

DIN EN ISO 24212



ICS 13.080.01

Einsprüche bis 2023-07-12

Entwurf

**Sanierungstechniken an kontaminierten Standorten
(ISO/DIS 24212:2023);
Deutsche und Englische Fassung prEN ISO 24212:2023**

Remediation techniques applied at contaminated sites (ISO/DIS 24212:2023);
German and English version prEN ISO 24212:2023

Techniques de dépollution appliquées en sites et sols pollués (ISO/DIS 24212:2023);
Version allemande et anglaise prEN ISO 24212:2023

Anwendungswarnvermerk

Dieser Norm-Entwurf mit Erscheinungsdatum 2023-05-12 wird der Öffentlichkeit zur Prüfung und Stellungnahme vorgelegt.

Weil die beabsichtigte Norm von der vorliegenden Fassung abweichen kann, ist die Anwendung dieses Entwurfs besonders zu vereinbaren.

Stellungnahmen werden erbeten

- vorzugsweise online im Norm-Entwurfs-Portal von DIN unter www.din.de/go/entwuerfe bzw. für Norm-Entwürfe der DKE auch im Norm-Entwurfs-Portal der DKE unter www.entwuerfe.normenbibliothek.de, sofern dort wiedergegeben;
- oder als Datei per E-Mail an naw@din.de möglichst in Form einer Tabelle. Die Vorlage dieser Tabelle kann im Internet unter www.din.de/go/stellungnahmen-norm-entwuerfe oder für Stellungnahmen zu Norm-Entwürfen der DKE unter www.dke.de/stellungnahme abgerufen werden;
- oder in Papierform an den DIN-Normenausschuss Wasserwesen (NAW), 10772 Berlin oder Am DIN-Platz, Burggrafenstr. 6, 10787 Berlin.

Die Empfänger dieses Norm-Entwurfs werden gebeten, mit ihren Kommentaren jegliche relevanten Patentrechte, die sie kennen, mitzuteilen und unterstützende Dokumentationen zur Verfügung zu stellen.

Gesamtumfang 224 Seiten

DIN-Normenausschuss Wasserwesen (NAW)

Nationales Vorwort

Dieses Dokument (prEN ISO 24212:2023) wurde vom Technischen Komitee ISO/TC 190 „Soil quality“ in Zusammenarbeit mit dem Technischen Komitee CEN/TC 444 „Umweltbezogene Charakterisierung fester Matrices“ erarbeitet, dessen Sekretariat von NEN (Niederlande) gehalten wird.

Das zuständige nationale Normungsgremium ist der Unterausschuss NA 119-01-02 -03 UA „Standortbeurteilung, Bodenschutz, Altlastensanierung“ im DIN-Normenausschuss Wasserwesen (NAW).

Um Zweifelsfälle in der Übersetzung auszuschließen, ist die englische Originalfassung beigelegt. Die Nutzungsbedingungen für den deutschen Text des Norm-Entwurfes gelten gleichermaßen auch für den englischen Text.

Für die in diesem Dokument zitierten Dokumente wird im Folgenden auf die entsprechenden deutschen Dokumente hingewiesen:

ISO 11074:2015/amd 2020	siehe	DIN EN ISO 11074/A1:2020-11
ISO 21365:2019	siehe	DIN EN ISO 21365:2021-02

Aktuelle Informationen zu diesem Dokument können über die Internetseiten von DIN (www.din.de) durch eine Suche nach der Dokumentennummer aufgerufen werden.

Nationaler Anhang NA (informativ)

Literaturhinweise

DIN EN ISO 11074/A1:2020-11, *Bodenbeschaffenheit — Wörterbuch — Änderung 1*
(ISO 11074:2015/Amd.1:2020); Deutsche Fassung EN ISO 11074:2015/A1:2020

DIN EN ISO 21365:2021-02, *Bodenbeschaffenheit — Leitfaden zur Erstellung konzeptioneller Standortmodelle für kontaminationsverdächtige Flächen* (ISO 21365:2019); Deutsche Fassung EN ISO 21365:2020

<i>Titel de:</i>	Sanierungstechniken an kontaminierten Standorten (ISO/DIS 24212:2023)
<i>Titel en:</i>	Remediation techniques applied at contaminated sites (ISO/DIS 24212:2023)
<i>Titel fr:</i>	Techniques de dépollution appliquées en sites et sols pollués (ISO/DIS 24212:2023)

Inhalt

	Seite
Europäisches Vorwort	8
Vorwort	9
Einleitung	10
1 Anwendungsbereich	11
2 Normative Verweisungen	11
3 Begriffe	12
4 Abkürzungen	14
5 Überblick über das Dokument	16
5.1 Aufbau dieses Dokuments	16
5.2 Zur Sanierung zugehörige Oberbegriffe	18
6 Grundsätze für die Bewertung der durchführbaren Sanierungsoptionen vor der Umsetzung des Sanierungsplans	20
6.1 Grundsätze für die Bewertung von durchführbaren Sanierungsoptionen	20
6.2 Bewährte Verfahren zur Durchführung einer Optionsbewertung	21
6.2.1 Allgemeines	21
6.2.2 Bestimmung durchführbarer Sanierungsoptionen	21
6.2.3 Detaillierte Auswertung der Optionsbewertung	22
6.2.4 Endgültige Auswahl der Sanierungsoption	24
7 Allgemeine Empfehlungen für die Auswahl und wirksame Umsetzung von Sanierungstechniken	24
7.1 Allgemeines	24
7.2 Allgemeine Betriebsfenster	25
7.2.1 Berücksichtigung des Standortumfelds	25
7.2.2 Einrichtung der Sanierung vor Ort	26
7.2.3 Voraussetzungen für den Einsatz einer Technik	26
7.2.4 Kollaterale Auswirkungen der Techniken	27
7.3 Laborprüfungen und Pilotversuche	27
8 Allgemeine Empfehlungen für den Umgang mit Gefährdungen und Risiken während der Sanierung	27
8.1 Allgemeines	27
8.2 Risikomanagementverfahren	28
8.2.1 Allgemeines	28
8.2.2 Gefährdungen und Kontrollen im Zusammenhang mit kontaminiertem Boden und Grundwasser	29
8.2.3 Asbest	29
8.2.4 Staub	29
8.2.5 Penetrante Gerüche oder geruchsintensive gesundheitsschädliche Stoffe in der Luft	30
8.2.6 Kontaminierter Abfall	30
8.2.7 Sanierungsausrüstung	30
8.2.8 Unerwartete Funde	30
8.2.9 Langzeitüberwachung	31
8.2.10 Arbeiten im Außenbereich	31
8.2.11 Arbeiten an abgelegenen oder abgeschotteten Orten	31

8.2.12	Unterirdische Versorgungsleitungen und Rohrleitungen.....	31
8.2.13	Stabilität des Untergrunds	31
8.2.14	Aushubarbeiten	32
8.2.15	Nicht detonierte Kampfmittel (UXO)	32
8.2.16	Umschlossene Räume	32
8.2.17	Gefährliche Chemikalien und Gefahrgüter	32
8.2.18	Gefährdungen bei von Hand ausgeführten Arbeiten	33
8.2.19	Ausrutschen, Stolpern und Abstürzen	33
8.2.20	Anlagen, Maschinen und Geräte.....	33
8.2.21	Lärm	34
9	Beschreibung der Sanierungstechniken.....	34
9.1	In-situ chemische Oxidation (ISCO)	34
9.1.1	Technische Grundlagen.....	34
9.1.2	Anwendungsbereich und Anwendbarkeit der Technik (Betriebsfenster)	34
9.1.3	Beschreibung der Technologie.....	34
9.1.4	Planungsüberlegungen und Auslegung.....	35
9.1.5	Wichtige Überwachungsparameter	35
9.1.6	Vorteile und Grenzen	35
9.1.7	Relevante Aspekte für Sicherheit, Gesundheit und Umweltschutz (SGU)	36
9.1.8	Mögliche andere Techniken oder Einschlussansätze, die mit dieser Technik kombiniert werden können	36
9.2	In-situ chemische Reduktion (ISCR).....	36
9.2.1	Technische Grundlagen.....	36
9.2.2	Anwendungsbereich und Anwendbarkeit der Technik	36
9.2.3	Beschreibung der Technologie.....	37
9.2.4	Planungsüberlegungen und Auslegung.....	37
9.2.5	Wichtige Überwachungsparameter	37
9.2.6	Vorteile und Grenzen	37
9.2.7	Relevante Aspekte für Sicherheit, Gesundheit und Umweltschutz (SGU)	38
9.2.8	Mögliche andere Techniken, die mit dieser Technik kombiniert werden können.....	38
9.3	Verbesserte biologische In-situ-Sanierung (EISB)	38
9.3.1	Technische Grundlagen.....	38
9.3.2	Anwendungsbereich und Anwendbarkeit der Technik (Betriebsfenster)	38
9.3.3	Beschreibung der Technologie.....	39
9.3.4	Planungsüberlegungen und Auslegung.....	39
9.3.5	Wichtige Überwachungsparameter	39
9.3.6	Vorteile und Grenzen	40
9.3.7	Relevante Aspekte für Sicherheit, Gesundheit und Umweltschutz (SGU)	40
9.3.8	Mögliche andere Techniken oder Einschlussansätze, die mit dieser Technik kombiniert werden können	40
9.4	Überwachte natürliche Konzentrationsabnahme (MNA).....	40
9.4.1	Technische Grundlagen.....	40
9.4.2	Anwendungsbereich und Anwendbarkeit der Technik (Betriebsfenster)	40
9.4.3	Beschreibung der Technologie.....	40
9.4.4	Planungsüberlegungen und Auslegung.....	41
9.4.5	Wichtige Überwachungsparameter	41
9.4.6	Vorteile und Grenzen	41
9.4.7	Relevante Aspekte für Sicherheit, Gesundheit und Umweltschutz (SGU)	41
9.4.8	Mögliche andere Techniken oder Einschlussansätze, die mit dieser Technik kombiniert werden können	42
9.5	Thermische In-situ-Sanierung (ISTR)	42
9.5.1	Technische Grundlagen.....	42
9.5.2	Anwendungsbereich und Anwendbarkeit der Technik (Betriebsfenster)	42
9.5.3	Beschreibung der Technologie.....	42
9.5.4	Planungsüberlegungen und Auslegung.....	43

9.5.5	Wichtige Überwachungsparameter	43
9.5.6	Vorteile und Grenzen	43
9.5.7	Relevante Aspekte für Sicherheit, Gesundheit und Umweltschutz (SGU)	44
9.5.8	Mögliche andere Techniken oder Einschlussansätze, die mit dieser Technik kombiniert werden können	44
9.6	Thermische In-situ-Desorption	44
9.6.1	Technische Grundlagen	44
9.6.2	Anwendungsbereich und Anwendbarkeit der Technik (Betriebsfenster)	44
9.6.3	Beschreibung der Technologie	44
9.6.4	Planungsüberlegungen und Auslegung	45
9.6.5	Wichtige Überwachungsparameter	45
9.6.6	Vorteile und Grenzen	45
9.6.7	Relevante Aspekte für Sicherheit, Gesundheit und Umweltschutz (SGU)	45
9.6.8	Mögliche andere Techniken oder Einschlussansätze, die mit dieser Technik kombiniert werden können	46
9.7	Bodenluftabsaugung (BLA)	46
9.7.1	Technische Grundlagen	46
9.7.2	Anwendungsbereich und Anwendbarkeit der Technik (Betriebsfenster)	46
9.7.3	Beschreibung der Technologie	46
9.7.4	Überlegungen zur Planung und Auslegung	46
9.7.5	Wichtige Überwachungsparameter	47
9.7.6	Vorteile und Grenzen	47
9.7.7	Relevante Aspekte für Sicherheit, Gesundheit und Umweltschutz (SGU)	47
9.7.8	Mögliche andere Techniken oder Einschlussansätze, die mit dieser Technik kombiniert werden können	47
9.8	Grundwasserbelüftung	48
9.8.1	Technische Grundlagen	48
9.8.2	Anwendungsbereich und Anwendbarkeit der Technik (Betriebsfenster)	48
9.8.3	Beschreibung der Technologie	48
9.8.4	Planungsüberlegungen und Auslegung	48
9.8.5	Wichtige Überwachungsparameter	48
9.8.6	Vorteile und Grenzen	49
9.8.7	Relevante Aspekte für Sicherheit, Gesundheit und Umweltschutz (SGU)	49
9.8.8	Mögliche andere Techniken oder Einschlussansätze, die mit dieser Technik kombiniert werden können	49
9.9	Mehrphasenextraktion (MPE)	49
9.9.1	Technische Grundlagen	49
9.9.2	Anwendungsbereich und Anwendbarkeit der Technik (Betriebsfenster)	49
9.9.3	Beschreibung der Technologie	50
9.9.4	Planungsüberlegungen und Auslegung	50
9.9.5	Wichtige Überwachungsparameter	50
9.9.6	Vorteile und Grenzen	51
9.9.7	Relevante Aspekte für Sicherheit, Gesundheit und Umweltschutz (SGU)	51
9.9.8	Mögliche andere Techniken oder Einschlussansätze, die mit dieser Technik kombiniert werden können	51
9.10	Duale druckunterstützte Flüssigkeitsextraktion (DPLE)	51
9.10.1	Technische Grundlagen	51
9.10.2	Anwendungsbereich und Anwendbarkeit der Technik (Betriebsfenster)	51
9.10.3	Beschreibung der Technologie	52
9.10.4	Planungsüberlegungen und Auslegung	52
9.10.5	Wichtige Überwachungsparameter	52
9.10.6	Vorteile und Grenzen	52
9.10.7	Relevante Aspekte für Sicherheit, Gesundheit und Umweltschutz (SGU)	52
9.10.8	Mögliche andere Techniken oder Einschlussansätze, die mit dieser Technik kombiniert werden können	53

9.11	Hydraulische Verfahren zur Grundwassersanierung	53
9.11.1	Technische Grundlagen	53
9.11.2	Anwendungsbereich und Anwendbarkeit der Technik (Betriebsfenster)	53
9.11.3	Beschreibung der Technologie	53
9.11.4	Planungsüberlegungen und Auslegung	54
9.11.5	Wichtige Überwachungsparameter	54
9.11.6	Vorteile und Grenzen	54
9.11.7	Relevante Aspekte für Sicherheit, Gesundheit und Umweltschutz (SGU)	54
9.11.8	Mögliche andere Techniken oder Einschlussansätze, die mit dieser Technik kombiniert werden können	54
9.12	Bodenwäsche	55
9.12.1	Technische Grundlagen	55
9.12.2	Anwendungsbereich und Anwendbarkeit der Technik (Betriebsfenster)	55
9.12.3	Beschreibung der Technologie	55
9.12.4	Überlegungen zur Planung und Auslegung	55
9.12.5	Wichtige Überwachungsparameter	55
9.12.6	Vorteile und Grenzen	56
9.12.7	Relevante Aspekte für Sicherheit, Gesundheit und Umweltschutz (SGU)	56
9.12.8	Mögliche andere Techniken oder Einschlussansätze, die mit dieser Technik kombiniert werden können	56
9.13	Mietenverfahren (Biopiling)	56
9.13.1	Technische Grundlagen	56
9.13.2	Anwendungsbereich und Anwendbarkeit der Technik (Betriebsfenster)	56
9.13.3	Beschreibung der Technologie	57
9.13.4	Planungsüberlegungen und Auslegung	57
9.13.5	Wichtige Überwachungsparameter	57
9.13.6	Vorteile und Grenzen	58
9.13.7	Relevante Aspekte für Sicherheit, Gesundheit und Umweltschutz (SGU)	58
9.13.8	Mögliche andere Techniken oder Einschlussansätze, die mit dieser Technik kombiniert werden können	58
9.14	Landfarming	58
9.14.1	Technische Grundlagen	58
9.14.2	Anwendungsbereich und Anwendbarkeit der Technik (Betriebsfenster)	59
9.14.3	Beschreibung der Technologie	59
9.14.4	Planungsüberlegungen und Auslegung	59
9.14.5	Wichtige Überwachungsparameter	60
9.14.6	Vorteile und Grenzen	60
9.14.7	Relevante Aspekte für Sicherheit, Gesundheit und Umweltschutz (SGU)	60
9.14.8	Mögliche andere Techniken oder Einschlussansätze, die mit dieser Technik kombiniert werden können	60
9.15	Verbrennung	60
9.15.1	Technische Grundlagen	60
9.15.2	Anwendungsbereich und Anwendbarkeit der Technik	60
9.15.3	Beschreibung der Technologie	61
9.15.4	Planungsüberlegungen und Auslegung	61
9.15.5	Wichtige Überwachungsparameter	61
9.15.6	Vorteile und Grenzen	62
9.15.7	Relevante Aspekte für Sicherheit, Gesundheit und Umweltschutz (SGU)	62
9.15.8	Mögliche andere Techniken oder Einschlussansätze, die mit dieser Technik kombiniert werden können	62
9.16	Technologien mit vertikaler Barriere (VBT)	62
9.16.1	Technische Grundlagen	62
9.16.2	Anwendungsbereich und Anwendbarkeit der Technik	63
9.16.3	Beschreibung der Technologie	63
9.16.4	Planungsüberlegungen und Auslegung	63

9.16.5	Wichtige Überwachungsparameter	64
9.16.6	Vorteile und Grenzen	64
9.16.7	Relevante Aspekte für Sicherheit, Gesundheit und Umweltschutz (SGU)	64
9.16.8	Mögliche andere Techniken oder Einschlussansätze, die mit dieser Technik kombiniert werden können	64
9.17	Abdeckungssysteme	64
9.17.1	Technische Grundlagen	64
9.17.2	Anwendungsbereich und Anwendbarkeit der Technik	65
9.17.3	Beschreibung der Technologie	65
9.17.4	Planungsüberlegungen und Auslegung	66
9.17.5	Wichtige Überwachungsparameter	66
9.17.6	Vorteile und Grenzen	66
9.17.7	Relevante Aspekte für Sicherheit, Gesundheit und Umweltschutz (SGU)	67
9.18	Systeme mit durchlässiger aktiver Barriere (PRB)	67
9.18.1	Technische Grundlagen	67
9.18.2	Anwendungsbereich und Anwendbarkeit der Technik (Betriebsfenster)	67
9.18.3	Beschreibung der Technologie	67
9.18.4	Planungsüberlegungen und Auslegung	68
9.18.5	Wichtige Überwachungsparameter	68
9.18.6	Vorteile und Grenzen	68
9.18.7	Relevante Aspekte für Sicherheit, Gesundheit und Umweltschutz (SGU)	68
9.18.8	Mögliche Kombinationen mit anderen Techniken und Technikvarianten	69
9.19	Immobilisierungstechniken für Böden und Feststoffe	69
9.19.1	Technische Grundlagen	69
9.19.2	Anwendungsbereich und Anwendbarkeit der Technik (Betriebsfenster)	69
9.19.3	Beschreibung der Technologie	69
9.19.4	Überlegungen zur Planung und Auslegung	70
9.19.5	Wichtige Überwachungsparameter	71
9.19.6	Vorteile und Grenzen	71
9.19.7	Relevante Aspekte für Sicherheit, Gesundheit und Umweltschutz (SGU)	72
9.19.8	Mögliche andere Techniken oder Ansätze zum Einschluss, die mit dieser Technik kombiniert werden können	72
9.20	Aushub	72
9.20.1	Technische Grundlagen	72
9.20.2	Anwendungsbereich und Anwendbarkeit der Technik (Betriebsfenster)	72
9.20.3	Beschreibung der Technologie	73
9.20.4	Planungsüberlegungen und Auslegung	73
9.20.5	Wichtige Überwachungsparameter	73
9.20.6	Vorteile und Grenzen	73
9.20.7	Relevante Aspekte für Sicherheit und Gesundheit	74
9.20.8	Mögliche andere Techniken oder Einschlussansätze, die mit dieser Technik kombiniert werden können	74
9.20.9	Mögliche andere Techniken oder Einschlussansätze, die mit dieser Technik kombiniert werden können	74
9.21	Abgas- und Abwasserbehandlungstechnologien	74
9.21.1	Allgemeines	74
9.21.2	Adsorption von Kohlenstoff	75
9.21.3	Abgasbehandlungstechnologien	75
9.21.4	Abwasserbehandlungstechnologien	76
Anhang A (informativ)	Auflistung der möglichen durchführbaren Sanierungsoptionen	79
Anhang B (informativ)	Gegenüberstellung der Kontaminantenfamilien und der möglichen Sanierungstechniken	85

Anhang C (informativ) Beispiele für Maßnahmen zur Unterstützung des Risikomanagements und der Beherrschung von Gesundheits- und Sicherheitsgefährdungen an Sanierungsstandorten	97
Anhang D (informativ) Bildliche beispielhafte Darstellungen der Sanierungstechniken.....	106
Literaturhinweise.....	121

Europäisches Vorwort

Dieses Dokument (prEN ISO 24212:2023) wurde vom Technischen Komitee ISO/TC 190 „Soil quality“ in Zusammenarbeit mit dem Technischen Komitee CEN/TC 444 „Umweltbezogene Charakterisierung fester Matrices“ erarbeitet, dessen Sekretariat von NEN gehalten wird.

Dieses Dokument ist derzeit zur parallelen Umfrage vorgelegt.

Anerkennungsnotiz

Der Text von ISO/DIS 24212:2023 wurde von CEN als prEN ISO 24212:2023 ohne irgendeine Abänderung genehmigt.

