



# In-situ-Quellensanierung für diverse Schadstoffquelltypen

## ITVA-Arbeitshilfe H1-17

Stand 05.11.2024

### Impressum

#### Herausgeber

Ingenieurtechnischer Verband für Altlastenmanagement und Flächenrecycling e.V. (ITVA)  
Leipziger Platz 9  
D-10117 Berlin  
Tel.: 030 / 48 63 82 80  
Fax: 030 / 48 63 82 82  
E-Mail: [info@itv-altlasten.de](mailto:info@itv-altlasten.de) Inter-  
net: [www.itv-altlasten.de](http://www.itv-altlasten.de)

#### Autoren/Autorinnen

**M. Cornelsen, U. Hiester, U. Hintzen, E. W. Hoffmann, S. Hüttmann, F. Karg, K. Menschner,  
K. Neumann, N. Pawletko, V. Zeisberger**

#### Bildnachweise

Die Nutzungsrechte der Bilder liegen bei Dr. Frank KARG / HPC INTERNATIONAL SAS sowie Volker Zeisberger / HLNUG. Weitere Urheberrechte sind in den Verfahrensblättern angegeben.

#### Endredaktion, Layout

Elke Kadgien, ITVA e.V.

#### Stand

05.11.2024



© 2024 Ingenieurtechnischer Verband für Altlastenmanagement und Flächenrecycling e. V. (ITVA) • Berlin

Jede Verwertung, die nicht ausdrücklich urheberrechtlich zugelassen ist, bedarf der vorherigen schriftlichen Zustimmung des Herausgebers. Dies betrifft insbesondere Vervielfältigungen, Bearbeitungen, Mikroverfilmungen und die Einspeicherung und Verarbeitung in elektronischen Systemen sowie Übersetzungen.

Haftungsausschluss: Diese Arbeitshilfe entbindet in keinem Fall von der Verpflichtung zur Beachtung der gesetzlichen Vorschriften. Sie wurde mit großer Sorgfalt erstellt. Dennoch übernehmen die Verfasser und der ITVA e.V. keine Gewähr und Haftung für die Richtigkeit, Zuverlässigkeit, Vollständigkeit, Qualität und Aktualität der bereitgestellten Informationen, Angaben, Hinweise und Ratschläge sowie für eventuelle Druckfehler. Aus etwaigen Folgen können deswegen keine Ansprüche, weder gegen die Verfasser noch gegen den ITVA e.V. geltend gemacht werden.

## Inhalt

|   |    |
|---|----|
| Inhalt  | 3  |
| Abbildungsverzeichnis                                     | 4  |
| Tabellenverzeichnis                                       | 4  |
| 1 Veranlassung und Zielsetzung                            | 5  |
| 2 Einführung  | 7  |
| 3 Schadstoffquellen                                       | 8  |
| Allgemeines   | 8  |
| Schadstoffquellen-Typen                                   | 9  |
| 4 Regelungsbereiche                                       | 23 |
| 5 Anwendungsbereiche und -voraussetzungen                 | 24 |
| 6 Konzeptionelles Standortmodell                          | 28 |
| 7 Sanierungsuntersuchung                                  | 32 |
| Anwendungsrisiken   | 32 |
| Hydrogeologische und hydrogeochemische Risiken            | 33 |
| Verfahrenstechnische Risiken                              | 34 |
| Risiken bei chemischen / biologischen In-situ-Sanierungen | 35 |
| Risiken bei thermischen In-situ-Sanierungen               | 36 |
| 8 Sanierungskonzept                                       | 38 |
| Sanierungsstrategien und deren Zielsetzungen              | 38 |
| 9 Sanierungsanwendung und Ausblick                        | 39 |
| 10 Literaturverzeichnis und weiterführende Literatur      |    |
| 11 Verfahrensblätter zur In-situ-Quellensanierung         | 41 |
| Anlagen zu 11: Verfahrensblätter                          | 46 |

## Abbildungsverzeichnis

|               |  |
|---------------|--|
| Abbildung 1:  | Schematische Darstellungen von Schadstoffquellen inkl. Sekundärquellen und Schadstofffahne (Quelle: Co-Autoren der ITVA-H1-Arbeitshilfe In-situ-Quellensanierung: Karg/Zeisberger 2023). *NAPL: Non Aqueous Phase Liquid ..... 8   |
| Abbildung 2:  | Schadstoffquellentypen A-1 (mit ihren Transferpfaden) von nicht-wässrigen aber z.T. flüchtigen Flüssigkeiten (NAPL-V: Non Aqueous Phase Liquid - Volatile). Hierbei ist die Schadstoff- Infiltrationsmasse kleiner als das Sorptions- bzw. Rückhaltevermögen der ungesättigten Zone (Quelle: Co-Autoren der ITVA-H1-Arbeitshilfe In-situ-Quellensanierung: Karg/Zeisberger 2023).11  |
| Abbildung 3:  | Schadstoffquellentypen A-2 (mit ihren Transferpfaden) von leichten, nicht-wässrigen aber z.T. flüchtigen Flüssigkeiten (LNAPL-V: Light Non Aqueous Phase Liquid – Volatile). Hierbei ist die Schadstoff-Infiltrationsmasse größer als das Sorptions- bzw. Rückhaltevermögen der ungesättigten Zone). (Quelle: Co-Autoren der ITVA-H1-Arbeitshilfe In-situ-Quellensanierung: Karg/Zeisberger 2023) ..... 12   |
| Abbildung 4:  | Schadstoffquellentypen A-3 (mit Transferpfaden) von schweren, nicht-wässrigen aber z.T. flüchtigen Flüssigkeiten (DNAPL-V: Dense Non Aqueous Phase Liquid – Volatile). Hierbei ist die Schadstoff-Infiltrationsmasse grösser als das Sorptions- bzw. Rückhaltevermögen der ungesättigten Zone. (Quelle: Co-Autoren der ITVA-H1-Arbeitshilfe In-situ-Quellensanierung: Karg/Zeisberger 2023)13  |
| Abbildung 5:  | Schadstoffquellentypen B-1 (mit ihren Transferpfaden) von z.T. wässrigen aber auch z.T. flüchtigen Flüssigkeiten und Lösungen. Hierbei ist die Schadstoff-Infiltrationsmasse kleiner als das Sorptions- bzw. Rückhaltevermögen der ungesättigten Zone. Ein Grundwasserschaden ist (noch) nicht eingetreten. (Quelle: Co-Autoren der ITVA-H1-Arbeitshilfe In-situ-Quellensanierung: Karg/Zeisberger 2023) ..... 15  |
| Abbildung 6:  | Schadstoffquellentypen B-2 (mit Transferpfaden) von wässrigen aber z.T. flüchtigen Flüssigkeiten und Lösungen. Hierbei ist die Schadstoff-Infiltrationsmasse größer als das Sorptions- bzw. Rückhaltevermögen der ungesättigten Zone. (Quelle: Co-Autoren der ITVA- H1- Arbeitshilfe In-situ- Quellensanierung: Karg/Zeisberger 2023)..... 16  |
| Abbildung 7:  | Schadstoffquellentypen C-1a (mit Transferpfaden) von festen aber z.T. löslichen Schadstoffen. Hierbei ist die Schadstoff-Infiltrationsmasse kleiner als das Sorptions- bzw. Rückhaltevermögen der ungesättigten Zone. (Quelle: Co-Autoren der ITVA-H-1-Arbeitshilfe In-situ- Quellensanierung: Karg/Zeisberger 2023)..... 18   |
| Abbildung 8:  | Schadstoffquellentypen C-1b (mit Transferpfaden) von festen aber z.T. löslichen Schadstoffen. Hierbei ist die Schadstoff-Infiltrationsmasse größer als das Sorptions- bzw. Rückhaltevermögen der ungesättigten Zone. (Quelle: Co-Autoren der ITVA-H1-Arbeitshilfe In-situ- Quellensanierung: Karg/Zeisberger 2023)..... 20   |
| Abbildung 9:  | Schadstoffquellentypen C-2a (mit Transferpfaden) von festen aber unlöslichen Schadstoffen. Hierbei ist die Schadstoff-Infiltrationsmasse kleiner als das Sorptions- bzw. Rückhaltevermögen der ungesättigten Zone. (Quelle: Co-Autoren der ITVA-H1- Arbeitshilfe In-situ- Quellensanierung: Karg/Zeisberger 2023)..... 21  |
| Abbildung 10: | Schadstoffquellentypen C-2b (mit Transferpfaden) von festen, wasserunlöslichen Schadstoffen. Hierbei ist die Schadstoff-Infiltrationsmasse größer als das Sorptions- bzw. Rückhaltevermögen der ungesättigten Zone. (Quelle: Co-Autoren der ITVA-H1-Arbeitshilfe In-situ-Quellensanierung: Karg/Zeisberger 2020 & 2023) ..... 22   |
| Abbildung 11: | Schadstoffquellentypen C-3 (mit Transferpfaden) von festen Schadstoffen bei Depots oder Deponien mit „nassem Fuß“ durch Einlagerung im Grundwasser (rechts) und direkte Auslaugung von Schadstoffen im Grundwasser sowie Bildung von toxischen sowie flüchtigen Transformationsprodukten und nachfolgender Ausgasung. Hierbei ist die Schadstoff- Infiltrationsmasse größer als das Sorptions- bzw. Rückhaltevermögen der ungesättigten Zone. (Quelle: Co-Autoren der ITVA- H1-Arbeitshilfe-In-situ-Quellensanierung: Karg/Zeisberger 2020).23 |
| Abbildung 12: | Beispiel eines konzeptionellen Schemas mit Transfer- & Wirkungspfaden der Schadstoffe (Quelle: Co-Autor der ITVA H1 Arbeitshilfe In-situ-Quellensanierung: Karg 2020 & 2023)..... 30   |

## Tabellenverzeichnis

|            |  |
|------------|--|
| Tabelle 1: | Schadstoffgruppen im Boden und Grundwasser ..... 26  |
| Tabelle 2: | Beispiele von Expositionsszenarien und Expositionspfaden, die im Rahmen von verschiedenen Nutzungsszenarien berücksichtigt werden können..... 30 |

# 1 Veranlassung und Zielsetzung

Seit Veröffentlichung der vom Arbeitskreis „Innovative In-situ-Sanierungsverfahren“ im ITVA-Fachausschuss H1 „Technologien und Verfahren“ erstellten Arbeitshilfe H1-13 im Juni 2010 [1] haben sich die dort sogenannten innovativen In-situ-Sanierungsverfahren weiterentwickelt und am Markt etabliert.

Diese Verfahren machen sich komplexe physikalische, biologische und chemische Vorgänge zu Nutze und stellen einen hohen Anspruch an die Planer und an die Genehmigungsbehörden. Sie bieten – einen sorgfältigen und sachgerechten Einsatz vorausgesetzt – ein hohes Potenzial, die Herausforderungen zu meistern, die eine Sanierung kontaminierter Standorte stellt. In der Ausführungspraxis haben sich die Anwendungsbereiche, Anwendungsvoraussetzungen und -grenzen der Verfahren gezeigt und zu entsprechenden Anpassungen geführt, so dass verfahrensbezogene Risiken bei den erfolgreichen Technologien weitgehend bekannt und in der Anwendung beherrschbar sind. Bei den In-situ-Sanierungsverfahren im ungesättigten und gesättigten Boden sowie im Grundwasser steht eine nachhaltige Reduzierung der Schadstoffpotenziale „vor Ort“ im Vordergrund.

Die hier vorgelegte Arbeitshilfe setzt ihren Schwerpunkt auf die quelltypbezogene Sanierung von Schadstoffquellen mittels In-situ-Verfahren im Boden und Grundwasser.

Aufbauend auf einer Definition des Begriffes Schadstoffquelle (Primär- oder Sekundärquelle) hat sich der Arbeitskreis „Quellensanierung“ im ITVA-Fachausschuss H1 „Technologien und Verfahren“ konstituiert. Ziel ist, den Entwicklungsstand und die bisherigen Erfahrungen bei der Anwendung innovativer In-situ-Sanierungsverfahren bei erfolgreichen und großtechnisch erprobten Technologien darzulegen. Hierzu werden Praxisbeispiele anhand ihrer Eignung und spezifischen Verfahrensgrenzen ausgewertet und in den Kontext zur Dekontamination von Schadstoffquellen gestellt.

Die Arbeitshilfe soll – ohne Anspruch auf Vollständigkeit – einen unabhängigen und möglichst ausgewogenen Überblick über mögliche Anwendungsbereiche und -grenzen von In-situ-Verfahren nach dem aktuellen Stand der Technik vermitteln.

Das neue zentrale Element der Arbeitshilfe bildet die Definition von Schadstoffquelltypen sowie die Beschreibung und Verknüpfung mit geeigneten Sanierungstechnologien mittels einheitlicher Verfahrensblätter.

Die aus der Anwendungspraxis bekannten Anwendungsvoraussetzungen bzw. Planungsgrundlagen werden erläutert. Erfolgreich angewendet werden heute physikalische, chemische und biologische In-situ-Sanierungsverfahren. Zu den Methoden werden jeweils die Anforderungen an notwendige Untersuchungen und die hierzu notwendigen Untersuchungsschritte beschrieben.

In der Arbeitshilfe werden nur solche In-situ-Sanierungsverfahren aufgeführt, die mehrfach erfolgreich zur Quellensanierung angewendet worden sind und damit dem Stand der Technik entsprechen. Dies gilt auch für die Gruppe der PFAS, deren Anwendung in der Sanierung sich zurzeit in einem dynamischen Prozess befindet.

Anmerkung: Potenziell anwendbare Techniken für weitere Schadstoffgruppen, wie z.B. für flüchtige PFAS (FTOH: Fluortelomeralkohole) oder TFA können im Rahmen dieser Arbeitshilfe nicht umfassend berücksichtigt werden.

Für die ausgewählten Verfahren werden Angaben zu wirksamen Prozessen, technischem Aufbau, spezifischen Planungsgrundlagen, Anwendungsbereichen und –grenzen, Besonderheiten, Risiken, Entwicklungsstand, Referenzen, Verfahrensgarantien und zu relevanten Fundstellen in

der aktuellen Literatur gemacht, die eine Einschätzung bzw. kritische Wertung durch den Anwender ermöglichen.

Grundwasserfahnenanierungen sind nicht Gegenstand dieser Arbeitshilfe.

Die Arbeitshilfe richtet sich an Fachleute und Sachverständige in Ingenieurbüros und Behörden sowie an Sanierungspflichtige. Sie soll dazu beitragen, die Prüfung der Eignung von Quellensanierungen mittels In-situ-Sanierungsverfahren im jeweiligen Einzelfall zu erleichtern, um eine qualifizierte Anwendung zu ermöglichen.

Die Anwendung der Arbeitshilfe steht jedem frei. Rechtliche Ansprüche aus der Anwendung ergeben sich nicht.

Der vorliegende Entwurf wurde vom Arbeitskreis „Quellensanierung“ im ITVA-Fachausschuss H1 „Technologien und Verfahren“ erarbeitet und vom Vorstand des ITVA zur Veröffentlichung freigegeben.

## 2 Einführung

Der Entwicklungsstand in Deutschland, der EU sowie international wird berücksichtigt. Begriffe und Definitionen der ITVA-H1-Arbeitshilfe 13 [1] werden verwendet.

In-situ-Sanierungsverfahren zur Quellensanierung nutzen physikalische, chemische und/oder biologische Prozesse [8]. Physikalische und chemische Prozesse führen zu einer Entfernung (z.B. bei thermisch unterstützter Bodenluftabsaugung), Umwandlung (z.B. Oxidation, Reduktion) oder Immobilisierung (z.B. Fällung, Sorption) der Schadstoffe im Untergrund. Biologische Prozesse können nicht nur abbaubare Schadstoffe eliminieren, sondern auch physikalisch-chemische Prozesse initiieren oder unterstützen. Umgekehrt können biologische Abbaureaktionen auch als "Sekundäreffekte" beim Einsatz physikalischer oder chemischer Verfahren auftreten.

In-situ-Sanierungsverfahren werden zur Quellensanierung in der ungesättigten Bodenzone und in der gesättigten Bodenzone eingesetzt. Dabei handelt sich zum einen um Methoden zur Leistungssteigerung klassischer Verfahren (z.B. in Verbindung mit P&T-Verfahren, Bodenluftsanierung), zum anderen aber auch um eigenständige Verfahren als Alternative zu bewährten Dekontaminations- und Sicherungsmaßnahmen.

Zur Unterstützung hydraulischer und pneumatischer Verfahren werden Techniken zur Erhöhung des Schadstoffaustrags und damit zur Verkürzung der Sanierungsdauer angewendet.

Die Entscheidung, ob eine Quellensanierung mittels In-situ-Sanierungsverfahren durchgeführt werden soll, ist nicht nur von den Schadstoffen, sondern auch von den Untergrundverhältnissen, der Lage der Kontamination im Untergrund und den planerischen und örtlichen Randbedingungen abhängig. Es handelt sich immer um eine Einzelfallentscheidung unter Berücksichtigung der Aspekte Auswirkung auf Schutzgüter, Sanierungsdauer und Verhältnismäßigkeit (Geeignetheit, Erforderlichkeit, Angemessenheit, siehe auch ITVA- H1-16: Verhältnismäßigkeitsprüfung bei der Sanierungsuntersuchung [39]).

Genehmigungsrechtlich kommen unterschiedliche Rechtsbereiche zum Tragen. Neben den Belangen des Wasserrechts und des Bodenschutzes können auch Genehmigungen nach Abfall- und Immissionsschutzrecht oder nach weiteren Normen (s. Verfahrensblätter, Kap. 10) erforderlich werden. Generell sind Art und Umfang der erforderlichen Genehmigungen und die zu ihrer Erteilung einzureichenden Unterlagen im Einzelfall mit der zuständigen Behörde abzustimmen und obliegen dem Planer.

### 3 Schadstoffquellen

Schadstoffquellen sind Bereiche in der ungesättigten und gesättigten Bodenzone, die hohe Gehalte mobiler bzw. mobilisierbarer Schadstoffe aufweisen, so dass die Schadstoffe über Grundwasser, Sickerwasser oder Bodenluft freigesetzt werden<sup>1</sup>. Die meisten Schadstoffquellen können als Primärquellen bezeichnet werden, daneben existieren auch Sekundärquellen (siehe nachfolgende Kapitel).

#### Allgemeines

Typische Schadstoffquellen entstehen, indem z.B. flüssige organische Schadstoffe (Kraftstoffe, Öle, Lösungsmittel, Teeröle) im Boden als Phase (NAPL) versickern (s. Abbildung 1). Weiterhin können als Festphase vorliegende Schadstoffe und gelöste Schadstoffe als Schadstoffquelle wirken. Der Schadstoffeintrag kann einmalig erfolgt sein (Havarie, Unfall) oder über einen längeren Zeitraum stattgefunden haben (undichte Tanks, Rohrleitungen oder Kanalisation). In Kapitel 3.2 werden verschiedene Schadstoffquellen-Typen beschrieben.

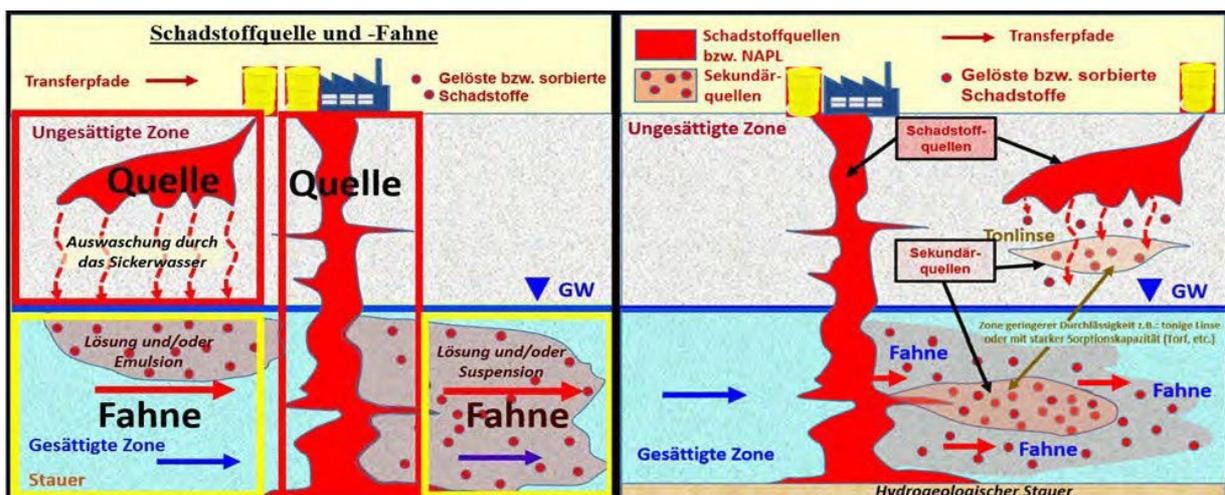


Abbildung 1: Schematische Darstellungen von Schadstoffquellen inkl. Sekundärquellen und Schadstofffahne (Autorenschaft Karg/Zeisberger 2023).

