

# 1 Einleitung

## 1.1 Das Erbe der Industrialisierung

Die immer rascher fortschreitende Industrialisierung der letzten beiden Jahrhunderte hat nicht nur zu Annehmlichkeiten geführt, sondern auch zu einer Verunreinigung der Umwelt. Der unsachgemäße Umgang mit Stoffen und zahlreiche Chemikalienunfälle bis hin zu den Kriegseinwirkungen der letzten beiden Weltkriege haben in der Vergangenheit vielfach zu einem Eintrag von Schadstoffen in Boden und Grundwasser geführt. Daher wurden umfangreiche Sanierungsmaßnahmen erforderlich. Seit in den 1970er Jahren die Kontaminationen von Boden und Grundwasser mit organischen Schadstoffen und Schwermetallen in den Fokus der Aufmerksamkeit gerückt sind, wurden zahlreiche Analysen von Umweltproben durchgeführt. Wir konzentrieren uns heute im Wesentlichen auf Schadstoffe, die in der Vergangenheit in großen Mengen produziert und verwendet wurden, wie Mineralölprodukte (Mineralölkohlenwasserstoffe, aromatische Kohlenwasserstoffe, polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe), Lösemittel (leichtflüchtige chlorierte Kohlenwasserstoffe), Schwermetalle und einige mehr. In Einzelfällen fanden nachweislich Einträge mit spezifischen Stoffen statt wie z. B. Wärmeträgeröle, die aus wenigen definierten Substanzen bestehen; entsprechend wird im Untergrund nach genau diesen Stoffen gesucht [1]. Dem steht die Tatsache gegenüber, dass heute mehr als 67 Mio. chemische Substanzen im CAS-Katalog (*Chemical Abstracts Service*) verzeichnet sind. Die genaue Zahl erhöht sich im Sekundentakt [<http://www.cas.org> (23.06.12)]. Dies bedeutet, dass sich mehr Schadstoffe im Untergrund befinden könnten als uns heute bekannt ist. Und bekannt ist schon eine große Anzahl kontaminierter Flächen: Nach der Erhebung des Umweltbundesamtes (Stand 07/2011) liegen im Bundesgebiet 314 347 altlastenverdächtige Flächen und 14 209 nachgewiesene Altlasten vor, die sich noch nicht in der Sanierung befinden oder bei denen die Sanierung noch nicht abgeschlossen ist. Angesichts des Aufwandes für manche Sanierung wird deutlich, welche erheblichen Anstrengungen noch vor uns liegen. Die Beseitigung dieser Altlasten wird nicht die Aufgabe einer, sondern wahrscheinlicher mehrerer Generationen sein.

Mit unserem heutigen Kenntnisstand zur Schädlichkeit der Verunreinigungen und den erheblichen Bemühungen, das Eintreten weiterer Kontaminationen zu vermeiden, stellt sich die Frage, ob das Thema nachsorgender Umweltschutz, d. h. Reparatur der eingetretenen Schäden, nach Abschluss der Sanierung der bekannten Kontaminationen dann erledigt ist. Zudem soll mit der 2013 in deutsches Recht umgesetzten Richtlinie für Industrieemissionen (*Industrial Emission Directive*; IED), die eine regelmäßige Untersuchung von industriell genutzten Flächen und gegebenenfalls eine Wiederherstellung des ursprünglichen Zustandes fordert, eine Art „Null-Toleranz-Politik“ für neue Verschmutzungen verfolgt und das Verursacherprinzip untermauert werden“ [2]. Es liegen aber deutliche Hinweise darauf vor, dass das Thema Altlastensanierung nicht so schnell beendet sein wird. Dies wird beispielsweise an der seit 2010 geführten Diskussion zu den perfluorierten Tensiden (PFT) deutlich. Nachdem diese Stoffe in der Vergangenheit an vielen Orten nachgewiesen werden konnten und da sie wegen ihres stark inerten Verhaltens eine sehr große Verbreitung zeigen, rückten sie immer mehr in das behördliche und öffentliche Interesse. Es ist zu vermuten, dass angesichts der Existenz einer enormen Anzahl an unterschiedlichen industriell verwendeten Chemikalien auch in der Zukunft immer wieder bislang unerkannte Belastungen als solche identifiziert werden. Auch die IED kann eine Kontamination des Untergrundes letztlich nicht verhindern.

Die Altlasten werden uns daher voraussichtlich nicht so schnell ausgehen. Somit wird über Generationen hinweg die Sanierung von Belastungen des Bodens und Grundwassers ein hohes marktwirtschaftliches Potential und eine hohe gesellschaftliche Bedeutung haben.

## 1.2

### Historische Entwicklung der *In-situ*-Verfahren

In den 1970er Jahren sind Belastungen der Umwelt mit Schadstoffen in den Fokus der Öffentlichkeit gerückt [3]. Zur gleichen Zeit haben wir begonnen, über Verfahren nachzudenken, diese unerwünschten Stoffe wieder aus dem Untergrund zu entfernen. Die ersten Sanierungsversuche, wie der Bodenaustausch bzw. das Auskoffern des kontaminierten Bodes mit den nachfolgenden Problemen – der Entsorgung der kontaminierten Böden – oder das Abpumpen und Reinigen von kontaminiertem Grundwasser, das so genannte *Pump and Treat* (P&T), waren teuer und im Falle des P&T oft nur wenig erfolgreich.

Mit der Entwicklung von *In-situ*-Verfahren wurde das Konzept verfolgt, den Boden und das Grundwasser dort zu behandeln, wo es sich befindet. Begonnen haben die *In-situ*-Verfahren mit der Nutzung mikrobieller Abbauvorgänge. Bereits 1913 wurde das aerobe Belebungsverfahren zur Reinigung kommunaler Abwässer eingeführt. Gleichzeitig war der Zugang zum Grundwasser über Brunnen schon seit jeher bekannt. Daher lag nach Bekanntwerden von Grundwasserbelastungen nahe, dass diese saniert werden könnten, indem die Mikroflora zu einem aeroben Metabolismus angeregt wird.