Vorwort

ISO (die Internationale Organisation für Normung) ist eine weltweite Vereinigung nationaler Normungsinstitute (ISO-Mitgliedsorganisationen). Die Erstellung von Internationalen Normen wird üblicherweise von Technischen Komitees von ISO durchgeführt. Jede Mitgliedsorganisation, die Interesse an einem Thema hat, für welches ein Technisches Komitee gegründet wurde, hat das Recht, in diesem Komitee vertreten zu sein. Internationale staatliche und nichtstaatliche Organisationen, die in engem Kontakt mit ISO stehen, nehmen ebenfalls an der Arbeit teil. ISO arbeitet bei allen elektrotechnischen Normungsthemen eng mit der Internationalen Elektrotechnischen Kommission (IEC) zusammen.

Die Verfahren, die bei der Entwicklung dieses Dokuments angewendet wurden und die für die weitere Pflege vorgesehen sind, werden in den ISO/IEC-Directives, Teil 1 beschrieben. Es sollten insbesondere die unterschiedlichen Annahmekriterien für die verschiedenen ISO-Dokumentenarten beachtet werden. Dieses Dokument wurde in Übereinstimmung mit den Gestaltungsregeln der ISO/IEC-Directives, Teil 2 erarbeitet (siehe www.iso.org/directives).

Es wird auf die Möglichkeit hingewiesen, dass einige Elemente dieses Dokuments Patentrechte berühren können. ISO ist nicht dafür verantwortlich, einige oder alle diesbezüglichen Patentrechte zu identifizieren. Details zu allen während der Entwicklung des Dokuments identifizierten Patentrechten finden sich in der Einleitung und/oder in der ISO-Liste der erhaltenen Patenterklärungen (siehe www.iso.org/patents).

Jeder in diesem Dokument verwendete Handelsname dient nur zur Unterrichtung der Anwender und bedeutet keine Anerkennung.

Für eine Erläuterung des freiwilligen Charakters von Normen, der Bedeutung ISO-spezifischer Begriffe und Ausdrücke in Bezug auf Konformitätsbewertungen sowie Informationen darüber, wie ISO die Grundsätze der Welthandelsorganisation (WTO, en: World Trade Organization) hinsichtlich technischer Handelshemmnisse (TBT, en: Technical Barriers to Trade) berücksichtigt, siehe www.iso.org/iso/foreword.html.

Dieses Dokument wurde vom Technischen Komitee ISO/TC 190, *Soil Quality*, Unterkomitee SC 7, *Impact Assessment*, erarbeitet.

Rückmeldungen oder Fragen zu diesem Dokument sollten an das jeweilige nationale Normungsinstitut des Anwenders gerichtet werden. Eine vollständige Auflistung dieser Institute ist unter www.iso.org/members.html zu finden.

Einleitung

Wenn bei einer Risikobewertung inakzeptable Risiken im Zusammenhang mit kontaminierten Böden an einem Standort festgestellt werden und Abhilfe geschaffen werden muss, ist es wahrscheinlich, dass eine Sanierung zur Beseitigung oder Verringerung der Kontamination durchgeführt und/oder andere Maßnahmen zur Beherrschung der Risiken ergriffen werden müssen, d. h. es sind Abhilfemaßnahmen erforderlich, um mögliche Auswirkungen von inakzeptablen Risiken zu verhindern, zu minimieren, zu beheben oder abzumildern. Die Auswahl, Umsetzung und Überprüfung von Sanierungstechniken erfordern eine ausführliche Standortanalyse und Risikobewertung.

Es muss ein Sanierungsplan mit entsprechenden technischen und organisatorischen Maßnahmen in Bezug auf die Kontaminationsquelle(n), den Transport und die Expositionspfade und/oder die Rezeptoren erstellt werden, um die bei den Untersuchungen und der Risikobewertung festgestellten nicht annehmbaren möglichen Auswirkungen und die damit verbundenen Risiken zu beherrschen. Diese Maßnahmen umfassen die Umsetzung einzelner oder kombinierter Sanierungstechniken zur Beseitigung von Verunreinigungen, die als freie Phase oder im Boden, im Wasser, in der Boden- oder Umgebungsluft vorliegen könnten.

Dieses Dokument enthält Leitlinien zu den wichtigsten Aspekten einer wirksamen Umsetzung einzelner oder kombinierter In-situ- oder On-site-Sanierungstechniken. Es wurde aufgrund der Nachfrage nach Mindestanforderungen für die Wahl und Überprüfung von Sanierungskonzepten zur Beherrschung der von Altlasten ausgehenden Risiken entwickelt.

Es soll Fachleute und Interessenvertreter über die wichtigsten Merkmale der gängigen Sanierungstechniken informieren. Es kann Fachleuten auch dabei helfen, anhand des Stands der Sanierungstechnologien technisch machbare Ansätze während der Phase der Optionsbewertung auszuwählen. Es ist nicht beabsichtigt, die Anwendung eines bestimmten Verfahrens in der jeweiligen Situation vorzugeben. Es handelt sich daher nicht um ein Rahmenwerk, das alle einzelnen Situationen abdecken kann.

ANMERKUNG 1 Einige der in diesem Dokument vorgestellten On-site-Verfahren können auch in Anlagen zur Off-site-Behandlung eingesetzt werden, letztere werden jedoch hier nicht behandelt (z. B. ist die Verbrennung am Standort, nicht aber die Verbrennung in einer fest installierten Anlage zur Off-site-Behandlung abgedeckt).

ANMERKUNG 2 Die Sanierungstechniken werden ständig weiterentwickelt. Möglicherweise spiegelt die Norm nicht alle Erkenntnisse wider, die im Zuge der technischen Weiterentwicklung gewonnen werden.

ANMERKUNG 3 Nicht alle verfügbaren Techniken werden behandelt. Unter anderem werden elektrokinetische Verfahren zur Entfernung von Verunreinigungen oder zur Verbesserung der Wirksamkeit anderer Verfahren (z. B. elektrokinetisch unterstützte biologische Sanierung) und Phytosanierung nicht behandelt.

1 Anwendungsbereich

Dieses Dokument enthält Leitlinien zu den wichtigsten Aspekten von Sanierungstechniken und ihrer Umsetzung. Es beschreibt kurz die Grundsätze, die wichtigsten Merkmale sowie die Vorteile und Grenzen einzelner oder kombinierter In-situ- und On-site-Sanierungstechniken, die bei der Auswahl und Bewertung der möglichen Optionen zu berücksichtigen sind. Diese beinhalten:

- die Art der zu behandelnden Verunreinigungen;
- die derzeitige und/oder beabsichtigte Nutzung des Standorts;
- lokale rechtliche, politische, sozioökonomische und ökologische Zusammenhänge.

Es folgt den Grundsätzen für eine nachhaltige Sanierung nach ISO 18504.

Der Anwendungsbereich dieses Dokuments beschränkt sich auf die Sanierung von Altlasten, d. h. von kontaminiertem Boden, kontaminierter Boden- oder Umgebungsluft oder kontaminiertem Grundwasser. Es gibt an, auf welche Phase/Matrix eine Technik abzielen kann, z. B. Flüssigkeit (Grundwasser, Gas, nichtwässrige Phase) oder Feststoff, und auf welche Verunreinigungen sie angewendet werden kann. Das Dokument enthält auch Informationen zu Gefährdungen, die mit der Durchführung einer Sanierung verbunden sein können.

Dieses Dokument enthält nicht:

- eine vollumfängliche Liste der Sanierungstechniken und -verfahren;
- Leitlinien für Standorte, die mit radioaktiven Substanzen, Krankheitserregern bzw. infektiösen Stoffen oder „pyrotechnischen Gegenständen (z. B. nicht detonierten Kampfmitteln)“ belastet sind;
- Leitlinien zu Ex-situ-Verfahren, die außerhalb des Standorts durchgeführt werden;
- Rahmenbedingungen, die alle einzelnen Situationen abdecken, oder die vorschreiben, welche Technik(en) in der jeweiligen Situation anzuwenden ist/sind.

2 Normative Verweisungen

Die folgenden Dokumente werden im Text in solcher Weise in Bezug genommen, dass einige Teile davon oder ihr gesamter Inhalt Anforderungen des vorliegenden Dokuments darstellen. Bei datierten Verweisungen gilt nur die in Bezug genommene Ausgabe. Bei undatierten Verweisungen gilt die letzte Ausgabe des in Bezug genommenen Dokuments (einschließlich aller Änderungen).

ISO 18504:2017, *Soil quality — Sustainable remediation*

ISO 11074:2015/Amd 2020, *Soil quality — Vocabulary*

ISO 21365:2019, *Soil quality — Conceptual site models for potentially contaminated sites*

3 Begriffe

Für die Anwendung dieses Dokuments gelten die Begriffe nach ISO 11074 und die folgenden Begriffe.

ISO und IEC stellen terminologische Datenbanken für die Verwendung in der Normung unter den folgenden Adressen bereit:

- ISO Online Browsing Platform: verfügbar unter <https://www.iso.org/obp>
- IEC Electropedia: verfügbar unter <https://www.electropedia.org/>

3.1

Kontaminationskette

Vorkommen und Beziehung zwischen Verunreinigungen, bevorzugten Pfaden und Rezeptoren

3.2

ingenieurtechnisch-orientiertes Verfahren

ingenieurtechnisches Verfahren (z. B. Aushub, Einschluss, Regelung des Wasserhaushalts) zur Entfernung der Kontaminationsquelle oder von Bodenmaterial oder zur Änderung von Ausbreitungspfaden, gegebenenfalls ohne Entfernung, Zerstörung oder Veränderung der Kontaminationsquelle

Anmerkung 1 zum Begriff: Einige dieser Techniken können bei der Umsetzung von Sicherungsmaßnahmen berücksichtigt werden.

[QUELLE: ISO 11074:2015, 6.2.1, modifiziert — Anmerkung 1 zum Begriff ergänzt.]

3.3

Umweltmedium

Boden, darunter liegendes Material, Sedimente, Oberflächenwasser, Grundwasser, Bodenluft und Umgebungsluft, das/die Verunreinigungen enthalten kann

[QUELLE: ISO 21365:2019, 3.4, modifiziert – „Luft“ durch „Umgebungsluft“ ersetzt.]

3.4

Ex-situ-Behandlungstechnik

Behandlungstechnik (z. B. anwendbar auf Boden, Grundwasser), die nach der Entnahme aus dem Medium angewendet wird

[QUELLE: ISO 11074:2015, 6.2.2, modifiziert — „Verfahren“ durch „Technik“ ersetzt.]

3.5

Gefährdung

Eigenschaft eines Stoffes oder Materials oder einer Situation, die unter bestimmten Umständen zu einem Schaden oder zu einer Verschmutzung führen kann

[QUELLE: ISO 11074:2015, 5.2.15]

3.6

In-situ-Behandlungstechnik

Behandlungstechnik (z. B. anwendbar auf Boden, Grundwasser), die ohne Entnahme aus dem Medium angewendet wird

Anmerkung 1 zum Begriff: Die Sanierungseinrichtung wird vor Ort aufgebaut und die Behandlung der Verunreinigungen wird direkt im Untergrund vorgenommen.

[QUELLE: ISO 11074:2015, 6.2.3, modifiziert — „-verfahren“ durch „-technik“ ersetzt und Anmerkung 1 zum Begriff ergänzt]

3.7

Off-site-Behandlung

Behandlung außerhalb des zu sanierenden Standorts

[QUELLE: ISO 11074:2015, 6.2.4]

3.8

On-site-Behandlung

Behandlung am zu sanierenden Standort

Anmerkung 1 zum Begriff: Bei kontaminierten Böden wird die Behandlung nach der Entnahme des Umweltmediums aus dem Boden durchgeführt.

[QUELLE: ISO 11074:2015, 6.2.5, modifiziert — Anmerkung 1 zum Begriff ergänzt.]

3.9

Sanierung

Prozess der Beseitigung, Verringerung oder Überwachung von Risiken durch kontaminierte Böden, Grundwasser oder Standorte für die menschliche Gesundheit oder die Umwelt

Anmerkung 1 zum Begriff: Eine Sanierung kann sich auf eine einzige Sanierungstechnik oder eine Kombination von Sanierungstechniken stützen.

[QUELLE: ISO 11074:2015, 6.1.17, modifiziert — „Verringerung“ nach „Beseitigung“ eingefügt und Anmerkung 1 zum Begriff ergänzt.]

3.10

Sanierungsplan

Sanierungskonzept

eine oder mehrere Sanierungstechnologien und zugehörige Arbeiten, durch die die Ziele der kontaminationsbezogenen Risikominderung erreicht werden

Anmerkung 1 zum Begriff: Die Wahl der Verfahren kann durch eine Vielzahl standortspezifischer Faktoren wie Topografie, Geologie, Hydrogeologie, Hochwasseranfälligkeit unterirdischer Leitungen und das Klima eingeschränkt sein.

[QUELLE: ISO 18504:2017, 3.5, modifiziert — „Sanierungskonzept“ und Anmerkung 1 zum Begriff ergänzt.]

3.11

nachhaltige Sanierung

sichere und rechtzeitige Beseitigung, Minderung und/oder Beherrschung inakzeptabler Risiken bei gleichzeitiger Optimierung des ökologischen, sozialen und wirtschaftlichen Werts der Arbeit

[QUELLE: ISO 18504:2017, 3.10]

3.12 Risiko

Kombination der Wahrscheinlichkeit oder Häufigkeit des Auftretens einer festgelegten Gefährdung und das Ausmaß der Konsequenzen des Auftretens

[QUELLE: ISO 11074:2015, 5.2.24]

3.13 inakzeptables Risiko

Risikoniveau, das Sanierungsmaßnahmen erfordert

Anmerkung 1 zum Begriff: Das Risikoniveau könnte durch Vergleich mit einem numerischen Schwellenwert oder durch Vergleich mit einer verbalen Definition bewertet werden. In verschiedenen Ländern oder sogar durch verschiedene Gesetze innerhalb eines Landes werden unterschiedliche Risikoniveaus als inakzeptabel angesehen.

[QUELLE: ISO 11074:2015, 5.2.24]

4 Abkürzungen

BTEX	Benzol-, Toluol-, Ethylbenzol-, Xylol-Isomere
CHP	katalytische H ₂ O ₂ -Ausbreitung (en: Catalyzed H ₂ O ₂ Propagations)
CSB	chemischer Sauerstoffbedarf
DNAPL	nicht-wässrige Schwerflüssigkeit (en: Dense Non Aqueous Phase Liquid)
DPLE	duale druckunterstützte Flüssigkeitsextraktion (en: Dual Pump Liquid Extraction)
ECH	Wärmeeintrag mit elektrischer Konduktion (en: Electric conduction heating)
SGU	Sicherheit, Gesundheit und Umweltschutz
EISB	Verbesserte biologische In-situ-Sanierung (en: Enhanced In-Situ Bioremediation)
ENA	natürliche Konzentrationsabnahme (en: Enhanced Natural Attenuation)
NAG	Funnel and Gate
AKG, GAK	Aktivkohlegranulat, granuliert Aktivkohle
HDPE	Polyethylen mit hoher Dichte (en: High Density PolyEthylene)
HRC	Wasserstoff freisetzende Verbindung (en: Hydrogen Release Compound)
IS S/S	In-situ-Stabilisierungs-/Verfestigungstechnik (en: In-Situ Stabilization/Solidification Technique)
ISC	In-situ-Verbrennung (en: In-Situ Combustion)
ISCO	in-situ chemische Oxidation (en: In-Situ Chemical Oxidation)
ISCR	in-situ chemische Reduktion (en: In-Situ Chemical Reduction)
ISTD	thermische In-situ-Desorption (en: In-Situ Thermal Desorption)

ISTR	thermische In-situ-Sanierung (en: In-Situ Thermal Remediation)
LCA	Ökobilanz (en: Life Cycle Analysis)
LNAPL	nicht-wässrige Leichtflüssigkeit (en: Light Non Aqueous Phase Liquid)
MNA	überwachte natürliche Konzentrationsabnahme (en: Monitored Natural Attenuation)
MPE	Mehrphasenextraktion
MTBE	Methyl-Ter-Butyl-Ether
NSB	natürlicher Sauerstoffbedarf
NSZD	natürlicher Abbau der Quellenzone (en: Natural Source Zone Depletion)
ORC	Sauerstoff freisetzende Verbindung (en: Oxygen Release Compound)
ORP	Sauerstoffreduktion P
P & T	Pump-and-Treat (Abpumpen und Behandeln)
PAK	Polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe
PBDD	polybromierte Dibenzo-p-dioxine
PBDF	polybromierte Dibenzofurane
PCDD	polychlorierte Dibenzodioxine
PCDF	polychlorierte Dibenzofurane
PCB	polychlorierte Biphenyle
PCDD	polychlorierte Dibenzodioxine
PCDF	polychlorierte Dibenzofurane
PBDD	polybromierte Dibenzo-p-dioxine
PBDF	polybromierte Dibenzofurane
PCE	Perchlorethylen oder Tetrachlorethen
PRB	durchlässige aktive Barriere (en: Permeable Reactive Barrier)
PVC	Polyvinylchlorid
POP	persistenter organischer Schadstoff (en: Persistent Organic Pollutant)
RoC	Erfassungsradius (en: Radius of Capture)
RoI	Absenkungsradius (en: Radius of Influence)
RZ	Reaktive Zone

STA	Dampfeinblasung (en: Stream Air Injection)
BLA	Bodenluftabsaugung
TCE	Trichlorethen
TCH	Wärmeeinbringung durch thermische Konduktion (en: Thermal Conductive Heating)
TPH	Gesamt-Mineralölkohlenwasserstoff (en: Total Petroleum Hydrocarbon)
VBT	Techniken mit vertikaler Barriere
VFD	Frequenzumrichter (en: Variable Frequency Drive)
VOC	flüchtige organische Verbindungen (en: Volatile Organic Compounds)
ZVI	nullwertiges Eisen (en: Zero-Valent Iron)
UXO	nicht-detonierte Kampfmittel (en: Unexploded Ordnance)

5 Überblick über das Dokument

5.1 Aufbau dieses Dokuments

Der Aufbau dieses Dokuments ist in Bild 1 dargestellt.

Abschnitt 5 – Überblick über das Dokument	Abschnitt 5.1 – Aufbau dieses Dokuments
	5.2 Zur Sanierung zugehörige Oberbegriffe
Abschnitt 6 – Grundsätze für die Bewertung der durchführbaren Sanierungsoptionen vor der Umsetzung des Sanierungsplans	6.1 Grundsätze für die Bewertung von durchführbaren Sanierungsoptionen
	6.2 Bewährte Verfahren zur Durchführung einer Optionsbewertung
Abschnitt 7 – Allgemeine Empfehlungen für die Auswahl und wirksame Umsetzung von Sanierungstechniken	7.1 Allgemeines
	7.1 Allgemeine Betriebsfenster
	7.2 Laborprüfungen und Pilotversuche
Abschnitt 8 – Allgemeine Empfehlungen für den Umgang mit Gefährdungen und Risiken während der Sanierung	8.1 Allgemeines
	8.2 Risikomanagementverfahren
Abschnitt 9 – Beschreibung der Sanierungstechniken	9.1 bis 9.21

Bild 1 — Inhalt des vorliegenden Dokuments und Zusammenspiel der beschreibenden Abschnitte

Die in Abschnitt 9 vorgestellten Sanierungstechniken sind in Tabelle 1 aufgeführt.

Tabelle 1 — In der Norm vorgestellte Sanierungstechniken

9.1	In-situ chemische Oxidation (ISCO)
9.2	In-situ chemische Reduktion (ISCR)
9.3	Verbesserte biologische In-situ-Sanierung (EISB)
9.4	Überwachte natürliche Konzentrationsabnahme (MNA)
9.5	Thermische In-situ-Sanierung (ISTR)
9.6	Thermische In-situ-Desorption
9.7	Bodenluftabsaugung (BLA)
9.8	Grundwasserbelüftung
9.9	Mehrphasenextraktion (MPE)
9.10	Duale druckunterstützte Flüssigkeitsextraktion (DPLE)
9.11	Hydraulische Verfahren zur Grundwassersanierung
9.12	Bodenwäsche (ex-situ)
9.13	Mietenverfahren (Biopiling)
9.14	Landfarming
9.15	Verbrennung
9.16	Techniken mit vertikaler Barriere (VBT)
9.17	Abdeckungssysteme
9.18	Systeme mit durchlässiger aktiver Barriere (PRB)
9.19	Immobilisierungstechniken für Böden und Feststoffe
9.20	Aushub
9.21	Abgas- und Abwasserbehandlungstechnologien

Angaben zu den jeweiligen Verfahren sind in Abschnitt 9 und den folgenden Überschriften aufgeführt.

1. Sanierungskonzept
2. Anwendungsbereich und Anwendbarkeit der Technik (d. h. Betriebsfenster)
3. Beschreibung der Technologie (d. h., wie das Verfahren durchgeführt/umgesetzt wird)
4. Planungsüberlegungen und Auslegung
5. Wichtige Überwachungsparameter
6. Vorteile und Grenzen
7. Relevante Aspekte für Sicherheit, Gesundheit und Umweltschutz (SGU)
8. Mögliche Kombination mit anderen Sanierungs-/Einschlusstechniken

Die Grundsätze für die Bewertung von Optionen sind in Abschnitt 6 beschrieben. Allgemeine Empfehlungen für die Wahl der Sanierungstechniken im Rahmen des Optionsbewertungsverfahrens sind in Abschnitt 7 angegeben. Allgemeine Informationen zur Vermeidung von Gefährdungen und Risiken, die bei der Umsetzung eines Sanierungskonzeptes für einen kontaminierten Standort zu berücksichtigen sind, werden in Abschnitt 8 vorgestellt. Eine genauere Beschreibung einer Reihe von einzelnen Techniken und entsprechende Empfehlungen, die bei einer Optionsbewertung in Betracht gezogen werden können, sind in Abschnitt 9 beschrieben. Die möglichen Kombinationen von Verfahren und unterstützenden Techniken werden ebenfalls in diesem Abschnitt beschrieben. Alle Techniken werden in Anhang D bebildert dargestellt.

