuchung (DU)** eine Überwachung notwendig werden. Es können sich aus der Überwachung folgende Handlungsoptionen ergeben:

- Überschreitung von Kontrollwerten bzw. Nachweis einer sich ausdehnenden Kontamination bzw. Gefahrenlage anderer Schutzgüter als das Grundwasser und damit verbunden die Notwendigkeit einer zeitnahen Durchführung einer Sanierungsuntersuchung. Parallel dazu ggf. Fortsetzung der Überwachung.
- Nachweis einer ortsstabilen Belastung und kalkulierbaren Gefahrenlage mit einer langfristigen Tolerierbarkeit des Schadens (keine prognostizierte, absehbare nachteilige Änderung der Randbedingungen) und damit Beendigung der Überwachung möglich. Bei Schutz- und Beschränkungsmaßnahmen weitere Überwachung notwendig. Weiterbearbeitung des Standortes mit Sanierungsuntersuchung ist nicht dringlich.
- Ausschluss einer Gefahr und damit Beendigung der Überwachung.

Treten bei der Überwachung mit unklarer Gefahrenlage bzw. nicht zeitnaher Weiterbearbeitung erhöhte Gefahrenlagen (Überschreitung von Kontrollwerten) auf, ist der Standort unmittelbar weiter zu bearbeiten und ggf. auch weiter kontinuierlich zu überwachen.

Aus den Ergebnissen der Überwachung nach der **Sanierungsuntersuchung (SU)** können folgende Fälle abgeleitet werden:

- Bestätigung der räumlichen Kontaminationsverbreitung zur Sicherung der Datenbasis und Entscheidung für die nachfolgend festgelegte Sanierung.
- Deutliche Zunahme der horizontalen und vertikalen Kontaminationsverbreitung bzw. abweichende Milieuverhältnisse. Damit Überprüfung der vorgesehenen Sanierungs- und Überwachungsbereiche und ggf. der geeigneten Sanierungsverfahren im Rahmen der Sanierungsplanung anhand der bisherigen Prognose.
- Deutliche Abnahme der horizontalen und vertikalen Kontaminationsverbreitung bzw. abweichende Milieuverhältnisse (z. B. durch verstärkt ablaufende Abbauprozesse). Damit Überprüfung der vorgesehenen Sanierungs- und Überwachungsbereiche und ggf. des Erfordernisses von Sanierungsmaßnahmen (Verhältnismäßigkeit).

Aus den Ergebnissen der Überwachung während und nach der **Sanierung (S)** können sich folgende Fallkonstellationen ergeben:

- Erreichung der Sanierungsziele bzw. Überwachungsziele und damit kein weiterer Handlungsbedarf.
- Nichterreichung der Sanierungsziele bzw. Überwachungsziele im Prognosezeitraum nach einer Sanierung bzw. Teilsanierung und damit weiterer Handlungsbedarf.

Ursachen für die Nichterreichung können sein:

- verbleibende Restkontaminationen (z. B. Phasenanreicherungen) führen zu einem verlängerten Schadstoffaustrag,
- Abweichungen bzw. Ungenauigkeiten in dem gemäß in der Phase der Detailerkundung erarbeiteten konzeptionellen Standortmodell,
- verändertes Schadstoffverhalten der einzelnen Schadstoffe oder der Mischkontaminationen (z. B. durch Wechselwirkungen),
- angewendetes Sanierungsverfahren weist eine geringere Wirksamkeit bezüglich der Entfernung bzw. Reduzierung des Schadstoffpotenzials auf.

Diese Ursachen erfordern in der Regel:

- Überprüfung und ggf. Anpassung des konzeptionellen Standortmodelles (bzw. der getroffenen modellhaften Annahmen)
- Prüfung der aktuellen Gefahrenlage im Ergebnis der bisherigen Sanierung,
- Ableitung erforderlicher weiterer Maßnahmen oder veränderter Sanierungsziele unter Berücksichtigung der Verhältnismäßigkeit bei Nichtbeendigung der Sanierung,
- Fortsetzung des bisher realisierten Sanierungsverfahrens bis zum Erreichen des Sanierungs- bzw. Überwachungsziels,
- Anwendung anderer geeigneter Sanierungsverfahren oder Kombinationsverfahren,
- Anwendung von Schutz- und Beschränkungsmaßnahmen.

Bei langlaufenden Maßnahmen ist die Überprüfung der Erreichung des Sanierungsziels während der Sanierung unbedingt erforderlich. So können rechtzeitig Entscheidungen zur Anpassung bzw. Beendigung der Überwachung getroffen werden.

## 7.4 Kontrolle und Qualitätssicherung

Eine wesentliche Voraussetzung für die fachgerechte Datenerfassung und die daraus resultierende Ableitung und Festlegung von Handlungsempfehlungen zur Überwachung ist die Vorlage repräsentativer und auswertbarer Daten. Um diese zu erhalten sind qualitätssichernde Maßnahmen durchzuführen und zu kontrollieren. Gerade bei Langzeitüberwachungen stellt die Qualitätssicherung eine wichtige Komponente dar. Diese QS-Maßnahmen und Kontrollen sind sowohl während der Überwachung, als auch im Rahmen der Auswertung vorzunehmen.

Die konkreten Maßnahmen der **Qualitätssicherung** sind im Sanierungsplan bzw. dem darin enthaltenen Qualitätssicherungsplan bzw. im Überwachungskonzept konkret enthalten. Deren Einhaltung ist während der Durchführung der Überwachung und der Auswertung kontinuierlich zu prüfen und berücksichtigen.

Schwerpunkte während der Durchführung der Überwachung sind:

- Mitführung erforderlicher Unterlagen zum Überwachungsmessnetz (Lagepläne, Messstellenpässe mit Schichtenverzeichnissen und Ausbaudaten, bisher vorliegende Daten zu Vor-Ort-Parametern während der Überwachung),
- Verwendung funktionstüchtiger Probenahmesysteme und Messgeräte,
- Reihenfolge der Probenahme von Messstellen mit geringen Schadstoffbelastungen hin zu Messstellen mit hohen Schadstoffbelastungen,
- Dekontamination der Probenahmesysteme zwischen den Probenahmen gemäß Vorschrift,
- ggf. Verwendung mehrerer Probenahmesysteme für unterschiedliche Schadstoffbelastungen,
- Kalibrierung der Messgeräte gemäß zeitlichen und inhaltlichen Vorgaben vor Ort oder im Labor,
- Gewährleistung des hydraulischen und hydrochemischen Abbruchkriteriums bei Grundwasserbeprobungen,
- Einhaltung Probenahmebedingungen gemäß Vorgabe (z. B. abzupumpendes Filtervolumen, Probenahmetiefe, Abpump- und Förderrate, Probenahme unter aeroben oder anaeroben Verhältnissen),
- Dichtheitsprüfung bei Bodenluftentnahmesystemen,
- Kontinuierliche Überwachung und digitale Aufzeichnung der Vor-Ort-Parameter,
- Gewährleistung der parameterspezifischen Stabilisierung der Proben (vor Ort oder im Labor),
- Kurze Transportzeiten zwischen Ende der Probenahme und Übergabe an das Labor (z. B. Einhaltung Kühlkette bei der Lagerung und dem Transport von gasförmigen bzw. leichtflüchtigen Schadstoffen),
- Einhaltung von vorgegebenen Lager- und Transportbedingungen und deren Dokumentation,
- Verwendung von standardisierten Probenahme- und Übergabeprotokollen,
- Ordnungsgemäße Kennzeichnung der Probenahmegefäße (ggf. Anonymisierung der Aufschlussbezeichnungen),
- Fotodokumentation.

Hinsichtlich der **Qualitätskontrolle** kann zwischen internen und externen Maßnahmen unterschieden werden.

### *Interne Qualitätskontrolle*

Wesentliche Bestandteile der internen Qualitätskontrolle sind beispielhaft die Umsetzung firmeninterner Vorgaben zum Qualitätssicherungsmanagementsystem oder Eigenüberwachungsmaßnahmen, wie z. B.:

- Qualitätssicherungsproben (Referenz- oder Blindwerte),
- Durchführung von Doppelbestimmungen/Aufstockungen.

### *Externe Qualitätskontrolle*

Im Gegensatz zur internen Qualitätskontrolle werden externe Qualitätskontrollen vom Auftraggeber, Behörden oder einem dafür beauftragten Gutachter durchgeführt.

Im Rahmen von unangekündigten Vor-Ort-Kontrollen bei Probenahmen sind schwerpunktmäßig zu kontrollieren:

- Fachgerechte Durchführung der Probenahme
- Einhaltung der Probenahmenvorgaben
- Allgemeine Sichtkontrolle (Ordnung und Sauberkeit im Überwachungsbereich),
- Verwendung der gemäß Untersuchungskonzept festgelegten technischen Geräte zur Probenahme und Messwerterfassung,
- Sauberkeit, Unversehrtheit und Kennzeichnung der Probengefäße,
- Einhaltung Lager- und Transportbedingungen sowie der Kühlkette,
- Dokumentation der Probenahme (Verwendung Protokolle),
- Vorlage eines Übergabe-/Übernahmescheins für den Transport der Proben,
- Einhaltung der Vorgaben zum Gesundheits- und Arbeitsschutz.

Bei umfangreichen Laboruntersuchungen ist auch eine Kontrolle des Untersuchungslabors zu empfehlen hinsichtlich:

- Einhaltung qualitätssichernder Maßnahmen (Annahme und Lagerung der Proben, Zeitraum zwischen Lagerung und Untersuchung),
- Einhaltung vorgegebener Untersuchungsmethoden,
- Kalibrierung der Analysengeräte,
- Qualitätssicherung der Analyseergebnisse.
- Durchführung von Parallelbeprobungen und/oder Parallelanalysen durch ein Fremdlabor im Falle besonderer Fragestellungen oder erheblichen Schwankungen in den Analyseergebnissen.

Im Rahmen der Auswertung der Überwachungsergebnisse ist bezüglich der Qualitätssicherung zu realisieren:

- Prüfung der Vollständigkeit der Dokumentation zur Probenahme, zum Probentransport und zu den Ergebnissen der analytischen Untersuchungen,
- Prüfung der Probenahmeprotokolle auf Vollständigkeit und Plausibilität der Eintragungen und Einhaltung der Vorgaben gemäß Qualitätssicherungsplan bzw. Untersuchungskonzept,
- Prüfung der Prüfberichte auf Vollständigkeit und Anwendung des gemäß Qualitätssicherungsplan und Untersuchungskonzept vorgegebenen Untersuchungsmethoden, Bestimmungsgrenzen, Untersuchungszeiträume,
- Plausibilitätsprüfung der Vor-Ort-Parameter und der Analyseergebnisse anhand der bisherigen Ergebnisse (z. B. Zeitreihen) bzw. den Prognoseerwartungen,
- Prüfung der Reihenfolge der Beprobung in Übereinstimmung mit dem Probenahmeplan (Kontaminationsverschleppung).

Im Fall erheblicher Konzentrationsschwankungen im Vergleich zu den bisher vorliegenden Ergebnissen bzw. Daten sind mögliche Ursachen für diese Abweichungen zu prüfen (z. B. veränderte Probenahmebedingungen, technische Mängel der Probenahme-/Messsysteme, Nichteinhaltung der Kühlkette, standortbezogene saisonale Abweichungen, Kontaminationsverschleppung). In diesem Fall ist zur Plausibilitätsprüfung die Erstellung von Ionenbilanzen und den Ionenbilanzfehlern zu empfehlen.

## 7.5 Aufgaben und Entscheidungen der Behörde

Während der Durchführung der Überwachung und Auswertung/Bewertung der Ergebnisse der Überwachungsmaßnahmen ergeben sich für die zuständige Behörde nachfolgende Aufgaben und Entscheidungen.

Während der Durchführung:

- Durchführung von Kontrollbegehungen der Überwachungsmaßnahmen hinsichtlich Einhaltung der Vorgaben zur Überwachung,
- Überwachung der Wirkungspfade (Prüfung externer Leistungen bzw. eigener Untersuchungen),
- Kontrolle der Funktion und Wirksamkeit von Bauwerken und Anlagen, Funktionskontrolle (Prüfung externer Leistungen bzw. Durchführung eigener Kontrollen),
- Erstellung eines Begehungsprotokolls und Übergabe an den Verpflichteten,
- Prüfung des Erfordernisses von Maßnahmen.

Im Fall erheblicher Abweichungen zum Sanierungsplan/Überwachungskonzept kann die zuständige Behörde eine Wiederholung der Überwachung fordern.

Im Rahmen der Auswertung der Überwachung:

- Prüfung der vorgelegten Dokumente zur Überwachung auf Vollständigkeit und Einhaltung der Vorgaben im Sanierungsplan bzw. im Überwachungskonzept,
- Plausibilitätsprüfung der Überwachungsergebnisse,
- Prüfung der Dokumentation der Überwachungsergebnisse hinsichtlich der Einhaltung der festgelegten Sanierungs- bzw.-/Überwachungsziele.

Im Ergebnis der vorgelegten Auswertung des Überwachungszyklus sind durch die Behörde Entscheidungen hinsichtlich

- Bestätigung der Fortsetzung der Überwachung gemäß Sanierungsplan bzw. Überwachungskonzept,
- Ggf. Forderung zur Wiederholungsbeprobung aufgrund nachweisbarer Mängel,
- Festlegung von zusätzlichen Eigen- und Fremdkontrollen (z. B. bei erheblichen Schwankungen),
- Anpassung/Optimierung der Überwachung (Messstellenauswahl, Parameter, Probenahmeturnus) (vgl. Kapitel 8.1),
- Beendigung von Überwachungsmaßnahmen (vgl. Kapitel 8.2)

vorzunehmen.

## 8 Optimierung und Beendigung von Überwachungsmaßnahmen

Im Ergebnis der Auswertung ist nach jedem Überwachungszyklus im Hinblick auf die Vorgaben aus dem Sanierungsplan bzw. dem Überwachungskonzept zu prüfen, ob eine Fortsetzung erforderlich ist und welche Optimierungsmöglichkeiten bei der Fortsetzung bestehen oder ob eine Beendigung der Überwachung erfolgen kann.

### 8.1 Optimierung von Überwachungsmaßnahmen

Aus Gründen der Verhältnismäßigkeit ist es erforderlich, basierend auf den im Rahmen der Überwachung gewonnenen Erkenntnissen, die Überwachungsmaßnahmen regelmäßig hinsichtlich einer Optimierung/Anpassung zu prüfen. Dies trifft insbesondere bei langlaufenden Sanierungen (z. B. hydraulische Grundwassersanierungen) und Langzeitüberwachungen zu. Diese Prüfung sollte nach jedem Überwachungszyklus bzw. nach festgelegten Zeiträumen von z. B. drei Jahren erfolgen und Entscheidungen nach sich ziehen.

Dazu ist neben einer Auswertung der Daten zur Kontaminationsentwicklung auch die Überprüfung des konzeptionellen Standortmodells notwendig (vgl. Pkt. 7.2).

Eine Neubewertung der Gefahrenlage kann anhand neuer Erkenntnisse zum Standort und zu den Schadensentwicklungen im Vergleich zum Sanierungsplan oder Konzept bzw. zur Prognose oder bei Änderungen der Rahmenbedingungen (beispielsweise Änderung der Nutzung, neue Grundwasserentnahmen in der Nähe) erforderlich werden und ist mit der Behörde abzustimmen. Gegebenenfalls muss damit der Umfang des Überwachungsprogramms ggf. auch das Überwachungsziel an die veränderte Sachlage angepasst werden.

Möglichkeiten zur Optimierung bestehen in:

- Verminderung/Änderung des Parameterumfangs (vgl. III.4). Zeigt sich, dass sich bestimmte Schadstoffe in der Schadstofffahne aufgrund der stoffspezifischen Eigenschaften langsamer ausbreiten (z. B. erhöhte Retardation oder verringerte Grundwasserfließgeschwindigkeit), kann sich die Analyse auf die mobileren Schadstoffe beschränken bzw. die Analytik der nichtmobileren Stoffe in größeren Abständen erfolgen. Weiterhin ist die Optimierung hinsichtlich der Festlegung von Leitparametern bei Schadstoffen und zur Charakterisierung ablaufender Prozesse im Untergrund zu prüfen.
- Reduzierung/Änderung des Umfangs der beprobten Messstellen. Über lange Zeit trockene Messstellen sollten aus dem Überwachungsprogramm herausgenommen werden. Das gleiche gilt für Messstellen, an denen die Schadstoffgehalte zuverlässig unterhalb der Bestimmungsgrenze bzw. im Bereich der Vorsorgewerte<sup>7</sup> liegen. Zu prüfen ist bei Langzeitüberwachungen auch, inwieweit eine Konzentrierung der Messstellenbeprobung auf Schwerpunkte im Quellbereich bzw. in der Schadstofffahne (Hauptabstrombahnen) erfolgen kann. Voraussetzungen für eine solche Optimierung sind umfassende Daten zur Gefährdungslage, zur Verbreitung der Schadstoffe und zu ablaufenden Prozessen im Untergrund. Im Fall des Schutzgutes Grundwasser sind außerdem ausreichende Kenntnisse zu den hydraulischen Verhältnissen erforderlich.
- Nutzung externer Messstellen/Brunnen bei der Überwachung der Schadstofffahne z. B. aus Landesmessnetzen GW/OW. Zwingend zu prüfen sind im Vorfeld einer Nutzung Lage, technische Eignung (z. B. Ausbau) und Funktionsfähigkeit.

---

<sup>7</sup> mit Inkrafttreten der Novellierung der BBodSchV am 01.08.2023 wurden einige Vorsorgewerte angepasst. Die aktuellen Vorsorgewerte sind in BBodSchV Anlage 1 Tabelle 1 und 2 dargestellt.

- Zeitliche Aufweitung des Probenahmeturnus. Die Optimierung des Überwachungszyklus ist immer dann möglich und sinnvoll, wenn ausreichend belastbare Messwerte vorliegen und die Konzentrationsschwankungen in der Zeitreihe gering sind.
- Änderung des Überwachungszieles durch Änderung von Randbedingungen (z. B. Nutzungsänderung).

Zur Ableitung, welche Daten verzichtbar sind, helfen u. a. geostatistische Verfahren. Dies kann zur Messstellenoptimierung das häufig angewandte Kriging (z. B. Ordinary Kriging) sein, welches sich als ein mögliches und geeignetes statistisches Verfahren zur räumlichen Interpolation erwiesen hat [90]. Nähere Erläuterungen erfolgen dazu im Teil B, IV.

Bei Überwachungsmaßnahmen zur Überprüfung einer unklaren Gefahrenlage sind nur geringe Optimierungsmöglichkeiten gegeben, da hier die Erfassung der räumlichen Schadstoffausbreitung und deren Entwicklung im Vordergrund stehen.

## 8.2 Kriterien zur Beendigung von Überwachungsmaßnahmen

Hinsichtlich der Beendigung von Überwachungsmaßnahmen sind die im Sanierungsplan bzw. in den Überwachungskonzepten angegebenen Kriterien für die Beendigung vordergründig zu berücksichtigen. Diese stehen im Zusammenhang mit der Erfüllung des jeweiligen Überwachungszieles und unterscheiden sich in Abhängigkeit vom Überwachungsanlass.

Grundlegende Voraussetzung für die Beendigung jeglicher Überwachungsmaßnahmen ist der Nachweis, dass keine Gefahrenlage für den Einzelnen oder die Allgemeinheit mehr vorliegt oder die Restschadstoffkonzentrationen bzw. -frachten tolerierbar (also akzeptabel) sind. Hierzu sind insbesondere für das Schutzgut Grundwasser der aktuelle Erlass Rahmenerlass Altlasten-Grundwasser (derzeit: 27.06.2000, [77]) sowie die ermessensleitenden Regeln (derzeit: vom 23.10.2000, [70]) zu beachten.

Es bedarf einer ausreichend belastbaren Datenlage, so dass Qualität und Dichte der Daten über einen hinreichenden Zeitraum (i. d. R. mind. drei Jahre) einen Rückschluss auf Tendenzen zulassen.

In [67] wird wie folgt hinsichtlich der Kriterien der Beendigung einer Überwachung zwischen gesicherten, dekontaminierten und nicht sanierten Altlasten und Altablagerungen unterschieden:

### ■ gesicherte Altstandorte und Altablagerungen

- Überwachung, so lange ein nicht tolerabler Schadstoffaustrag aus dem gesicherten Bereich zu erwarten ist,
- gleichbleibend niedrige Schadstoffausträge aufgrund intakter technischer Sicherungselemente stellen kein ausreichendes Kriterium für einen Abbruch der Überwachung dar, da jene Sicherungselemente i. d. R. nur eine begrenzte Lebensdauer aufweisen,
- Beendigung der Überwachung nur dann möglich, wenn ohne intakte Sicherungselemente keine Gefährdung von Schutzgütern zu erwarten ist (bspw. durch vermindertes Schadstoffpotenzial aufgrund natürlichen Abbaus).

### ■ dekontaminierte Altstandorte und Altablagerungen

- Nachweis des Sanierungserfolges erfordert meist kürzere Überwachungszyklen als bei gesicherten Altstandorten und Altablagerungen,
- mehrjährig in Folge gemessene Unterschreitungen von Kontrollwerten (oberhalb der SZW) für Grundwasser und ggf. Bodenluft können im Einzelfall eine hinreichende Entscheidungsgrundlage zur Beendigung der Überwachung unter Berücksichtigung der Tolerierbarkeit darstellen.

## ■ nicht sanierte Altlasten

- Überwachung bis zu Beginn der Sanierungsmaßnahmen,
- Kontrollwerte aufgrund der noch gegebenen Gefahr meist höher als Sanierungszielwerte,
- Dauer der Überwachung hängt von Gefahrenausmaß und zeitlicher Entwicklung der Schadstoffemissionen ab,
- Grundlage für die Beendigung der Überwachung ist die Kenntnis über die am Standort ablaufenden Prozesse und betroffenen Wirkungspfade. Hier sollte eine ausreichend genaue Prognose der zu erwartenden Schadstoffkonzentration und -verteilung vorliegen.

In der Tabelle 3 sind die verschiedenen Falloptionen hinsichtlich der Beendigung der Überwachung angegeben. Zu unterscheiden ist dabei zwischen der planmäßigen Beendigung der Überwachung nach Erreichung der Sanierungszielwerte oder der Überwachungsziele und der vorzeitigen, außerplanmäßigen Beendigung aufgrund veränderter Randbedingungen bzw. den Ergebnissen der Überwachung.

In der Regel sollte die Beendigung der Überwachung nach Erreichung des Sanierungs-/Überwachungsziels für die einzelnen Überwachungsanlässe erfolgen.

Eine **vorzeitige Beendigung der Überwachung** kann unter verschiedenen Aspekten erfolgen:

- Keine Gefahrenlage (mehr) erkennbar (stagnierende bzw. schrumpfende Schadstofffahne, Tolerierbarkeit des Schadens ist gegeben).
- Gefahrenlage erfordert zusätzliche Maßnahmen der Sicherung/Sanierung bzw. Schutz- oder Beschränkungsmaßnahmen (z. B. Rückfalloption bei MNA-Konzept).

Eine vorzeitige Beendigung der Überwachung des behördlich bestätigten Sanierungsplans/Überwachungskonzepts bedarf der Abstimmung und Bestätigung mit bzw. durch die zuständige Behörde.

## Tolerierbarkeit

Die Tolerierbarkeit eines (Grundwasser-)Schadens ist im Einzelfall zu prüfen. Die Beurteilung der Tolerierbarkeit in der Detailuntersuchung setzt detaillierte Kenntnisse von Konzentrationen, Mengen bzw. Frachten, zeitlichen Veränderungen (z. B. Schadstoffminderungsprozessen), Nutzungen und ggf. weiteren einzelfallspezifischer Kriterien (z. B. Metabolite) voraus.

Hierzu gelten die Regelungen gemäß aktueller Erlasslage zur Tolerierbarkeit und die Hinweise im Handbuch zur Altlastenbehandlung Teil 3 - Grundwasser (vgl. [70], [77]).

Als vereinfachter Bewertungsmaßstab für die Tolerierbarkeit der Grundwasserverunreinigung können die auf der Grundlage der Geringfügigkeitsschwellen (GFS) errechneten Dringlichkeitswerte nach [71] herangezogen werden. Die Dringlichkeitswerte ergeben sich aus dem humantoxikologisch begründeten Teil der GFS (Besorgniswerte) verknüpft mit einem Faktor von 10 bei nicht kanzerogenen Stoffen und mit einem Faktor von 5 bei kanzerogenen bzw. entsprechend verdächtigen Stoffen. Für den Vergleich sind repräsentative Messwerte unter Einbeziehung der Hintergrundwerte zu verwenden. Liegen die ermittelten und prognostizierten Schadstoffkonzentrationen unter den Dringlichkeitswerten, ist die Grundwasserverunreinigung i. d. R. tolerierbar.

Eine vollständige Beendigung der Überwachung bei Feststellung der Tolerierbarkeit ist nur dann möglich, wenn bei absehbarer Änderung der Randbedingungen (bspw. Wasserdargebot in Trockenjahren) keine neue Gefahrenlage entsteht. Bei einer Änderung hin zu einer sensibleren Nutzung ist ein erneutes Überwachungserfordernis zu prüfen.

**Tabelle 3: Fallbetrachtungen zur Beendigung einer Überwachung**

Anlass	Ergebnis	Handlungsbedarf
Ausnahmefall: Überwachung nach der OU	Bestätigung Gefahrenverdacht	Detailuntersuchung
	Nichtbestätigung Gefahrenverdacht	Beendigung Überwachung
Ausnahmefall: Überwachung nach der DU	Bestätigung Gefahrenlage, Schaden ist nicht tolerierbar	Sanierungsuntersuchung
	Nichtbestätigung Gefahrenlage	Beendigung Überwachung
	Schaden ist tolerierbar	Beendigung Überwachung sofern Randbedingungen (bspw. GW-Stände) sich in absehbarer Zeit nicht nachteilig ändern (bei Nutzungsänderung evtl. Wiederaufnahme der Überwachung)
Überwachung nach der SU	Bestätigung der zeitlichen/ räumlichen Schadensentwicklung	Sanierung
	Relevante Änderung der prognostizierten zeitlichen/räumlichen Schadensentwicklung	Überprüfung der vorgesehenen Sanierungs- und Überwachungsbereiche und ggf. der geeigneten Sanierungs- verfahren  Prüfung der Beendigung der Überwachung, wenn Schadens- entwicklung geringer ist als prognostiziert.
Überwachung nach der Dekontamination	Sanierungszielwert nachhaltig erreicht	Beendigung Überwachung
	Sanierungszielwert nicht erreicht	Prüfung der Fortsetzung der Überwachung Prüfung der Optimierung des Sanierungsverfahrens Prüfung Standortmodell Prüfung Tolerierbarkeit  Überprüfung Sanierungsziele/ Sanierungsaudit  Prüfung der Beendigung der Über- wachung, wenn Tolerierbarkeit gegeben und weitere Maßnahmen unverhältnis- mäßig (Abbruch)
Überwachung nach Teildekontamination	keine Gefahrenlage mehr vor- handen aufgrund abnehmender, stagnierender oder dauerhaft schwankender Konzentrationen/ Frachten und keine aktiven Maß- nahmen mehr vorgesehen, da unverhältnismäßig und Rest- belastung tolerierbar	Beendigung Überwachung

	erneute Gefahrenlage durch ansteigende Konzentrationen/ Frachten	Wiederaufnahme von Maßnahmen zur Gefahrenabwehr (z. B. Sanierungsmaßnahmen, Schutz- und Beschränkungsmaßnahmen)
	Sanierungszielwert nicht erreicht	Prüfung der Fortsetzung der Überwachung Prüfung der Optimierung des Sanierungsverfahrens Prüfung Standortmodell Prüfung Tolerierbarkeit  Überprüfung Sanierungsziele/ Sanierungsaudit  Prüfung der Beendigung der Überwachung, wenn Tolerierbarkeit gegeben und weitere Maßnahmen unverhältnismäßig (Abbruch)
Überwachung von (langlaufenden) Sicherungsmaßnahmen	Kontamination innerhalb und außerhalb der Sicherung tolerierbar (Ausnahmefall)	Beendigung Überwachung (Abbruch)
	kein Nachweis, dass Kontamination tolerierbar ist	Überwachung über bestimmten Zeitraum, ggf. Audit
Überwachung der vorher nachgewiesenen natürlichen Selbstreinigung (MNA)	Bestätigung Prognose	Beendigung Überwachung
	Nichtbestätigung Prognose Abbruchkriterium nicht eingehalten	Prüfung Ursachen der Nichtbestätigung der Prognose Rückfallszenarien/Sanierungsmaßnahmen (ENA)

### 8.3 Aufgaben und Entscheidungen der Behörde

Mit der Vorlage der Ergebnisse der Überwachung zu den einzelnen Überwachungsanlässen sind eine Reihe von Aufgaben und Entscheidungen der zuständigen Behörde verbunden.

#### Aufgaben

- Prüfung der Überwachungsergebnisse anhand der gemäß Sanierungsplan und Überwachungskonzept vorgegebenen Ziele,
- Prüfung von Vorschlägen zur Optimierung der Überwachung,
- Prüfung von Vorschlägen zur Beendigung / zum Abbruch von Überwachungsmaßnahmen,
- Gewährleistung einer organisatorischen Überwachung (insbesondere bei Abbruch der Überwachung bspw. bei Nutzungsänderung, vgl. Kapitel 3).

#### Entscheidungen

- Bestätigung der Optimierung der Überwachung anhand der vorgelegten Ergebnisse,
- Bestätigung der Beendigung der Überwachung nach Erreichung des Sanierungszieles bzw. der Überwachungsziele,
- Veranlassung bzw. Bestätigung des Abbruchs der Überwachung bei Nichterreicherung der Sanierungsziele bzw. Überwachungsziele (vgl. Tabelle 3).

## 9 Behördliche Instrumente bei der Überwachung

Unter behördlicher Überwachung nach Bodenschutzrecht (vgl. Kapitel 2) werden neben Überwachungsmaßnahmen, welche die Behörde selbst durchführt, im Wesentlichen organisatorische Maßnahmen und die Anordnung und Prüfung der Ergebnisse von Eigenkontrollmaßnahmen verstanden.

Insgesamt umfasst die behördliche Überwachung alle einzelfallbezogenen Kontrollen von Sachverhalten und Entwicklungen im Rahmen der Gefährdungsabschätzung, Gefahrenerkundung und Sanierung.

Durch das SMEKUL wird jährlich „Der Erlass zur Umweltüberwachung im Freistaat Sachsen“ [78] sowie das „Konzept zur Wahrnehmung von Überwachungsaufgaben durch die Umweltbehörden im Freistaat Sachsen“ [79] herausgegeben. Darin sind auch die Vorgaben für die Überwachungen im Bereich Bodenschutz enthalten. Hierbei sind die derzeitigen Kategorien:

- 5.1 Altlasten/Altlastenverdachtsflächen in der Erkundung (unterschieden in Überwachungen vor Ort und Dokumentenprüfung)
- 5.2 Altlasten in der Sanierung (unterschieden in Überwachung vor Ort und Eigenkontrollmaßnahmen)<sup>8</sup>

relevant. Die Überwachungen sollen gemäß [78] anlassbezogen erfolgen.

Für die unteren Bodenschutzbehörden (und im Fall der Selbstbeteiligung nach § 2 (1) 15 Sächs-KrWBodSchZuVO) und für die Landesdirektion Sachsen ist dieser Erlass Grundlage für die jährliche Überwachungstätigkeit, die Planung der Überwachungstätigkeit für das Folgejahr sowie die entsprechende Dokumentation der Überwachungen im abgelaufenen Jahr. Diese erfolgen im Programm UMONITOR.

Die im Rahmen der behördlichen Überwachung während der Nachsorge<sup>8</sup> von der Behörde selbst durchzuführenden oder anzuordnenden und zu prüfenden Maßnahmen beziehen sich insbesondere auf:

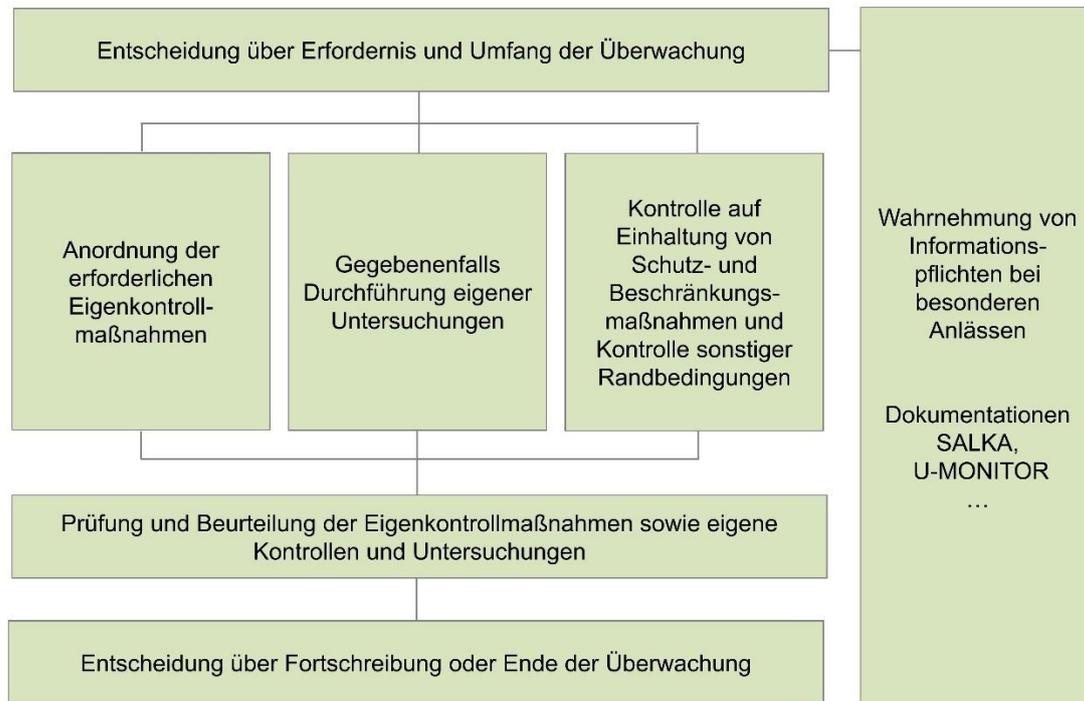
- Überwachung der Wirkungspfade (z. B. regelmäßige Untersuchungen des Grundwassers oder Flächenbegehungen zur Kontrolle, welche Schutzgüter ggf. neu gefährdet sind, Kontrolle auf Einhaltung der zulässigen Nutzungen),
- Kontrolle der Funktion und Wirksamkeit von Bauwerken und Anlagen (Funktionskontrolle),
- Kontrolle der Wirksamkeit von ergänzenden Schutz- und Beschränkungsmaßnahmen (s. Kapitel 4.4),
- Prüfung des Erfordernisses weitergehender Maßnahmen.

Die Ergebnisse der behördlichen Überwachung können die zuständige Behörde dazu veranlassen, dem Verpflichteten weitere Maßnahmen aufzuerlegen.

Im Detail umfasst die behördliche Überwachung die in Abbildung 6 aufgeführten Tätigkeiten.

---

<sup>8</sup> Der Begriff der Nachsorge bezieht sich auf die Regelungen des BBodSchG und der BBodSchV. Er ist im betrachteten Zusammenhang der Altlastenbearbeitung nicht mit dem Nachsorgebegriff aus dem Abfallrecht (KrWG; DepV) gleichzusetzen.



**Abbildung 6: Fließbild typischer behördlicher Tätigkeiten bei der Überwachung**

Für die Festlegung von rechtsverbindlichen Regelungen zwischen zuständiger Behörde oder Planungsbehörde und Verpflichteten bzw. Eigentümern hinsichtlich Überwachungs- und Nachsorgemaßnahmen (z. B. die Sicherstellung von Nutzungseinschränkungen sowie von Informations-, Untersuchungs-, Abstimmungs- und Kostenpflichten) können folgende Instrumente herangezogen werden:

- Ordnungsrechtliche Mittel wie Anordnung, Verbindlichkeitserklärung, öffentlich-rechtlicher Vertrag,
- Festsetzungen und Kennzeichnungen im Bebauungsplan,
- Baulast,
- Städtebaulicher Vertrag sowie
- Zivilrechtlicher Vertrag.

Gemäß § 16 (4) Punkt 7 der BBodSchV sind die behördlichen Entscheidungen hinsichtlich der geplanten und durchgeführten Überwachungsmaßnahmen zu dokumentieren [10].

Die behördliche Überwachung wird in der Regel im Rahmen der Qualitätssicherung sanierungsbegleitend durch die zuständige Behörde durchgeführt. Dazu sind in den methodischen Unterlagen des Freistaates Sachsen [75] nachfolgende untersetzende Angaben aufgeführt.

Die behördliche Überwachung kann u. a. durch:

- regelmäßige Besuche der Sanierungsbaustellen,
- die Teilnahme an Baubesprechungen und
- die Plausibilitätskontrolle der durch Eigen- und Fremdprüfer vorgelegten Berichte

erfolgen. Die zuständige Behörde kann in diesem Zusammenhang auf Basis gesetzlicher Bestimmungen aufgrund des beobachteten Sanierungsverlaufs einzelfallspezifisch ergänzende Anforderungen stellen.

Wesentliche Elemente der behördlichen Überwachung sind:

- Festlegung der Lage und der Bewertung der Ergebnisse von Probefeldern,
- Prüfung des Erreichens der Überwachungsziele,
- Freigabe von Sanierungsbereichen oder -teillflächen bzw. Sanierungselementen,
- Prüfung von Abschlussberichten,
- behördliche Abnahme der abgeschlossenen Sanierungsmaßnahme,
- Überprüfung ggf. erforderlich werdender Nachbesserungen.

Der zuständigen Behörde ist es grundsätzlich vorbehalten, in der Überwachung externe Sachverständige einzusetzen. Im Vorfeld der Ausführung kann zwischen Auftraggeber und zuständiger Behörde abgestimmt werden, inwiefern der Fremdüberwacher des Auftraggebers auch in die behördliche Überwachung eingebunden wird. Behördliche Überwachungsinstrumente im Freistaat Sachsen für die Altlastenbearbeitung sind beispielsweise das Sächsische Altlastenkataster (SALKA) und das Programm U-Monitor (Überwachung Altlasten als Anlassbezogene Überwachungen). Im Folgenden wird auf die Notwendigkeit zur Erfassung überwachungsrelevanter Sachverhalte im SALKA eingegangen.

### Sächsisches Altlastenkataster (SALKA)

Im SALKA erfolgt durch die zuständigen Bodenschutzbehörden die Aufnahme und Verwaltung aller altlastverdächtigen Flächen, Altlasten, sowie sanierter Altlasten. Neben den allgemeinen Standortdaten werden wichtige Informationen zu jeder Bearbeitungsstufe und Angaben zu Überwachungsmaßnahmen aufgenommen. Ziel des Katasters ist die Dokumentation der Bearbeitung und Zugriff auf jene Informationen bei:

- Anfragen,
- Nutzungsänderung (zur erneuten Prüfung der Gefahrenlage) und
- Änderung der Rahmenbedingungen sowie für
- Regelmäßige Berichte und statistische Auswertungen zur Entwicklung der Altlastensituation in Sachsen
- im Sinne einer organisatorischen Überwachung (vgl. Kap 3).

Wird nach einer Untersuchung der Handlungsbedarf „Überwachen“ festgelegt, so kann im SALKA für die jeweilige Bearbeitungsstufe das Überwachungsprogramm dokumentiert werden.

Ein entsprechendes Formular kann über den Menüeintrag „Überwachung“ direkt aus den Formularen der Orientierenden Untersuchung, Detailuntersuchung, Sanierungsuntersuchung oder Sanierung aufgerufen werden. Es kann jeweils nur ein Überwachungsprogramm für die Schutzgüter Grundwasser, Oberflächenwasser, Boden und Bodenluft pro Bearbeitungsstufe angelegt werden. Es erlaubt die Erfassung von Angaben zu Kontrollparametern, der Anzahl der Messstellen, dem Zeitraum der Überwachung, dem Kontrollintervall sowie den wichtigsten Analyseergebnissen. Darüber hinaus können Eintragungen zu ergänzenden Untersuchungen dokumentiert werden. Handelt es sich um die Überwachung einer NA-Maßnahme, so ist das entsprechend dem dafür vorhandenen Feld „MNA“ zu kennzeichnen. Es sind u. a. die zu überwachenden Parameter und der Kontrollwert anzugeben. Die Daten sind nach jedem Überwachungszyklus in das entsprechende Formular in das SALKA einzupflegen.