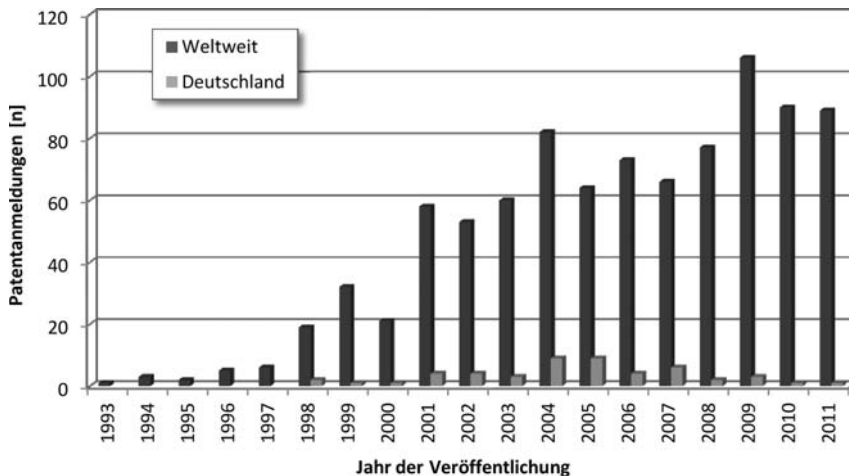


Abb. 1.1 Erteilte Patente seit 1994 für Verfahren zur Grundwassersanierung (Quelle: CAS). (Summe 474 weltweit, Mehrfachnennungen durch Anmeldungen in unterschiedlichen Ländern)

Eines der ersten Patente zur *In-situ*-Sanierung wurde bereits 1974 erteilt [4] und umfasst die Injektion von Luft in den Aquifer zur Sauerstoffversorgung sowie die Injektion von Nährsalzlösungen und die Entnahme von Grundwasser zur Verbesserung der Verteilung der Supplemente. Eine Strippung von Schadstoffen war nicht berücksichtigt. Kurze Zeit später (1977) wurde in Deutschland ein Patent für ein Verfahren erteilt, das Wasserstoffperoxid ( $H_2O_2$ ) als Sauerstofflieferant für den Schadstoffabbau nutzt [5]. Wasserstoffperoxid wird durch das bakterielle Enzym Katalase unter Freisetzung von Sauerstoff gespalten:  $H_2O_2 \rightarrow \frac{1}{2} O_2 + H_2O$ . Im Jahr 1983 wurde in den USA die hydraulische Unterstützung der *In-situ*-Sanierung (*Pump and Treat* mit Re-Infiltration) patentiert [6]. Damit waren alle fachlichen Grundlagen für die ersten in Deutschland genutzten *In-situ*-Verfahren gelegt. In der Folgezeit nahmen die Entwicklungen zur Sanierung von Grundwasserbelastungen deutlich zu, wie der Verlauf der jährlich erteilten Patente in Abbildung 1.1 zeigt. Der deutsche Anteil an Patenten (einschließlich ausländischer Anmelder) im nachsorgenden Umweltschutz wies mit rund 14 % der Anmeldungen im Jahr 2005 den höchsten Anteil auf.

Für Deutschland wird daher eine Vorreiterrolle bei der Boden- und Standortsanierung gesehen. Dies bietet im Hinblick auf den Export die Möglichkeit für einen forcierten Technologietransfer, Innovation und wirtschaftliche Expansion [7].

Insgesamt haben die Entwicklungen der *In-situ*-Verfahren seit dem Ende der 1990er Jahre einen rasanten Zuwachs erfahren, nicht zuletzt auch durch Erfahrungen ausgelöst, dass mit dem von Beginn der Grundwassersanierung an verwendeten *Pump-and-Treat*-Verfahren auch nach langer Laufzeit in den meisten Fällen keine Dekontamination der Quelle erzielbar war. *Pump and Treat* (P&T) war auch in den USA zu Beginn der Sanierungsaktivitäten das bevorzugte Verfahren (Abbildung 1.2). Schon aus dem Anfang der 1990er Jahre resultiert aber die

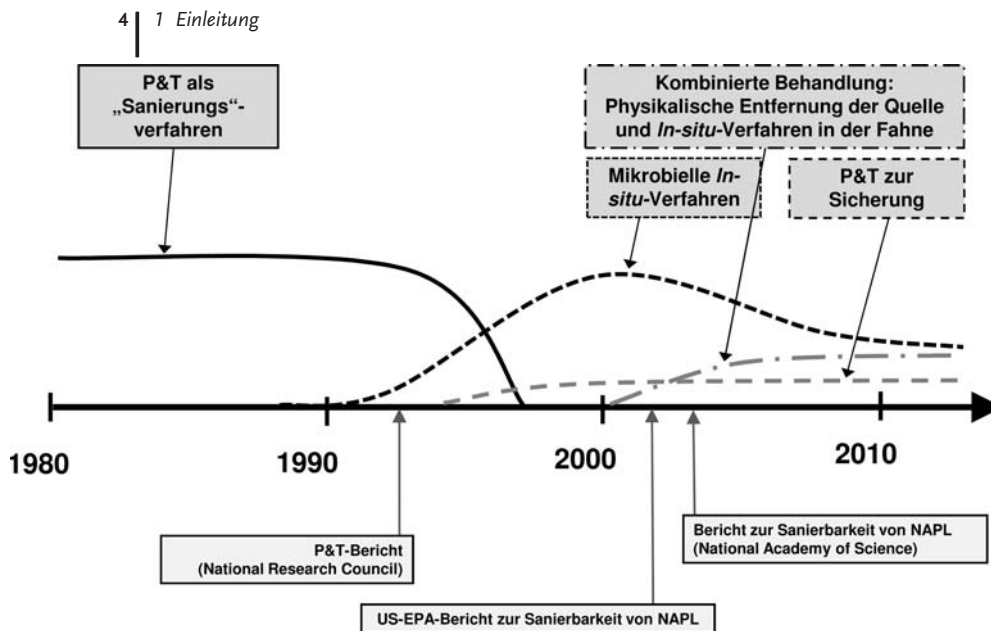


Abb. 1.2 Markttrends in den USA.