ANMERKUNG 1 Abschnitt 7 muss vor Anwendung der Angaben in Abschnitt 9 gelesen werden.

5.2 Zur Sanierung zugehörige Oberbegriffe

Ein Sanierungsplan zielt darauf ab, inakzeptable Auswirkungen und damit verbundene Risiken, die bei den Untersuchungen und der Risikobewertung festgestellt wurden, zu beherrschen (einschließlich der Fälle, in denen die Beseitigung einer konzentrierten Verunreinigung technisch komplex und finanziell unverhältnismäßig ist). Dieses Konzept stützt sich auf das konzeptionelle Standortmodell (CSM, en: Conceptual Site Model), welches nach ISO 21365 [1] entwickelt werden sollte.

In Hinblick auf eine Verunreinigung mit einer punktuellen Quelle liegt der Schwerpunkt des Sanierungskonzeptes in der Regel auf der Bestimmung der Verunreinigungsquelle und deren Beseitigung sowie auf der Stabilisierung und/oder Eindämmung und/oder Begrenzung der Ausbreitung der von dieser Quelle ausgehenden Kontamination. Der Sanierungsplan kann den Einsatz von Behandlungstechniken vorsehen, die einzeln oder kombiniert in einem Behandlungsstrang die im Umweltmedium vorhandenen Verunreinigungen zersetzen, umwandeln, entfernen oder stabilisieren. Ein Sanierungsplan kann auch dabei helfen, diffuse Kontamination handzuhaben.

Die Erstellung eines Sanierungsplans stützt sich u. a. auf eine Bewertung der Optionen. Anhand der Optionsbewertung kann entschieden werden, welche möglichen Sanierungsoptionen für eine bestimmte Kontaminationskette verfügbar sind, um die inakzeptablen Risiken zu beherrschen. Eine Kombination mehrerer Techniken kann die Effizienz eines Sanierungsplans verbessern. In solchen Fällen können Techniken als Teil eines „Behandlungsstrangs“ kombiniert werden und als Option im Rahmen der Bewertung in Betracht gezogen werden. „Unterstützende Techniken“ (chemisch und/oder physikalisch) können ebenfalls eingesetzt werden, um die Wirksamkeit von Extraktionsverfahren zu verbessern. Das trifft zum Beispiel auf die thermisch unterstützte Bodenluftabsaugung zu.

Die Sanierung sollte keine wesentlichen neuen Risiken mit sich bringen und für den Zeitraum, über den die Kontaminationsrisiken beherrscht werden müssen, wirksam und nachhaltig sein. Eine nachhaltige Sanierung regt dazu an, die erneute Nutzung eines Standorts von Beginn eines Sanierungsvorhabens an in Betracht zu ziehen, um Synergien des Erschließungsprozesses zu nutzen und gleichzeitig die Kosten und Umweltauswirkungen zu minimieren, die mit der erneuten sinnvollen Nutzung von Standorten einhergehen. Dabei wird sich unter anderem auf die in ISO 18504 [2] dargelegten Grundsätze der nachhaltigen Sanierung gestützt.

Sanierungstechniken können auf vielfältige Weise eingestuft werden, z. B. nach dem Ort der Behandlung, der Art des Verfahrens, auf dem die Behandlung beruht (physikalisch, thermisch, chemisch, biologisch usw.), der Art der zu behandelnden Verunreinigung oder der zu erreichenden Matrix.

Bei einer Einteilung nach dem Ort der Sanierung lassen sich folgende Unterscheidungen zwischen den für ein Sanierungskonzept infrage kommenden Behandlungstechniken treffen (Bild 2):

- Alle „**In-situ-Behandlungstechniken**“, die im Boden und für diese Verunreinigungen angewendet werden können oder „**physikalische, ingenieurtechnisch-orientierte Verfahren**“ wie Einschluss oder Techniken zur Regelung des Wasserhaushalts. Diese Techniken behandeln Verunreinigungen direkt im Boden oder von der Bodenoberkante aus oder entfernen die Verunreinigungen aus der Matrix des Umweltmediums (ohne Nachbehandlung). Für In-situ-Behandlungstechniken wird die Sanierungseinrichtung vor Ort aufgebaut und die Behandlung der Verunreinigungen wird direkt am Boden

vorgenommen. Sie können als „**In-situ-Sanierungstechniken**“ bezeichnet werden. Sie werden auf das Medium und die Verunreinigungen innerhalb der Standortgrenzen angewendet.

- Alle „**Ex-situ-Behandlungstechniken**“, die auf das entnommene Umweltmedium angewendet werden können (zu behandelndes Medium bzw. zu behandelnde Verunreinigung). „**Physikalische ingenieurtechnisch-orientierte Verfahren**“ wie die Extraktion bilden die Voraussetzung für die Anwendung einer Ex-situ-Behandlung. Die Sanierungseinrichtung wird vor Ort aufgebaut und die Behandlung erfolgt oberirdisch. Wird die Behandlung vor Ort durchgeführt, spricht man von „**On-site-Techniken**“ (z. B. wird der Boden ausgehoben oder das Grundwasser abgepumpt und in mobilen Anlagen behandelt, die auf dem Gelände aufgestellt werden). Erfolgt die Behandlung außerhalb des Standorts, spricht man von „**Off-site-Techniken**“ (z. B. werden kontaminierte Böden ausgehoben oder Grundwasser abgepumpt und an eine ordnungsgemäß zugelassene Anlage geliefert).

ANMERKUNG 1 Off-site-Techniken werden in diesem Dokument nicht behandelt. Sie stützen sich auf standort-unabhängige Verfahren, die als „Abfallbehandlungstechnologien“ angesehen werden können, wobei auch sehr spezifische lokale/nationale Anforderungen hinsichtlich der Behandlungsziele und der Möglichkeit der Wiederverwendung des behandelten Bodens gelten.

Behandlungstechniken können auch danach eingestuft werden, ob sie auf der Umwandlung oder Beseitigung der Verunreinigung beruhen und ob sie in situ oder ex situ angewendet werden (siehe Anhang B).

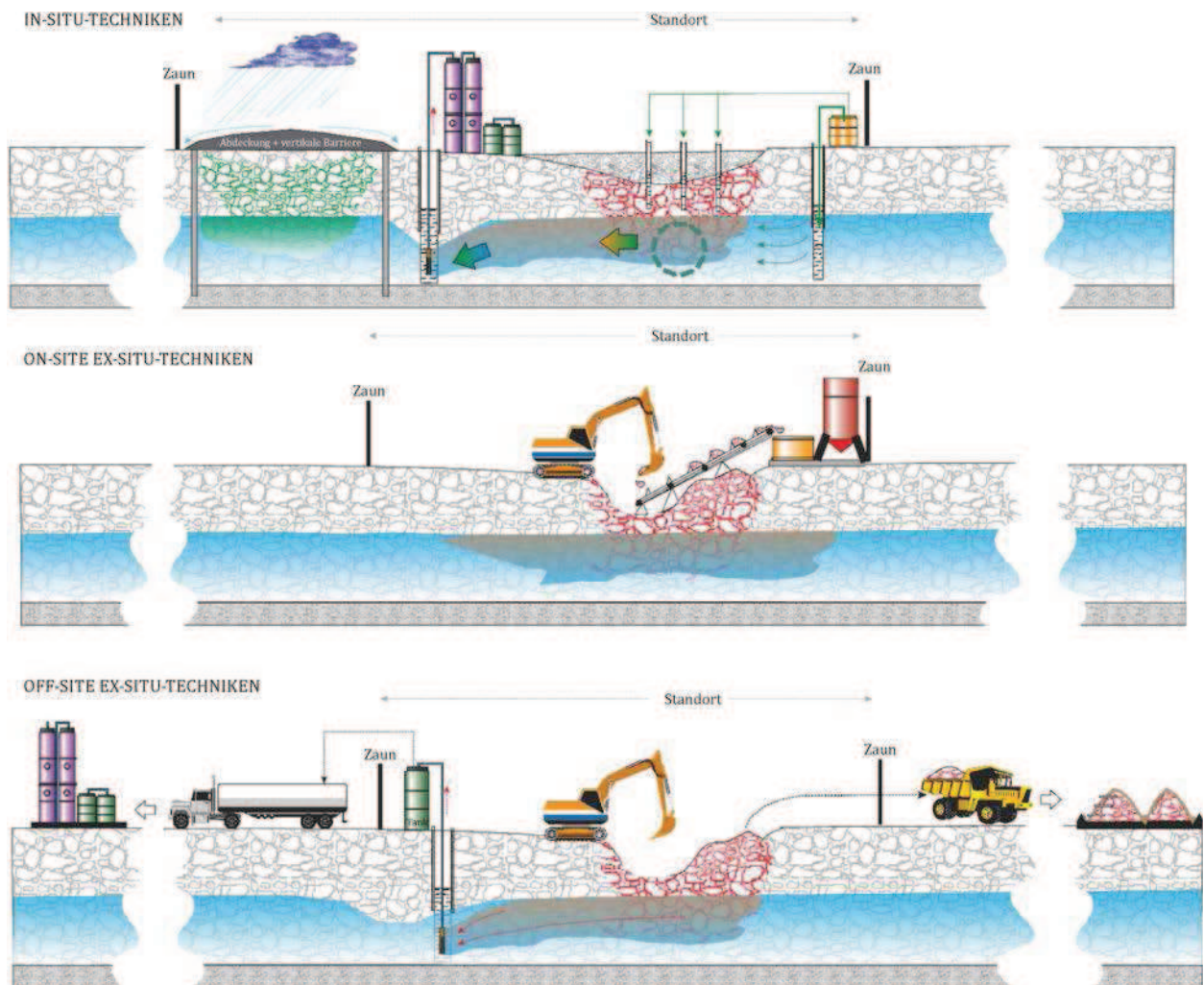


Bild 2 — Schematische Darstellung der möglichen Behandlungstechniken

ANMERKUNG 2 Wie in den hervorgehobenen Feldern dargestellt, werden in dieser Norm nur On-site- und In-situ-Techniken behandelt.

6 Grundsätze für die Bewertung der durchführbaren Sanierungsoptionen vor der Umsetzung des Sanierungsplans

6.1 Grundsätze für die Bewertung von durchführbaren Sanierungsoptionen

Wenn nach einer Risikobewertung im Zusammenhang mit kontaminierten Böden weitere Maßnahmen erforderlich sind, d. h. inakzeptable Risiken festgestellt wurden, die beherrscht werden müssen, erfolgt die Bewertung der Sanierungsoptionen (siehe Bild 3). Ihr Hauptziel ist es, die Auswahl einer einzelnen oder einer Kombination von Sanierungstechnik(en), die durchführbar und angemessen ist/sind und in einem angemessenen Verhältnis zu den technischen und finanziellen Herausforderungen steht/stehen, zu unterstützen.

Das Optionsbewertungsverfahren umfasst drei Hauptschritte:

1. Ermittlung technisch durchführbarer Sanierungsoptionen für jede relevante Kontaminationskette, bei der die Risikobewertung ergeben hat, dass sie ein inakzeptables Risiko darstellt;
2. Durchführung einer detaillierten Bewertung der technisch durchführbaren Sanierungsoptionen, um die am besten geeignete Option für eine bestimmte Kontaminationskette zu ermitteln.

Erarbeitung eines Sanierungskonzepts, das alle relevanten Kontaminationsketten und eine ausreichende Risikominderung berücksichtigt, gegebenenfalls durch Kombination von Sanierungsoptionen

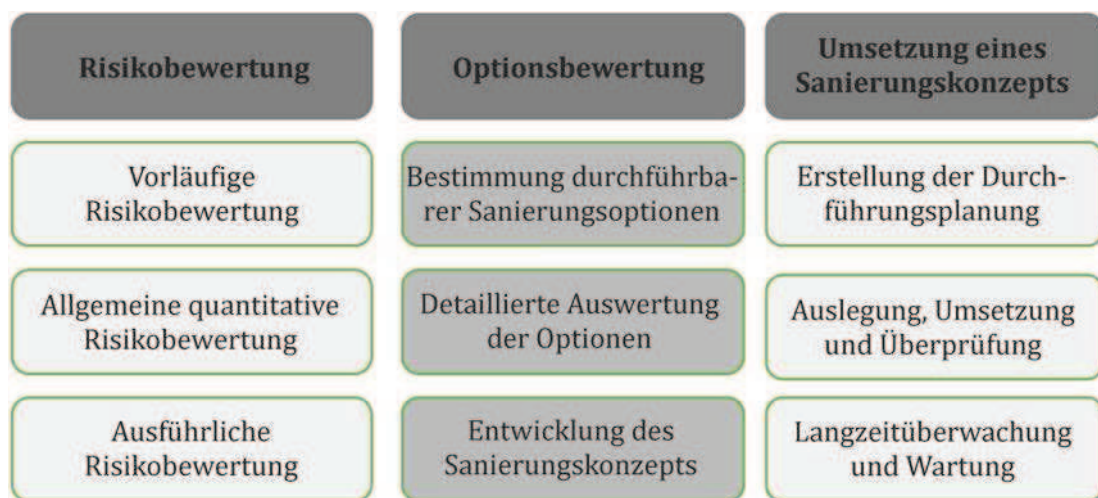


Bild 3 — Vorgehensweise von der Risikobewertung über die Optionsbewertung bis zum Sanierungsplan (Quelle: angepasst aus dem früheren Leitfaden CRL11 [3])

ANMERKUNG 1 Ein Sanierungsplan darf für den Umgang mit inakzeptablen Gesundheitsgefährdungen, aber auch für den Schutz der Umwelt und von Ressourcen oder für interne Verfahren usw. erstellt werden).

Die Bewertung der Optionen konzentriert sich in erster Linie auf die Kontaminationsketten (Quelle-Expositionspfad-Rezeptor-Kette), die nach der Risikobewertung inakzeptable Risiken darstellen, und woraufhin eine Entscheidung zur Sanierung getroffen wurde. Die Gesamtbewertung aller Optionen dient dazu, unter Berücksichtigung aller örtlichen Gegebenheiten des Standorts und seiner Umgebung die Optionen zu ermitteln, die (entweder einzeln, in Kombination oder als Abfolge von Techniken im Laufe der Zeit) das beste Gesamtkonzept für die Sanierung des Standorts insgesamt bieten. Die Bewertung der Optionen ist mit der Entwicklung eines Sanierungsplans vor dessen Umsetzung abgeschlossen. Während der Umsetzung des

Sanierungsplans muss die Effizienz des vorgesehenen Konzepts überprüft werden, um sicherzustellen, dass die Sanierungsziele erreicht werden (z. B. durch Risikobewertungen zur Überprüfung der Akzeptanz der geplanten Restkonzentrationen).

ANMERKUNG 2 Diese Norm legt den Schwerpunkt nur auf die Bereitstellung allgemeiner Leitlinien für den Gesamtansatz der Optionsbewertung.

In der Praxis könnte es eine Reihe von Möglichkeiten zur Minderung oder Beherrschung inakzeptabler Risiken geben, die alle jeweils Vorteile und Grenzen haben. Der in diesem Dokument gegebene Überblick über die Merkmale bekannter Sanierungstechniken, insbesondere im Hinblick auf die Verunreinigungen und die Rahmenbedingungen, unter denen sie angewendet werden können, kann alle drei Schritte der Bewertung von Sanierungsoptionen unterstützen. Insbesondere sollte er zum Teil die Bewertung unterstützen, welche Optionen, entweder einzeln oder in Kombination oder als Abfolge, den besten Gesamtansatz zur Erreichung der Sanierungsziele für den Standort insgesamt bieten, wobei verschiedene Parameter berücksichtigt werden. Behandlungsstränge zur Sanierung können auch eingesetzt werden, um die wirksamsten Aspekte mehrerer Technologien und/oder Produkte in einer Weise zu kombinieren, die die Grenzen der einzelnen Technologien überwindet.

6.2 Bewährte Verfahren zur Durchführung einer Optionsbewertung

6.2.1 Allgemeines

Wenn eine Entscheidung zur Sanierung gefallen ist, muss die Optionsbewertung durchgeführt werden. Die durch die Risikobewertung ermittelten Kontaminationsketten werden nun zu „relevanten Kontaminationsketten.“ Sie stellen die inakzeptablen Risiken für die ermittelten Rezeptoren dar. Nur eine Fachkraft sollte eine Optionsbewertung durchführen. Am Ende einer Optionsbewertungsphase sollte ein Optionsbewertungsbericht erstellt werden. Nachhaltigkeit sollte bei der Bewertung von Optionen und der Entwicklung von Strategien ein bestimmender Aspekt sein.

6.2.2 Bestimmung durchführbarer Sanierungsoptionen

In dieser ersten Phase geht es um die Ermittlung und Erstellung einer Auswahlliste von durchführbaren Sanierungsoptionen. Sie umfasst eine erste Auswahl von Sanierungsoptionen nach Prüfung aller möglichen Techniken, die für die Kontaminationsketten und die Gegebenheiten des Standorts relevant sind. Je nachdem, welches Umweltmedium von der Verunreinigung betroffen ist und um welche Verunreinigungen es sich handelt (ob organisch oder anorganisch), können die Sanierungstechniken gewählt werden. Die Ziele des Sanierungsplans können als Kriterien für diese Auswahl herangezogen werden, d. h.:

- Notwendigkeit von Schutzmaßnahmen und Unterbrechung der Kontaminationspfade;
- Notwendigkeit der Entfernung, Zersetzung oder Umwandlung der betreffenden Verunreinigungen in der Kontaminationsquelle;
- Notwendigkeit der Behandlung von Grundwasser (vor Ort); und
- Notwendigkeit der Behandlung von austretenden Gasen (vor Ort).

Insgesamt müssen bei der Auswahl der durchführbaren Sanierungsoptionen folgende Kriterien vorab berücksichtigt werden (siehe Anhang A mit einer Auflistung durchführbarer Sanierungsoptionen):

- Ist die Behandlungstechnik für den fraglichen Verunreinigungstyp geeignet (siehe Anhang B)?
- Kann die Behandlungstechnik auf das zu behandelnde Umweltmedium (oder die Matrix) ausgerichtet werden (z. B. Boden, Grundwasser, Boden/Feststoff-Matrix, Bodenluftmatrix usw.)?
- Ist die Behandlungstechnik mit den Gegebenheiten des Standorts vereinbar (Zugang, Topografie usw.)?

- Kann mit der Technik die für die Sanierungsziele erforderliche Zeit eingehalten werden (z. B. die erwartete Beseitigung der Kontamination im Medium)?
- Kann die erwartete Größenordnung der erforderlichen Beseitigung durch die Technik erreicht werden?
- Würde die Anwendung der Behandlungstechnik die Sanierungsziele erreichen (d. h. im Hinblick auf die erwartete Beseitigung der Kontamination im Medium)?
- Müsste die Technik mit anderen Techniken kombiniert werden (z. B. als Teil eines Behandlungsstrangs), um die Sanierungsziele zu erreichen?

In einigen Fällen kann auch die Art der Sanierung ein zu berücksichtigendes Kriterium sein (physikalisch, chemisch, biologisch). Darüber hinaus kann die Matrix „Sanierungstechniken“ versus „Verunreinigungen, die gezielt behandelt werden können“ als Hilfe bei der Auswahl der wichtigsten Techniken in dieser Phase dienen (siehe Anhang B). Die Standortinformationen müssen für diese Aufgabe auf dem neuesten Stand sein. Eine solche unterstützende Matrix kann jedoch keine spezifischen Studien ersetzen, die für eine vollständige Charakterisierung des Standorts erforderlich sind.

ANMERKUNG 1 Einige Länder haben öffentlich zugängliche Online-Tools entwickelt, die ähnliche Konzepte nutzen wie die in Anhang A, um diese Auswahl zu unterstützen.

ANMERKUNG 2 In dieser Phase müssen die Ziele und möglichen Reaktionen auf etwaige behördliche Kontrollen, die bei Beginn der Sanierung erforderlich sein könnten, festgelegt werden.

6.2.3 Detaillierte Auswertung der Optionsbewertung

In dieser zweiten Phase werden die in der vorangegangenen Phase gewählten Optionen bewertet und es wird entschieden, welche Optionen am besten geeignet sind, um jede relevante Kontaminationskette kurz- und längerfristig zu behandeln.

Die erforderliche Bewertung ist eine vergleichende Beurteilung der verschiedenen möglichen Sanierungsoptionen unter Berücksichtigung der mit jeder Option verbundenen Vorteile, Nachteile und Kosten. Für die Durchführung dieser Bewertung und den anschließenden Vergleich sind Kriterien erforderlich. Die Beteiligten sollten sich bereits in einer frühen Phase auf eine Reihe ganzheitlicher Kriterien einigen, die alle drei Dimensionen der nachhaltigen Sanierung widerspiegeln: Umwelt, Gesellschaft und Wirtschaft (siehe ISO 18504). Technische, normative und organisatorische Kriterien sowie rechtliche und regulatorische Gesichtspunkte können ebenfalls berücksichtigt werden (Tabelle 1).

Eine Sanierungstechnik, die für eine bestimmte Kontaminationskette die am besten geeignete Lösung zu sein scheint, könnte auch negative oder positive Auswirkungen auf die Umwelt oder die Gesellschaft außerhalb des betrachteten Standorts haben. Die Berücksichtigung dieser Auswirkungen führt zu der Notwendigkeit, Nachhaltigkeitskriterien bei der Wahl der am besten geeigneten Sanierungstechniken für einen bestimmten Standort mit einzubeziehen. Wenn ein nachhaltiger Ansatz verfolgt wird, kann er dazu beitragen, dass der Nutzen der Sanierung größer ist als ihre Auswirkungen.