Unabhängig von der punktuellen Altlastenbearbeitung befindet sich im SALKA die Angabe, ob bei einer Altlast bzw. Verdachtsfläche eine Relevanz nach Wasserrahmenrichtlinie (WRRL) vorliegt, also der Schadstoffeintrag auch hinsichtlich der Bewertung des gesamten Grundwasserkörpers bzw. Oberflächengewässers (also nicht nur der lokalen Gewässer) mengenmäßig relevant ist. Wenn ja, sind die Maßnahmen bzw. Überwachungsergebnisse zur Fläche auch hinsichtlich WRRL zu dokumentieren und zu bewerten.

## Literaturverzeichnis

- [1] ARBEITSKREIS „GRUNDWASSERBEOBACHTUNG“ DER LÄNDER SACHSEN UND SACHSEN-ANHALT UND DES UFZ-UMWELTFORSCHUNGSZENTRUM LEIPZIG-HALLE GMBH (2003): Handbuch Grundwasserbeobachtung, Teil 5: Grundwasserprobenahme, 31.05.2003; <https://publikationen.sachsen.de/bdb/artikel/23156>, zuletzt aufgerufen am 07.07.2021.
- [2] ARBEITSKREIS „GRUNDWASSERBEOBACHTUNG“ DER LÄNDER BRANDENBURG, SACHSEN UND SACHSEN-ANHALT UND DES HELMHOLTZ-ZENTRUM FÜR UMWELTFORSCHUNG UFZ (2009): Merkblatt Rückbau von Grundwassermessstellen, 01.10.2009; <https://publikationen.sachsen.de/bdb/artikel/13867>, zuletzt aufgerufen am 07.07.2021.
- [3] ARBEITSKREIS „GRUNDWASSERBEOBACHTUNG“ DER LÄNDER BERLIN, BRANDENBURG, SACHSEN UND SACHSEN-ANHALT UND DES HELMHOLTZ-ZENTRUMS FÜR UMWELTFORSCHUNG UFZ LEIPZIG-HALLE (2012): Handbuch Grundwasserbeobachtung - Merkblatt Bau von Grundwassermessstellen, 15.06.2012; <https://publikationen.sachsen.de/bdb/artikel/13808>, zuletzt aufgerufen am 07.07.2021.
- [4] ARBEITSKREIS „GRUNDWASSERBEOBACHTUNG“ DER LÄNDER BAYERN, BERLIN, BRANDENBURG, SACHSEN UND SACHSEN-ANHALT UND DES HELMHOLTZ-ZENTRUM FÜR UMWELTFORSCHUNG UFZ LEIPZIG-HALLE; (2018): Merkblatt Funktionsprüfung an Grundwassermessstellen, 30.06.2018; <https://publikationen.sachsen.de/bdb/artikel/31235>, zuletzt aufgerufen am 07.07.2021.
- [5] BAYERISCHES LANDESAMT FÜR UMWELT (2005): Ableitung von Vorschlägen für Geringfügigkeitsschwellen für das Grundwasser für Kampfstoffe und Abbauprodukte, redaktionelle Änderungen August 2005, Projekt 3801.
- [6] BAYERISCHES LANDESAMT FÜR UMWELT (2015): Natürliche Schadstoffminderung bei Grundwasserverunreinigungen durch Altlasten und schädlichen Bodenveränderungen. – Monitored Natural Attenuation (MNA). Merkblatt Nr. 3.8/3, Stand: 30.Juni 2015; [https://www.stmuv.bayern.de/themen/boden/vollzug/doc/nr\\_383.pdf](https://www.stmuv.bayern.de/themen/boden/vollzug/doc/nr_383.pdf), zuletzt aufgerufen am 25.03.2024.
- [7] BAYERISCHES LANDESAMT FÜR UMWELT (2017): Merkblatt Nr. 3.8/4 - Probenahme von Boden und Bodenluft bei Altlasten und schädlichen Bodenveränderungen für die Wirkungspfade Boden-Mensch und Boden-Gewässer. Stand: 15. November 2017; [https://www.stmuv.bayern.de/themen/boden/vollzug/doc/lfu\\_merkblatt\\_3.8\\_4.pdf](https://www.stmuv.bayern.de/themen/boden/vollzug/doc/lfu_merkblatt_3.8_4.pdf), zuletzt aufgerufen am 25.03.2024.
- [8] BAYERISCHES LANDESAMT FÜR WASSERWIRTSCHAFT (1992): Strömungstechnische Vorgänge und Verringerung der Sandführung in Vertikalfilterbrunnen. Merkblatt-Nr. 1.4/8, Stand: 15.10.1992.
- [9] BBODSCHG: Gesetz zum Schutz vor schädlichen Bodenveränderungen und zur Sanierung von Altlasten, Bundes-Bodenschutzgesetz, 17. März 1998; BGBl. I S. 502.
- [10] BBODSCHV: Bundes-Bodenschutz- und Altlastenverordnung, 9. Juli 2021; BGBl. I S.2598, 2716.
- [11] BUNDESAMT FÜR UMWELT, BERN (BAFU) (HRSG.) (2015): Überwachung von belasteten Standorten; [https://www.bafu.admin.ch/dam/bafu/de/dokumente/altlasten/uv-umwelt-vollzug/ueberwachung\\_vonbelastetenstandorten.pdf.download.pdf/ueberwachung\\_vonbelastetenstandorten.pdf](https://www.bafu.admin.ch/dam/bafu/de/dokumente/altlasten/uv-umwelt-vollzug/ueberwachung_vonbelastetenstandorten.pdf.download.pdf/ueberwachung_vonbelastetenstandorten.pdf), zuletzt aufgerufen am 25.03.2024.
- [12] BUNDESANSTALT FÜR ARBEITSSCHUTZ UND ARBEITSMEDIZIN (BAUA) (2011): Schutzmaßnahmen bei Tätigkeiten in kontaminierten Bereichen (TRGS 524), Ausgabe: Februar 2010, zuletzt geändert und ergänzt: GMBI 2011 S. 1018-1019 [Nr. 49-51]; [https://www.baua.de/DE/Angebote/Regelwerk/TRGS/pdf/TRGS-524.pdf?\\_\\_blob=publicationFile&v=1](https://www.baua.de/DE/Angebote/Regelwerk/TRGS/pdf/TRGS-524.pdf?__blob=publicationFile&v=1), zuletzt aufgerufen am 25.03.2024.
- [13] CAMERON, K. (2004): Better Optimization of Long-Term Monitoring Networks. Bioremediation Journal 8:3-4, 89–107, DOI: [10.1080/10889860490887464](https://doi.org/10.1080/10889860490887464).
- [14] DIN 4023:2006-02 (2006): Geotechnische Erkundung und Untersuchung - Zeichnerische Darstellung der Ergebnisse von Bohrungen und sonstigen direkten Aufschlüssen, 2006-02.

- [15] DIN EN ISO 5667-3:2019-07 (2019): Wasserbeschaffenheit - Probenahme - Teil 3: Konservierung und Handhabung von Wasserproben (ISO 5667-3:2018); Deutsche Fassung EN ISO 5667-3:2018.
- [16] DIN EN ISO 5667-6:2016-12 (2016): Wasserbeschaffenheit - Probenahme - Teil 6: Anleitung zur Probenahme aus Fließgewässern (ISO 5667-6:2014); Deutsche Fassung EN ISO 5667-6:2016.
- [17] DIN 19528:2009-01 (2009): Elution von Feststoffen - Perkolationsverfahren zur gemeinsamen Untersuchung des Elutionsverhaltens von anorganischen und organischen Stoffen, 2009-01.
- [18] DIN 38402-12:1985-06 (1985): Deutsche Einheitsverfahren zur Wasser-, Abwasser- und Schlammuntersuchung; Allgemeine Angaben (Gruppe A); Probenahme aus stehenden Gewässern (A 12), 1985-06.
- [19] DIN 38402-13:1985-12 (1985): Deutsche Einheitsverfahren zur Wasser-, Abwasser- und Schlammuntersuchung; Allgemeine Angaben (Gruppe A); Probenahme aus Grundwasserleitern (A 13), 1985-12.
- [20] DORGERLOH, U. THEIßEN, H., NEHLS, I., BECKER, R. (2013): Untersuchung und Bewertung von Hilfsstoffen zur Konservierung bzw. Stabilisierung von organischen Schadstoffen in Grundwasserproben gegenüber mikrobiellen oder chemischen Veränderungen im Rahmen von Altlastenuntersuchungen und Sanierungen. Länderfinanzierungsprogramm „Wasser, Boden und Abfall“, (LFP Projekt-Nr. B4.11, Abschlussbericht).
- [21] DVGW W 108:2003-12 (2003): Messnetze zur Überwachung der Grundwasserbeschaffenheit in Wassergewinnungsgebieten, Technische Regel, 2003-12.
- [22] DVGW W 112:2011-10 (2011): Grundsätze der Grundwasserprobenahme aus Grundwassermessstellen, Technische Regel, 2011-10.
- [23] DVGW W 121:2003-07 (2003): Bau und Ausbau von Grundwassermessstellen, Technische Regel, 2003-07.
- [24] DVGW W 129:2012-05 (2012): Eignungsprüfung von Grundwassermessstellen, Technische Regel, 2012-05.
- [25] DVGW W 130:2007-10 (2007): Brunnenregenerierung, Technische Regel, 2007-10.
- [26] DVGW W 135:2018-12 (2018): Sanierung und Rückbau von Brunnen, Grundwassermessstellen und Bohrungen, Technische Regel, 2018-12.
- [27] EPA (2005): Roadmap to Long-Term Monitoring Optimization, EPA 542-R-05-003.
- [28] GIHR, R., DANIEL, B., GRAMATTE, A., RIPPEN, G., WIESERT, P. (1990): Altlasten-Analytik: Parameterliste zur branchenspezifischen Auswahl von Analysenparametern für Altstandorte. Verlag: Landsberg/Lech: ecomed, 1990.
- [29] GRANDEL, S., DAHMKE, A. (HRSG.) (2008): Leitfaden: Natürliche Schadstoffminderung bei LCKW-kontaminierten Standorten – Methoden, Empfehlungen und Hinweise zur Untersuchung und Beurteilung. KORA-Themenverbund 3 im BMBF-Förderschwerpunkt „Kontrollierter natürlicher Rückhalt und Abbau von Schadstoffen (KORA).
- [30] GRWV - VERORDNUNG ZUM SCHUTZ DES GRUNDWASSERS: (Grundwasserverordnung), Ausfertigungsdatum: 09.11.2010, (BGBl. I S. 1513).
- [31] HEKEL, U., HPC AG (2012): Integrale Altlastenuntersuchung Ravensburg; Vergleichsstudie „Aufwand-/Qualitätsverhältnis von Auswerteverfahren für Immissionspumpversuche, Band Juni 2012.
- [32] HELD, T. (2012): Auswertung von Fällen mit In-situ-Anwendungen in der gesättigten Zone bei der Altlastenbearbeitung (Folgeprojekt) (Projekt B 3.10). Länderfinanzierungsprogramm „Wasser, Boden und Abfall“ 2010.
- [33] HELD, T. (2014): In-situ-Verfahren zur Boden- und Grundwassersanierung: Planung, Verfahren und Sanierungskontrolle. Wiley-Verlag, Weinheim, 19. März 2014.

- [34] HELD, T. (2015): Boden- und Grundwasserkontaminationen mit PFC bei altlastverdächtigen Flächen und nach Löschmitteleinsätzen, Arbeitshilfe zur flächendeckenden Erfassung, standortbezogenen historischen Erkundung und zur Orientierenden Untersuchung (Projektstufe 1) (Projekt-Nr. B 4.14) Hrsg.: Länderfinanzierungsprogramm Wasser, Boden und Abfall.
- [35] HESSISCHES LANDESAMT FÜR UMWELT UND GEOLOGIE (2008): Handbuch Altlasten, Band 3, Teil 6: Ermittlung von Schadstofffrachten im Grund- und Sickerwasser, Wiesbaden.
- [36] HESSISCHES LANDESAMT FÜR UMWELT UND GEOLOGIE (2014): Handbuch Altlasten, Band 3 Teil 8: Ökotoxikologische Verfahren als Bewertungshilfe bei Altlastenverfahren. Studie über die grundlegende Anwendbarkeit etablierter aquatischer ökotoxikologischer Testverfahren zur Beurteilung von Grundwasserverunreinigungen bei Altlasten, Wiesbaden.
- [37] HEYER, K.-U., HUPE, K., KOOP, A., STEGMANN, R., WILLAND, A. (2006): Wann können Deponien aus der Nachsorge entlassen werden? Ergebnisse eines BMU UFOPLAN-Vorhabens. Deponie- & Biogasanlagen der gemeinsame Einstieg, Fachtagung, 09.-10.05.2006, Dresden.
- [38] HÖLTING, B., COLDEWEY, W. G. (2013): Hydrogeologie - Einführung in die Allgemeine und Angewandte Hydrogeologie. Springer-Verlag.
- [39] HÜSERS, N., KLOTZSCH, S., NITSCHKE, C. (2016): Natürliche Schadstoffminderung am Standort Wülknitz; Schriftenreihe des LfULG, Heft 22/2016.
- [40] INGENIEURTECHNISCHER VERBAND ALTLASTEN E. V. (ITVA) (2002): Richtlinie „Bodenluftabsaugversuch“, Richtlinie H1-1/02.
- [41] INGENIEURTECHNISCHER VERBAND ALTLASTEN E.V. (ITVA) (2003): „Nachsorge und Überwachung von sanierten Altlasten“, Handlungsempfehlung H1-1-01/03.
- [42] INGENIEURTECHNISCHER VERBAND FÜR ALTLASTENMANAGEMENT UND FLÄCHENRECYCLING E.V. (ITVA) (11/2018): Arbeitshilfe „Verhältnismäßigkeitsprüfung bei der Sanierungsuntersuchung“, H1-16.
- [43] INTERSTATE TECHNOLOGY & REGULATORY COUNCIL (ITRC) (2009): Evaluating LNAPL Remedial Technologies for Achieving Project Goals. Technical/Regulatory Guidance, Dezember 2009.
- [44] ISAAKS, E. H., Srivastava, R. M. (1990): An Introduction to Applied Geostatistics, Oxford University Press, New York, 561 p.
- [45] JOHNSON, V. M., TUCKFIELD, R. C., RIDLEY, M. N., ANDERSON, R. A. (1996): Reducing the Sampling Frequency of Groundwater Monitoring Wells. Environ. Sci. Technol. 30, 1, 355-358.
- [46] KORA (2008): Leitfaden des Teilverbundes 4 „Deponien, Altablagerungen“: Umgang mit abfallablagerungsverursachten Gewässerschäden und Gefahrensituationen unter Berücksichtigung der Wirkungen natürlicher Rückhalte- und Abbau-Prozesse.
- [47] KORA (2008): BMBF-Förderschwerpunkt „Kontrollierter natürlicher Rückhalt und Abbau von Schadstoffen bei der Sanierung kontaminierter Grundwässer und Böden“, Handlungsempfehlungen, <http://www.natural-attenuation.de/download.html>, zuletzt aufgerufen am 25.03.2024.
- [48] LÄNDERARBEITSGEMEINSCHAFT ABFALL, MITTEILUNG 32, LAGA PN 98, Richtlinie für das Vorgehen bei physikalischen, chemischen und biologischen Untersuchungen im Zusammenhang mit der Verwertung / Beseitigung von Abfällen, Stand Dezember 2001.
- [49] LÄNDERARBEITSGEMEINSCHAFT BODEN (LABO) (2003): Ständiger Ausschuss ‚Informationsgrundlagen‘, „Geostatistische und statistische Methoden und Auswerteverfahren für Geodaten mit Punkt- bzw. Flächenbezug, Abschlussbericht Teil 3: Empfehlungen für die Anwendung statistischer und geostatistischer Methoden zur flächenbezogenen Auswertung von Daten über Stoffgehalte in Böden“, 2003.
- [50] LÄNDERARBEITSGEMEINSCHAFT BODEN (LABO) (2015): Berücksichtigung der natürlichen Schadstoffminderung bei der Altlastenbearbeitung. Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft Bodenschutz - Ständiger Ausschuss Altlasten – ALA, Ad-hoc Unterausschuss „Natürliche Schadstoffminderung“, Positionspapier vom 15.09.2015.

- [51] LÄNDERARBEITSGEMEINSCHAFT WASSER (LAWA) (2003): Ermittlung von Stoff-Frachten in Fließgewässern, Probenahmestrategien und Berechnungsverfahren, Länderarbeitsgemeinschaft Wasser, Mai 2003.
- [52] LÄNDERARBEITSGEMEINSCHAFT WASSER (LAWA) (2004): Ableitung von Geringfügigkeitsschwellenwerten für das Grundwasser, Länderarbeitsgemeinschaft Wasser.
- [53] LÄNDERARBEITSGEMEINSCHAFT WASSER (LAWA), LÄNDERARBEITSGEMEINSCHAFT BODEN (LABO) (2006): Grundsätze des nachsorgenden Grundwasserschutzes bei punktuellen Schadstoffquellen.
- [54] LANDESANSTALT FÜR UMWELTSCHUTZ, BADEN-WÜRTTEMBERG (1995): Sicherung von Altlasten mit Schlitz- und Schmalwänden. Handbuch Altlasten und Grundwasserschadensfälle, Nr. 23.
- [55] LANDESANSTALT FÜR UMWELTSCHUTZ BADEN-WÜRTTEMBERG (1998): Verwaltungsvorschrift über Orientierungswerte für die Bearbeitung von Altlasten und Schadensfällen (BW-VwV), Erlass vom 16. September 1993, Fassung vom 01. März 1998; <https://pudi.lubw.de/detailseite/-/publication/22443>, zuletzt aufgerufen am 25.03.2024.
- [56] LANDESANSTALT FÜR UMWELTSCHUTZ BADEN-WÜRTTEMBERG (2000): Handlungsempfehlung - Entnahme von Bodenluftproben (Bd. 32).
- [57] LANDESUMWELTAMT NORDRHEIN-WESTFALEN (LUA NRW) (2006): Überwachung, Nachsorge und Eigenkontrolle bei der Altlastenbearbeitung. Ein Leitfaden für die praktische Arbeit in Nordrhein-Westfalen. Materialien zur Altlastensanierung und zum Bodenschutz. MALBO 24.
- [58] LAUSITZER UND MITTELDEUTSCHE BERGBAU- UND VERWALTUNGSGESELLSCHAFT MBH (LMBV) (2007): Merkblatt Montanhydrologisches Monitoring in der LMBV mbH (Stand 30.11.2007).
- [59] LING, M., RIFAI, H. S., NEWELL, C. J., AZIZ, J., GONZALES, J. R. (2003): Groundwater monitoring plans at small-scale sites – an innovative spatial and temporal methodology. J. of Environ. Monit. 5(1):126–134, DOI:10.1039/B207682A.
- [60] MARTIN, H., PIEPENBRINK, M., GRATHWOHL, P. (2000): Ceramic dosimeters for time-integrated contaminant monitoring. Journal of Process Analytical Chemistry, 68-73.
- [61] MINISTERIUM FÜR UMWELT UND VERKEHR, BADEN-WÜRTTEMBERG (1988): Altlastenhandbuch Teil I, Altlastenbewertung. Wasserwirtschaftsverwaltung Heft 18.
- [62] NITSCHKE, C., LUCKNER, L. UND HAFERKORN, B. (1999): Bau, Prüfung und Betrieb montanhydrologischer Messnetze, 7. Dresdner Grundwasserforschungstage vom 27./28.09.99, Proceedings (ISSN 1430-0176).
- [63] NOBEL, C., ANTHONY, J. W. (2004): Three-Tiered Approach to Long Term Monitoring Program Optimization, Bioremediation Journal 8(3-4):147-165, 2004.
- [64] BUNDESMINISTERIUM FÜR WOHNEN, STADTENTWICKLUNG UND BAUEN (BMWSB), BUNDESMINISTERIUM DER VERTEIDIGUNG (BMVG), BUNDESANSTALT FÜR IMMOBILIENAUFGABEN (BIMA) (2023): Baufachliche Richtlinien Boden- und; [https://www.bfr-bogws.de/downloads/BFR%20BoGwS\\_zuletzt\\_geaendert\\_Juli\\_2023.pdf](https://www.bfr-bogws.de/downloads/BFR%20BoGwS_zuletzt_geaendert_Juli_2023.pdf), zuletzt aufgerufen am 25.03.2024.
- [65] OGeWV - VERORDNUNG ZUM SCHUTZ DER OBERFLÄCHENGEWÄSSER - (Oberflächengewässerverordnung (vom 20.06.2016 (BGBl. I S. 1373)).
- [66] PULS, R. W., PAUL, C. J. (1995): Low-flow Purging and sampling of groundwater monitoring wells with dedicated systems. GWMR Winter 1995, 116.123.
- [67] RIPPEN, G., HELD, T. JACOB, H. (2005): Kriterien für die Beendigung von Grundwasser- und Bodenluftüberwachungen in: Handbuch Altlasten, Band 8 Teil 2: Arbeitshilfen zur Überwachung und Nachsorge von altlastverdächtigen Flächen und Altlasten, Hessisches Landesamt für Umwelt und Geologie, 117-138.
- [68] SACHSEN (2007): VwVSächsAltK - Verwaltungsvorschrift des Sächsischen Staatsministeriums für Umwelt und Landwirtschaft über das Sächsische Altlastenkataster (Abl. Nr. L 30 vom 26.07.2007 S. 1002).

- [69] SÄCHSISCHES LANDESAMT FÜR UMWELT UND GEOLOGIE (1998): Probenahme bei der Technischen Erkundung von Altlasten. Materialien zur Altlastenbehandlung 3/1998.
- [70] SÄCHSISCHES LANDESAMT FÜR UMWELT UND GEOLOGIE (2002): Ermessensleitende Regeln Altlasten - Grundwasser zum vorläufigen Rahmenerlass Altlasten-Grundwasser vom 27.06.2000 (Dresden, 18.06.2002), [https://www.boden.sachsen.de/download/Ermessensleitende\\_Regeln1.pdf](https://www.boden.sachsen.de/download/Ermessensleitende_Regeln1.pdf), zuletzt aufgerufen am 25.03.2024.
- [71] SÄCHSISCHES LANDESAMT FÜR UMWELT, LANDWIRTSCHAFT UND GEOLOGIE (2018): Bewertungshilfen bei der Gefahrenverdachtsermittlung in der Altlastenbehandlung; Orientierungswerte zur Ermessensausübung sowie Prüf- und Maßnahmenwerte, 04.11.2019 (Redaktionsschluss), Aktualisierungsstand: Oktober 2022, <https://publikationen.sachsen.de/bdb/artikel/13456>, zuletzt aufgerufen am 25.03.2024.
- [72] SÄCHSISCHES LANDESAMT FÜR UMWELT, LANDWIRTSCHAFT UND GEOLOGIE (1994-2018): Branchenbezogene Merkblätter zur Altlastenbehandlung, <https://www.boden.sachsen.de/branchenbezogene-merkblätter-17149.html>, zuletzt aufgerufen am 07.07.2021.
- [73] SÄCHSISCHES STAATSMINISTERIUM FÜR UMWELT UND GEOLOGIE, LANDESAMT FÜR UMWELT UND GEOLOGIE (2001): Handbuch zur Altlastenbehandlung, Teil 5: Gefährdungsabschätzung, Pfad und Schutzgut Oberflächenwasser.
- [74] SÄCHSISCHES STAATSMINISTERIUM FÜR UMWELT UND GEOLOGIE, LANDESAMT FÜR UMWELT UND GEOLOGIE (2001): Handbuch zur Altlastenbehandlung, Teil 6: Gefährdungsabschätzung, Pfad Luft.
- [75] SÄCHSISCHES STAATSMINISTERIUM FÜR UMWELT UND GEOLOGIE, LANDESAMT FÜR UMWELT UND GEOLOGIE (2000): Handbuch zur Altlastenbehandlung, Teil 9: Sanierung.
- [76] SÄCHSISCHES STAATSMINISTERIUM FÜR UMWELT UND LANDWIRTSCHAFT, SÄCHSISCHES LANDESAMT FÜR UMWELT, LANDWIRTSCHAFT UND GEOLOGIE, ARGE AFC SACHSEN (2018): Projekthandbuch zur Altlastenfreistellung in Sachsen, Stand: Dezember 2010, aktualisiert Januar 2018.
- [77] SÄCHSISCHES STAATSMINISTERIUM FÜR UMWELT UND LANDWIRTSCHAFT (2000): Vorläufiger Rahmenerlass „Altlasten/Grundwasser – Bewertungen und Festsetzung vorläufiger Sanierungszielwerte am Ende der Detailuntersuchung“, 27.06.2000.
- [78] SÄCHSISCHES STAATSMINISTERIUM FÜR UMWELT UND LANDWIRTSCHAFT (2012): Umweltüberwachung im Freistaat Sachsen – Überwachungserlass (Stand: 14. Oktober 2020).
- [79] SÄCHSISCHES STAATSMINISTERIUM FÜR UMWELT UND LANDWIRTSCHAFT (2012): Konzept zur Wahrnehmung von Überwachungsaufgaben durch die Umweltbehörden im Freistaat Sachsen – Überwachungskonzept Umwelt (Stand: Oktober 2020).
- [80] SächsWG - SÄCHSISCHES WASSERGESETZ erlassen als Artikel 1 des Gesetzes zur Änderung wasserrechtlicher Vorschriften vom 12. Juli 2013.
- [81] UMWELTBUNDESAMT (UBA) (1999): Erarbeitung von Programmen zur Überwachung von altlastenverdächtigen Flächen und Altlasten, Umweltbundesamt, Forschungsbericht FKZ: 296 77 816, UBA Texte 96/99.
- [82] UMWELT UND NATURSCHUTZ, LANDWIRTSCHAFT UND VERBRAUCHERSCHUTZ, NRW (2001): Materialien zur Altlastensanierung und zum Bodenschutz (2001): Arbeitshilfe Bodenluftsanierung - Ergebnisse einer Recherche zum Stand der Bodenluftsanierungspraxis mit Handlungsempfehlungen für die Planung und Durchführung von Bodenluftsanierungsmaßnahmen.
- [83] UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY (EPA) (2008): A Systematic Approach for Evaluation of Capture Zones at Pump and Treat Systems. EPA 600/R-08/003.
- [84] UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY (EPA) (2009): Statistical analysis of groundwater monitoring data at RCRA facilities. Unified Guidance. EPA 530/R-09-007.
- [85] VDI Richtlinie 3860 Blatt 1 (2006): Messen von Deponiegas – Grundlagen, 2006-05.
- [86] VDI Richtlinie 3865, Blatt 1 (2005): Messen organischer Bodenverunreinigungen; Messplanung für die Untersuchung der Bodenluft auf leichtflüchtige organische Verbindungen, 2005-06.

- [87] VDI Richtlinie 3865 Blatt 2 (1998): Messen organischer Bodenverunreinigungen - Techniken für die aktive Entnahme von Bodenluftproben, 1998-01.
- [88] VDI RICHTLINIE 3865 Blatt 2 (1998): Messen organischer Bodenverunreinigungen; Techniken für die aktive Entnahme von Bodenluftproben, 1998-01.
- [89] VDI Richtlinie 4300, BLATT 1 (1995): Messen von Innenraumluftverunreinigungen - Allgemeine Aspekte der Messstrategie, 1995-12.
- [90] WEBER, D. D., ENGLUND, E. J. (1994): Evaluation and comparison of spatial interpolators I and II. Math Geol 26, 381-391 and 589-603.
- [91] WENZEL, A., SCHLICH, K, SHEMOTYUK, L., NENDZA, M. (1990): Revision der Umweltqualitätsnormen der Bundes-Oberflächengewässerverordnung nach Ende der Übergangsfrist für Richtlinie 2006/11/EG und Fortschreibung der europäischen Umweltqualitätsziele für prioritäre Stoffe, UBA-Texte 47/2015, ISSN 1862-480, Juni 2015.
- [92] WERNER, P., BÖRKE, P., HÜSERS, N. (HRSG.) (2008): Leitfaden „Natürliche Schadstoffminderung bei Teeröfaltlasten“ Themenverbund 2 „Gaswerke, Kokereien, Teerverarbeitung, (Holz-)Imprägnierung“ im BMBF-Förderschwerpunkt „Kontrollierter natürlicher Rückhalt und Abbau von Schadstoffen bei der Sanierung kontaminierter Grundwässer und Böden (KORA).
- [93] WOOD, A. L., ANNABLE, M. D., JAWITZ, J. W., FALTA, R. W., BROOKS, M. C., ENFIELD, C. G. SURESH, P, RAO, C., GOLTZ, M. N. (2009): Impacts of DNAPL Source Treatment: Experimental and Modeling Assessment of the Benefits of Partial DNAPL Source Removal. SERDP Project ER-1295, EPA 600/R-09/096.

## **Teil B Ergänzende Hinweise zur Überwachung**

### **I Branchenbezogene relevante Parameter**

Für ausgewählte Branchen können die jeweils typischen Stoffe und Stoffgruppen den Branchenbezogenen Merkblättern [72] entnommen werden. Die branchenrelevanten Parameter werden zudem den typischen, ehemals bestehenden Technologieschwerpunkten zugeordnet, um so die Vorgehensweise bei einer Erkundung eines Altlastenstandortes besser planen zu können.

### **II Hinweise zur Prozess- bzw. Erfolgsüberwachung verschiedener Sanierungsverfahren**

#### **II.1 Einleitung**

In den nachfolgenden Kapiteln werden ausgewählte Sanierungsverfahren vorgestellt. Spezielle Anforderungen an die Überwachung ergeben sich auch aus umfangreichen Neu- und Weiterentwicklungen von in-situ-Verfahren und betreffen z. B. Art, Ausbau und Beprobung von Überwachungsmessstellen.

#### **II.2 Bodensanierungen durch Bodenaustausch**

Beim Bodenaustausch wird kontaminierter Boden, dessen Schadstoffgehalte die für den Einzelfall festgelegten Maßnahmenwerte<sup>9</sup> überschreiten, ausgekoffert, abtransportiert und durch geeigneten, zum Einbau zugelassenen, unbelasteten Boden ersetzt. Zum Erfolgsmonitoring gehört an dieser Stelle die Beprobung der offenen Baugrube (Sohle, Wände) durch die Entnahme von Bodenproben. Fallbezogen kann eine Grundwasserüberwachung im Abstrom erforderlich sein, wenn relevante Restkontaminationen am Standort verbleiben oder bereits vor der Sanierung Schadstoffe ins Grundwasser gelangt sind. Damit wird sichergestellt, dass der kontaminierte Boden mit Schadstoffgehalten oberhalb der festgelegten Maximalwerte vollständig - oder im Fall verbleibender Restbelastungen zumindest größtenteils - ausgehoben wurde.

##### **Messnetz**

Die Untersuchungen beschränken sich i. d. R. auf die Beprobung des Bodens gemäß Sanierungs- bzw. Qualitätssicherungsplan, unter Zuhilfenahme von vor Ort-Analytik bzw. optischen Kriterien. Messnetze liegen beim Bodenaustausch nur bei der Überwachung eventueller Schadstofffahnen vor.

##### **Probenahme und Analytik**

Der Umfang der Beprobung richtet sich nach der Größe der Fläche. Als Richtwert gilt die Entnahme einer Mischprobe je 100 m<sup>2</sup> Fläche (z. B. aus 10 einzelnen Einstichen mittels Stechzylinder). Bei der Festlegung des Überwachungsumfangs ist die Homogenität des Untergrunds zu berücksichtigen, da sich bindige Horizonte in der Regel durch eine erhöhte Schadstoffadsorption auszeichnen. Bei organoleptischen Auffälligkeiten können auch Punktproben entnommen werden.

Bei der Beprobung der Grubenwand werden die Bodenproben vor allem aus dem im Rahmen der Erkundung identifizierten belasteten Bodenhorizonten entnommen. Ist dies nicht bekannt, wird der oben beschriebene Flächenansatz gewählt.

---

<sup>9</sup> mit Inkrafttreten der Novellierung der BBodSchV am 01.08.2023 wurden einige Maßnahmenwerte angepasst. Die aktuellen Maßnahmenwerte sind in BBodSchV Anlage 2 dargestellt.

## II.3 Bodenluftsanierungen

Bei der Bodenluftsanierung mittels Absaugung der kontaminierten Bodenluft und deren Reinigung erfolgt eine regelmäßige Beprobung der Absaugpegel<sup>10</sup>. Die gemessenen Schadstoffkonzentrationen dienen neben dem Prozessmonitoring, bei dem der Verlauf der Abnahme der Schadstoffe in der Bodenluft überwacht wird, auch der Überwachung des Sanierungserfolges (Erfolgsmonitoring). Wegen der bei der Bodenluftsanierung ausgeprägten Reboundeffekte (vgl. Kapitel 3), erfolgt im späteren Verlauf der Bodenluftsanierung regelmäßig ein Intervallbetrieb der Absaugung. Es ist erforderlich Bodenluftproben während der Absaugpause, am Ende der Absaugphase und in kurzen Abständen nach Wiederbeginn der Bodenluftabsaugung (beispielsweise nach 1, 4 und 8 h) (vgl. [86]) zu entnehmen. Konzentrationsänderungen während der Absaugpause und unmittelbar nach Wiederbeginn der Absaugung lassen auf das verbliebene Schadstoffinventar schließen. Es ist in Abhängigkeit vom Grundwasserstand zu beachten, dass bei Bodenluftabsaugungen mit hohem Unterdruck (> 0,5 bar) auch der Übertritt der Schadstoffe aus dem Grundwasser in die Bodenluft forciert wird. Damit verbunden kann eine Verfälschung des Ergebnisses der Bodenluftsanierung auftreten, gleichzeitig wird in Abhängigkeit von den stoffspezifischen Eigenschaften (Flüchtigkeit) die prognostisch eintretende erneute Bodenluftbelastung durch die aus dem Grundwasser entgasenden Schadstoffe sichtbar.

### Messnetz

Messnetze für Bodenluftsanierungen sind anhand der Untergrundverhältnisse in der ungesättigten Bodenzone und damit der Reichweite der Absaugpegel festzulegen.

In der Regel beträgt die Filterlänge 1 bis 2 m, wobei die Filterbereiche, in Abhängigkeit vom angelegten Unterdruck, nicht im Einflussbereich ausgasender Schadstoffe aus dem Grundwasser angeordnet sein sollten.

### Probenahme und Analytik

Die Untersuchungsmethoden beschränken sich i. d. R. auf die Beprobung der Bodenluft mit nachfolgender chemischer Analyse der Proben flüchtiger Stoffe.

Da die Probenahme meist unterdruckseitig (saugseitig) des Absaugaggregats erfolgt, ist zusätzlich eine Vorlagepumpe erforderlich, um den Unterdruck in einen leichten Überdruck zu konvertieren [40]. Der Überdruckbereich ist einfach zu beproben. Insbesondere die Messung der sogenannten Deponiegase während des Intervallbetriebes gibt Auskunft über einen natürlichen Schadstoffabbau. Ohne Absaugung muss, wenn aerob abbaubare Schadstoffe vorliegen, die Sauerstoffkonzentration sinken und die CO<sub>2</sub>-Konzentration zunehmen.

## II.4 Grundwassersanierung - Hydraulische Verfahren (Pump-and-Treat-Verfahren)

Bei den hydraulischen Verfahren zur Grundwassersanierung erfolgt die Entnahme aus einem oder mehreren Förderbrunnen mit anschließender Aufbereitung und Ableitung (z. B. in die Kanalisation, in Oberflächenwasser) bzw. Infiltration zurück in den Grundwasserleiter.

---

<sup>10</sup> Zu einem späteren Zeitpunkt (wenn keine Bodenluftabsaugung erfolgt oder diese bereits eingestellt ist) können die Bodenluftabsaugpegel auch als reguläre Monitoringpegel verwendet werden. Neben den in der Regel dicht sitzenden Absaugpegeln sind keine weiteren Monitoringpegel erforderlich.

Schwerpunkte des Prozessmonitorings sind, neben der kontinuierlichen Überprüfung der Schadstoffparameter und deren Reduzierung im Roh- und Reinwasser, die Überwachung der verfahrenstechnisch relevanten Parameter. Diese besitzen besondere Relevanz bei ggf. auftretenden Veränderungen im Chemismus des Grundwassers (z. B. wechselnde Milieubedingungen). Solche Veränderungen können erhebliche Auswirkungen auf die Wirksamkeit der Sanierungsanlage in den einzelnen Verfahrensstufen (z. B. erhöhte Ausfällungen) und die Repräsentativität der Ergebnisse haben. Gegebenenfalls ist eine Anpassung der Sanierungsanlage oder im Extremfall des Sanierungsverfahrens erforderlich.

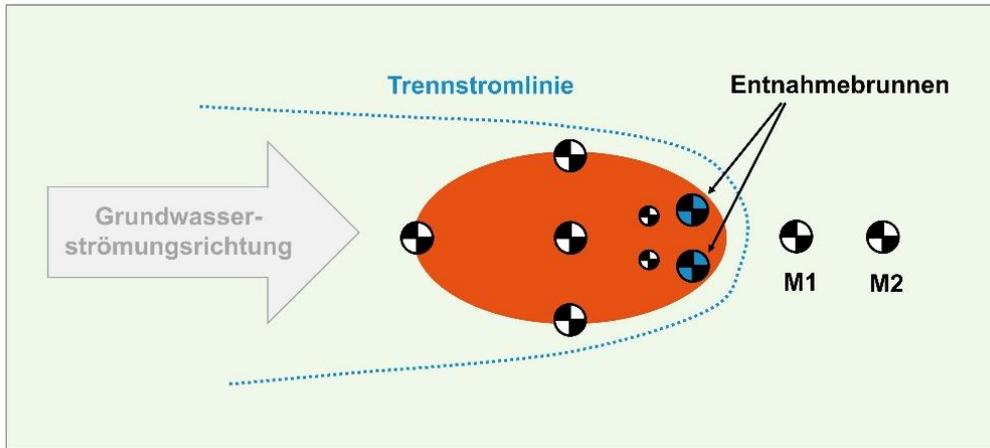
Die Überwachung im Rahmen des Erfolgsmonitorings konzentriert sich auf:

- die Erfassung von Grund- und Oberflächenwasserständen zur Erstellung von Grundwassergleichenplänen,
- die Beprobung von Grundwassermessstellen im Schadensherd und in der Schadstofffahne des kontaminierten Standortes,
- die Entnahme von anlagenbezogenen Roh- und Reinwasserproben sowie,
- Chemische Analysen der Proben,
- den Nachweis der Abnahme der Schadstoffkonzentrationen im Schadensherd und
- den Nachweis der Wirksamkeit der hydraulischen Maßnahme.

### **Messnetz**

Durch die Förderung von Grundwasser aus Entnahmebrunnen und die damit verbundene hydraulische Beeinflussung ergeben sich spezielle Anforderungen an das Überwachungsmessnetz bei Pump-and-Treat-Sanierungen.

Da die Grundwasserstände in den Entnahmebrunnen wegen des Eintrittswiderstands in den Brunnen in der Regel nicht die tatsächlichen flächenhaften Grundwasserverhältnisse im Grundwasserleiter reflektieren, können diese nicht zur Erstellung von Grundwassergleichenplänen herangezogen werden. Daher sind in deren Nähe weitere Grundwassermessstellen erforderlich. Ein typisches Grundwassermessstellennetz ist in Abbildung 7 gezeigt. Die Grundwassermessstellen im kontaminierten Bereich dienen dem Nachweis der Abnahme der Schadstoffkonzentrationen. Die Grundwassermessstelle abstromig einer Trennstromlinie dient zur Überwachung der Wirksamkeit der hydraulischen Maßnahme. Ist diese gegeben, müssen eventuelle Restschadstoffe an der abstromigen Messstelle (M1) unter Berücksichtigung der Retardierung und Rückdiffusion nach Beginn der Sanierungsmaßnahme kontinuierlich abnehmen. Wird die Grundwasserentnahme (siehe Entnahmebrunnen) innerhalb der Schadstofffahne realisiert, so wird der vordere Teil der Schadstofffahne durch die Grundwasserentnahme ggf. nicht erfasst. Sie strömt in Grundwasserströmungsrichtung ab und löst sich durch Abbau und/oder Verdünnung auf. Gegebenenfalls unterliegen die Schadstoffe in diesem Fahnenenteil einem natürlichen mikrobiellen Abbau. Neben der notwendigen Überwachung des Schadherdes sollten sowohl das Abströmen als auch Anhaltspunkte für den natürlichen Abbau betrachtet werden. Dazu ist im Beispiel in Abbildung 7 die weiter abstromig gelegene Messstelle (M2, gegebenenfalls mehrere Messstellen) erforderlich.