\*NAPL: Non Aqueous Phase Liquid

Bei der Freisetzung der Schadstoffe ist i.d.R. das Schutzgut Grundwasser betroffen (Pfad Boden-Grundwasser), denn Schadstoffquellen verursachen sogenannte Schadstofffahnen, in denen Schadstoffe gelöst vorliegen [33]. Eine Gefährdung des Menschen kann auftreten, wenn die Schadstoffe leichtflüchtig sind (Pfad Boden-Bodenluft-Raumluft bzw. Boden-Grundwasser-Bodenluft-Raumluft), oder wenn verunreinigtes Grundwasser als Trinkwasser (Pfad Boden-Grundwasser-Trinkwasser) oder zur Bewässerung genutzt wird (Pfad Boden-Nutzpflanze-Mensch). Weiterhin kann der Wirkungspfad Boden-Mensch (Direktpfad) relevant sein, der die direkte Bodenaufnahme beschreibt. Schadstoffe können durch das Verschlucken von Boden, das Einatmen

<sup>1</sup> Eine ähnliche Definition verwendet das LABO-Positionspapier MNA [33]: „Als Schadstoffquelle werden Bereiche mobiler und residual gesättigter Phase sowie die in der Bodenmatrix der ungesättigten und gesättigten Zone festgelegten Schadstoffe bezeichnet.“

von feinen Bodenpartikeln oder den Kontakt der Haut mit dem Boden aufgenommen werden (*LABO-Arbeitshilfe Expositionsabschätzung [34]*).

Die Sanierung einer Schadstoffquelle („Quellensanierung“), hier mittels In-situ-Sanierungsverfahren, soll die weitere Freisetzung von Schadstoffen verhindern bzw. vermindern. Zu unterscheiden ist zwischen Dekontamination und Sicherung. Im Falle von In-situ-Sanierungsverfahren beruhen die meisten Verfahren auf der Dekontamination der Schadstoffquelle.

Schadstoffe werden biologisch oder chemisch abgebaut, immobilisiert oder mittels physikalischer Verfahren aus dem verunreinigten Boden oder dem Grundwasser entfernt.

Sicherungsmaßnahmen verhindern oder mindern eine Ausbreitung von Schadstoffen langfristig, beispielsweise durch eine In-situ-Immobilisierung von Schadstoffen.

Verunreinigte Bodenbereiche, die durch Schadstoffe unmittelbar betroffen sind (z.B. infolge einer Havarie, eines Lecks in einem Tank oder bei Ablagerungen), werden als „Primärquellen“ bezeichnet. Weiterhin können „Sekundärquellen“ auftreten [9]. Unter Sekundärquellen werden Bodenbereiche in der ungesättigten und gesättigten Bodenzone verstanden, die freigesetzte und transportierte Schadstoffe an einem anderen Ort zunächst anreichern und mit Verzögerung wieder freisetzen. Sekundärquellen können z.B. sein:

- Geringdurchlässige Bereiche in heterogenen Grundwasserleitern (z.B. Ton-/Schlufflinsen); diese Bereiche wurden langjährig durch hochbelastetes Grundwasser verunreinigt, indem Schadstoffe in die Mittel- und Feinporen diffundiert sind. Sinkt die Schadstoffkonzentration in der Schadstofffahne (z.B. infolge einer Sanierungsmaßnahme), findet eine Rückdiffusion aus geringdurchlässigen in gut durchlässige Bereiche des Grundwasserleiters statt. Da Rückdiffusion ein langsamer Prozess ist, können Sekundärquellen über einen langen Zeitraum Schadstoffe freisetzen.
- Geringdurchlässige Bereiche in der ungesättigten Bodenzone; analog zu den oben beschriebenen Ton-/Schlufflinsen in Grundwasserleitern wurden Schadstoffe zunächst angereichert und anschließend langsam mit dem Sickerwasser oder über das Bodengas wieder freigesetzt.

Weiterhin werden solche Schadstoffquellen als Sekundärquellen bezeichnet, bei denen die ursprünglich vorhandenen Schadstoffe bereits (bio-)chemisch umgesetzt, ausgelaugt oder ausgegast sind, jedoch toxikologisch relevante mikrobiologische Abbaumetaboliten oder Hydrolyseprodukte noch vorhanden sind.

Ob eine Sekundärquelle im Sinne dieser Arbeitshilfe als „zu sanierende Schadstoffquelle“ zu betrachten ist, hängt von der Höhe der Schadstoffbelastung sowie dem Schadstofffreisetzungsverhalten und der Schadstoffexposition ab.

## Schadstoffquellen-Typen

Zur Systematisierung von Schadstoffquellen werden in dieser Arbeitshilfe Schadstoffquellen-Typen beschrieben. Zur Einteilung in einen bestimmten Schadstoffquellen-Typ sind folgende Merkmale relevant:

- Aggregatzustand des Schadstoffs (gasförmig, flüssig, fest)
- Löslichkeit und Mischbarkeit mit Wasser (Phasen, Gemische, Suspensionen und Emulsionen)

- Dichte einer flüssigen, nicht wässrigen (Schadstoff-) Phase (leichter oder schwerer als Wasser)
- Flüchtigkeit der Schadstoffe (leichtflüchtig, mittelflüchtig, schwerflüchtig)
- Geologische und hydrogeologische Standortverhältnisse (Untergrundaufbau, Poren- oder Kluffgrundwasserleiter)

Schadstoffquellbereiche mit schwankenden Grundwasserständen und -fließrichtungen können komplexere Schadstoffquelltypen hervorrufen.

Nachfolgend sind häufig vorkommende Schadstoffquellen-Typen beschrieben und werden schematisch dargestellt. Alle nachfolgend gezeigten Schadstoffquelltypen und -ausbreitungen können in Kombination vorkommen.

### Typ A Organische Schadstoffphasen (NAPL)

Viele alltlastentypische Schadstoffe wie leichtflüchtige chlorierte Kohlenwasserstoffe (LCKW) und Kraftstoffe sind mit Wasser nicht/kaum mischbar und treten im Falle einer Freisetzung - beispielsweise aus Fässern, Tanks oder Leitungen - als flüssige Phase auf (nicht-wässrige flüssige Phase, engl.: non aqueous phase liquid, NAPL).

In heterogenen Böden/Grundwasserleitern breiten sich NAPL nicht nur senkrecht, sondern entlang von Schichtgrenzen und Zonen unterschiedlicher Porosität auch lateral aus. In Kluffgesteinen können sich NAPL rasch ausbreiten, die Ausbreitungsgeschwindigkeit und -richtung hängt von der Dichte und Viskosität des Schadstoffs sowie von Kluffweiten und Porositäten etc. ab.

In Bodenbereichen, wo die NAPL den Porenraum zusammenhängend ausfüllen, liegen fließfähige Phasen vor. NAPL, die nicht mehr beweglich sind, werden als residuale Phase bezeichnet. Die NAPL füllen dann nur noch die **kleineren** Poren aus bzw. benetzen die Oberflächen des Bodenkorns. Weiterhin kann es auch zu einem kapillaren Aufstieg von NAPL kommen.

Viele als NAPL freigesetzte Schadstoffe sind leicht- bzw. mittelflüchtig, d.h. sie haben einen Siedepunkt kleiner 220 °C (z.B. BTEX, LCKW und andere LHKW, Benzin, Kerosin, leichte Diesel-/Heizölanteile sowie leichte Teerölanteile wie Naphthalin).

Je nach Dichte werden NAPL in LNAPL und DNAPL unterschieden [8]:

**LNAPL (Light Non Aqueous Phase Liquid):** Leichtphasen haben eine geringere Dichte als Wasser. Typische LNAPL sind Benzol, Benzin, Diesel und Motoröl.

**DNAPL (Dense Non Aqueous Phase Liquid):** Schwerphasen haben eine höhere Dichte als Wasser. Typische DNAPL sind chlorierte Lösungsmittel (z.B. LCKW) und Teeröle.

Nachfolgend werden drei Schadstoffquellen-Typen mit NAPL (LNAPL und DNAPL) dargestellt:

#### Typ A-1 NAPL - Ausbreitung nur in der ungesättigten Zone

Das Ausbreitungsverhalten in der ungesättigten Zone ist bei LNAPL und DNAPL ähnlich, da die Migration der Phase durch Viskosität und Oberflächenspannung maßgeblich beeinflusst wird. Die Abbildungen 2 bis 4 zeigen NAPL, das sich aus leichtflüchtigen Schadstoffen zusammensetzt (z.B. Benzin, LCKW). Bei NAPL mit mittlerer Flüchtigkeit (z.B. Naphthalin, Teeröle, Heizöl) ist die Ausgasung in die Bodenluft bei natürlichen Bodentemperaturen i. d. R. weniger relevant.

Die Abbildung 2 zeigt Schadstoffquellentyp A-1 (mit Transferpfaden) von nicht-wässrigen aber z.T. flüchtigen Flüssigkeiten (NAPL-V: Non Aqueous Phase Liquid - Volatile). Hierbei ist die Schadstoff-Infiltrationsmasse kleiner als das Sorptions- bzw. Rückhaltevermögen der ungesättigten Zone. Ein gravitativer Eintrag der NAPL ins Grundwasser erfolgt daher nicht.

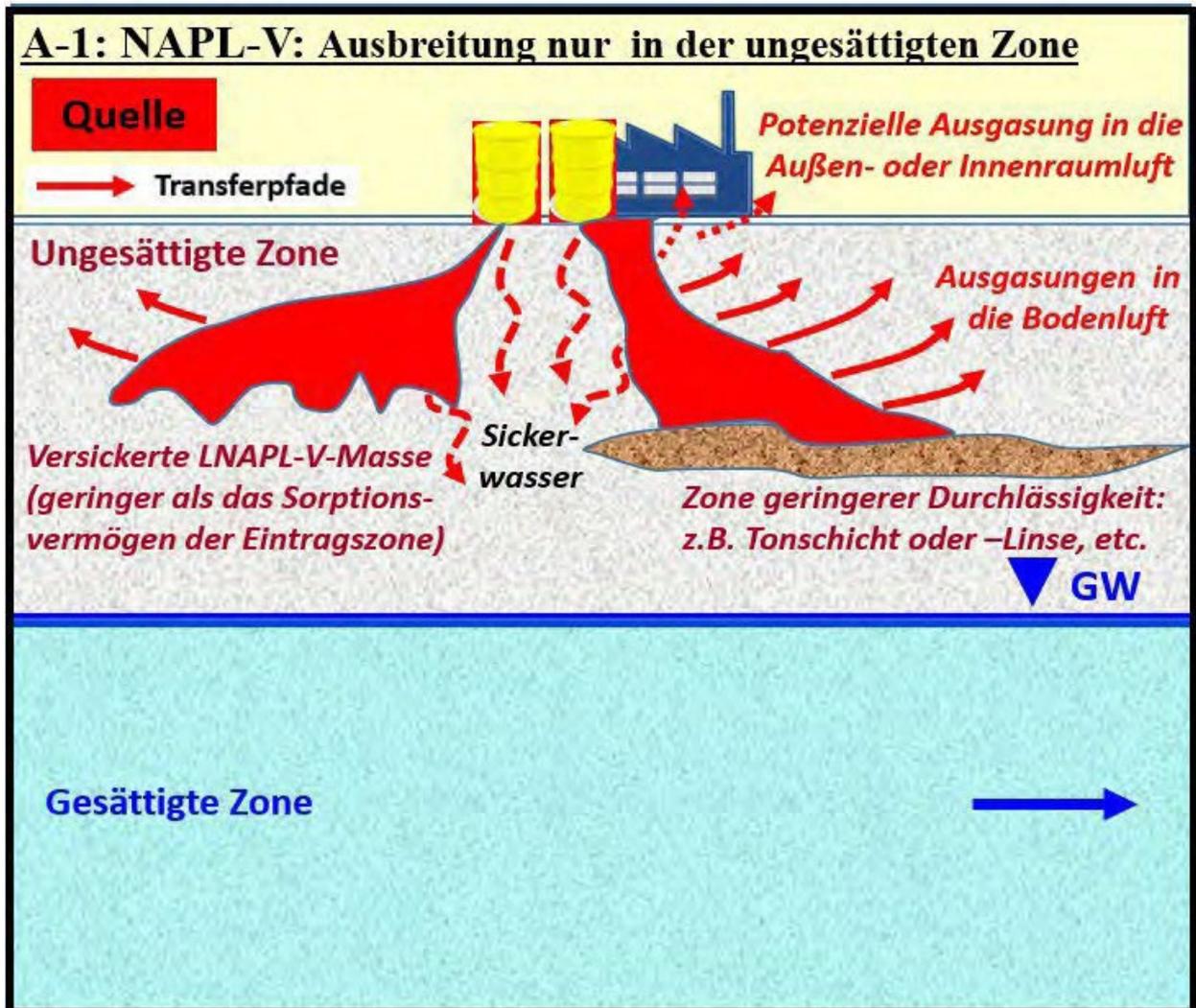


Abbildung 2: Schadstoffquellentypen A-1 (mit ihren Transferpfaden) von nicht-wässrigen aber z.T. flüchtigen Flüssigkeiten (NAPL-V: Non Aqueous Phase Liquid - Volatile). Hierbei ist die Schadstoff-Infiltrationsmasse kleiner als das Sorptions- bzw. Rückhaltevermögen der ungesättigten Zone (Autorenschaft Karg/Zeisberger 2023).

### Typ A-2 LNAPL - Ausbreitung bis zur gesättigten Zone

Da LNAPL<sup>2</sup> eine geringe Dichte als Wasser aufweisen, bilden sie beim Erreichen der Grundwasseroberfläche eine sogenannte „aufschwimmende Phase“. Von hier aus können Emulsionen entstehen und auch Schadstoffe gelöst werden. Flüchtige Stoffe können ausgasen. Grundwasserschwankungen bewirken ein „Verschmieren“ der LNAPL im Kapillarraum und können zu einer komplexen Schadstoffausbreitung führen. LNAPL können sich somit auch

<sup>2</sup> Engl.: lighter than water non-aqueous phase liquid

unterhalb der Grundwasseroberfläche als Phasenkörper befinden. Sie sinken aufgrund ihrer geringen Dichte jedoch nicht gravitativ ab.

Die Abbildung 3 zeigt den Schadstoffquellentyp A-2 (mit Transferpfaden) von leichten, nicht-wässrigen aber z.T. flüchtigen Flüssigkeiten (LNAPL-V: Light Non Aqueous Phase Liquid - Volatile). Hierbei ist die Schadstoff-Infiltrationsmasse größer als das Sorptions- bzw. Rückhaltevermögen der ungesättigten Zone.

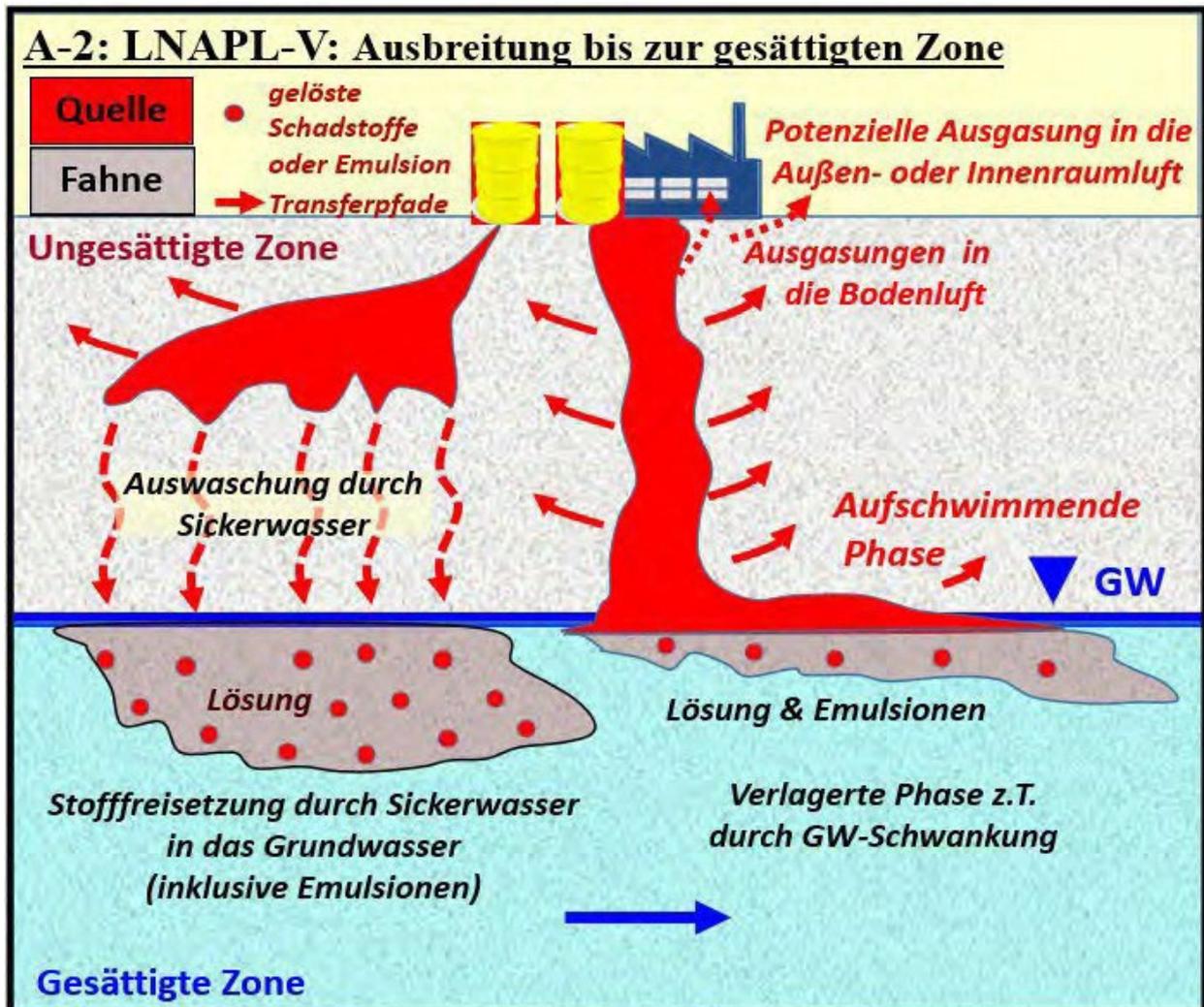


Abbildung 3: Schadstoffquellentypen A-2 (mit ihren Transferpfaden) von leichten, nicht-wässrigen aber z.T. flüchtigen Flüssigkeiten (LNAPL-V: Light Non Aqueous Phase Liquid – Volatile). Hierbei ist die Schadstoff- Infiltrationsmasse größer als das Sorptions- bzw. Rückhaltevermögen der ungesättigten Zone). (Autorenschaft Karg/Zeisberger 2023).

### Typ A-3 DNAPL - Ausbreitung bis in die gesättigte Zone

Da DNAPL<sup>3</sup> eine höhere Dichte als Wasser aufweisen, können sie bei entsprechender Menge im Grundwasserleiter bis zum Stauer absinken. Dort können sie sich sammeln und Phasenpools bilden. Bei DNAPL mit geringer Flüchtigkeit (z.B. Schweröl oder Teeröl) ist die Ausgasung in die Bodenluft i. d. R. nicht oder weniger relevant.