Die Optionsbewertung sollte es ermöglichen, in der Auswahl der verfügbaren Optionen die beste wirtschaftliche und nachhaltige Option zu erkennen. Sie sollte es Fachleuten ermöglichen, die wirtschaftlichen und nachhaltigen Auswirkungen einer Reihe von Sanierungsoptionen abzuwägen, um die Entscheidungsträger bei der Suche und Auswahl der Option zu unterstützen, mit der die Sanierungsziele am besten erreicht werden können [4]. Im Hinblick auf eine nachhaltige Sanierung sollte die Fähigkeit der jeweiligen Option, die Sanierungsziele sicher und rechtzeitig zu erreichen und gleichzeitig den ökologischen, sozialen und wirtschaftlichen Wert der Arbeiten zu optimieren, in Relation zu den anderen Optionen berücksichtigt werden [3].

ISO 18504 zeigt verschiedene mögliche Ansätze für eine detaillierte Bewertung von Optionen auf. Diese Ansätze können auf einer qualitativen Analyse (z. B. narrative Analyse, nichtparametrische Priorisierung), einer halbquantitativen Analyse (z. B. Multikriterienanalyse, paarweiser Vergleich) oder einer quantitativen Analyse (z. B. Kosten-Nutzen-Analyse, Lebenszyklusanalyse, Bewertung des (ökologischen) Fußabdrucks,

Kostenwirksamkeitsanalyse) beruhen. Der zu verfolgende Bewertungsansatz sollte jedoch von Fall zu Fall angepasst werden [3].

In dieser Phase sollten mindestens zwei Optionen geprüft werden. Die ausführliche Bewertungsphase ermöglicht, eine vergleichende Diskussion der ausgewählten Sanierungsoptionen zu führen und gegebenenfalls Empfehlungen für Prüfungen und ergänzende Studien zu geben [3].

In der Praxis umfasst die ausführliche Bewertung der Optionen in der Regel eine Kosten-Nutzen-Analyse. Das Ergebnis dieser Art von Bewertung kann in einer Übersichtstabelle festgehalten werden, in der die Bewertung der verschiedenen Sanierungsoptionen für jedes der gewählten Kriterien dargestellt wird. Zur Unterstützung dieser Bewertung können Instrumente der Multikriterienanalyse eingesetzt werden. Nach ISO 18504 [3] können fünf Hauptgruppen von Kriterien berücksichtigt werden.

ANMERKUNG Ein Plan zur Wiederherstellung der Bodengesundheit und der damit verbundenen ökologischen Funktionen des Bodens könnte ebenfalls erforderlich sein (je nach Sanierungstechnik und geplanter Flächennutzung). Der Boden sollte nach der Sanierung in einem besseren Zustand sein als vorher und dazu gehört nicht nur die Entfernung von Verunreinigungen. Dieser Aspekt sollte bei der Beurteilung von Sanierungstechniken im Rahmen der Optionsbewertung berücksichtigt werden.

Tabelle 2 — Mögliche Kriterien, die bei einer ausführlichen Bewertung zu berücksichtigen sind
(Quelle: adaptiert von ADEME UPDS 2017 [5] und ISO 18504 [3])

1. Gruppe der Auswirkungskriterien	2. Beispiele für Auswirkungskriterien
Technische, normative und organisatorische Kriterien	— Art der Verunreinigung — belastete Umweltmedien oder -matrix — Tiefe der Kontamination unter der Bodenoberkante
wirtschaftliche Kriterien	— direkte und indirekte Kosten der Sanierungsmaßnahmen (einschließlich ggf. erforderlicher Nutzungsbeschränkungen, notwendiger Abhilfemaßnahmen und ggf. deren Aufrechterhaltung)
Umweltkriterien	— Gesamtauswirkungen auf alle Ökosysteme, einschließlich der Auswirkungen auf die Atmosphäre, die Raumluft, die Bodengesundheit und die damit verbundenen ökologischen Bodenfunktionen, die geotechnischen Eigenschaften, das Grundwasser und das Oberflächenwasser — Energieverbrauch — Verringerung der Kontaminationsmasse — Abfallaufkommen und Abfallwiederverwendung — Beitrag zur kreislauforientierten Landnutzung und zur Bauausführung
sozialpolitische und Gesundheitsschutz-/Sicherheitskriterien	— Gesundheitsschutz und Sicherheit (Belästigungen durch die Baustelle (optische, lärmbedingte, geruchliche...)) (siehe Abschnitt 8) — Zunahme des Verkehrsaufkommens (auch in Bezug auf die oben genannten Umweltkriterien) — Ethik und Gleichstellung — Gemeinden und deren Einbindung: Akzeptanz des vorgeschlagenen Sanierungsvorhabens (erwartete künftige Nutzung, Nutzungsbeschränkungen, Sanierungsziele und verbleibende Restkontamination) — Unwägbarkeiten und Nachweise
rechtliche und regulatorische Kriterien	— verbleibende Einschränkungen — erforderliche anschließende Überwachung — Abfallmanagement

6.2.4 Endgültige Auswahl der Sanierungsoption

In dieser Phase erfolgt die endgültige Entscheidung für eine Sanierungsoption. In einigen Fällen ist die Auswahl nur einer Option möglicherweise nicht zweckmäßig oder ausreichend. Es könnte mehr als eine oder verschiedene Arten von relevanten Kontaminationsketten geben. Die endgültig gewählte Option könnte eine einzelne Technik oder eine Kombination von Sanierungstechniken (dies könnten verfahrensbasierte oder ingenieurtechnisch-orientierte Techniken sein) sowie die erforderlichen Schutzmaßnahmen und etwaigen Einschränkungen für bestimmte Nutzungen am Standort umfassen.

Diese werden in den noch zu entwickelnden Sanierungsplan aufgenommen. Bei der Suche nach einer Option, die kombinierte Techniken umfasst, sollte berücksichtigt werden, wie dies in der Praxis funktionieren würde. Wenn keine entsprechenden Optionen gefunden werden können, muss das gesamte Verfahren wiederholt und eine Neubewertung durchgeführt werden. Es handelt sich um einen theoretischen Ansatz; die getroffenen Entscheidungen müssen durch Prüfungen der Behandelbarkeit und Durchführbarkeit im Labor validiert werden, wenn es sich um komplexe Situationen handelt, die mit hohem Aufwand verbunden sind.

7 Allgemeine Empfehlungen für die Auswahl und wirksame Umsetzung von Sanierungstechniken

7.1 Allgemeines

Die folgenden Empfehlungen sollen die Bewertung der Optionen und die Entwicklung des Sanierungsplans in Bezug auf die möglicherweise zu berücksichtigenden Faktoren (wesentliche Aspekte der Planung/Auslegung, wesentliche Aspekte der Überwachung, Vorteile und Grenzen) erleichtern.

Die Sammlung von Daten und eine angemessene Bewertung der Hintergrundinformationen (Situation, Standort, Techniken) sind erforderlich, um die Auswahl und Gestaltung von Abhilfemaßnahmen zu unterstützen.

Es ist wichtig, sich über Folgendes im Klaren zu sein:

- 1) Jede Situation ist einzigartig – zum Beispiel könnte es sich um eine Krise, ein aufgeheiztes politisches Klima oder eine Sorgfaltspflicht handeln, wo die Zeitspanne ungeachtet der Kosten oder der möglichen Aggressivität der Technik kurz ist, oder es könnte sich um ein ruhigeres Umfeld handeln, wo ein vollständiger Sanierungsstrang mit Versuch und Irrtum sorgfältig geplant werden kann.
- 2) Alle Standorte weisen spezifische Gegebenheiten, hydrogeologische und Kontaminationsprofile auf, die die Optionen für mögliche Sanierungsmaßnahmen einschränken.
- 3) Alle Techniken haben ihre eigenen kritischen Merkmale wie behandelbare Verunreinigungen, Zeitrahmen und Effizienz, die auf die Sanierungsziele abgestimmt werden müssen.

Die Abstimmung von Situationen, Standorten und Techniken ist eine komplexe Aufgabe: Die Sanierung wird dadurch zu einer sowohl technisch als auch wissenschaftlich anspruchsvollen Aufgabe, die den Einsatz von vielfältigem Fachwissen und Erfahrung erfordert.

7.2 Allgemeine Betriebsfenster

7.2.1 Berücksichtigung des Standortumfelds

Nur diejenige Technik oder Kombination von Techniken ist beizubehalten:

- die das Erreichen der Sanierungsziele ermöglicht, d. h. mit der voraussichtlichen Wirksamkeit (dies ist eine sehr starke Einschränkung);
- mit der bei Bedarf der erwartete Zeitplan eingehalten werden kann, um die Sanierungsziele zu erreichen (jede Technik hat ihren eigenen Zeitplan, der von Wochen über Monate und Jahre bis zu Jahrzehnten reichen kann).

In-situ- und Ex-situ-Techniken könnten entsprechend eingeordnet werden. Je dringlicher die Situation ist, desto aggressiver und teurer könnte die Technik sein.

Für die Festlegung von Sanierungszielen, die Bewertung der Leistungsfähigkeit der Technik und die Durchführung von In-situ-Sanierungsmaßnahmen sind verschiedene Ansätze möglich:

- 1) Einhaltung der risikobasierten Sanierungsstufen und/oder der vorgeschriebenen Werte für Grundwasser, Trinkwasser und/oder Umgebungsluft und/oder;
- 2) das asymptotische Zerfallen der extrahierten Konzentrationen/Massenflüsse und die wirtschaftlichen Grenzen der Technik (Kosten je extrahierter Masseneinheit) – mögliche Rückbindungseffekte müssen bei der Sanierungsleistung vor dem endgültigen Abschluss der Sanierungsarbeiten berücksichtigt werden.

Die Leistung von Sanierungstechniken ist sehr unterschiedlich, wobei die Größenordnung der Schadstoffreduktion zwischen einem und vier Jahrzehnten liegt (von gering bis sehr hoch). Die Gefahr ist groß, dass der Sanierungsplan unter- oder überdimensioniert ist und die Sanierungsziele nicht innerhalb des angestrebten Zeitrahmens erreicht werden.

ANMERKUNG 1 Beispiel: Bei Grundwasser, das mit 1 500 µg/l Schadstoff kontaminiert ist, und einem Sanierungsziel von 10 µg/l ist die Größenordnung der Schadstoffreduktion dann gleich drei (3). In solchen Situationen könnten nur sehr effiziente Techniken wie die thermische In-situ-Desorption innerhalb von einem Jahr oder die biologische Sanierung innerhalb von drei Jahren geprüft werden.

Möglicherweise ist die Anwendung eines (nicht „grünen“) chemischen Verfahrens mit Vorbehalten verbunden. Auch soziale und wirtschaftliche Kriterien (Standortreputation, Restkonzentration) könnten einer rein mathematisch ermittelten zeit- und effizienzkompatiblen Technik entgegenstehen. Daher sollten subjektive oder zwingende Interessen einbezogen werden und müssen bei der Wahl der Sanierungstechnik berücksichtigt werden.

Außerdem findet die Sanierung nicht im luftleeren Raum statt. An einigen Standorten sind bereits Brunnen oder Systeme zum Schutz und zur Unterbrechung von Verunreinigungsmigrationspfaden installiert. Techniken, die das bestehende Netz von Brunnen oder Verfahrensanlagen vor Ort nutzen könnten (z. B. verfügen manche Standorte über Wasserbehandlungsanlagen), sind von Vorteil.

ANMERKUNG 2 Es sollte großer Wert darauf gelegt werden, die Geochemie des Standorts zu verstehen. Dies ist besonders wichtig für die Planung von metallbasierten Sanierungsmaßnahmen wie ISCR und für das Verständnis der langfristigen Stabilität von Ausfällungen und adsorbierten Spezies. So hängt beispielsweise die langfristige Stabilität von Metallausfällungen davon ab, ob sie im Verhältnis zur Umgebung stabil sind (langfristiger pH-Wert und Redoxverhalten in der Grundwasserzone werden wahrscheinlich vom pH-Wert im einströmenden Grundwasser und vom Redoxverhalten bestimmt). Außerdem ist es wichtig, dass die Durchführbarkeits- und Behandlungsstudien im Labor unter Bedingungen (z. B. pH-Wert, Redoxverhalten) durchgeführt werden, die denen am Standort ähnlich sind.

7.2.2 Einrichtung der Sanierung vor Ort

Der Standort muss den nötigen Platz für die Technik und deren Zugang zur Kontamination bieten. Dies ist ein Schlüsselkriterium, das bei der Auswahl der am besten geeigneten Techniken hinsichtlich ihres Platzbedarfs für den Betrieb helfen kann. Wenn beispielsweise ein Gebäude mit Tiefgarage in kontaminiertem Boden errichtet werden soll, ist der Aushub mit Behandlung außerhalb des Standorts wahrscheinlich die einzige machbare Option. Würde man sich beispielsweise für eine Injektionstechnik entscheiden, bei der die Bohrlöcher im Direct-Push-Verfahren hergestellt werden, wäre ein feines Netz von Bohrlöchern erforderlich, um die gesamte Grundwasserfahne abzudecken. Eine solche Anordnung könnte unrealistisch sein, wenn der Standort von Gebäuden bedeckt ist oder in einem Stadtzentrum liegt. Nur eine kleine Anzahl von Zirkulationsbrunnen mit einer chemischen oder biologischen Technik könnte verwendet werden.

Die Anwendung einer Sanierungstechnik, die nahe gelegene Einrichtungen wie Deponien oder Aktivkohlebehandlungsanlagen erfordert, dürfte an Standorten, die weit von großen städtischen und industriellen Zentren entfernt sind, schwierig sein. An abgelegenen Standorten beispielsweise muss die Gasbehandlung überdimensioniert sein (mit einem Oxykatalysator vor Ort), wenn es keine Möglichkeit gibt, das Aktivkohlegranulat (AKG) zu deponieren oder zu regenerieren.

Verschiedene Daten und Informationen sind erforderlich, um die Auswahl und Planung von Abhilfemaßnahmen zu unterstützen. Für die Auslegung der meisten Sanierungstechniken und die Entscheidung, ob sie wirksam sind, ist es notwendig, die Quelle der Verunreinigung (und der zu behandelnden Verunreinigungen), die von der Verunreinigung betroffenen Umweltmedien, die geologischen und hydrogeologischen Gegebenheiten und die Sanierungsziele zu bestimmen.

Eine Sanierungsmaßnahme zielt im Allgemeinen auf die Entfernung, Zersetzung oder Umwandlung einer bestimmten Verunreinigung in der Kontaminationsquelle ab. Daher ist die Charakterisierung der Quelle von entscheidender Bedeutung. Ziel dieser Charakterisierung sollte die nähere Bestimmung folgender Punkte sein:

- 1) der (hydro-)geologischen Rahmenbedingungen;
- 2) der Massen- und Konzentrationsverteilung (dreidimensional) der fraglichen Verunreinigungen innerhalb des Standorts (d. h. die Menge jeder Verunreinigung im zu behandelnden Gebiet);
- 3) der Art und Beschaffenheit der Verunreinigung, auch abhängig von der vorgesehenen Technologie;
- 4) der (bio-)geochemischen Bedingungen vor Ort.

7.2.3 Voraussetzungen für den Einsatz einer Technik

Bei jeder Technik gibt es Einschränkungen hinsichtlich der Wirkungstiefe, der Bodendurchlässigkeit, des Grundwassers usw., daher können Techniken ausgeschlossen werden, die den hydrogeologischen und quellenbezogenen Kriterien des Standorts nicht entsprechen. Die Stinger-Technik zur Mehrphasenextraktion zum Beispiel ist durch die Fähigkeit, Flüssigkeiten mitzuführen, eingeschränkt einsetzbar und eignet sich nicht für die Behandlung von Grundwasser in der Tiefe. Biologische Behandlungen können auch durch den pH-Wert eingeschränkt sein.

Alle Voraussetzungen für den Einsatz der Technik müssen ermittelt werden und danach geht es darum, die richtige Technik auszuwählen. Für jede der aufeinanderfolgenden Techniken eines Sanierungsstrangs gibt es ebenfalls Voraussetzungen, die berücksichtigt werden müssen. Beispielsweise wird das Grundwasser durch Grundwasserbelüftung mit Sauerstoff versorgt. Das kann nicht durchgeführt werden, wenn eine anaerobe Grundwasserbehandlung erfolgt. Für die Durchführung von In-situ-Sanierungsmaßnahmen sind sowohl verfahrenstechnische Kenntnisse als auch Fachwissen in (Hydro-)Geologie erforderlich.

Bei der Durchführung von On-site-Maßnahmen hängen die Extraktionsraten der Verunreinigungen von den örtlichen (hydro-)geologischen Gegebenheiten, den Eigenschaften der Stoffe und der Verarbeitungskapazität

ab. Für die Auswahl und Planung von In-situ- und On-site-Sanierungstechniken sind häufig Vorversuche im Labor (Prüfungen der Behandelbarkeit und Durchführbarkeit) und in einigen Fällen Pilotversuche vor Ort erforderlich. Dies ist zum Beispiel bei der in-situ chemischen Oxidation (ISCO) der Fall.

7.2.4 Kollaterale Auswirkungen der Techniken

Die Auswirkungen der verschiedenen Sanierungsverfahren auf die Gesundheit des Bodens, einschließlich der Bodenfunktionen, sind zu beachten. Techniken wie Pump-and-Treat-Verfahren beispielsweise beeinträchtigen das Leben im Oberboden nur wenig, während Techniken wie die ISCO, die thermische In-situ-Sanierung (ISTR) oder In-situ-Immobilisierungstechniken natürliche organische Stoffe zerstören oder das Leben im Erdreich verändern können. Auch die Injektion von Ozon, die bei der verbesserten biologischen In-situ-Sanierung (EISB) eingesetzt werden kann, hat eine potenziell toxische Wirkung auf die Mikroorganismen im Untergrund.

7.3 Laborprüfungen und Pilotversuche

Für die Auswahl und Planung von In-situ- und On-site-Sanierungstechnologien sind in der Regel Vorversuche im Labor (Prüfungen der Behandelbarkeit und Durchführbarkeit) und häufig auch Pilotversuche vor Ort erforderlich. Die Bewertung der Durchführbarkeit der Technik kann anhand der folgenden Prüfungen erfolgen:

- Orientierungsprüfungen mit dem Ziel, die mögliche Umsetzung einer bestimmten Sanierungstechnik zu validieren;
- Prüfungen zur Leistungsbewertung, um zu prüfen, ob die Ziele erreicht werden können, und zur Abschätzung der Geschwindigkeit der geplanten Behandlung und ihrer Dauer.

Die Auslegung einer Sanierungstechnik erfordert ingenieurtechnische Kenntnisse. Sie folgt der Durchführbarkeitsbewertung.

In der Phase der Optionsbewertung ist es wichtig, die voraussichtliche Wirksamkeit einer Sanierungstechnik zu berücksichtigen. Dies gilt insbesondere für Einschlusssysteme. Bei der Bewertung der Wirksamkeit der Technik (sowohl kurz- als auch langfristig) ist Folgendes wichtig zu wissen:

- Welchen Grad der Wirksamkeit erreicht die Sanierungstechnik zum Zeitpunkt der Installation?
- Wie lange wird es nach der Installation dauern, bis die volle Wirkung eintritt?
- Nimmt die Wirksamkeit mit der Zeit ab?

Diese letzte Frage ist die grundlegende Frage in Hinblick auf die langfristige Wirksamkeit und kann nicht allgemein beantwortet werden. Sie kann nur in Bezug auf eine bestimmte Sanierungsmaßnahme beantwortet werden, die so konzipiert ist, dass sie den Bedingungen am kontaminierten Standort und den festgelegten Planungszielen Rechnung trägt. Bei Bedarf könnte eine umfassende Sanierungs-Ökobilanz (LCA) durchgeführt werden [6].

8 Allgemeine Empfehlungen für den Umgang mit Gefährdungen und Risiken während der Sanierung

8.1 Allgemeines

Während der Sanierung und Behandlung eines kontaminierten Standorts ist der Arbeits- und Gesundheitsschutz sowie die Sicherheit aller Personen, die am Standort arbeiten oder anderweitig damit zu tun haben, von höchster Bedeutung. Dazu gehören die Beschäftigten auf der Baustelle, die Besucher der Baustelle und Dritte, wie die Nutzer der angrenzenden Grundstücke, Anwohner, Passanten und Schaulustige.

Die Sanierung von Altlasten birgt spezielle Risiken für die Gesundheit und Sicherheit, die über die Gefahren auf einer normalen Baustelle hinausgehen. Viele der Gefährdungen werden bekannt und vorhersehbar sein, aber einige sind unbekannt. Der Arbeits- und Gesundheitsschutz sowie die Sicherheitssysteme müssen für beide Situationen ausgelegt sein. Gefährdungen können danach unterschieden werden, ob sie mit bereits vor der Sanierung vorhandenen Verunreinigungen in den Umweltmedien oder mit der Durchführung der Sanierungsarbeiten zusammenhängen. Stoffe, die ein mögliches physikalisches, chemisches und/oder biologisches Risiko darstellen, könnten in fester, flüssiger, gasförmiger oder staubförmiger Form vorliegen. Sie können im Boden oder im Grundwasser vorkommen. Zu den allgemeinen Gefährdungen könnten Brände, Explosionen, umschlossene Räume, unter- und oberirdische Leitungen (z. B. Gas- und Stromleitungen), Anlagen, manuelle Tätigkeiten sowie Ausrutschen, Stolpern und Abstürzen gehören. [7] Nach der Bestimmung dieser Gefährdungen und der Bewertung der damit verbundenen Risiken können entsprechende Maßnahmen erwogen werden (siehe Beispiele in Anhang C). Da die mit der Durchführung von Sanierungsmaßnahmen verbundenen Gefährdungen je nach Technologie sehr unterschiedlich sind, werden die für die Umsetzung einer bestimmten Sanierungstechnik spezifischen Gesundheits- und Sicherheitsgefährdungen in einem eigenen Unterabschnitt über Gesundheit und Sicherheit in Abschnitt 9 aufgeführt. Alle Beteiligten sollten zusammenarbeiten, um einen angemessenen Umgang mit Gefährdungen und Risiken zu gewährleisten, die sich aus der Anwendung von Sanierungstechniken ergeben.