**Abbildung 7: Typisches Messnetz bei Pump-and-Treat-Verfahren**

Ist der Grundwasserleiter heterogen, so sind abstromig der Trennstromlinien mehrere Kontrollmessstellen, bevorzugt Messstellengruppen oder zusätzliche Messstellen, zur Erfassung der vertikalen Schadstoffverteilung erforderlich.

### Probenahme und Analytik

Analysiert werden die relevanten Schadstoffparameter. Durch natürlichen mikrobiellen Abbau von organischen Schadstoffen kann es zu einer vorübergehenden Akkumulierung von Metaboliten kommen, die sich als gelöster organischer Kohlenstoff (DOC) wiederfinden können. Daher sollte auch der DOC bei organischen Schadstoffen analysiert werden.

## II.5 Grundwassersanierung - Chemische Verfahren

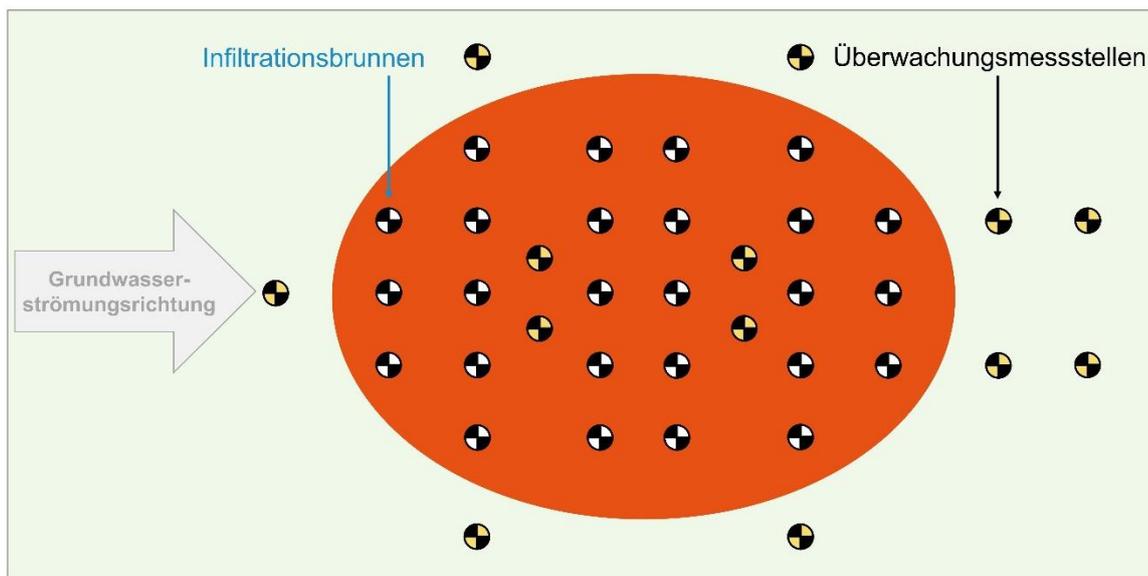
Bei den Verfahren zur In-situ chemischen Oxidation (ISCO) werden Oxidationsmittel in wässriger Lösung in den Untergrund eingebracht, z. B. Wasserstoffperoxid, Fentons Reagenz, Persulfat, Kalium- oder Natriumpermanganat. Über verschiedene abiotische, spontan ablaufende Oxidationsreaktionen werden die Schadstoffe mineralisiert.

Dabei können auch Metabolite vorübergehend akkumuliert werden. In der Regel können natürliche Mikroorganismen in Bodenporen überleben und insbesondere nach Abschluss der chemischen Reaktion zum Abbau der zwischenzeitlich akkumulierten Metabolite beitragen. Die meisten Oxidationsmittel hinterlassen nach deren Verbrauch Produkte, die den Mikroorganismen als Elektronenakzeptoren zum Abbau dienen, z. B. Sulfat aus Persulfat, Sauerstoff und Fe-III aus Fentons Reagenz. Das Einbringen der wässrigen Oxidationsmittellösung erfolgt entweder mit Hilfe eines dichten Injektionspegelnetzes oder über sogenannte Rezirkulationsschleifen. Dabei wird Grundwasser abstromig des Schadens entnommen, optional gereinigt, mit Oxidationsmittel versetzt und anstromig wieder infiltriert. Rezirkulationsverfahren können mit sehr rasch reagierenden Oxidationsmitteln wie dem Fentons Reagenz nicht eingesetzt werden [32] [33]. Die Injektion von Fentons

Reagenz muss wegen der verstärkten Strippung leichtflüchtiger Schadstoffe aufgrund von Wärme- und Gasbildung mit einer Bodenluftabsaugung kombiniert werden. In diesem Fall sind im Rahmen der Überwachung auch Bodenluftuntersuchungen zu realisieren und bis ins Grundwasser reichende Bauwerke auf eventuelle Beschädigungen zu überprüfen (Beweissicherung). So stellt die deutliche Erniedrigung des pH-Wertes beim Einsatz von Fentons Reagenz (Versauerung) und der Einsatz von sulfathaltigen Verbindungen (Schwefelsäure, Persulfat) eine erhebliche Betonaggressivität dar, welche zu überwachen bzw. zu vermindern ist.

## Messnetz

Das ISCO-Verfahren ist in der Regel durch ein engmaschiges Netz von Infiltrations- und Überwachungsmessstellen charakterisiert. Ein typisches Messstellennetz ist in Abbildung 8 zu sehen.



**Abbildung 8: Typisches Messnetz bei ISCO-Verfahren (einschließlich Infiltrationsbrunnen)**

Die Grundwassermessstellen innerhalb des kontaminierten bzw. in Sanierung befindlichen Bereichs (rote Ellipse) dienen dem Nachweis der Abnahme der Schadstoffkonzentrationen und der Verteilung des Oxidationsmittels. Die Anstrommessstelle erlaubt nicht nur die Überprüfung der Kontaminationsfreiheit des Anstromes, sondern auch die Beurteilung der Veränderung der geochemischen Verhältnisse gegenüber dem Abstrom. Lateral angeordnete Messstellen erlauben die Erfassung einer möglichen Verdrängung der Schadstoffe während der Oxidationsmittelinfiltrationen. Schadstoffe können durch die Infiltrationen lateral verfrachtet werden. Aus den dadurch neu kontaminierten Bereichen strömen nach dem Ende der Infiltrationen die Schadstoffe ab bzw. unterliegen einem chemischen/mikrobiellen Abbau, so dass die Verfrachtung nicht zu einer dauerhaften Belastung neuer Bereiche führt.

Die Grundwassermessstellen seitlich und vor allem abstromig des Schadens haben eine Reihe unterschiedlicher Funktionen. Sie dienen im Wesentlichen:

- dem Nachweis einer möglichen Verfrachtung von Schadstoffen durch Verdrängung,
- dem Nachweis einer möglichen Verfrachtung von Schadstoffen durch Mobilisierung (die Oxidationsmittel bauen auch den natürlichen organischen Kohlenstoff ab, wodurch die Sorption der Schadstoffe vermindert wird),
- dem Nachweis des Abströmens von Metaboliten (DOC-Anstieg) und gegebenenfalls mobilisierten Schwermetallen und
- dem Nachweis des Sanierungserfolges (Verminderung des Abströmens von Schadstoffen nach Abbau im Reaktionsraum).

Abstromig des Reaktionsraumes verbliebene Restschadstoffe müssen unter Berücksichtigung der Retardierung und Rückdiffusion (Teil A, Kapitel 5.1) nach dem erfolgreichen Abschluss der Sanierungsmaßnahme zunächst abströmen bzw. auf natürlichem Wege abgebaut werden, bevor an der abstromig gelegenen Messstelle die Schadstoffkonzentrationen signifikant sinken. Um die oben genannten Prozesse zu

überwachen, einschließlich der Rückbildung der geochemischen Bedingungen entlang der Grundwasserfließrichtung abstromig des Reaktionsraumes, sind mehrere Grundwassermessstellen in verschiedenen Abständen zum Reaktionsraum erforderlich.

Für die Festlegung der Anzahl der Infiltrations- und Überwachungsmessstellen bzw. der Menge des Oxidationsmittels sind die Fließgeschwindigkeit des Wassers (Durchlässigkeit des Grundwasserleiters) und die Wirksamkeit und der damit verbundene Reaktionsraum des Oxidationsmittels zu beachten.

Beim Einsatz des Fentons Reagenz ist nur eine unmittelbare Schadstoffeliminierung im Bereich des Infiltrationspegels zu verzeichnen. Bei Persulfat und Permanganat ist der Reaktionsraum durch Abströmen der längerlebigen Oxidationsmittel deutlich größer. Dies ist bei der Überwachung zu berücksichtigen.

Ist der Grundwasserleiter stark heterogen ausgebildet und wurden Oxidationsmittellösungen mit einer Dichte  $> 1$  kg/L eingesetzt, so sollten die Grundwassermessstellen abstromig des Reaktionsraumes so gebaut sein, dass eine Erfassung auch der vertikalen Grundwasserqualität möglich wird, um absinkende Lösungen zu überwachen.

Die initiierten Reaktionen können insbesondere bei erhöhten Oxidationsmittelkonzentrationen gegebenenfalls zu einer (meist vorübergehenden) Verblockung des Grundwasserleiters führen, beispielsweise durch die Bildung von Sauerstoffgasblasen nach der Infiltration von Fentons Reagenz oder durch Ausfällung von Manganoxid nach Infiltration von Permanganat. Daher ist die Erstellung von Grundwassergleichenplänen, mit denen aufgrund von lokaler Verblockung veränderte Grundwasserfließrichtungen erkannt werden können, erforderlich.

### Probenahme und Analytik

Neben den üblichen Anforderungen an die Probenahme ist zu beachten, dass Grundwasserproben erst dann entnommen werden dürfen, wenn das Oxidationsmittel abreagiert ist, andernfalls verändert sich die Grundwasserprobe vom Zeitpunkt der Probenahme bis zur Analyse zu stark. Dies bedeutet, dass bei der Probenahme die Restkonzentration der Oxidationsmittel mittels Schnelltests gemessen werden müssen. Für Fentons Reagenz (hier:  $H_2O_2$ ) und Persulfat stehen entsprechende Teststäbchen zur Verfügung, welche die Konzentration der Oxidationsmittel durch eine Farbreaktion anzeigen. Permanganat kann anhand der Lilafärbung der Grundwasserprobe optisch erkannt werden. Zwar besteht die Möglichkeit, noch vorhandene Oxidationsmittel durch die Zugabe von Reduktionsmittel zu inaktivieren, doch wird dadurch auch eine Reihe wichtiger Analyseparameter (beispielsweise der DOC bei Verwendung organischer Reduktionsmittel) verändert.

Analysiert werden im Rahmen des Erfolgsmonitorings vor allem die zu sanierenden Schadstoffe. Durch den forcierten chemischen Abbau kann es zu einer vorübergehenden Akkumulierung von als DOC analysierbaren Metaboliten kommen. Daher muss auch der DOC analysiert werden. Ebenfalls sollten auf jeden Fall auch Schwermetalle im Sanierungsareal und dessen Abstrom analysiert werden, da diese durch die Oxidationsreaktion (jedoch abhängig vom verwendeten Oxidationsmittel unterschiedlich stark) mobilisiert werden können (z. B. Hg und Cr). Zudem ist es erforderlich, die Redoxindikatoren (zumindest im Zustrom und in unterschiedlichen Entfernungen im Abstrom) zu analysieren. Dies dient der Erkennung der Veränderung der geochemischen Verhältnisse im Grundwasserleiter nach Infiltration der Oxidationsmittel und der „Erholung“ der Redoxbedingungen entlang der Strömungsrichtung im Abstrom, was auch wieder zu einer Immobilisierung der im Reaktionsraum mobilisierten Schwermetalle führen sollte. Hinsichtlich der Überwachung der Bodenluft (z. B. Ausgasen von leichtflüchtigen organischen Schadstoffen bei der Infiltration von Fentons Reagenz) ist eine kontinuierliche PID-Messung zu empfehlen.

## II.6 Grundwassersanierung - Mikrobielle Verfahren

Bei den mikrobiellen *In-situ*-Sanierungsverfahren (bspw. ENA-Verfahren) werden Elektronenakzeptoren (Sauerstoff, Nitrat, Sulfat) zur Aktivierung der am Standort vorhandenen Mikroorganismen hinsichtlich des Abbaus der Schadstoffe in den Grundwasserleiter eingebracht. Zum Abbau hochchlorierter Methane und Ethene müssen dagegen Elektronendonatoren (organisches Material wie beispielsweise Melasse, Lactat oder Speiseölemulsionen) infiltriert werden. Im Rahmen des forcierten Schadstoffabbaus können Metabolite vorübergehend akkumulieren. Das Einbringen der wässrigen Elektronenakzeptor- oder Elektronendonatorlösung erfolgt mit Hilfe eines dichten Injektionsmessnetzes oder über sogenannte Rezirkulations-schleifen [32] [33].

Zu den ablaufenden mikrobiellen Prozessen erfolgen nähere Ausführungen im Kapitel II.12.

### Messnetz

Das Grundwasser-Messnetz zur Überwachung der mikrobiellen Verfahren ist in der Regel ähnlich dem Messnetz für ISCO-Verfahren (vgl. Teil B, II.5).

### Probenahme und Analytik

Analysiert werden im Rahmen des Erfolgsmonitorings vor allem die als relevant festgelegten Schadstoffparameter. Durch den forcierten mikrobiellen Abbau kann es zu einer vorübergehenden Akkumulation von als DOC analysierbaren Metaboliten kommen. Daher muss auch der DOC analysiert werden. Bei der Forcierung des reduktiven mikrobiellen Abbaus von LCKW (Infiltration von Elektronendonatoren) gehören die Metabolite (geringer chlorierte LCKW) zum Standardparameterumfang. Darüber hinaus sollten bei den chlorierten C<sub>2</sub>-Verbindungen die Abbauendprodukte (Ethen, Ethan) im Abstrom des Reaktionsraumes analysiert werden. Nach der Infiltration von Elektronendonatoren in den Grundwasserleiter verändern sich dort die Redoxbedingungen sehr stark hin zu einem stärker reduzierten Zustand. Dies kann dazu führen, dass im Abstrom des Reaktionsraumes eine Reihe von Prozessen auftreten, die analytisch mit Hilfe der Beprobung mehrerer, in unterschiedlichen Abständen zum Reaktionsraum installierten Grundwassermessstellen überwacht werden sollten:

- Nachweis der vollständigen Zehrung der gegebenenfalls abströmenden Elektronendonatoren (gemessen als DOC) oder Elektronenakzeptoren (SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>, NO<sub>3</sub><sup>-</sup>) sowie deren Endprodukte (S<sup>2-</sup>) oder Metabolite (NO<sub>2</sub><sup>-</sup>)
- Sulfid (S<sup>2-</sup>) kann in höheren Konzentrationen toxisch wirken und den weiteren natürlichen Abbau im Reaktionsraum oder im Abstrom hemmen,
- bei der Infiltration von Elektronenakzeptoren dient die Analyse des DOC der Überwachung eventuell abströmender Metabolite,
- Überprüfung der Verfrachtung von gegebenenfalls zugegebenen und abströmenden Nährsalzen (PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>, NH<sub>4</sub><sup>+</sup>, NO<sub>3</sub><sup>-</sup>) zur Förderung des mikrobiellen Abbaus. Wegen deren Retardation können die Nährsalze mitunter Jahre nach Ende der aktiven Sanierung noch in erhöhten Konzentrationen nachgewiesen werden,
- bei der Infiltration der Elektronendonatoren kann es durch die Verminderung des Redoxpotenzials zur Mobilisierung redoxsensitiver Metalle/Metalloide (vor allem Arsen) kommen,
- der Abbau der infiltrierten Elektronendonatoren führt zur Bildung von Methan (CH<sub>4</sub>), welches ausgasen kann, aber auch unter den bei höheren Redoxpotenzialen ablaufenden Redoxprozessen zu Kohlendioxid (CO<sub>2</sub>) oxidiert wird.

Es ist erforderlich, die Veränderungen der geochemischen Verhältnisse im Grundwasserleiter nach Infiltration der Elektronenakzeptoren oder Elektronendonatoren und der „Erholung“ der Redoxbedingungen entlang der Strömungsrichtung im Abstrom zu erfassen.

## II.7 Grundwassersanierung - Physikalische Verfahren

Physikalische Verfahren können sehr unterschiedlich ausgestaltet sein. Bei den thermischen Verfahren wird Wärme in den Untergrund eingebracht oder dort erzeugt. Dadurch gehen die Schadstoffe in die Gasform über, migrieren in die ungesättigte Bodenzone und werden mittels einer Bodenluftabsaugung entfernt. Die gängigsten Verfahren sind ECH (*electrical conductive heating*), ERH (*electrical resistive heating*) und SEE (*steam enhanced extraction*). Bei konduktiven Verfahren (ECH) werden feste Wärmeelemente in einem dichten Netz in den Grundwasserleiter und meist auch ungesättigten Boden eingebaut. Bei dem ERH-Verfahren werden Elektroden in den Boden eingebracht und ein elektrischer Strom angelegt, woraufhin sich der Boden aufgrund seines Widerstandes erhitzt. Ein weiteres Verfahren ist die Dampf-Luft-Injektion (SEE).

Die Überwachung im Rahmen des Erfolgsmonitorings konzentriert sich auf die Entnahme und Analyse von Grundwasser- und Bodenluftproben. Darüber hinaus muss die Bodentemperatur, die nach dem Ende der aktiven Sanierung nur langsam über Monate hinweg abnimmt und sich wieder auf die Umgebungstemperatur einstellt, mit Hilfe von im Untergrund installierten Thermoelementen gemessen werden.

Bei überbauten Sanierungsstandorten ist zu prüfen und messtechnisch zu überwachen, ob die durch die Aufheizung des Bodens mobilisierten leichtflüchtigen Schadstoffe über den Bodenluftpfad in die Innenräume der Gebäude eindringen können. Durch die Temperaturerhöhung im Untergrund ist eine Schrumpfung des Bodens nicht auszuschließen, sofern ein ausreichend hoher Tongehalt und/oder organische Böden vorliegen. Dies kann zu bautechnischen Problemen führen. Damit ist eine Überwachung des Setzungsverhaltens von aufstehenden Gebäuden während einer Sanierung erforderlich.

### Messnetz

Das Grundwasser-Messnetz zur Überwachung physikalischer Sanierungsverfahren ist in der Regel ähnlich dem Messnetz für ISCO-Verfahren (siehe Teil B, II.5).

Wesentlich sind Grundwassermessstellen im Reaktionsraum, mit deren Hilfe die Abnahme der Schadstoffkonzentrationen zu überwachen ist. Die entstehenden Gase (Schadstoffe) können auch in der Bodenluft lateral migrieren, außerhalb des erhitzten Bereiches abkühlen und kondensieren, wenn der zu erheizende und abzusaugende Bereich nicht ausreichend groß gewählt wurde. Daher müssen am Rande des Aufheizbereiches nicht nur Grundwassermessstellen, sondern auch Bodenluftmessstellen installiert werden. Meist ist der Erfolg bei der Schadstoffentfernung hinreichend groß, so dass kaum eine Verfrachtung in den Abstrom beobachtet wird. Dennoch muss dies mit entsprechenden Abstrommessstellen überwacht werden.

### Probenahme und Analytik

Das Verfahren der thermischen Desorption besitzt eine starke Vertikalkomponente. Die Schadstoffe werden im ungesättigten Bodenbereich und im Grundwasserleiter verdampft, migrieren bevorzugt vertikal und werden vertikal über eine Bodenluftabsaugung entfernt. Dies bedeutet, dass die Filterstrecken der Messstellen (vorrangig Messstellengruppen) so angeordnet sein müssen, dass vertikale Schadstoffgradienten erfasst werden können.

Wenn sich die Filterstrecke einer Grundwassermessstelle vollständig unterhalb des Grundwasserspiegels befindet, kann nach Öffnen der Messstellenkappe heißer Wasserdampf oder Grundwasser austreten. Erfasst die Filterstrecke auch den ungesättigten Bereich, ist das Austreten heißer Bodenluft nicht ausgeschlossen. Ist die Bodenoberfläche heiß, sind diese Gefahren insbesondere gegeben. Es empfiehlt sich

daher, die Messstellen mit einem Ventil, Hahn und Ablassschlauch auszustatten, so dass vor dem Öffnen der Messstelle ein Überdruck sicher abgelassen werden kann.

Neben den üblichen Anforderungen an die Probenahme ist zu beachten, dass bei den thermischen Verfahren in der Regel heiße Medien beprobt werden. Daher ist bei der Probenahme dem Arbeitsschutz (Vollgesichtsschirm, vor Wärme schützende Handschuhe und Kleidung) ein besonders hoher Stellenwert einzuräumen. Vorrangig sollte die Probenahme mit sehr geringer Förderrate (dem sogenannten *low flow purging and sampling*) durchgeführt werden. Vor der Probenabfüllung sollte das geförderte Grundwasser abgekühlt werden, indem der Probenahmeschlauch durch eine Eisschüttung gelegt wird. Dabei kann es zu Kondensationseffekten und folglich Minderbefunden in der Probe kommen. Das Abkühlen ist aber auf jeden Fall erforderlich, wenn der Grundwasserstrom durch eine Durchflusszelle mit Elektroden zur Messung der Feldparameter geleitet wird. Eine Alternative der Probenahme ist die Abfüllung der heißen Probe, sorgfältiges Verschließen des Probenahmegefäßes und anschließendes Abkühlen auf Eis. Dabei entsteht jedoch ein Unterdruck in den Probenahmegefäßen. Diese kann gegebenenfalls durch eine Belüftung ausgeglichen werden. Dazu wird das Septum des Probenahmegefäßes mit einer Kanüle durchstoßen.

Bodenluft wird in der Regel in vorevakuierten Aluminiumgefäßen entnommen. Da es bei der Abkühlung der Probe zu einer Kondensierung kommen kann, muss das Volumen des Kondensats und dessen Schadstoffkonzentration ebenfalls gemessen werden.

Analysiert werden im Rahmen des Erfolgsmonitorings vor allem die als relevant festgelegten Schadstoffparameter. Bei solchen Schadstoffen, die einen abiotischen Zerfall aufweisen (z. B. 1,1,1-Trichlorethan zu 1,1-Dichlorethen, was durch die Temperaturerhöhung beschleunigt wird), sind auch die Zerfallsprodukte in die Analytik aufzunehmen. Die Grundwasserhydraulik ist mit Hilfe von Grundwasserstandsmessungen zu überwachen. Nach Beendigung der Wärmezufuhr muss das Auskühlen mit Hilfe der für die Sanierung installierten Temperatursonden überwacht werden.

## **II.8 Sicherungsmaßnahmen - Oberflächenabdeckung**

Bei einer Oberflächenabdeckung als Sicherungsmaßnahme erfolgt der Auftrag verschiedener Abdeckschichten. Diese bestehen überwiegend aus natürlich bindigen Böden oder, bei einem nur temporären Einsatz, aus synthetischen Materialien. Darüber hinaus ist eine Abdeckung mit Asphalt denkbar (und eine anschließende Nutzung beispielsweise als Parkplatz).

Damit wird der Direktkontakt zum kontaminierten Boden, dessen Verlagerung durch Wind- und Wassererosion, Eintrag von Niederschlagswasser und die damit mögliche Auswaschung von Schadstoffen sowie der Austrag von flüchtigen Schadstoffen vermieden bzw. reduziert.

Die Überwachung besteht in der Regel aus einer visuellen Prüfung der Funktionsfähigkeit der Oberflächenabdeckung (z. B. jährlich) und einer Überwachung des Grundwasserabstroms. Besteht die Wahrscheinlichkeit der Ausgasung von flüchtigen Stoffen so ist diese ggf. mittels Entgasungsmessstellen zu überwachen. Im Fall von großen Altablagerungen ist außerdem das Setzungsverhalten anhand von Markierungen zu kontrollieren.

In speziellen Fällen ist weiterhin die Versickerungsrate des Niederschlagswassers bezüglich der Planungsvorgaben zu überprüfen.

## II.9 Sicherungsmaßnahmen - Oberflächenabdichtung

Bei einer Oberflächenabdichtung als Sicherungsmaßnahme erfolgt der Auftrag verschiedener Abdichtungsschichten.

Wesentliche Unterschiede zur Oberflächenabdeckung bestehen in der Unterbindung des Eindringens von Niederschlagswasser in Kontaminationsbereiche und in der Verhinderung des unkontrollierten Gasausstrags in die Atmosphäre beim Vorliegen gasförmiger Schadstoffe (einschließlich Methan).

Damit wird eine Lösung von Schadstoffen durch Niederschlag im ungesättigten Bodenbereich und ein anschließender Eintrag in das Grundwasser über den Sickerwasserpfad verhindert oder weitgehend minimiert.

Für Oberflächenabdichtungen gibt es zahlreiche Bauweisen. Am häufigsten angewendet werden mineralische Abdichtungen und Kunststoffdichtungsbahnen (KDB). Daneben kommen Kombinationsabdichtungen, geosynthetische Tondichtungsbahnen (Bentonitmatten) und Asphaltabdichtungen sowie seltener Kapillarsperren zum Einsatz. Begrünte Oberflächenabdichtungssysteme bestehen in der Regel aus Bewuchs, Rekultivierungsschicht, Entwässerungselement, Dichtung und Dichtungsauflage bzw. Gasdrainageschicht.

Die Oberflächenabdichtungssysteme müssen definierten Anforderungen hinsichtlich der Material- und Bodenbeschaffenheit, z. B. Wasserdurchlässigkeit, Wasserspeichervermögen, Nährstoffgehalt, Verformungsvermögen, Langzeitbeständigkeit des Oberflächengefälles sowie der Bepflanzung, z. B. Verdunstungsfaktor erfüllen.

Die Überwachung von Oberflächenabdichtungen dient der Gewährleistung dieser definierten Anforderungen und der Erkennung möglicher Fehlfunktionen. So können eine Reihe unterschiedlicher Prozesse zur Beeinträchtigung der Funktionsfähigkeit des Bauwerkes führen (vgl. Tabelle 4).

**Tabelle 4: Überwachung einer Oberflächenabdichtung (in Anlehnung an [57] gemäß Teil A, 10)**

Kontroll-element	Mögliche Überwachungstatbestände	Mögliche Ursachen	Überwachungsmaßnahmen
Oberfläche	Freilegen der Entwässerungsschicht und der Dichtung	Erosion, Windbruch von Gehölzen, Grabe- und Wühltätigkeiten	Standortbegehung
	Vegetationsschäden	Migration von Gasen, Veränderung der bodenhydrologischen Verhältnisse (Vernässung, Austrocknung)	Überwachung des Wirkungspfades Luft, Standortbegehung, Wasserbilanz
Entwässerungssystem	Verstopfung	Durchwurzelung	Abflussmessungen, Wasserbilanz, Standortbegehung
	Verschlämmung	Einwaschen von Feinstmaterial	Standortbegehung
Dichtungselement	Austrocknung	Kapillarer Wassertransport, Wasserentzug durch Vegetation	Überwachung des Wirkungspfades Wasser, Dichtungskontrolle, Aufgrabungen
		Temperaturschwankungen	
	Durchdringung	Wurzelwachstum	Standortbegehung

Kontroll- element	Mögliche Überwachungs- tatbestände	Mögliche Ursachen	Überwachungs- maßnahmen
	Verformung der Dichtung	Setzungen, Sackungen, Verformungen des Altlastkörpers, Stand- sicherheitsprobleme, Auflast	Standortbegehung, Setzungskontrollen, Aufgrabungen
	Rissbildung	Austrocknung, Setzungen, Verformungen	

Die *Oberflächenmorphologie* ist der wichtigste Indikator für eine Fehlfunktion des Bauwerkes. Eine Freilegung der Entwässerungs- und Dichtungsschicht durch beispielsweise Erosion, Windbruch, Grab- und Wühltätigkeiten oder Befahren mit schwerem Gerät ist leicht erkennbar und kann schnell beseitigt werden.

Bei Einsatz von *Entwässerungssystemen* können beispielsweise Verschlämmungen mit Feinmaterial oder Durchwurzeln zur Einschränkung der hydraulischen Leistungsfähigkeit führen. Eine Fehlfunktion der Drainageschicht ist nur durch Wasserbilanzen (einschl. Messungen des Drainageabflusses) erkennbar. Unter Umständen kann es auch zu Vernässungszonen an der Oberfläche oder zu einem auffällig hohen Anteil an Indikatorpflanzen für Feucht- oder Nässezonen kommen. Bei den bautechnischen Entwässerungseinrichtungen sind die einzelnen Wasserflüsse mit Hilfe von Rohren oder Gerinnen so zu kanalisieren, dass die einzelnen Schüttraten messbar sind.

Die Wirksamkeit der *Dichtungsschicht* ist meist nur unmittelbar überprüfbar. So besteht beispielsweise das Risiko einer Fehlfunktion bei Austrocknung, Durchdringung oder Rissbildung. Dieses Risiko ist bei mineralischen Dichtungen und geosynthetischen Tondichtungsbahnen höher als bei Kunststoffdichtungsbahnen, der Kombinationsdichtung und der Asphaltabdichtung. Insofern ist bei den zuletzt genannten Systemen der Überwachungsbedarf diesbezüglich als geringer einzustufen. Bei Asphaltbetonabdichtungen ist das Risiko einer Funktionseinbuße aufgrund ungleichmäßiger Setzungen höher einzustufen. Indizien für eine Fehlfunktion der Oberflächendichtung sind beispielsweise eine nicht geschlossene Wasserbilanz (s. u.) oder ein verstärktes Zutagetreten kontaminierter Bodenluft. Im Hinblick auf die Vegetation sollte das Wachstum tiefwurzelnder Vegetation verhindert werden. Diese kann darunterliegende Schichten in ihrer Funktion beeinträchtigen. Auch Pioniergehölze bilden oftmals ein dichtes, tiefreichendes Wurzelwerk aus, welches die Funktion der Entwässerungs- und der Dichtungsschicht beeinträchtigen kann. Im Falle hoher Schadstoffkonzentrationen kann nach Diffusion durch die Dichtungsschicht an die Oberfläche (bspw. beim Versagen der Dichtung) auch die Vegetation beeinträchtigt sein. In begründeten Einzelfällen kann auch eine Überprüfung der Schadstoffkonzentrationen in den Pflanzen in die Überwachung einbezogen werden. Die Überprüfung der Vegetation im Rahmen einer Flächenbegehung erfolgt daher vorzugsweise vor der Mahd.

## Überwachungsmaßnahmen

### Standortbegehung

Die wichtigste Methode zur Überwachung von Oberflächenabdichtungen ist die Standortbegehung (Kontrolle mittels Inaugenscheinnahme). In deren Rahmen erfolgt die Kontrolle auf Setzungen, Verformungen, Vernässungen, Trockenrissbildungen, Beschädigungen durch grabende Tiere, Abgleiten von Böschungen, Erosionsschäden, Böschungsrutschungen und Wasseraustritten. Eine entsprechende Checkliste findet sich in Teil B Kapitel VII.

Anhand von Standortbegehungen kann kontrolliert werden, ob durch Veränderungen am Standort gegebenenfalls Schutzgüter neu betroffen bzw. ob die zulässigen Standortnutzungen eingehalten sind. Ferner kann eine Kontrolle der Wirksamkeit von optional erlassenen Schutz- und Beschränkungsmaßnahmen erfolgen. Eine Standortbegehung sollte regelmäßig (z. B. jährlich, ggf. häufiger) erfolgen. Die Gesamtsituation und sichtbare Details sollten grundsätzlich durch Fotos dokumentiert werden.

### **Setzungsmessungen**

Verformungen und Setzungen können zur Rissbildung und Ausbildung von Wegsamkeiten in der Oberflächenabdichtung und damit zur Beeinträchtigung ihrer Funktion führen. Die Überprüfung kann erfolgen durch:

- Visuelle Inspektion (auch von Gipsmarken an Bauwerken) oder
- Vermessungen von festen Höhenmarken oder oberflächigen Setzungspegeln. Hierzu ist ein entsprechender Übersichtslageplan der Setzungspegel erforderlich. Es ist notwendig, die Setzungen in zeitlichen Verläufen zu erfassen. Damit kann abgeschätzt werden, wann die Setzungen abgeschlossen sein werden. Danach sind keine weiteren Messungen mehr erforderlich.

Setzungsmessungen sollten ebenfalls im jährlichen Abstand erfolgen.

### **Wasserbilanz**

Gibt es Hinweise auf ein unzureichend funktionierendes Entwässerungssystem, sind weitere Prüfungen erforderlich. In erster Linie gibt eine Wasserbilanz zur Beurteilung der Funktionsfähigkeit der Oberflächenabdichtungen und der Entwässerungsschichten sowie zur Ermittlung der Sickerwasserbildung Aufschlüsse. Hierzu ist insbesondere die kontinuierliche oder zumindest wöchentliche Messung des Abflusses der Entwässerungsschicht, des Oberflächenabflusses und des Niederschlags erforderlich. In Verbindung mit der Verdunstung kann gegebenenfalls unter Verwendung von Rechenmodellen die Dichtungsdurchsickerung bestimmt werden. Details finden sich in Teil B, Kapitel VIII.

### **Dichtungskontrolle**

Bei Vegetationsschäden ist die Überprüfung einer eventuellen Gasmigration durch die Oberflächenabdichtung beispielsweise mittels PID-Messungen notwendig.

Bei einer passiven Entgasung sind die Entgasungsbrunnen so zu installieren, dass ein dichter Anschluss an die Oberflächenabdichtung erfolgt und bei der Probenahme ausgeschlossen ist, dass atmosphärische Luft angesaugt wird. Im Optimalfall enthält der Entgasungsbrunnen eine Kappe zum zeitweisen Verschluss gegenüber der Atmosphäre und einen seitlich angebrachten absperrbaren Probenahmestutzen.

Neben der Analyse der Bodenluft auf leichtflüchtige Schadstoffe sind stets die Deponiegase ( $O_2$ ,  $CO_2$ ,  $CH_4$ ) zu messen.

### **Unterhaltungs-/ Reparatur-/ Ersatzmaßnahmen**

Wird eine Beeinträchtigung der Funktionsfähigkeit des Bauwerkes festgestellt, sind im Rahmen der Langzeitunterhaltung von Sicherungssystemen entsprechende Reparatur-, Ersatz- oder Unterhaltungsmaßnahmen auszulösen. Die Unterhaltung von Bauwerken oder baulichen Einrichtungen hat das Ziel, deren Funktionsfähigkeit langfristig zu gewährleisten.

Hierzu zählen unter anderem auch regelmäßig wiederkehrende Arbeiten wie:

- Mähen und Entfernen von ungeeignetem Bewuchs,
- Arbeiten zur Säuberung und Regenerierung von Brunnen, Grundwassermessstellen und sonstigen Entnahmehauwerken,
- Instandhaltung von Einrichtungen zur Grundstückssicherung sowie von Betriebswegen und Betriebsflächen,
- Wartung, Instandsetzung und Funktionskontrolle von Bauwerksteilen,
- Prüfung und Instandhaltung von Mess- und Beobachtungseinrichtungen.

Wegen der begrenzten Haltbarkeit von Sicherungssystemen und der Tatsache, dass Schadstoffe über sehr lange Zeiträume vorhanden bleiben können, kann für die Überwachungsdauer keine zeitliche Begrenzung angegeben werden.

## II.10 Sicherungsmaßnahmen - Vertikale Dichtwände

Die Errichtung von vertikalen Dichtwänden erfolgt i. d. R. kombiniert mit Oberflächenabdichtungen (Abbildung 9). Dichtwände verhindern das Abströmen kontaminierten Grundwassers und eine mögliche horizontale Ausbreitung von belasteter Bodenluft im ungesättigten Bodenbereich. Zum Bau der Dichtwände wird der Boden entlang der Dichtwandtrasse ausgehoben oder verdrängt und ein Dichtungsmaterial eingebracht. Die Durchlässigkeit des anstehenden Bodens lässt sich auch durch andere Verfahren verringern. Insgesamt gibt es diverse technische Möglichkeiten und Einbauarten. Dichtwände lassen sich in allen Lockergesteinen herstellen. Voraussetzung ist, dass sich ein mit Stützhilfe standsicherer Raum zur Einbringung der Dichtmasse herstellen lässt bzw. der Untergrund rammbaar oder injizierbar ist. Im Festgestein sind nur bohrende oder fräsende Verfahren zur Hohlräumherstellung für Injektionen einsetzbar. Bei der Mixed-in-Place-Bauweise wird das anstehende Bodenmaterial nicht entnommen, sondern mit dem Drehbohrverfahren *in-situ* mit der Zementsuspension vermischt. Eine vollständige Einkapselung wird erzielt, wenn die Dichtwand die Kontamination vollständig umschließt und in den Grundwasserstauer, unter Ausbildung eines hydraulisch isolierten Topfes, einbindet [57]. Da eine Dichtwand und auch eine Oberflächenabdichtung nicht vollkommen dicht sind, ist es erforderlich, den hydraulisch isolierten Topf zu bewirtschaften. Hierzu wird so viel Grundwasser abgepumpt, dass der Grundwasserstand innerhalb der Dichtwand stets etwas geringer ist als außerhalb der Dichtwand.

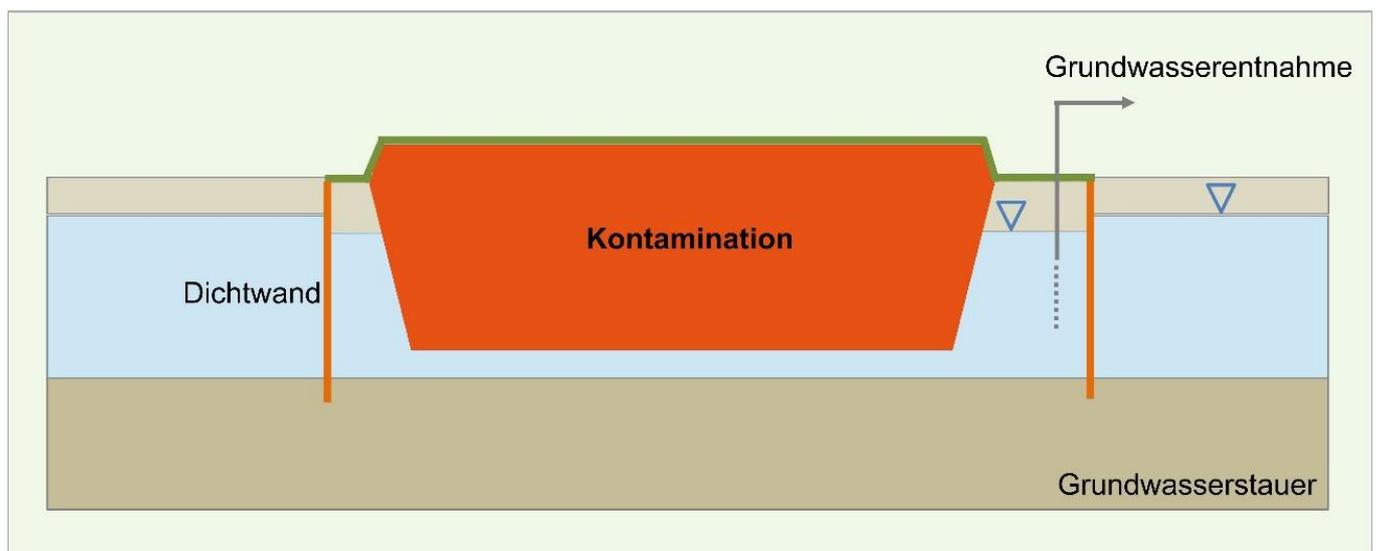


Abbildung 9: Prinzip einer mittels Dichtwand gesicherten Kontamination [54]

Dichtwände mit zementhaltigen oder zementfreien Materialien, Spundwände und überschnittene Bohrpfahlwände neigen in einem höheren Maße zur Fehlfunktion als Kombinationsdichtwände. Bei Stahlspundwänden ist zudem verstärkt auf Verformungen, insbesondere bei Aufschüttungen, Überbauung der Dichtwand und bei hohen Unterschieden der Grundwasserstände (innen/außen) zu achten. Für alle sicherungstechnischen Bauwerke gilt, dass ausführungsbedingte Mängel oder Mängel aufgrund einer Alterung erst relativ spät bemerkt werden können. Dies gilt insbesondere dann, wenn die Grundwasserüberwachungsmessstellen verhältnismäßig weit entfernt von der Umschließung angeordnet sind, ein geringes Grundwassergefälle vorliegt und die Dichtwand zwar nicht die vorgesehene geringe Wasserdurchlässigkeit aufweist, aber doch rückhaltend wirkt. Der Transport des schadstoffhaltigen Grundwassers aus dem umschlossenen Grundwasserleiterbereich bis zu den außerhalb angeordneten Grundwassermessstellen kann in solchen Fällen erhebliche Zeiträume in Anspruch nehmen.