Erkenntnis, dass mit P&T die vorgegebenen Sanierungszielwerte nur in den wenigsten Fällen erreicht werden können [8].

Dies hatte zur Folge, dass vermehrt *In-situ*-Verfahren vorzugsweise zur Sanierung der Fahne als Alternative zum P&T zum Einsatz kamen. Zunächst konzentrierten sich die *In-situ*-Verfahren auf den mikrobiellen Schadstoffabbau unter aeroben Bedingungen. Verfahren, die auf anderen als mikrobiellen Prozessen beruhen, wurden in diesem Zeitraum noch sehr selten angewendet. Parallel dazu war ein Paradigmenwechsel von P&T als Dekontaminationsmaßnahme hin zu einer Anwendung als hydraulische Sicherung zu verzeichnen. Andererseits kristallisierte sich Anfang der 2000er Jahre heraus, dass auch Schwierigkeiten bestehen, einen Schadstoffherd mit *In-situ*-Verfahren zu dekontaminieren [9, 10]. In der Folgezeit entwickelten sich Kombinationen aus physikalischer Sanierung des Schadensherdes (z. B. durch Bodenaustausch) und einer Reihe von *In-situ*-Verfahren für die Behandlung der gelösten Schadstoffe, bevorzugt zur Behandlung der Fahne.

Der Erkenntniszuwachs der letzten 20 Jahre zu den im Untergrund ablaufenden Prozessen hat zu einem stark verbesserten und damit auch präziseren Standortverständnis geführt. Insbesondere die Ergebnisse des Forschungsverbundes KORA (Kontrollierter natürlicher Rückhalt und Abbau von Schadstoffen bei der Sanierung kontaminierter Grundwässer und Böden; [www.natural-attenuation.de](http://www.natural-attenuation.de)) [11] haben einen Paradigmenwechsel „von der Black Box zum Standortmanagement“ verursacht. Dies mag der Anwendung von *In-situ*-Verfahren Vorschub geleistet haben. Zwischenzeitlich sind die Verfahren auch hinsichtlich ihrer wissenschaftlichen Grundlagen besser verstanden und technisch sehr viel weiter entwickelt worden.

Moderne *In-situ*-Verfahren beruhen auf der Injektion von Reagenzien zur Forcierung des chemischen oder mikrobiellen Abbaus oder von Wärme, wodurch Schadstoffe in eine mobile, extrahierbare Form überführt werden. Um solche *In-situ*-Verfahren zu beherrschen, sind umfangreiche Kenntnisse über die im Untergrund ablaufenden biogeochemischen und physikalischen Prozesse sowie deren Beeinflussbarkeit erforderlich. Im englischen Sprachgebrauch werden die *In-situ*-Verfahren daher auch als *Knowledge Intensive* bezeichnet. *In-situ*-Sanierungsverfahren werden heute nicht nur mit dem Ziel einer Verkürzung der Sanierungsdauer und der Sanierungskosten als Alternative zu den klassischen Sanierungsverfahren eingesetzt, sondern adressieren neben der Fahne auch mehr und mehr den Schadensherd [12].

Mit der Einführung des Bundesbodenschutzgesetzes (BBodSchG) [13] wurden erstmals unter bestimmten Voraussetzungen systematische Untersuchungen zur Entscheidung über Art und Umfang der erforderlichen Maßnahmen (Sanierungsuntersuchungen mit Variantenstudie) und zur Ableitung des am besten geeigneten Sanierungsverfahrens erforderlich. Voraussetzung für die Notwendigkeit einer Sanierungsuntersuchung ist, dass der Schadensfall ausreichend komplex ist, was für solche Fälle, bei denen *In-Situ*-Maßnahmen erwogen werden, angenommen werden kann. Damit war die Verpflichtung aufgegeben, neben den P&T-Verfahren auch andere Verfahren zu betrachten und zu bewerten. Gleichwohl fanden *In-situ*-Verfahren trotz der auch in Deutschland bereits frühzeitig, d. h. seit Anfang der 1990er Jahre erzielten Sanierungserfolge und der stets postulierten ökonomischen und ökologischen Vorteile keine rasche Verbreitung. Ähnliches wird auch in anderen Ländern festgestellt [15]. Die Gründe dafür sind vielfältig:

- Unsicherheiten hinsichtlich der technischen Zuverlässigkeit und der erreichbaren Ziele.
- Unsicherheiten hinsichtlich der erforderlichen Sanierungszeiträume und der damit verbundenen finanziellen Risiken.
- Unsicherheiten hinsichtlich der Kriterien für die Auswahl des anzuwendenden Verfahrens.
- Neues Wissen kommt nicht in ausreichendem Maße in der Praxis an.
- Es fehlen Standards für die Auslegung und Überwachung einzelner Verfahren.
- Begrenzte behördliche Akzeptanz für die Infiltration von Stoffen ins Grundwasser.
- Der nachsorgende Umweltschutz rückt aus dem Blickwinkel vor dem Hintergrund noch drängenderer Probleme.

Eine weitere mögliche Ursache könnte darin liegen, dass *In-situ*-Verfahren als *Knowledge Intensive* gelten, also ein hohes Maß an Standort- und Prozessverständnis vorhanden sein muss, um sie einsetzen zu können. Dies gilt insbesondere für eine Prognose des Sanierungsverlaufes, wobei die Dauer, die meist linear mit den Kosten korreliert, das wesentlichste kostenbasierte Entscheidungselement darstellt. Liegen hier Unsicherheiten vor, fällt leicht die Entscheidung für ein häufiger angewendetes, in seinem Verlauf hinsichtlich der Wirksamkeit vermeintlich leicht

ter abschätzbare Verfahren. Sanierungsentscheidungen, insbesondere Entscheidungen für oder gegen *In-situ*-Verfahren werden in der Praxis vielfach aufgrund einer dürftigen Datengrundlage getroffen. Dies führte bei der Realisierung der Maßnahmen neben einer großen Kostenunsicherheit auch zu einer erheblichen Unsicherheit hinsichtlich der erreichbaren Sanierungsziele. Es ist aber auch allgemein akzeptiert, dass die vermehrte Verwendung von *In-situ*-Verfahren zu Kosteneinsparungen, einem Schub für den Markt für Umwelttechnologien und zu gewichtigen Zugewinnen hinsichtlich der Nachhaltigkeit bei Sanierungen führt [15].