8.2 Risikomanagementverfahren

8.2.1 Allgemeines

Ein Risikomanagementverfahren bietet einen Rahmen, der bei der Entscheidungsfindung in Bezug auf alle Aspekte des Arbeitsschutzes und der Sicherheit am Arbeitsplatz hilft. Das Risikomanagement ist ein Verfahren, das vier Schritte umfassen kann: 1) Bestimmung der Gefährdungen, 2) Bewertung der Risiken, 3) Kontrolle der Risiken und 4) Überprüfung der Maßnahmen [7].

Für jeden Standort, an dem eine Sanierung durchgeführt wird, sollte ein Arbeitsschutz- und Sicherheitsplan erstellt werden. Er beschreibt insbesondere Aufgaben, die Gefährdungen des Personals, das die Arbeiten vor Ort durchführt (Zwischenfälle und Verletzungen bei der Arbeit) und Gefährdungen für die Ausrüstung, die Umwelt und die Öffentlichkeit auf ein Mindestmaß beschränken oder ausschließen sollen. Interessenvertreter werden sich stets auf dieses Dokument beziehen, ebenso wie auf die Dokumentation der Risikobewertungen, die Meldung von Vorfällen und die regelmäßige Überprüfung der ergriffenen Maßnahmen.

In den meisten Rechtsordnungen gibt es Vorschriften und maßgebliche Leitlinien zu den in 8.2.3 bis 8.2.21 aufgeführten Gefährdungen, die für alle Arbeitssituationen gelten.

ANMERKUNG 1 Eine Risikobewertung für Arbeits-, Gesundheits- und Sicherheitsgefährdungen kann mithilfe einer Risikomatrix durchgeführt werden, bei der die Höhe des Risikos gegen die Wahrscheinlichkeit des Eintretens der Gefährdung abgewogen wird. Für jede Tätigkeit gibt es eine eigene Zeile und für das Risiko werden sowohl vor als auch nach den Maßnahmen Bewertungspunkte angegeben (siehe z. B. Tabelle 3). Kann das Risiko auch mit Maßnahmen nicht unter einen bestimmten Schwellenwert gesenkt werden, gilt die Tätigkeit als zu riskant und muss durch eine andere Arbeitsweise ersetzt werden.

Die Verwendung einer Matrix kann für die Priorisierung von Maßnahmen sehr hilfreich sein. Sie eignet sich für sehr viele Bewertungen, vor allem aber für komplexere Situationen. Es erfordert jedoch ein gewisses Maß an Fachkenntnis und Erfahrung, um die Wahrscheinlichkeit eines Schadens richtig einschätzen zu können. Ein falscher Ansatz könnte dazu führen, dass unnötige Kontrollen durchgeführt oder wichtige Kontrollen unterlassen werden [8].

Tabelle 3 — Risikomatrix für die Priorisierung von Maßnahmen (Quelle: ISO 18400-301 [8])

Potenzielle Schwere des Schadens				
Wahrscheinlichkeit, dass der Schaden eintritt		leicht gesundheits-schädlich 2	gesundheits-schädlich 2	extrem gesundheits-schädlich 3
	sehr unwahrscheinlich 1	trivial 1	annehmbar 2	moderat 3
	unwahrscheinlich 2	annehmbar 2	moderat 4	substanziell 6
	wahrscheinlich 3	moderat 3	substanziell 6	nicht annehmbar 9

ANMERKUNG 2 Weitere Informationen zur Anwendung dieses Verfahrens auf die Untersuchung von Standorten siehe ISO 18400-301 [8].

8.2.2 Gefährdungen und Kontrollen im Zusammenhang mit kontaminiertem Boden und Grundwasser

Personen können chemischen Verunreinigungen durch Einatmen (Partikel, Staub, Fasern oder Rauch und Dämpfe), Verschlucken (Bodenpartikel, Staub, Grundwasser, kontaminierte Lebensmittel oder Wasser) oder Absorption über Haut und/oder Augen ausgesetzt sein.

Bei der Bewertung der mit kontaminierten Böden und Grundwasser verbundenen Gefährdungen und Risiken sollten die örtlichen Gegebenheiten am Standort berücksichtigt werden, einschließlich der Toxizität der Verunreinigungen, der erforderlichen Schutzausrüstung und der jeweiligen Sanierungsmaßnahmen.

8.2.3 Asbest

Asbest kann an einem kontaminierten Standort als Verbundmaterial (z. B. asbesthaltige Zementplatten oder Linoleum), als spröde faserige Verkleidung (z. B. an Rohrleitungen und Heizkesseln) oder als Fasern im Boden vorhanden sein. Es ist häufig in anthropogenen Baustoffen wie Verfüllungen und Anschüttungen enthalten. Je nach den gesetzlichen Bestimmungen der einzelnen Länder reichen die Sicherheitsmaßnahmen von einfachen Zugangsbeschränkungen bis hin zum Einsatz eines Zeltes mit kontrollierter Atmosphäre für die Entfernung von Asbestfasern. Geeignete Maßnahmen sollten im Sanierungsplan beschrieben werden.

8.2.4 Staub

Durch Witterungseinflüsse und Sanierungsarbeiten kann Staub erzeugt werden. Dies kann zu Bedenken hinsichtlich möglicher gesundheitlicher Auswirkungen auf die Arbeitskräfte wie auch auf Personen in der Nachbarschaft führen.

Bei der Bewertung der mit Staub verbundenen Gefährdungen und Risiken sollten die örtlichen Gegebenheiten am Standort berücksichtigt werden, z. B. die mutmaßlichen Quellen der Staubbildung, die Entfernung zu den nächstgelegenen empfindlichen Rezeptoren, die potenzielle Toxizität des Staubs (z. B. Siliziumdioxid, Asbest und die Eigenschaften der chemischen Substanzen in den Partikeln) sowie Abhilfemaßnahmen wie der Einsatz von Regnern. Eine zeitliche Abstimmung der Sanierung auf eine regnerische Saison dürfte die Staubbelastung aufgrund der höheren Bodenfeuchtigkeit usw. minimieren.

ANMERKUNG Halden können aufgrund ihrer Höhe, ihrer unverdichteten Beschaffenheit und (häufig) ihrer Nähe zu empfindlichen Rezeptoren eine erhebliche Staubquelle darstellen.

8.2.5 Penetrante Gerüche oder geruchsintensive gesundheitsschädliche Stoffe in der Luft

Die Freisetzung vieler chemischer Stoffe in die Luft, insbesondere von Erdölkohlenwasserstoffen, Abgasen aus Gaswerken, organischen Lösungsmitteln oder verrottbaren Abfällen, kann zu Geruchsbelästigung oder schädlichen Dämpfen führen. Diese können die Ursache für unterschiedliche Arten und Grade von Gefährdungen sein, wie z. B. explosionsfähige Umgebungsbedingungen, toxische Umgebungen, nicht annehmbare Gesundheitsrisiken (entweder akut oder chronisch) und widerwärtige Gerüche. Auch können Gerüche in der Bevölkerung Besorgnis erregen, da sie möglicherweise als Giftstoffe wahrgenommen werden.

Beim Umgang mit flüchtigen Schadstoffen sollte die Notwendigkeit einer regelmäßigen Analyse der Luftbelastung durch Schadstoffe (z. B. Schwefelwasserstoff, Ammoniak, Schwefeldioxid, Ethyl- und Methylmercaptane, VOC...) am Standort und an den Standortgrenzen bewertet werden, um sicherzustellen, dass Arbeitskräfte und Anwohner keinen inakzeptablen Konzentrationen ausgesetzt sind, die zu gesundheitlichen Beeinträchtigungen führen könnten.

8.2.6 Kontaminierter Abfall

Bei der Sanierung eines kontaminierten Standorts fallen sehr häufig Abfälle an, die Restverunreinigungen enthalten (z. B. ausgehobenes kontaminiertes Erdreich oder abgepumptes Grundwasser, gebrauchte PSA, Produkte zur einmaligen Anwendung wie Planen zur Abdeckung von Mieten oder Bauschutt).

Die örtlichen Gegebenheiten am Standort sollten bei der Bewertung der mit kontaminierten Abfällen verbundenen Gefährdungen und Risiken berücksichtigt werden, einschließlich der Toxizität der Verunreinigungen, des Lebenszyklus der Verunreinigungen und des Lebenszyklus des Abfallprodukts.

8.2.7 Sanierungsausrüstung

Einige Sanierungsausrüstungen sind hochspezialisiert und bergen während des Betriebs verschiedene Gefährdungen (heiße Oberfläche, unter Druck stehende Rohre, Stromschlag, Umgang mit giftigen Injektionsmitteln usw.). In der Regel werden diese Systeme von einem Fachunternehmen betrieben und überwacht, das mit dem Betrieb, den potenziellen Gefährdungen und den entsprechenden Kontrollen vertraut ist. Dieses Unternehmen sollte über Informationen zu Gesundheitsschutz und Sicherheit für diese Ausrüstung verfügen, die in den Gesundheits- und Sicherheitsplan der Baustelle aufgenommen werden sollten. Diese Informationen sollten Risikobewertungen sowie Gefährdungs- und Betriebsfähigkeitsuntersuchungen für verfahrensbasierte Ausrüstungen umfassen.

Zu den üblichen Kontrollmaßnahmen gehören das Ausschließen einer Gefährdung von Unbefugten (z. B. durch physische Absperrungen) und verpflichtende Schulungen vor der Inbetriebnahme.

ANMERKUNG Weitere Informationen über spezifische Gefährdungen durch Sanierungsausrüstungen sollten beim betreffenden Hersteller eingeholt werden.

8.2.8 Unerwartete Funde

Zusätzlich zu den bekannten Verunreinigungen könnten bei den Sanierungsarbeiten Bereiche freigelegt werden, die zuvor nicht als verunreinigt galten. Dies wird als „unerwarteter Fund“ bezeichnet. Dabei kann es sich um neue Kontaminationsbereiche handeln, die den bereits am Standort vorhandenen ähnlich sind, um eine neue Art von Kontamination, die zuvor am Standort nicht festgestellt wurde, oder um andere Gefährdungen, einschließlich nicht detonierter Kampfmittel. Unerwartete Funde sind Sonderfälle, die von Fall zu Fall behandelt werden müssen. Dabei werden zunächst die Arbeiten im betroffenen Gebiet eingestellt und der Sachverhalt wird untersucht. Sobald Art und Ausmaß des unerwarteten Fundes feststehen, sollte der Gesundheits- und Sicherheitsplan für den Standort aktualisiert werden.

Der Gesundheits- und Sicherheitsplan sollte ein Verfahren für den Umgang mit unerwarteten Funden enthalten.

8.2.9 Langzeitüberwachung

In einigen Fällen ist eine langfristige Überwachung eines Standorts als Teil der Sanierung oder der Validierung oder als Teil von beidem erforderlich. Die Entwicklung eines langfristigen Überwachungsprogramms muss das Risikomanagementverfahren zur Ermittlung der Gefährdungen und zur Bewertung und Beherrschung der Risiken für die Arbeitskräfte, die die Überwachung durchführen, sowie für andere Personen, die ihnen folgen oder sie beobachten könnten, umfassen.

8.2.10 Arbeiten im Außenbereich

Bei vielen Sanierungsmaßnahmen wird zeitweise oder über den gesamten Arbeitstag im Freien gearbeitet. Bei der Bewertung der mit der Arbeit im Freien verbundenen Gefährdungen und Risiken sollten die örtlichen Gegebenheiten berücksichtigt werden, z. B. Einschränkungen bei der persönlichen Hygiene, Sonneneinstrahlung, Kälte und Nässe sowie biologische Gefährdungen (z. B. Hunde, Rinder, Schlangen, Zecken usw.). Es sollte eine geeignete Schulung für die spezifischen Bedingungen im Außenbereich einschl. Überlebens- und Training erfolgen.

8.2.11 Arbeiten an abgelegenen oder abgeschotteten Orten

Einige Sanierungsarbeiten werden an Orten durchgeführt, die abgelegen oder aufgrund des Standorts, der Zeit oder der Art der Arbeiten abgeschottet sind. In einigen Situationen könnte eine Arbeitskraft für kurze Zeit allein sein (z. B. bei der regelmäßigen Überwachung von Begrenzungen oder der Reparatur von Zäunen auf einer großen Baustelle abseits von anderen Arbeitskräften). In anderen Situationen könnte die Arbeitskraft an abgelegenen Orten tage- oder wochenlang auf sich allein gestellt sein. Allein oder an abgelegenen Orten zu arbeiten, erhöht die Risiken bei jeder Arbeit. Es kann eine angemessene Schulung durchgeführt werden, die auch die medizinische Selbstbehandlung an einem abgelegenen Ort umfasst. Spezielle Vorgehensweisen (Registrierung, vorher festgelegte Anrufe) und Ausrüstung wie Satellitentelefone könnten erforderlich sein.

8.2.12 Unterirdische Versorgungsleitungen und Rohrleitungen

Das Treffen auf unterirdische Versorgungsleitungen oder Bauwerke, wie z. B. Wasser- und Abwasserleitungen, unterirdische Lagerbehälter, Bewässerungssysteme, Kellerräume und Bergwerksschächte stellt eine der größten Gefährdungen bei Aushub- oder Bohrarbeiten im Rahmen von Sanierungsmaßnahmen dar. Vor Beginn der Aushubarbeiten müssen alle angemessenen Schritte unternommen werden, um aktuelle Informationen über unterirdische Versorgungsleitungen am Standort und in den angrenzenden Gebieten zu erhalten. Jede Arbeitskraft, die Aushubarbeiten durchführt, muss diese Informationen erhalten, und sie müssen bis zum Abschluss der Aushubarbeiten zur Einsichtnahme durch die zuständigen Stellen vorgehalten werden.

ANMERKUNG Wenn verdächtige oder unerwartete Bauwerke oder Schäden an Versorgungsleitungen auftreten, sollten die Aushubarbeiten ausgesetzt werden. Falls erforderlich, sollten Notfallmaßnahmen ergriffen werden, z. B. die Bereitstellung von Auffangvorrichtungen, die Abschottung des Bereichs oder die Beseitigung von Zündquellen. Wenn Sicherheit hergestellt ist, sollte die Baugrube inspiziert und die betreffende Versorgungseinrichtung oder das betreffende Bauwerk bestimmt werden. Der zuständige Versorger oder das zuständige Unternehmen muss so schnell wie möglich benachrichtigt werden, und die Baugrube muss offen gelassen, angemessen umzäunt und mit entsprechenden Warnhinweisen versehen werden.

8.2.13 Stabilität des Untergrunds

Die durch den Aushub und die Bohrungen oder die betreffenden Maschinen verursachten Erschütterungen oder das Befahren mit schwer beladenen Lastwagen können unter Umständen zum Einsturz von Gruben oder zur Beschädigung von Fundamenten angrenzender Bauwerke oder von unterirdischen Versorgungsleitungen führen. Bei der Bewertung der Gefährdungen und Risiken im Zusammenhang mit der Bodenstabilität sollten die örtlichen Gegebenheiten berücksichtigt werden, z. B. jetzige oder frühere Bergbauaktivitäten, Keller, unterirdische Lagertanks, unterirdische Verbrennungsanlagen oder nicht verfestigter Boden bzw. Füllmaterial.

8.2.14 Aushubarbeiten

An Sanierungsstandorten werden sehr häufig Aushubarbeiten durchgeführt, bei denen mithilfe von Werkzeugen, Maschinen oder Sprengstoff Boden oder Gestein von einem Standort entfernt wird, um eine offene Fläche, ein Loch, einen Graben, einen Hohlraum oder Ähnliches zu schaffen.

Zu den speziellen Gefährdungen gehören für Personen das Stürzen in die Baugrube, das Einklemmen in der Baugrube durch Einstürzen einer oder mehrerer Baugrubenwände oder Verletzungen durch sich bewegende Maschinen oder durch herabstürzende Teile, ferner die Destabilisierung eines angrenzenden Bauwerks, das durch die Baugrube an Standfestigkeit verliert, eine explosionsfähige Atmosphäre in einer Baugrube, insbesondere bei Vorhandensein flüchtiger Verunreinigungen, das Beschädigen von unterirdischen oder oberirdischen Versorgungsleitungen durch Baugerät während des Aushubs (siehe Abschnitt xxx oben).

8.2.15 Nicht detonierte Kampfmittel (UXO)

Es sollte bewertet werden, wie hoch das Potenzial dafür ist, dass sich am Standort oder im Einflussbereich möglicherweise nicht detonierte Kampfmittel befinden. Bei der Untersuchung des Standorts vor der Sanierung sollten Maßnahmen zur Risikominderung ergriffen werden, wenn sich diese durch eine UXO-Risikobewertung als notwendig erweisen.

ANMERKUNG Siehe z. B. die Leitlinien in Literaturhinweis [9].

8.2.16 Umschlossene Räume

Ein umschlossener Raum ist nicht einfach gegeben, wenn Arbeiten in einem Sanierungszelt durchgeführt werden. Er wird durch die mit einer Reihe spezifischer Umstände verbundenen Gefährdungen bestimmt. Umschlossene Räume sind beispielsweise in Behältern, Kanälen, Abwasserkanälen oder Klärgruben sowie in tiefen Gräben und Tunneln zu finden.

Zu den durch Arbeit in umschlossenen Räumen bedingten Risiken gehören Bewusstseinsverlust, Beeinträchtigungen, Verletzungen oder Tod aufgrund der unmittelbaren Auswirkungen von luftgetragenen Verunreinigungen, Feuer oder Explosionen durch die Entzündung brennbarer Verunreinigungen, Erstickung aufgrund von Sauerstoffmangel oder Untertauchen sowie die Schwierigkeit, eine verletzte oder bewusstlose Person zu bergen und zu behandeln.

ANMERKUNG Vorzugsweise ist der Arbeitsablauf so zu ändern, dass ein Betreten des umschlossenen Raums nicht erforderlich ist. Ist dies jedoch nicht möglich, sollte eine entsprechend geschulte Person eine standortspezifische Gefährdungsermittlung durchführen, Anleitungen zu Maßnahmen geben und die Arbeiten ausführen.

8.2.17 Gefährliche Chemikalien und Gefahrgüter

Es ist typisch für Sanierungsarbeiten, dass gefährliche Chemikalien oder Gefahrgüter entweder Gegenstand der Sanierung sind oder während des Sanierungsverfahrens eingesetzt werden. Gefährliche Chemikalien sind solche, die bei Einwirkung auf die Arbeitskräfte gesundheitsschädliche Folgen haben können.

Beispiele für gefährliche Chemikalien sind Gifte, Chemikalien, die Verbrennungen oder Haut- und Augenreizungen verursachen können, und Chemikalien, die möglicherweise krebserregend sind. Beispiele für gefährliche Chemikalien oder Gefahrgüter, die auf einer Sanierungsbaustelle angetroffen werden können, sind Erdölprodukte, einschließlich Rückstände in unterirdischen Lagerbehältern, chlorierte Kohlenwasserstoffe, chemische Klebstoffe, Lösungsmittel für die Reinigung oder Kalibrierung von Geräten oder Chemikalien, die als Zusatzstoffe für die chemische In-situ-Oxidation verwendet werden (Permanganat, Ozon, andere Reagenzien).

Es gibt zwei grundlegende Arten von Gefährdungen im Zusammenhang mit gefährlichen Chemikalien: 1) Gesundheitsgefährdungen aufgrund der Eigenschaften einer Chemikalie, die potenziell gesundheits-schädliche Auswirkungen haben, und 2) physikalisch-chemische Gefährdungen aufgrund der physikalischen

oder chemischen Eigenschaften der Chemikalie, des Gemischs oder der Partikel, die für die Arbeitskräfte andere Risiken als Gesundheitsrisiken darstellen, da sie nicht durch die biologische Wechselwirkung der Chemikalie mit dem menschlichen Organismus bedingt sind.

8.2.18 Gefährdungen bei von Hand ausgeführten Arbeiten

Bei Sanierungsarbeiten sind von Hand ausgeführte Arbeiten üblich und einige dieser Tätigkeiten können gefährlich sein. Eine gefährliche von Hand ausgeführte Arbeit ist jede Arbeit, bei der eine Person, ein Tier oder ein Gegenstand angehoben, abgesenkt, geschoben, gezogen, getragen oder anderweitig bewegt, gehalten oder zurückgehalten werden muss und es dabei zu wiederholter oder anhaltender Krafteinwirkung, hoher oder plötzlicher Krafteinwirkung, wiederholten Bewegungen, lang in einer Position anhaltenden oder ungünstigen Körperhaltungen oder Einwirkung von Vibrationen oder einer Kombination mehrerer Einwirkungen kommt.

Beispiele für gefährliche von Hand ausgeführte Arbeiten, die auf einer Sanierungsbaustelle anfallen könnten, sind unter anderem das Tragen von Zaunabschnitten, das Heben von Probenahmebehältern in ein Fahrzeug, der Einbau von Sanierungsausrüstung, die Handhabung von Ausrüstung (Rohre, Pumpen, Stromgeneratoren usw.) und das Nachfüllen von Reagenzien. Es sollten grundsätzlich geeignete Hebezeuge usw. eingesetzt werden.

8.2.19 Ausrutschen, Stolpern und Abstürzen

Die Art der Sanierungsarbeiten birgt häufig Absturzgefahren. Absturzgefahr besteht bei Arbeiten in der Höhe, z. B. beim Be- und Entladen eines großen Lastkraftwagens. Stürze können auch in Löcher im Boden, z. B. Gräben oder Wartungsgruben erfolgen.