Die Dichtigkeit eines Dichtwandensystems insgesamt (Dichtwand und Sohle) kann durch Pumpversuche im Dichtwandkasten überprüft werden. Die Überwachung der Grundwasserentnahme gehört in den Bereich aktiver *Pump-and-Treat*-Maßnahmen (siehe Kapitel II.4) und wird an dieser Stelle nicht ausgeführt.

Einflüsse auf die Dichtigkeit der Wand können folgende Prozesse haben:

- Verformung der Wand durch Setzung des umgebenden Erdreiches oder nachträgliche Auflast auf benachbarte Flächen mit nachfolgender Rissbildung,
- Korrosion,
- Erosion,
- Beständigkeit gegenüber Schadstoffangriff.

Grundwasseranalysen sind aus oben genannten Gründen nur in mehrjährigen Abständen erforderlich. Gasanalysen sollten mindestens einmal jährlich durchgeführt werden.

Bei hohen Konzentrationen organischer Belastungen sollte der Schadherd hinsichtlich langfristiger qualitativer Veränderungen der Grundwasserbeschaffenheit und einer möglichen Gasbildung kontrolliert werden. Das gilt auch für Teilsicherungssysteme. Dort kommt es zur Ausbildung von Strömungsschatten. Wenn das Grundwasser hohe Konzentrationen an Sulfat aufweist, kann ein Abbau unter Zehrung dieses Elektronenakzeptors zur Akkumulierung von Sulfid ( $S^{2-}$ ) führen, zumal ein Abtransport mit dem Grundwasserstrom nicht mehr möglich ist. Sulfid in höherer Konzentration wirkt toxisch für Mikroorganismen und führt zu einem Erliegen der natürlichen Abbauvorgänge, was aber keinen unmittelbaren Einfluss auf die Wirksamkeit der Sicherung hat. Durch die hydraulische Isolierung gibt es keinen natürlichen Grundwasserzustrom mehr, mit dem lösliche Elektronenakzeptoren herangeführt werden können. Daher ist der dominierende Abbauprozess die Methanogenese mit einem entsprechend hohen Potenzial der Ausgasung von Methan in die ungesättigte Bodenzone.

Aufgrund des erheblichen Einflusses einer Sicherungsmaßnahme auf die Grundwasserströmung ist es erforderlich, bereits im Rahmen der Planung ein Grundwasserströmungsmodell zu erstellen. Dieses wird bei der späteren Überwachung zur Überprüfung der Grundwasserströmung anhand der dann gemessenen Grundwasserstände verwendet. In der Regel erfolgt die Überwachung mit Hilfe von:

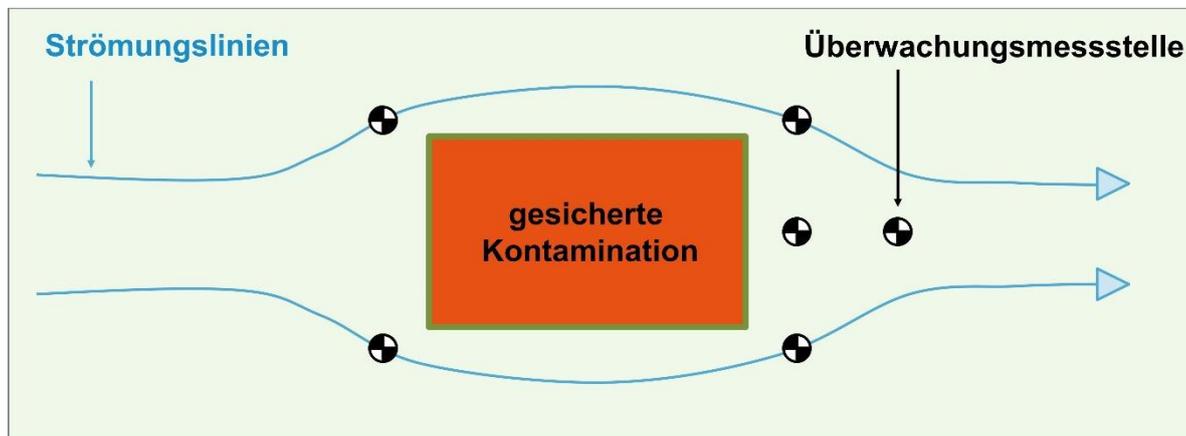
- Wasserstandsmessungen,
- chemischen Analysen des Grundwassers,
- Begehungen sowie
- der Kontrolle der Wasserhaltung und Wasserbewirtschaftung (ggf. einschließlich der Erstellung einer Wasserbilanz).

Zur Prüfung der Funktionsfähigkeit des Bauwerkes gehören, neben Grundwasseruntersuchungen zur Dichtheit, auch visuelle Prüfungen der Geländeoberfläche entlang der Achse der Wand im Hinblick auf Setzungen oder Beschädigungen im Rahmen einer Begehung (mindestens einmal jährlich). Stichtagsmessungen an allen Messstellen im Wirkungsbereich des Sicherungssystems sollten mindestens zweimal pro Jahr erfolgen. Die Beprobungshäufigkeit des Grundwassers hängt vor allem von der Art und Qualität des Sicherungssystems sowie der Sensibilität einer möglichen Grundwassernutzung im Abstrom ab und liegt in der Regel zwischen vierteljährlich und jährlich. Bei einem begründeten Verdacht auf Undichtigkeiten können lokale Überprüfungen mit Hilfe von Pumpversuchen, die Erstellung von Wasserbilanzen durch Messung bzw. Berechnung aller wesentlichen Flüsse sowie Modellrechnungen und gegebenenfalls lokale Aufgrabungen erforderlich werden.

### Messnetz

Zur Überwachung der Grundwasserhydraulik und Grundwasserbeschaffenheit ist ein geeignetes Messnetz, sowohl im Anstrom als auch im Abstrom, erforderlich. Die Umschließung einer Kontamination mit einer Dichtwand stellt für den natürlichen Grundwasserstrom eine Barriere dar. Die Folgen sind ein Aufstau des Grundwassers im Anstrombereich bzw. ein Absinken des Wasserspiegels im Abstrom (vgl. Abbildung 10).

Die mittig im Abstrom, nahe der Dichtwand gelegene Messstelle dient als Vorwarnmessstelle. Treten auf der Abstromseite Undichtigkeiten auf, so können diese überwiegend an dieser Messstelle erfasst werden. An dieser Stelle ist nahezu keine Strömung vorhanden. Erst wenn die Schadstoffe in den weiteren Abstrom gelangen, werden sie von der Grundwasserströmung erfasst. Undichtigkeiten an anderen Stellen werden über die seitlich gelegenen Messstellen erfasst.



**Abbildung 10: Strömungslinien und mögliche Anordnung von Überwachungsmessstellen bei einer mittels Umschließung gesicherten Kontamination**

Veränderungen in der Grundwasserströmungsrichtung können auch dazu führen, dass die Vorwarnmessstelle direkt angeströmt wird. Daher ist immer auch der mögliche Einfluss von Grundwasserentnahmen auf die hydraulische Situation im Sicherungsbereich abzuschätzen.

### Probenahme und Analytik

Ein wichtiger Leitparameter neben den relevanten Schadstoffparametern im Grundwasser ist die Leitfähigkeit, die wichtige Informationen vermittelt. Vorgefundene Kontaminationen enthalten oft einen hohen Salzgehalt.

## II.11 Sicherungsmaßnahmen - Funnel-and-Gate und Reaktive Wände

Bei reaktiven Dichtwänden wird das Strömen des kontaminierten Grundwassers mittels einer oft V-förmigen Dichtwand (*Funnel*) verhindert und dieses einem durchströmbaren Reaktor, dem sogenannten *Gate*, zugeführt. Auf der Anstromseite wird das Grundwasser aufgestaut und der Wasserdruck befördert das Grundwasser durch das Gate. Innerhalb des Gates werden die Schadstoffe aus dem Grundwasserstrom entfernt. Dies kann entweder durch Sorption an beispielsweise granulärer Aktivkohle oder durch abiotischen oder biotischen Abbau erfolgen. Zum abiotischen Abbau von LCKW oder zur Fällung von Schwermetallen wird oft nullwertiges granuläres Eisen ( $\text{Fe}^0$ ) verwendet. Zur Forcierung des mikrobiellen Schadstoffabbaus können dem Reaktormaterial eine Reihe unterschiedlicher Substrate, beispielsweise organisches Material ( $\text{C}_{\text{org}}$ ) zur Forcierung des mikrobiellen reduktiven LCKW-Abbaus zugemischt werden. In jedem Fall muss das Reaktormaterial durch Zumischung von Kies oder anderem Stützmaterial eine hydraulische Durchlässigkeit aufweisen und behalten, die deutlich höher ist als die der Umgebung. Andernfalls wird der Reaktor nicht durch-, sondern umströmt. Bei Sorptionswänden muss das Sorptionsmaterial regelmäßig erneuert werden. Dies gilt auch für sich verbrauchende Materialien wie beispielsweise solchen zur Unterstützung des mikrobiellen Abbaus.  $\text{Fe}^0$  sollte trotz des Auftretens einer teilweisen Passivierung dauerhaft verwendbar sein.

Ein Sonderfall des *Funnel-and-Gate*-Verfahrens sind die sogenannten reaktiven Wände. Dabei wird in einer Ebene quer zum Grundwasserabstrom vollflächig reaktives Material in einer durchströmten Wand eingebaut. Wegen des hohen Aufwandes zur Herstellung reaktiver Wände wird nur reaktives Material verwendet, das nach heutiger Kenntnis keinen Austausch erfordert.

Bei der Überwachung von reaktiven Wänden steht neben der Kontrolle der Funktionalität des Bauwerkes und der Wirksamkeit des Reaktormaterials insbesondere die Überwachung der hydraulischen Situation im Vordergrund. Es muss über einen sehr langen Zeitraum – auch bei sich ändernden hydrogeologischen Bedingungen – sichergestellt sein, dass das kontaminierte Wasser die reaktive Wand durchströmt und nicht umfließt oder bei hängenden Wänden unterfließt. Die Überwachung der Wirksamkeit schließt nicht nur die Kontrolle eines zuverlässigen Rückhalts der Schadstoffe innerhalb der reaktiven Wand, sondern auch Inaktivierungen bzw. Verschlechterungen der Reaktivität des Wandmaterials ein.

Nach dem Einbau der reaktiven Wand kommt es gegenüber dem unbeeinflussten Zustand zu signifikanten Änderungen der hydraulischen Bedingungen am Standort. Diese werden zwar bereits in der Regel im Planungsstadium mit Hilfe von Prognosen unter Verwendung eines Grundwasserströmungsmodells abgeschätzt, sind aber auch langfristig zu überwachen. Oft treten auch saisonale Richtungsänderungen des Grundwassers, insbesondere in Flussnähe, auf. Dies kann im Extremfall zu einem (teilweisen) Umströmen der reaktiven Wand führen. In ungünstigen Fällen kann der Grundwasserspiegel soweit absinken, dass ein unerwünschter Zutritt von Sauerstoff in die Reaktor-Packung, z. B. bei  $\text{Fe}^0$ - oder  $\text{C}_{\text{org}}$ -Reaktoren über die Bodenluft erfolgen kann. In der Regel wird dieser Effekt jedoch bereits durch konstruktive Elemente verhindert. Infolge von saisonalen Grundwasserspiegelschwankungen kann es auch zu Änderungen der Grundwasserabstandsgeschwindigkeiten kommen und dadurch zu unterschiedlichen Aufenthaltszeiten an verschiedenen Stellen der reaktiven Wand. Aus diesen Betrachtungen wird deutlich, dass eine intensive Überwachung der hydrogeologischen Bedingungen erforderlich ist. Dies erfolgt in der Regel durch vergleichende Überprüfung der Grundwasserstände in allen vorhandenen Messstellen, insbesondere im Anstrom, innerhalb der Wand und im Abstrom.

Ziel der Überprüfung ist der Nachweis, dass:

- der hydraulische Gradient durch die Wand hindurch stets aufrechterhalten bleibt und
- die Grundwasserströmungsverhältnisse im Umfeld der Wand den Ergebnissen und den Prognosen des im Planungsstadium verwendeten Grundwasserströmungsmodells entsprechen.

Kontrollen der Wasserstände im Hinblick auf die Veränderung der Grundwasserhydraulik durch die errichtete Wand sind im ersten Überwachungsjahr in einem kurzen zeitlichen Abstand, z. B. monatlich (ggf. auch *online* mit Hilfe von Datenloggern zum Grundwasserstand), in der Folgezeit etwa quartalsweise, später deutlich seltener, z. B. jährlich vorzunehmen.

Mit den gemessenen Grundwasserständen wird das Grundwasserströmungsregime überprüft. Wegen dessen Komplexität ist dafür das im Rahmen der Planung erstellte Grundwasserströmungsmodell zu verwenden.

Ergeben sich aufgrund der erhobenen Messwerte Abweichungen von den mit Hilfe des Grundwasserströmungsmodells prognostizierten Bedingungen, so ist eine Validierung und Modifizierung des Modells vorzunehmen. Mit einer Prognose ist zu überprüfen, ob die reaktive Wand auch künftig unter den gegebenen hydraulischen Bedingungen funktionieren kann.

Oft werden reaktive Wände nicht am Fahnenende, sondern innerhalb der Schadstofffahne installiert. Nach dem Bau der Wand werden dann über einen gewissen Zeitraum im Abstrom der Wand noch relativ hohe Schadstoffkonzentrationen festgestellt. Dies beruht darauf, dass wegen der verringerten Konzentration der Schadstoffe in der Wasserphase nun die an die Bodenmatrix sorbierten Schadstoffe wieder desorbieren und abströmen (Rebound). Dieser Prozess ist solange zu beobachten, bis das bodengebundene Schadstoffinventar aufgebraucht ist [67].

Daneben ist eine Überprüfung der Funktionsfähigkeit des Reaktormaterials erforderlich. Ziel ist es, Änderungen innerhalb des Reaktormaterials, die eine Auswirkung auf dessen Wirksamkeit bzw. hydraulische Permeabilität haben, zu erkennen und gegebenenfalls korrigierend einzugreifen, um somit eine Durchströmung des reaktiven Materials aufrechterhalten zu können. Zu diesen Änderungen zählen im Wesentlichen:

- Ausfällungen,
- Absacken,
- Verdichten des Schüttungsmaterials,
- Ausbildung bevorzugter Fließwege,
- Bildung von H<sub>2</sub>-Gasblasen (bei Fe<sup>0</sup>-Reaktoren),
- Passivierung von Fe<sup>0</sup>-Oberflächen,
- Biofouling/Bioclogging.

Ausfällungen vermindern die Porengröße. Dadurch wird an anderer Stelle die Strömungsgeschwindigkeit erhöht und die Retentionszeit vermindert. Dies kann zu einem unvollständigen Abbau führen. Einen ähnlichen Effekt verursacht die Verdichtung des Schüttungsmaterials. Im ungünstigsten Fall kann das Gate soweit verblocken, dass das gesamte Bauwerk umströmt wird. Eine ungleichmäßige Verblockung führt zu bevorzugten Fließwegen mit dem Effekt einer verminderten Aufenthaltszeit im Reaktor und damit einem möglichen unvollständigen Abbau bzw. unvollständiger Sorption. Auch die bei Fe<sup>0</sup>-Reaktoren mögliche Bildung von H<sub>2</sub>-Gasblasen hat den gleichen Effekt. Es werden Teilbereiche durch die Gasblasen verblockt und in anderen Bereichen wird die Strömungsgeschwindigkeit infolgedessen erhöht. Auch ungleichmäßige Schüttung des Reaktormaterials begünstigt die Ausbildung bevorzugter Fließwege [67]. Bei mikrobiell

sehr aktiven Gates kann es zu einer Anreicherung von Biomasse innerhalb des Gates kommen (Biofouling/Bioclogging) was die gleichen Effekte verursacht.

Die Interpretation der Überwachungsdaten liefert Einsicht in die innerhalb des Reaktors ablaufenden Prozesse wie Schadstofftransformation, Mineralisierung, Immobilisierung oder Sorption. Allem voran dienen folgende Änderungen (vor/nach Gate) am Beispiel eines  $\text{Fe}^0$ -Reaktors der Verfolgung der Prozesse innerhalb der Wand:

- Abnahme der Schadstoffkonzentrationen,
- Konzentrationsabnahme von  $\text{Ca}^{2+}$ ,
- Konzentrationszunahme von gelöstem Eisen (Fe-II) und Wasserstoff ( $\text{H}_2$ ),
- Zunahme des pH-Wertes und Abnahme der Redoxspannung.

Aus den Änderungen dieser Prozesse über die Zeit lässt sich auf eine Abnahme der Wirksamkeit des Reaktors schließen. Beispielsweise führt eine Passivierung der Eisenoberfläche zu einer geringeren pH-Wert-Zunahme bei der Passage des Grundwassers. In der Übergangszone unmittelbar abstromig des Reaktors können die in der Wand ablaufenden Prozesse nachwirken. Beispielsweise wird aus  $\text{C}_{\text{org}}$ -Wänden DOC freigesetzt, der auch abstromig des Reaktors den LCKW-Abbau fördert. Ähnliches tritt bei  $\text{Fe}^0$ -Wänden auf. Hier dient der freigesetzte Wasserstoff abstromig der Wand dem mikrobiellen reduktiven LCKW-Abbau. Innerhalb der Übergangszone bildet sich das durch den Reaktor veränderte biogeochemische Milieu auf den am Standort vorhandenen Ausgangszustand zurück.

Bei reaktiven Wänden können weiterhin entstehende Gase in die Bodenluft ausgasen. Dies ist insbesondere bei  $\text{Fe}^0$ -Reaktoren und  $\text{C}_{\text{org}}$ -Reaktoren der Fall. Im ersten Fall ist die Freisetzung von Wasserstoff ( $\text{H}_2$ ), im zweiten Fall die Freisetzung von Methan und Schwefelwasserstoff ( $\text{H}_2\text{S}$ ) in die Bodenluft möglich. Anders als die Ausgasung von Methan ist die Ausgasung von  $\text{H}_2$  und  $\text{H}_2\text{S}$  aber von untergeordneter Bedeutung. Das Ausmaß der Gasbildung sollte aber im Einzelfall überprüft werden.

Folgende Prozesse müssen überwacht werden:

- Effizienz des Schadstoffabbaus (bzw. Abnahme der Reaktivität, Akkumulierung von Metaboliten),
- Abnahme der Permeabilität (mit nachfolgender Abnahme der Aufenthaltszeit),
- Auftreten von Strömungskurzschlüssen,
- Auftreten von Undichtigkeiten des Funnel-Bauwerks.

Die vorstehend dargestellten Prozesse können über eine Änderung der hydrogeologischen Bedingungen und/oder anhand der (Schad)-Stoffanalytik an Proben aus den Überwachungsmessstellen erkannt werden. Einsetzende Undichtigkeiten der Dichtwand werden vor allem dadurch erkannt, dass auf der Abstromseite die Schadstoffkonzentrationen nach einem vorangegangenen Auswaschen wieder ansteigen, gegebenenfalls auch anhand der Grundwassergleichen. Daneben gehören zur Überwachung auch die Kontrollen der Grundwasserqualität in Messstellen seitlich der Wände, um ein Umströmen feststellen zu können.

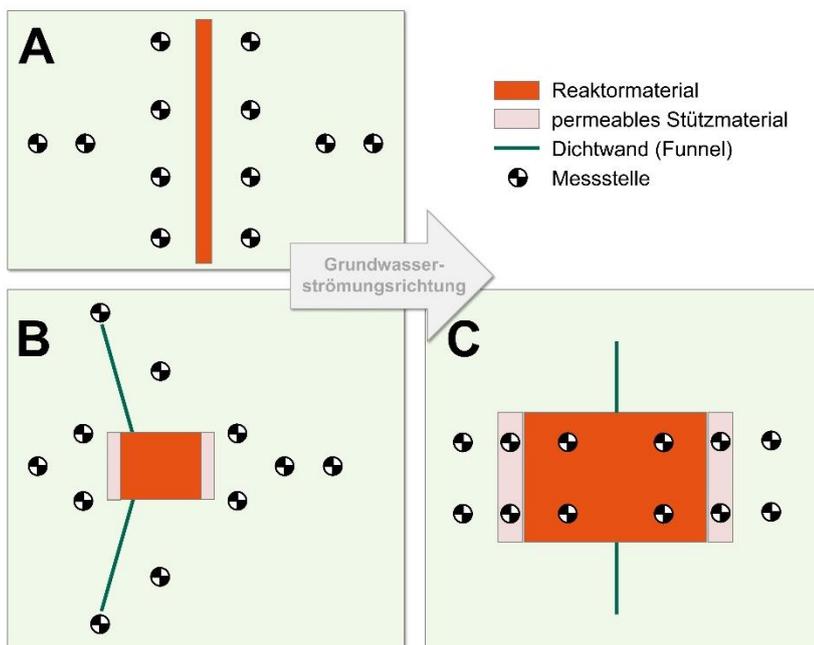
Ergibt die Überwachung einen Hinweis auf eine unzureichende Funktionalität der Dichtwand oder des Reaktors, sind Ergänzungsuntersuchungen in Form von *Erkundungen* erforderlich. Die Gründe für eine abnehmende Leistungsfähigkeit der reaktiven Wand sind zu ermitteln. Das können beispielsweise Tracer-tests (Reaktordurchgang) oder Pumpversuche unmittelbar abstromig des Reaktors sein. Bei einem geeigneten Messnetz anstromig, innerhalb und abstromig des Reaktors kann mit Hilfe der Pumpversuche die

Permeabilität in verschiedenen Bereichen des Bauwerkes überprüft werden. Optional kann bei dem Pumpversuch abstromig des Reaktors ein Tracer zugegeben werden (*Forced Gradient Tracer Tests*). Mit Hilfe von reaktiven und nicht reaktiven Tracern kann man die Reaktivität des Reaktors von seinen hydraulischen Eigenschaften unterscheiden [67]. Optional kann es erforderlich werden, Proben des Reaktormaterials zu entnehmen und im Labor weiter zu untersuchen.

Der Probenahmeturnus wird nach Erfordernis festgelegt, kann jedoch in etwa dem der erforderlichen Beprobung des Grundwassers entsprechen. Gibt es Hinweise auf eine hohe Methanbildungskapazität (bei  $C_{org}$ -Reaktoren), ist mit einem entsprechenden Messnetz sicherzustellen, dass sensible Schutzobjekte nicht beeinträchtigt werden.

### Messnetz

Die Anordnung der Messstellen muss die hinreichende Erfassung aller relevanten Prozesse ermöglichen. Dies bedingt nicht nur Messstellen im Anstrom sowie gestaffelt im Abstrom, sondern auch seitlich angeordnete Messstellen und Messstellen innerhalb des Reaktors (vgl. **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.**, Fließrichtung von links nach rechts). Die Lage der Messstellen ist so zu wählen, dass die Erfassung der Inhomogenität sowie diverser Prozesse im Zustrom und entlang der Abstromlinie gewährleistet wird. Die Errichtung mehrerer Grundwassermessstellen quer zur Grundwasserfließrichtung ist notwendig, da eine Schadstofffahne in der Kontrollebene meist sehr unterschiedliche Konzentrationen aufweist. Des Weiteren ist dies auch aufgrund einer möglichen Inhomogenität des Reaktormaterials und des Untergrundes erforderlich.



**Abbildung 11: Anordnung von Überwachungsmessstellen (Aufsicht) (A: im Umfeld einer vollflächigen reaktiven Wand, B: im Umfeld eines Funnel-and-Gate, C (Detail von B): innerhalb des Reaktors (Gate) und im nahen Umfeld) [67]**

Da eine inhomogene Reaktivität innerhalb des Reaktors auftreten kann, ist eine tiefendifferenzierte Probenahme sowohl innerhalb des Reaktors als auch außerhalb erforderlich. Dazu ist die Installation von Mehrfachmessstellen mit Filterstrecken von  $\leq 1$  m oder von sogenannten CMT-Messstellen (*Continuous Multichannel Tubing*) erforderlich. Messstellen innerhalb des Reaktors können kleinkalibrig sein (z. B.  $\phi_i$

≤ ¾"). Die Messstellen bzw. die Filterstrecken müssen so angeordnet sein, dass ein Um-, Unter- oder Überfließen der reaktiven Wand erkannt werden kann. Die Messstellen direkt an- oder abstromig der Wand sollen so weit entfernt sein, dass bei der Beprobung kein Wasser aus der Wand gezogen wird. Aber so nah, dass die Effekte der Wand ohne Überprägung durch die Eigenschaften des Grundwasserleiters gemessen werden können.

Sofern der Reaktor im Gate nicht zur ungesättigten Bodenzone hin abgedichtet ist, sind Bodenluftmessstellen (vgl. Teil B, III.3) erforderlich, mit denen die Bildung der Reaktionsgase überwacht werden kann.

### Probenahme und Analytik

Wegen der Mobilisierung von Schadstoffen durch den Bau des Systems sollten diese nicht direkt nach Fertigstellung, sondern frühestens drei Monate danach gemessen werden. Dies gilt nicht für die Grundwasserstände. Diese können direkt vor und nach dem Bau gemessen werden.

Da innerhalb des Gates die Grundwassergeschwindigkeit im Vergleich zum ungestörten Strömungsregime deutlich erhöht ist und eine Fehlfunktion in vergleichsweise kurzer Zeit eintreten kann, ist zumindest zu Beginn der Maßnahme eine häufigere Probenahme (quartalsweise) erforderlich. Wenn genügend Erfahrungen mit der Funktion und dem Verhalten des Gate-Reaktors vorliegen (nach ca. fünf Jahren), kann der Probenahmeturnus sowie der Turnus der Stichtagsmessung auf halbjährlich, später auch auf jährlich verringert werden. Wegen der geringen Anzahl dieser Verfahren liegt keine Erfahrung zu Generalisierung vor und die Entscheidungen müssen einzelfallspezifisch getroffen werden.

Ein Mindestuntersuchungsprogramm umfasst die zu behandelnden Schadstoffe, die Bildung von Endprodukten (gegebenenfalls auch der Metabolite) sowie weiterer Untersuchungsparameter, die im Hinblick auf die Ermittlung biogeochemischer Prozesse von Bedeutung sind:

- Schadstoffe,
- Abbauendprodukte,
- gegebenenfalls Metabolite,
- Feldparameter,
- Redoxindikatoren,
- $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$  (Passivierung von  $\text{Fe}^0$ -Oberflächen) und
- DOC.

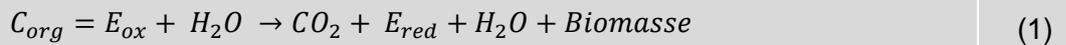
## II.12 Überwachung von NA-Prozessen

Natürliche Schadstoffminderungsprozesse sind nach [50] 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. Diese Prozesse spielen bei organischen Kontaminanten eine Rolle. Aber erst wenn die Relevanz dieser natürlichen Schadstoffminderungsprozesse nachgewiesen ist und deren Überwachung als Handlungsoption zur Sanierung des Grundwassers behördlich bestätigt wird, spricht man von MNA (Monitored Natural Attenuation).

### Prozesse

Beim mikrobiellen Abbau werden die Schadstoffe mikrobiell „katalysiert“ und bevorzugt in mineralische Endprodukte ( $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2\text{O}$ , Mineralsalze) umgewandelt. Man spricht dann von Mineralisierung. Beim Abbau von LCKW (hier: Chlorethen) spricht man in der Regel schon dann von einer Mineralisierung, wenn die LCKW vollständig zu den Endprodukten Ethen und Ethan abgebaut sind, auch wenn diese noch weiter mineralisierbar sind. Erfolgt nur eine Umwandlung in andere Stoffe, wird der Abbau als Transformation bezeichnet. Während des Abbaus kann eine Vielzahl von Metaboliten auftreten, die jedoch oft besser abbaubar sind als die Ausgangsverbindungen und nicht dauerhaft akkumulieren. Einzelstoffspezifisch sind

nur wenige Verbindungen analytisch erfassbar. Als Summe sind sie jedoch als DOC nachweisbar. Während dieses Metabolismus werden auch Bausteine für ein Wachstum (Zunahme der Biomasse) gebildet (1).



$C_{org}$  Elektronendonator (z. B. nichtchlorierter Schadstoff oder andere organische Substrate MKW, AKW, PAK, niederchlorierte LCKW, DOC)

$E_{ox}$  Elektronenakzeptor (Höherchlorierte LCKW, Chloraromaten)

$E_{red}$  „verbrauchter“ (reduzierter) Elektronenakzeptor

Schadstoffgruppen wie BTEX, MKW oder niederchlorierte LCKW dienen als organisches Material für Bakterien und sind sogenannte Elektronendonatoren. Zum Abbau selbst sind dann Elektronenakzeptoren erforderlich. Es gibt eine Reihe unterschiedlicher Elektronenakzeptoren wie Sauerstoff,  $NO^3$ , Mn-IV, Fe-III und  $SO_4^{2-}$ .

Beim aeroben Abbau wird Sauerstoff benötigt und damit der Elektronenakzeptor verbraucht (reduziert).

Beim methanogenen Abbau wird entweder  $CO_2$  als Elektronenakzeptor verwendet (autotrophe Methanogenese) oder die Generierung von Methan erfolgt aus dem abzubauenen Molekül selbst (acetoklastische Methanogenese).

Durch die Zehrung der Elektronenakzeptoren im Rahmen des mikrobiellen Abbaus verändert sich das Milieu des Grundwassers hin zu stark reduzierenden Bedingungen.

Chlorierte Schadstoffe (LCKW) werden unter anaeroben Bedingungen anders abgebaut als nicht-chlorierte Schadstoffe. Sie werden ausschließlich als Elektronenakzeptoren verwendet, die Abbauverhältnisse sind daher entsprechend komplizierter. Hier muss sichergestellt sein, dass dauerhaft ausreichend Elektronendonatoren (DOC) zur Verfügung stehen, um eine vollständige mikrobielle Mineralisierung (reduktive Dechlorierung) zu erlauben. Findet nur eine anaerobe reduktive Teiltransformation der LCKW statt, muss (als Voraussetzung für eine Akzeptanz des MNA-Ansatzes) im weiteren Verlauf der Schadstofffahne eine oxidative Mineralisierung der teilchlorierten LCKW-Verbindungen oder eine Mineralisierung an reduzierten Eisenoberflächen erfolgen. Da hierbei keine charakteristischen Metabolite akkumulieren, kann der Nachweis ausschließlich mit Hilfe der Isotopenanalytik geführt werden. Zudem muss mit Hilfe der Analyse der Redoxindikatoren nachgewiesen werden, dass tatsächlich auch ein geeignetes Milieu vorliegt [33].

Aus den Untersuchungsergebnissen zum Abbauverhalten innerhalb der Schadstofffahne muss eine Prognose erstellt werden, ob aktuell und zukünftig eine Verunreinigung des noch nicht betroffenen Grundwassers oder weiterer Schutzgüter ausgeschlossen werden kann. Dies kann beispielsweise mit Hilfe eines numerischen Modells, das die Strömungs-, Transport- und Reaktionsprozesse abbildet oder mit Hilfe von extrapolierten Zeitreihenanalysen erfolgen. In der Prognose muss gezeigt werden, dass die Schadstofffahne „quasi-stationär“ oder „schrumpfend“ ist. Für ein MNA-Konzept ist es in der Regel notwendig, die Schadstoffmenge im Schadensherd oder den Austrag der Schadstoffe aus dem Schadensherd durch Sanierungsmaßnahmen zu reduzieren (Quellensanierung). Ausnahmen können bestehen, wenn beispielsweise der Schadensherd einer Herdsanierung nicht zugänglich ist.

Weiterführende Informationen zur Thematik Tolerierbarkeit eines Grundwasserschadens sind dem „Handbuch zur Altlastenbehandlung Teil 3: Gefährdungsabschätzung, Pfad und Schutzgut Grundwasser“ zu entnehmen.

Die nachfolgend beschriebenen Maßnahmen umfassen die Planung und Durchführung der Überwachung zur Überprüfung der Wirksamkeit der NA-Prozesse, einschließlich der Untersuchungsmethoden und deren Auswertung.

### Untersuchungskonzept

Für das vorliegende Handbuch wird davon ausgegangen, dass die Wirksamkeit des NA nachgewiesen ist und somit ein genehmigtes einzelfallspezifisches MNA-Konzept vorliegt. Dieses Konzept enthält folgende Regelungsbestandteile:

- Nachweis des prinzipiellen Schadstoffabbaus (Labor, Feldversuch),
- Prognose der weiteren Entwicklung,
- Auf der Basis der Prognose erfolgt eine Festlegung von nachprüfbaren Zielvorgaben in Raum und Zeit,
- Festlegung von Überwachungsmaßnahmen zur Kontrolle der Wirksamkeit von natürlichen Schadstoffminderungsprozessen (MNA) und Berichtspflichten,
- Vergleich Prognose und Überwachung,
- Plausibilitätsprüfungen durch Bilanzierung (reichen verfügbare Elektronenakzeptoren aus, um den Abbau der Schadstoffe zu begründen).

Bei der Konzeption des Überwachungsprogramms ist zu berücksichtigen, dass sich das Reaktionssystem "Schadstofffahne" über größere Zeiträume hinweg verändern kann. Einflussfaktoren sind beispielsweise:

- Große Schwankungen des Grundwasserstandes (durch saisonale Änderungen der Grundwasserneubildung), was unter Umständen zu einer zeitlich variierenden Mobilisierung von im Kapillarraum befindlichen Schadstoffen führen kann.
- Stark wechselnde Grundwasserfließrichtungen (natürlich oder durch Pumpmaßnahmen in der Umgebung verursacht).

Deshalb müssen auch Änderungen von hydrogeologischen, geochemischen, mikrobiologischen oder anderen Rahmenbedingungen, welche die Wirksamkeit von Schadstoffminderungsprozessen beeinflussen können, erfasst werden. Das Überwachungsprogramm hat daher zudem die Aufgabe, Aussagen über die relevanten Schadstoffminderungsprozesse zu ermöglichen.

### Durchführung der Überwachung

Im Rahmen der Überwachung der natürlichen Schadstoffminderung (*Monitored Natural Attenuation*; MNA) muss die dauerhafte Wirksamkeit von natürlichen Schadstoffminderungsprozessen überprüft werden.

Das NA-Überwachungsprogramm geht damit über das reine Aufzeichnen von Schadstoffkonzentrationen hinaus. Im Detail muss die Überwachung folgende Überprüfungen umfassen:

- Verlauf der Schadstoffkonzentrationen (Soll/Ist-Vergleich mit Prognose, ggf. Feststellung einer erneuten Freisetzung von Schadstoffen),
- Nichtbeeinträchtigung der vorher definierten Schutzgüter,
- Änderungen der hydrogeologischen Bedingungen (Grundwasserstand, Fließgeschwindigkeit, Fließrichtung),
- Änderung der Redoxbedingungen (einschl. DOC und Vor-Ort-Parameter),
- Akkumulation von toxischen Zwischenprodukten und
- Überprüfung der Randbedingungen (z. B. Nutzungsänderungen).

Im Rahmen von MNA sollten nicht nur schadstoff- und prozessbezogene Konzentrationsmessungen erfolgen, sondern es sollten in zeitlich größeren Abständen auch Frachtbetrachtungen als Bestandteil der Kontrolle durchgeführt werden. Die zu erhebenden Informationen, durchzuführenden Untersuchungen und Kontrollen (einschließlich aller Beprobungspunkte, -methoden und -intervalle) sind in Abstimmung mit der zuständigen Behörde festzulegen. Das Überwachungsprogramm soll umso intensiver gestaltet werden, je unsicherer die Prognose ist. Bei MNA-Vorhaben sind generell die aufgelisteten drei verschiedenen Szenarien (Fälle) zu unterscheiden: (A) Schadensherd ganz oder teilweise entfernt, (B) Schadensherd nicht entfernt und (C) eine aktive Sanierung wird beendet und das Restschadstoffinventar einem zuvor nachgewiesenen natürlichen Schadstoffabbau überlassen.

### Untersuchungsmethoden

Untersuchungsmethoden im Rahmen des MNA sind vorrangig Stichtagsmessungen sowie Beprobungen des Grundwassers und eine nachfolgende Analytik der Proben. Die Erstellung von Grundwassergleichplänen dient zur Prüfung, ob sich über die Zeit wesentliche Änderungen der Grundwasserfließgeschwindigkeit oder -fließrichtung ergeben. Für MNA-Vorhaben sollte das Messnetz mehrere Kontrollebenen aufweisen, mit ausreichend Messstellen, um jeweils die gesamte Fahnenbreite zu erfassen. Wesentliche Kriterien für die Ausgestaltung des Messnetzes sind u. a. die Fließgeschwindigkeit des Grundwassers, die Retardation der Schadstoffe und die Wirksamkeit des mikrobiellen Abbaus (vgl. Kapitel 4.5).

Da es beim Nachweis des natürlichen mikrobiellen Schadstoffabbaus stark auf die Feststellung der vorhandenen Redoxbedingungen ankommt, ist auf die Messung der Konzentration des im Grundwasser gelösten Sauerstoffs besondere Sorgfalt zu legen. Sinnvoll sind in diesem Zusammenhang lediglich *in-situ*-Messungen. Ist eine zuverlässige Bilanzierung der Stoffe erforderlich, sollten für leichtflüchtige Verbindungen druckerhaltende Probenahmesysteme verwendet werden (begrenzt am Markt zur Verfügung). Es ist generell darauf zu achten, dass ein Sauerstoffzutritt verhindert bzw. so gering wie möglich gehalten wird. Zur Bestimmung der gelösten Anteile an Eisen und Mangan werden die entnommenen Grundwasserproben filtriert (0,45 µm) und angesäuert (pH < 2). Im sauren Filtrat wird der Gehalt an Eisen<sub>gesamt</sub> und Mangan<sub>gesamt</sub> bestimmt. Diese Gehalte werden per Definition dem gelösten Anteil (Fe-II; Mn-II) gleichgesetzt.

Die vor Beginn der Überwachung abgeschlossenen Voruntersuchungen zur Wirksamkeit der Konzentrationsminderungsprozesse können ergeben haben, dass der eine oder andere Redoxprozess am Standort keine oder nur eine untergeordnete Rolle spielt. Die entsprechenden Redoxindikatoren können dann im Rahmen der Überwachung vernachlässigt werden. Auf jeden Fall muss geprüft werden, ob Sulfid in signifikanten Konzentrationen vorliegt. Höhere Konzentrationen an Sulfid können Abbauprozesse vollständig hemmen. Zeigt die Analyse der Redoxparameter ausreichend stabile Bedingungen über einen Zeitraum von mindestens 5 Jahren, kann sich das Monitoring zunächst auf die Schadstoffe beschränken. Die Redoxparameter sollten dann in größeren Abständen (etwa alle 5 Jahre) überwacht werden.

Anhand der Konzentration des DOC kann (im Vergleich zu den Konzentrationen im Anstrom) abgeleitet werden, ob am Untersuchungsstandort abbaubares organisches Material vorliegt. Dieses umfasst meist im Prinzip mikrobiell mineralisierbare Schadstoff-Metabolite, welche nur vorübergehend in signifikanten Konzentrationen akkumulieren. Deren Abbau kann Elektronenakzeptoren zehren. Ist eine DOC-Akkumulation feststellbar, muss auch die gesamte Ausdehnung der DOC-Fahne (im eigentlichen Sinne die Metabolitenfahne) mit der Überwachung erfasst werden.

### Auswertungen mit Entscheidungsfenstern

Folgen die künftig gemessenen Schadstoffkonzentrationen nicht der Prognose, ist anhand von vorgegebenen Abbruchkriterien das Erfordernis zur Einleitung und Durchführung der bereits im MNA-Konzept festgelegten Alternativmaßnahmen (Rückfalloption) zu prüfen. Dies ist vor allem dann der Fall, wenn die Konzentration an einer Messstelle nahe der Fahnen Spitze ansteigen und der Abstand der Fahnen Spitze zum Schutzobjekt gering ist [92]. Gegebenenfalls ist zu überprüfen, ob veränderte Randbedingungen auch weiterhin eine Beschränkung auf NA-Prozesse zulassen. Dies erfordert zusätzliche, einzelfallspezifische Erkundungsaufgaben, die nicht im Rahmen des vorliegenden Handbuches zum Routinemonitoring abgehandelt werden können. Im Ergebnis kann es erforderlich werden, das Routinemonitoringprogramm anzupassen. Auf jeden Fall ist es notwendig, die Festlegung der Sanierungsziele aufgrund der Prognose auf eine Art und Weise zu gestalten, dass nicht kleinste Abweichungen schon aktive Maßnahmen auslösen.