<sup>3</sup> Engl.: denser than water non-aqueous phase liquid

Die Abbildung 4 zeigt Schadstoffquellentyp A-3 (mit Transferpfaden) von schweren, nicht-wässrigen aber z.T. flüchtigen Flüssigkeiten (DNAPL-V: Dense Non Aqueous Phase Liquid – Volatile). Hierbei ist die Schadstoff-Infiltrationsmasse größer als das Sorptions- bzw. Rückhaltevermögen der ungesättigten Zone.

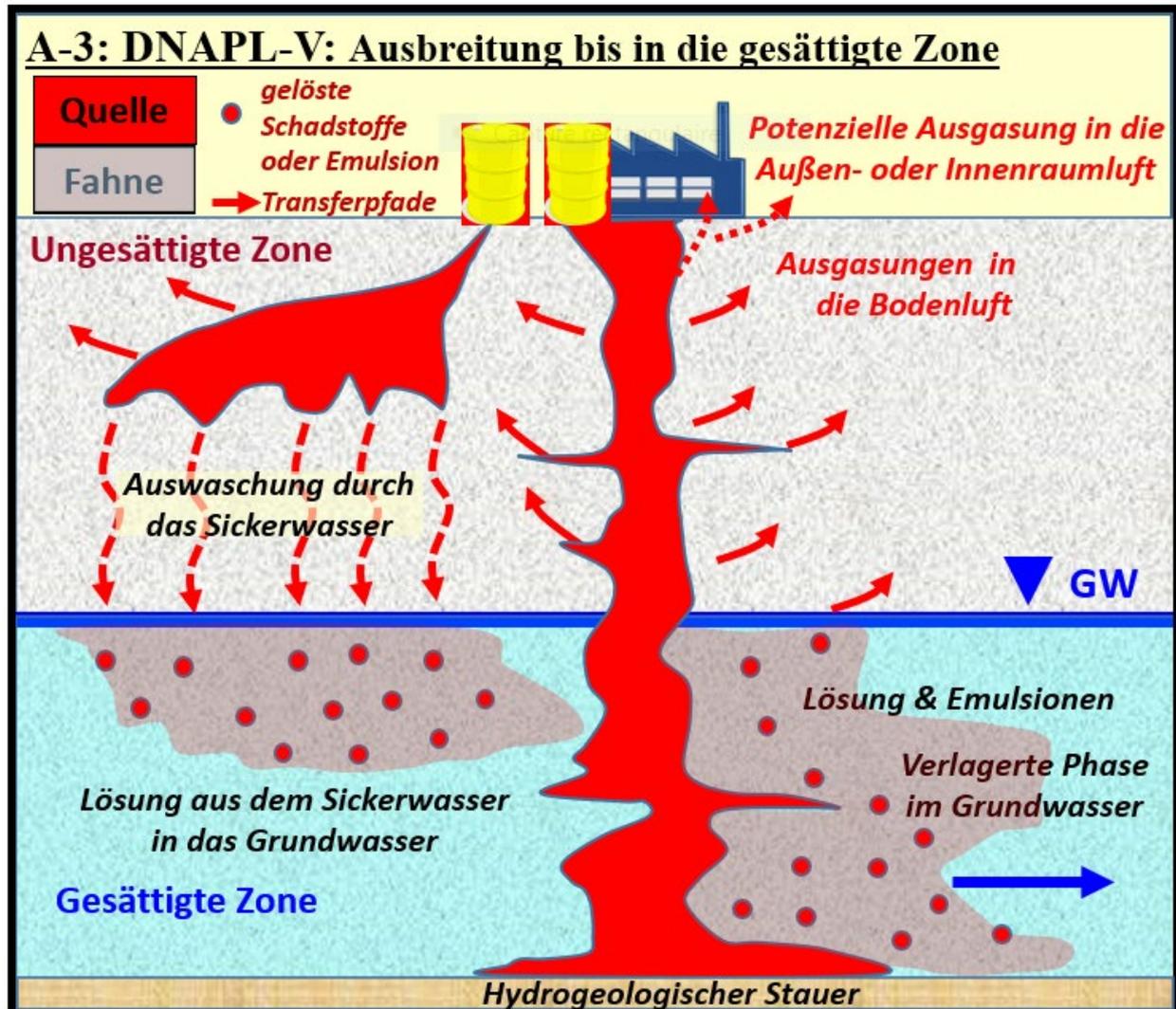


Abbildung 4: Schadstoffquellentypen A-3 (mit Transferpfaden) von schweren, nicht-wässrigen aber z.T. flüchtigen Flüssigkeiten (DNAPL-V: Dense Non Aqueous Phase Liquid – Volatile). Hierbei ist die Schadstoff-Infiltrationsmasse größer als das Sorptions- bzw. Rückhaltevermögen der ungesättigten Zone. (Autorenschaft Karg/Zeisberger 2023).

In den Abbildungen 2 bis 4 ist dargestellt, dass NAPL als Schadstoffquelle wirken, indem Schadstoffe in die Bodenluft ausgasen oder indem Schadstoffe durch vorbeiströmendes Sicker- und Grundwasser gelöst werden. Der Fall einer nicht durch NAPL verursachten Grundwasserverunreinigung wird im Folgenden unter "Typ B" behandelt.

## **Typ B            Gelöste Schadstoffe und gut wasserlösliche Phasen**

Schadstoffphasen (NAPL, siehe Typ A) können Schadstoffe freisetzen, die dann im Sicker- und Grundwasser gelöst vorliegen und so Schadstofffahnen verursachen können (siehe auch Abbildung 3 und Abbildung 4).

Weiterhin können Schadstoffe als wässrige Lösungen oder als ausgetretene gut wasserlösliche Phasen (z.B. Alkohole, Ketone, Phenole, etc.) zu Boden- und Grundwasserverunreinigungen führen (z.B. bei undichter Kanalisation sowie bei Fass- oder Tank-Leckagen, etc.). In Mischungen mit Lösungsvermittlern (z.B. polaren Lösungsmitteln wie Alkoholen, Phenolen, etc.) kann die Wasserlöslichkeit von schwerlöslichen Schadstoffen deutlich erhöht werden. [15]

Sind die Schadstoffe flüchtig, kann die Ausgasung der Schadstoffe in die Bodenluft relevant sein. Eine mögliche Anreicherung der gelösten Schadstoffe im Untergrund ist im konzeptionellen Standortmodell zu berücksichtigen (z.B. Torflinsen, tonige bzw. schluffige Bereiche).

Wässrige Lösungen mit polaren Lösemitteln können in die ungesättigte Bodenzone und damit in die Bodenluft ausgasen (z.B. kurzkettige Ketone, Alkohole, aromatischen Amine wie Anilin oder Toluidine, etc.). Wässrige Lösungen mit Säuren, Laugen, Salzen, Metallen & Metalloiden oder polaren organischen Schadstoffen gasen normalerweise nicht oder kaum aus (langkettige Alkohole, Phenole, Carboxylsäuren, Amino- & Nitroorganika, Pestizide, heterozyklische Aromaten, PFAS,).

Die Abbildung 5 zeigt Schadstoffquelltypen B-1 (mit Transferpfaden) von z.T. wässrigen aber auch z.T. flüchtigen Flüssigkeiten und Lösungen. Hierbei ist die Schadstoff-Infiltrationsmasse kleiner als das Sorptions- bzw. Rückhaltevermögen der ungesättigten Zone.

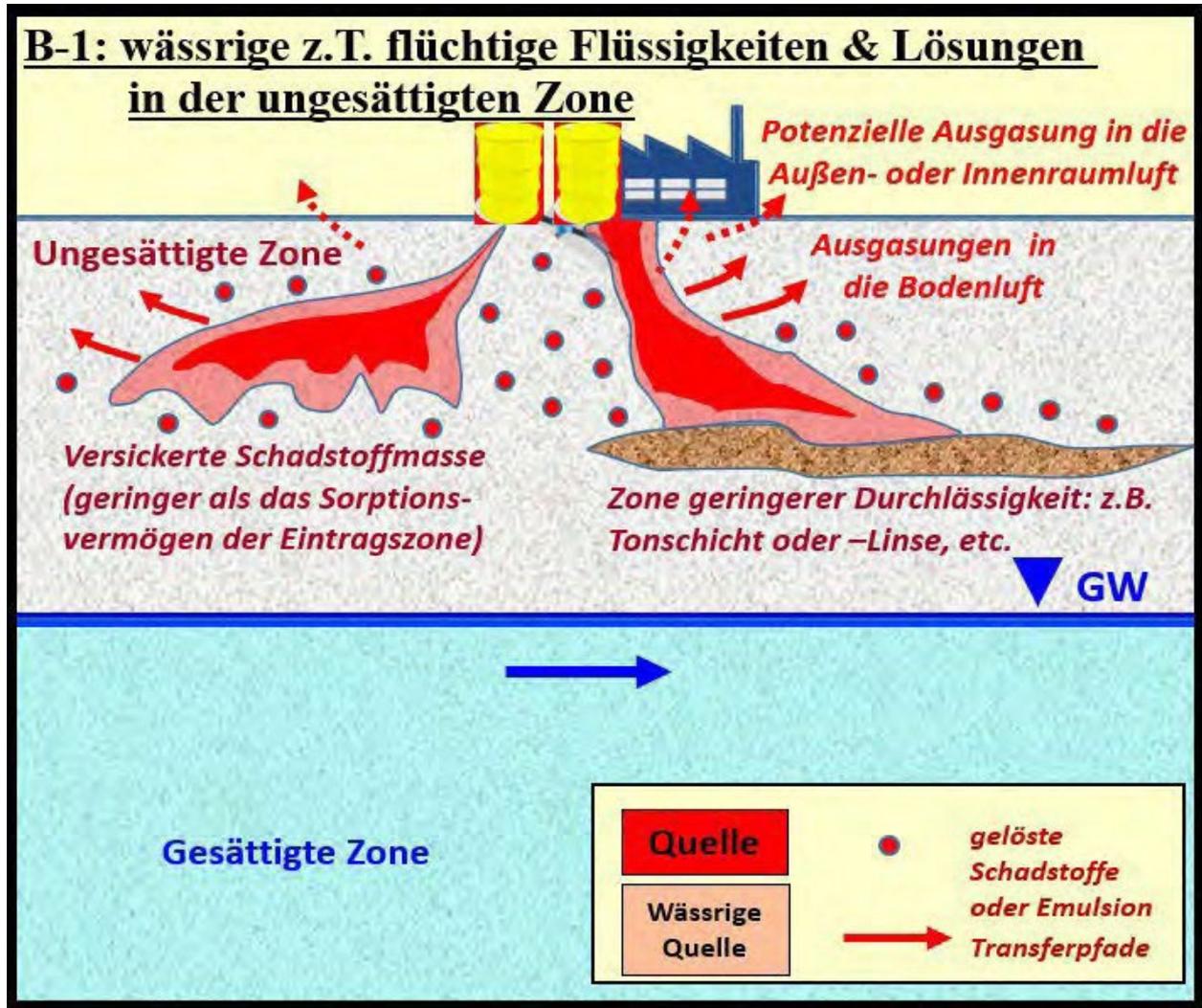


Abbildung 5: Schadstoffquelltypen B-1 (mit ihren Transferpfaden) von z.T. wässrigen aber auch z.T. flüchtigen Flüssigkeiten und Lösungen. Hierbei ist die Schadstoff-Infiltrationsmasse kleiner als das Sorptions- bzw. Rückhaltevermögen der ungesättigten Zone. Ein Grundwasserschaden ist (noch) nicht eingetreten. (Autorenschaft Karg/Zeisberger 2023).

Die Abbildung 6 zeigt Schadstoffquelltypen B-2 (mit Transferpfaden) von wässrigen aber z.T. flüchtigen Flüssigkeiten und Lösungen. Hierbei ist die Schadstoff-Infiltrationsmasse größer als das Sorptions- bzw. Rückhaltevermögen der ungesättigten Zone.

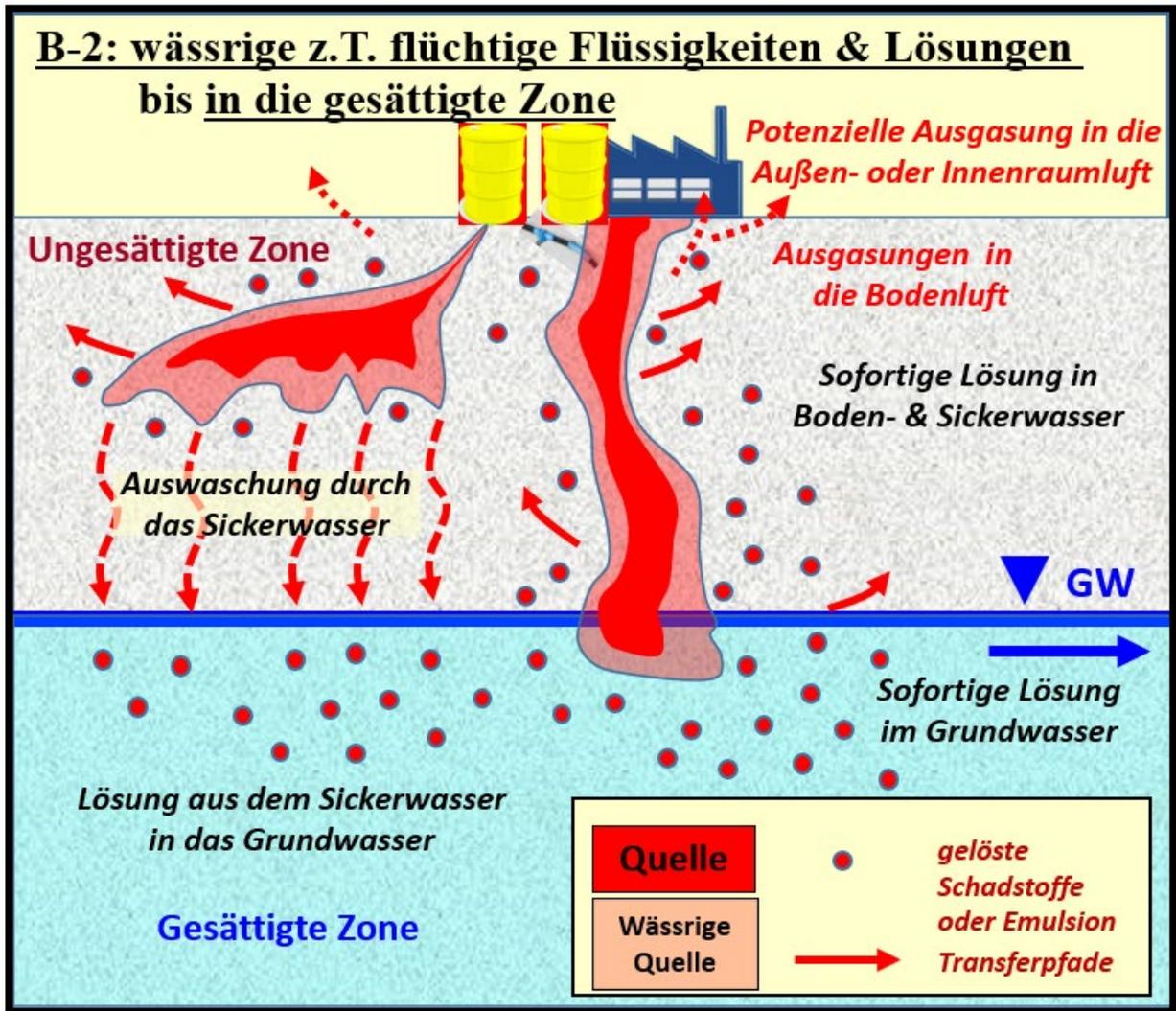


Abbildung 6: Schadstoffquelltypen B-2 (mit Transferpfaden) von wässrigen aber z.T. flüchtigen Flüssigkeiten und Lösungen. Hierbei ist die Schadstoff-Infiltrationsmasse größer als das Sorptions- bzw. Rückhaltevermögen der ungesättigten Zone. (Autorenschaft Karg/Zeisberger 2023).

## **Typ C      Feste Schadstoffe**

Feste Schadstoffe treten als Bestandteile von Abfällen (Deponien, Bergbauhalden, etc.), Schlacken und Produktionsrückständen auf. Zu unterscheiden sind Feststoffe mit wasserlöslichen Anteilen und inerte Feststoffe, die nur als Suspension verfrachtet werden können. Ob Feststoffe wasserlösliche Anteile in relevantem Umfang aufweisen, kann durch Elutionsuntersuchungen (bzw. Perkolationsuntersuchungen) ermittelt werden.

Bei schadstoffhaltigen Feststoffen mit löslichen Anteilen, die in der ungesättigten Zone auftreten, erfolgen Stofffreisetzungen und -transporte durch Sickerwasser. Bei Feststoffen (dies kann auch PFAS betreffen), die in der gesättigten Zone abgelagert wurden (z.B. Deponien mit löslichen Anteilen und „nassem Fuß“) erfolgen Stofffreisetzungen und -transporte direkt mit dem Grundwasser.

Weiterhin kann bei fehlender Abdeckung eine Staubbildung mit Schadstoffanteilen erfolgen. Bei der Ableitung von Prüfwerten für den Pfad Boden-Mensch spielen Stäube sehr wohl eine Rolle (inhalative Aufnahme, z.B. von chromat-belastetem Boden)

### **Typ C-1      Feste Schadstoffe - mit wasserlöslichen Anteilen**

Bei Feststoffen, die wasserlösliche Anteile aufweisen, werden diese durch Sickerwasser freigesetzt. I. d. R. ist die Stofffreisetzung vergleichsweise gering, sie erfolgt jedoch über einen langen Zeitraum. Bei Ablagerungen mit „nassem Fuß“ (z.B. Deponien oder Bergbauabraum, etc.) erfolgt die Schadstofffreisetzung direkt durch das hindurchfließende Grundwasser. Typische feste Schadstoffe mit wasserlöslichen Anteilen sind Schlacken, Bergbauhalden, Deponien aus Abfällen und Produktionsrückständen mit löslichen Metallen, Metalloiden, Salzen (wie Sulfate, Cyanide, Phosphate, etc.) sowie organische feste Verbindungen wie Pestizide, Polymere, etc.

Die Abbildung 7 zeigt Schadstoffquelltypen C-1a (mit ihren Transferpfaden) von festen aber z.T. löslichen Schadstoffen. Hierbei ist die Schadstoff-Infiltrationsmasse kleiner als das Sorptions- bzw. Rückhaltevermögen der ungesättigten Zone.