Bei der Bewertung der mit der Arbeit im Außenbereich verbundenen Gefährdungen und Risiken sollten die örtlichen Gegebenheiten am Standort berücksichtigt werden, z. B. Bauwerke oder Anlagen, die errichtet, abgerissen oder demontiert, inspiziert, geprüft, repariert oder gereinigt werden, brüchige Oberflächen, potenziell instabile Oberflächen, Verwendung von Ausrüstung für Arbeiten in der Höhe, abschüssige oder rutschige Oberflächen, auf denen es schwierig ist, das Gleichgewicht zu halten, Löcher, Schächte oder Gruben, in die jemand hineinfallen könnte.

Eine Checkliste kann nützlich sein, um Gefährdungen und Risiken im Zusammenhang mit Abstürzen zu ermitteln. Erforderlichenfalls sollten Zäune und geeignete Sicherheitsgeschirre verwendet werden.

8.2.20 Anlagen, Maschinen und Geräte

Die meisten Sanierungsvorhaben erfordern den Einsatz von Anlagen, Maschinen und Geräten. Der Einsatz von Anlagen und Maschinen birgt erhebliche Risiken, vor allem bei ungesichertem Einsatz kann es zu schweren Verletzungen kommen, z. B. zur Abtrennung von Gliedmaßen durch ungeschützte bewegliche Anlagenteile, zur Quetschung durch bewegliche Maschinen, zu Knochenbrüchen durch Stürze beim Betreten, Bedienen oder Warten von Maschinen, zu Stromschlägen durch unzureichend geschützte oder isolierte Anlagen oder Maschinen, zu Verbrennungen oder Verbrühungen durch Kontakt mit heißen Oberflächen oder mit Flammen oder heißen Flüssigkeiten, zu Gehörschäden durch laute Maschinen oder zu Muskel-Skelett-Erkrankungen durch den Einsatz von schlecht konzipierten Anlagen oder Maschinen.

Beispiele für Gefährdungen durch Anlagen, Maschinen und Geräte, die auf einer Sanierungsbaustelle auftreten könnten, sind unter anderem unsachgemäßer Einsatz von Geräten, einschließlich Elektrowerkzeugen, Gefährdung von Fußgängern durch Verkehr auf der Baustelle, Gefährdung durch den Aufenthalt in der Nähe von, auf oder unter in Betrieb befindlichen Anlagen oder Geräten, Gefährdung durch rückwärtsfahrende Maschinen oder Geräte, Luftstöße von Druckluftgeräten usw.

8.2.21 Lärm

Viele Sanierungsvorhaben führen zumindest zeitweise zu einer lärmbelasteten Umgebung, insbesondere wenn schwere Maschinen oder spezielle Sanierungsausrüstungen zum Einsatz kommen. Lärm von Sanierungsarbeiten kann auch eine Belästigung für die Bevölkerung in der Nähe eines Standorts darstellen. Lärmbelastung kann bereits bei Dezibelwerten auftreten, die unter dem als gefährlich eingestuften Wert liegen.

Beispiele für mögliche Lärmquellen auf einer Sanierungsbaustelle sind Bohrtürme, schwere Maschinen, Elektrowerkzeuge, spezielle Sanierungsausrüstung wie Dieselpumpen zur Grundwasserentnahme und der normale Baustellenbetrieb (z. B., wenn die Sanierung in einem Werk bei fortlaufendem Betrieb stattfindet).

9 Beschreibung der Sanierungstechniken

9.1 In-situ chemische Oxidation (ISCO)

9.1.1 Technische Grundlagen

Die in-situ chemische Oxidation (ISCO) ist eine In-situ-Technik, die darauf abzielt, eine Verunreinigung durch chemische Oxidation in weniger mobile und/oder weniger toxische Substanzen umzuwandeln. Sie beruht auf der Einbringung eines chemischen Oxidationsmittels (Reagenz) in den Untergrund. Die Oxidationszahl des Reagenz wird durch die Aufnahme eines Elektrons verringert, um die Zielsubstanz zu oxidieren.

9.1.2 Anwendungsbereich und Anwendbarkeit der Technik (Betriebsfenster)

Die in-situ chemische Oxidation kann zur Sanierung sowohl ungesättigter als auch gesättigter Zonen bei einem breiten Spektrum organischer und anorganischer Verbindungen selbst bei hohen Konzentrationen eingesetzt werden (siehe Anhang A). Die Anwendbarkeit dieses Verfahrens hängt von der Art der Zielverbindungen und dem eingesetzten Oxidationsmittel ab. Permanganat ist wirksam bei Alkanen, chlorierten Ethanen, Dichlorethylen-Isomeren, Vinylchlorid, Phenolen und einigen polyzyklischen aromatischen Kohlenwasserstoffen (PAK). Das Fenton-Reagenz ist in der Lage, sorbierte Verunreinigungen und DNAPL zu behandeln. Ozon kann auch organische Verunreinigungen schnell angreifen und ihre organischen Kohlenstoffverbindungen aufspalten. Persulfat ist im Untergrund stabiler als andere Oxidationsmittel; es kann Benzol oxidieren (bei der Sanierung von ausgetretenen Kraftstoffen und mit Benzol, Toluol, Ethylbenzol und Xylol kontaminiertem Grundwasser). Es wird eine homogene Wasserleitfähigkeit von mehr als 10^{-7} cm/s empfohlen, um die wirksame Zufuhr der Reagenzien in die zu behandelnde Zone zu gewährleisten. Der natürliche Oxidationsmittelbedarf (NOD) muss zuerst durch die Injektion einer signifikanten Menge an Oxidationsmittel gedeckt werden, dann kann der Oxidationsmittelbedarf der Verunreinigung gedeckt werden.

9.1.3 Beschreibung der Technologie

Es gibt verschiedene Verfahren, um das Oxidationsmittel mit der Verunreinigung in Kontakt zu bringen (siehe bildliche Darstellungen in Anhang D):

- 1) durch Einsatz von Injektionsbrunnen (das Oxidationsmittel wird unter Druck in den Boden eingebracht; hierfür sind vertikale Injektionsbrunnen erforderlich);
- 2) durch Einsatz von Injektion im Direct-Push-Verfahren;
- 3) durch Einsatz von Rezirkulation (Kombination von direkter Injektion oder Versickerung und Grundwasserentnahme);
- 4) durch Versickern des Oxidationsmittels über mit Brunnensieben versehene Vertikalbrunnen oder Ablaufrinnen in Gräben;

- 5) durch (tiefe) Durchmischung des Bodens (d. h. der Boden wird mithilfe von Erdbohrern mit dem Oxidationsmittel vermischt);
- 6) durch Grundwasserbelüftung mit Ozon (d. h. Einbringung von Ozon in die gesättigte Zone).

9.1.4 Planungsüberlegungen und Auslegung

Die Wahl des Oxidationsmittels hängt von den Umweltbedingungen (Geologie, Hydrogeologie, Geochemie) sowie von den Eigenschaften der Kontaminationsquelle und/oder der Kontaminationskette ab, auf die die ISCO-Technik abzielt (Art der Kontamination, Verteilung). Im Allgemeinen weisen die wirkungsvollsten Oxidationsmittel folgende Merkmale auf: 1) Halbwertszeiten und Persistenzzeiten sind kürzer, 2) der Absenkradius ist kleiner und 3) die Bandbreite der oxidierbaren organischen Verbindungen ist größer.

Für die Dimensionierung und Auslegung einer Behandlung durch in-situ chemische Oxidation sind Prüfungen im Labor erforderlich, um das wirksamste Oxidationsmittel auszuwählen und die Zusammensetzung der Oxidationsmittellösungen zu optimieren. Die Anzahl der Injektionen muss genau festgelegt werden. Ebenso werden In-situ-Pilotversuche dringend empfohlen, um technische Entscheidungen zu bestätigen, bevor sie in vollem Umfang umgesetzt werden. Mathematische Modelle der hydrodynamischen Dispersion können nützlich sein, um die Lage und Dynamik der In-situ-Oxidationsfront abzuschätzen und das Injektionsnetz zu entwerfen (Position, Anzahl, Abstand, Tiefe und Lage der Brunnensiebe usw.). Prüfungen mit Tracern (meist Bromid, Uranin) liefern eine Schätzung des Absenkradius einer Injektion.

9.1.5 Wichtige Überwachungsparameter

Eine Überwachung ist während der in-situ chemischen Oxidation (sie erfolgt häufig, um sicherzustellen, dass die Technik wie vorgesehen funktioniert), aber auch nach der Behandlung erforderlich. Um die Wirksamkeit der in-situ chemischen Oxidation zu ermitteln, können folgende Punkte überwacht werden:

- 1) Grundwasserspiegel;
- 2) die Entwicklung der Konzentrationen von Verunreinigungen und Reagenziennebenprodukten über die Zeit sowie die Redoxbedingungen;
- 3) Übersicht über das Volumen des behandelten Bodens/Grundwassers;
- 4) Übersicht über die Menge des zugesetzten Oxidationsmittels;
- 5) Übersicht über die Verunreinigungskonzentrationen oberhalb/unterhalb der jeweiligen Sanierungsziele (unter Berücksichtigung von Rückbindungseffekten).

9.1.6 Vorteile und Grenzen

Mit der in-situ chemischen Oxidation können die betreffenden Ziele relativ schnell erreicht werden. Sie ist möglicherweise kostengünstiger als andere Sanierungstechniken und kann bei einem breiten Spektrum von organischen und anorganischen Verbindungen (wässrig, sorbiert und nicht wässrig) selbst bei hohen Konzentrationen eingesetzt werden. Bei der in-situ chemischen Oxidation fallen keine großen Abfallmengen an. Dadurch werden die Kontaminationsbelastung, der Zeitaufwand und die Kosten verringert, da für die Entsorgung oder Behandlung nur geringer Aufwand entsteht.

Es gibt Einschränkungen für die Anwendung an stark kontaminierten Standorten. Im Vergleich zu anderen Sanierungstechnologien ist es möglich, weniger Oxidationsmittel oder Maßnahmen zur Regelung des Wasserhaushalts einzusetzen. Die chemischen, physikalischen und biologischen Eigenschaften des Bodens können durch die in-situ chemische Oxidation verändert werden, wodurch möglicherweise toxische Verbindungen in den Boden eingetragen werden. In diesem Fall werden natürliche organische Stoffe, an denen Verunreinigungen (insbesondere organische) adsorbiert sind, zerstört und bestimmte Metalle und Metalloide, die in einem reduzierten, ausgefallten Zustand vorliegen, oxidiert. Außerdem sind Oxidationsmittel nicht sehr

selektiv und reagieren mit vielen oxidierbaren Stoffen, was zu einem höheren Verbrauch an Oxidationsmitteln führt. Die Einbringung von Peroxid und Permanganat kann zur Bildung von Partikeln führen (Ausfällung von Mangan oder Eisen) und die Durchlässigkeit des Grundwasserleiters verringern (Verstopfungseffekt). Einige Oxidationsmittel können aufgrund der hohen Reaktionsgeschwindigkeit im Untergrund kurzzeitig persistieren. Die Heterogenität der hydraulischen Leitfähigkeit des Untergrundes ist ein einschränkender Faktor für die in-situ chemische Oxidation (siehe Abschnitt 7).

9.1.7 Relevante Aspekte für Sicherheit, Gesundheit und Umweltschutz (SGU)

Damit eine Oxidation stattfinden kann, muss ein großes Redoxpotenzial vorhanden sein, was im Allgemeinen besondere Sicherheitsauflagen für den Umgang mit diesen Oxidationsmitteln erfordert:

- 1) Oxidationsmittel müssen sicher gehandhabt und gelagert werden;
- 2) Permanganat- und Persulfatstaub sind gefährlich;
- 3) das Vorhandensein von Ozon erhöht die Entflammbarkeit vieler Stoffe;
- 4) die Entstehung von Ozon kann zu Problemen mit Hochspannungsgeräten führen;
- 5) es besteht die Gefahr unkontrollierter exothermer Reaktionen und;
- 6) es besteht die Gefahr einer vorrangigen Migration von Oxidationsmitteln und/oder Verunreinigungen (flüssig oder dampfförmig) durch unterirdische Versorgungsleitungen.

9.1.8 Mögliche andere Techniken oder Einschlussansätze, die mit dieser Technik kombiniert werden können

In manchen Fällen, wenn die Oxidation nicht vollständig abläuft, können die entstehenden Produkte auch biologisch besser abbaubar sein als die ursprünglichen Verunreinigungen, so dass die Behandlung mit biologischen Sanierungstechniken auf der Ebene der Kontaminationsketten kombiniert werden kann. Manchmal werden am Ende der Behandlung organische Stoffe zugegeben, um die Bodenfunktionen wiederherzustellen.

9.2 In-situ chemische Reduktion (ISCR)

9.2.1 Technische Grundlagen

Die in-situ chemische Reduktion (ISCR) ist eine In-situ-Technik, bei der ein Reduktionsmittel in den Boden eingebracht wird. Sie beruht auf der Injektion eines Reduktionsmittels oder eines Reduktionsmittel erzeugenden Stoffes in den Untergrund, um giftige organische Verbindungen in potenziell ungiftige oder weniger giftige Verbindungen umzuwandeln, Metalle durch Adsorption oder Ausfällung zu immobilisieren und nichtmetallische Oxianionen, wie beispielsweise Nitrat, abzubauen.

9.2.2 Anwendungsbereich und Anwendbarkeit der Technik

Die in-situ chemische Reduktion wird hauptsächlich zur Sanierung von chlorhaltigen Verunreinigungen eingesetzt, die in der gesättigten und ungesättigten Zone vorhanden sein könnten (siehe Anhang A). Das Verfahren kann in einigen Fällen auf anorganische Stoffe angewendet werden. Wie bei jeder anderen Sanierungsmaßnahme mit Injektionstechnik sind homogene und durchlässige Böden und Grundwasserleiter für eine effiziente Durchführung erforderlich.

9.2.3 Beschreibung der Technologie

Die Technik beruht auf der Verwendung eines Reduktionsmittels. Das am häufigsten verwendete Reduktionsmittel ist nullwertiges Eisen. Andere Reduktionsmittel, die zur Metallbehandlung eingesetzt werden, sind Eisen, Natriumdithionit, Sulfidsalze (Calciumpolysulfid) und Schwefelwasserstoff. Substrate, die eingeführt wurden, um günstige Bedingungen für die mikrobielle Reduktion von Eisen und Sulfaten herbeizuführen, werden auch zur Behandlung von Verunreinigung durch gelöste Metalle eingesetzt. Die ISCR von Metallen und Metalloiden wird durch einen Stabilisierungsmechanismus erreicht, der die Geochemie des Zielgebiets im Untergrund so beeinflusst, dass es zu einer direkten Ausfällung, Mitfällung oder indirekten Adsorption und Ausfällung (z. B. Adsorption an Eisenhydroxiden) der Zielchemikalien kommt. Dies führt zu einer langfristigen In-situ-Sequestrierung der Metalle.

Bei der Sanierung von Metallen durch anaerobe Biostimulation wirken die Mikroorganismen im Allgemeinen nicht direkt auf die Metalle, sondern einige ihrer Respirationsprodukte können zur Metallstabilisierung durch direkte Aus- oder Mitfällung eingesetzt werden. Unter stark anaeroben Reduktionsbedingungen, die mithilfe eines Elektronendonators und einer Kohlenstoffquelle (z. B. Methanol, Laktat, Melasse) erzeugt werden, können in einem Grundwasserleiter Bedingungen für die Sulfatreduktion geschaffen werden. Anhang D enthält eine bildliche Darstellung dieser Technik.

9.2.4 Planungsüberlegungen und Auslegung

Eine numerische Modellierung der hydrodynamischen Dispersion ist häufig erforderlich, um die Lage und Dynamik der In-situ-Reduktionsfront abzuschätzen und das Netz der Injektionsbrunnen zu planen (Lage, Anzahl, Abstand zwischen den Brunnen, Tiefe und Lage der Brunnensiebe usw.). Weitere wichtige Parameter für die Auslegung der Sanierung durch ISCR sind: 1) Parameter für die Injektion: vertikale Verteilung, Durchfluss und Druck der Injektion, Dauer, Art der Injektion, Brunnengröße und 2) Parameter für die Entnahme: Anzahl der Brunnen, Brunnengröße, Durchfluss- und Druckrate, Ort der Brunnen, Wasserbehandlungsanlage.

9.2.5 Wichtige Überwachungsparameter

Die wichtigsten Überwachungsparameter zur Bestimmung der Wirksamkeit der in-situ chemischen Reduktion sind:

- 1) der Grundwasserspiegel und die Grundwasserfließrichtung;
- 2) die Tiefe der verschiedenen Strukturen;
- 3) die Injektionstiefe des Reduktionsmittels;
- 4) die Menge des eingesetzten Reduktionsmittels und des Wassers, der Injektionsvolumenstrom und der Druck;
- 5) die Kontaminationskonzentrationen und die physikalisch-chemischen Parameter (einschließlich Redoxpotenzial) des Grundwassers stromaufwärts, stromabwärts und an der Quelle sowie die Konzentrationen von Nebenprodukten.

9.2.6 Vorteile und Grenzen

Die in-situ chemische Reduktion kann auf ein breites Spektrum von organischen Schadstoffen wirken. Sie beruht auf schnellen Reaktionen. Sie kann bei hohen Konzentrationen von Verunreinigungen eingesetzt werden. Die Reduktion kann vollständig ablaufen (vollkommene Mineralisierung). Läuft die Reduktion nicht vollständig ab, können die entstehenden Abbauprodukte manchmal biologisch besser abbaubar sein als die ursprünglichen Schadstoffe, so dass die Behandlung mit aeroben/anaeroben biologischen Sanierungstechniken kombiniert werden kann. Außerdem sind herkömmliche Reduktionsmittel nicht sonderlich kostenintensiv. Im Gegensatz zur in-situ chemischen Oxidation werden bei diesem Verfahren die organischen Stoffe im Boden nicht zerstört.

Beim Einsatz der ISCR-Technologie besteht jedoch die Gefahr, dass Verunreinigungen und Reduktionsmittel ins Grundwasser gelangen. Daher ist ein gutes Verständnis der Geologie und Hydrogeologie erforderlich, um den Weg der Oxidationsmittel vorherzusagen und Rückgewinnungsbrunnen so zu platzieren, dass gegebenenfalls eine vollständige Rückgewinnung der Reduktionsmittel möglich ist. Die chemischen, physikalischen und biologischen Eigenschaften des Bodens können vorübergehend verändert werden, allerdings in einem weitaus geringeren Ausmaß als bei der in-situ chemischen Oxidation. Wenn die Reduktion nicht vollständig abläuft, können die entstehenden Abbauprodukte giftiger sein als die ursprünglichen Schadstoffe (z. B. Vinylchlorid für Perchlorethylen und Trichlorethylen). Reduktionsmittel sind nicht sehr selektiv und reagieren mit vielen reduktionsfähigen Stoffen. Die in-situ chemische Reduktion erfolgt in manchen Fällen mithilfe von Abwässern aus der Abgasbehandlung.

9.2.7 Relevante Aspekte für Sicherheit, Gesundheit und Umweltschutz (SGU)

Änderungen des pH-Werts und des Redoxverhaltens können andere Verunreinigungen als die angestrebten mobilisieren. Abbauprodukte können löslicher sein als die eigentliche Verunreinigung. Wenn nullwertiges Mikro- oder Nanoeisen eingesetzt wird, besteht die Gefahr der Bildung explosionsfähiger Gase.

9.2.8 Mögliche andere Techniken, die mit dieser Technik kombiniert werden können

Die Kombination von Reduktionstechniken kann die Effizienz der Reinigung oft verbessern. Nach der Behandlung der Kontaminationsquelle wird die ISCR häufig zur Diffusionszonensanierung eingesetzt.

9.3 Verbesserte biologische In-situ-Sanierung (EISB)

9.3.1 Technische Grundlagen

Die verbesserte biologische In-situ-Sanierung (EISB) ist ein technisches In-situ-Verfahren, das physikalische, chemische und biologische Veränderungen im Boden herbeiführt, um die erforderlichen Bedingungen für die Umwandlung von bedenklichen Verunreinigungen in unschädliche Nebenprodukte durch Mikroorganismen zu schaffen. Die mikrobielle Aktivität wird stimuliert und intensiviert durch:

- Bioaugmentation, bei der Mikroorganismen eingebracht werden (z. B. gentechnisch veränderte Mikroorganismen); oder
- Biostimulation, bei der ein bestimmter Mikroorganismus durch die Zufuhr von Zusatzstoffen, die entweder Nährstoffe oder einen Elektronendonator enthalten, zum Wachstum angeregt wird.

Der biologische Abbau von organischen Verbindungen basiert auf einer Redoxreaktion zwischen einem Elektronendonator (den zu behandelnden Verunreinigungen) und einem Elektronenakzeptor. Natürlicher Konzentrationsabbau liegt vor, wenn natürliche physikalische, chemische und biologische Prozesse dazu führen, dass die Masse, die Konzentration, die Toxizität und/oder die Mobilität der Verunreinigung im Untergrund verringert wird.

9.3.2 Anwendungsbereich und Anwendbarkeit der Technik (Betriebsfenster)

Die verbesserte biologische In-situ-Sanierung kann sowohl für organische (z. B. Erdölkohlenwasserstoffe) als auch anorganische Verbindungen (z. B. Perchlorat) und sowohl in der ungesättigten als auch der gesättigten Zone eingesetzt werden (siehe Anhang A). Die Mineralisierung erfolgt bei organischen Verbindungen, wenn alle Kohlenstoffverbindungen aufgebrochen sind. Eine Biotransformation findet statt, wenn: 1) sich die Speziation von anorganischen oder organischen Verbindungen durch mikrobiologische Aktivität ändert; 2) organische Verbindungen in Moleküle mit geringerem Molekulargewicht (Metaboliten) umgewandelt werden.