In Deutschland haben wir derzeit noch einen Flächenverbrauch von jährlich 1000 km<sup>2</sup>. Vor dem Hintergrund, dass bis 2050 ein Netto-Null-Flächenverbrauch angestrebt wird und die Europäische Kommission 2006 in ihrer Bodenschutzstrategie eine nachhaltigere Nutzung unserer Böden und die Notwendigkeit einer Sanierung belasteter Standorte angemahnt hat [7], wird die Notwendigkeit, über bezahlbare und effiziente Sanierungsverfahren zu verfügen, verstärkt evident.

### 1.3

#### Gesetzliche Rahmenbedingungen

Bevor die gesetzlichen Rahmenbedingungen erörtert werden können, ist zunächst eine Definition einiger Begriffe erforderlich, allem voran Boden und Grundwasser. Nach dem BBodSchG [13] ist der „Boden im Sinne dieses Gesetzes [...] die obere Schicht der Erdkruste, soweit sie Träger der [...] Bodenfunktionen ist, einschließlich der flüssigen Bestandteile (Bodenlösung) und der gasförmigen Bestandteile (Bodenluft), ohne Grundwasser und Gewässerbetten“ (§ 2, Abs. 1). Das Grundwasser wird nach DIN 4049 [16] definiert als „unterirdisches Wasser, das die Hohlräume der Erdrinde zusammenhängend ausfüllt und dessen Bewegung ausschließlich oder nahezu ausschließlich von der Schwerkraft und den durch die Bewegung selbst ausgelösten Reibungskräften bestimmt wird“. Das Wasserhaushaltsgesetz [17] bestimmt Grundwasser als „das unterirdische Wasser in der Sättigungszone, das in unmittelbarer Berührung mit dem Boden oder dem Untergrund steht“. Nicht zum Grundwasser zählt das in der ungesättigten Bodenzone im Wesentlichen durch Oberflächenspannung oder durch Kapillareffekte gebundene Wasser. Auch das Sickerwasser in der ungesättigten Bodenzone gehört nicht zum Grundwasser.

Das Vorgehen bei der Untersuchung möglicher Untergrundkontaminationen, der Abschätzung zur Notwendigkeit einer Sanierung sowie der Durchführung und Beendigung der Sanierung selbst ist umfassend im Bundesbodenschutzgesetz (BBodSchG) und der dazugehörigen Verordnung (BBodSchV) [14] sowie in weiterführenden Landesgesetzen gesetzlich geregelt. Für Schadstoffbelastungen, die sich bereits im Grundwasser befinden, ist zusätzlich das Wasserhaushaltsgesetz (WHG) bestimmend. Nach der Systematik des BBodSchG/V gliedert sich die Bearbeitung von Kontaminationen in folgende Stufen:

- Historische Erkundung
- Orientierende Erkundung
- Detailuntersuchung (DU)
- Sanierungsuntersuchung (SU)
- Sanierungsplan (nach § 13 BBodSchG)

Die Detailuntersuchung endet mit einer umfassenden Gefährdungsabschätzung und der Feststellung, ob eine so genannte schädliche Bodenveränderungen vorliegt. Dabei handelt es sich um Beeinträchtigungen der Bodenfunktion, die geeignet sind, Gefahren (z. B. für die Gesundheit), erhebliche Nachteile (z. B. für Vermögen), erhebliche Belästigungen (z. B. für das Wohlbefinden) für den Einzelnen oder die Allgemeinheit herbeizuführen. Standorte mit schädlichen Bodenveränderungen werden dann als Altlast bezeichnet, wenn betreffende Altstandorte oder Altlagerungen nicht mehr in Betrieb sind.

Im Rahmen der Gefährdungsabschätzung werden die am Untersuchungsstandort relevanten Wirkungspfade ermittelt (Abbildung 1.3). Während in den meisten Fällen der Wirkungspfad Boden → Grundwasser dominiert, spielt insbesondere bei den LCKW auch das Eindringen gasförmiger Schadstoffe in Innenräume eine wesentliche Rolle bei der Gefährdungsabschätzung. In überbauten und damit versiegelten ungesättigten, stark kontaminierten Bodenbereichen kann der natürliche Abbau nicht chlorierter Schadstoffe zu erheblichen Methanbelastungen führen. Methan ist zwar kaum toxisch, kann aber in höheren Konzentrationen und in Mischung mit Sauerstoff explosive Atmosphären bilden. Für die spätere Sanierung – unter Sanierung wird nach dem BBodSchG sowohl Sicherung als auch Dekontamination verstanden – gilt, dass diese auf eine Unterbrechung der relevanten Wirkungspfade ausgelegt sein muss. Das BBodSchG gibt vor, „... den