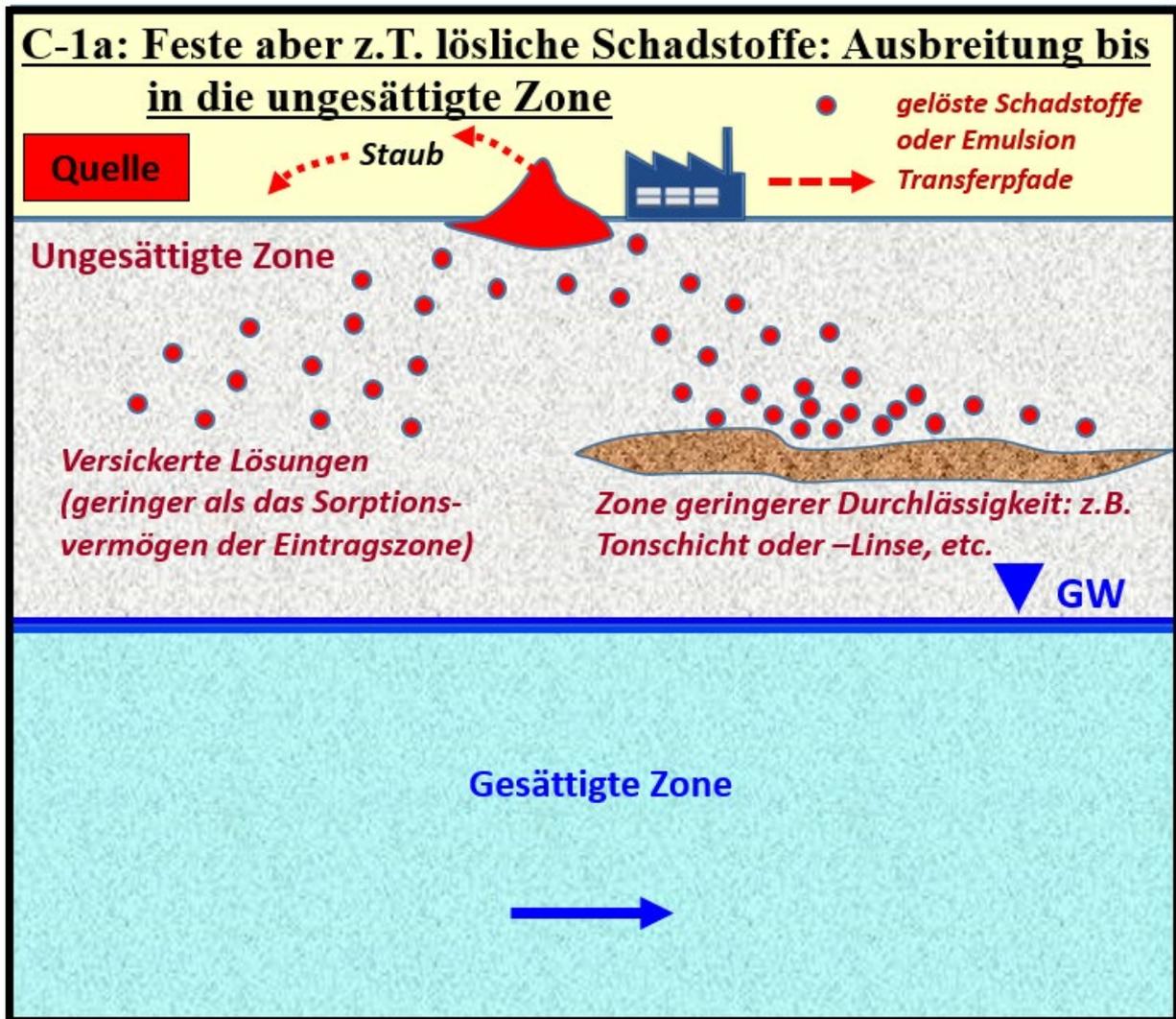


Abbildung 7: Schadstoffquelltypen C-1a (mit Transferpfaden) von festen aber z.T. löslichen Schadstoffen. Hierbei ist die Schadstoff-Infiltrationsmasse kleiner als das Sorptions- bzw. Rückhaltevermögen der ungesättigten Zone. (Autorenschaft Karg/Zeisberger 2023).

Die Abbildung 8 zeigt Schadstoffquelltypen C-1b (mit Transferpfaden) von festen, aber z.T. löslichen Schadstoffen. Hierbei ist die Schadstoff-Infiltrationsmasse größer als das Sorptions- bzw. Rückhaltevermögen der ungesättigten Zone.

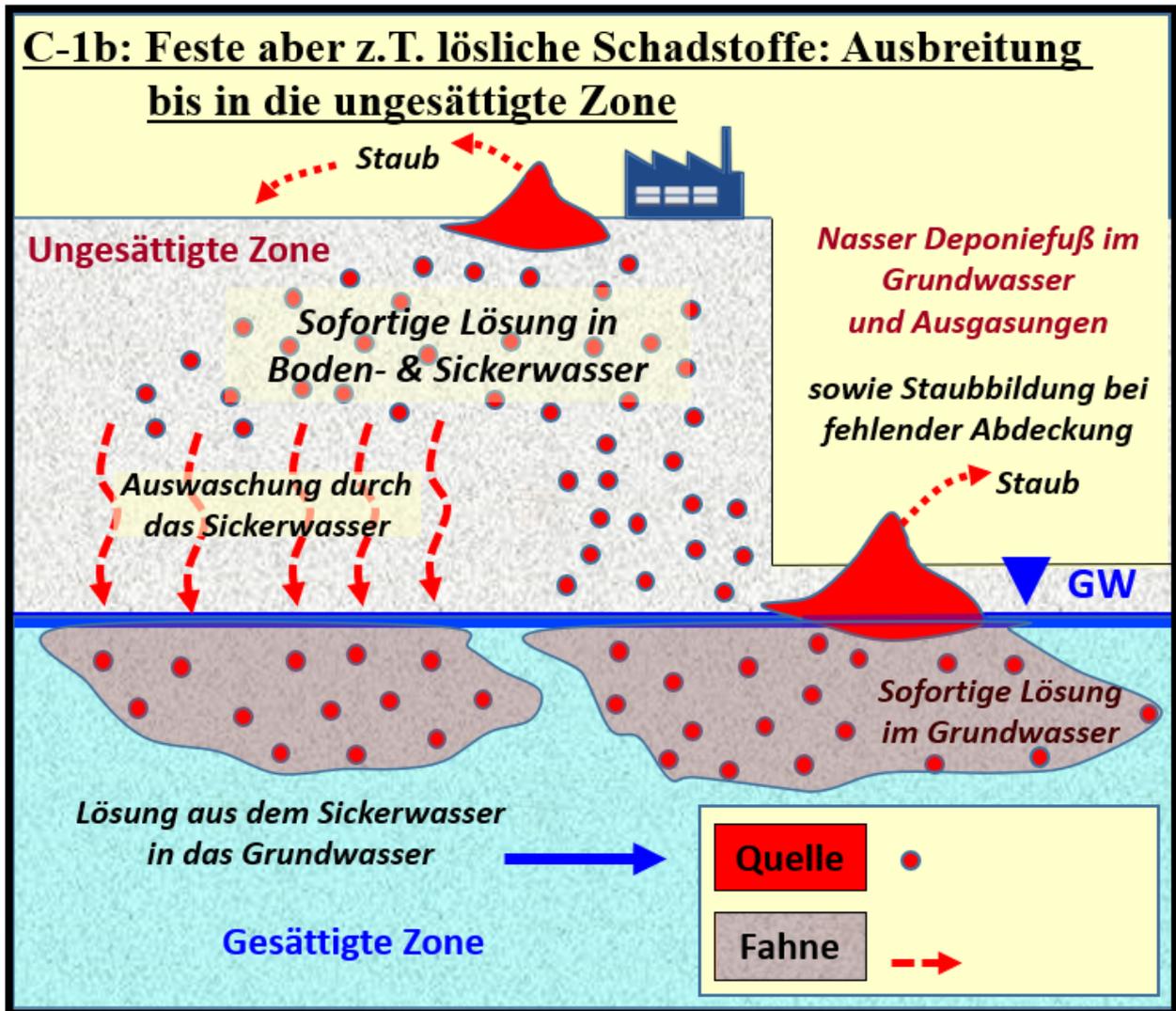


Abbildung 8: Schadstoffquelltypen C-1b (mit Transferpfaden) von festen aber z.T. löslichen Schadstoffen. Hierbei ist die Schadstoff-Infiltrationsmasse größer als das Sorptions- bzw. Rückhaltevermögen der ungesättigten Zone. (Autorenschaft Karg/Zeisberger 2023).

**Typ C-2: Feste Schadstoffe - Transport per Suspension**

Unlösliche Schadstoffe können als Suspension in Kluftgrundwasserleitern transportiert werden.

Die Abbildung 9 zeigt Schadstoffquelltypen C-2a (mit ihren Transferpfaden) von festen, aber unlöslichen Schadstoffen. Hierbei ist die Schadstoff-Infiltrationsmasse kleiner als das Sorptions- bzw. Rückhaltevermögen der ungesättigten Zone.

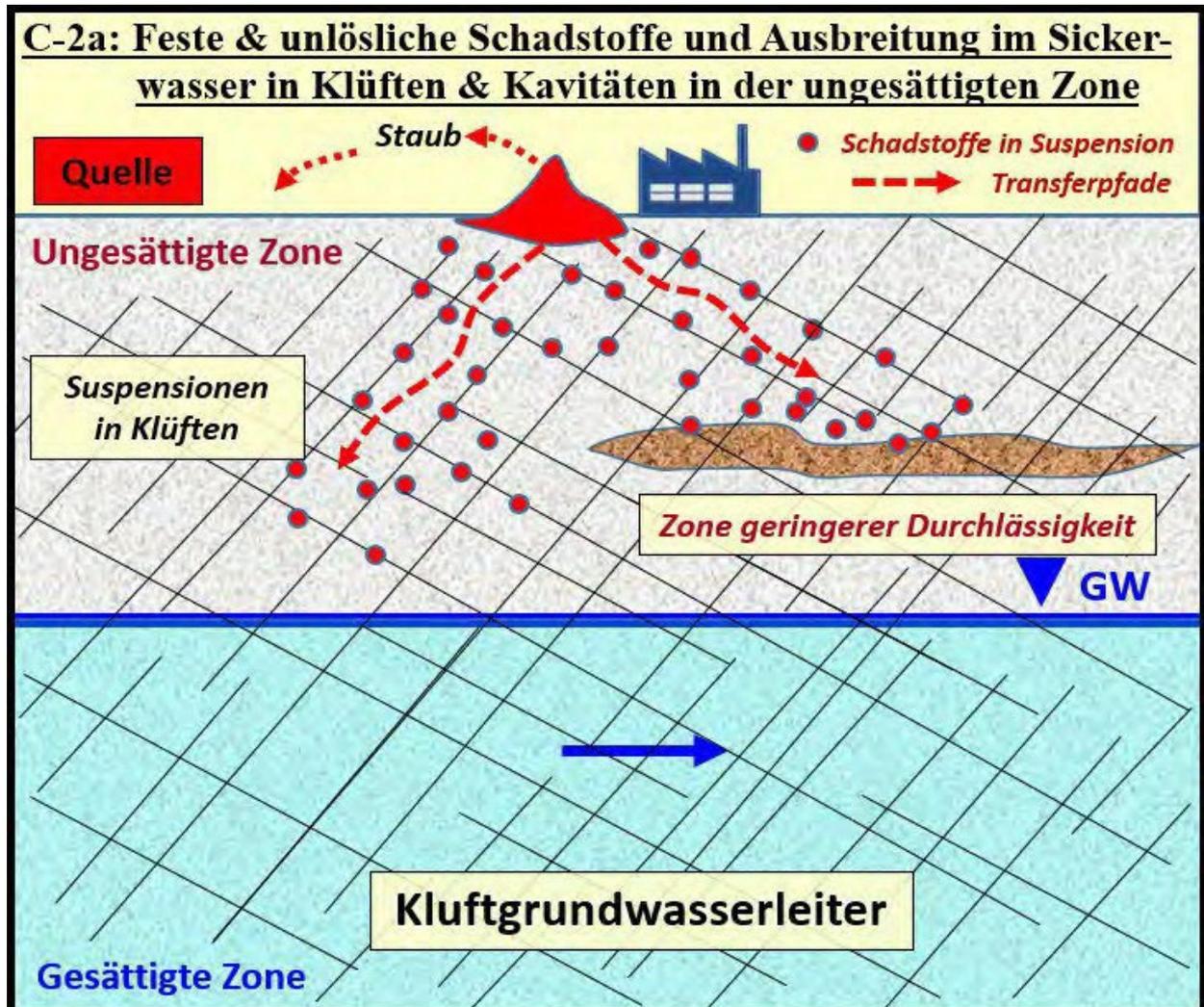


Abbildung 9: Schadstoffquelltypen C-2a (mit Transferpfaden) von festen, aber unlöslichen Schadstoffen. Hierbei ist die Schadstoff-Infiltrationsmasse kleiner als das Sorptions- bzw. Rückhaltevermögen der ungesättigten Zone. (Autorenschaft Karg/Zeisberger 2023).

Die Abbildung 10 zeigt Schadstoffquelltypen C-2b (mit Transferpfaden) von festen, wasserunlöslichen Schadstoffen. Hierbei ist die Schadstoff-Infiltrationsmasse größer als das Sorptions- bzw. Rückhaltevermögen der ungesättigten Zone.

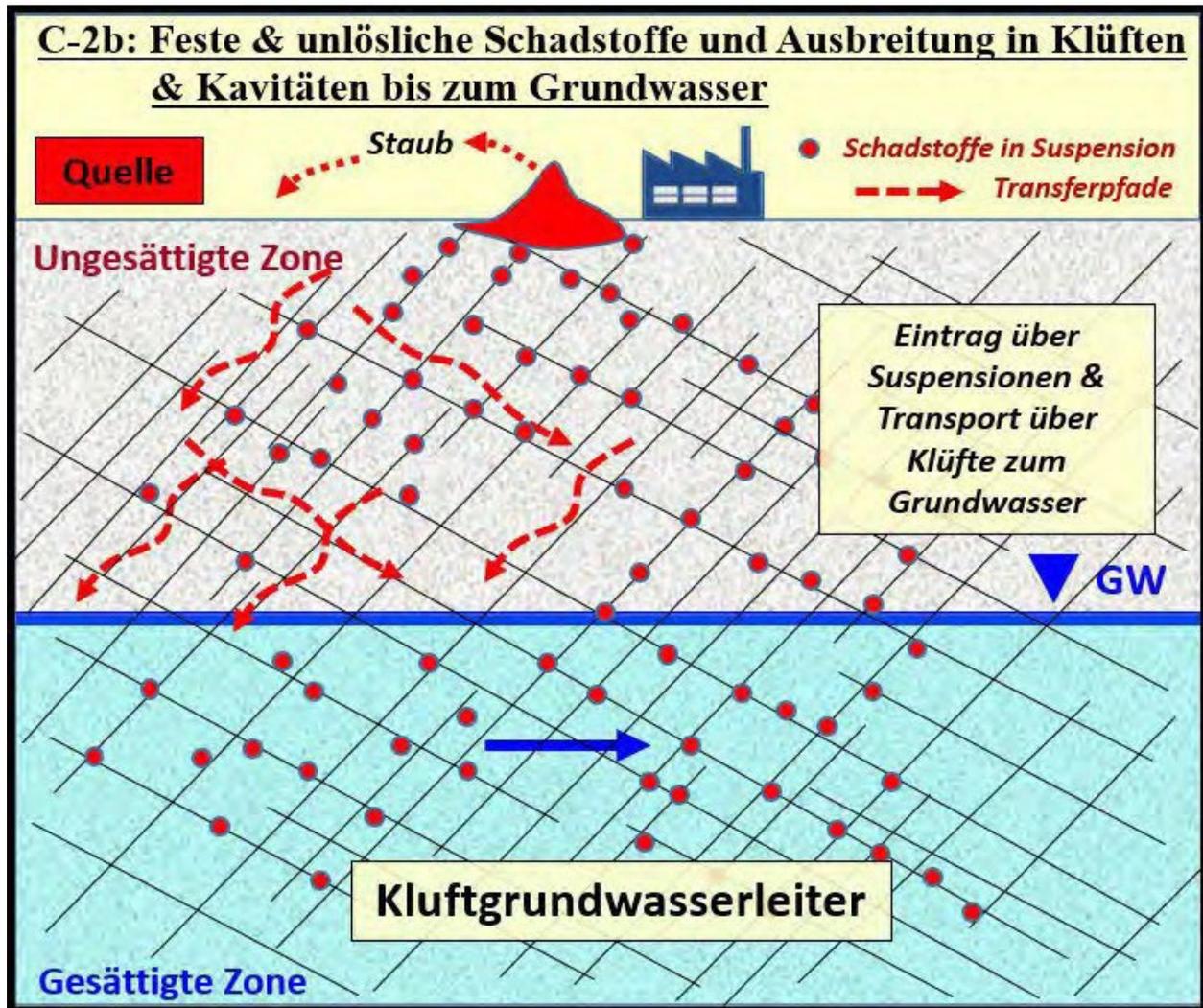


Abbildung 10: Schadstoffquelltypen C-2b (mit Transferpfaden) von festen, wasserunlöslichen Schadstoffen. Hierbei ist die Schadstoff-Infiltrationsmasse größer als das Sorptions- bzw. Rückhaltevermögen der ungesättigten Zone. (Autorenschaft Karg/Zeisberger 2023).

### Typ C-3 Feste Schadstoffe - mit wasserlöslichen Anteilen und flüchtigen Transformationsprodukten

Feststoffe, die wasserlösliche Anteile aufweisen, können diese durch Sickerwasser freisetzen. I. d. R. ist die Stofffreisetzung vergleichsweise gering, sie erfolgt jedoch über einen langen Zeitraum. Bei Ablagerungen mit „nassem Fuß“ (z.B. Deponien oder Bergbauabraum, etc.) erfolgt die Schadstofffreisetzung direkt durch das hindurchfließende Grundwasser.

Bei einigen Feststoffen können flüchtige Schadstoffe entstehen, welche ausgasen können. Diese sind z.B. Radon aus Halden mit Radiumanteilen, flüchtige Abbauprodukte aus Polymerzusätzen (z.B. Anilin aus TDI: Toluoldiisocyanat, etc.), Cyanwasserstoff (Blausäure) beim Kontakt von Cyaniden mit Säureabfällen (z.B. aus Eisencyaniden der Gasreinigermassen alter Kokereien oder Gaswerke), Bildung von methyliertem Quecksilber oder Arsen oder auch die Arsin-Bildung bei gewissen chemischen Milieubedingungen, etc. Typische feste Schadstoffe mit wasserlöslichen Anteilen, welche auch flüchtige Transformationsprodukte bilden können, sind z.B. Schlacken, Bergbauhalden, Deponien aus Abfällen und Produktionsrückständen, cyanidhaltige Abfälle aus

der Gasbehandlung sowie organische feste Verbindungen wie Polyurethane, sowie alle sublimierenden Stoffe, welche flüchtige Schadstoffe abgeben.

Die Abbildung 11 zeigt Schadstoffquelltypen C-3 (mit Transferpfaden) von festen Schadstoffen mit „nassem Fuß“ durch Einlagerung im Grundwasser (rechts) und direkte Auslaugung von Schadstoffen im Grundwasser sowie Bildung von toxischen sowie flüchtigen Transformationsprodukten und nachfolgender Ausgasung. Hierbei ist die Schadstoff-Infiltrationsmasse größer als das Sorptions- bzw. Rückhaltevermögen der ungesättigten Zone.