9.3.3 Beschreibung der Technologie

Es gibt mehrere Verfahren der verbesserten biologischen In-situ-Sanierung, die jeweils spezifischen Auslegungsanforderungen unterliegen:

- 1) Kreislaufsysteme, die in erster Linie zur Sanierung von verunreinigtem Grundwasser eingesetzt werden (verunreinigtes Grundwasser wird auf der Abströmseite der Quelle mithilfe von Brunnen an die Oberfläche gepumpt, das entnommene Grundwasser wird mit Nährstoffen und einem Elektronendonator (in der Regel Sauerstoff) vermischt, und das behandelte Wasser wird dann auf der Anströmseite der Quelle in denselben Grundwasserleiter eingeleitet;
- 2) Sauerstoffinjektion oder ORC-Injektion (beide aerob) durch einen Injektionskanal zur Sanierung von organischen Kohlenwasserstoffen sowohl in der gesättigten (z. B. ORC-Barriere) als auch ungesättigten Zone;
- 3) Ozoninjektion (dieses starke Oxidationsmittel hat potenziell eine toxische Wirkung auf mikrobielle Populationen im Untergrund, aber aufgrund seiner hohen Löslichkeit kann Ozon ein effizientes Mittel zur Verteilung von Sauerstoff am Standort sein);
- 4) beschleunigte anaerobe biologische In-situ-Sanierung (Elektronendonatoren und -akzeptoren werden an einem kontaminierten Standort eingebracht, um die Population anaerober Mikroorganismen zu erhöhen und so die natürliche Fähigkeit der Mikroorganismen zum Abbau der Verunreinigung zu fördern).

Die Kosten für die Verfahren der verbesserten biologischen In-situ-Sanierung sind sehr unterschiedlich und hängen von der Art und dem Ausmaß der erforderlichen Bodenverbesserung sowie von anderen Umweltfaktoren ab. Anhang D enthält eine bildliche Darstellung dieser Technik.

9.3.4 Planungsüberlegungen und Auslegung

Der biologische Abbau von Verbindungen mithilfe von Mikroorganismen hängt von der Art und Konzentration der zu behandelnden Verunreinigungen, dem Elektronenakzeptor und dem Zeitraum ab, über den die Mikroorganismen der Verunreinigung ausgesetzt sind. Die wichtigsten zu berücksichtigenden Umweltfaktoren, die zur Auslegung der verbesserten biologischen In-situ-Sanierung herangezogen werden, um zu beurteilen, ob eine Biotransformation stattfindet oder nicht, sind folgende:

- 1) pH-Wert, Konzentration, Temperatur und Nährstoffverfügbarkeit;
- 2) zeitliche Entwicklung und Entwicklung der Grundwasserströmung;
- 3) Verteilung? von Elektronenakzeptoren und Nährstoffen für das mikrobielle Wachstum;
- 4) Vorkommen oder Fehlen von Metallen wie Quecksilber, Blei und Zyanid in toxischer Konzentration sowie das Vorhandensein toxischer Verbindungen, die das mikrobielle Wachstum während der biologischen Sanierung behindern könnten.

9.3.5 Wichtige Überwachungsparameter

Die Wirksamkeit der verbesserten biologischen In-situ-Sanierung sollte durch die Analyse des Zustands der Zielverunreinigungen und anderer Reaktanten und Produkte (Metaboliten), die den biologischen Abbau anzeigen, (wie Sauerstoff, Mn^{2+}/Mn^{4+} , Fe^{2+}/Fe^{3+} , SO_4^{2-} , NH_4^+/NO_3^- , Cl, Biogase (CO_2 , H_2S , CH_4)) ständig überwacht werden.

9.3.6 Vorteile und Grenzen

Techniken zur verbesserten biologischen In-situ-Sanierung können zur Behandlung von Verbindungen eingesetzt werden, die an die Stoffe im Grundwasserleiter gebunden oder in Porenräumen eingeschlossen sind. Die kontaminierte Zone, die Gegenstand der Behandlung ist, kann im Vergleich zu anderen Sanierungstechniken in der Regel größer sein, da die Behandlung Bereiche erreichen kann, die sonst nicht zugänglich sind. Die Vermehrung der Mikroorganismenpopulation in den Porenräumen verringert die Durchlässigkeit des Bodens und die hydraulische Leitfähigkeit des Grundwasserleiters und bremst somit die Migration der Verbindungen.

Die verbesserte biologische In-situ-Sanierung weist einige Einschränkungen auf: den erreichbaren Reinigungsgrad, den zur Erreichung der Sanierungsziele erforderlichen Zeitrahmen, in einigen Fällen die potenzielle Entstehung toxischer Nebenprodukte, das Vorhandensein hemmender Stoffe und/oder toxischer (zu hoher) Konzentrationen der betreffenden Verbindung sowie die Schwierigkeit, Zusatzstoffe wie Nährstoffe, Tenside und Sauerstoff einzusetzen.

9.3.7 Relevante Aspekte für Sicherheit, Gesundheit und Umweltschutz (SGU)

Im Umgang mit ORC ist Vorsicht geboten. Biogase (wie Methan, Kohlendioxid oder Schwefelwasserstoff) müssen überwacht werden, um eine nicht annehmbare Freisetzung in die Umgebungsluft oder in sensible Bereiche (z. B. Versorgungsleitungen) zu verhindern.

9.3.8 Mögliche andere Techniken oder Einschlussansätze, die mit dieser Technik kombiniert werden können

Eine breite Palette physikalischer und chemischer In-situ-Techniken kann mit der biologischen In-Situ-Sanierung kombiniert werden, z. B. Biobelüftung, Grundwasserbelüftung (siehe 9.7). Die verbesserte biologische In-situ-Sanierung wird an kontaminierten Standorten häufig in einer zweiten Phase eingesetzt, wenn die physikalisch-chemischen Technologien ihre technisch-wirtschaftlichen Grenzen erreicht haben.

9.4 Überwachte natürliche Konzentrationsabnahme (MNA)

9.4.1 Technische Grundlagen

Die überwachte natürliche Konzentrationsabnahme (MNA) ist eine In-situ-Behandlung, bei der mithilfe langfristiger Probenahmen und Analysen von Boden, Grundwasser und/oder Bodenluft nachgewiesen wird, dass die natürlichen physikalischen, chemischen und biologischen Prozesse die Risiken für bestimmte Umwelt- oder Grundwasserrezeptoren angemessen eindämmen. Die überwachte natürliche Konzentrationsabnahme liegt vor, wenn Masse, Konzentration, Mobilität und/oder Toxizität des Schadstoffs unter natürlichen biologischen und/oder physikalisch-chemischen Bedingungen verringert werden.

9.4.2 Anwendungsbereich und Anwendbarkeit der Technik (Betriebsfenster)

Die überwachte natürliche Konzentrationsabnahme ist für alle (biologisch) abbaubaren Verunreinigungen geeignet, insbesondere für gelöste Kohlenwasserstoffe und nicht-wässrige Leichtflüssigkeiten (LNAPL) (siehe Anhang A). Bei nicht-wässrigen Leichtflüssigkeiten (LNAPL) wird die Technik als natürlicher Abbau der Quellenzone (NSZD; en: Natural Source Zone Depletion) bezeichnet. Die überwachte natürliche Konzentrationsabnahme ist potenziell für halogenierte Kohlenwasserstoffe in gelöster Phase geeignet. Die Toxizität und/oder Mobilität einiger Metalle kann auch unter natürlichen Bedingungen verringert werden.

9.4.3 Beschreibung der Technologie

Die natürliche Konzentrationsabnahme wird durch drei Prozesse erreicht:

- physikalische Prozesse, unter anderem Auflösung, Dispersion und Sorption;

- chemische Prozesse, unter anderem abiotische Oxidation oder Reduktion der Verunreinigungen;
- biologische Prozesse, unter anderem aerober und anaerober Abbau von Kohlenwasserstoffen und direkter oder kometabolischer Abbau von halogenierten Kohlenwasserstoffen.

9.4.4 Planungsüberlegungen und Auslegung

Der wichtigste Gesichtspunkt bei der Auslegung ist die Lage, die Tiefe und der Aufbau der Überwachungsbrunnen in der Reaktionszone. Diese müssen sich auf der Abströmseite der primären oder sekundären Quellenzone befinden, und einige müssen versetzt sein, damit die Ausbreitung festgestellt werden kann. Anhang D zeigt bildliche Darstellungen aller möglichen Auslegungskonzepte.

Studien haben gezeigt, dass Kohlenwasserstofffahnen typischerweise einige hundert Meter lang, selten sehr viel länger, sein können, während Fahnen von halogenierten Kohlenwasserstoffen zwischen 1,5 km und 2 km lang sein können. Die Länge der Fahnen in der gelösten Phase konservativer anorganischer Ionen (z. B. Bromid) wird entweder durch die Nachweisgrenze oder eine einschlägige Wasserqualitätsnorm (z. B. eine Trinkwassernorm) definiert.

9.4.5 Wichtige Überwachungsparameter

Die wichtigsten Parameter für die Bestimmung der Wirksamkeit der überwachten natürlichen Konzentrationsabnahme sind die anström- und abströmseitigen Konzentrationen der Verunreinigungen, der Elektronendonatoren bzw. -akzeptoren und der Tochterprodukte. Im Falle eines anaeroben Abbaus könnten neue toxische Verbindungen entstehen, die die Ziele der überwachten natürlichen Konzentrationsabnahme zunichte machen oder zu Gesundheitsgefährdungen führen könnten. So entsteht beispielsweise beim anaeroben Abbau von Erdölprodukten Schwefelwasserstoff (H_2S), ein sehr giftiges Gas.

9.4.6 Vorteile und Grenzen

Die überwachte natürliche Konzentrationsabnahme (MNA) ist von geringer Intensität, nutzt natürliche Prozesse. Sie ist daher kurzfristig relativ kostengünstig und weist einen geringen CO_2 -Fußabdruck auf. Wenn die überwachte natürliche Konzentrationsabnahme ein Jahrzehnt lang andauert, zeigt eine sorgfältig erstellte Ökobilanz, dass der kumulierte CO_2 -Fußabdruck genauso wie bei einer Sanierung des Standorts ausfallen könnte.

Die überwachte natürliche Konzentrationsabnahme hat einige Einschränkungen und Nachteile. Sie erfordert ein tragfähiges konzeptionelles Standortmodell der hydrogeologischen, geochemischen und mikrobiologischen Bedingungen. Die detaillierte Standortcharakterisierung ist erforderlich, um nachzuweisen, dass die natürliche Konzentrationsabnahme stattfindet (Verringerung der Konzentration durch Massenabnahme und nicht durch Dispersion). Das Verfahren kann einen langen Zeitraum in Anspruch nehmen. Es schützt nicht die menschliche Gesundheit. Für das Verfahren wird von relativ stabilen Grundwasserströmungsrichtungen ausgegangen, andernfalls werden Überwachungsbrunnen an weiteren Standorten erforderlich sein. Es kann gesellschaftliche und politische Vorbehalte geben (überwachte natürliche Konzentrationsabnahme wird als Untätigkeit angesehen).

9.4.7 Relevante Aspekte für Sicherheit, Gesundheit und Umweltschutz (SGU)

Neben den Aspekten, die mit der Untersuchung des Standorts und der Probenahme verbunden sind, und standortspezifischen Gesichtspunkten (z. B. Abgelegenheit, Alleinarbeit oder Vermeidung betrieblicher Gefahren) gibt es keine spezifischen Aspekte die Sicherheit, Gesundheit und den Umweltschutz betreffend.

9.4.8 Mögliche andere Techniken oder Einschlussansätze, die mit dieser Technik kombiniert werden können

Die überwachte natürliche Konzentrationsabnahme kann nach intensiveren Techniken wie der in-situ chemischen Oxidation (9.1) oder der verbesserten biologischen Sanierung (9.3) als letzte Komponente eines Sanierungsstrangs eingesetzt werden.

9.5 Thermische In-situ-Sanierung (ISTR)

9.5.1 Technische Grundlagen

Bei der thermischen In-situ-Sanierung (ISTR) (auch thermische In-situ-Desorption (ISTD) genannt) wird die Temperatur in der Behandlungszone im Untergrund erhöht. Dadurch erhöhen sich der Dampfdruck, die Löslichkeit und die Diffusionsraten der Verunreinigungen, während sich ihre Viskosität verringert. So werden die zu behandelnden Verunreinigungen an einen Ort unter der Geländeoberkante transportiert, an dem die Dämpfe oder die Bodenluft für eine oberirdische Behandlung aufgefangen werden können. Die ungesättigte Zone oder die gesättigten Zonen können erhitzt werden, um die Freisetzung von Verunreinigungen zu fördern. Die Betriebstemperaturen können von 80 °C bis 800 °C reichen. Bei Temperaturen von über 600 °C können die in der erhitzten Bodenzone vorhandenen organischen Verbindungen durch Pyrolyse aufgespalten werden.

9.5.2 Anwendungsbereich und Anwendbarkeit der Technik (Betriebsfenster)

Die thermische In-situ-Sanierung ist für ein breites Spektrum von Verunreinigungen geeignet, die gut auf Erhitzung reagieren (siehe Anhang A), darunter: Quecksilber, halogenierte flüchtige organische Verbindungen, energiereiche aromatische Nitroverbindungen, Polychlorbiphenyle (PCB) und PCB-Dioxin-ähnliche Stoffe, Polychlordibenzodioxine, Polychlordibenzofurane (PCDD/PCDF), polybromiertes Dibenzo-P-Dioxin, polybromiertes Dibenzofuran (PBDD/PBDF), Pestizide und Herbizide. Das Verfahren eignet sich besonders für die Extraktion von NAPL, die in der ungesättigten Zone eingeschlossen sind, und von hohen Konzentrationen an gelösten Verunreinigungen in der gesättigten Zone. Die In-situ-Hochtemperaturerhitzung wird in erster Linie für die Behandlung von Verbindungen mit einem hohen Molekulargewicht (wie halogenierte und nichthalogenierte flüchtige organische Verbindungen, PCB, Diesel und ölhaltige Kraftstoffe sowie DNAPL-Gemische) eingesetzt. Die thermische In-situ-Sanierung kann auch zur Extraktion von elementarem Quecksilber aus der ungesättigten Zone verwendet werden. Der Wirkungsgrad der Entfernung von Kontaminationsmassen mit dieser Technik wird mit über 95 % angegeben.

9.5.3 Beschreibung der Technologie

Bei der thermischen In-situ-Sanierung gibt es verschiedene Verfahren zur Erhöhung der Untergrundtemperatur, die vom Standort und dem gewünschten bzw. erforderlichen Temperaturbereich abhängen. Die drei Hauptverfahren zur Erhitzung sind in Anhang D bildlich dargestellt:

- **Elektrische Beheizung mit einem Netz von Elektroden oder Heizelementen zur Erwärmung von Boden und Grundwasser.** Der Wärmeeintrag erfolgt entweder durch thermische Konduktion, bei der einzelne Heizelemente verwendet werden, oder durch elektrische Konduktion, bei der Strom zwischen Elektroden fließt und die Erwärmung durch die Herabsetzung des Bodenwiderstands erfolgt. Der Wärmeeintrag durch thermische Konduktion benötigt eine geringe Bodenfeuchte und kann Temperaturen bis zu 750 °C erreichen (Hochtemperatursysteme), bei denen die Desorption von Verunreinigungen erfolgt (thermische In-situ-Desorption (ISTD)). Der Wärmeeintrag durch elektrische Konduktion erfordert einen durchlässigen Boden mit hoher Bodenfeuchte, damit der Strom fließen und die Zieltemperatur von 100 °C erreicht werden kann (Niedrigtemperatursysteme). Beide Wärmeeintragsysteme erfordern ein dichtes Netz von Wärmequellen.

- **Zündbrunnen, die durch die Injektion eines Gemischs aus brennbarem Gas und Luft betrieben werden.** Sie werden eingesetzt, um den Boden zu erhitzen und eine flammenlose Verbrennung (In-situ-Verbrennung (ISC) oder „Schwelbrand“) in Gang zu setzen, bei der die Verunreinigungen zur Energiequelle werden. Im Allgemeinen ist ein mittleres Netz von Injektionsbrunnen erforderlich, um hohe Temperaturen zu erzeugen.
- **Injektion von Heißluft, Heißwasser oder Dampf.** Es gibt eine Vielzahl von Techniken, bei denen eine Flüssigkeit oder Flüssigkeitskombination eingeleitet wird, um den Untergrund auf Temperaturen von normalerweise höchstens 100 °C (niedrige Temperatur) zu erhitzen. Diese Injektionen sind bei gering durchlässigen Stoffen nicht wirksam (hydraulische Leitfähigkeit $< 10^{-4}$ cm/s). Bei flachen kontaminierten Bereichen kann es ohne Dämmmaßnahmen an der Oberfläche zu extrem hohem Wärmeverlust kommen.

ANMERKUNG Mit dem Wärmeeintrag durch thermische Konduktion und der In-situ-Verbrennungstechnologie können hohe Temperaturen erreicht werden: örtlich über 800 °C bis 1 000 °C mit einer Durchschnittstemperatur von 600 °C in der zu sanierenden Zone. Niedrige Temperaturen um 100 °C können durch elektrischen Wärmeeintrag, In-situ-Dampfinjektion und andere Wärmeeintragssysteme erreicht werden.

Techniken zur thermischen In-situ-Sanierung werden in der Regel mit einem Dampfauffang- und -behandlungssystem im Untergrund und einer oberirdischen Behandlung der zurückgewonnenen getrennten Gas- und Flüssigphasen kombiniert.

9.5.4 Planungsüberlegungen und Auslegung

Eine ausführliche Standortbewertung ist erforderlich, um in der betreffenden Kontaminationszone das zu erwartende Ergebnis des Wärmeeintrags und die geologischen (Bodenart usw.) sowie die hydrologischen Verhältnisse (Grundwasserströmung, Sättigungsgrad usw.) zu bestimmen. Die wichtigsten Parameter sind der Feuchtegehalt, der Gehalt an organischen Stoffen in der ungesättigten Zone sowie die Eigenschaften des Netzes, die Anzahl der (Wärme-)Eintrags- und Entnahmebrunnen (Gas oder Dampf) und die Abstände zwischen den Brunnen. Die Position und Auslegung dieser Brunnen hängt von der Geometrie des Zielgebiets und ihrem Absenkradius und/oder Erfassungsradius ab. Grundwasser- und Dampfrückgewinnungs- und -behandlungssysteme müssen für die Rückgewinnung von Flüssigkeiten mit erhöhter Temperatur ausgelegt sein (siehe 9.21). Die Bewertung und Auswahl der Behandlungs-Auslegungsalternativen für ein bestimmtes thermisches Sanierungssystem erfolgt anhand der technischen Machbarkeit und der Kosten (Investitions- und Betriebskosten) für das Erreichen der Sanierungsziele.

9.5.5 Wichtige Überwachungsparameter

Die wichtigsten Überwachungsparameter zur Bestimmung der Wirksamkeit der thermischen In-situ-Sanierung sind: 1) Verteilung der Ist-Temperatur im Vergleich zur Soll-Temperatur im Untergrund (durch Einsatz von Temperaturüberwachungsbrunnen); 2) Masse der organischen Verbindungen im zurückgewonnenen Wasser; 3) anteiliger und gesamter Energieverbrauch; 3) Reduzierung der Schadstoffmasse im Grundwasser.

9.5.6 Vorteile und Grenzen

Die thermische In-situ-Sanierung ist ein zuverlässiges, schnelles (Zeitraumen drei bis sechs Monate) und bewährtes Verfahren, wenn der Boden vor Ort stark kontaminiert oder lehmig ist oder die Kontamination eingeschlossen und für andere In-situ-Behandlungen unzugänglich ist. Die thermische In-situ-Sanierung kann Sanierungsprobleme lösen, insbesondere bei Böden mit geringer Durchlässigkeit, die mit einem komplexen Chemikaliengemisch kontaminiert sind, oder wenn der Aushub zu gefährlich wäre. Die thermische In-situ-Sanierung ist im Vergleich zur biologischen Sanierung eine sehr aggressive Behandlungstechnologie (z. B. könnte der Boden in einem lehmigen Umfeld „gekocht“ werden). Der Energieverbrauch aller thermischen Anlagen ist hoch (20 l bis 50 l Brennstoff je Tonne Boden), so dass der CO₂-Fußabdruck sehr groß sein kann. Die Bodeneigenschaften, einschließlich der geotechnischen Eigenschaften, könnten durch die Behandlung verändert werden, was sich auf die mögliche Nutzung des Standorts nach der Behandlung auswirken würde. Entsprechende Prüfungen sollten nach Bedarf durchgeführt werden.

9.5.7 Relevante Aspekte für Sicherheit, Gesundheit und Umweltschutz (SGU)

Besonders bedenklich ist die Einwirkung von Hochspannung, heißen Dämpfen und hohen Temperaturen während der Durchführung der thermischen In-situ-Sanierung. Es müssen Maßnahmen ergriffen werden, um die Arbeitskräfte vor Ort vor zufälligem Kontakt mit Stromleitungen oder freiliegenden heißen Oberflächen zu schützen. Bei der thermischen In-situ-Sanierung von Kohlenwasserstoffverunreinigungen (z. B. Benzin) oder flüchtigen organischen Verbindungen mit niedrigem Flammpunkt müssen wegen der Brand- und Explosionsgefahr Sicherheitsvorrichtungen und -protokolle für die Überwachung und die korrekte Auslegung der Behandlungseinheiten in Betracht gezogen werden.