### III Spezielle Hinweise zur Vorbereitung einer Überwachung

In den nachfolgenden Kapiteln erfolgen spezielle technische Hinweise, welche die Voraussetzung für eine effektive Überwachung darstellen.

#### III.1 Messnetz Grundwasser

Das Überwachungsmessnetz zum Grundwasser besteht aus mehreren Messstellen und muss an die relevanten Wirkungspfade, Schadstoffe und hydrogeologischen Gegebenheiten eines konkreten Standortes sowie dem Ziel der konkreten Überwachungsaufgabe angepasst werden. In Bezug auf Erkundung, Überwachung und Bewertung eines Grundwasserschadens sollten die Messstellen folgende räumliche Anordnungen abdecken:

- Anstrom,
- Schadensherd,
- Schadensherdnaher Abstrom,
- weiterer Abstrom (Schadstofffahne),
- Schadstofffahnenrand (Spitze und seitlich),
- an der Spitze außerhalb der Schadstofffahne (d. h. außerhalb des belasteten Bereichs als Vorwarnmessstelle).

In der Regel liegt aus den Erkundungsstufen ein Messnetz mit einer ausreichenden Anzahl an Messstellen vor, welches hinsichtlich einer spezifischen Überwachungsaufgabe geprüft, ausgewählt und ggf. punktuell verdichtet werden muss (z. B. für die Überwachung spezieller Sanierungsverfahren). In Merkblättern des AK „Grundwasserbeobachtung“ sind Hinweise zum Bau [3], [1] und zum Rückbau [2] von Messstellen sowie zur Grundwasserprobenahme [1] enthalten. Im Folgenden werden spezifische Hinweise für Überwachungsmessnetze benannt.

#### Messstellen

Anhand der verfügbaren Bestandsunterlagen und der Vor-Ort-Begehung erfolgt eine Auswahl unter Beantwortung folgender Fragen:

- Liegt die Messstelle an einem für die Überwachung erforderlichen Punkt und ist diese hinsichtlich der Überwachungsart und den qualitativen Anforderungen geeignet?
- Garantiert die Lage der Ringraumabdichtungen und der Filterbereich der Messstelle eine eindeutige Zuordnung der zu entnehmenden Grundwasserprobe aus dem zu überwachenden Grundwasserleiter bzw. dem Grundwasserhorizont? Ist ein prozessbezogenes Monitoring (bei MNA) mit den vorhandenen Messstellen möglich?
- Erlauben die Eigentumsrechte eine sichere bzw. stetige Nutzung bzw. sind solche Rechtsverhältnisse mit vertretbarem Aufwand herzustellen?

Generell sind Messstellen mit solchen Filterstrecken für das Überwachungsmessnetz auszuwählen, die den Kontaminationsbereich und dessen Abstrom eindeutig erfassen. Filterlängen der Messstellen sind entsprechend der erwarteten vertikalen Schadstoffausbreitung und der hydrogeologischen Randbedingungen zu prüfen. Die sich in der Praxis häufig ausbildenden (vertikal) unterschiedlichen Kontaminationsbereiche sind zu berücksichtigen.

Diese treten vor allem auf bei:

- mobilen Phasen oder Residualphasen (LNAPL oder DNAPL),
- Vertikalströmungen,
- großer Mächtigkeit des kontaminierten Grundwasserleiters,
- heterogener Schadstoffverteilung innerhalb des Grundwasserleiters,

- lokal auftretenden bindigen Bereichen (Grundwasserstauer bzw. Grundwassergeringleiter),
- Konzentrierung von Schadstoffen in bestimmten Horizonten des Grundwasserleiters aufgrund lithologischer Unterschiede (z. B. wechselnde Durchlässigkeiten),
- mehreren Grundwasserleitern.

Dies gilt insbesondere auch für die Überwachung des Grundwassers im geklüfteten Festgestein. Die gewonnenen Ergebnisse bei Festgesteinsgrundwasserleitern weisen immer eine höhere Unsicherheit auf, da sich die Strömung im Wesentlichen auf Trennfugen und Klüfte beschränkt. Zudem kann in größeren Klüften die Grundwasserabstandsgeschwindigkeit beträchtlich sein.

In der Regel bilden Messstellengruppen mit einzelnen Filterstrecken in mehreren Horizonten mit kurzen Filterstrecken die Vertikalverteilung der Schadstoffe am besten ab. Oft liegen jedoch aus der Vergangenheit Grundwassermessstellen mit sehr langen Filterstrecken (10 m und mehr) vor. Es muss dann im Einzelfall geprüft werden, inwieweit diese Messstellen für die geplanten Überwachungsaufgaben geeignet sind.

### Messnetzkonfiguration

Generell sind die Konfiguration und die Qualität eines Messnetzes abhängig von der Anzahl, der Lage und dem Ausbau der Messstellen zur Erfassung der Horizontal- und Vertikalverteilung der Schadstoffe. In Abhängigkeit von dem einzelfallbezogenen Sanierungs- oder Überwachungsziel unterscheidet man einfache oder komplexe Messnetze zur:

- Flächigen Überwachung (Schadstoffausbreitung),
- Überwachung von Strombahnen (Konzentrationsverminderung),
- Überwachung in Kontrollebenen (Frachtverminderung),
- Kombination dieser Ansätze.

Eine Beschränkung auf die Überwachung einzelner Messstellen (z. B. Vorwarnmessstelle) ist wegen einer meist saisonalen Variabilität der Strömungslinien unsicher und sollte nur bei ausreichender Kenntnis zur Repräsentativität der Kontaminationsbelastung und der hydrodynamischen Verhältnisse erfolgen.

### Flächige Überwachung

In Bezug auf Überwachung und Bewertung eines Grundwasserschadens sollten die Messstellen die o. g. Elemente der räumlichen Anordnungen abdecken.

**Anstrommessstelle:** Diese muss zur Erfassung der Zustromverhältnisse eindeutig außerhalb des Schadensherdes errichtet werden (unter Berücksichtigung eventueller Fließrichtungsänderungen).

**Messstelle im Schadensherd:** Die Schadensherdmessstelle muss den wesentlichen Eintragsbereich bzw. Zentralbereich der Kontamination bzw. das Vorhandensein von Phasenanreicherungen horizontal und vertikal erfassen.

**Messstelle im Fahnenbereich:** Die Messstelle im Fahnenbereich hat die aus dem Schadensherd abströmenden gelösten Schadstoffe zu erfassen. Zu beachten ist dabei, dass es bei einigen Schadstoffen mit einer Dichte  $>1 \text{ mg/m}^3$  zu einer vertikalen Verlagerung innerhalb der Kontaminationsfahne in tiefere Grundwasserleiterbereiche kommen kann, welche durch geeignete Filterlagen zu erfassen sind.

**Vorwarnmessstelle:** Die Vorwarnmessstelle muss so platziert werden, dass eine ausreichend frühe Information hinsichtlich nachteiliger Veränderungen der Grundwasserbeschaffenheit zum Schutz spezieller

Schutzgüter (z. B. konkrete Brunnen zur Trinkwassergewinnung) erhalten werden kann [21]. Konzentrationserhöhungen an dieser Messstelle lösen bei Überschreitung eines Kontrollwertes Maßnahmen aus (Vorwarnfunktion). Dabei kann die Vorwarnmessstelle prinzipiell außerhalb der derzeitigen Fahne oder auch innerhalb der Fahne in Nähe des Schutzobjektes platziert werden. Es ist zu beachten, dass bei einer Messstelle abstromig einer Fahnen spitze ggf. Veränderungen in den Redoxbedingungen auftreten, ohne dass die originären Schadstoffe dorthin gelangen. Dies kann ein Indiz dafür sein, dass eine Nähe zur Schadstofffahne besteht (Ursache: Zehrung von Elektronenakzeptoren im Bereich der Belastung durch mikrobielle Abbauprozesse).

Bei Sanierungsmaßnahmen hängen die Anforderungen an das Messstellennetz wesentlich von dem zu erwartenden Fahnenverhalten (I: schrumpfend, II: zunehmend bis stationär, III: temporär zunehmend) in Abhängigkeit der vorherigen Sanierungsmaßnahme ab (Tabelle 5).

**Tabelle 5: Fahnenverhalten in Abhängigkeit vorangegangener Sanierungsmaßnahmen**

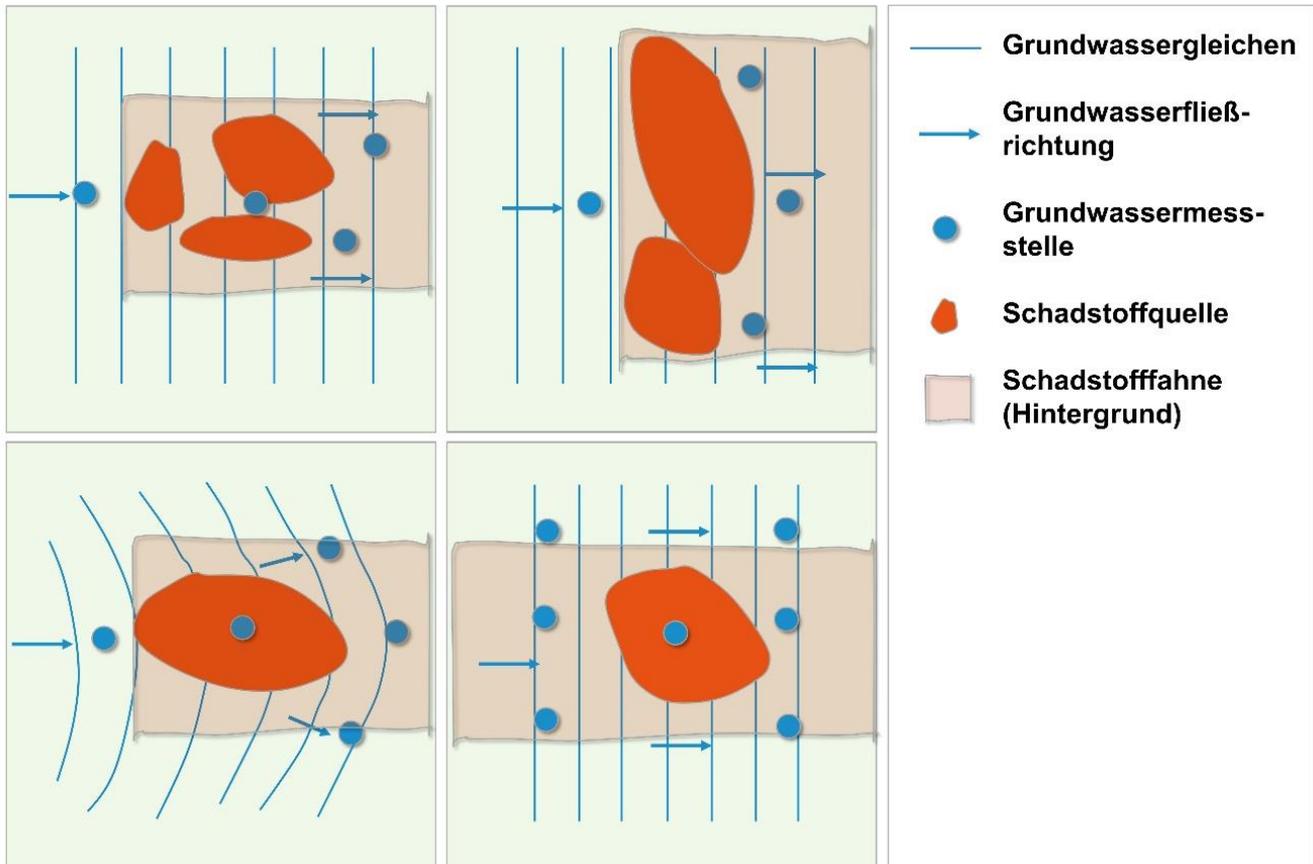
Fall	Quelle	Fahne
I	Quelle teilweise oder vollständig entfernt	Fahnenausdehnung schrumpfend
II	Quelle nicht entfernt	Fahnenausdehnung zunehmend bis stationär
III	Nutzung natürlicher Abbauvorgänge/ Reboundeffekte nach dem Ende aktiver Sanierungsmaßnahmen	Fahnenausdehnung temporär zunehmend, erreicht nach einiger Zeit einen quasistationären Zustand

Dies bedeutet, dass vor allem bei einer vorübergehend zunehmenden Fahnenausdehnung weitere Grundwassermessstellen in vergleichsweise kurzen Abständen abstromig der aktuellen Fahnenausdehnung erforderlich sind. Bei einer schrumpfenden Fahne kann die maximale Ausdehnung der sich zurückziehenden Schadstofffahne vereinfacht durch eine lineare Extrapolation des Logarithmus der Konzentration ( $\log c$ ) gegenüber der Entfernung vom Schadensherd abgeschätzt werden.

Im Rahmen von Erkundungen (Orientierende Untersuchung, Detailuntersuchung) sind die Überwachungsmaßnahmen und damit verbunden die Einrichtung von Messnetzen in Abhängigkeit vom Umfang des Kenntnisstands zur Schutzgutgefahrenlage des Grundwassers festzulegen. Bei einer unklaren Gefahrenlage ist entweder die Errichtung einzelner Überwachungsmessstellen oder die Überprüfung des Verhaltens der Kontaminationsfahne angezeigt.

### Flächige Überwachung mit einfachen Messnetzen

In unkomplizierten Fällen kann die Überwachung vereinfacht werden. Dies ist in Abbildung 12 gezeigt. Die Anzahl und Lage der Grundwassermessstellen ist so zu wählen, dass die Breite von Kontaminationen im Zustrom und Abstrom erfasst werden. Mindestens eine der abstromigen Messstellen sollte dicht am Schadenszentrum (naher Abstrom, jedoch außerhalb der Quelle) positioniert sein und damit an einer Stelle, an der der Einfluss von Abbau- und Verdünnungsprozessen im Grundwasser noch gering ist. Die abstromigen Messstellen sollten die Konzentrationsunterschiede entlang einer Kontrollebene erfassen.



**Abbildung 12: Anordnung von Grundwassermessstellen einer flächigen Überwachung zur Erfassung der Schadstofffahne (Aufsicht) [35]**

Den Schwerpunkt der Überwachung stellt der Abstrom des Kontaminations- bzw. Sanierungsbereichs dar. Bei stationären oder schrumpfenden Schadensherden ist die Überwachung ausgewählter Messstellen im nahen Abstrom ausreichend.

Wurde für einen definierten Bereich im Abstrom festgelegt, dass dort definierte Sanierungsziele zu erreichen sind (Prüfstellen), sind diese Grundwassermessstellen in das Routineüberwachungsprogramm zu integrieren. Ausnahmen können sich im Zusammenhang mit den durch die Sanierungsmaßnahme ausgelösten temporären Schadstoffmobilisierungen (z. B. Bodensanierung mittels Großlochbohrverfahren, ISCO-Verfahren) ergeben. In diesen Fällen ist das Messnetz gegebenenfalls zu verdichten.

### Flächige Überwachung mit komplexen Messnetzen

Bei komplexen Altlastenstandorten mit z. B. mehreren Teilflächen existieren in vielen Fällen umfangreiche Messstellennetze. Um den Aufwand und die Kosten für das Monitoring minimal zu halten, ist zu Beginn der Überwachung das vorhandene Messstellennetz soweit zu optimieren, dass die erforderlichen Informationen ohne die Erhebung redundanter Daten gewonnen werden können. Wenn Grundwassermessstellen in weitgehend homogenen Grundwasserleitern mit ähnlicher Lage der Filterstrecken nur eine sehr geringe Entfernung zueinander aufweisen, werden die daraus hinsichtlich der Verteilung der Grundwasserqualität gewonnenen Informationen nicht identisch, aber doch meist sehr ähnlich sein. Unter statistischen Gesichtspunkten (vgl. Teil B, IV) sind folglich redundante Daten solche, deren Vernachlässigung unter Berücksichtigung einer hinreichenden Genauigkeit zu keinem wesentlich abweichenden Ergebnis hinsichtlich der Schadstoffausdehnung führen [13].

Ein optimiertes Überwachungssystem weist nur einen geringen Verlust (statistischer) Informationen bei erheblichen Kosteneinsparungen auf. Für hinreichend genaue Ergebnisse zur Schadstoffverteilung ist jedoch eine ausreichende Anzahl von Datenpunkten (Grundwassermessstellen) erforderlich. Dies betrifft insbesondere heterogen aufgebaute Grundwasserleiter. Die Festlegung einer ausreichenden Anzahl von Messstellen erfordert genaue Kenntnisse zum konzeptionellen Standortmodell.

### Überwachung von Strombahnen

Im einfachsten Fall könnte eine Überwachung eine Reihe von Grundwassermessstellen entlang der vermuteten zentralen Fahnenachse (d. h. einer definierten und auch nachgewiesenen Strömungslinie) sowie die gerade noch unbelastete Messstelle vor der Fahnen Spitze umfassen. Der Vorteil ist ein möglicher Nachweis des Abbaus von Schadstoffen auf einer Strömungslinie. Der Abstand zweier Messstellen auf der Fahnenachse sollte so gestaltet werden, dass ein mindestens 40%iger Abbau nachgewiesen werden kann. Grundlage ist die Abhängigkeit des Messstellenabstandes von der Abbaugeschwindigkeit des relevanten Schadstoffes und Abstandsgeschwindigkeit [39]. Nachteil ist, dass bereits kleinere Änderungen im Fließregime zu stark variierenden Konzentrationen an einzelnen Messstellen führen und dann keine zuverlässigen Aussagen mehr möglich sind. Voraussetzung für eine solche Überwachung sind Kenntnisse zum Schadstofftransport und stabile Strömungsverhältnisse.

### Überwachung in Kontrollebenen (Transekten)

Die Abschätzung der aus dem Schadensherd transportierten Schadstofffrachten im Grundwasser kann über Kontrollebenen erfolgen. Diese besitzen beispielsweise Bedeutung für:

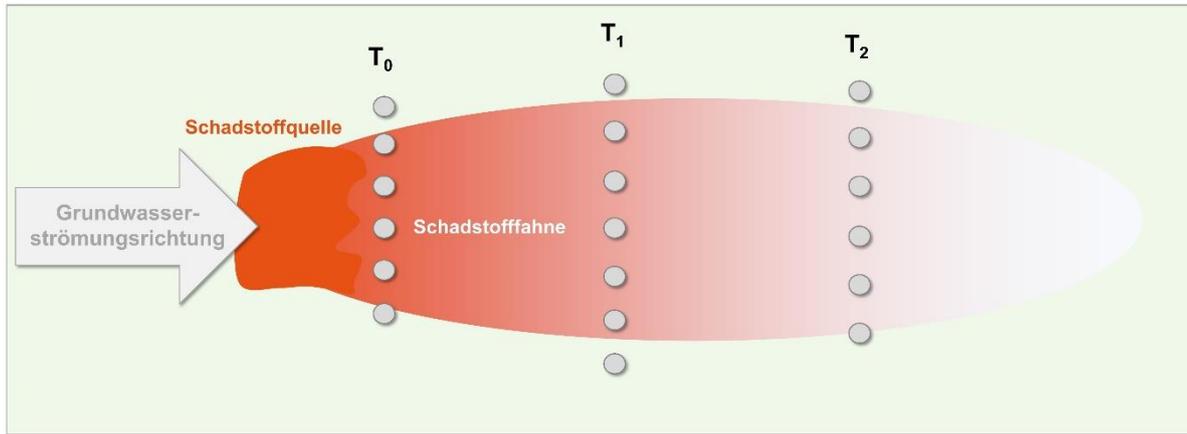
- die Ableitung des Erfordernisses einer Grundwassersanierung (Tolerierbarkeit, Festlegung von Sanierungszielwerten),
- die Beendigung einer laufenden Grundwassersanierung, obwohl die Sanierungszielwerte noch nicht erreicht sind oder
- die Überwachung natürlicher Schadstoffabbauvorgänge zur Festlegung und Überprüfung von MNA-Konzepten.

Gegebenenfalls kann auch auf die Ermittlung der Flächenverteilung verzichtet und stattdessen nur regelmäßig die Ermittlung der Frachten vorgenommen werden.

In der Abbildung 13 ist ein mögliches Messnetz aus Kontrollebenen schematisch dargestellt. Die Fracht ist ebenso wie die Konzentration im direkten Abstrom der Schadstoffquelle am höchsten (Transekte<sup>11</sup> T0).

---

<sup>11</sup> Transekten sind senkrechte Ebenen (Kontrollebenen), die quer zur Ausbreitungsrichtung der im Grundwasser transportierten Schadstoffe aufgespannt werden. Grundwassermessstellen, die entlang einer Transekte positioniert sind, erfassen die Breite einer Schadstofffahne.



**Abbildung 13: Mögliche Anordnung von drei Transekten ( $T_0$ ,  $T_1$ ,  $T_2$ ) in einer Schadstofffahne im Rahmen einer Überwachung mittels Kontrollebenen [35]**

Für die Frachtabschätzung mittels der Transekten-Methode werden Grundwassermessstellen benötigt, die sich sowohl auf einer Kontrollebene senkrecht zur Grundwasserströmungsrichtung als auch Ausbreitungsrichtung der Schadstoffe befinden. Bei der Festlegung der Lage der Transekten (Kontrollebenen) sowie der Messstellen ist die Fahngeometrie zu berücksichtigen. Die Kontrollebene muss daher ausreichend breit sein, um unterschiedliche Zustände der Schadstofffahne vollständig erfassen zu können. Der Abstand der Messstellen senkrecht zur Grundwasserströmungsrichtung sollte so gering sein, dass eine heterogene Schadstoffverteilung weitgehend erfasst wird. Darüber hinaus muss die Gesamtmächtigkeit des kontaminierten Grundwasserleiters sowohl bei heterogenen Grundwasserleitern als auch unterschiedlichen Grundwasserständen mit den einzelnen Grundwassermessstellen erfasst werden. Ist die Mächtigkeit der kontaminierten Schicht groß, so sind ggf. Messstellengruppen erforderlich.

### III.2 Messnetz Oberflächenwasser

Ein Überwachungsmessnetz für Oberflächengewässer besteht aus mehreren Messstellen entlang des Wirkungspfades (abhängig von konkreten Schadstoffen, konkreten Strömungsverhältnissen, sensiblen Nutzungen). Der Wirkungspfad ergibt sich aus der Eintragsituation (z. B. flächiger Eintrag aus Grundwasserzustrom, punktueller Eintrag aus Direkteinleiter, bevorzugte Abflussbahnen aus der Erosion). Zur Beprobung von Oberflächengewässern (Gräben, Flüsse, Teiche, Seen) im Rahmen von Altlasten werden in der Regel keine festen Probenahmestellen für ein Messnetz installiert. Allerdings ermöglicht der temporäre Einsatz von mobilen und automatisch gesteuerten Probenahmegeräten vor allem in kleinen Fließgewässern auch die Untersuchung verschiedener Abflusssituationen, die maßgeblich den Stoffeintrag bestimmen können. Die Beprobung erfolgt je nach Strömungsverhältnissen entlang der mutmaßlichen Strömungsbahnen entweder vom Ufer aus oder an repräsentativen Stellen des Oberflächengewässers durch die Entnahme von Schöpfproben. Zur Ermittlung von zeitlichen Veränderungen im Sinne einer Überwachung sind die gleichen Stellen in gleicher Art wiederholt zu beproben. Ausgenommen davon sind Spezialbeprobungen (z. B. aus Seen oder Teichen) zur Erfüllung gesonderter Aufgaben (z. B. Überprüfung vertikal differenzierter Milieuverhältnisse). Eine Überwachung von Oberflächengewässern im Abstrom einer Altlast bzw. altlastverdächtigen Fläche ist insbesondere erforderlich, wenn sich Schadstoffe in Richtung von Badegewässern bzw. einer Trinkwassernutzung ausbreiten oder einem anderen schützenswerten Bereich des Oberflächenwassers.

### III.3 Messnetz Bodenluft

Ein Überwachungsmessnetz für Bodenluft besteht aus mehreren Messstellen entlang des Wirkungspfad des der flüchtigen Schadstoffe (abhängig von konkreten möglichen Ausbreitungswegen und sensiblen Nutzungen). Eine Überwachung der Bodenluft ist erforderlich, wenn an einem Standort leichtflüchtige organische Schadstoffe (z. B. LCKW, BTEX bzw. gering molekulare MKW oder aufgrund von natürlichen Schadstoffabbauvorgängen sich bildende flüchtige Stoffe wie beispielsweise Methan) berücksichtigt bzw. überwacht werden müssen.

Diese gasförmigen Schadstoffe können sich in der ungesättigten Bodenzone leicht ausbreiten und in Innenräume eindringen (Wirkungspfad Bodenluft → Innenraumluft → Mensch). Bei Methangas ( $\text{CH}_4$ ) ist weniger dessen Giftigkeit (gering) problematisch als vielmehr die Gefahr der Ausbildung von explosionsfähigen Gasgemischen oder dessen erstickungsverursachende Wirkung. Ähnlich kann auch Schwefelwasserstoff ( $\text{H}_2\text{S}$ ) durch mikrobielle Abbauvorgänge gebildet werden. Für die Überwachung ist dabei der auffällige Geruch wichtig, wobei die Geruchsschwelle deutlich unterhalb der Toxizitätsschwelle liegt. Die Bildung von  $\text{CH}_4$  und  $\text{H}_2\text{S}$  beschränkt sich nicht nur auf Altablagerungen, sondern kann durchaus auch an hochbelasteten Altstandorten auftreten.

Die Ausbreitungsmöglichkeiten in der Gasphase werden vor allem durch die Durchlässigkeit des Bodens bestimmt. Störungen im natürlichen Bodengefüge, wie unterirdisch verlegte Leitungen oder Kanäle, können eine größere Durchlässigkeit bewirken und für bevorzugte Fließwege über größere Entfernungen sorgen. Es empfiehlt sich, geeignete Revisionsschächte in der Nähe von Gebäuden zur Entnahme von Luftproben zu nutzen. Die Möglichkeiten der Gasmigration bei der Aufstellung eines Überwachungsprogrammes ist zu berücksichtigen.

Eine Überwachung von Bodenluft ist neben der Gefahrenerkundung beispielsweise notwendig, wenn sich flüchtige Schadstoffe in Richtung Innenraumluft eines genutzten Gebäudes ausbreiten oder wenn der Sanierungserfolg im Rahmen einer Bodenluftsanierung nachgewiesen werden muss. Hinsichtlich der Repräsentativität der Probe sollte der Zutritt von Außenluft weitgehend ausgeschlossen sein.

Bodenluftmessstellen haben in der Regel eine kurze Filterstrecke (1 – 2 m). Der Abstand des Filters zur Grundwasseroberfläche sollte mindestens 1 m betragen.

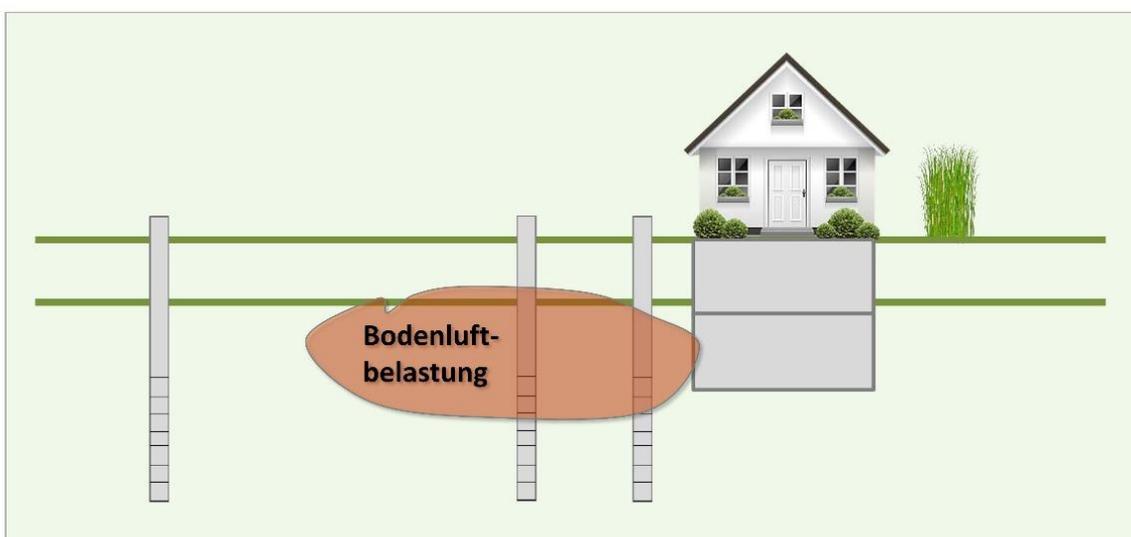


Abbildung 14: Schema einer Überwachung der Bodenluft

Liegt der Schaden unterhalb des Gebäudes, sollte die Bodenluftmessstelle innerhalb des Gebäudes installiert werden. Sofern die Errichtung einer Bodenluftmessstelle im Gebäude nicht möglich ist, muss diese nahe am Gebäude installiert werden und den Bodenhorizont unterhalb der Bodenplatte als gasmobiles Schadstoffpotenzial, welches in das Gebäude bzw. den Keller eindringen, kann erfassen.

Mit einer sorgsam Abdichtung des Ringraumes wird vermieden, dass Migrationswege künstlich geschaffen werden. Aus dem gleichen Grund ist die Messstelle mit einem gasdichten Abschluss zu versehen. Kann Bodenluft mit erhöhten Schadstoffgehalten in Gebäude eindringen und die Innenraumluft beeinträchtigen, ist das Messnetz in Abstimmung mit der zuständigen Gesundheitsbehörde auf Innenraumluft zu erweitern.

### III.4 Analysenparameter

Die im Rahmen der Überwachung zu analysierenden Parameter ergeben sich im Wesentlichen bei Altstandorten aus der historischen und aktuellen Nutzung (branchenspezifische Schadstoffe) und bei Altablagerungen aus dem Ablagerungsinventar, wobei sich bei langlaufenden Überwachungen oft auf Primärschadstoffe beschränkt werden kann. Im Teil B, I sind für ausgewählte Branchen die als relevant anzusehenden Parameter angegeben.

#### Relevante Parameter

Die relevanten Parameter ergeben sich aus der Altlastenerkundung in Abhängigkeit von den Aktivitäten, die auf dem betreffenden belasteten Grundstück stattgefunden haben. Typisch sind bei organischen Schadstoffen vorrangig Mineralölkohlenwasserstoffe (MKW), (mono)aromatische Kohlenwasserstoffe (BTEX), leichtflüchtige halogenierte Kohlenwasserstoffe (LHKW) und polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe (PAK), mitunter auch Phenole und bei den anorganischen Schadstoffen vor allem Schwermetalle, Arsen und Cyanide<sup>12</sup>. In den letzten Jahren ist je nach Einzelfall auch die Stoffgruppe der Per- und polyfluorierte Alkylverbindungen (PFAS) sowie deren Vorläuferverbindungen (Precursor-Verbindungen) in den Fokus gerückt, welche sowohl bei verschiedenen Altlastenorten (z. B. Galvanik, Gerbereien, Papierherstellung) und Altablagerungen, aber auch an Standorten mit Löschereignissen der Feuerwehren auftreten können. Bei militärischen und Rüstungsaltslasten sind Kampfstoff- bzw. sprengstofftypische Verbindungen zu prüfen.

#### Leitparameter

Ausgehend von den relevanten Parametern ist eine Verringerung des Parameterumfangs auf einen oder wenige sogenannte Leitparameter ausschließlich vor dem Hintergrund der Kostenersparnis von Bedeutung. Als Leitparameter (oder Indikatorschadstoffe) werden Messgrößen für chemische Stoffe oder Verbindungen verstanden, die relativ kostengünstig und einfach zu erfassen sind und stellvertretend für eine Vielzahl von Einzel- oder Summenschadstoffen gemessen werden. Dabei sind Leitparameter so auszuwählen, dass sie einen Standort hinsichtlich spezifischer Fragestellungen zur Gefahrenlagenabschätzung charakterisieren, somit:

- Parameter, die charakteristisch für den zu untersuchenden Standort sind (flächenhaft vorhanden),
- Parameter mit geringer mikrobieller Abbaubarkeit (langer Nachweis),
- Parameter mit hoher mikrobieller Abbaubarkeit (schnelle Abnahme),
- Parameter mit geringer Retardierung und damit großer Mobilität (Fahnnenspitze Grundwasser),

---

<sup>12</sup> Siehe Branchenblätter in Sachsen: <https://www.umwelt.sachsen.de/umwelt/boden/12501.htm>

- Parameter mit einem hohen toxikologischen Potenzial (größte Gefahrenlage),
- Summenparameter zur Ausbreitung von Schadstoffen mit ähnlichen Eigenschaften, z. B. LHKW für leicht flüchtige Schadstoffe.

Eine Beschränkung auf Leitparameter ist sinnvoll, wenn umfangreiche Mischkontaminationen vorliegen, z. B. bei größeren Altablagerungen. So ist bei den Kombinationen von BTEX und PAK zu prüfen, ob sich die Überwachung vordergründig auf BTEX als Leitparameter beschränken kann, da diese deutlich mobiler sind. Sind zusätzlich noch LCKW vorhanden, sollte keine weitere Beschränkung vorgenommen werden. Beide Stoffgruppen unterscheiden sich in ihrer natürlichen mikrobiellen Abbaubarkeit. Der Abbau der BTEX liefert zudem erst den für den Abbau der LCKW notwendigen Wasserstoff. Es sollten Parameter jeweils aus der Gruppe der nicht-chlorierten und der chlorierten Schadstoffe analysiert werden.

Summenparameter wie BTEX und PAK sind genaugenommen bereits Leitparameter, da sie jeweils große Stoffgruppen charakterisieren und nur eine stellvertretend kleine Anzahl analysiert wird. Die Quantifizierung nur einer der Verbindung aus solch einem Summenparameter kann, wenn es die Hauptkontamination charakterisiert sinnvoll sein, führt aber nicht unbedingt zu kostenrelevanten Einsparungen, da der Analysengang den gleichen Aufwand wie die Analyse des Summenparameters verursachen kann. Der Nachweis o. g. PFAS kann über Summenparameter erfolgen. Dazu werden derzeit verschiedene Verfahren entwickelt und getestet (bspw. TOP-Assey, AOF, EOF).

Eine Festlegung auf Leitparameter setzt ein Prozessverständnis voraus. Eine Reduzierung auf Leitparameter bei der Untersuchung von Abbauprozessen ist erst zu einem späteren Zeitpunkt sinnvoll, wenn die Überwachung eine Stabilität der ablaufenden Prozesse gezeigt hat.

Wenn sich beispielsweise gezeigt hat, dass an einem Standort bestimmte Prozesse erschöpft sind (meist die bei höherem Oxidationszustand ablaufenden Prozesse der Denitrifikation, Mangan- und Eisenreduktion) kann eine Konzentration auf relevante Indikatoren wie Sulfat bzw. Methan erfolgen.

### NA-Parameter

Bei der Auswahl und Festlegung des Parameterspektrums bei den Untersuchungen von Abbauprozessen ist darauf zu achten, dass außer einer Bewertung der Konzentrationsverteilung der relevanten Schadstoffe auch eine Kontrolle der wesentlichen schadstoffmindernden Prozesse für Abbaubilanzen bzw. Frachtberechnungen erfolgt. Neben der Analyse der Schadstoffe und der Messung der Feldparameter (z. B. Sauerstoff, Redoxpotenzial) im Rahmen der Probenahme, ist die Analyse der Redoxindikatoren<sup>13</sup> erforderlich.

Dazu zählen:

- |                             |                   |
|-----------------------------|-------------------|
| ■ Sauerstoff (gelöst),      | ■ Sulfat, Sulfid, |
| ■ Nitrat, Nitrit, Ammonium, | ■ Methan,         |
| ■ Mangan (gelöst),          | ■ DOC.            |
| ■ Eisen (gelöst),           |                   |

---

<sup>13</sup> Der Überbegriff Redoxindikatoren umfasst neben Elektronenakzeptoren auch die Endprodukte einzelner Redoxprozesse (sozusagen die „verbrauchten“ Elektronenakzeptoren), Zwischenprodukte (Nitrit, Sulfid) und den DOC

## Ökotoxikologische Untersuchungen

An manchen Standorten treten eine Vielzahl unterschiedlicher Schadstoffe und Schadstoffklassen auf. Solche Mischkontaminationen finden sich vor allem bei Altablagerungen. Zum einen ist oft nicht ableitbar, welche Schadstoffe für die Gefahrenlage ausschlaggebend und somit die zu bestimmende Referenzsubstanz im Grundwasserleiter ist. Zum anderen kann auch nicht ausgeschlossen werden, dass chemische Stoffe eine Rolle spielen, die sich der Analyse entziehen. Auch Wechselwirkungen einzelner Stoffe untereinander können anhand der Einzelstoffanalytik nicht bewertet werden. Zudem gibt es für viele chemische Einzelstoffe keine Bewertungskriterien. In diesen Fällen kann die Überwachung einer solchen Mischkontamination, bestehend aus Einzel- bzw. Leitparametern, ergänzt werden durch die summarische Erfassung der ökotoxikologischen Wirkung (integrale Beurteilung). Hierfür bieten sich biologisch-ökotoxikologische Untersuchungen (kurz Biotests) an. Auch wenn diese Verfahren schon lange Zeit zur Verfügung stehen, ist deren Anwendung erst in den letzten Jahren zur Überwachung des Grundwassers festzustellen. Bisher wurden Biotests meist nur für Oberflächenwasser eingesetzt, vor allem deshalb, weil die verwendeten Testorganismen auch Oberflächenwasserorganismen sind.

Als Ergebnis der Tests erhält man nach einer definierten Inkubationszeit eine „organismische“ Antwort, z. B. Verminderung von Schwimmgeschwindigkeit, Wachstum oder Einschränkungen in der Entwicklung, die in Abhängigkeit von der eingesetzten Verdünnung der zu untersuchenden Probe von einer unbelasteten Vergleichsprobe abweicht. Entsprechend wird das Ergebnis als G-Wert angegeben. Der G-Wert ist der reziproke Wert der niedrigsten unwirksamen Verdünnungsstufe.

Unterschieden werden Biotests zur Untersuchung der akuten Toxizität (die Versuchsdauer beträgt je nach Test max. 48 h) und Langzeittests zur Erfassung chronischer Toxizitätseffekte. Schädliche Veränderungen des Erbgutes werden mithilfe spezieller Tests zur Gentoxizität erfasst, z. B. *umu*-Test. Für einen umfassenden Überblick über die ökologischen Auswirkungen müssen Biotests auf unterschiedlichen trophischen Ebenen (Produzenten, Konsumenten, Destruenten) und an verschiedenen taxonomischen Gruppen (Bakterien, Pflanzen, Tiere) durchgeführt werden. Ein Beispiel einer solchen Testbatterie ist in Tabelle 6 gezeigt [36].

**Tabelle 6: Ökotoxikologische Testverfahren**

Test	Dauer	Trophieebene	Organismus	Untersuchungsparameter	Zweck
Fischeitest	48 h	Sekundärkonsument	<i>Danio rerio</i>	Entwicklung	Erfassung akut toxischer und fruchtschädigender Wirkungen
Daphnientest	24 h	Primärkonsument	<i>Daphnia magna</i>	Schwimmfähigkeit, Reproduktion	Erfassung akut toxischer Wirkung gegenüber filtrierenden Wasserorganismen/ Fischnährtieren
Algentest	72 h	Primärproduzent	<i>Scenedesmus subspicatus</i>	Wachstum	Erfassung akut toxischer und chronischer Wirkung gegenüber Pflanzen
Leuchtbakterientest	< 0,5 h	Destruenten	<i>Vibrio fischeri</i>	Lumineszenz	Erfassung akut toxischer Wirkung gegenüber Bakterien
<i>umu</i> -Test	2 h		<i>Salmonella typhimurium</i>	Geninduktion	Erfassung gentoxischer Wirkungen

Test	Dauer	Trophieebene	Organismus	Untersuchungsparameter	Zweck
Langzeittest mit Daphnien	21 d	Primärkonsument	<i>Daphnia magna</i>	Wachstum, Reproduktion	Erfassung akut toxischer und chronischer Wirkung gegenüber filtrierenden Wasserorganismen/ Fischnährtieren

Unerlässlich sind zu den Biotests begleitende Analysen der die Testorganismen beeinflussenden Stoffparameter (im Wesentlichen Sulfat, Chlorid, H<sub>2</sub>S, Calcium, Magnesium und andere Salze). Zur Probenvorbereitung sind eine Entgasung der Proben und eine Belüftung unerlässlich. Daher erfassen die Tests leichtflüchtige Schadstoffe nicht. Vorschläge für Schwellenwerte zur Beurteilung von Stoffen im Grundwasser unter Berücksichtigung der unterschiedlichen Empfindlichkeit des jeweils zu betrachtenden aquatischen Ökosystems finden sich in Tabelle 7.