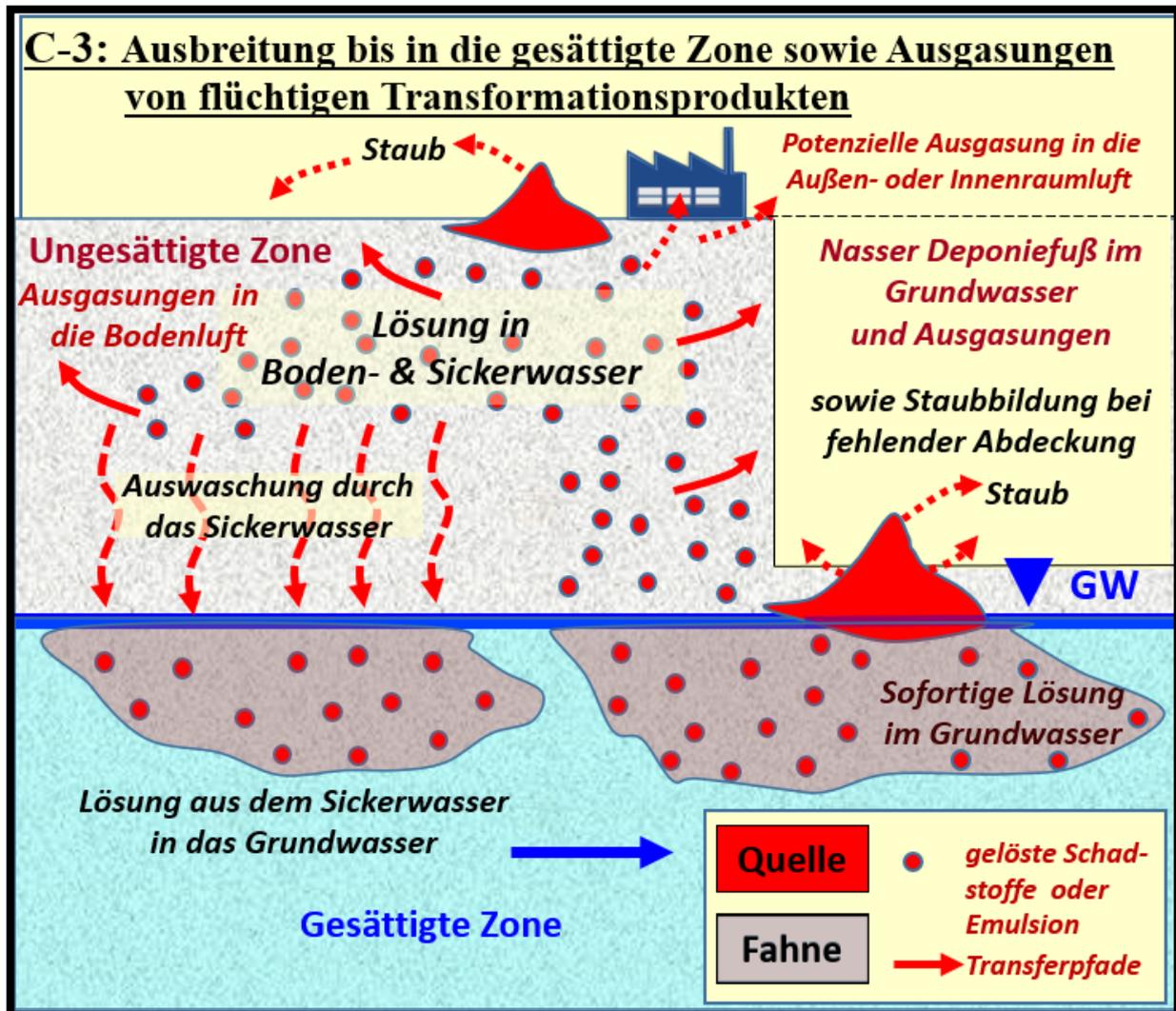


Abbildung 11: Schadstoffquelltypen C-3 (mit Transferpfaden) von festen Schadstoffen bei Depots oder Deponien mit „nassem Fuß“ durch Einlagerung im Grundwasser (rechts) und direkte Auslaugung von Schadstoffen im Grundwasser sowie Bildung von toxischen sowie flüchtigen Transformationsprodukten und nachfolgender Ausgasung. Hierbei ist die Schadstoff-Infiltrationsmasse größer als das Sorptions- bzw. Rückhaltevermögen der ungesättigten Zone. (Autorenschaft Karg/Zeisberger 2023).

## 4 Regelungsbereiche

Genehmigungsrechtlich kommen unterschiedliche Rechtsbereiche zum Tragen. Neben den Belangen des Wasserrechts und des Bodenschutzrechts können auch Genehmigungen nach Abfall- und Immissionsschutzrecht oder nach weiteren Normen zum Tragen kommen.

Hierzu gehören verfahrensübergreifend u.a. (s. Details Verfahrensblätter, Kap. 10):

- wasserrechtliche Genehmigung und Anzeige von Bohrungen,
- Anzeige der Baustelle bei der Berufsgenossenschaft,
- Kampfmittelfreigabe vor der Ausführung von Bohrarbeiten,
- eine fachgerechte Dokumentation von Bohrarbeiten,
- eine abfallrechtlich zulässige Beprobung und Entsorgung von Bohrgut,
- bei Grundwasserförderungen Genehmigung:
  - der Förderraten,
  - verfahrensspezifisch der Einleitung von Stoffen,
  - der Einleitmöglichkeit und -genehmigungen für gereinigtes GW (Kanalisation/Reinfiltration).
- Lärmschutzanforderungen an die zu betreibenden Anlagen

Generell sind Art und Umfang der erforderlichen Genehmigungen und die zu ihrer Erteilung einzureichenden Unterlagen im Einzelfall mit der zuständigen Behörde abzustimmen.

Grundsätzlich gelten die Gesetze und Verordnungen im jeweiligen Anwendungsfall.

## 5 Anwendungsbereiche und -voraussetzungen

Eine Quellensanierung kann sowohl in der gesättigten als auch in der ungesättigten Bodenzone erfolgen. Wie bereits in Kapitel 3 erläutert, kann es sich dabei um Primär- oder Sekundärquellen handeln. Wann und wie eine Schadstoffquelle zu sanieren ist, wird standortspezifisch entschieden und hängt von verschiedenen Faktoren ab, die im Vorfeld einer Sanierung im Rahmen einer Sanierungsuntersuchung aufzuzeigen und hinsichtlich ihrer Machbarkeit und unter wirtschaftlichen Aspekten zu vergleichen sind.

Grundwassersanierungen finden oftmals auch im Bereich von Schadstofffahnen statt, weil eine Quellensanierung nicht gewünscht oder nicht möglich ist. Diese Sanierungen sind nicht Gegenstand dieser Arbeitshilfe.

In der vorliegenden Arbeitshilfe relevante Schadstoffeinträge erfolgen z.B. über Havarien/Unfälle, Schadstoffeinträge aus Produktanwendung, z.B. PFAS (nicht durch großflächige Aufbringung auf landwirtschaftlichen Flächen), Schadstoffeinträge aus Leckagen z.B. aus Tanks, Fässern, Maschinen, etc., Schadstoffeinträge aus dem Handling von Flüssigkeiten, z.B. Tropfverluste, etc.

Je nach Schadstofftyp kommen verschiedene Sanierungsverfahren für eine Sanierung im Bereich der Quelle in Frage.

Vor der Entscheidung für den Einsatz eines Sanierungsverfahrens im Bereich einer Schadstoffquelle sind zwingend ausreichende **Vorkenntnisse** über die **lokalen Rahmenbedingungen** (hydraulische, hydrogeologische und hydrochemische Standort- und Milieuverhältnisse) sowie **detaillierte Kenntnisse über die Schadenssituation** (Art, Ausbreitung und räumliche Verteilung, Menge, physikalische und chemische Eigenschaften, ggf. biologische Abbaubarkeit und Bioverfügbarkeit etc. der Schadstoffe) erforderlich. Die Anwendung von In-situ-Sanierungsverfahren kann eingeschränkt werden durch:

- Inhomogenitäten des Aquifers bzw. der ungesättigten Zone, verbunden mit dem Problem der gezielten Verteilung von Reagenzien/Energieeinträgen etc.,
- Matrixeffekte des Bodens, mit der Erfordernis stark überstöchiometrischer Reaktionsmittelzugaben,
- unkontrollierte, unerwünschte Sekundäreffekte wie Mobilisierung (beispielsweise von Schwermetallen durch Oxidation, Reduktion oder pH-Wert-Änderungen), Metabolitenbildung, Strippeffekte usw.

Deswegen ist die Kenntnis

- der Bodenstruktur (Aggregation, Vorhandensein von Makroporen),
- der Bodentextur (Korngrößenverteilung),
- der Porosität/Lagerungsdichte, des Wassergehaltes sowie
- des Gehaltes an organischer Substanz

von besonderer Bedeutung. Durch diese Bodenfaktoren wird einerseits die Luftdurchlässigkeit bzw. die hydraulische Leitfähigkeit, andererseits das Sorptionsverhalten des Bodens beeinflusst. Zudem ist die Kenntnis der relativen Lage der Kontamination zum Grundwasser, die ggf. technische Schutzmaßnahmen (Schutzinfiltrationen, Spundwände etc.) erforderlich macht, von Relevanz.

Die nachfolgende Tabelle zeigt typische altlastenrelevante Schadstoffgruppen, die im Quellbereich in der ungesättigten und gesättigten Bodenzone vorkommen können:

**Tabelle 1: Schadstoffgruppen im Boden und Grundwasser**

Erläuterung: MKW = Mineralölkohlenwasserstoffe  
 BTEX-N = Benzol, Toluol, Ethylbenzol, Xylol – Naphtalin  
 FTOH = Fluortelomeralkohole  
 STV = Sprengstofftypische Verbindungen  
 PFAS = Per- und polyfluorierte Alkylverbindungen  
 PCB = Polychlorierte Biphenyle  
 PCDD/F = Polychlorierte Dibenzodioxine und Dibenzofurane

| Medium (gemäß Kap. 3.2)   | Schadstoffe / Schadstoffgruppe |   | ungesättigte Zone | gesättigte Zone |
|---|--------------------------------|---|-------------------|-----------------|
| <b>NAPL (Flüssigphasen)</b>   | 1                              | Organische Leichtphase (LNAPL) inkl. Suspension: BTEX, MKW                        | X                 | X               |
|   | 2                              | Organische Schwerphase (DNAPL) inkl. Suspension: z.B. LHKW, PAK, Teeröl (flüssig) | X                 | X               |
|   | 3                              | Mineralische Reinphase: z.B. Quecksilber  | X                 | X               |
| <b>gelöste Schadstoffe in der Bodenluft</b>                             | 4a                             | Organ. Schadstoffe (BTEX-N, MKW, flüchtige HET, aromatische Amine, Methan, usw.)  | X                 |                 |
|   | 4b                             | Organ. Schadstoffe (z.B. LHKW)  | X                 |                 |
|   | 4c                             | PFAS-FTOH   | X                 |                 |
|   | 5                              | Mineral. Schadstoffe (Quecksilber, Arsin, usw.)                                   | X                 |                 |
| <b>gelöste Schadstoffe im Wasser (Sicker-, Schicht- u. Grundwasser)</b> | 6                              | Organ. Schadstoffe alle NAPL u. lösliche Organika                                 | (X)               | X               |
|   | 7                              | PFAS  | (X)               | X               |
|   | 8                              | Mineralische Schadstoffe  | (X)               | X               |
| <b>Feststoffe und feststoffartige Schadstoffe</b>                       | 9                              | Mineralische Feststoffe, Cyanide, Zink, Zinn, Blei, Schwermetalle                 | X                 | (X)             |
|   | 10                             | Organische Feststoffe: fester Teer, Polymer-Ausschussabfälle, Cyanidkomplexe, STV | X                 | (X)             |
|   | 11                             | stark sorbierte Organika (z.B. PFAS, PAK, PCB, PCDD/F)                            | (X)               | (X)             |

Diese Kenntnisse sind sowohl zur sachgerechten Auswahl eines für die Standortbedingungen geeigneten Verfahrens als auch genehmigungsrechtlich für den Nachweis der Schadlosigkeit des Verfahrens am Standort unerlässlich. Sie können grundsätzlich nur durch vorgeschaltete Labor-, Technikums- und/oder Feldversuche (Pilotversuch) sowie eine zielorientierte Standort-erkundung gewonnen werden. Elementar für solche Vorversuche ist ein repräsentatives Sanierungsfeld, so dass die gewonnenen Ergebnisse plausibel auf andere Sanierungsbereiche übertragbar sind.

Abhängig von dem eingesetzten Verfahren können diese Versuche Informationen liefern:

- zu Wirkungsradien, räumlicher Verteilung und zeitlicher Entwicklung, z.B. von Luftinjektionen/Luftabsaugungen und erzielbarer Über- bzw. Unterdrücke,
- zur Dynamik der Schadstoffübergänge zwischen fester, flüssiger und gasförmiger Phase,
- zum zeitlichen Verlauf von Schadstofffrachten, die aus dem Untergrund extrahiert werden können,
- zur Kinetik des biologischen und/oder chemischen Schadstoffabbaus,
- zu Matrixeffekten sowie
- zu den Auswirkungen auf andere Schutzgüter.

Auf diese Weise werden die spezifischen Standortverhältnisse vor Ort bei der verfahrenstechnischen Planung berücksichtigt. Labor- und Feldversuche bieten ferner die Grundlage für Prognosen zum erreichbaren Sanierungsziel und zur Sanierungsdauer und erlauben damit auch eine fundierte Kostenschätzung und insbesondere eine zuverlässige Auslegung der Sanierung.

Zur Kontrolle des Sanierungserfolgs ist bei allen Verfahren während der gesamten Sanierungsmaßnahme ein Monitoring erforderlich, das nach einem in der Planung festgelegten Monitoringkonzept durchgeführt werden muss. Hinsichtlich des Sanierungserfolgs ist zu differenzieren zwischen der Wirksamkeit (Effektivität) des Verfahrens und dessen Wirkungsgrad (Effizienz). Beides sind Voraussetzungen dafür, dass der Sanierungserfolg bzw. der Abschluss einer Sanierungsmaßnahme zeitgerecht, d.h. im geplanten Sanierungszeitraum erreicht werden kann. Zur Planung des Monitoringkonzeptes ist daher im Rahmen der Erkundung insbesondere auch die Abgrenzung der Schadstofffahne bedeutsam.

Die zu untersuchenden Kompartimente (Boden, Grundwasser und Bodenluft) sowie Art und Umfang des Monitorings richten sich nach den jeweiligen Verfahren. Ebenso werden Nährstoffgehalte und etwaige Randparameter (zum Beispiel Sauerstoff- und Kohlendioxidgehalt in der Bodenluft) ermittelt. Je nach Verfahrensart kommen folgende Maßnahmen bei der Überwachung und Steuerung einer In-situ-Sanierung zur Anwendung:

- Überwachung der Schadstoffentwicklung und ggf. des Schadstoffaustrags,
- Messung der Grundwasserstände,
- Online-Überwachung der Untergrundtemperatur und der Temperaturentwicklung (für thermische Verfahren),
- Online-Überwachung der Anlagenbetriebsparameter und Anlagensteuerung inklusive Fehlermeldung,
- Monitoring der redoxsensitiven Parameter inkl. der Elektronenakzeptoren und -donatoren,
- Monitoring der Biotransformationsprodukte,
- Biomonitoring mikrobieller Aktivitäten, der Biomasseentwicklung, der Biomassedifferenzierung, des Potenzials abbauaktiver Enzyme,

- Entnahme von Bodenproben im Sanierungsgebiet und deren Untersuchung auf Schadstoffgehalte und Abbauaktivitäten.

Zur optimalen Planung der Sanierungsmaßnahme und Erstellung eindeutiger Ausschreibungsunterlagen sind verschiedene Planungsgrundlagen zu erarbeiten. Die einzelnen Planungskriterien und der notwendige Umfang der Untersuchungen sind für jeden Sanierungsfall und jede geplante Maßnahme einzelfall- und standortspezifisch festzulegen. In der Konsequenz bedeutet dies, dass dem Planungs- und Gutachteraufwand bei der Konzeption von In-situ-Sanierungen im Vergleich zu konventionellen Maßnahmen eine höhere Bedeutung zukommt.

## 6 Konzeptionelles Standortmodell

Die in Kapitel 3.2 vorgestellten und erläuterten Schadstoffquellentypen sollen helfen, eine optimale Sanierungsstrategie zu entwickeln. Wie kann erkannt werden, um welchen konkreten Quellentyp es sich im Einzelfall handelt? Und welche standortspezifischen Rahmenbedingungen sind zu berücksichtigen? Ist eine Zuordnung überhaupt möglich oder liegt ein Mischtyp vor? Zur Beantwortung dieser Fragen ist gutachterlich ein konzeptionelles Standortmodell zu entwickeln.

Im Rahmen der Detailuntersuchung bildet das konzeptionelle Standortmodell die Basis der abschließenden Gefährdungsabschätzung. Im Modell müssen sämtliche Informationen u.a. zur Schadstoffquelle, zu Ausbreitungswegen und zur möglichen Exposition von Schutzgütern enthalten sein. Das konzeptionelle Standortmodell muss graphisch dargestellt und textlich erläutert werden.

Folgende Standortcharakteristiken müssen betrachtet werden, um ein konzeptionelles Standortmodell erstellen zu können:

- Standortspezifische Randbedingungen
  - Bebauung, Infrastruktur, Nutzungen
  - Geologie, Hydrogeologie, Hydrochemie
  - anthropogene und geogene Stoffe
- Stoffinventar
  - Benennung der Schadstoffe und Abbauprodukte
  - Schadstoffquellentypen
  - Schadensabgrenzung: Quelle und Fahne
- Gefährdung
  - Schutzziele
  - Wirkungspfade
  - Exposition von Schutzgütern

Zunächst sollte eine historische Recherche durchgeführt werden, um sämtliche, bereits vorhandene Informationen zu einem Standort zu erfassen. Neben der Nutzungshistorie und der allgemeinen Standortverhältnisse (z.B. Lage, Eigentumsverhältnisse, aktueller Zustand) sind insbesondere Informationen über die örtliche Geologie und Hydrogeologie einzuholen. Falls bereits Berichte früherer Untersuchungen vorhanden sind, können diese einen ersten Überblick über die geogenen Verhältnisse und das vorhandene Schadstoffinventar verschaffen.

Nach dieser grundlegenden Recherche kann bereits ein erster Entwurf eines Standortmodells entwickelt werden, um die weiteren orientierenden und dann detaillierten Untersuchungen zu planen. Die Standortuntersuchungen dienen dazu einen möglichst genauen Sachstand über die geologischen und hydro(geo)logischen Vor-Ort-Verhältnisse zu erhalten. In diesem Zuge sind z.B. Kleinrammbohrungen oder Schürfe durchzuführen sowie Grundwasser- und Bodenluftmessstellen zu errichten. Geotechnische und hydrogeologische Untersuchungen wie Sieb- und Schlämmanalysen, Dichtemessungen, Versickerungsversuche, Pumpversuche etc. geben Aufschluss über die örtliche Geologie sowie die Gesteins- und Aquifereigenschaften. Zur Untersuchung und Abgrenzung des Schadstoffinventars sind z.B. Probenahmen und chemische Analysen von Boden, Grundwasser und Bodenluft sowie ggf. eine Sickerwasserprognose und geophysikalische Untersuchungen durchzuführen.

Nach diesen Untersuchungen sollte die am betrachteten Standort vorliegende Schadstoffquelle räumlich möglichst vollständig abgegrenzt und in ihrer Schadstoffzusammensetzung soweit

bekannt sein, so dass sie einem (oder auch mehreren) der in Kapitel 0 aufgeführten Schadstoffquellentypen zugeordnet werden kann.

Für die Erstellung des konzeptionellen Standortmodells sind zudem die Ausbreitungswege und die Exposition von möglichen Schutzgütern zu erkunden (Abb. 12). Im Rahmen einer Gefährdungsabschätzung werden die einzelnen Wirkungspfade ausgehend von der Schadstoffquelle betrachtet und entsprechend ihres Gefährdungspotentials ausgewertet. Gemäß Anlage 2 der BBodSchV sind dabei die Wirkungspfade Boden-Mensch, Boden-Nutzpflanze und Boden-Grundwasser zu betrachten. Die Relevanz weiterer Wirkungspfade ist zu prüfen.

Mit den Erkenntnissen aus ergänzenden Standortuntersuchungen und Sanierungstests in der nachfolgenden Sanierungsuntersuchung ist das Standortmodell zu ergänzen und fortzuschreiben (siehe auch Kap. 7). Verbleibende Kenntnisdefizite sind zu benennen. Bei komplexen Schadensfällen bietet sich außerdem der Einsatz von numerischen Schadstofftransportmodellen oder/und 3D-Visualisierungen an.

Das konzeptionelle Standortmodell (Beispiel in Abb. 12) bildet die Basis für die behördliche Entscheidung eines Sanierungsbedarfes indem alle Ergebnisse der Gefährdungsabschätzung einfließen. Ist ein Sanierungsbedarf gegeben, so sind weitere Sanierungsuntersuchungen erforderlich, um das konzeptionelle Standortmodell sukzessive zu erweitern und zu optimieren. Die weiteren Kapitel betreffen die Sanierungsuntersuchungen bei denen eine In-situ- Quellensanierung in Betracht kommt.