9.5.8 Mögliche andere Techniken oder Einschlussansätze, die mit dieser Technik kombiniert werden können

Die thermische In-situ-Sanierung wird häufig auch als Teil eines Behandlungsstrangs einer Sanierung vorgesehen, um die Rückgewinnung von Verunreinigungen zu optimieren. Zum Beispiel können die niedrigen Temperaturen beim Wärmeeintrag durch thermische Konduktion zur Optimierung von Mehrphasenextraktionssystemen bei zähflüssigen PAK oder DNAPL (siehe 9.9) oder bei Pump-and-Treat-Verfahren (siehe 9.11) eingesetzt werden. Die Sanierungstechniken mit Wärmeeintrag durch elektrische Konvektion (ECH) oder durch Injektion eines Dampf-Luft-Gemischs (SAI) können sowohl in der ungesättigten als auch in der gesättigten Zone eingesetzt und dabei mit einer Mehrphasenextraktionstechnik kombiniert werden. Die thermische In-situ-Sanierung kann auch zur Verbesserung der Effizienz aller Systeme zur Bodenluftabsaugung (BLA) in der ungesättigten Zone eingesetzt werden. Hier wird die Absaugung von Dämpfen und gasförmigen Verunreinigungen durch eine „heiße“ Bodenluftabsaugung im Vergleich zur „kalten“ Absaugung (siehe 9.7) erhöht.

9.6 Thermische In-situ-Desorption

9.6.1 Technische Grundlagen

Die thermische In-situ-Desorption beruht auf dem Eintrag von Wärme, um flüchtige Verunreinigungen durch Verflüchtigung oder Pyrolyse (Zersetzung durch Erhitzung) aus dem ausgehobenen Boden zu entfernen (siehe Anhang A). Die extrahierten Verunreinigungen werden in der Gasphase transportiert und in einem Gasbehandlungssystem behandelt. Das Verfahren kann on-site oder off-site eingesetzt werden.

9.6.2 Anwendungsbereich und Anwendbarkeit der Technik (Betriebsfenster)

Mit organischen Verbindungen kontaminierter Boden, auch mit hohen Konzentrationen an VOC (z. B. in der Größenordnung von 10 000 mg/kg (1 Gewichtsprozent)), kann mit dieser Technik behandelt werden. Für Böden mit hohem Feuchtigkeitsgehalt (> 40 %) ist dieses Verfahren aufgrund der hohen Energiekosten für die Verdampfung von Wasser nicht zu empfehlen. Der Wirkungsgrad wird mit über 97 % angegeben.

9.6.3 Beschreibung der Technologie

Durch Erhitzen des ausgehobenen kontaminierten Bodens auf eine Temperatur zwischen 90 °C und 560 °C, hauptsächlich in der Behandlungsanlage (z. B. Trommeltrockner/Desorber), werden die Verunreinigungen verflüchtigt oder pyrolysiert (siehe Bild in Anhang C). Die freigesetzten Verunreinigungen werden dann in der Gasphase transportiert und in einem separaten Gasbehandlungssystem aufbereitet. Die Rauchpartikel werden zunächst in Filtern, Nassstaabscheidern und/oder elektrostatischen Abscheidern aufgefangen; anschließend werden die organischen Verbindungen durch Zerstörung (Verbrennung, katalytische Oxidation) oder Bindung (Aktivkohle, Kondensator) entfernt. Thermische Desorptionsanlagen, die chlorierte Lösungsmittel behandeln, müssen mit einer Behandlungsanlage für die Neutralisierung von Salzsäure ausgestattet sein. Um den Boden abzukühlen und die Staubbildung zu verhindern, wird der Boden nach der Phase der thermischen Desorption mit Wasser wieder befeuchtet.

9.6.4 Planungsüberlegungen und Auslegung

Eine thermische On-site-Desorptionsanlage besteht aus einer Vorbehandlungseinheit (Mahlen, Mischen), einem Trockner/Thermodesorber zur Entfernung von Wasser und Zielverbindungen (z. B. Drehrohrofen, Schnecken- oder Bandzuführanlage), der intern oder extern beheizt wird, und leistungsstarken Gasbehandlungseinheiten (z. B. Wärmeübertrager, Staubabscheider, Nachverbrenner oder Oxidator, Kondensator, Aktivkohlefilter). Die wichtigsten bei der Auslegung eines thermischen Ex-situ-Desorptionssystems zu berücksichtigenden Parameter sind: 1) die Art und Konzentration der Verunreinigungen, da diese die Arbeitstemperaturen der Desorbereinheit (z. B. für Mineralöl: 200 °C bis 400 °C; PAK: bis 600 °C; PCB oder halogenierte flüchtige organische Verbindungen: bis 600 °C) und auch die Temperaturen der Gasbehandlung bestimmen; 2) die Bodenfeuchte, die organischen Stoffe und die im kontaminierten Boden enthaltenen schwefelhaltigen Verbindungen; 3) die Sanierungsziele und die erforderliche Behandlungskapazität (in der Regel 5 t/h bis 40 t/h).

9.6.5 Wichtige Überwachungsparameter

Die wichtigsten Überwachungsparameter zur Bestimmung der Wirksamkeit der thermischen On-site-Desorption sind: 1) organische Stoffe und Feuchtigkeit, Konzentration der Verunreinigungen im zu behandelnden Boden; 2) Temperatur, Turbulenz, Verweilzeit in der Desorptionseinheit; 3) Konzentration der Verunreinigungen in den behandelten Gasemissionen. Auch die Betriebsparameter der Behandlungsanlage (Volumenströme, Unterdruck, Druckverluste, Sättigungsgrad des Filters usw.) müssen überwacht werden.

9.6.6 Vorteile und Grenzen

Die thermische On-site-Desorption ist eine zuverlässige, schnelle und bewährte Technik für Böden, die stark kontaminiert oder zu lehmig für eine andere Behandlung sind. Einige Verunreinigungen wie halogenierte flüchtige organische Verbindungen können eine Belastung für die gesamte Desorptionsanlage darstellen, da korrodierte Teile in der Anlage ständig erneuert werden müssen (durchschnittlich bis zu 20 % der Betriebskosten). Die Notwendigkeit der gründlichen Behandlung von desorbierten flüchtigen Stoffen, die ein wesentlicher Bestandteil des Verfahrens ist, kann zu hohen Kosten für die Behandlung führen, da sie in der Regel für stark kontaminierte Böden eingesetzt wird. Der Energieverbrauch in thermischen Anlagen ist hoch (20–50 Liter Brennstoff je Tonne Boden), daher ist der CO₂-Fußabdruck groß.

Potenziell bedenklich sind die hohen Temperaturen, denen die Arbeitskräfte in der Nähe der Brenneroberflächen und der verschiedenen Rohre ausgesetzt sind. Die Abgasbehandlungsanlagen müssen so ausgelegt sein, dass Brand- und Explosionsgefahr vermieden werden. Die behandelten Gasemissionen müssen ständig überwacht werden, und es müssen sofortige Abhilfemaßnahmen ergriffen werden, wenn z. B. ein defekter Brenner dioxinähnliche Verbindungen freisetzt.

Die physikalischen und anderen Eigenschaften des behandelten Bodens könnten sich radikal verändern, da vielen Mineralien, einschließlich Gips, und zumindest einigen Tonmineralien Hydrationswasser entzogen werden kann und organische Stoffe und alle Organismen zerstört werden können. Diese Veränderungen und die möglicherweise dunkle Färbung könnten die Wiederverwendung des behandelten Bodens als bodenähnliches Material oder in der Bauwirtschaft behindern. Entsprechende Prüfungen, möglicherweise auch in Bezug auf das Pflanzenwachstum und die Toxizität, sind unter Umständen erforderlich.

9.6.7 Relevante Aspekte für Sicherheit, Gesundheit und Umweltschutz (SGU)

Besonders bedenklich ist die Gefährdung der Arbeitskräfte vor Ort durch hohe Spannungen, heiße Dämpfe und hohe Temperaturen beim Betrieb des Systems. Es müssen Maßnahmen ergriffen werden, um die Arbeitskräfte vor Ort vor zufälligem Kontakt mit Stromleitungen oder freiliegenden heißen Oberflächen zu schützen. Bei Systemen, die auf Verunreinigung durch Kohlenwasserstoffe (wie Erdöl) oder flüchtige organische Verbindungen mit niedrigem Flammpunkt abzielen, müssen wegen der Brand- und Explosionsgefahr Sicherheitsvorrichtungen und -protokolle für die Überwachung und die korrekte Auslegung der Behandlungseinheiten in Betracht gezogen werden.

9.6.8 Mögliche andere Techniken oder Einschlussansätze, die mit dieser Technik kombiniert werden können

Die Desorption hängt zunächst vom Aushub des kontaminierten Bodens ab (siehe Abschnitt 9.20). Neue Generationen von Verfahrenseinheiten, um die Verunreinigungen wirksamer zu verdampfen oder zu verbrennen (z. B. Drehrohröfen, archimedische Schnecke, Förderer) können in Kombination mit innovativen Vorbehandlungsverfahren (z. B. Vortrocknung, Zusatzstoffe, Entmischung, Homogenisierung, Pellets) eingesetzt werden.

9.7 Bodenluftabsaugung (BLA)

9.7.1 Technische Grundlagen

Die Bodenluftabsaugung oder „Vakuumextraktion“ oder „Belüftung“ ist eine anerkannte und bewährte Technik zur In-situ-Bodensanierung. Sie wird zur Entfernung flüchtiger Verbindungen aus der ungesättigten Zone eingesetzt. Bei der Bodenluftabsaugung wird ein Unterdruck im Untergrund erzeugt, dadurch entsteht ein Druck-/Konzentrationsgefälle, das den Massetransfer der betreffenden Verunreinigungen aus NAPL, adsorbierten Verunreinigungen und den Transfer von in der Bodenfeuchte gelösten Bestandteilen in die Dampfphase erleichtert. Die Dämpfe werden dann über Entnahmebrunnen aus dem Untergrund entnommen und können anschließend oberirdisch behandelt werden, um die Verunreinigungen rückzugewinnen oder zu beseitigen.

9.7.2 Anwendungsbereich und Anwendbarkeit der Technik (Betriebsfenster)

Mit der Bodenluftabsaugung (BLA) können Mineralölkohlenwasserstoffe wie Benzin, BTEX, VOC und SVOC mit Dampfdruck, der in der Regel höher als 1,0 mm Hg bei 20 °C ist (siehe Anhang A), behandelt werden. Die BLA beruht auf Luftströmung und funktioniert daher nur in luftdurchlässigen Böden (sandig-schluffige bis kiesige Böden mit einer Durchlässigkeit von mehr als 10^{-5} m/s). Durch die Bodenluftabsaugung entsteht im Boden ein Unterdruck, der einen Frischluftstrom durch die ungesättigte Zone anregt. Die BLA kann auch zum Schutz von Innenräumen vor dem Eindringen von Bodengasen eingesetzt werden. Dieses Verfahren wird allgemein als SSD (en: sub slab depressurisation) bezeichnet. Hier werden ein sehr niedriger Volumenstrom und Unterdruck eingesetzt.

9.7.3 Beschreibung der Technologie

Das Extraktionsnetz besteht in der Regel aus vertikalen Brunnen und/oder horizontalen Abläufen, die über geeignete Rohrleitungen (unterirdisch oder an der Oberfläche) mit einer Vakuumextraktionseinheit verbunden sind, um den gewünschten Unterdruck zu erzeugen (in der Regel ein Unterdruck von bis zu 300 mbar). Es gibt eine Reihe von Vakuumtechnologien, die vom Volumenstrom und dem an das System angelegten Unterdruck abhängen. Dazu gehören Radialventilatoren, Klauengebläse und Drehkolbengebläse.

Gasbehandlungsanlagen können mit Aktivkohlefiltration, Biofiltration oder katalytischer Oxidation arbeiten. Kontrollsysteme für den sicheren Betrieb, einschließlich Kontrolle der explosionsfähigen Atmosphäre, sind der Schlüssel zum sicheren und effektiven Betrieb der Anlage. Anhang D enthält eine bildliche Darstellung dieser Technologie.

9.7.4 Überlegungen zur Planung und Auslegung

Die wichtigsten Parameter für die Auslegung der BLA sind: 1) Luftdurchlässigkeit der kontaminierten Zone, 2) Boden-Dampf-Massetransferkoeffizient, 3) Ausdehnung der kontaminierten Fläche und Mächtigkeit der ungesättigten Zone und 4) Größe und Verteilung des Luftstroms.

Diese Parameter wirken sich auf den Absenkradius, den Erfassungsradius eines jeden Brunnens sowie auf die Wirksamkeit der Sanierung und das Ende einer Bodenluftabsaugung aus. Die Auslegung umfasst: 1) die Anzahl, die Abstände und die Eigenschaften der Injektionsbrunnen, 2) den jeweiligen Absenkradius und

Erfassungsradius der Entnahmebrunnen, 3) die Anzahl, die Abstände und die Eigenschaften der Entnahmebrunnen (Tiefe, Durchmesser, Gräben, Bohrlöcher...), 4) die Art und Leistung der Absaugeinheit, und 5) die Abmessungen der Behandlungseinheit.

Das kontaminierte Zielgebiet muss vollständig durch den Erfassungsradius der Bodenluftabsaugung abgedeckt sein. Mathematische Modelle dürfen zur Auslegung und Vorhersage der Leistung der Bodenluftabsaugung verwendet werden. Die Luftdurchlässigkeit des Bodens darf auf dem Sanierungsfeld durch Absaugprüfungen oder durch Versuche im Labor gemessen werden.

9.7.5 Wichtige Überwachungsparameter

Die wichtigsten Parameter zur Bestimmung der Wirksamkeit des Mietenverfahrens sind: 1) Unterdruck am Brunnenkopf und Unterdruck im Netz, 2) abgesaugter Volumenstrom, 3) Konzentrationen der zu behandelnden Verunreinigungen in der Bodenluft und 4) Konzentration und/oder Volumenstrom (m^3/h) und/oder Massenflüsse (Gramm/h , kg/Tag) bei Freisetzen in die Umgebungsluft.

Wird an einer Kontaminationsquelle eine BLA durchgeführt, um eine Kontaminationskette zu schwächen, muss die Grundwasserqualität anström- und abströmseitig der Quelle vor, während und nach Abschluss der Sanierungsmaßnahme überwacht werden.

9.7.6 Vorteile und Grenzen

Die Bodenluftabsaugung ist einfach in der Durchführung und relativ kostengünstig. Diese Technik ist bewährt und hat sich als sehr zuverlässig erwiesen. Die Bodenluftabsaugung kann während des laufenden Betriebs am Standort oder sogar während der Wiedererschließung eingesetzt werden. Hohe Heterogenität bei der Durchlässigkeit schränkt die Effizienz ein. Der größte einschränkende Faktor für die Anwendung dieses Verfahrens ist der Dampfdruck. Eine Verbindung mit einem Dampfdruck unter 0,5 mm Hg (67 Pa) (bei 20 °C) ist unter normalen Belüftungsbedingungen nicht remobilisierbar. Außerdem beträgt die begrenzende Flüchtigkeitskonstante nach Henry für eine signifikante Verflüchtigung 0,01 $\text{Pa}\cdot\text{m}^3/\text{mol}$ (bei 20 °C) [10]. Die Bodenluftabsaugung wird in ungesättigten Zonen mit einer Mächtigkeit von mehr als 1,5 m bis 3 m, abhängig von den umgebenden Verhältnissen durchgeführt. Bei feuchten Böden mit geringer Durchlässigkeit können die geomechanischen Eigenschaften des Bodens durch die Bodenluftabsaugung beeinträchtigt werden, da dem Boden die natürliche Feuchte entzogen wird und er sich zusammenzieht. Wegen der Sättigung der Porenräume ist die Bodenluftabsaugung bei Böden mit hohem Feuchtegehalt nur begrenzt wirksam.

9.7.7 Relevante Aspekte für Sicherheit, Gesundheit und Umweltschutz (SGU)

Bei der Absaugung von flüchtigen Kohlenwasserstoffen ist es erforderlich, die Möglichkeit der Bildung explosionsfähiger Atmosphären innerhalb des Prozesses zu berücksichtigen. Die Geräte und Anlagen sollten in Übereinstimmung mit den örtlichen Normen und Regelungen ausgelegt werden. In der Regel werden die Dämpfe in den Absauganlagen und Rohrleitungen auf 15–25 % der unteren Explosionsgrenze geregelt, um die Explosionsgefahr zu verringern. Diese Konzentration begrenzt auch den Wärmestau in den Aktivkohle-adsorbereinheiten und minimiert die Entzündungsgefahr in den Filterbetten.

Die Verdünnung der abgesaugten Gase mit Frischluft wird häufig als Kontrollmaßnahme eingesetzt, insbesondere zu Beginn eines Projekts mit Bodenluftabsaugung.

9.7.8 Mögliche andere Techniken oder Einschlussansätze, die mit dieser Technik kombiniert werden können

Mögliche unterstützende Techniken in Kombination mit der Bodenluftabsaugung sind die Biobelüftung und die thermisch verstärkte Bodenluftabsaugung. Das Einbringen von Frischluft in den Boden während der Bodenluftabsaugung stimuliert die aerobe biologische Aktivität. Der biologische Abbau organischer Verbindungen kann durch die Zufuhr von Nährstoffen im Rahmen der Biobelüftung gefördert werden. Biobelüftung ist auf alle biologisch abbaubaren Verunreinigungen anwendbar, wurde aber am häufigsten und Berichten zufolge am erfolgreichsten an Standorten mit Verunreinigungen durch Erdölkohlenwasserstoffe

eingesetzt. Die Effizienz der BLA kann durch thermische Unterstützung verbessert werden, um die In-situ-Verflüchtigungsraten von Verunreinigungen zu erhöhen (siehe 9.7). Die Belüftung kann auch mit einer Grundwasserbelüftung kombiniert werden, um die gleiche im Grundwasserleiter gelöste Verbindung zu entfernen (siehe 9.8).

ANMERKUNG Der dynamische und pneumatische Einschluss ist eine weitere Anwendung der BLA. Die BLA ist sehr vielseitig und kann wie das Abpumpen von Grundwasser für den dynamischen und pneumatischen Einschluss genutzt werden. Die BLA kann als bauliche Maßnahme eingesetzt werden, um das Eindringen von kontaminierten Dämpfen aus dem Untergrund in das Gebäude einzudämmen (SSD).

9.8 Grundwasserbelüftung

9.8.1 Technische Grundlagen

Die Grundwasserbelüftung ist eine In-situ-Technik, die auf dem Massetransfer (Verflüchtigung) von gelösten flüchtigen Verbindungen aus dem Wasser der gesättigten Zone in die Bodenluft der ungesättigten Zone mittels Luftblasen basiert, die durch Einblasen von Luft in den Grundwasserleiter erzeugt werden. Luftblasen (mit gasförmigen Verbindungen) bewegen sich im Allgemeinen nach oben in die ungesättigte Zone, wo ein BLA-System eingesetzt werden kann, um die kontaminierte Luft aufzufangen. Die Einbringung von frischem Sauerstoff in den Grundwasserleiter kann auch den aeroben biologischen Abbau fördern.

9.8.2 Anwendungsbereich und Anwendbarkeit der Technik (Betriebsfenster)

Die Grundwasserbelüftung wird für ein breites Spektrum an gelösten VOC eingesetzt (siehe Anhang A). Hydrogeologische Verhältnisse mit homogener hydraulischer Leitfähigkeit in der gesättigten Zone ($> 10^{-5}$ m/s) und Luftdurchlässigkeit in der ungesättigten Zone sorgen für optimale Leistung bei der Grundwasserbelüftung.

9.8.3 Beschreibung der Technologie

Bei der Grundwasserbelüftung wird in der Regel ein Netz von Lufteinbringungsbrunnen mit einem Netz von Luftabsaugbrunnen kombiniert. Die Luft wird in vertikale Brunnen, die unterhalb der kontaminierten Zielzone mit Brunnensieben versehen sind, mithilfe eines Kompressors oder Gebläses mit einem Druck eingeblasen, der von der Tiefe des mit einem Brunnensieb versehenen Teils des Brunnens, dem erforderlichen Luftstrom und der Lithologie abhängt. Die Lufteinbringung erfolgt in der Regel diskontinuierlich („Durchgänge“), während die zugehörige BLA kontinuierlich durchgeführt wird. Vor Ort ist häufig eine Abgasbehandlung erforderlich, bevor die Luft ins Freie entlassen werden kann. Anhang D enthält eine bildliche Darstellung dieser Technik.

9.8.4 Planungsüberlegungen und Auslegung

Die wichtigsten Parameter für die Auslegung eines Systems zur Grundwasserbelüftung sind 1) der Absenkradius der In-situ-Strippung und der Erfassungsradius der BLA und 2) je nach Größe der zu behandelnden Verunreinigung und des Erfassungsradius der Absenkradius der einzelnen Brunnen, die Anzahl und die Merkmale (Tiefe, Durchmesser usw.) der Absaug- und Injektionsnetze sowie der Abstand zwischen den Brunnen.

9.8.5 Wichtige Überwachungsparameter

Die Technik der Grundwasserbelüftung erfordert eine strenge Kontrolle der Bodenluftmigration, um unkontrollierte Luftmigration zu verhindern. Die wichtigsten Überwachungsparameter zur Bestimmung der Wirksamkeit sind: 1) Grundwasserspiegel, 2) Kontaminationskonzentration in Wasser und Gas und 3) Indikatoren für den biologischen Abbau.

Die Überwachung der Betriebsparameter der Behandlungsanlagen (Durchflussmengen, Unterdruck, Druckverluste, Sättigungsgrade der Aktivkohlefilter usw.) ist ebenfalls erforderlich.