**Tabelle 7: Bewertungsvorschläge auf Grundlage ökotoxikologischer Testverfahren [36]**

Test	Kleine und mittlere Fließgewässer	Grundwasser
Fischartest	G <sub>EI</sub> 2	G <sub>EI</sub> 2
Daphnientest	G <sub>D</sub> 3	G <sub>D</sub> 2
Algentest	G <sub>A</sub> 3	G <sub>A</sub> 3
Leuchtbakterientest	G <sub>L</sub> 6	G <sub>L</sub> 5
<i>umu</i> -Test	G <sub>Eu</sub> 1,5	G <sub>Eu</sub> 1,5
Langzeittest mit Daphnien	k.A.	k.A.

Eine Überschreitung der jeweiligen G-Werte zeigt, dass die Probe eine ökotoxikologische bzw. genotoxische Wirkung aufweist. Bisher bestehen noch Kenntnisdefizite zur Empfindlichkeit der Biotests. Wegen des relativ hohen Aufwandes und der Kosten für die Biotests erfolgen diese nur für spezielle Fragestellungen. Eine Anwendung könnte beispielsweise der geplante Abbruch einer Überwachung sein, wenn das Überwachungsziel nicht erreicht ist, aber aus Verhältnismäßigkeitsgründen eine Beendigung erfolgen soll. Ökotoxische Untersuchungen könnten dabei eine letzte Absicherung darstellen.

### III.5 Überwachungszyklus

Die Intensität der Überwachung während der Sanierung ist so zu wählen, dass Veränderungen ablaufender Prozesse im Untergrund sowie Veränderungen der Schadstoffbelastungen erfasst und damit Aussagen zur Erreichung des Sanierungsziels oder gegebenenfalls zu deren Anpassungen (geringer oder stagnierender Sanierungsfortschritt) getroffen werden können. In der Regel werden die Intervalle bei länger laufender Sanierung (beispielsweise Pump-and-Treat-Maßnahmen) größer sein.

Bei der Überwachung von Sicherungsbauwerken ist nach Einstellung konstanter Untergrundverhältnisse von größeren Zeitabständen in der Überwachung auszugehen (> 1 Jahr). Bei den meisten kostenintensiven, langlaufenden Überwachungsmaßnahmen nach Abschluss einer Sanierung oder im Fall der Umsetzung von MNA-Konzepten sind generell drei verschiedene, typische Szenarien (Fälle) zu unterscheiden:

- Der Schadensherd wurde vollständig entfernt. In diesem Fall ist mit einem zeitnahen Sinken der Konzentrationen an den Grundwassermessstellen innerhalb der Schadstofffahne zu rechnen. Mittel- bis langfristig wird sich die Schadstofffahne auflösen.
- Der Schadensherd wurde (noch) nicht entfernt. Die Schadstofffahne hat nach einer temporären Zunahme einen quasi-stationären Zustand erreicht. Die Schadstoffkonzentrationen an jeder Messstelle innerhalb der Schadstofffahne bleiben über sehr lange Zeiträume konstant.
- Eine aktive Sanierung wird beendet und das Restschadstoffpotenzial wird einem zuvor nachgewiesenen natürlichen Schadstoffabbau überlassen. In diesem Fall können die Schadstoffgehalte nach Beendigung der aktiven Sanierung lokal noch ansteigen. Eine ortsstabile Schadstofffahne wird sich erst mit der Zeit ausbilden.

Jeder dieser unterschiedlichen Anwendungsfälle hat entscheidenden Einfluss auf den erforderlichen Probenahmeturnus. So ist beispielsweise ausschließlich beim Fall B über einen langen Zeitraum mit keiner Konzentrationsänderung zu rechnen. Die Grundwasserabstandsgeschwindigkeit ist dann in der Regel von untergeordneter Bedeutung. Andererseits spielt die Rate der (erwarteten) Konzentrationsänderungen – zunächst unabhängig davon, ob zu- oder abnehmend – eine wesentliche Rolle bei der Festlegung des Probenahmeturnus [92]. Auch wenn verschiedene Autoren [29] empfehlen, den Probenahmeturnus alleine von der Grundwasserfließgeschwindigkeit abhängig zu machen, erscheint dies aufgrund weiterer Einflussfaktoren als nicht ausreichend.

Die Bewertung vieler der genannten Einflussparameter ist einzelfallspezifisch. In der Tabelle 8 werden erfahrungsbasierte Richtwerte angegeben. Nach [29] werden Konzentrationsschwankungen zu 70 - 90 % durch eine zeitliche und räumliche Variabilität im Untergrund verursacht. Wenn Grundwasserproben daher nicht häufig genug gewonnen werden, kann möglicherweise eine zeitliche Variabilität der Grundwasserqualität und der hydraulischen Bedingungen nicht erfasst werden. Um sehr häufige Probenahmen zu vermeiden, bieten sich zeitintegrierende Probenahmen an.

Zu häufige Beprobungen führen andererseits zu einer nicht erforderlichen Redundanz der Daten und zu hohen Kosten. Neu errichtete Grundwassermessstellen sollten nach Errichtung dagegen generell häufiger beprobt werden (mindestens dreimal nach Errichtung), um eine ausreichend große Datenbasis für den Verlauf der Schadstoffkonzentrationen zu schaffen.

Bei der sanierungsnachlaufenden Überwachung zur Überprüfung des Rebounds spielen vor allem Diffusions- und Lösungsprozesse eine Rolle. Diese verlaufen bei hoher Grundwasserabstandsgeschwindigkeit rascher, da der schnelle Abtransport der gelösten Schadstoffe stets den Konzentrationsgradienten maximiert. Darüber hinaus können sich eine Reihe weiterer Randbedingungen auf den erforderlichen Probenahmeturnus auswirken.

**Tabelle 8: Richtwerte der Einflussfaktoren für die Festlegung des Probenahmeturnus**

Parameter	Gering	Mittel	Hoch
Mobilität der Schadstoffe (R = Retardierung) <sup>14</sup>	R > 3	R = > 2 - 3	R = 1 - 2
Höhe der Schadstoffkonzentrationen	< 10-fach GFS	10 - 50-fach GFS	≥ 50-fach GFS
Grundwasserabstandsgeschwindigkeit	< 0,5 m/d	0,5 – 1 m/d	≥ 1 m/d
Konzentrationschwankungen	< 20 % $\bar{c}$	20 – 30 % $\bar{c}$	> 30 % $\bar{c}$
Rate der Konzentrationsänderung	< ±10 %/a	±10 - 20 %/a	≥ ±20 %/a
Nähe zu sensiblen Schutzobjekten	≥ 500 m	200 – 500 m	<< 200 m

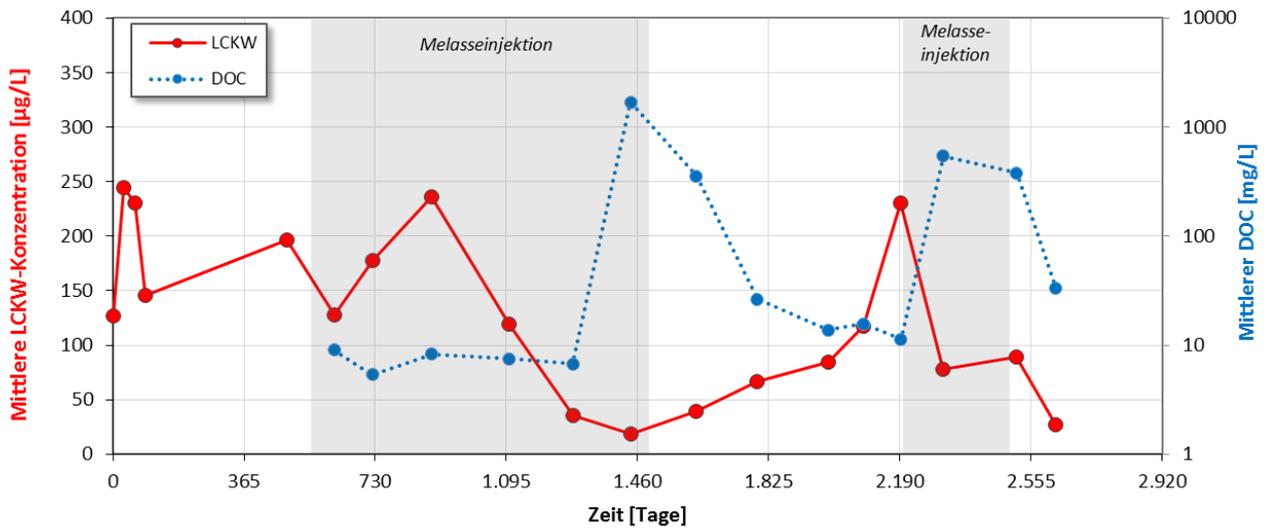
Eine *Verlängerung* des Probenahmeturnus ist prinzipiell angezeigt bei stark verzögert und gedämpft reagierenden Grundwasserleitern (beispielsweise Lockergesteinsgrundwasserleitern mit großem Flurabstand oder tiefe Grundwasserstockwerke) sowie bei niedrigen Grundwasserfließgeschwindigkeiten.

Eine *Verkürzung* des Probenahmeturnus ist prinzipiell angezeigt bei:

- Kluft-/Karstgrundwasserleiter,
- stark wechselnden Grundwasserfließrichtungen,
- geringer Datenlage,
- nicht prognostizierbaren Konzentrationsverläufen oder
- sensiblen Schutzobjekten (Wasserschutzgebiet, Oberflächengewässer, ...).

Nach dem Abschluss vieler Sanierungen kommt es zu einem Rebound. Dies bedeutet, dass es zu einer Einstellung eines meist auf einem höheren Niveau liegenden Konzentrationsgleichgewichts zwischen (in Grundwasser oder Bodenluft) gelösten Schadstoffen und den an der Bodenmatrix sorbierten oder in residuellen Phasen bzw. gering durchlässigen Bereichen vorliegenden Schadstoffen kommt. Abbildung 15 zeigt exemplarisch den Rebound bei einem mikrobiellen Sanierungsverfahren (reduktiver LCKW-Abbau nach Melasseinjektionen). Nach Einstellung der Melasseinjektionen befinden sich noch hohe Konzentrationen an DOC im Grundwasser. Zum Teil wird der DOC aus der, während der Injektionen aufgebauten und nun absterbenden Biomasse, nachgeliefert. Der Abbau des verbleibenden DOC liefert die für einen anhaltenden mikrobiellen LCKW-Abbau entsprechenden Substrate. Erst nach weitgehender Aufzehrung des DOC und dem zum Erliegen kommenden mikrobiellen Abbau, beginnt die Akkumulation sich nachlösender Schadstoffe im Grundwasser. Bei einer ausreichend langen Überwachung erreicht der Rebound ein Konzentrationsplateau. Zu diesem Zeitpunkt sind die durch die Sanierung veränderten biogeochemischen Bedingungen im Grundwasserleiter vollständig abgeklungen.

<sup>14</sup> Bei einer Retardation (R) von 1 wird der Schadstoff nicht sorbiert und migriert mit der gleichen Geschwindigkeit wie das Grundwasser



**Abbildung 15: Wirksamkeit des Rebound-Effekts**

Zusammengefasst sind bei der Festlegung der Überwachungshäufigkeit alle Erkenntnisse zu den Schadstoffbelastungen, den hydrogeologischen Randbedingungen und den zeitlichen (saisonalen) Veränderungen im Grundwasser zu berücksichtigen. Veränderungen von örtlichen Randbedingungen, die Einfluss auf das Schadstoffverhalten haben können, z. B. unerwartete Grundwasserschwankungen durch Nass- oder Trockenperioden oder Grundwasserabsenkungen infolge von Baumaßnahmen, erfordern eine Anpassung des Überwachungsprogramms.

Zum Probenahmeturnus bezüglich der Bodenluft gibt es bisher kaum dokumentierte Erfahrungswerte. Dieser richtet sich in der Regel nach den festgelegten Sanierungszielwerten oder vorhandenen Prüf- bzw. Grenzwerten. Aufgrund des bei bspw. einer Bodenluftabsaugung erfolgten Nachlösens der Schadstoffe aus dem Boden ist von einem intermittierenden Verfahren auszugehen. Dieses erfordert ein operatives Festlegen des Probenahmezyklus. Bei moderatem Überwachungsaufwand sollte mit vierteljährlichen Beprobungen begonnen werden.

## IV Spezielle Hinweise zur Auswertung der Ergebnisse eines Überwachungszyklus

Die Auswertung der im Rahmen der Überwachung erhaltenen Ergebnisse erfolgt anhand der Vorgaben bzw. Festlegungen zu Sanierungszielen oder Kontrollwerten im behördlich bestätigten Sanierungsplan oder im Überwachungskonzept.

In der Regel werden diese anhand von:

- Konzentrationen,
- Schadstofffrachten und
- Trendentwicklungen

festgelegt.

Die Ergebnisse stellen eine Grundlage für die aktuelle Gefahrenbewertung von Altlasten oder altlastenverdächtigen Flächen zur prognostischen Entwicklung dar.

So sind die Konzentrationshöhe der relevanten Kontaminationsparameter sowie die räumliche und zeitliche Entwicklung der Schadstoffausbreitung in [77] und [70] in Verbindung mit konkreten Schutzgütern wesentliche Faktoren für die Entscheidung zur Tolerierbarkeit eines Grundwasserschadens.

Damit verbunden sind Entscheidungen über Fortsetzung, Abbruch oder ordnungsgemäße Beendigung der Überwachung.

### Konzentrationen

In vielen Fällen erfolgen Festlegungen zur Überprüfung der Gefahrenlage (bzw. zum Sanierungserfolg) anhand von messpunkt- oder flächenbezogenen Konzentrationswerten und deren Über- oder Unterschreitung. Die standortkonkreten Zielwerte der Überwachung (bzw. Sanierung) wurden auf Grundlage folgender Werte festgelegt (bereits im Überwachungs- bzw. Sanierungskonzept):

- Gesetzlich festgelegte Prüf- und Maßnahmenwerte für verschiedene Wirkungspfade (Boden – Mensch; Boden – Nutzpflanze, Boden – Grundwasser nach der BBodSchV [10],
- Prüfwert<sup>15</sup>vorschläge, Besorgnis- und Dringlichkeitswerte für einzelne Schutzgüter [71],
- Orientierende Hinweise für die Bodenluft [71],
- Geringfügigkeitsschwellenwerte der LAWA für das Grundwasser bzw. analoge Werte [52], [5],
- Umweltqualitätsnormen (UQN) gemäß Oberflächengewässerverordnung (OGewV, 2016) [65] bzw. analoge Werte [91].

Zu beachten ist dabei, ob diese Konzentrationswerte im Ergebnis einer einmaligen Überwachung oder eines Überwachungszyklus überschritten bzw. langfristig gemessen wurden. Bei einer einmaligen Überschreitung ist eine Repräsentanz nicht gegeben. Sowohl standortspezifische Verhältnisse als auch hydraulische oder klimatische Einflussfaktoren können zu erheblichen zeitlichen und räumlichen Schwankungen führen. Unter diesen Aspekten sind Schlussfolgerungen zur Beendigung oder Fortführung der Überwachung erst anhand gesicherter Aussagen mehrfacher Überwachungszyklen zu treffen.

---

<sup>15</sup> mit Inkrafttreten der Novellierung der BBodSchV am 01.08.2023 wurden einige Prüfwerte angepasst. Die aktuellen Prüfwerte sind in BBodSchV Anlage 2 dargestellt.

Hinsichtlich der räumlichen Darstellung von Überwachungsergebnissen erfolgt in der Regel eine Interpolation der Schadstoffgehalte zwischen den Messpunkten. Um aus Punktmessungen Aussagen zur flächenhaften oder räumlichen Schadstoffverteilung zu erhalten bedient man sich geostatistischer Methoden. Die Geostatistik stellt eine auf Modellierung beruhendes Werkzeug dar.

Man unterscheidet dabei zwischen nichtstatistischen und statistischen Interpolationsverfahren.

Zu den *nichtstatistischen* Interpolationsverfahren gehören z. B.:

- Thiessen-Polygone,
- Triangulierung sowie
- Inverse Distance.

Bei der **Polygonmethode** wird eine Fläche in Vielecke (Polygone) unterteilt. Die jeweiligen Messpunkte liegen im Zentrum des Polygons und alle Punkte innerhalb des Polygons erhalten denselben Wert.

Bei der **Triangulierung** wird anhand von drei benachbarten Konzentrationswerten eine Ebene gelegt und der Wert innerhalb dieses Dreiecks abgeschätzt.

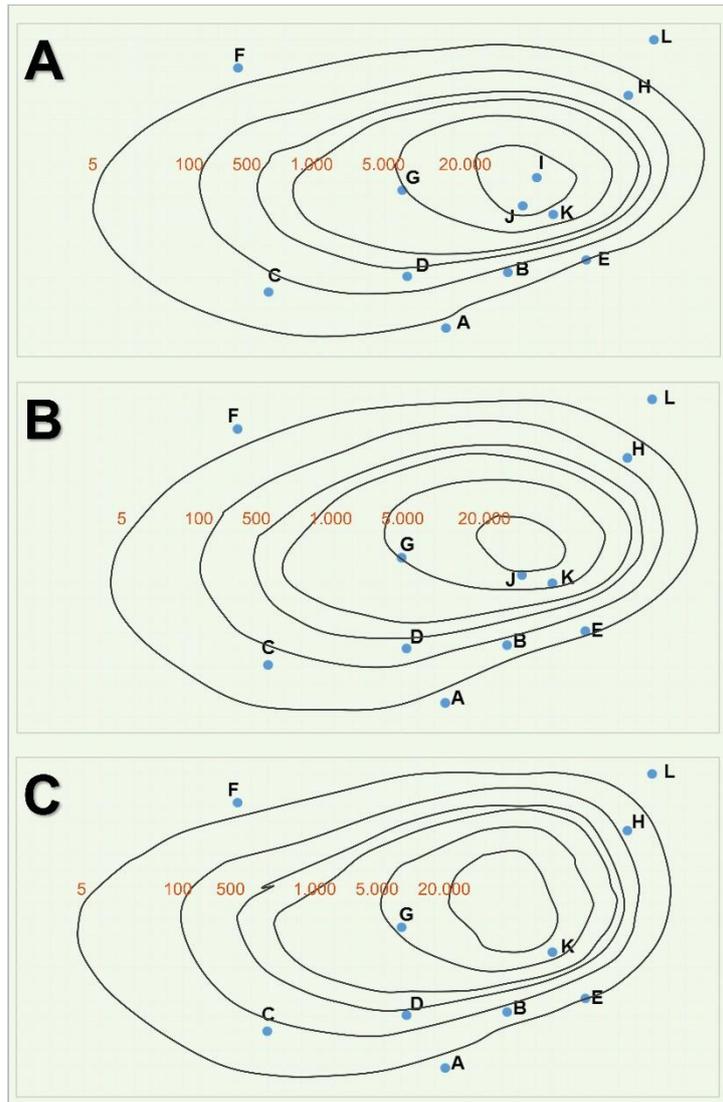
Bei der **inversen Distanzwichtung** wird die Konzentration an einem nicht beprobten Punkt bzw. Bereich anhand benachbarter gemessener Werte abgeschätzt.

Ein in der Praxis häufig angewendetes *statistisches* Interpolationsverfahren ist das **Kriging-Verfahren**.

Dabei wird eine wahrscheinliche, sich mit der Entfernung ändernde Schadstoffverteilung zwischen mehreren Messpunkten erzeugt. Das Kriging erfordert, dass an jedem Ort nur ein Datenpunkt existiert und die Filterlagenzuordnung eindeutig einem Grundwasserleiter zugeordnet werden kann. Das Kriging berücksichtigt alle Messpunkte und ignoriert Ausreißer. Darüber hinaus ist es erforderlich, dass an den Rändern der Fahnen ausreichend Messungen mit dem Wert Null vorliegen, um eine Interpolation in zu weite Entfernungen zu vermeiden. Optional können diese Punkte als *angenommene Stützstellen* eingefügt werden. Unter der Annahme einer positiven räumlichen Korrelation der Messdaten zueinander kann die Redundanz durch eine Vergrößerung des Abstandes zwischen den verbleibenden Messstellen und nachfolgend durch die Eliminierung der als redundant vermuteten Messstellen reduziert werden (Neuberechnung der Schadstoffverteilung [59]). Unberücksichtigt bleiben dabei stoffspezifische Eigenschaften. Ein derartiges Beispiel ist in Abbildung 16 gezeigt.

Bei umfangreichen und komplexen Kontaminationsstandorten besteht zur Interpolation die Möglichkeit, kommerzielle Software-Programme zu nutzen (z. B. ArcGIS Geostatistical Analyst oder GSLIB Geostatistical Software Library). Weiterführende Angaben zu möglichen Programmen und geostatistischen Verfahren sind unter der homepage [https://wiki.52north.org/AI\\_GEOSTATS/WebHome](https://wiki.52north.org/AI_GEOSTATS/WebHome) (AI-Geostats) bzw. in [49] vorhanden.

In heterogen aufgebauten Grundwasserleitern (z. B. starke Schichtung zwischen grobklastigen und feinsandigen/schluffigen Bereichen, Unterschiede in den Druckverhältnissen – gespannter/ungespannter Grundwasserleiter) können geostatistische Verfahren nur stark eingeschränkt angewandt werden.



**Abbildung 16: Mittels Kriging berechnete Schadstoffverteilung unter Verwendung aller Messpunkte (A), unter Vernachlässigung von Messstellen I (B) und zusätzlich von J (C) (nach [13], verändert)**

Die Vernachlässigung von zwei Messstellen (Messstelle I und Messstelle J) im visuellen Vergleich der Fahnenkarten führt zu näherungsweise der gleichen Schadstoffverteilung, insbesondere an den Fahnenrändern.

Eine weitere Möglichkeit zur Abschätzung der Schadstoffverteilung ist die Verwendung von reaktiven Schadstofftransportmodellen. Wegen des hohen Aufwandes kommt diese Alternative nur selten zur Anwendung. Die abschließende Wahl des optimalen Messnetzes erfordert jedoch immer eine individuelle Bewertung durch den Gutachter. Mit Hilfe der vergleichsweise einfachen geostatistischen Verfahren gelingt es, mit einem reduzierten Datensatz die wahrscheinliche Ausdehnung und Konzentration der Kontamination im zweidimensionalen (mit deutlich mehr Aufwand auch im dreidimensionalen) Raum zu erfassen.

### Trendentwicklungen

Bei längerfristigen Überwachungen und einer ausreichenden Datengrundlage sollte die Auswertung zur zeitlichen und räumlichen Schadstoffentwicklung und damit verbunden zur Prognose des Schadensverlaufs anhand von Trendentwicklungen erfolgen.

Dies ist besonders relevant bei der Betrachtung von Strombahnen im Abstrom von Schadensherden und der Überprüfung des Verhaltens der Schadstofffahne (ansteigend, quasi-stationär oder schrumpfend).

Anhand von zeitlichen Trendentwicklungen können Änderungen von Gefahrenpotenzialen ggf. rechtzeitig erkannt und darauf reagiert werden. Voraussetzung für eine belastbare Trendaussage ist eine gesicherte Datengrundlage. Die wesentlichen Einflussfaktoren sind in der Auswertung zwingend anzugeben. Dies betrifft z. B. saisonal schwankende hydraulische Verhältnisse (Grundwasserneubildung, Einfluss von Vorflutern, Grundwassernutzungen usw.) oder stoffspezifische Eigenschaften (z. B. Retardation) bzw. standortspezifische Verhältnisse (inhomogene Bodenschichten).

Eine unzureichende oder fehlerhafte Interpretation kann erhebliche Auswirkungen auf die Festlegung von Maßnahmen haben.

Im UBA-Leitfaden „Erarbeitung von Programmen zur Überwachung von alllastverdächtigen Flächen und Altlasten“ [81] wird ein mögliches Vorgehen bei der Interpretation von Messreihen anhand von Fallbeispielen erläutert.

Im Teil B, VIII sind die auftretenden unterschiedlichen Konzentrationsverläufe und deren Interpretation angegeben und es werden unterschiedliche statistische Verfahren vorgestellt und erläutert.

### Schadstofffrachten

Die Ermittlung von Schadstofffrachten erfolgt anhand der Ergebnisse der Überwachung in der Regel für das Grund- und Oberflächenwasser.

#### Schadstofffrachten im Grundwasser

Die Ermittlung von Schadstofffrachten erfolgt an Kontroll- oder Bilanzebenen senkrecht zur Schadstoffausbreitung (Transsekten). Hinsichtlich der Repräsentanz der Ergebnisse sollte die Erfassung an jeder Kontrollebene mittels mehrerer Messstellen erfolgen. Ausnahmen stellen stationäre Pumpversuche oder Sanierungsbrunnen mit aktiver Förderung dar, bei denen durch die räumliche Erfassung der Grundwasserbelastung auch eine Messstelle ausreichend sein kann. Voraussetzung ist die möglichst vollständige sowohl horizontale als auch vertikale Erfassung der Schadstofffahne.

Bei der Ermittlung der Fracht ist zu prüfen, ob die Konzentrationsreduzierung zwischen den Kontrollebenen durch Verdünnung, Abbau- oder Rückhaltevermögen erzielt wird.

Mögliche Verfahren zur Überprüfung sind:

- Konservative Tracer-Methoden,
- Isotopenuntersuchungen und
- Säulenversuche.

Sollte eine nur sehr geringe Konzentrationsreduzierung vorliegen, können im Ergebnis der Frachtdifferenzen zwischen den Kontrollebenen bedingt halbquantitative oder quantitative Aussagen zum Abbau- und Rückhaltevermögen getroffen werden.

Alle Verfahren sind in Abhängigkeit von der Homogenität des Aquifers zu betrachten und weisen entsprechende Unsicherheiten auf. Diese sind in der Aus- und Bewertung klar darzustellen. Frachtberechnungen sind nur bei Porengrundwasserleitern sinnvoll.

Verfahren zur Bestimmung der Schadstofffracht sind [35]:

- Stromröhrenmodell,
- Immissionspumpversuche,
- Transsekten-Verfahren sowie
- Schadstofftransportmodelle.

Bei der Probenahme sind vertikale Unterschiede im Zustrom der Messstelle aufgrund von Inhomogenitäten zu beachten (zuflussgewichtete Probenahme).

### Stromröhrenmodell

Stromröhren besitzen aufgrund der Betrachtung der Filterstrecke einer Messstelle einen rechteckigen Querschnitt und verlaufen parallel zur Grundwasserfließrichtung. Sie können sowohl nebeneinander als auch untereinander liegen. Die Grundwassermessstellen sollten zur Ermittlung der aus dem Schadensherd ausgetragenen Schadstoffmenge und Konzentration nahe dem Zentrum errichtet werden. Die Schadstoffretardierung und der natürliche abiotische und biotische Abbau werden beim Stromröhrenmodell nicht berücksichtigt.

Die Frachtermittlung erfolgt separat für jede Stromröhre, welche dann addiert werden. Zur Überprüfung von Zustromfrachten ist mindestens eine Messstelle im Anstrom zu errichten. Diese Fracht ist von der abströmenden Fracht abzuziehen.

Gemäß [35] wird die Schadstofffracht nach folgender Gleichung berechnet:

$$E_{ab} = Q_{ab} * c_{ab} = k_f * I * B * H * c_{ab} \quad (2)$$

- $E_{ab}$  Schadstofffracht (Emission) im GW-Abstrom einer Schadstoffquelle [g/s]
- $Q_{ab}$  Grundwasser-Volumenstrom einer Stromröhre [m<sup>3</sup>/s]
- $c_{ab}$  Stoffkonzentration im Abstrom, die eine Stromröhre repräsentiert [g/m<sup>3</sup>]
- $k_f$  Durchlässigkeitsbeiwert [m/s]
- $I$  Grundwassergefälle [-]
- $B$  Breite der kontaminierten Fläche quer zur GW-Fließrichtung [m]
- $H$  GW-Mächtigkeit [m] bzw. Länge der Filterstrecke der GW-Messstelle

### Immissionspumpversuche

Immissionspumpversuche werden im Vergleich zum Stromröhrenmodell weiter entfernt vom Schadensherd durchgeführt. An einer oder mehreren Aufschlüssen erfolgt über einen längeren Zeitraum eine Grundwasserentnahme. Damit ist durch einen entsprechenden Pumpversuch eine grobe Frachtermittlung für die Kontaminationsfahne möglich.

Bei einem Immissionspumpversuch wird die Fracht durch das Abpumpen der Schadstoffe über die gesamte Breite ermittelt. Unterschieden wird dabei zwischen:

- quasi-stationären (ein Brunnen / Messstelle) und
- instationären Pumpversuchen (mehrere Brunnen / Messstellen).

Bei einem *stationären* Pumpversuch wird von homogenen Grundwasserleitern ausgegangen. Um eine ausreichende Aussage zur Schadstofffracht treffen zu können, muss die sich einstellende Trennstromlinie gleich groß oder größer als die Breite der Schadstoffquelle sein.

Gemäß [35] wird die Schadstofffracht nach folgender Gleichung berechnet:

$$E = C_P * Q_P \quad (3)$$

$E$  Fracht in der Schadstofffahne = Fracht während des IPV [g/d]  
 $C_P$  Konzentration im Förderwasser unter quasi-stationären Bedingungen [g/m<sup>3</sup>]  
 $Q_P$  Förderrate der Pumpe während des IPV [m<sup>3</sup>/d]

Anzumerken ist, dass solche stationären Pumpversuche vorrangig bei schmalen Schadstofffahnen anzuwenden sind. Bei breiten Fahnen sind hinsichtlich der gesamten Erfassung lange Pumpzeiten erforderlich, welche erhebliche Kosten verursachen.

*Instationäre* Pumpversuche sollten auf einer Kontrollebene und nacheinander erfolgen, da im Fall von deutlichen hydraulischen Überlagerungen keine eindeutige Ermittlung der Schadstofffracht erfolgen kann.

Hinsichtlich der Auswertung von Immissionspumpversuchen stehen unterschiedliche Verfahren zur Verfügung. Im Wesentlichen wird dabei zwischen analytischen (mit und ohne Grundströmung) und modellgestützten, numerischen Verfahren unterschieden.

Die Auswahl und Anwendung hängt wesentlich von der Homogenität des Aquifers (Durchlässigkeit, Mächtigkeit, effektive Porosität) und den hydraulischen Verhältnissen (Grundwassernutzungen, Vorfluter, Abstandsgeschwindigkeit) ab.

Bei größeren Inhomogenitäten sind die Immissionspumpversuche mittels Grundwassermodellen auszuwerten, da analytische Verfahren dafür nicht oder nur bedingt geeignet sind.

In [31] erfolgt im Rahmen einer Integralen Altlastenbetrachtung ein Vergleich verschiedener Verfahren für unterschiedliche Anwendungsfälle bei homogenen Grundwasserleitern und Empfehlungen für die Anwendung. Betrachtet wurden:

- analytische Verfahren für homogene Aquiferverhältnisse ohne Grundströmung,
- analytische Verfahren für homogene Aquiferverhältnisse mit Grundströmung,
- Partikelverfahren für homogene Aquiferverhältnisse ohne Grundströmung und hydraulischen Beeinflussungen durch Versuche mit Nachbarmessstellen,
- modellgestützte Verfahren für homogene Aquiferverhältnisse mit Grundströmung.

Vereinfachte Auswerteverfahren für Immissionspumpversuche sind bereits im Internet veröffentlicht und zugänglich, z. B. das vom Landesumweltamt Baden-Württemberg veröffentlichte IPV-Tool inkl. Handbuch (<https://www.lubw.baden-wuerttemberg.de/altlasten/anwendungsprogramme>).

Anhand der Abnahme der Schadstofffracht zwischen zwei Kontrollebenen können Abbau- und Rückhalteprozesse in einer Schadstofffahne quantifiziert werden.

Verdünnungsprozesse besitzen durch den integralen Ansatz keine Bedeutung. Aussagen zur Fahnenentwicklung sind mit dem IPV nicht möglich.

### Transsekten-Verfahren

Für das Transsekten-Verfahren werden entlang einer Kontrollebene senkrecht zur Grundwasserströmungsrichtung (Ausbreitung der Schadstoffe) errichtete Grundwassermessstellen benötigt und beprobt.

Es werden näherungsweise gleiche Aussagen wie beim IPV erhalten. Zur vertikalen Erfassung der Grundwasserkontamination sollten bei dieser Methode längere Filterstrecken installiert werden. Gemäß [35] wird die Schadstofffracht nach folgenden Gleichungen berechnet:

$$E_P = c * Q_P \quad (4)$$

$$E_{nat} = k_f * I * c * B \quad (5)$$

$E_P$  Fracht, die der Messstelle während der Probenahme zuströmt [g/s]

$E_{nat}$  Fracht, die an der Messstelle (Zylindermantel) unter ungestörten Bedingungen vorbeifließt [g/s]

$Q_P$  Förderrate der Pumpe während der Probenahme [m<sup>3</sup>/s]

$c$  Schadstoffkonzentration im gepumpten Grundwasser während der Probenahme [g/m<sup>3</sup>]

$k_f$  Durchlässigkeitsbeiwert [m/s]

$I$  Grundwassergefälle [-]

$B$  senkrechte, durchflossene Fläche im Bereich einer Messstelle [m<sup>2</sup>] (Länge der Filterstrecke multipliziert mit 1 m)

Durch Multiplikation der zuflussgewichteten mittleren Konzentration  $c$  mit der Förderrate  $Q_P$  errechnet sich die Schadstofffracht  $E_P$ , die der Messstelle während der Probenahme zuströmt. Bei mehreren Messstellen ist die Gesamtfracht durch Interpolation zwischen den einzelnen Messpunkten abzuschätzen.

Die Schadstofffracht  $E_{nat}$ , die unter ungestörten Bedingungen (also nicht während der Grundwasserentnahme) die Umgebung der Messstelle passiert, ist abhängig von der ungestörten Grundwasserfiltergeschwindigkeit, also dem Produkt aus dem Durchlässigkeitsbeiwert  $k_f$  und dem Grundwassergefälle  $I$ .

### Schadstofftransportmodelle

Schadstofftransportmodelle können sowohl aktuelle Frachten, als auch Prognosen der Schadstoffentwicklung liefern. Unterschieden wird dabei zwischen stationären und instationären Modellen. Bei stationären Modellen wird nur ein Gleichgewichtszustand und bei instationären die Entwicklung des Zustands über einen festzulegenden Zeitraum betrachtet. Bei kleineren Grundwasserkontaminationen und homogenen Aquiferhältnissen können analytische Modelle, wie z. B. Bioscreen, Biochlor oder Bioplume angewendet werden.

Bei komplizierteren Standortverhältnissen sind numerische Modelle erforderlich (z. B. Modellprogramme Feflow oder Modflow). Detaillierte Handlungsempfehlungen zur Anwendung mathematischer Modelle wurden im Rahmen des Förderschwerpunktes KORA erstellt [47].

Unterschieden werden kann dabei zwischen 1-, 2- und 3-dimensionalen Modellen.

Für die unterschiedlichen Modelle sind auch unterschiedliche Datenmengen erforderlich. Bei Schadstofftransportmodellen sind neben den für das numerische Modell erforderlichen hydraulischen Daten zusätzliche standort- und stoffspezifischen Kennwerte, wie:

- durchflusswirksame Porosität,
- Dispersivitäten,
- Emission von Schadstoffen, erforderlich.
- Zerfalls- oder Abbaukonstanten sowie
- Adsorptionsparameter (Retardation)

## Frachtabschätzung in Fließgewässern

Hinsichtlich der Ermittlung von Schadstofffrachten in Fließgewässern existieren verschiedene Berechnungsverfahren [51]. Grundlage der Frachtermittlung sind die Messungen der Abflüsse und Stoffkonzentrationen, die als repräsentativ für den gesamten Fließquerschnitt anzusehen sind. Die Frachtabschätzung hängt wesentlich von der Probenahmestrategie und dabei insbesondere von der Probenahmeart, der Frequenz und dem Termin ab. Erforderlich für die Berechnung der Jahresfracht sind Ganglinien von Konzentration und Abfluss. Die jeweiligen Abflüsse werden aus der bereits im Vorfeld ermittelten Fließgewässerspezifischen Wasserstands-Abfluss-Beziehung abgelesen.

Unterschieden wird dabei zwischen:

- Einzelproben und
- Mischproben.

Die Messintervalle variieren in der Praxis zwischen 1 – 4 Wochen. Aufgrund der durch den Probenahmezyklus erhaltenen unvollständigen Ganglinie wird bei Fließgewässern von einer Frachtschätzung ausgegangen.

Bei den Frachtberechnungsverfahren für *Einzelproben* unterscheidet man zwischen Standardverfahren zur Ermittlung der Jahresfracht (Standardmethode, abflusskorrigierte Standardmethode) und der Methode der Jahresmittelwerte. Weitere Verfahren zur Ermittlung der täglichen Konzentrationswerte sind z. B. die Interpolationsmethode, Q-C-Regressionmethode und Q-T-Regressionmethode. In genannten Methoden werden der Abflussgradient, die Temperatur- und Zeitabhängigkeit sowie saisonale Effekte nicht berücksichtigt.

Bei den Frachtberechnungsverfahren für *Mischproben* unterscheidet man verschiedene Standardverfahren unter Berücksichtigung mittlerer Abflüsse. Weitere Verfahren zur Ermittlung der Jahresfrachtabschätzung sind die Q-C-Regressionmethode sowie die Q-T-Regressionmethode.

## V Spezielle Hinweise zur Optimierung und Beendigung von Überwachungsmaßnahmen

In allen nachfolgend aufgeführten Fällen ist eine Prognose erforderlich, wie sich künftig die Schadstoffkonzentrationen über die Zeit und im Raum verändern werden.

Kann im Fall der vollständigen Dekontamination ein stetiger Trend zur Konzentrationsabnahme statistisch nachgewiesen werden (leicht verfügbare Schadstoffe sind bereits ausgewaschen, geringe Rückdiffusion) kann die Überwachung beendet werden, auch wenn die Ziele (Sanierungsziel bzw. MNA-Ziel) voraussichtlich erst nach Jahrzehnten erreicht werden.

Bei der Teil- bzw. vollständigen Dekontamination ist die Überwachung zunächst solange fortzuführen, bis sich wieder ein quasi-stationärer Zustand ausgebildet hat. Für diesen quasi-stationären Zustand ist mit statistischen Verfahren nachzuweisen, dass kein ansteigender Trend vorliegt. Anschließend kann die Überwachung beendet werden.

In allen Fällen, in denen eine Kontamination mit Konzentrationen oberhalb der Prüfwerte vorliegt, die Tolerierbarkeit nachgewiesen ist und keine dauerhafte Überwachung mehr stattfindet, ist eine „organisatorische“ Überwachung erforderlich. Dies kann beispielsweise eine automatisierte Signalgebung durch ein (GIS-gestütztes) System sein, wenn geplante Maßnahmen im Umfeld den kontaminierten Standort berühren.

Die Überprüfung, ob die Überwachung entsprechend den eingangs getroffenen Festlegungen fortgeführt wird oder ob Anpassungen hinsichtlich Art und Umfang des Überwachungsprogramms erforderlich sind, ist nach jedem Überwachungszyklus<sup>16</sup> durchzuführen.

### Überwachung bei unklarer Gefahrenlage oder nicht zeitnaher Weiterbearbeitung

Eine Überwachung bei unklarer Gefahrenlage bzw. bei nicht zeitnaher Weiterbearbeitung findet in der Regel zeitlich begrenzt und in einem vergleichsweise geringen Umfang statt. Optimierungsmaßnahmen sind daher ebenfalls in nur geringem Umfang möglich.

Treten bei der Überwachung mit unklarer Gefahrenlage bzw. nicht zeitnaher Weiterbearbeitung erhöhte Gefahrenlagen (Überschreitung eines entsprechend festgelegten Kontrollwertes) auf, ist der Standort unmittelbar weiter zu bearbeiten und ggf. auch weiter kontinuierlich zu überwachen.

In den Fällen, in denen eine Weiterbearbeitung des Standortes erforderlich, aber nicht vordringlich ist, muss die Flächendynamik der Belastung (statistisch) geprüft werden. Erweist sich die Belastung als ortsstabil oder schrumpfend, kann die Überwachung zunächst beendet werden. Eine spätere Überwachung wird dann erst wieder während und nach der gegebenenfalls erforderlichen Sanierung notwendig.