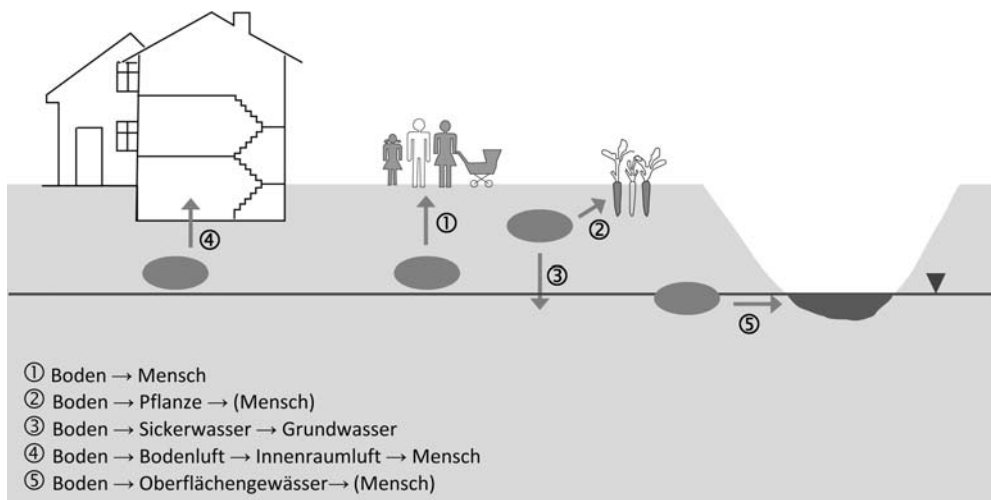


Abb. 1.3 Wirkungspfade [18].

Boden und Altlasten sowie durch schädliche Bodenveränderungen oder Altlasten verursachte Verunreinigungen von Gewässern so zu sanieren, dass dauerhaft keine Gefahren, erheblichen Nachteile oder erheblichen Belästigungen für den Einzelnen oder die Allgemeinheit entstehen.“ (§ 4 Abs. 3).

Im Rahmen der Sanierungsuntersuchung (bzw. Sanierungsauswahl) wird für den kontaminierten Standort die unter technischen und wirtschaftlichen Gesichtspunkten am besten geeignete und verhältnismäßige Technik ermittelt. Die Prüfung der Verhältnismäßigkeit umfasst die Punkte Geeignetheit, Erforderlichkeit und Angemessenheit.

*In-situ*-Sanierungsverfahren stellen durch das Einleiten von Stoffen, durch Erhitzen oder Ähnliches in erster Linie erhebliche Eingriffe in den Boden und das Grundwasser dar, dies jedoch mit dem Ziel, dessen Zustand erheblich zu verbessern. Regelungen zur Einleitung von Stoffen in das Grundwasser finden sich im Wasserhaushaltsgesetz (WHG), den jeweiligen Wassergesetzen der Bundesländer und den Wasserschutzgebietsverordnungen.

Um eine behördliche Akzeptanz für das geplante *In-situ*-Sanierungsverfahren zu erzielen, sind die Einleitungen nach Art, Menge, Ort und Häufigkeit zu begründen, die mit den Eingriffen verbundenen Risiken dazustellen und dem erzielbaren Erfolg gegenüberzustellen. Auch das Aufstauen, Absenken und Umleiten von Grundwasser ist ein genehmigungsbedürftiger Tatbestand (§ 9, Abs. 2, Nr. 1). Nach einem wasserrechtlichen Antrag unter Berücksichtigung der genannten Punkte kann eine wasserrechtliche Erlaubnis (§ 8) z. B. für die Einleitung flüssiger Stoffe (§ 9 Abs. 2) wie Alkohole, Tenside, Melasse und andere erteilt werden. Die Erlaubnis wird nur dann erteilt, wenn dauerhaft keine nachteilige Veränderung der Wasserbeschaffenheit zu besorgen ist (§ 48, Abs. 1) und keine schädlichen nicht vermeidbaren oder nicht ausgleichbaren Grundwasserveränderungen zu erwarten sind (§ 12, Abs. 1). Bei der Planung der Sanierungsverfahren gilt allgemein, dass kontaminiertes nicht mit unkontaminiertem Grundwasser vermischt werden darf. Dies ergibt sich hauptsächlich aus dem Verschlechterungsverbot im WHG (§ 47) [17].

#### 1.4

##### Verfahrensübersicht

Der Duden [19] definiert „*in situ*“ mit „in der natürlichen, richtigen Lage“ oder „in originaler Lage“. Dies bedeutet, übertragen auf die Sanierung von Umweltschäden, dass die Schadstoffe dort abgebaut werden, wo sie sich befinden. Der Gegensatz dazu bezeichnet „*ex situ*“ Verfahren, bei denen die Schadstoffe und das Medium, in dem sie sich befinden (Boden und/oder Grundwasser), entnommen und an einem anderen Ort die Schadstoffe entfernt werden. Zu den klassischen *Ex-situ*-Verfahren zählen der Bodenaustausch und das Abpumpen von Grundwasser mit nachfolgender Reinigung und Ableitung oder Re-Infiltration (*Pump and Treat*) bzw. die Bodenluftabsaugung für die ungesättigte Bodenzone. Sanierungsverfahren, bei denen der Abbau zwar bevorzugt *in situ* erfolgt, bei denen aber ein



übergelagerter hydraulischer Spülkreislauf hilft, die für die Behandlung der Schadstoffe erforderlichen Reagenzien zu verteilen, sind keine reinen *In-situ*-Verfahren mehr. Dies gilt insbesondere dann, wenn zusätzlich vor der Re-Infiltration eine Reinigung des entnommenen Grundwassers stattfindet. Es handelt sich dann eher um ein Hybrid-Verfahren. Gleiches gilt z. B. für die thermischen Verfahren, bei denen die mobilisierten Schadstoffe mittels Bodenluftabsaugung entfernt werden. *In-situ*-Verfahren können auf verschiedene Kompartimente angewendet werden, wie die ungesättigte Bodenzone, den Aquifer oder die Grenzfläche zwischen beiden, also die Kapillarzone. Je nach behandeltem Kompartiment unterscheiden sich die Verfahren signifikant. Für die ungesättigte Bodenzone liegt nur eine geringe Anzahl von *In-situ*- oder Hybrid-Verfahren vor:

- Phytosanierung
- *Bioventing*
- Elektrokinetik
- Thermisch unterstützte Bodenluftabsaugung

Die Kapillarzone wird meist nur dann separat behandelt, wenn sich dem Grundwasser aufschwimmend eine nicht wässrige Leichtphase (*Light Non-Aqueous Phase Liquid*; LNAPL) gebildet hat:

- *Dual-Phase-Extraction*
- *Multi-Phase-Extraction*

Die unterschiedlichen Verfahren zur *In-situ*-Sanierung der gesättigten Bodenzone können in drei große Bereiche (Grundverfahren) mit den jeweiligen spezifischen Einzelverfahren eingeteilt werden:

- Biologische Verfahren
  - Aerob
    - Elektronenakzeptor-Injektionsverfahren
    - *Air Sparging* / *Biosparging*
    - Methan-Biostimulationsverfahren
    - Sauerstoffdiffusionsverfahren
    - Biooxidationswand
  - Anaerob
    - Elektronenakzeptor-Injektionsverfahren (nicht chlorierte Schadstoffe)
    - Elektronendonator-Injektionsverfahren (chlorierte Schadstoffe, Metalle)
- Chemische Verfahren
  - *In situ* chemische Oxidation (ISCO)
  - *In situ* chemische Reduktion (ISCR)
    - Injektion von nanopartikulärem Eisen
    - Injektion von Dithionit
- Physikalische Verfahren
  - Thermische Verfahren

- Dampfinjektion
- *Thermal Conductive Heating* (TCH)
- *Electrical Resistance Heating* (ERH)
- Tensid- oder Alkoholspülung
- Unterdruckverdampferbrunnen (UVB)
- Grundwasserzirkulationsbrunnen (GZB)

Diese Liste lässt sich sicherlich noch weiter fortschreiben, beispielsweise um Sicherungsverfahren, Immobilisierungsverfahren oder andere Spezialverfahren [20]. Darüber hinaus sind Kombinationen einzelner Verfahren möglich. Stellvertretend sei die Injektion von EZVI (*Emulsified Zero Valent Iron*) genannt. Dabei handelt es sich um eine Mischung aus nanopartikulärem Eisen und organischen Stoffen zur gleichzeitigen Forcierung mikrobieller und chemischer Abbauvorgänge.

Während biologische und chemische Verfahren die Eliminierung der Schadstoffe vor Ort fördern, führen physikalische Verfahren zu einer Änderung des Aggregatzustandes mit dem Ziel einer Solubilisierung und damit einer Mobilisierung, so dass eine nachfolgende Extraktion aus dem Untergrund heraus über den Wasser- oder Gaspfad erleichtert werden. Die eigentliche Schadstoffeliminierung findet dann mit Hilfe der gewählten Anlagentechnik *ex situ* statt. Da beim *Air Sparging* der pneumatische Austrag von Schadstoffen (physikalische Komponente) im Vergleich zum mikrobiellen Abbau meist nur eine kleine Rolle spielt, ist das Verfahren den mikrobiellen Verfahren zugeordnet.

Die genannten Verfahren werden nach den dominierenden Prozessen eingeteilt. Oft spielen darüber hinaus auch weitere Prozesse eine im Hinblick auf den Sanierungserfolg nicht zu vernachlässigende Rolle. So kann beispielsweise die Zugabe von Tensiden zur Mobilisierung von LCKW auch deren reduktiven mikrobiellen Abbau fördern oder es verbleibt nach der chemischen Oxidation mittels Fenton's Reagenz eine große Menge von Sauerstoff im Aquifer, der von den nach dem Ende der Oxidationsphase nicht abgetöteten Mikroorganismen zum aeroben Abbau von Schadstoffen genutzt werden kann. Es gibt es noch viele weitere Beispiele für mögliche „Nebenreaktionen“.

Generell muss unterschieden werden, ob die Verfahren in der Quelle oder in der Fahne angewendet werden können. Wegen der signifikant verschiedenen Eigenschaften der beiden Bereiche – Fahne und Quelle – sind grundlegend unterschiedliche Bewertungen beim Einsatz der *In-situ*-Sanierungsverfahren erforderlich. Gleichwohl sind bei der Anwendung der innovativen *In-situ*-Verfahren spezifische Einsatzgrenzen zu beachten, die ihre Ursache zumeist in ungünstigen standort-spezifischen Randbedingungen haben.

PRB-Verfahren (*Permeable Reactive Barrier*), die in verschiedenen Ausführungen wie *Funnel and Gate*, *Drain and Gate*, durchströmte reaktive Wände oder auch Dichtwand-Hebereaktor zur Anwendung kommen können, stellen im Hinblick auf die obenstehende Systematik eine Sonderform dar. In erster Linie sind PRB im Vergleich zu den weiteren diskutierten *In-situ*-Verfahren keine Dekontaminations-

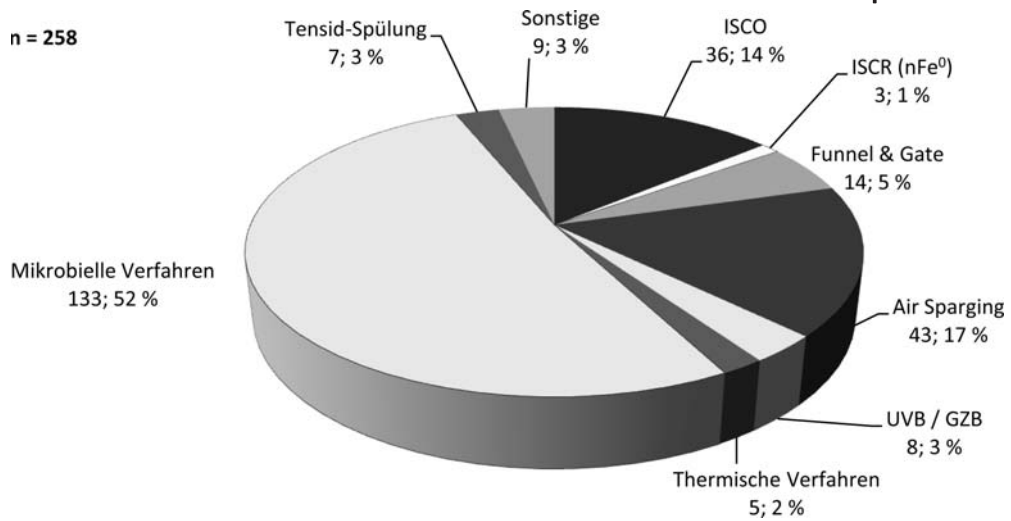


Abb. 1.4 Angewendete *In-situ*-Verfahren (Doppelnennungen möglich) [22].

sondern Sicherungsverfahren und zum anderen können PRB in Abhängigkeit von den gewählten Reaktoren biologische, chemische oder physikalische Verfahren darstellen. PRB wurden intensiv im Forschungsverbund RUBIN untersucht. Als Ergebnis wurde 2007 ein Handbuch mit Handlungsempfehlungen veröffentlicht [21], diese Verfahren werden daher im vorliegenden Buch nicht behandelt.