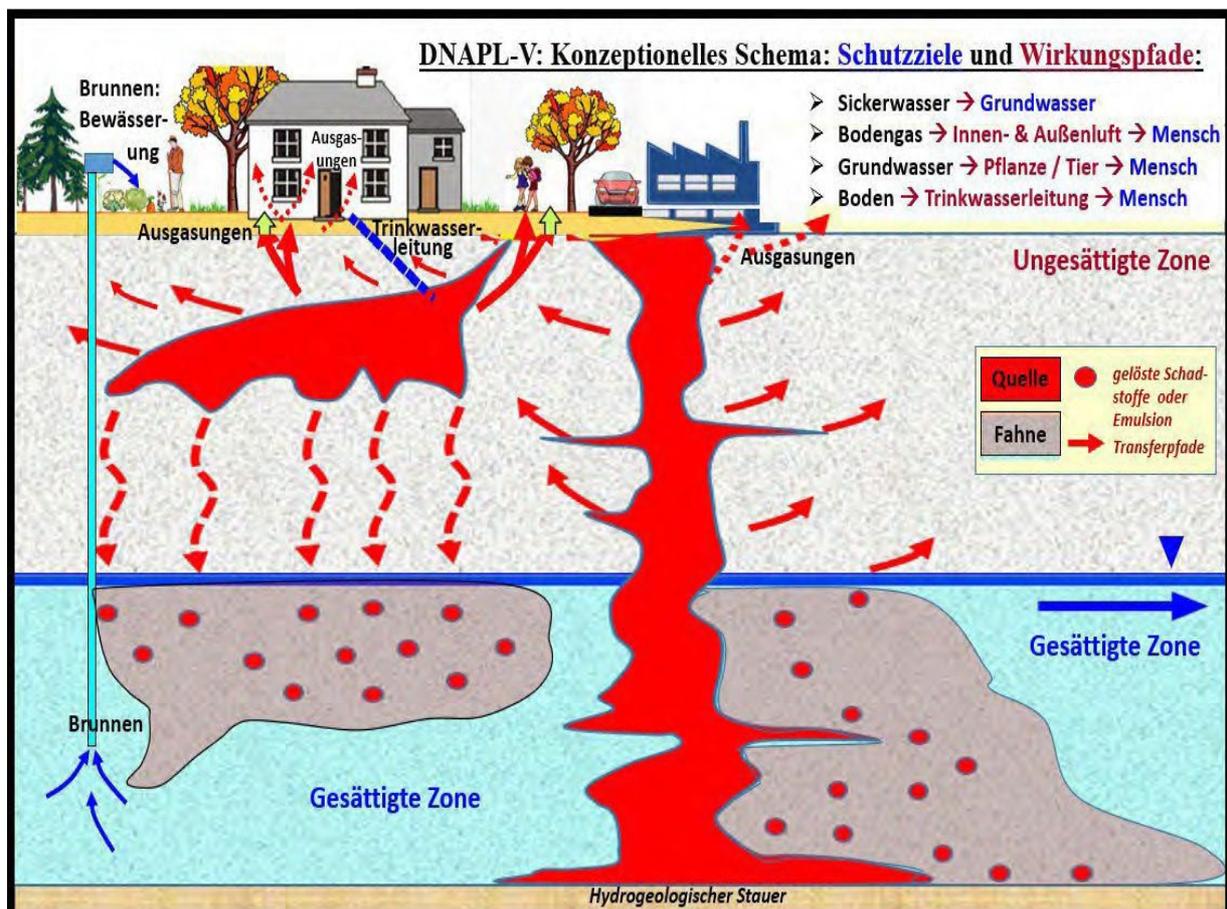


Abbildung 12: Beispiel eines konzeptionellen Schemas mit Transfer- & Wirkungspfaden der Schadstoffe (Autorenschaft Karg 2023).

Bei der Ermittlung von Sanierungstechnologien ist die zukünftige Nutzung mit den dazu gehörigen Transfer- und Expositionspfaden zu berücksichtigen (siehe Abb. 12 und Tabelle 2).

Bei der Abgrenzung von Schadstoffquellen und Sanierungsbereichen können risikobasierte Ansätze hilfreich sein, da auch nutzungsspezifische Sanierungsziele definiert werden müssen. Beispiele der Risiko-basierten Anwendung finden sich in der nachfolgenden Tabelle.

**Tabelle 2: Beispiele von Expositionsszenarien und Expositionspfaden, die im Rahmen von verschiedenen Nutzungsszenarien berücksichtigt werden können**

| Potenzieller Expositionspfad |   | Wohngebiet evtl. mit Badebecken (Grundwassernutzung) | Kinderspielplätze | Park, Freizeitanlage u. Grünfläche | Gewerbe- / Industriegebiet |
|------------------------------|---|--|-------------------|------------------------------------|----------------------------|
| Inhalativ                    | Einatmung von dampf- bzw. gasförmigen flüchtigen Kontaminanten  | ja <sup>(1)</sup>                                    | ja <sup>(1)</sup> | ja <sup>(1)</sup>                  | ja <sup>(1)</sup>          |
|                              | Einatmung von mit Kontaminanten behaftetem Staub  | ja <sup>(2)</sup>                                    | ja <sup>(2)</sup> | ja <sup>(2)</sup>                  | ja <sup>(2)</sup>          |
|                              | Einatmung von (hei ßem) Wasserdampf beim Duschen oder Baden durch Schadstoffeindringungen in Trinkwasserleitungen | ja <sup>(3)</sup>                                    | nein              | ja <sup>(3)(6)</sup>               | ja <sup>(3)(6)</sup>       |
| Oral                         | Direkte (passive) Aufnahme aus dem Boden (und Bodenstaub)   | ja <sup>(2)</sup>                                    | ja <sup>(2)</sup> | ja <sup>(2)</sup>                  | ja <sup>(2)</sup>          |
|                              | Aufnahme von selbst erzeugter Nahrung   | ja <sup>(4)</sup> (*)                                | nein              | nein <sup>(5)</sup>                | nein                       |
|                              | Aufnahme von Wasser beim Baden oder Duschen durch Schadstoffeindringungen in Trinkwasserleitungen                 | ja <sup>(3)</sup>                                    | nein              | ja <sup>(3)(6)</sup>               | ja <sup>(3)(6)</sup>       |
|                              | Aufnahme von Wasser beim Baden im Oberflächengewässer   | ja <sup>(7)</sup>                                    | nein              | ja <sup>(7)</sup>                  | nein                       |
| Dermal                       | Kontakt mit Wasser beim Baden oder Duschen durch Schadstoffeindringungen in Trinkwasserleitungen                  | ja <sup>(3)</sup>                                    | nein              | ja <sup>(3)(6)</sup>               | ja <sup>(3)(6)</sup>       |
|                              | Hautadsorption von Boden und Staub  | ja <sup>(2)</sup>                                    | ja <sup>(2)</sup> | ja <sup>(2)</sup>                  | ja <sup>(2)</sup>          |
|                              | Kontakt mit Wasser beim Baden im Oberflächengewässer  | ja <sup>(7)</sup>                                    | nein              | ja <sup>(7)</sup>                  | nein                       |

## Tabellenerklärungen:

- (\*) Bei Wohnbebauung kann die Anwesenheit von Hausgärten zur oralen Exposition von selbsterzeugten Nahrungsmitteln führen, welche belastet sein können.
- (1): Falls flüchtige Kontaminanten vorhanden sind: Entweder Anwendung von Luftanalytik-Ergebnissen oder über Modellierung vom Grundwasser und/ oder Boden  
 Bodenluft  Umgebungsluft.
- (2): Falls unversiegelte Flächen mit kontaminiertem Oberboden vorhanden sind und auch keine dichte Vegetationsdecke (wie dichter Rasen) die Staubbildung aus Oberboden unterbinden kann:  
 Entweder Anwendung von Oberbodenanalytik-Ergebnissen oder über Modellierung vom Boden  Staub.
- (3): Falls Schadstoffe aus belastetem Boden in Trinkwasserleitungen diffundieren können (z.B. Lösemittel): Entweder Anwendung von Leitungswasseranalytik-Ergebnissen oder über Modellierung vom Boden  Trinkwasserleitung.
- (4): Falls Nahrung im belasteten Boden produziert wird, mit belastetem Wasser bewässert oder aus dem belastetem Oberflächengewässer gefischt wird: Entweder Anwendung von Ergebnissen der Nahrungsmittelanalytik oder über Modellierung des Schadstofftransfers vom Boden bzw. Wasser zum  Nahrungsmittel (Pflanzen, Algen, Pilze, Tiere).
- (5): Dieser Expositionspfad könnte trotzdem anwendbar sein, wenn z.B. wilde Pflanzen konsumiert werden (Brombeeren, Pilze, Kräuter, etc.): Entweder Anwendung von Pflanzenanalytik-Ergebnissen oder über Modellierung des Schadstofftransfers vom Boden zur  Pflanze.
- (6): Falls Trinkwasserleitungen in belastetem Boden vorhanden und Dusch- oder Badeinstallationen vorhanden sind.
- (7): Falls ein kontaminiertes Oberflächengewässer zum Baden genutzt wird.

## 7 Sanierungsuntersuchung

Das konzeptionelle Standortmodell aus der Detailuntersuchung (inkl. der abschließenden Gefährdungsabschätzung) bildet die Basis der Sanierungsuntersuchung. Im Rahmen der Sanierungsuntersuchung sind i. d. R. weitere Standortuntersuchungen notwendig. Dies können sein:

- Quellengeometrie und Zusammensetzung,
- Erkundung der Ausbreitungswege der Schadstoffe,
- Sanierungsmethoden spezifische Untersuchungen von Hydrochemie und Redoxverhältnis, Mikrobiologie, Abbauverhalten von Schadstoffen, usw.
- Labor-/Technikums- und Feldversuche,
- Vergleichende Machbarkeitsstudien zur Ermittlung der Geeignetheit und Kosten der betrachteten Verfahren.

Auf Basis dieser Untersuchungen wird das konzeptionelle Standortmodell so verfeinert, dass die Anwendbarkeit von In-situ-Sanierungsmethoden zur Quellensanierung beurteilt werden kann. In das verfeinerte konzeptionelle Standortmodell können die anwendbaren Sanierungsvarianten integriert werden. Ziel ist die Ermittlung der Vorzugsvariante, z.B. einer In-situ-Quellensanierung, auf Grundlage einer aussagekräftigen Datenlage, die auch im konzeptionellen Standortmodell dargestellt werden sollte.

In den beigefügten Verfahrensblättern der einzelnen In-situ-Quellensanierungsmethoden wird im Detail auf spezifische Erkundungsanforderungen und Machbarkeitsuntersuchungen eingegangen.

### Anwendungsrisiken

In-situ-Sanierungsmaßnahmen unterliegen verschiedenen standortspezifischen Risiken, auf die im Folgenden näher eingegangen wird. Diese Risiken beziehen sich zum einen auf die geogenen Rahmenbedingungen des Standortes, zum anderen auf die Kontaminationssituation selbst.

Risiken, die im Zusammenhang mit der jeweiligen In-situ-Sanierungsmethode stehen (technische Prozessrisiken), werden in den beigefügten verfahrensspezifischen Datenblättern behandelt. Auch Risiken, die aus der jeweiligen Standortnutzung (Expositionsrisiken) hervorgehen und daher in den Bereich der Gefährdungsbeurteilung fallen, werden ebenfalls in den beigefügten verfahrensspezifischen Datenblättern behandelt. Dies gilt auch für das Risiko unzureichender Standort- und Geoprozesskenntnisse (z.B. bei unzulänglicher räumlicher Standort-erkundung ohne dynamische Betrachtungen). Hinweise zur Anlagensicherheit gibt die Arbeitshilfe ITVA AH-H1-15.

Zu den geogenen Risiken, die bei In-situ-Sanierungsmaßnahmen grundsätzlich zu betrachten sind, zählen vor allem:

- die geologischen Verhältnisse (z.B. Gesteinsaufbau, Korngrößenverteilung, Matrix- und Poreneigenschaften, mineralische Zusammensetzung, Stratigraphie),
- die hydrogeologischen Verhältnisse (z.B. räumlicher Aufbau von Grundwasserleitern und -stauern, Grundwasserhydraulik und -dynamik, Sickerwasser- und Schichtwassereinfluss) sowie

- die bodenphysikalischen Faktoren (z.B. Kapillarprozesse, Sorptions und Resorptionsprozesse),
- die geo-/hydrochemischen Verhältnisse (z.B. Redox-Milieueinflüsse, Eh-pH-bedingte Phasenumwandlungen, Präzipitationen, reversible und irreversible Reaktionen) und
- die bodenbiologischen Faktoren (z.B. mikrobiologisches Potenzial zu Verschleimung und Biofouling).

Viele In-situ-Sanierungsverfahren basieren auf Prinzipien, bei denen entweder biologische oder chemische Wirkstoffe an die Schadstoffe im Untergrund zu deren Abbau, Umwandlung oder Immobilisierung herangeführt werden oder durch physikalische Aktivierungsprozesse Schadstoffe aus dem Untergrund entfernt werden können. Aus diesem Grund spielen Aktivierungsprozesse an Phasengrenzflächen und Transportprozesse über die wässrige Phase oder über die Bodenluft eine entscheidende Rolle für die Herbeiführung des Sanierungserfolges.

So finden solche Transportprozesse in bindigen Böden wie Ton-, Schluff- oder Mergelstrukturen, die eine geringe hydraulische Durchlässigkeit aufweisen, kaum bzw. nur sehr langsam statt. Weisen diese Strukturen relevante Schadstoffkonzentrationen auf, so werden diese im Rahmen einer In-situ-Sanierungsmaßnahme oft nur unzureichend erreicht. Wenn bei dem jeweiligen Sanierungsverfahren nicht durch entsprechende flankierende Maßnahmen die Wirkstoffverteilung oder die Einwirkung in hydraulisch schlecht durchlässigen Strukturen sichergestellt wird, zeigt sich das jeweilige Verfahren möglicherweise in diesen Bereichen nur eingeschränkt wirksam.

## Hydrogeologische und hydrogeochemische Risiken

Eine hydrogeologisch bedingte Herausforderung stellt die Grundwasserhydraulik und -dynamik dar. Das Grundwasser stellt als Transportmittel für die gelösten Schadstoffe bei In-situ-Sanierungsverfahren in der gesättigten Zone auch das Haupttransportmittel für die Wirkstoffe dar. Eine starke Dynamik des Fließgeschehens kann bei entsprechender Kenntnis gezielt genutzt werden. Sie kann für eine Wirkstoffverteilung förderlich sein.

Bei unzureichender Kenntnis kann eine stark wechselnde Grundwasserfließrichtung eine In-situ-Sanierung in ihrer Wirksamkeit reduzieren. Beispielhaft seien hier stark wechselnde Grundwasserstände für die Ölphasenentnahme oder wechselnde Fließrichtungen für Biobarrierenkonzepte genannt.

Transportprozesse von Wirkstoffen in bindigen Böden wie Ton-, Schluff- oder Mergelstrukturen, die eine geringe hydraulische Durchlässigkeit aufweisen, finden kaum bzw. nur sehr langsam statt. Weisen diese Strukturen relevante Schadstoffkonzentrationen auf, so muss die hier eingesetzte In-situ-Sanierungsmaßnahme auch auf die Schadstoffe gezielt einwirken (z.B. in-situ-Waschungen oder konduktiver Wärmetransport wie z.B. beim THERIS-Verfahren). Wenn bei dem jeweiligen Sanierungsverfahren nicht durch entsprechende flankierende Maßnahmen die Wirkstoffverteilung oder die Einwirkung in hydraulisch schlecht durchlässigen Strukturen sichergestellt wird, ist das jeweilige Verfahren üblicherweise für bindige Böden ungeeignet. Für organische Schadstoffe in bindigen Böden gilt daher, dass thermische In-situ-Sanierungsverfahren über einen konduktiven Wärmetransport eine Reinigung bindiger Schichten bewirken können.

Ein weiteres wichtiges, geogen bedingtes Risiko ist das Redoxmilieu am Standort. Häufig wird bei In-situ-Sanierungen das Redoxmilieu aktiv verändert, z.B. bei chemischen Oxidationsmaßnahmen oder bei biologischen Sanierungsverfahren. Dadurch kann es leicht zu

Fällungsprozessen kommen, da Löslichkeitsgleichgewichte sich verschieben (Carbonatfällung) oder z.B. durch Oxidationsprozesse Eisen- oder Manganoxide ausfallen. Die Fällungsprodukte können sich auf die Porenstrukturen im Grundwasserleiter auswirken. Inwieweit sich solche Prozesse auf größerskalige Kenngrößen, wie die hydraulische Leitfähigkeit, auswirken, muss im Einzelfall geprüft werden. Hierbei ist die Hydro-/Geochemie zu berücksichtigen. Neben Fällungsprozessen können auch Lösungsprozesse ein Risiko darstellen. Beispielhaft sei hier die Lösung gegen vorhandener Schwermetalle benannt, die z.B. durch chemische Oxidationsmaßnahmen aus ihrer sulfidischen Bindung herausgelöst werden und sich dann ins Grundwasser lösen können.

Ebenso können durch Fällungsprozesse Brunnen, Pumpen und ggf. oberirdische Anlagenstrukturen funktional beeinflusst werden, durch die das Grundwasser zum Beispiel im Rahmen von Grundwasserzirkulationsmaßnahmen geleitet wird.

Weiterhin können Änderungen des Redox-Milieus zu Ausgasungen von flüchtigen Schadstoffen führen (Arsin, Schwefelwasserstoff, usw.).

Risiken, die im Zusammenhang mit den am Standort vorhandenen Schadstoffen stehen, liegen unter anderem in deren Mobilitätsverhalten, in ihrem Phasenverhalten (bei schlecht wasserlöslichen organischen Schadstoffen) und in ihrem physikalischen, biologischen und/oder chemischen Verhalten.

Bei Festgesteinen ist generell ein Verständnis der Kluftstruktur erforderlich. Zudem kann eine poröse Gesteinsstruktur erhebliche Schadstoffmassen einschließlich Phase speichern. Eine Schadstofffreisetzung bei natürlichen Temperaturen erfolgt maßgeblich über Diffusion.

## Verfahrenstechnische Risiken

In-situ-Verfahren können eine Reihe technologiespezifischer potenzieller Risiken aufweisen, die im Rahmen der Sanierungskonzeptionierung und Ausführungsplanung abzuklären sind.

Bei biologischen Sanierungsverfahren besteht ein technologisches Risiko in der Bildung von Metaboliten und im unvollständigen biologischen Abbau von Schadstoffen. So kommt es z.B. bei der reduktiven Dechlorierung von chlorierten Ethenverbindungen zur Bildung der Zwischenprodukte cis-1,2-DCE und Vinylchlorid. Die weitere Prozessführung muss zur weiteren Umsetzung zu nicht toxischen Endstoffen führen.

Einige, generell gut biologisch abbaubare organische Schadstoffe können bei hoher Konzentration eine hohe Biotoxizität aufweisen, die biologische Abbauprozesse in (stark) belasteten Schadensbereichen erschwert.

Eine wichtige Rolle spielt eine mangelnde Bioverfügbarkeit von Schadstoffen bei der Stimulation biologischer Abbauprozesse. Schadstoffe können unter anderem durch Sorption an die Bodenmatrix (z.B. bei PAK) in ihrer Bioverfügbarkeit und dadurch in ihrer biologischen Abbaubarkeit stark herabgesetzt sein, so dass dadurch biologische In-situ-Abbauprozesse weniger wirksam bleiben. Die Abbauprozesse basieren zumeist darauf, dass sich für die am Abbau beteiligten Mikroorganismen ausreichend Energie aus dem Schadstoffabbau erzielen lässt und genügend milieuspezifische Elektronenakzeptoren vorhanden sind. Je geringer jedoch die verbliebenen Restkonzentrationen im Zuge des Abbaus werden, umso schwerer wird es für die Mikroorganismen, noch ausreichend Energie aus den verbliebenen Restschadstoffkonzentrationen zu beziehen.

Bei chemischen Verfahren liegen dagegen anders gelagerte spezifische Verfahrensrisiken vor. Chemische Oxidations- oder Reduktionsverfahren greifen zumeist massiv in die Redoxchemie

des Standortes ein. Dadurch kann es zu unerwünschten Fällungs- und Freisetzungsprozessen (z.B. Freisetzung von Schwermetallen aus sulfidischen Bindungsformen) kommen. Bei chemischen Oxidationsverfahren werden in der Regel auch große Mengen von Oxidationsmitteln eingesetzt, die, mit Ausnahme von Wasserstoffperoxid, nicht rückstandslos zerfallen, sondern Reaktionsprodukte freisetzen, z.B. Manganoxide aus Permanganaten, Sulfat aus Persulfaten. Der Umgang mit chemischen Stoffen, wie Peroxide, usw. birgt Arbeitsschutzrisiken, die berücksichtigt werden müssen.