Eine Überwachung kann ggf. eingestellt werden, wenn keine erhöhte Gefahrenlage vorliegt (Überschreitung eines entsprechend festgelegten Kontrollwertes), die Kontamination nachweislich ortsstabil ist oder

---

<sup>16</sup> In der Praxis wird jedoch meist ein vollständiger Beprobungszyklus mit mehreren Probenahmen in definierten zeitlichen Abständen ausgeschrieben und beauftragt. Eine Überprüfung des Überwachungsprogramms ist dann zumindest am Ende jedes Beprobungszyklus vorzunehmen. Es empfiehlt sich jedoch in der Ausschreibung eine zusätzliche Überprüfung des Überwachungsprogramms und gegebenenfalls Anpassung nach jedem Probenahmetermin zu fordern.

schrumpft und im Ergebnis der fachlichen Tolerierbarkeitsbetrachtung sowie des Verhältnismäßigkeitsgrundsatzes keine Sanierung notwendig ist.

### Überwachung nach der Sanierung (Nachsorge)

Kann für einen hinreichend langen Zeitraum nachgewiesen werden, dass die Restbelastung nachhaltig quasi-stationär (oder gar schrumpfend) und tolerierbar ist, kann die Überwachung beendet werden.

### Langzeitüberwachung

In allen Fällen der Langzeitüberwachung entstehen im Idealfall stetige (unveränderliche oder abnehmende) Konzentrationsverläufe. Kann dies für einen hinreichend langen Zeitraum mit Hilfe statistischer Verfahren (Kapitel VIII.2) nachgewiesen werden, so kann (mit Ausnahme der Überwachung von Sicherungsmaßnahmen) eine Beendigung der Überwachung in Betracht gezogen werden. Dafür sind belastbare Daten (ausreichende Dichte und Qualität) notwendig. Als Richtwert dafür können mindestens 8 Datensätze (Kapitel VIII.2) und ein Zeitraum von ca. 10 Jahren dienen. Bei Karst- oder Kluftgrundwasserleitern ist i. d. R. ein längerer Zeitraum anzusetzen, da die Überwachung in solchen Grundwasserleitern meist schwieriger ist. Es ist regelmäßig, d. h. nach jedem Überwachungszyklus zu prüfen, ob die statistische Basis ausreichend repräsentativ ist, um anhand derer eine Entscheidung über die Beendigung der Überwachung zu treffen. Diese Entscheidung obliegt der Behörde (vgl. Kapitel 9).

Dieses Vorgehen impliziert, dass sich die räumliche Ausdehnung der Kontamination nicht vergrößert und somit eine größere als die aktuell tolerierbare Gefahrenlage ausgeschlossen werden kann. Insofern sind die genannten Abbruchkriterien (die Restbelastung ist statistisch nachweislich ortsstabil oder schrumpfend) unabhängig von der Schadstoffkonzentration und der Fracht. Dass Konzentration und Fracht tolerierbar sind und keine Gefahrenlage außer für das Grundwasser selbst besteht, war bereits Eingangsvoraussetzung für den Übergang in die Überwachung. Dem Grundsatz, dass eine Beendigung der Überwachung erst dann möglich ist, wenn die verbleibenden Restschadstoffe kein Gefahrenpotenzial für Mensch und Umwelt mehr darstellen, ist damit entsprochen.

Für den Fall, dass der Konzentrationsverlauf nicht stetig (unveränderlich oder abnehmend) ist, muss die Überwachung fortgeführt werden. Ursachen für diesen Konzentrationsverlauf können anthropogene Maßnahmen oder auch bisher nicht in ausreichendem Maße berücksichtigte, im Wesentlichen mit schwankender Grundwasserneubildung verbundene, natürliche, vor allem saisonal wiederkehrende Vorgänge (veränderliche Nachlösung, veränderlicher Abbau) sein. Erst wenn diese hinreichend erkannt und im Rahmen der Überwachung erfasst sind, gelingt es, deren Einfluss auf den stetigen Verlauf der Schadstoffkonzentrationen zu quantifizieren. Unter Umständen wird es erforderlich, zusätzliche Messungen und Untersuchungen zur Ursachenfindung durchzuführen und/oder das Überwachungsprogramm zu modifizieren. Die Überwachung kann dann beendet werden, wenn die zusätzlichen Einflüsse in ihrer Häufigkeit und ihrem Ausmaß hinreichend statistisch erfasst sind. Ist bekannt, dass solche Einflüsse an einem definierten Standort eine Rolle spielen, sollte das Überwachungsprogramm (vor allem der Probenahmeturnus) bereits von Beginn an darauf abgestimmt sein.

Im ungünstigsten Fall ergibt die Überwachung nicht-prognostizierbare Konzentrationsverläufe und damit auch nicht prognostizierbare Gefahrenlagenzustände. In diesem Fall wie auch im Fall sich ausdehnender Schadstoffbelastungen sind auch Alternativ(sanierungs)maßnahmen in Betracht zu ziehen [50]. Um sicherzustellen, dass dauerhaft keine Umstände eintreten, die einen stetigen Konzentrationsverlauf (ohne Trend

oder abnehmend) negativ beeinflussen können, ist es erforderlich, für das betroffene Grundstück entsprechende Baulasten einzutragen (vgl. Kapitel 9). Zu diesen Verpflichtungen kann die Unterlassung u. a. nachfolgender Handlungen gehören:

- Gebäuderückbau oder einer Entsiegelung,
- Entfernung einer gegen Direktkontakt schützenden Vegetationsdecke,
- Veränderung der Grundwasserfließrichtung infolge neuer oder anderer Wasserentnahmen,
- Temporäre Baumaßnahmen wie Tunnelbau, Grundwasserhaltung usw.

Daraus wird deutlich, dass einige Maßnahmen auch außerhalb des belasteten Grundstücks zu einer Änderung des Gefahrenpotenzials bzw. des Gefahrenausmaßes führen können. Solche Eingriffe erfordern in der Regel eine wasserrechtliche Erlaubnis mit einer vorhergehenden Abschätzung deren räumlicher Auswirkung. Es muss mit den der Behörde zur Verfügung stehenden Instrumenten (vgl. Kapitel 9) im Rahmen einer „Umfeldüberwachung“ festgestellt werden, inwieweit der zu überwachende Standort betroffen ist. Es obliegt dann der Behörde, weitere Maßnahmen (beispielsweise verdichtete Überwachung) festzulegen. Dies bedeutet aber auch, dass die Kontamination nach der Beendigung der Überwachungsmaßnahmen nicht vollständig aus der Überwachung entlassen wird. Stattdessen wird die auf Probenahme und Analytik basierende Überwachung durch eine „organisatorische“ Überwachung, d. h. beispielsweise automatisierte Alarmgebung durch ein GIS-gestütztes System, wenn geplante Maßnahmen im Umfeld den kontaminierten Standort berühren, ersetzt.

Bei der Entscheidung über die Einstellung der Überwachung steht in vorderster Linie der Aspekt, dass zukünftig gegenüber dem aktuellen Zustand keine erhöhte Gefahrenlage eintreten wird. Dies gelingt mit der statistischen Trendanalyse zusammen mit den eingetragenen Baulasten und der Umfeldüberwachung. In zweiter Linie sind bei der Entscheidung über die Einstellung der Überwachung der Grundsatz der Verhältnismäßigkeit (im Rahmen der Ermessensausübung) und das Wohl der Allgemeinheit zu beachten.

Der Grundsatz der Verhältnismäßigkeit ist aus dem im Grundgesetz verankertem Rechtsstaatsprinzip hergeleitet worden und hat daher Verfassungsrang. Ein Handeln ist danach nur dann verhältnismäßig, wenn es geeignet, erforderlich und angemessen ist:

- Geeignetheit ist gegeben, wenn durch die Maßnahme/Technik der gewünschte Erfolg bzw. das Ziel erreicht werden kann.
- Erforderlichkeit ist gegeben, wenn es keine andere, mildere, aber ebenso taugliche Maßnahme gibt, um das Ziel zu erreichen.
- Angemessenheit ist gegeben, wenn die ausgewählte Maßnahme in einem zumutbaren Verhältnis von Aufwand und angestrebtem Erfolg steht.

In Hinblick auf eine Beendigung der Überwachung ist für alle Fälle (bei MNA ist diese ohnehin eine Einstiegsvoraussetzung) die Überprüfung der am Standort ablaufenden Abbauprozesse (beispielsweise mittels Analyse der Redoxindikatoren und/oder Isotopenanalysen) für die Argumentation erforderlich. Liegen komplexe Kontaminationen vor oder solche mit selten auftretenden Schadstoffen, können ökotoxische Tests zur letzten Absicherung verwendet werden (siehe Kapitel III.4). Im Rahmen der Langzeitüberwachung ist stets zu prüfen, ob Optimierungen möglich sind.

## Überwachung von Sicherungsmaßnahmen

Sicherungssysteme weisen eine vergleichsweise lange, aber doch endliche Lebensdauer auf. Es besteht eine hohe Wahrscheinlichkeit, dass die Sicherung ihre Funktion verliert und diese wiederhergestellt werden muss. Um dies frühzeitig zu erkennen und Gegenmaßnahmen ergreifen zu können, ist eine Überwachung für einen von der zuständigen Behörde bestimmten Zeitraum erforderlich (vgl. § 17 (3) BBodSchV).

Bei gesicherten Kontaminationen mit intakten Sicherungselementen (Dichtwand, Oberflächenabdichtung o. ä.) ist davon auszugehen, dass außerhalb der Sicherungselemente abnehmende Schadstoffkonzentrationen im Grundwasser auftreten. Da Sicherungselemente im Regelfall nur eine begrenzte Zeitspanne funktionstüchtig bleiben, sind über vergleichsweise lange Zeiträume gleichbleibend niedrige Schadstoffkonzentrationen kein ausreichendes Kriterium für die Beendigung einer Überwachung. Sicherungsmaßnahmen können nur dann aus der Überwachung entlassen werden, wenn auch bei Versagen der Sicherungselemente keine Gefahr mehr von der Schadstoffquelle ausgeht, z. B. Schadstoffpotenzial innerhalb der Sicherungssysteme hat sich so vermindert, dass die verbleibende Belastung tolerierbar ist). Dies ist auch von der Lage der Kontamination (ungesättigte oder gesättigte Bodenzone) und der Art der Sicherungsmaßnahme, z. B. Oberflächenabdichtung, Oberflächenabdeckung oder Dichtwand, abhängig.

## Monitored Natural Attenuation (MNA)

Eingangsvoraussetzung für die Bestätigung eines MNA-Konzeptes ist der Ausschluss einer weiteren Ausdehnung der Kontamination, der Ausschluss einer Gefahrenlage für sensible Schutzobjekte und die Tolerierbarkeit der Restbelastung hinsichtlich Konzentration und Frachten.

Die Dauer der Überwachung der natürlichen Schadstoffminderungsprozesse (MNA) und der damit verbundenen Beendigung regelt zunächst das LABO-Positionspapier „Berücksichtigung der natürlichen Schadstoffminderung bei der Altlastenbearbeitung“ [50]. Die Überwachung ist mindestens so lange durchzuführen, bis das vereinbarte Ziel erreicht und sichergestellt ist, dass die Schadstoffkonzentrationen dauerhaft unterhalb der Zielwerte bleiben. Dies impliziert eine Schadstoffabnahme, die in der Regel nur dann gegeben ist, wenn die Quelle teilweise (Fall B s. Kapitel III.5) oder vollständig entfernt werden konnte (Fall A, s. Kapitel III.5). Aber auch im Fall der vollständigen Entfernung der Quelle kann eine Schadstofffahne noch über mehrere Jahrzehnte existent sein.

Andererseits gibt es eine Reihe von Schadensfällen, in denen die Quelle aus Gründen der Verhältnismäßigkeit nicht entfernt werden kann (beispielsweise stark überbaute Standorte oder unverhältnismäßige Sanierung) und der natürliche Schadstoffabbau zu einem tolerierbaren Zustand führt. Im Rahmen der Überwachung muss nachgewiesen werden, dass das Schadstoffverhalten die Prognose bestätigt (d.h. dass alle wesentlichen Prozesse erfasst sind) und ein festgelegtes Ziel (z. B. im Zustrom einer Trinkwasserfassung) erreicht wird. Dabei sind folgende drei Fälle zu unterscheiden:

- Vollständige Dekontamination der Quelle bzw. des Bodens (Fall A). An jeder Grundwassermessstelle innerhalb der Schadstofffahne werden die Schadstoffkonzentrationen entsprechend den in Kapitel II geschilderten Prozessen abnehmen. Die künftigen Konzentrationen an definierten Orten zu definierten Zeiten werden prognostiziert.
- Teildekontamination (Fall C). Hier hängt die Änderung der Schadstoffkonzentrationen in der Schadstofffahne von der Art der Teildekontamination der Quelle ab (s. o.). Wenn nach Beendigung einer aktiven Sanierung ein Restinventar verbleibt, wird sich wieder ein quasi-stabiler Zustand der Schadstoffverteilung einstellen und eine stationäre Schadstofffahne über einen langen Zeitraum verbleiben.

- Keine Dekontamination (Fall B). Hierbei bleibt die Schadstofffahne in ihrer Ausdehnung unverändert und stationär. Die Schadstoffkonzentrationen werden sich im Rahmen der prozessbedingten Schwankungen über einen langen Zeitraum (oft > 10 Jahre) nicht ändern.

## VI Datenerhebung und Datenerfassung

Die im Rahmen der Überwachung erfassten Daten stellen den Ausgangspunkt eines verwalteten Datenbestandes dar. Sie unterscheiden sich durch die Art der Aufgabenstellung. Am Anfang steht in der Regel die Datenerhebung oder Generierung von Daten (beispielsweise Ergebnisse der chemischen Analytik). Im Rahmen der Datenerhebung erfolgt beispielsweise eine:

- Aufnahme der räumlichen Eigenschaften eines Objektes durch eine Vermessung oder eine
- Aufnahme anderer gegebenenfalls ebenfalls messbaren Eigenschaften wie Temperatur, Farbe, Konzentration etc.

Nach der Datenerhebung folgt die digitale Datenerfassung/Digitalisierung der meist analog vorliegenden Daten, bei der die Informationen vom Papier in ein digitales Speichermedium, wie z. B. eine Datenbank, manuell übertragen werden. Dadurch werden diese Informationen für aktuelle Methoden der Datenspeicherung und Datenauswertung nutzbar gemacht. Im Folgenden werden beide Methoden (Datenerhebung und Datenerfassung) unter dem Begriff Datenerfassung zusammengefasst.

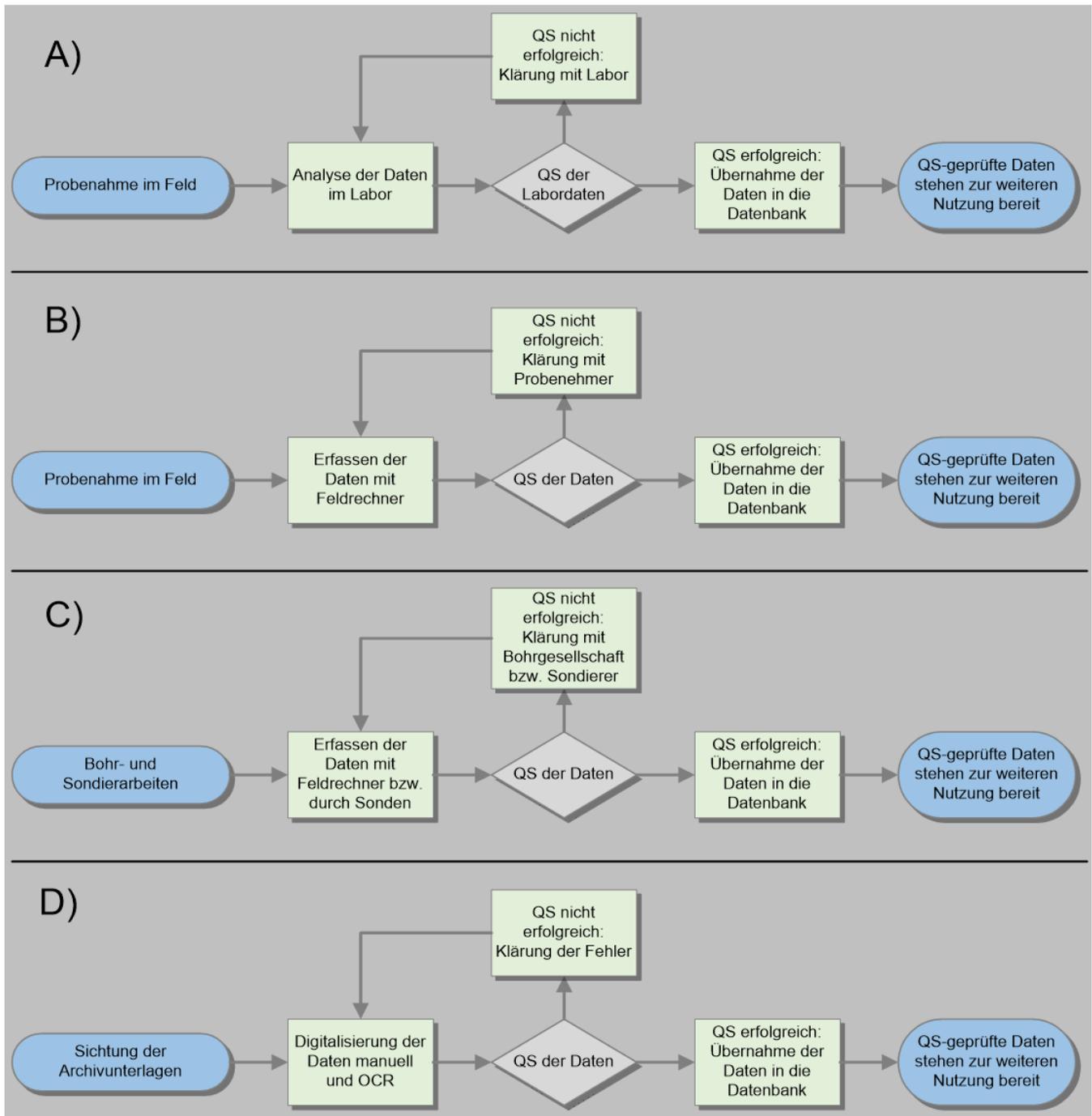
### VI.1 Datenerfassung als Grundlage der Informationsbereitstellung

Die analoge Datenerfassung stellt nicht mehr den Stand der Technik dar. Es ist auf einen durchgehenden digitalen Datenfluss zu achten. Vorteile daraus sind:

- Zeitersparnis, da die Daten direkt digital erfasst werden,
- Kostenersparnis, da weniger Zeit pro Datensatz aufgewendet werden muss und
- die Daten sind weniger fehleranfällig, da eine zweite manuelle Bearbeitung entfällt.

Die Qualitätssicherung der Daten ist unerlässlich und stellt einen wesentlichen Bestandteil der Datenerfassung dar. Die Datenerfassung im Rahmen einer Altlastenbearbeitung erfolgt im Wesentlichen über die folgenden vier wichtigen Datenflüsse (Abbildung 17):

- Probenahme → Labor → zentrale Datenverwaltung (Abbildung A)
- Probenahme (vor Ort Parameter) → zentrale Datenverwaltung (Abbildung B)
- Bohrungen und Sondierungen → zentrale Datenverwaltung (Abbildung C)
- Andere nicht genannte Quellen (z. B. Archive) → zentrale Datenverwaltung (Abbildung D)



**Abbildung 17: Flussschema der Datenerfassung**

Im Einzelfall ist zu prüfen, welche der genannten Datenflüsse relevant für die Überwachung im Rahmen dieses Handbuchs sind. Außerdem ist es sinnvoll, bereits zu Beginn der Maßnahme den Umfang und die Datenstruktur der zu erstellenden Datenbank zu definieren. In diesem Konzept zur Datenerfassung und Datenverwaltung ist zu beachten:

- Zu betrachtendes Parameter- und Attributspektrum  
Welche Parameter sind zu analysieren? Sind die Einzelparameter bei der Bildung von Parametersummen bekannt bzw. festgelegt? Muss die Berechnung abgestimmt werden, wenn neue Verfahren angewendet werden, die am Markt noch nicht etabliert sind? Welche Informationen und Parameter sind außer der Analytik noch relevant, um eine sinnvolle Dokumentation der Überwachung zu ermöglichen? Das trifft vor allem auf die Stammdaten von Messstellen, Sondierungen und Bohrungen zu. Wenn im Rahmen der Überwachung eine Zustandsbewertung der Messstellen durchgeführt wird, sind die entsprechenden Ergebnisse und Ausbaudaten in der Datenbank vorzuhalten, um Änderungen dokumentieren zu können. Diese Form der Dokumentation ermöglicht auch eine leichte und schnelle Aktualisierung von Messstellenpässen.
- Dokumentationstiefe (Level of Development)  
Wie detailliert muss die Dokumentation erfolgen? Ist es z. B. wirklich notwendig, die Gemarkung und Nummer eines Flurstücks zu erfassen, auf der sich eine Messstelle befindet? Diese Informationen sind selten von Bedeutung und sind veränderlich; müssen also aktuell gehalten werden, um wirklich hilfreich zu sein. Wie detailliert muss die Schichtenbeschreibung einer Bohrung sein?
- Dynamische Erweiterbarkeit des Modells  
Sollten während der Konzeption für die Datenverwaltung nicht alle Informationen bekannt sein oder ergibt sich während der Überwachung ein Bedarf für die Erweiterung des Parameterumfangs, muss das Datenmodell einfach erweiterbar sein.

## VI.2 Austauschdatenformate

Für den Austausch von Daten jeglicher Art, insbesondere aber für Daten, die in die zentrale Datenbank übernommen werden sollen, müssen Austauschformate festgelegt werden. Die Festlegung erfolgt dabei unter Berücksichtigung technischer Kriterien. Die fachliche Bedeutung der zu transportierenden Informationen spielt dabei eine geringere Rolle. In Datenbanken gespeicherte Daten sind grundsätzlich typsicher.

- **Allgemeinheit:** Der Austausch von Daten sollte soweit wie möglich auf allgemein anerkannten Daten- und Dateiformaten basieren. Nur im Ausnahmefall, wenn durch die Nutzung solcher Formate Datenverluste zu erwarten sind, finden dedizierte und/oder proprietäre Formate Anwendung.
- **Maschinenlesbarkeit:** Im Vordergrund eines digitalen Datentransfers steht die Maschinenlesbarkeit, d. h. Format und Daten müssen für Hard- und Software lesbar sein.
- **Typsicherheit:** Die vorgesehenen Datenformate sollen typsicher sein. Typsicherheit ist gegeben, wenn einem Attribut oder einer Eigenschaft ausschließlich Informationen bzw. Werte eines bestimmten Datentyps zugewiesen werden können. Wichtige Datentypen sind numerische Typen wie Fließ- und Festkommazahlen und nichtnumerische Typen wie Text und Datumsangaben.

## VI.3 Soft- und Hardwarenutzung bei der Datenerfassung

Für die digitale Erfassung von Daten stehen verschiedene technische Verfahren zur Verfügung. Zur Gewährleistung eines reibungslosen, digitalen Datenflusses von der Erhebung der Daten im Feld bis zur zentralen Datenbank ist es sinnvoll, feldtaugliche Hardware (Feldrechner) und speziell dafür entwickelte mobile Anwendungen einzusetzen. Die dabei erzeugten Daten können lokal auf dem Feldrechner in einem temporären Datencontainer gespeichert und nach der Rückkehr aus dem Feld in die zentrale Datenbank eingelesen werden. Die dabei zur Anwendung kommende Software kann entweder speziell für den Einsatz auf mobilen Geräten entwickelt worden sein oder die Daten werden über eine bestehende Internetverbindung mit dem Feldrechner direkt in der zentralen Datenbank erfasst.

Alternativ kann bei entsprechenden Betriebssystemvoraussetzungen auf der Hardware auch eine normale Desktop-Software zum Einsatz kommen.

Eine dritte Möglichkeit sind die Terminal- oder Remote-Anwendungen. Dabei wird eine Software genutzt, die nicht direkt auf dem jeweiligen Gerät installiert ist, sondern auf einem entsprechenden Applikationsserver. Die Nutzung solcher Anwendungen setzt im Feld eine mobile Internetverbindung voraus. Der Vorteil liegt im geringen Wartungsaufwand, da die Anwendung nur einmal auf dem Applikationsserver gewartet wird und in der Nutzung selbst. Der Anwender muss sich nicht mit einer weiteren (Feld) Software vertraut machen, sondern nutzt die ihm vertraute Desktopanwendung.

## **VI.4 Datenverwaltung**

Der Begriff Datenverwaltung wird oft als Oberbegriff für alle Aufgaben im Zusammenhang mit (digitalen) Daten genutzt. Der Aufgabenbereich der Datenverwaltung lässt sich aber relativ klar abgrenzen. Das Datenflussschema in Abbildung 18 verdeutlicht das. So fallen in den Bereich Datenverwaltung alle Aufgaben, die nicht der Datenerfassung oder Datennutzung zugeordnet werden können. Im Wesentlichen sind das Datenmigration, laufende Datenpflege und Archivierung.

Der Datenfluss und damit die Datenverwaltung in einem Projekt müssen klar definiert sein, um Redundanzen und Fehler zu vermeiden. Erfasste, qualitätsgesicherte Daten werden zu einer einheitlichen Datenbasis, vorzugsweise einer relationalen Datenbank, zusammengeführt. Unter ausschließlicher Verwendung dieser Daten und den, durch ein Datenbank-Management-System bereitgestellten Werkzeugen werden dann aufbereitete Auszüge (Exporte) zur weiteren Nutzung der Daten erzeugt. Die exportierten Daten können dann mit unterschiedlichen Werkzeugen grafisch und nichtgrafisch aufbereitet werden. Oder sie dienen als Grundlage weiterer Bearbeitungsschritte wie Modellierungen. Die Datenbank und das darunterliegende Datenbankmanagementsystem übernehmen dabei folgende wichtigen Aufgaben:

- Sicherung der Daten,
- Schutz der Daten,
- Steuerung des Zugriffes im Mehrbenutzerbetrieb,
- Bereitstellung der Daten in der nötigen Form (Schnittstellen),
- Bereitstellung der nötigen Metadaten (die Primärdaten beschreibende Daten),
- Sicherstellung der Datenintegrität.

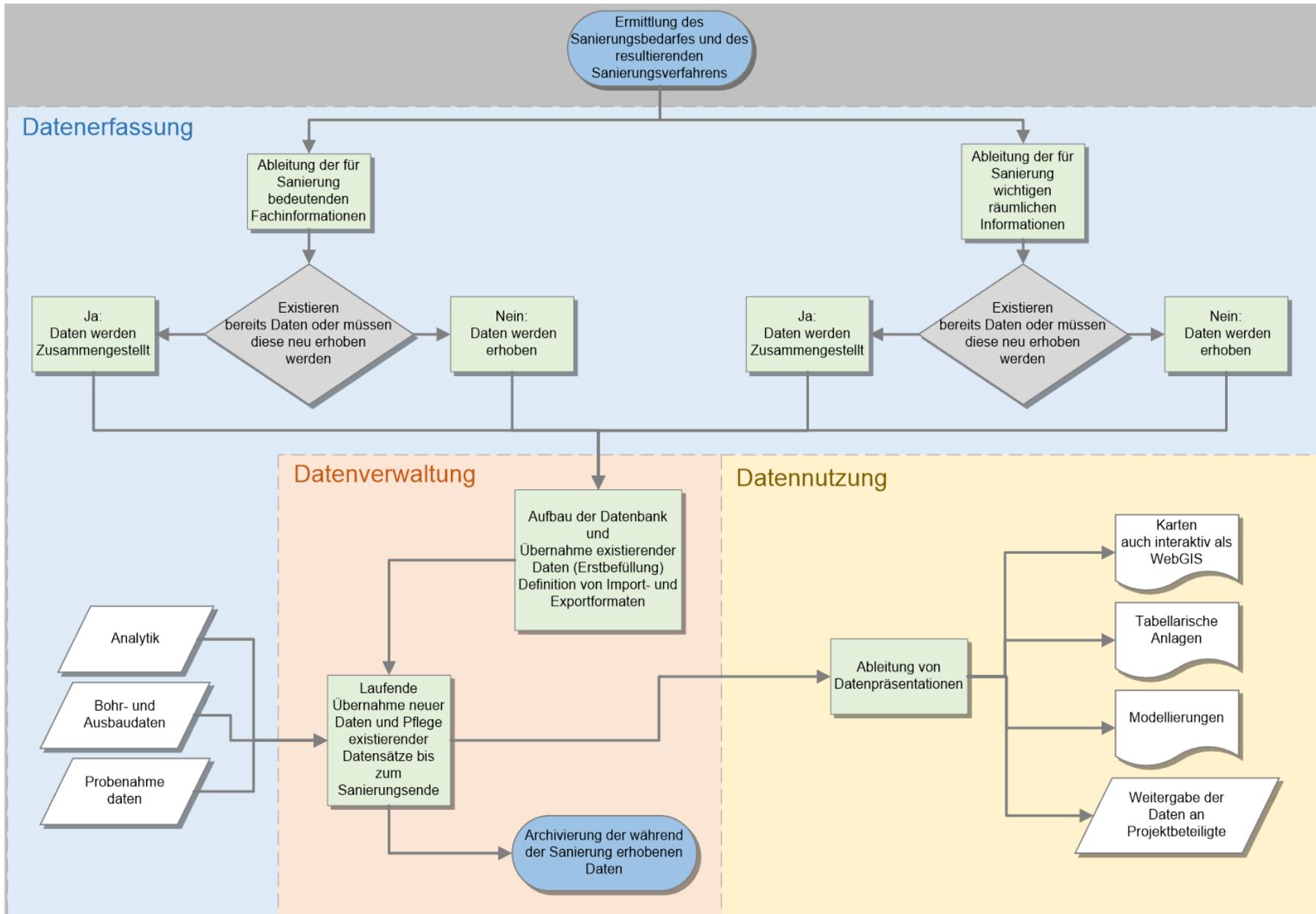


Abbildung 18: Datenflussschema bei der Bearbeitung einer Überwachung

## VI.5 Relationale Datenbank vs. Microsoft Excel

Tabellenkalkulationsprogramme, wie Microsoft Excel, sind nicht datenbankbasierte Speicherformate. Nachfolgend sind die Nachteile der Verwendung dieser Programme als Speichersysteme in Vergleich zu einer beliebigen relationalen Datenbank aufgelistet:

- Durch eine relationale Datenbank wird sichergestellt, dass alle Benutzer mit einem aktuellen, homogenen Datenbestand und nicht mit mehreren unterschiedlichen Dateiversionen arbeiten.
- Relationale Datenbanken verfügen im Gegensatz zu Microsoft Excel über standardisierte Methoden zur Datensicherung und Wiederherstellung.
- Die relationale Datenbank stellt durch die Verwendung von Identifikatoren in den Tabellen und darauf aufsetzenden Methoden wie Fremd- und Primärschlüsselbeziehungen effektive Möglichkeiten zur Vermeidung von Redundanzen in den Daten und daraus resultierenden Fehlern bereit.
- Excel ist kein Programm zur Datenhaltung, sondern ein Kalkulationsprogramm. Dessen Stärke liegt in der Erstellung von Tabellenkalkulationen und der grafischen Präsentation von Daten. Die in Microsoft Excel verfügbaren Kalkulationsfunktionen beherrscht eine Datenbank aber auch genauso gut.
- Eine Datenanalyse geht mittels Datenbank immer schneller als in Microsoft Excel, da Microsoft Excel den gesamten Datenbestand in den Hauptspeicher laden muss. Im Gegensatz dazu erzeugt eine Datenbank immer nur die Datenmenge, die auch wirklich abgefragt wurde.
- Microsoft Excel unterstützt im Gegensatz zu einer Datenbank keinen Mehrbenutzerbetrieb und keine Abstufung der Zugriffsrechte. Das kann bei mehreren Nutzern schnell zu verheerenden Folgen führen.
- Datenmengen und Funktionsanforderungen tendieren dazu, im Laufe der Zeit an Umfang zuzunehmen. Das nachträgliche Migrieren von Microsoft Excel Dateien in eine professionelle Datenbank stellt immer einen erhöhten Kosten- und Zeitaufwand dar. Die scheinbare Kostenersparnis, die durch die Verwendung von Microsoft Excel zunächst erreicht wird, wird durch eine nachträgliche Migration erfahrungsgemäß mehr als aufgebraucht.
- Excel ist nicht internetfähig. Das heißt, sollen einmal entwickelte Berechnungsalgorithmen sowie zusammengetragene Datenbestände über ein Internetportal verfügbar gemacht werden, ist eine Migration in eine Client-Server-Datenbank unvermeidlich.

## VI.6 Führendes System

Ein führendes System in einem Verbund ist eines, nach dessen Datenbestand sich alle anderen Systeme richten. In einem System aus zwei Datenbankservern, indem beispielsweise Server A die Datenbank mit den aktuellen Daten des Liegenschaftskatasters und Server B die Bohrdatenbank bereitstellt, ist Server A das führende System für Katasterdaten und Server B das führende System für Bohrdaten von Altlastenverdachtsflächen. Zu einem System gehören neben den Servern für das Datenhosting meist auch entsprechende Anwendungen zur Datenbearbeitung. Die Festlegung, welches System das führende für einen gegebenen Datenbestand ist, ist unabdingbar. Andernfalls kommt es zur parallelen Fortführung eines Datenbestandes in mehreren Systemen. So wäre es im gewählten Beispiel möglich, dass neue Bohrsatzpunkte parallel in das System eingepflegt werden, das ursprünglich nur die Daten des Liegenschaftskatasters bereitstellte.

## VI.7 Mehrdimensionale Daten

Die Verwaltung von reinen Sachdatensätzen oder 2- und 3-dimensionalen Raumdaten gehört zunehmend der Vergangenheit an. Zusätzliche Informationen zur zeitlichen und kostenseitigen Einordnung von Objekten im Sinne einer 4. und 5. Dimension gewinnen immer mehr an Bedeutung. Bei der Konzeption neuer bzw. der Reorganisation vorhandener Systeme zur Datenverwaltung muss dieser Entwicklung Rechnung getragen werden. Ziel ist die Zusammenführung aller Informationen zu einem Objekt für eine ganzheitliche

Sicht. So wird zukünftig der gesamte Lebenszyklus eines gegebenen Objektes abgebildet, von der Erstellung bis zur endgültigen Verwertung. Ein einfaches Beispiel für ein 5-dimensionales Objekt ist eine in einer Datenbank gespeicherte Grundwassermessstelle. Neben den 3 geometrischen Dimensionen Rechts- und Hochwert sowie Rohoberkante werden Informationen der 4. Dimension (Zeit) gespeichert. Informationen mit zeitlichem Bezug können die Bohrzeit aber auch der Zeitpunkt des Rückbaus sein. Daten der 5. Dimension (Kosten) werden künftig bei zunehmender Digitalisierung und Automatisierung von Geschäftsvorgängen immer mehr an Bedeutung gewinnen. Bei entsprechend gepflegten Daten ist es leicht, z. B. Gesamtkosten einer Bohrkampagne zu ermitteln.

## VI.8 Datensicherheit

Der Datensicherheit kommt eine zunehmend größere Bedeutung zu. Die Verfügbarkeit von Informationen wird immer wichtiger und der Zugriff auf Daten durch Vernetzungen und Internet immer einfacher. In gleichem Maße wie die Verfügbarkeit müssen auch die Sicherheitskonzepte erweitert werden und der Schutz der Daten vor Zerstörung (Viren, begrenzte Haltbarkeit von Speichermedien), Manipulation und unberechtigtem Zugriff gewährleistet sein. Daher sind Festlegungen zur Datensicherheit erforderlich:

- Nutzung aktueller Virenschutz- und Firewall-Techniken,
- Einrichtung und Verwaltung von Zugriffsrechten möglichst auf der Datenverwaltungsebene nicht auf der Applikationsebene → Schutz auch bei direkten Zugriffen ohne Applikation,
- Regelmäßige Datensicherung und Archivierung und der
- Schutz der Serverinfrastruktur vor möglichen Brand- und Wasserschäden sowie anderen Einflüssen höherer Gewalt.

Bei der Erstellung der Datenbanken ist zu berücksichtigen, dass Schnittstellen zu den Landesprogrammen geschaffen werden. Im Interesse der Sicherung und Kompatibilität geologischer Daten wird die nachfolgend beschriebene Verfahrensweise festgelegt. Geologische Daten (Grund- und Stammdaten, Schichtverzeichnisse (einschl. Stratigraphie), Ausbau- und Hinterfüllungsdaten, Pumpversuche, Korngrößen-/Siebanalysen, ingenieurgeologische Proben- und Analysedaten (Boden- und Felsmechanik), Daten indirekter Aufschlüsse (Sondierungen), geochemische Proben- und Analysedaten, hydrogeologische Kennwerte) sind dem LfULG auf Datenträger zu übergeben bzw. per E-Mail zu übersenden. Dies gilt für alle Aufschlüsse wie beispielsweise Bohrungen, Rammkernsondierungen, Brunnen, Grundwassermessstellen und Schürfe. Diese Festlegung bezieht sich auf alle genannten Untersuchungen, unabhängig von deren Tiefe, Umfang oder geologischer Aussage. Eine Verringerung des Erfassungsumfangs kann nur im Einzelfall nach Rücksprache mit dem LfULG festgelegt werden. Zur Kontrolle dient das Bestätigungsformblatt. Erst nach dessen Unterzeichnung durch das Referat 101 des LfULG kann eine Abnahme der Leistung erfolgen. Die Erfassung bezieht sich nicht nur auf neu gewonnene Daten, sondern auch auf vorhandene Altdaten, die für die Bearbeitung verwendet bzw. im Bericht dokumentiert werden.

Zu Bearbeitungsbeginn muss zunächst eine Datenrecherche in der Aufschlusssdatenbank durchgeführt werden, in deren Ergebnis dem Auftragnehmer vom LfULG die bereits vorhandenen Daten für das jeweilige Bearbeitungsgebiet zur Verfügung gestellt werden. Darüber hinaus neu gewonnene und recherchierte Daten sind dann gemäß obiger Verfahrensweise zu erfassen. Die Daten sind in 3 Ordnern abzulegen:

- die vom LfULG übergebenen Altdaten, an denen keine Veränderungen vorgenommen werden dürfen,
- die Stammdaten dieser Altdaten, um Ergänzungen (Schichtenverzeichnis, Ausbau, Analysen, Pumpversuche ...) vorzunehmen,
- komplette Neuerfassung von Aufschlüssen, die noch nicht in der Aufschlusssdatenbank vorhanden sind.

Für inhaltliche oder DV-technische Rückfragen steht im LfULG das Referat 101 zur Verfügung.

Anfragen zu Bohranzeigen, Ergebnismitteilungen und Bohrdaten sind zu richten an: [bohrarchiv.lfulg@smekul.sachsen.de](mailto:bohrarchiv.lfulg@smekul.sachsen.de).

## VII Checkliste zur Standortbegehung im Rahmen der Überwachung

### Vorbereitung der Standortbegehung

- Klärung der Standortverhältnisse.
- Klärung des Ziels und des Umfangs der Überwachung aus vorliegenden Unterlagen und Berichten.
- Ist die Information von zuständigen Beteiligten zu dem Termin der Standortbegehung (Auftraggeber, Behörden, Grundstückeigentümer, Pächter oder Nutzer, Betreiber von Sanierungsanlagen) erfolgt?
- Ggf. Vorlage einer Legitimation mit Angabe Leistungsinhalt und Leistungszeitraum sowie Ansprechpartner.
- Klärung der Zugänglichkeit und der Betretung von Überwachungsflächen oder -punkten (Betretung von Gebäude und Grundstücken, Befahrung von Feld- oder Waldwegen).
- Bereitstellung von Kartenmaterial und Lageplänen mit den Überwachungsmessstellen.
- Bereitstellung von Unterlagen zu den Überwachungsmessstellen (z. B. Messstellenpässe, Bohr- und Ausbauprofile, Fotos).
- Prüfung erforderlicher, geeigneter Probenahmegeräte.
- Bereitstellung der technischen Voraussetzung (z. B. GPS, Lichtlot, Fotoapparat, Schlüssel, Werkzeug zur Öffnung von Verschlusskappen, Abdeckungen oder Schächten, Mobiltelefon).
- Prüfung des Kontaminationsstatus mit Gefährdungseinschätzung zur Gewährleistung erforderlicher Maßnahmen des Gesundheits- und Arbeitsschutzes (Erfordernis Begehung mit zweiter Person, persönliche Schutzausrüstung, Messgeräte zur Überwachung).