Im Rahmen einer bundesweiten Fallzusammenstellung des Ausschusses Altlasten (ALA) der LABO (Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft Bodenschutz) zu *In-situ*-Verfahren in der gesättigten Zone (Quelle und Fahne) wurde, auch wenn die Fallzusammenstellung keinen Anspruch auch Vollständigkeit erhebt, ersichtlich, dass mikrobielle Verfahren einschließlich *Air Sparging* mit zusammen rund 70 % die Mehrzahl der *In-situ*-Sanierungen ausmacht, wobei *Air Sparging* allein 17 % einnimmt (Abbildung 1.4) [22].

Von großer Bedeutung sind auch noch die Verfahren zur *in situ* chemischen Oxidation (ISCO) (14 %). Die weiteren genannten Verfahren nehmen einen jeweils nur relativ kleinen Anteil ein.

Im Hinblick auf die behandelten Schadstoffe stellen die LCKW die wichtigste Gruppe dar und machen rund 35 % aller *in situ* behandelten Schadstoffe aus, gefolgt von AKW (26 %) und MKW (21 %). Aufgrund der sehr unterschiedlichen Anforderungen an den Abbau der einzelnen Schadstoffgruppen stellt sich die Gruppe der mikrobiellen *In-situ*-Verfahren auch sehr heterogen dar (Abbildung 1.5). Ein großer Anteil der Verfahren umfasst den reduktiven mikrobiellen Abbau von LCKW unter Zugabe organischer Substrate wie Melasse. Zum Teil werden LCKW auch aerob mit Hilfe des Methan-Biostimulationsverfahren abgebaut (Injektion von Methan und Sauerstoff). Zur Forcierung des aeroben Abbaus werden ebenfalls eine Reihe unterschiedlicher Verfahren angewendet. Hierzu zählt die Injektion von Gasen (Luft oder Sauerstoff), Suspensionen O<sub>2</sub>-freisetzender Fest-

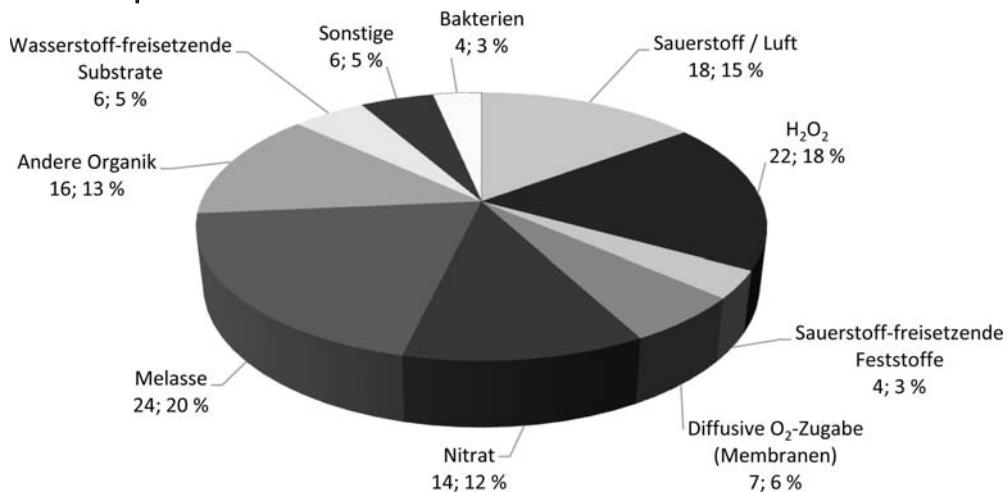


Abb. 1.5 Angewendete mikrobielle *In-situ*-Verfahren (Doppelnennungen möglich) [22].

stoffe, Flüssigkeiten (verdünnte H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>-Lösungen) oder diffusive Zugabe von Sauerstoff über Membransysteme.

Aus dieser Fallzusammenstellung wird deutlich, wo der Schwerpunkt dieses Buchs liegen soll: bei den mikrobiellen *In-situ*-Verfahren und den *in situ* chemischen Oxidationsverfahren. Das Buch soll einerseits einen hohen Praxisbezug aufweisen und dem Leser einen Eindruck vermitteln, wie die einzelnen Verfahren tatsächlich auch umgesetzt werden können, andererseits aber auch das entsprechende Hintergrundwissen vermitteln, das erforderlich ist, um eine Sanierung erfolgreich steuern zu können.

Bei den *In-situ*-Verfahren handelt es sich aber auch um eine Technologie, die einem ständigen Wandel und einer Fortentwicklung unterworfen ist. Daher soll, wo es angebracht erscheint, ein Ausblick auf die Zukunft vermittelt werden. Viele der in diesem Buch diskutierten Verfahren und vorgestellten Produkte unterliegen einem Patentschutz. Dies wurde in den folgenden Kapiteln nur in einzelnen, nicht aber in allen Fällen angegeben. Daher ist es in jedem Einzelfall erforderlich, sich vor jeder Anwendung eines Verfahrens über mögliche patentrechtlich Anwendungsbeschränkungen zu informieren.