*Anmerkung:*

Hinterlassen die Oxidationsmittel feste Rückstände, kann es an der Kontaktfläche von Schadstoff-Phasentröpfchen zur Bildung von Oxidhüllen kommen, die zu einem Phaseneinschluss führen.

Physikalische In-situ-Sanierungsverfahren weisen wiederum anders gelagerte Verfahrensrisiken auf. Ziel sowohl von thermischen Verfahren als auch von Mobilisationsverfahren (Air-Sparging, Biosparging, Tensidmobilisation, Alkoholwäsche etc.) ist es, durch gezielte Schadstoff-mobilisation die Schadstoffmasse aus dem Behandlungsbereich auszutragen, sei es über den Wasserpfad oder über die Bodenluft. Die damit einhergehende Schadstoffmobilisierung und ggf.

-verlagerung ist dadurch ein verfahrensimmanentes Risiko, das durch die Ausgestaltung entsprechender hydraulischer und pneumatischer Sicherungsmaßnahmen berücksichtigt werden muss. Berücksichtigt werden müssen auch, insbesondere bei der Quellensanierung und entsprechend erwartbar hohen Konzentrationen weitere Themen, wie EX-Schutz, Möglichkeiten der Risikominderung, ggfls klimarelevante Austrag von Methan und Energieaufwand etc.

Bei thermischen Sanierungsverfahren kann es darüber hinaus zu Austrocknungsprozessen in der ungesättigten Bodenzone kommen, was das Risiko von Setzungsprozessen mit entsprechender Gefährdung der darauf befindlichen Gebäudestrukturen birgt.

Schließlich kann es sowohl bei physikalischen als auch bei chemischen In-situ-Verfahren grundsätzlich zu einer Schwächung oder sogar weitgehenden Verminderung natürlicher Schadstoffabbau- und -rückhalteprozesse kommen. Der Einsatz dieser Verfahren kann daher mit einer Schwächung der Natural Attenuation einhergehen.

## Risiken bei chemischen / biologischen In-situ-Sanierungen

Diese In-situ-Sanierungsverfahren basieren oft auf einer hydraulischen Verteilung von Wirkstoffen, die entweder über Drainagen, Bohrinjektionen oder über Lanzen und Brunnensysteme in den Untergrund eingebracht werden. Dadurch greifen die In-situ-Maßnahmen in das hydraulische System des Untergrundes ein, was zu gewünschten, teilweise aber auch unerwünschten Schadstoffmobilisationsprozessen führen kann. Dieses Risiko ist grundsätzlich standort- und verfahrensspezifisch abzuschätzen und ggf. durch Feldtests zu untersuchen. Des Weiteren stellen Schadstoffphasen (in verschiedenen Verteilungsformen als Pools, Blobs, Suspensionen oder überströmte gealterte Kornanhaftungen) für viele dieser In-situ-Verfahren ein potentiell Risiko dar, das bei der Planung des Sanierungsverfahrens zu berücksichtigen ist. Die Überführung von Schadstoffphasen in Suspensionen kann auch ein Verfahrensvorteil sein, wenn die Biodisponibilität und mikrobiologische Angreifbarkeit der Schadstoffe erhöht werden soll.

Biologische und chemische In-situ-Sanierungsverfahren basieren auf dem Eintrag gasförmiger oder flüssiger Wirkstoffe, die auf die Schadstoffe in der Bodenmatrix wirken können (z.B. an Phasengrenzflächen). Relevante Schadstoff-Phasenpools oder -blobs können die Wirksamkeit vieler In-situ-Verfahren deutlich einschränken, insbesondere den zeitlichen Verlauf stark verlängern. Einige Schadstoffe können während der mikrobiologischen Sanierung zu toxischen Metaboliten

umgewandelt werden. Dies muss bei der Sanierungsplanung berücksichtigt werden, um bei der Sanierung bzw. Verfahrenstechnik nicht tolerable Risiken zu vermeiden. Die eventuell zugesetzten Stoffe sind im Rahmen des Genehmigungsverfahrens zu berücksichtigen.

Diese Sanierungsrisiken können zum einen durch hinreichende konzeptionelle Standortmodelle und zum anderen systematische Voruntersuchungen in Labor und Feld (Machbarkeitsstudie) erkannt und berücksichtigt werden.

## Risiken bei thermischen In-situ-Sanierungen

Bei thermischen Verfahren werden die Schadstoffe thermisch mobilisiert. Hauptaustragspfad ist dabei die Bodenluft. Nachgelagert werden Schadstoffe auch über das Grundwasser gefördert. Hierbei ist dafür Sorge zu tragen, dass dem Verschlechterungsverbot im Grundwasser Rechnung getragen wird, heißt: die mobilisierten Schadstoffe müssen auch gefördert werden.

Bei hohen Fließgeschwindigkeiten im Grundwasser kann es zu einer abströmenden Wärmelehne kommen. Dies muss bei der Auslegung des Heizregimes, bei der Auslegung der GW-Förderpumpen, sowie bei einer Risikobetrachtung für angrenzende Grundstücke berücksichtigt werden.

Bei der Bodenluftabsaugung können systembedingt Schadstoffe durch saubere Bodenschichten transportiert werden (z.B., wenn vor einem Air-Sparging oder einer thermischen In-Situ-Sanierung ein (oberflächennaher) Bodenaustausch stattgefunden hat (z.B. Munitionsräumung) [15]). Hierbei kann sich die Schadstoffkonzentration in dem sauberen Boden zeitweise erhöhen. Deshalb sind die Filterstrecken der Absaugbrunnen fachgerecht auszulegen.

Bei der Dampf-Luft-Injektion (DLI, z.B. TUBA-Verfahren), kommt es aufgrund des konvektiver Wärmeeintrags und des Injektionsdruckes zu einer schnellen Verteilung der Wärme und der mobilisierten Schadstoffe. Daher muss bei diesem Verfahren darauf geachtet werden, dass die Bodenluftabsaugung vor der DLI in Betrieb ist, um mobilisierte Schadstoffe zu fördern. Zudem ist eine Verschaltung der beiden Anlagen sinnvoll, so dass die Dampf-Luft-Injektion unterbrochen wird, sobald die Bodenluftabsaugung nicht betrieben wird.

Bei festen Wärmequellen (konduktiver Wärmeeintrag) besteht dieses Risiko nicht.

Das Risiko von Setzungen während der thermischen In-situ Sanierung ist die Abhängigkeit von der Bodenbeschaffenheit und -mächtigkeit des erwärmten Bodens. Konsolidierte Böden sind geringersetzungsanfällig als unkonsolidierte Böden. Bei stark organischen Böden kann es zu Setzungen im cm-Bereich kommen. Das Ausmaß der Setzungen lässt sich nicht prognostizieren. Im Sanierungsbetrieb sollten Setzungen regelmäßig gemessen werden, insbesondere, wenn eine Interaktion von Baugrundbewegungen zu bestehenden Gebäuden nicht ausgeschlossen werden kann. Verfahrensbegleitend ist ein Beweissicherungsverfahren an bestehender Bausubstanz durchzuführen.

Bei Sanierungen unmittelbar neben und unter Gebäuden wird eine kontinuierliche Raumluft-Überwachung mit Vor-Ort-Analytik, beispielsweise mobilem Gaschromatographen, empfohlen.

Besondere Vorsicht ist bei der Entnahme von Bodenproben direkt nach einer TISS geboten. Da der Boden oft noch sehr heiß ist (teilweise bis zu  $>80^{\circ}\text{C}$ ) sind besondere Arbeitsschutzmaßnahmen und spezielles Probenahmeequipment notwendig. Im Zweifel ist es sinnvoll einige Monate abzuwarten, bis sich der Boden etwas abgekühlt hat.

Thermische Verfahren erwärmen auch die Gesteinsstruktur und somit auch die hierin gespeicherten Schadstoffe. Dies bewirkt eine Schadstoffmobilisierung aus der Gesteinsstruktur. Zur Vermeidung einer unkontrollierten Mobilisation ist eine Kenntnis der Kluffstruktur erforderlich, um die Förderbrunnen / Absaugbrunnen fachgerecht auszulegen.

Nähere Erläuterungen zu diesen Verfahren finden sich in den Datenblättern.

## 8 Sanierungskonzept

### Sanierungsstrategien und deren Zielsetzungen

In-situ-Sanierungsverfahren können schutzgut- und nutzungsbezogen verschiedene Zielsetzungen hinsichtlich des räumlichen und zeitlichen Sanierungserfolgs verfolgen. Grundsätzlich steht die relevante Verringerung spezifischer Schadstoffkonzentrationen und -frachten sowie die damit einhergehende Verminderung des Gefährdungspotenzials, das von einem kontaminierten Standort ausgeht, im Vordergrund. Dieses generelle Ziel der Gefahrenabwehr kann aber auf verschiedene Art und Weise erreicht werden.

Die „Quelltermreduzierung“ mittels In-situ-Sanierung wird oft als ein Sanierungsziel verfolgt. Generelle Sanierungsziele können die Verringerung der vorhandenen Schadstoffmasse, Schadstofffrachten, Schadstoffkonzentrationen sowie Schadstoffexpositionen sein. In der praktischen Anwendung können dazu auch bestimmte prozentuale Schadstoffreduzierungen erreicht werden, die im Bereich von z.B. 80, 90 oder 99% liegen. Eine weitere Möglichkeit ist die Reduzierung des Quellterms unterhalb von Grenzwerten in Bezug auf Schadstoffkonzentrationen/-frachten sowie Schadstoffexpositionen.

Dieses Vorgehen ist primär bei Schadstoffquellensanierungen zu wählen, bei denen sichergestellt ist, dass keine Schadstoffe mehr in den Sanierungsbereich eindringen/nachströmen können. Das Erreichen dieses Sanierungszieles wird durch ein entsprechendes Monitoring von Grundwasser ggf. auch Bodenluft (ggf. Raumluft) und Boden im Sanierungsbereich überwacht und nachgewiesen. Problematisch kann bei dieser Zielsetzung sein, dass sich die Schadstoffkonzentrationen im Grundwasser auch bei starker Verminderung der Boden- und Bodenluftkonzentrationen nicht im gleichen Maße dauerhaft absenken lassen bzw. wenn es zu Rebound-Effekten kommt.

Die standortspezifischen Sanierungsziele sind schutzgut- und einzelfall-bezogen abzuleiten. Weitere Hinweise dazu finden sich u.a. in der ITVA-Arbeitshilfe H1-16 Verhältnismäßigkeitsprüfung [50].

#### Mindestanforderungen

Die Planungssicherheit muss in vielen Fällen durch vergleichende technisch-finanzielle Machbarkeitsstudien untermauert werden. Sanierungsuntersuchungen sollten so früh wie möglich technische Anforderungen der Sanierungstechnologieanbieter beinhalten.

Das Sanierungskonzept muss auf folgender Basis beruhen:

- Standortbeschreibung (Geologie, Hydrogeologie, Hydrochemie, Modellierung des Schadstofftransports, Infrastruktur),
- Schadensbeschreibung: Komplette Erkundung der gesamten Schadstoffausdehnung inkl. aller Schadstoffe und Abbauprodukte (Metabolite, Hydrolysate, usw.),
- ggf. erforderliche technische Machbarkeitsstudien mit evtl. Labor- und Feldtests,
- ggf. Pilot- oder Feldversuch,
- ggf. Modellierung des Sanierungsfortschritts,
- Management der Sanierungs- und Verfahrensrisiken,
- Arbeits- und Sicherheitsplan,
- Qualitätssicherung (Eigen- und Fremdüberwachung),
- Begleitendes Monitoring

## 9 Sanierungsanwendung und Ausblick

Die Autoren erhoffen sich von der Veröffentlichung dieser Arbeitshilfe eine positive Wirkung auf die Wahl, Planung und Realisierung von In-situ-Quellensanierungsmaßnahmen. Von besonderer Bedeutung für die Erfolgsaussichten einer Standortsanierung ist eine klare Identifizierung des jeweils vorliegenden Schadstoffquelltypus, aus dem sich verschiedene Konsequenzen insbesondere für dessen Sanierungsmöglichkeiten ergeben.

Grundlage für die Anwendung der vorliegenden Arbeitshilfe ist daher der Abgleich des jeweils vorliegenden Schadstoffquelltypus mit den sich daraus ableitenden technischen In-situ-Sanierungsoptionen. Die jeweiligen Sanierungsoptionen werden in spezifischen Verfahrensblättern mit den wesentlichen technologischen Bewertungskriterien, Verfahrensdetails, Anwendungsmodalitäten sowie Vor- und Nachteilen bewertet (siehe Kapitel 10).

Die vorliegende Arbeitshilfe bietet daher einen Mehrwert auf verschiedenen Ebenen:

- Verschiedenartige Schadensquellen werden systematisch typisiert.
- Für alle erfassten Schadensquelltypen werden physikalische, chemische und/oder biologische In-situ-Sanierungstechnologien diskutiert.
- Die Arbeitshilfe bietet zusätzliche Orientierung für die Auswahl möglicherweise geeigneter neuartiger Verfahren zur Sanierung von Altstandorten.
- Empfehlungen für bestimmte Untersuchungsschritte zur Sanierungsvorbereitung werden ausgesprochen.
- Die Vor- und Nachteile der jeweiligen Sanierungstechnologien werden diskutiert.
- Ausgewählte, veröffentlichte Referenzprojekte werden erwähnt.

Die hier beschriebenen Sanierungsverfahren können auch kombiniert in Form von „treatment trains“ in Sanierungsplänen berücksichtigt werden. Die dazu nötigen Bewertungskriterien sind unter anderem die Gefahrenabwehr, die Eignung, Nachhaltigkeit (Ökobilanz, usw.) und die Verhältnismäßigkeit (siehe auch ITVA-Arbeitshilfe H1-16).

Gegenüber herkömmlichen Verfahren, wie Aushub und Deponierung großer Bodenmassen (dig and dump) oder einfacher hydraulischer Sicherungsmaßnahmen (Pump and Treat), bieten In-situ-Verfahren häufig eine deutlich ressourcenschonendere, energie- und wassersparende Alternative zur Verminderung des Gefährdungspotenzials. Der Boden und die geologische Struktur bleiben in der Regel bei der Anwendung von In-situ-Sanierungsverfahren in ihrem natürlichen Aufbau erhalten und können nach Abschluss der Behandlungsmaßnahme in der Regel ihre natürlichen Bodenfunktionen, d.h. ihre Puffer-, Filter- und Stoffumwandlungsfunktionen, wieder übernehmen. Knapper werdender Deponieraum wird geschont und dem ggf. betroffenen Grundwasser werden keine großen Mengen an Wasser entzogen.

Schließlich erfüllen gut geplante und gut an den jeweiligen Standort angepasste In-situ-Sanierungsmaßnahmen viele Nachhaltigkeitsgesichtspunkte, wie z.B.:

- geringe „Wassernutzungsintensität“ (Menge an benötigtem Wasser je eliminiertem kg Schadstoff),
- geringe „Bodennutzungsintensität“ (Menge an verlagertem Boden je eliminiertem kg Schadstoff),
- geringe „Materialnutzungsintensität“ (Menge Rohmaterial verbraucht je eliminiertem kg Schadstoff) und

- geringe “Energienutzungsintensität” (Menge Energie verbraucht je eliminiertem kg Schadstoff).

**Disclaimer:**

Die Verfahrensblätter zeigen den Stand der Technik zum Zeitpunkt ihrer Veröffentlichung. Diese Verfahren werden auch in Zukunft weiterentwickelt und insofern wird sich daraus auch weiterer Forschungs- und Entwicklungsbedarf ergeben. So befindet sich zum Beispiel die technische Auswahl an In-situ-Sanierungsverfahren zur Elimination von PFAS-Schäden in Böden und Grundwasser zurzeit in einer dynamischen Entwicklung. Die Verfahrensblätter ersparen nicht Standort- & Schadstoff- quellen-spezifische, technisch-ökonomische Machbarkeitsstudien durchzuführen.

## 10 Literaturverzeichnis und weiterführende Literatur

- [1] Altenbockum, M., Birke, V., Blum, P., Cornelsen, M., Feige-Munzig, A., Gier, S., Hintzen, U., Hoffmann, E.-W., Jacobs, P., Koschitzky, H.-P., Melzer, R., Nerger, M., Schroers, S., Weindl, J., Willershausen, H. (2010): Arbeitshilfe H1-13 „Innovative In-situ-Sanierungsverfahren“. ITVA-Fachausschuss H1 „Technologien und Verfahren“, Ingenieurtechnischer Verband für Altlastenmanagement und Flächenrecycling e.V. (ITVA), Juni 2010.
- [2] E. Beitinger, M. Cornelsen, S. Gier, M. Nerger (2017): Arbeitshilfe H1-15 „Anlagen zur Sanierung von Boden-, Bodenluft- und Grundwasserkontaminationen – Produktsicherheit und CE-Konformität“. ITVA-Fachausschuss H1 „Technologien und Verfahren“, Ingenieurtechnischer Verband für Altlastenmanagement und Flächenrecycling e.V. (ITVA), Juni 2017.
- [3] Bieber, L. (2018): Prognose der Grundwasserbelastung nach einer thermischen Quellsanierung. *altlasten spektrum* 27 (2018), 3, ISSN 0942-3818, S. 103-107.
- [4] BBodSchG - Bundesbodenschutzgesetz (1998): Gesetz zum Schutz vor schädlichen Bodenveränderungen und zur Sanierung von Altlasten, 17.03.1998.
- [5] FIELDS K.; GIBBS J. et al.: Air Sparging – A Project Manager’s Guide. – Battelle Memorial Institute, Battelle Press, USA, Ohio, Columbus; 2002.
- [6] Gidarakos E., Schachtebeck G.: In-situ-Sanierung von Mineralölschäden durch Bioventing, Bioslurping und Air-Sparging - *TERRATECH* 3/96, S. 50-54.
- [7] Hein G., Hutzler N., Gierke, J. et al. (1997): Field-Scale Model for Air Sparging Performance Assessment and Design. - U.S. Department of Energy with Michigan Technological University, Houghton, MI.
- [8] Held, T. (2014): In-situ-Verfahren zur Boden- und Grundwassersanierung: Planung, Verfahren und Sanierungskontrolle, John Wiley & Sons (2014), ISBN 978-3-527-33389-9, 436 Seiten.
- [9] Hessisches Landesamt für Naturschutz, Umwelt und Geologie (2018): „Arbeitshilfe zur Sanierung von Grundwasserverunreinigungen“, Handbuch Altlasten, Band 3, Teil 7, ISBN 978-3-89026-822-4, 105 Seiten.
- [10] Hiester, U. (2009): Technologieentwicklung zur In-situ-Sanierung der ungesättigten Bodenzone mit festen Wärmequellen. Promotionsschrift, Institut für Wasserbau, Eigenverlag (Publ.), Mitteilungsheft des Instituts für Wasserbau, 9.2009 (178) Universität Stuttgart, ISBN: 978-3-933761-82-8.
- [11] U. Hiester, M. Müller, H.-P. Koschitzky, O. Trötschler, U. Roland, F. Holzer (2012): Leitfaden: Thermische in situ Sanierungsverfahren (TISS) zur Entfernung von Schadensherden aus Boden und Grundwasser. Gefördert vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (bmbf) und vom Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung GmbH (UFZ). August 2012.
- [12] Hiester, U. und Bieber, L. (2017): Dominierende Prozesse bei der thermischen In-situ-Sanierung (TISS) kontaminierter Geringleiter. *Grundwasser – Zeitschrift der Fachsektion Hydrogeologie* (2017) 22: 185-195, ISSN 1430-483X print. DOI:10.1007/s00767-017-0366-z.
- [13] Uwe Hiester, Laura Bieber, Martina Müller (2018): Energiesparende, nachhaltige Grundwassersanierung - Erfahrungen mit einer thermischen In-situ-Sanierung (TISS). *altlasten spektrum* 27 (2018), 3, ISSN 0942-3818, S. 108-114.