### Durchführung der Standortbegehung

- Prüfung der Zugänglichkeit der Überwachungsmessstellen und Festlegung von Maßnahmen zur Sicherstellung der Zugänglichkeit.
- Ggf. Anmeldung bei Grundstückseigentümer, Nutzer oder Pächter.
- Prüfung des Vorhandenseins der Überwachungsmessstellen vor Ort und Abgleich mit den Lageplänen.
- Prüfung äußerer und innerlicher baulicher und technischer Zustand der Überwachungsmessstellen oder -punkte.
- Prüfung möglicher gefahrenrelevanter Sachverhalte (Arbeitsschutz).
- Messen von Wasserständen (ggf. Phasen) und Endteufen von Grundwassermessstellen.
- Erfassung der technischen Geräte und Hilfsmittel für die Überwachung.
- Prüfung möglicher Ersatzmessstellen.
- Anfertigung einer Fotodokumentation.
- Erstellung Protokoll/Dokumentation zur Standortbegehung.

### Nachbereitung der Standortbegehung

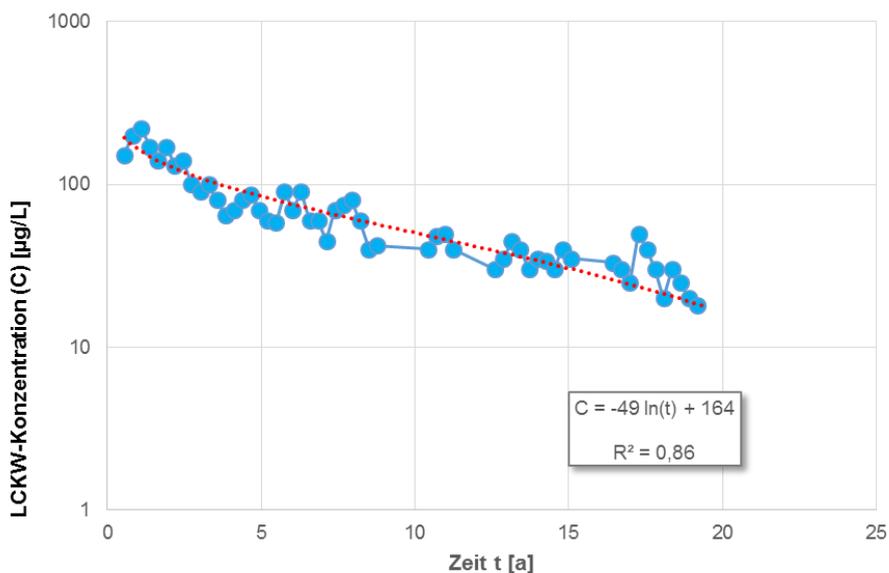
- Abgleich der Ergebnisse der Standortbegehung mit den vorliegenden Unterlagen zu den Überwachungsmessstellen (Lagepläne, Messstellenpässe, Messstellenstammdatenbank).
- Prüfung der Eignung von ggf. erforderlichen Ersatzmessstellen.
- Berücksichtigung der Ergebnisse im Untersuchungskonzept.
- Ausweisung von gegebenenfalls erforderlichen Maßnahmen in Vorbereitung der Überwachung hinsichtlich:
  - Information von Beteiligten,
  - Zugänglichkeit,
  - Reparatur oder Regenerierung von Messstellen,
  - Arbeitsschutz.

## VIII Trendanalysen

Die im Überwachungszyklus angefallenen Konzentrationsdaten sollten für die Trendanalyse und die daraus abzuleitende Prognose statistisch aufbereitet werden. Das Vorgehen kann in Abhängigkeit vom Überwachungsziel, sowie von Dauer der Überwachung und damit verbunden vom Datenumfang und deren Qualität in drei Schritten erfolgen:

- Erster Schritt: Grafische Darstellung der Konzentration über die Zeit und erste Auswertung
- Zweiter Schritt: Trendanalyse (Zusammenhang erkennen), ggf. in Verbindung mit einer Bruchpunktanalyse<sup>17</sup>
- Dritter Schritt: Prognose.

Erster Schritt: Die statistische Zusammenstellung und grafische Darstellung der Überwachungsdaten ist abhängig von der Zielstellung der Überwachung. Abbildung 19 zeigt das Beispiel einer LCKW-Konzentrationsganglinie an einer Grundwassermessstelle innerhalb der Schadstofffahne nach Sicherung des Schadensherdes.



**Abbildung 19: Grafische Auswertung eines Konzentrationsverlaufstrends einschließlich einer Anpassungskurve 2. Grades (rot gestrichelte Linie)**

Auch wenn die Auswaschung von Schadstoffen ein logarithmischer Prozess ist, der in der halblogarithmischen Darstellung eine Gerade ergeben müsste, wird dies oft nicht beobachtet. Stattdessen findet sich eine Überlagerung zweier oder mehrerer logarithmischer Prozesse, wie das Beispiel in Abbildung 19 zeigt. Zunächst findet eine Auswaschung der gelösten, hydraulisch rasch verfügbaren Schadstoffe statt. Danach macht sich mehr und mehr die Rückdiffusion und optional die Lösung residualer Phasen bemerkbar. Im

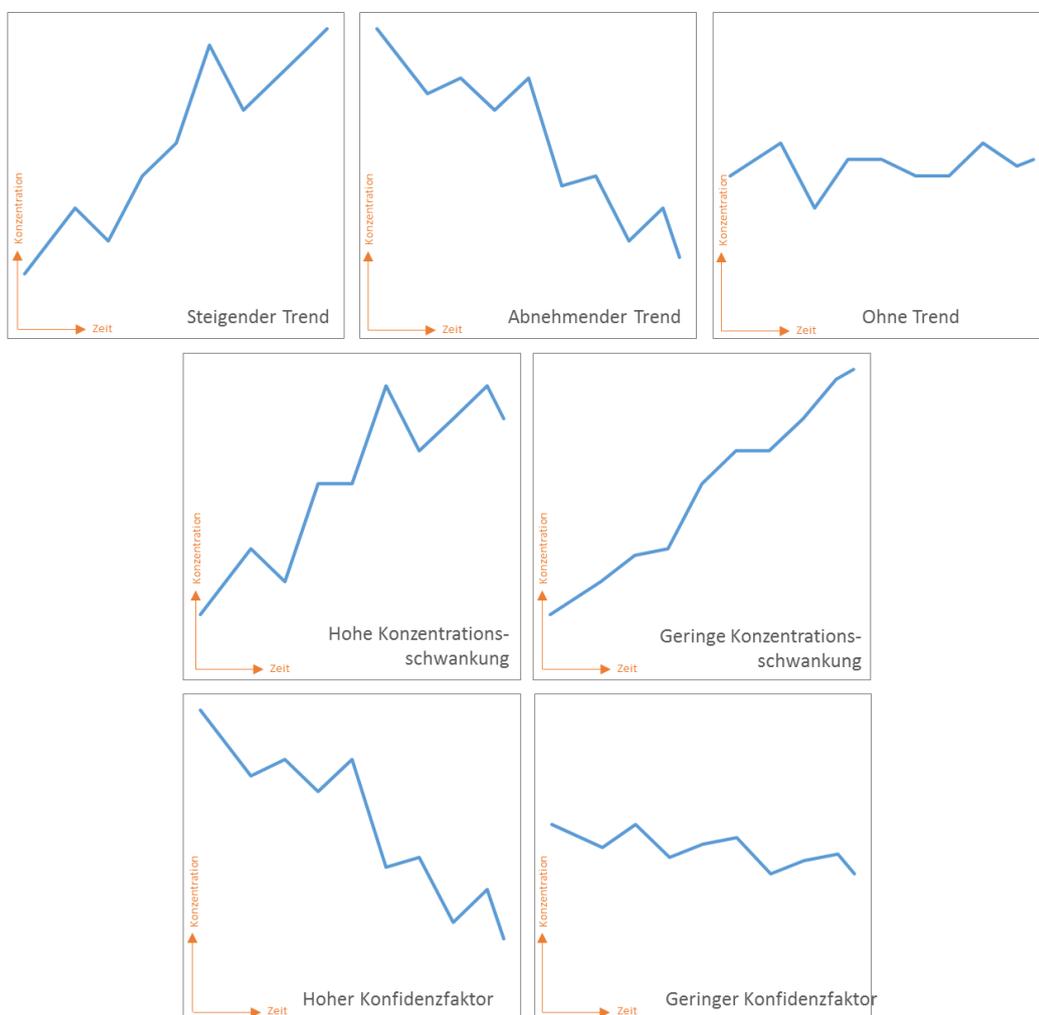
---

<sup>17</sup> Die Bruchpunktanalyse nach MANN-WHITNEY stellt einen verteilungsfreien Homogenitätstest für die Zeitreihe dar. Sie liefert als Information den wahrscheinlichsten Zeitpunkt innerhalb einer Zeitreihe, an dem mit einer bestimmten Wahrscheinlichkeit eine Änderung vorliegt. Dies bedeutet: weist eine Zeitreihe eine Veränderung im Verhalten auf, so liegt der Zeitpunkt der Veränderung mit der zugehörigen Wahrscheinlichkeit an dem ermittelten Bruchpunkt. Über die Wahrscheinlichkeit bzw. Signifikanz der Änderung selbst wird keine Aussage gemacht.

weiteren zeitlichen Verlauf dominiert dieser Prozess sehr stark und führt dazu, dass sich der Konzentrationsverlauf in der halblogarithmischen Darstellung einer fallenden Gerade nähert (fallender Trend). Mittels Regressionsanalyse kann die Geschwindigkeit der Konzentrationsabnahme berechnet werden (Steigung/Gefälle des Trends).

**Zweiter Schritt:** Bei einer genügenden Anzahl von Messergebnissen ist die Tendenz des Konzentrationsverlaufs (Trend) und die Geschwindigkeit der Änderung aus grafischen Darstellungen abzuleiten. Der Trend bezieht sich ausschließlich auf den betrachteten Zeitraum und gilt nicht für die gesamte Kontamination in ihrer gegenwärtigen Ausdehnung, sondern nur für den jeweils betrachteten Punkt (hier: Grundwassermessstelle).

Insgesamt ist die grafische Darstellung und Regressionsanalyse der erste Schritt in der Trendanalyse. Oft liegen aber nicht genügend Messpunkte und wenn ja, dann oft mit einer großen Streuung vor, so dass eine visuelle Trendüberprüfung keine leicht interpretierbaren Ergebnisse zeigt (keinen einheitlichen Trend oder schwankend über die Zeit) (vgl. Abbildung 20).



**Abbildung 20: Veranschaulichung von möglichen Konzentrationstrends (in Anlehnung an [63])<sup>18</sup>**

<sup>18</sup> Das Konfidenzintervall ist eine zahlenmäßig ausgedrückte Einschätzung der Gewissheit eines Faktums oder einer Relation. Häufig wird ein Konfidenzintervall von 95 Prozent verwendet.

In diesen Fällen können die Konzentrationstrends mit statistischen Tests überprüft werden. Entsprechende Programme, oft auf Basis von Excel-Kalkulationstabellen, sind frei verfügbar [84]. Die Methoden sind untenstehend beschrieben.

**Dritter Schritt:** Ergeben die Überprüfungen ein statistisch beschreibbares Verhalten der Ausdehnung der Kontamination, kann vorausgesetzt werden, dass geringe Änderungen in den hydrogeologischen und/oder geochemischen Bedingungen im Betrachtungszeitraum keine wesentlichen Auswirkungen auf das Trendverhalten haben.

Für den Fall, dass eine Abnahme der Schadstoffkonzentration im ersten oder zweiten Schritt festgestellt wurde, ist eine Prognose möglich. Dabei wird der bisher beobachtete Konzentrationsverlauf in die Zukunft extrapoliert. Damit kann ermittelt werden, zu welchem Zeitpunkt die vorgegeben Sanierungszielwerte unterschritten sein werden. Zu beachten ist dabei aber, dass in der Regel die Abnahme der Schadstoffe aus einem Schadensherd und damit verbunden die Reduzierung in der Kontaminationsfahne keinem linearen Verlauf, sondern einem exponentiellen Rückgang unterliegt. Dies kann hinsichtlich des Erreichens von Sanierungs- bzw. Überwachungszielen oder dem Eintreten von schrumpfenden bzw. quasistationären Zuständen erheblich lange Zeiträume benötigen. Dies ist bei der Abschätzung der Überwachungsdauer unbedingt zu berücksichtigen.

Anders ist der Sachverhalt bei einem fehlenden Trend (quasi-stationäre Verhältnisse) oder bei einem steigenden Trend (zunehmende Konzentrationen). Mit der Trendanalyse allein kann dann die Frage, wann das Restschadstoffinventar erschöpft sein wird und die Schadstoffkonzentrationen sinken, nicht beantwortet werden. Das gleiche gilt für einen steigenden Trend. Es kann mit den statistischen Verfahren nicht festgestellt werden, wann und bei welchen Konzentrationen das Maximum der Zunahme der Schadstoffkonzentrationen erreicht werden wird.

Steigende Konzentrationen werden bei einer Fahnenausdehnung, sinkende bei einer Fahnenschrumpfung und gleichbleibende Konzentrationen (ohne Trend) bei einem quasi-stationären Zustand der Schadstofffahne beobachtet. Konzentrationsschwankungen, welche eher der Regelfall der Überwachung sind, ergeben sich in der Regel durch Veränderung des hydraulischen Systems, z. B. saisonal variierende Grundwasserneubildung bzw. Fehler in der Probenahme und Analytik. Die Konzentrationsschwankungen sind immer in Verbindung mit dem Konzentrationstrend zu betrachten. Daraus ergibt sich die Vertrauenswürdigkeit (Konfidenz) der Messdaten. In der Praxis sollten in der Auswertung der Überwachungsergebnisse entsprechende Konfidenzintervalle in Abhängigkeit vom vorliegenden Datenkollektiv geprüft und festgelegt werden. Diese sind dann hoch, wenn die Konzentrationsschwankungen im Vergleich zu dem überlagerten Konzentrationstrend gering sind. Vereinfacht ausgedrückt fallen die gleichen (absoluten) Konzentrationsschwankungen weniger ins Gewicht, wenn der Konzentrationsgradient steiler ist als bei flachen Konzentrationsgradienten. Dies ist in Abbildung 20 (unten) verdeutlicht. Besteht der Verdacht, dass die Konzentrationsschwankungen auf Ungenauigkeiten in der Probenahme und Analytik zurückzuführen sind, müssen Maßnahmen zur Qualitätssicherung ergriffen werden. Sind die Konzentrationsschwankungen auf einmalige (z. B. Grundwasserhaltungsmaßnahmen) oder wiederkehrende saisonale hydraulische Änderungen zurückzuführen, sollten die Ursachen für die Schwankungen näher untersucht werden. In vielen Fällen der Altlastenüberwachung dominieren in Abhängigkeit vom Sanierungsumfang und von den Schadstoffen gleichbleibende bzw. leicht abnehmende Trends mit saisonalen Schwankungen.

Bei der Auswertung von Oberflächenwasseranalysen sind eine Betrachtung des Längsschnittes des Gerinnes und die Entwicklung der Frachten erforderlich.

## VIII.1 Für die Trendanalysen erforderliche Datenstruktur

Die für die statische Auswertung verwendeten Daten sollten in Raum und Zeit nicht stark geclustert vorliegen, sondern über Jahre und die gesamte Fahne verteilt sein. Vorsicht ist geboten bei einer Folge von Nullwerten (nicht bestimmbar). Dies erlaubt keine Aussage über eventuell auftretende saisonale Konzentrationserhöhungen oder mögliche Konzentrationstrends. Ein solcher würde erst detektiert, wenn die Konzentration über die Bestimmungsgrenze steigt.

## VIII.2 Statistische Verfahren

Es gibt verschiedene Möglichkeiten zur Bestimmung eines Trends. Diese werden nachfolgend aufgezeigt:

- Mann-Kendall-Test
- Mann-Whitney-Test
- t-Test
- Sen-Slope-Test
- Regressionsanalyse

### Mann-Kendall-Test

Ein in der Praxis zur Bestimmung von Trends häufig angewendetes Verfahren ist der nicht-parametrische<sup>19</sup> Mann-Kendall-Test. Dieser ist gut bei Datensätzen mit Ausreißern anwendbar. Ein weiterer Vorteil besteht darin, dass mit diesem Test sowohl lineare als auch nichtlineare Trends detektiert werden. Es lässt sich untersuchen, ob die in einer Messstelle gemessenen Schadstoffkonzentrationen einen zunehmenden, gleichbleibenden oder abnehmenden Trend aufweisen. Daten, die saisonalen Einflüssen unterliegen, lassen sich nicht interpretieren. Der Test erlaubt keine Aussage hinsichtlich der Stärke des Trends. Dieser Test ist gut geeignet, wenn nur wenige ( $\geq 8$  aufeinanderfolgende) Messpunkte vorliegen. Größere Datensätze erhöhen jedoch die Zuverlässigkeit der Aussage. Darüber hinaus sind keine Annahmen der zugrundeliegenden statistischen Verteilung der Daten erforderlich. Die Nullhypothese ( $H_0$ ) des Tests lautet, dass eine Datenreihe (Zeitreihe:  $c_t$  mit  $t = 1, 2, 3, \dots, n$ ) unabhängig und gleichverteilt ist, also kein Trend vorliegt. Die Alternativhypothese ( $H_1$ ) besagt, dass ein Trend in  $c_t$  vorliegt:

$H_0: P(c_j > c_i) = 0,5$  mit  $j > i$

$H_1: P(c_j > c_i) \neq 0,5$  (zweiseitiger Test)

mit  $c_i, c_j$  = Elemente (Konzentration) einer Zeitreihe,  $P$  = Wahrscheinlichkeit. Die Mann-Kendall-Statistik ( $S$ ) berechnet sich nach:

$$S = \sum_{k=1}^{n-1} \sum_{j=k+1}^n \operatorname{sgn}(X_j - X_k) \quad (6)$$

---

<sup>19</sup> Nicht-parametrische statistische Methoden sind mathematische Verfahren zum Testen von Hypothesen. Anders als parametrische statistische Methoden machen sie keine Annahmen über die Wahrscheinlichkeitsverteilung der zu untersuchenden Variablen.

wobei  $c_j$  und  $c_k$ , Datenwerte in den Jahren  $j$  und  $k$  darstellen (Voraussetzung:  $j > k$ ),  $n$  ist die Gesamtzahl der Datensätze und  $\text{sgn}$  (Signum) die Vorzeichenfunktion:

$$\text{sgn}(c_j - c_k) = 1 \quad \text{wenn } (c_j - c_k) > 0$$

$$\text{sgn}(c_j - c_k) = 0 \quad \text{wenn } (c_j - c_k) = 0$$

$$\text{sgn}(c_j - c_k) = -1 \quad \text{wenn } (c_j - c_k) < 0$$

Es wird also jeder Wert mit jedem folgendem, dementsprechend jüngerem Wert in der Zeitreihe verglichen. Bei einer Datenreihe mit  $n$  Messwerten erhält man so  $\frac{1}{2} n(n - 1)$  Wertepaare, deren Vorzeichenfunktion in  $S$  aufsummiert wird. Ein positiver  $S$ -Wert indiziert einen steigenden Trend, ein negativer Wert einen abnehmenden Trend und  $S = 0$  keinen Trend. Die Ergebnisse eines Mann-Kendall-Test können beim Vorliegen saisonaler Konzentrationsschwankungen aber fehlerhaft sein. Dies ist auch bei zu häufigen Beprobungen über vergleichsweise kurze Zeiträume der Fall.

Gegebenenfalls können saisonal zusammenhängende Überwachungszeiträume aus dem Gesamtdatensatz ausgegliedert und separat ausgewertet werden, um fehlerhafte Ergebnisse zu vermeiden.

Gemäß der Nullhypothese kann die Verteilung von  $S$  bei ausreichend großem Stichprobenumfang  $n$  gut durch die Normalverteilung approximiert werden. Der Erwartungswert der Teststatistik ( $\mu_S$ ) und die Varianz ( $\sigma_S^2$ ) sind dann mit

$$\mu_S = 0$$

$$\sigma_S^2 = \left[ n(n-1)(2n+5) - \sum_{i=1}^m t_i(t_i-1)(2t_i+5) \right] / 18 \quad (7)$$

gegeben, wobei in  $\sigma_S^2$  in Summe eine Korrektur für das Auftreten von identischen Werten in der Zeitreihe darstellt, mit  $t_i$  für die Anzahl der identischen Werte (für jeden Wert) vom Umfang  $i$ . Die standardisierte Teststatistik  $Z$  wird nun berechnet nach:

$$Z = \begin{cases} \frac{S-1}{\sigma_S}, & \text{wenn } S > 0 \\ 0, & \text{wenn } S = 0 \\ \frac{S+1}{\sigma_S}, & \text{wenn } S < 0 \end{cases} \quad (8)$$

Bei einem zweiseitigen Test wird die Nullhypothese mit der Signifikanz  $\alpha$  abgelehnt, wenn  $|Z| > Z_{\alpha/2}$  ist, wobei  $Z_{\alpha/2}$  der Wert der Standardnormalverteilung mit einer Überschreitungswahrscheinlichkeit von  $\alpha/2$  ist. Der Mann-Kendall Test kann mit Hilfe von Excel-Tabellenkalkulationsprogrammen durchgeführt werden. Als Ergebnis wird der P-Wert der Mann-Kendall Trendstatistik erhalten. Je größer der P-Wert ist, desto höher ist die Wahrscheinlichkeit, dass die Nullhypothese angenommen wird, das heißt, dass kein Trend vorliegt. Als Schwellenwerte können die P-Werte  $< 0,1$  (signifikant) und  $< 0,05$  (stark signifikant) gelten.

## Mann-Whitney-Test

Der parameterfreie statistische Mann-Whitney-Test kann verwendet werden, um Konzentrationstrends zu bestimmen, die saisonalen Einflüssen unterliegen. Allerdings ist nur eine Überprüfung möglich, ob die Schadstoffkonzentrationen einen abnehmenden Trend aufweisen. Als Minimum benötigt dieser Test Messwerte aus acht aufeinanderfolgenden viertel- oder halbjährlichen Messungen.

## t-Test

Unter der Voraussetzung, dass ein Trend statistisch signifikant nachweisbar ist (d. h. eine Abhängigkeit (Korrelation) der Parameter Konzentration von der Zeit gegeben ist), kann die Stärke eines Trends durch einen t-Test überprüft werden. Der t-Test ergibt unter Vorauswahl der maximal zulässigen Irrtumswahrscheinlichkeit (0,2 entspräche einer Sicherheit von 80 %) einen Korrelationskoeffizienten  $r$ . Beim t-Test geht der unterschiedliche Stichprobenumfang mit ein. Saisonale Schwankungen beeinträchtigen die Aussage stark.

Der einfache t-Test prüft anhand des Mittelwertes einer Stichprobe, ob sich der Mittelwert einer Grundgesamtheit von einem vorgegebenen Sollwert unterscheidet. Dabei wird vorausgesetzt, dass die Daten der Stichprobe einer normalverteilten Grundgesamtheit entstammen bzw. es einen genügend großen Stichprobenumfang gibt, so dass der zentrale Grenzwertsatz erfüllt ist.

## Sen-Slope-Test

Für den Sen-Slope-Test werden die Steigungen jedes möglichen Wertepaares der Zeitreihe ermittelt, also bei einer Datenreihe der Länge  $n$  erhält man  $\frac{1}{2} n (n - 1)$  Steigungen. Der Median dieser Steigungen ist dann nach Sen der Schätzer für die Trendstärke der gesamten Zeitreihe.

## Regressionsanalyse

Regression beschreibt eine Reihe von Verfahren, bei der die Beziehungen zwischen unabhängigen Variablen  $x$  und der abhängigen Variablen  $y$  für ein- (*einfache Regression*) oder mehrdimensionale Fälle (*multiple Regression*) dargestellt werden.

Die Regression gibt an, welcher gerichtete Zusammenhang zwischen zwei oder mehr Variablen besteht. Dabei kann die Regression linear oder nicht linear sein. Das Bestimmtheitsmaß ( $R^2$ ) drückt dabei aus, wie gut die Regression den Zusammenhang zwischen unabhängigen und abhängiger Variablen wiedergibt.  $R^2$  liegt zwischen 0 und 1, wobei der Wert  $R^2 = 1$  bedeutet, dass jeder beobachtete Datenpunkt direkt auf der Regressionskurve liegt.

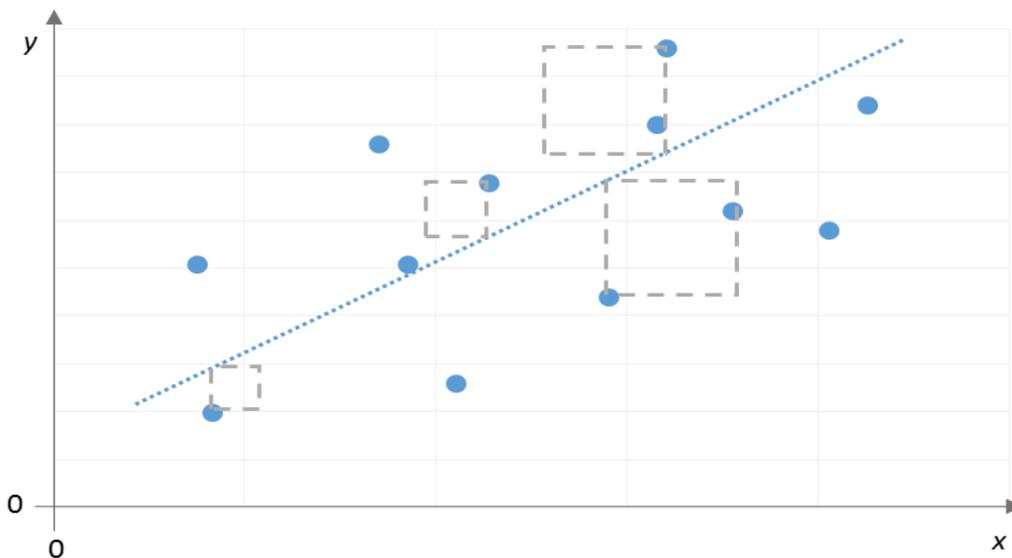
Es gibt eine große Anzahl von Regressionsanalyseverfahren, die für spezielle Analyseaufgaben eingesetzt werden können. Diese erfordern oft aufgrund großer Datenmengen und den damit verbundenen, umfangreichen Rechenalgorithmen meist spezielle Statistikprogramme. Für die Auswertung umweltbezogener Daten werden jedoch meist eindimensionale Regressionsverfahren zur Auswertung der zeitlichen Variabilität eines Messwertes genutzt, die in Tabellenkalkulationsprogrammen wie beispielsweise Excel implementiert sind. Standard sind dabei lineare, polynomische oder exponentielle sowie logarithmische und Potenz-Funktionen, deren Anpassungen an die jeweiligen Messdatenreihen auf der Methode der kleinsten Quadrate basieren (diese Methode besteht darin, die Parameter der angepassten Funktion so zu bestimmen, dass die Summe der quadratischen Abweichungen der Kurve von den beobachteten Punkten minimiert wird). Die Abweichungen der Messwerte zur Regressionsgerade sind in Abbildung 21 und

Abbildung 22 für einige Punkte grafisch dargestellt. Die Flächen für die Punkte unterhalb der Regressionsgerade bekommen ein negatives, die Flächen oberhalb ein positives Vorzeichen. Die Summe der Flächen aller Quadrate soll dabei nahe 0 liegen. Die Abweichungen davon werden Residuen genannt.

Ausreißer beeinflussen dabei die Berechnung der Parameter der Regressionsfunktion und können das Ergebnis der Trendanalyse stark verfälschen. Um dies zu vermeiden, müssen die Daten vorab auf fehlerhafte Beobachtungen untersucht werden. Hierzu kommen sogenannte *Ausreißertests* zum Einsatz. Die einzelnen Tests haben jeweils besondere Vor- und Nachteile, so dass die z. B. nachfolgend genannten Tests nicht unreflektiert eingesetzt werden sollten:

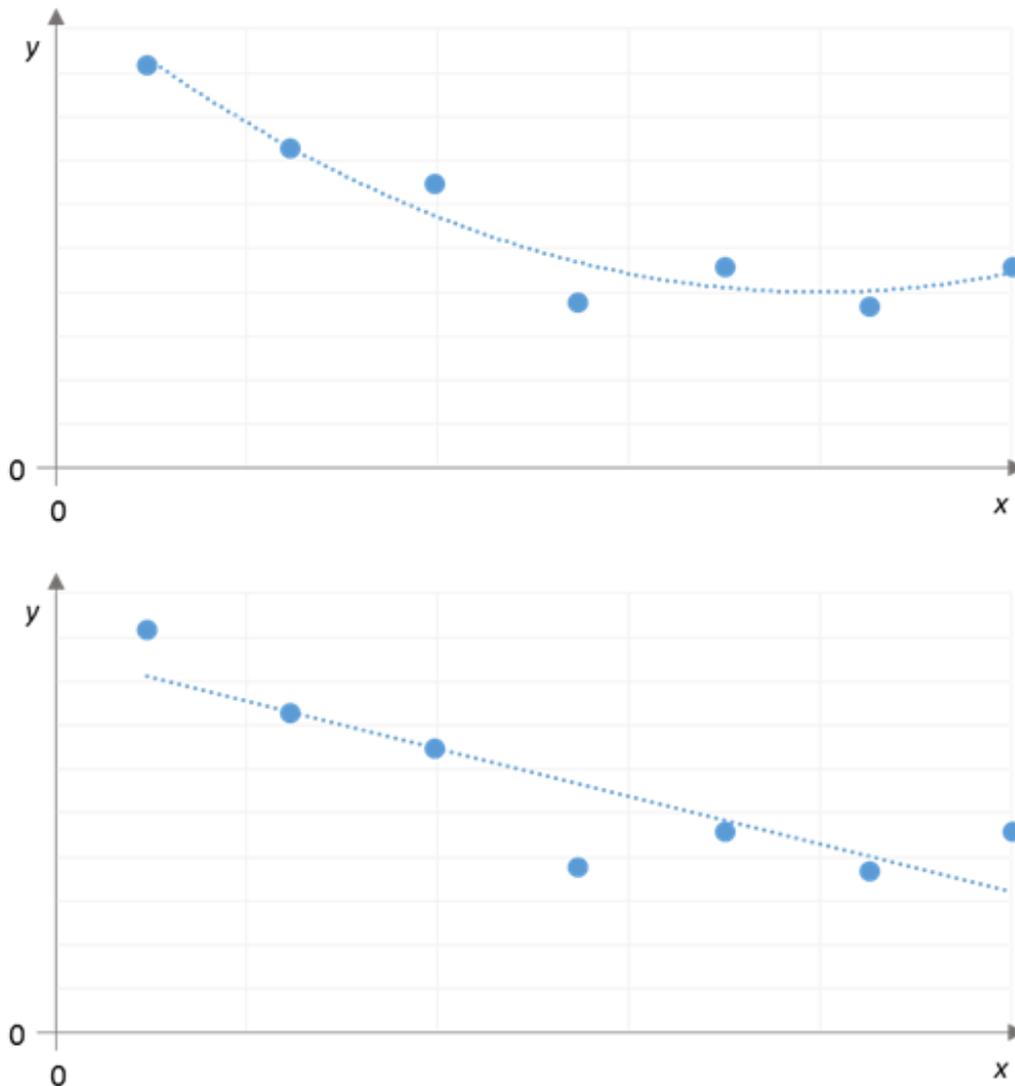
- Benutzung der Standardabweichung und des Interquartilsabstands
- Dean-Dixon-Test
- Ausreißertest nach Walsh
- Ausreißertest nach Grubbs
- Signifikanz von Extremwerten
- Nalimov-Test.

Die entdeckten Ausreißer können aus der Messreihe entfernt werden oder es sind alternative ausreißer-resistentere Berechnungsverfahren wie die gewichtete Regression zur Trendanalyse zu verwenden. Ergibt die erste Berechnung der Schätzwerte durch statistische Tests ein zu geringes Bestimmtheitsmaß ( $R^2$ ), liegen vermutlich Ausreißer in der Messreihe vor. Diese Messwerte werden dann identifiziert und ausgeschieden und die Schätzwerte erneut berechnet. Dieses Verfahren eignet sich allerdings nur dann, wenn nur wenige Ausreißer vorliegen.



**Abbildung 21: Nach der Methode der kleinsten Quadrate entwickelte Regressionsgerade<sup>20</sup>**

<sup>20</sup> Quadrate entstehen, indem von jedem einzelnen Messpunkt eine Linie parallel zur y-Achse gezogen und in x-Richtung erweitert wird. Dies ist in Abbildung 21 exemplarisch für zwei Messpunkte oberhalb und unterhalb der Regressionsgerade gezeigt. Die Regressionsgerade wird dann so berechnet, dass die Fläche der Summe aller Quadrate minimiert wird.



**Abbildung 22: Datenreihe mit verschiedenen Ausgleichslinien (oben polynomisch, unten linear)**

Bei der gewichteten Regression werden die abhängigen Variablen  $y$  in Abhängigkeit von ihren Residuen gewichtet. Ausreißer, d. h. Beobachtungen mit großen Residuen, erhalten ein geringes Gewicht, das je nach Größe des Residuums abgestuft sein kann. Beim Algorithmus des „biweighting“, werden z. B. unproblematische Werte mit 1 und Ausreißer mit 0 gewichtet, was die Unterdrückung des Ausreißers bedingt. Bei der gewichteten Regression sind in der Regel mehrere Iterationsschritte erforderlich, bis sich die Menge der erkannten Ausreißer nicht mehr ändert.

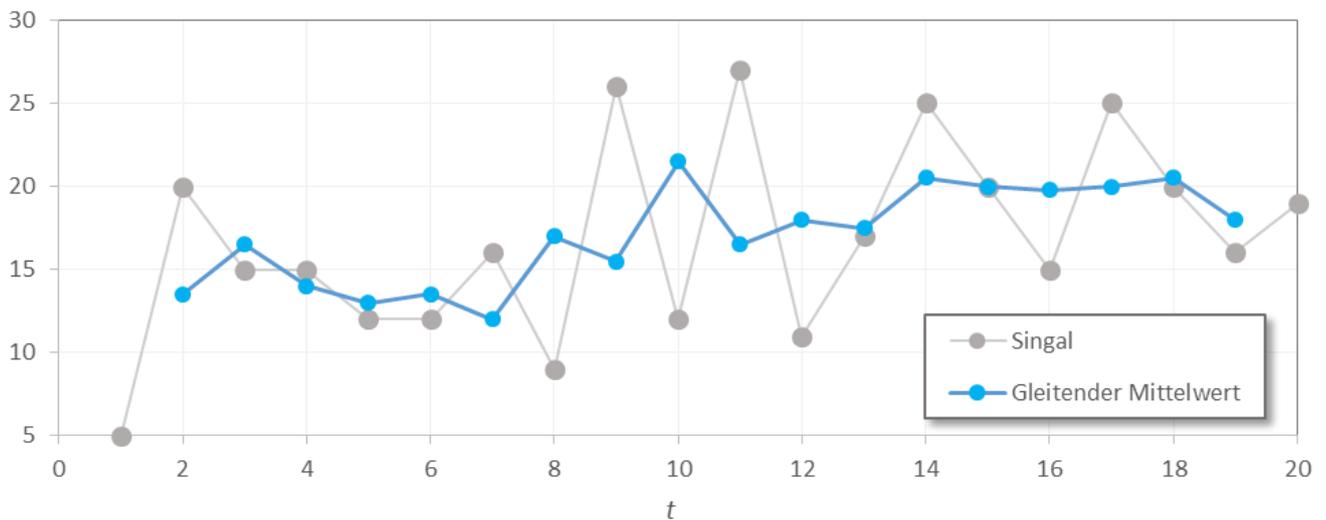
Die Verfahren der gewichteten Regression berücksichtigen jedoch keine saisonalen Trends und die darauf aufbauenden Erwartungswerte der Prognose besitzen eine eher geringe statistische Sicherheit. Zur Lösung bietet das einfache Verfahren der *gleitenden Durchschnitte* oder *gleitenden Mittelwerte* zur Trendanalyse und Prognose an. Die Menge der gleitenden Mittelwerte werden iterativ („gleitend“) über einen Ausschnitt (Fenster) der gegebenen Datenreihe berechnet. Das verwendete Fenster wird schrittweise so verschoben, dass der jeweils erste Wert aus dem betrachteten Ausschnitt gestrichen und der erste Wert nach dem nächsten Ausschnitt hinzugenommen wird. Für diesen Ausschnitt wird dann ein neuer Mittelwert nach folgender Formel berechnet und es wird eine neue Datenreihe erzeugt.

$$m^n(t) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^{n-1} x(t - n + i)$$

(9)

- m Mittelwert
- i Startwert
- n Endwert
- x Messwert
- t Zeitschritt/Fenster (Anzahl der Messwerte, für die ein gleitender Mittelwert zu berechnen ist)

In Abbildung 23 ist ein Beispiel für die Generierung einer Datenreihe aus gleitenden Mittelwerten mit einem Zeitschritt (oder Fenster)  $t$  von 3 dargestellt.



**Abbildung 23: Zentrierte gleitende Mittelwerte der Breite 3 im Vergleich zum Originalsignal**

Für die Berechnung des Mittelwerts können die im Fenster vorkommenden Werte zusätzlich noch beliebig gewichtet werden, um z. B. den Einfluss von Extremwerten zu minimieren.

Die Wahl des Zeitschrittes (Fensterbreite) hängt dabei auch vom Ziel der Trendanalyse ab, also ob saisonale Einflüsse sichtbar bleiben (kleine Fenster) oder ob diese unterdrückt werden sollen (große Fenster).

Trendanalysen allgemein sollten dabei immer über mehrere saisonale Zyklen durchgeführt werden. Damit können normale saisonale Einflüsse auf den Verlauf der Schadstoffkonzentrationen von singulären (abnormalen) Einflüssen wie beispielsweise Grundwasserneubildung nach Starkregenfällen oder z. B. nahe gelegene temporäre Grundwasserentnahmen abgegrenzt werden. Trendanalysen erfordern somit eine größere Datenanzahl, die nach Möglichkeit auch in regelmäßigen Abständen erhoben werden sollten.

**Herausgeber:**

Sächsisches Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie (LfULG)  
Pillnitzer Platz 3, 01326 Dresden  
Telefon: +49 351 2612-0  
Telefax: +49 351 2612-1099  
E-Mail: lfulg@smekul.sachsen.de  
www.smekul.sachsen.de/lfulg

**Autoren:**

Arcadis Germany GmbH  
Könneritzstraße 29, 01067 Dresden  
Telefon: + 49 351 263588 0  
Telefax: + 49 351 48189667  
E-Mail: dresden@arcadis.com

Sächsisches Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie (LfULG)  
Abteilung 4, Referat 42  
Zur Wetterwarte 11, 01109 Dresden  
Telefon: +49 351 89284212  
Telefax: +49 351 86284099  
E-Mail: sebastian.broese@smekul.sachsen.de

**Redaktion:**

Sächsisches Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie (LfULG)  
Sebastian Bröse  
Ulrike Menzel  
Abteilung 4, Referat 42  
Zur Wetterwarte 11, 01109 Dresden  
Telefon: +49 351 89284212  
Telefax: +49 351 86284099  
E-Mail: sebastian.broese@smekul.sachsen.de

**Titelfoto:**

Sebastian Bröse (LfULG)

**Redaktionsschluss:**

01.04.2024

**Hinweis:**

Die Broschüre steht nicht als Printmedium zur Verfügung, kann aber als PDF-Datei unter <https://publikationen.sachsen.de/bdb/> heruntergeladen werden.

**Verteilerhinweis**

Diese Informationsschrift wird von der Sächsischen Staatsregierung im Rahmen ihrer verfassungsmäßigen Verpflichtung zur Information der Öffentlichkeit herausgegeben.

Sie darf weder von Parteien noch von deren Kandidaten oder Helfern im Zeitraum von sechs Monaten vor einer Wahl zum Zwecke der Wahlwerbung verwendet werden. Dies gilt für alle Wahlen.

Missbräuchlich ist insbesondere die Verteilung auf Wahlveranstaltungen, an Informationsständen der Parteien sowie das Einlegen, Aufdrucken oder Aufkleben parteipolitischer Informationen oder Werbemittel. Untersagt ist auch die Weitergabe an Dritte zur Verwendung bei der Wahlwerbung. Auch ohne zeitlichen Bezug zu einer bevorstehenden Wahl darf die vorliegende Druckschrift nicht so verwendet werden, dass dies als Parteinarbeit des Herausgebers zugunsten einzelner politischer Gruppen verstanden werden könnte.

Diese Beschränkungen gelten unabhängig vom Vertriebsweg, also unabhängig davon, auf welchem Wege und in welcher Anzahl diese Informationsschrift dem Empfänger zugegangen ist. Erlaubt ist jedoch den Parteien, diese Informationsschrift zur Unterrichtung ihrer Mitglieder zu verwenden.

*Täglich für  
ein gutes Leben.*

[www.lfulg.sachsen.de](http://www.lfulg.sachsen.de)