## Literatur

- 1 Gühr, R., Daniel, B., Gramatte, A., Rippen, G., Wiesert, P. (1990) Altlasten-Analytik, ecomed Verlag, Landsberg.
- 2 Europäische Kommission (2012) Die Umsetzung der Thematischen Strategie für den Bodenschutz und laufende Maßnahmen, Brüssel, 13.2.2012. <http://www.dbges.de/wb/media/2012-02-13%20EU-KOM%20-%20Fortschrittsbericht%20zur%20Thematischen%20Strategie%20Bodenschutz.pdf> (08.07.2012).
- 3 Lühr, H.P. (2007) Altlasten – so fing alles an. Vortrag anlässlich der Verabschiedung von Dr. Franzius, Umweltbundesamt am

- 14.09.2007. [http://www.hpl-berlin.de/Seiten/Downloads/Allasten\\_so\\_fing\\_alles\\_an.pdf](http://www.hpl-berlin.de/Seiten/Downloads/Allasten_so_fing_alles_an.pdf) (25.06.2012)
- 4 Raymond, R. (1974) Reclamation of hydrocarbon contaminated groundwater. US-Patent 3,846,290, filed 29.09.1972, issued 05.11.1974.
  - 5 Gassmann, G., Gunkel, W. (1979). Verfahren zur Beseitigung offener und latenter Verölung. DE Patent 2533775, 03.02.1977.
  - 6 Jhaveri, V., Mazzacca, A.J., Snyder, H. (1983) Method and apparatus for treating hydrocarbon and halogenated hydrocarbon contaminated ground and groundwater, US-Patent 4,404,569, filed 09.07.1981, issued 30.08.1984.
  - 7 Gier, S. (2012) Sanierung kontaminierter Standorte – Schlüssel für ein effizientes Flächenmanagement in der EU. *altlasten spektrum* 1/12, 34-35.
  - 8 National Research Council (NRC) (1994) Alternatives for Groundwater Clean-up, National Academy Press, Washington, DC.
  - 9 U.S. EPA (2003) The DNAPL Remediation Challenge: Is There a Case for Source Depletion? Expert Panel on DNAPL Remediation, EPA 600-R-03-143, <http://www.epa.gov/nrmrl/pubs/600r03143.html> (21.12.2012)
  - 10 National Research Council (NRC) (2004) Contaminants in the Subsurface: Source Zone Assessment and Remediation, National Academies Press, Washington, DC.
  - 11 Michels, J., Stuhmann, M., Frey, C., Koschitzky, H.P. (Hrsg.) (2008) Handlungsempfehlungen mit Methodensammlung, Natürliche Schadstoffminderung bei der Sanierung von Altlasten, VEGAS, Institut für Wasserbau, Universität Stuttgart, DE-CHEMA e.V. Frankfurt, ISBN 978-3-89746-092-0. [www.natural-attenuation.de](http://www.natural-attenuation.de).
  - 12 Held, T. (2007) Neue Verfahren und Konzepte zur Quellensanierung: Eine Einführung. In: V. Franzius, K. Wolf, E. Brandt (Hrsg.), Handbuch Altlastensanierung, C. F. Müller Verlag, Heidelberg, 51. Aktualisierung, 3. Aufl. März 2007, 5851.
  - 13 Gesetz zum Schutz vor schädlichen Bodenveränderungen und zur Sanierung von Altlasten (Bundes-Bodenschutzgesetz-BBodSchG) vom 17. März 1998 (BGBl. I S. 502), zuletzt geändert durch Art. 5, Abs. 30 vom 24.02.2012 (BGBl. I S. 212).
  - 14 Bundes-Bodenschutz- und Altlastenverordnung (BBodSchV) 12.07.1999 (BGBl. I S. 1554), zuletzt geändert durch Artikel 5, Abs. 31 des Gesetzes vom 24. Februar 2012 (BGBl. I S. 212).
  - 15 Common Forum, NICOLE (2009) Common Position Paper On Innovative Technologies, [www.commonforum.eu/publications\\_positionpapers.asp](http://www.commonforum.eu/publications_positionpapers.asp) (10.07.2012).
  - 16 DIN 4049-1:1992-12: Hydrologie; Grundbegriffe. Beuth-Verlag, Berlin.
  - 17 Wasserhaushaltsgesetz vom 31. Juli 2009 (BGBl. I S. 2585), zuletzt geändert durch Artikel 5 Absatz 9 vom 24. Februar 2012 (BGBl. I S. 212).
  - 18 Reiersloh, D., Reinhard, M. (2009) Altlastenratgeber für die Praxis – Eine Reise durch die Welt schadstoffbelasteter Grundstücke – vom „Sanierungserfordernis“ bis zur „Brachflächenrevitalisierung“, Vulkan Verlag, Essen.
  - 19 Drosdowski, G., Köster, R., Müller, W., Scholze-Stubenrecht, W. (Hrsg.) (2009) Die deutsche Rechtschreibung. Band 1. 25. Auflage, Bibliographisches Institut GmbH (Dudenverlag), Mannheim, Leipzig, Wien, Zürich.
  - 20 ITVA (2010) Arbeitshilfe – H 1 – 13: Innovative In-situ-Sanierungsverfahren. Hrsg. Ingenieurtechnischer Verband für Altlastenmanagement und Flächenrecycling e.V. (ITVA), Berlin.
  - 21 Burmeier, H., Birke, V., Ebert, M., Finkel, M., Rosenau, D., Schad, H. (2007) RUBIN I Handbuch: Anwendung von durchströmten Reinigungswänden zur Sanierung von Altlasten, Endbericht. <http://www.rubin-online.de/deutsch/bibliothek/downloads/index.html>.
  - 22 Held, T. (2012) Auswertung von Fällen mit In-situ-Anwendungen in der gesättigten Zone bei der Altlastenbearbeitung – Teil 2. Finanziert durch das Länderfinanzierungsprogramm „Wasser, Boden und Abfall“ (Hrsg.) [www.laenderfinanzierungsprogramm.de/cms/WaBoAb\\_prod/WaBoAb/Vorhaben/LABO/index.jsp](http://www.laenderfinanzierungsprogramm.de/cms/WaBoAb_prod/WaBoAb/Vorhaben/LABO/index.jsp).