- [14] Hiester, U., Jungk, V., Canzler, W., Poetke, D., Ulrich, K.-U. (2022): Umweltverträgliche Nutzung geothermischer Wärmespeicher - Ermittlung und Bewertung thermischer Veränderungen im Grundwasser. [Hrsg.] Umweltbundesamt Berlin, Texte 113/2022, Ressortforschungsplan des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz, Forschungskennzahl FKZ 3717 43 249 0, FB000823. Umweltbundesamt: Fachgebiete: FG II 2.1 – Übergreifende Angelegenheiten Wasser & Boden, FG V 1.3 – Erneuerbare Energien, Dezember 2021, ISSN 1862-4804. DOI: 10.13140/RG.2.2.23987.30248
- [15] Hiester, U. & Bieber, L. (2023): Energiesparende, nachhaltige Grundwassersanierung am Petroleumhafen Hamburg mit Dampf-Luft-Injektion (TUBA-Verfahren). Artikel 5716.01 in: Franzius / Altenbockum / Gerhold (Hrsg.): Handbuch Altlastensanierung und Flächenmanagement, Rehm Verlag, München, 95. Aktualisierung, Stand September 2023. ISBN: 978-3-8073-2781-5.
- [16] Helmig, R. (1997): Multiphase Flow and Transport Processes in the Subsurface: A Contribution to the Modeling of Hydrosystems, Springer Berlin Heidelberg (1997), ISBN 3-540-62703-0, 978-3-642-64545-7, 367 Seiten.
- [17] Karg, F. (2006): TERQ – Toxikologische Expositionsrisiko-Quantifizierung zur standortspezifischen Gefährdungsbewertung und Sanierungszielermittlung unter Berücksichtigung der Vielstoffbetrachtung – Erfahrungen zur TERQ-Durchführung am Beispiel eines Standortes der RAG-Rütgers Chemicals in Oberhausen. Symposiumskript ITVA Berlin, 28.04.2006.
- [18] Karg, F. (2006): Risk Assessment Methodology for Military Pollutants & toxic Metabolites on future Residential Sites and Definition of Remediation Goals. Conference Book International Conference on Environmental Epidemiology & Exposure, ISEE/ISEA Paris, 04/09/2006.
- [19] Karg, F., Robin-Vigneron, L., Hintzen U., Olk, C. (2006): TERQ (Toxikologische Expositionsrisiko-Quantifizierung): Die standortspezifische Gefährdungsbewertung und Sanierungszieldefinition unter Berücksichtigung der Vielstoffbetrachtung – Beispiel: Standort RAG-Rütgers Chemicals in Oberhausen: - Altlastenspektrum: 6/2006, S. 331-343. <https://altlastendigital.de/ce/terq-toxikologische-expositionsrisiko-quantifizierung-die-standortspezifische-gefaehrdungsbewertung-und-sanierungszieldefinition-unter-beruecksichtigung-der-vielstoffbetrachtung/detail.html>
- [20] Karg, F., Hintzen, U., Portune, T. & Olk, C. (2006): Feldtesterfahrungen zur Anwendung der DNBA (Dynamisierte Natural Bio-Attenuation) und Prozessoptimierung: Standort Rütgers Chemicals AG, Hanau. Tagungshandbuch Symposium In-Situ-Sanierungen DECHEMA / Frankfurt: 21.11.2006.
- [21] Karg, F. Hintzen, U., Portune, T. & Domalski, R. (2007): Feldtesterfahrungen zur Anwendung der DNBA (Dynamisierte Natural Bio-Attenuation) zur Prozessoptimierung: Standort RÜTGERS Chemicals AG, Hanau: - Altlastenspektrum: 2/2007, S. 61-67. <https://altlastendigital.de/ce/feldtesterfahrungen-zur-anwendung-der-dnba-dynamisierte-natural-bio-attenuation-zur-prozessoptimierung-standort-ruetgers-chemicals-ag-hanau/detail.html>
- [22] Karg, F., Hintzen, U., Portune, T. & Domalski, R. (2007): Groundwater treatment by dynamized natural bio-attenuation (DNBA): Case study HAH, BTEX, PAH. 3rd European Conference on Natural Attenuation and In-situ Remediation. DECHEMA, Frankfurt 21.11.2007. Kongressbuch.
- [23] Karg, F., Grauf, T., Hintzen, U. (2010): Machbarkeitsstrategie zu ENA- bzw. DNBA- Sanierungskonzepten für einen komplexen LCKW-kontaminierten Standort (Feasibility

- Strategy for ENA & DNBA-Remediation Concepts concerning a Site contaminated with Chlorinated Hydrocarbons). Minutes of Isotopen im Grundwasserschutz / Anwendung und Forschung – Isotopes in Groundwater Management – Advances in Science and Implementation. HelmholtzZentrum München, 20-21.10.2010.
- [24] Karg, F. (2011): Mikrobiologische Sanierung TCE- und PCE-kontaminierter Grundwasserleiter durch DNBA (Dynamisierte Natural Bio-Attenuation). Vortragsbuch: Umgang mit Risiken von CKW-Altlasten. ChloroNet Solothurn / Schweiz 03.11.2011.
- [25] Karg, F., Hintzen, U., Schoendorf, T., Biester, H; Villalobos, M-J. (2012): In-situ Stabilization of Mercury contaminated Soils & Sediments and passive Groundwater Remediation with Effective Low-Cost Alloy Materials: Case Studies in Germany and France. Minutes of Congress & <http://www.nicole.org/uploadedfiles/nicole-brussels-december2012.pdf>. Technical Meeting NICOLE on 4 December 2012 at Solvay in Brussels.
- [26] Karg, F. (2013): Health risk-based Dioxin & POP Management in EC: European Community: PCDD/F- & PCB-Contaminations & Methodology for site investigations, Health Risk Assessment and ISCO & DNBA Remediation. Sharing Lessons-Learned - Dioxin/POPs Pollution Assessment and Remediation in Vietnam. Minutes of Congress - Da Nang, Vietnam, December 1-4, 2013.
- [27] Karg, F., Grauf, T. & Hintzen, U. (2016): Practical example of a microbiological and chemical in situ remediation of a TCE, PCE, DCE, VC & CrVI contamination in a fractured aquifer (DNBA). [Exemple concret de la décontamination microbiologique et chimique in situ d'un aquifère karstique contenant des TCE, PCE, DCE, VC et CrVI (BAND)]. Intersol Congress Minutes, Lille 17.03.2016.
- [28] Karg, F. (2020): Case Studies in Normandy and Central France of DNBA for Groundwater Remediation: Polar & chlorinated solvents (TCE, PCE, DCE, VC, BTEX, etc.) & best Cost-effectiveness (Dynamized Natural Bio-Attenuation). Etudes de cas en Normandie et Centre de la France de l'application de la BAND pour la dépollution des eaux souterraines : Solvants polaires & chlorés (TCE, PCE, DCE, VC, BTEX, etc.) et meilleurs coûts-avantages (BAND : Bio-Atténuation Naturelle Dynamisée). Minutes of Congress INTERSOL 06/2020.
- [29] Karg, F., Hintzen, U., Robin-Vigneron, L. & Mostersteg (2022): Einzelfallprüfung bei PFAS: Anwendung der neuen Mantelverordnung für verhältnismässige und kostenoptimierte Sanierungen bei Vielstoffbelastung. Altlastenspektrum 06/2022, ITVA Dezember 2022. <https://altlastendigital.de/ce/einzelfallpruefung-bei-pfas/detail.html>
- [30] Karg, F. & Hintzen, U. (2023): PFAS sicher und preiswert sanieren (Site specific Risk Assessment and Cost effective Site Remediation of PFAS): Umweltmagazin 01/2023. VDI: Verein Deutscher Ingenieure. S. 46 – 49.
- [31] Karg, F. (2023) : Traitements in-situ des Polluants émergents dans les Sols et les Eaux souterraines - Exemples des aménagements des sites polluées par des HET-NSO & PFAS. Minutes of Congress INTERSOL Lille / France: 29th to 31st of March 2023.
- [32] Karg, F. & Hüttmann, S. (2023): Sustainable In-situ Treatments of PFAS in contaminated Soil and Groundwater, Washing with Protein Bio-polymers. Introduction. Minutes of International Congress PFAS – Management of Environmental and Health Risks". Paris, June 13-14, 2023.
- <https://hpc.ag/wp-content/uploads/PFAS-abstract-Sensatec-Huettmann-KARG-E.pdf>
- <https://hpc.ag/wp-content/uploads/PFAS-abstract-Sensatec-Huettmann-KARG-F.pdf>

- [33] Kirchholtes, H. J. und Ufrecht, W. (Hrg. (2015): Chlorierte Kohlenwasserstoffe im Grundwasser. Springer Vieweg, Wiesbaden, ISBN 978-3-658-09248-1 DOI 10.1007-978-3-658-09249-8.
- [34] LABO, Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft Bodenschutz (2015): Ständiger Ausschuss Altlasten – ALA, Ad-hoc Unterausschuss „Natürliche Schadstoffminderung“: Berücksichtigung der natürlichen Schadstoffminderung bei der Altlastenbearbeitung. Positionspapier Stand 15.09.2015.
- [35] LABO, Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft Bodenschutz (2020): Arbeitshilfe zur Expositionsabschätzung in der Detailuntersuchung, Wirkungspfad Boden-Mensch, Wirkungspfad Boden-Nutzpflanze-Mensch. Ständiger Ausschuss „Altlasten“ (ALA). 05. Juni 2020.
- [36] LAWA, LABO Länderarbeitsgemeinschaft Wasser, Länderarbeitsgemeinschaft Boden (2006): Erarbeitet vom gemeinsamen Unterausschuss „Gefahrenabwehr bei Grundwasser- verunreinigungen und Grundwassergefährdungen“ der Ständigen Ausschüsse „Grundwasser und Wasserversorgung“ der LAWA und „Altlasten“ der LABO: „Grundsätze des nachsorgenden Grundwasserschutzes bei punktuellen Schadstoffquellen“. Mainz, Mai 2006.
- [37] LAWA Länderarbeitsgemeinschaft Wasser (2016): Erarbeitet vom Unterausschuss „Aktualisierung der Geringfügigkeitsschwellenwerte“ des Ständigen Ausschusses „Grundwasser und Wasserversorgung“ der LAWA: „Ableitung von Geringfügigkeitsschwellenwerten für das Grundwasser“. Stuttgart, Januar 2017.
- [38] LUBW, Landesanstalt für Umwelt Baden-Württemberg (2020): Ermittlung fachtechnischer Grundlagen zur Vorbereitung der Verhältnismäßigkeitsprüfung von langlaufenden Pump-and-Treat-Maßnahmen. ISSN 1437-0158, ISBN 978-3-88251-405-6, Stand März 2020.
- [39] Portune, T. & Karg, F. (2011): Dynamisierung eines aeroben und anaeroben mikrobiellen Abbaus von im Grundwasser gelösten Teerölinhaltsstoffen durch Bio-Air Sparging an einem teerölverarbeitenden Standort in Hanau (Enhancing of aerobic and anaerobic microbial degradation of dissolved tar oil ingredients in the groundwater by bio-air sparging on a tar oil processing site in Hanau): Altlastenspektrum 6/2011, S. 251-256. <https://altlastendigital.de/ce/dynamisierung-eines-aeroben-und-anaeroben-mikrobiellen-abbaus-von-im-grundwasser-geloesten-teeroelinhaltsstoffen-durch-bio-air-sparging-an-einem-teerolverarbeitenden-standort-in-hanau/detail.html>
- [40] J. Weindl, M. Altenbockum, U. Dannwolf, H.-P. Koschitzky, K. Schelle, V. Zeisberger (2018): Arbeitshilfe H1-16 „Verhältnismäßigkeitsprüfung bei der Sanierungsuntersuchung“. ITVA-Fachausschuss H1 „Technologien und Verfahren“, Ingenieurtechnischer Verband für Altlastenmanagement und Flächenrecycling e.V. (ITVA), November 2018.
- [41] Widmann, S., Karg, F., Hintzen, U. & Portune, T. (2008). Fallbeispiel “PAK-Schadensfall”. In HLUG (Ed.): Altlasten Annual 2007 (pp.153-163). Wiesbaden: HLUG.
- [42] Wisotzky, F., Cremer, N., Lenk, S. (2018): Angewandte Grundwasserchemie, Hydrogeologie und hydrogeochemische Modellierung: Grundlagen, Anwendungen und Problemlösungen. Springer Spektrum 2. Auflage (2018), ISBN 978-3-662-55557-6, 677 Seiten.
- [43] Wolf, M. und Hiester, U. (2018): Verfahrensumstellung nach 25 Jahren BLA und P&T - was bringt jetzt noch eine thermische Sanierung? in: Tagungsunterlagen "Altlasten und Schadensfälle - Neue Entwicklungen". Hessisches Landesamt für Naturschutz, Umwelt und Geologie (HLNUG), Idstein, 05.-06.06.2018, ISBN: 978-3-89531-877-1, pp. 43-51.

## 11 Verfahrenblätter zur In-situ-Quellensanierung

Die potenziellen Anwendbarkeiten der in den verschiedenen Verfahrenslättern beschriebenen In-situ-Sanierungstechnologien sind in der Tabelle des Kapitels 5 angegeben.

### 11.1. Physikalische Verfahren

| <b>Kapitel/Verfahrenslatt-Nr.</b>  | <b><u>Boden</u></b>                 | <b><u>Grundwasser</u></b>           |
|--|-------------------------------------|-------------------------------------|
| 11.1.1 Air-Sparging (In-situ-Strippen im Aquifer)  | <input type="checkbox"/>            | <input checked="" type="checkbox"/> |
| 11.1.2 MPE: Mehr-Phasen-Extraktion (MPE) von Bodenluft, Leichtphase, Grundwasser                                   | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> |
| 11.1.3 Dampf-Luft-Injektion im rolligen Boden o. Kluftgestein (konvektiver Wärmeeintrag, z.B. TUBA-Verfahren, DLI) | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> |
| 11.1.4 Feste Wärmequellen im bindigen Boden o. Kluftgestein (konduktiver Wärmeeintrag, z.B. THERIS-Verfahren)      | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> |
| 11.1.5 In-situ-Waschung in der ungesättigten Zone  | <input checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/>            |
| <b>11.2. Biologische Verfahren</b>   |                                     |                                     |
| 11.2.1 Mikrobiologische In-situ-Verfahren  | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> |
| <b>11.3. Chemische Verfahren</b>   |                                     |                                     |
| 11.3.1 In-situ-Immobilisierung (u.a. Fällung, Sorptionsmittel)   | <input type="checkbox"/>            | <input checked="" type="checkbox"/> |
| 11.3.2 ISCO: In-situ-chemische-Oxidation (ISCO) (vornehmlich Schadstoffeliminierung)                               | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> |
| 11.3.3 ISCR: In-situ-chemische-Reduktion (ISCR) (vorn. Schadstoffimmobilisierung, z.B. nullwertiges Eisen)         | <input type="checkbox"/>            | <input checked="" type="checkbox"/> |

Anmerkung:

In-situ-Mobilisierungen sind Teilprozesse verschiedener in-situ-Quellensanierungsverfahren. Die Mobilisierungsprozesse werden bewusst genutzt, um die Effizienz der in-situ-Quellensanierungsverfahren zu steigern. Eine Sanierung erfolgt jedoch ausschließlich durch eine Zerstörung der Schadstoffmoleküle oder durch Austrag der sanierungsrelevanten Schadstoffe.

Anlagen zu 11: Seite 46 bis 86

## 11.1.1 Air-Sparging (AS)

Bei einem **Air-Sparging (AS)** werden organische Schadstoffe durch Injektion von (ölfreier) Druckluft aus einem Grundwasserleiter in die ungesättigte Zone ausgetrieben. Die Schadstoffe werden dann über eine Bodenluftabsaugung kontrolliert abgesaugt und gereinigt (alternativ als in-situ-Strippen bezeichnet). Eine Abreinigung der abgesaugten Schadstoffe erfolgt z.B. mittels Luftaktivkohlefilter oder Lösemittelrückgewinnung oder katalytischer Oxidation. Beim Biosparging (Spezialfall eines AS) steht hingegen ein aerober mikrobiologischer Schadstoffabbau im Fokus. Beim Biosparging entfallen die verfahrenstechnische Komponenten BLA / MPE daher zu Gunsten einer erheblich längeren Sanierungszeit gegenüber AS.

### Kreuzmatrix **SCHADSTOFF(-gruppe) (NAPL, gelöst, Feststoff) – QUELLEN-TYP:**

| Medium   | Schadstoffe / Schadstoffgruppe  | Schadstoffquellen-Typen          |  |  |   |  |     |     |
|--|---|----------------------------------|--|--|---|--|-----|-----|
|  |   | A-1                              | A-2  | A-3  | B   | C-1  | C-2 | C-3 |
|  |   | NAPL                             |  |  | ungesättigte und gesättigte Zone: gelöste Schadstoffe u. gut wasserlösliche Phase | feste Schadstoffe                                    |     |     |
| NAPL nur in der ungesättigten Zone                   | LNAPL bis in die gesättigte Zone  | DNAPL bis in die gesättigte Zone | mit wasserlös. Anteilen: lösl. Metalle(oxide), Salze, Pestizide u.a. | Transport als Suspension (z.B. im Kluft-GW-Leiter) |   | wasserlös. Anteil u. flücht. Transformationsprodukte |     |     |
| NAPL (Flüssigphasen)                                 | 1 Organische Leichtphase (LNAPL) inkl. Suspension: BTEX, KW                                     | + bis ++                         | ++   |  |   |  |     |     |
|  | 2 Organische Schwerphase (DNAPL) inkl. Suspension: a) LHKW, Naphthalin b) PAK, Teeröl (flüssig) | a) + bis ++<br>b) -              |  | a) ++<br>b) -                                      |   |  |     |     |
|  | 3 Mineralische Reinphase: z.B. Quecksilber  | -                                |  | -  |   |  |     |     |
| In der Bodenluft<br>GELÖSTE/flüchtige<br>Schadstoffe | 4a Organische Schadstoffe (BTEX, MKW, usw.)   |                                  |  |  | +++   |  |     |     |
|  | 4b Halogen-organische Schadstoffe (z.B. LHKW)   |                                  |  |  | ++  |  |     |     |
|  | 4c PFAS-FTOH  |                                  |  |  | Einzelfall  |  |     |     |
|  | 5 Anorganische Schadstoffe (Quecksilber, Arsin, usw.)   |                                  |  |  | -   |  |     |     |
| im Wasser<br>GELÖSTES Schadst.                       | 6 Organ. Schadstoffe (Poren-, Schicht-, Grundwasser) alle                                       |                                  |  |  | ++ bis +++  |  |     |     |
|  | 7 PFAS (Poren-, Schicht-, Grundwasser)  |                                  |  |  | -   |  |     |     |
|  | 8 Mineral. Schadstoffe (Poren-, Schicht-, Grundwasser)  |                                  |  |  | -   |  |     |     |
| FESTstoffe,<br>feststoffartige Schadst.              | 9 Mineralische Feststoffe, Cyanide, Zink, Zinn, Blei, Schwermetalle                             |                                  |  |  |   | -  | -   | -   |
|  | 10 Organische Feststoffe: fester Teer, Polymer-Ausschussabfälle                                 |                                  |  |  |   | -  | -   | -   |
|  | 11 Stark sorbierte Organika (z.B. PFAS, PAK, PCB, PCDD/F)                                       |                                  |  |  |   | -  |     | -   |

**Erläuterung:** DEFINITION: PHASE (NAPL) = flüssig bei 10-15°C

Schematische Anwendungsübersicht zur Erstbewertung - ersetzt keine Einzelfallprüfung!

**Bewertung:**

|  |   |
|--|---|
|  | gute Anwendungsmöglichkeiten bei bestimmten Randbedingungen               |
|  | prinzipiell für alle oder einzelne Schadstoffe dieser Stoffgruppe möglich |
|  | keine Anwendung möglich   |
|  | keine Fallüberschneidung / Anwendung                                      |

|     |                       |
|-----|-----------------------|
| +++ | : sehr gut geeignet   |
| ++  | : gut geeignet i.d.R. |
| +   | : bedingt geeignet    |
| -   | : nicht geeignet      |

### **Besondere Hinweise (Schadstoffgruppe – Quellentyp):**

- **1\_A-1, 2a\_A-1:**  
in Kombination mit einer Bodenluftabsaugung (BLA) oder Mehrphasenextraktion (MPE)
- **1\_A-2, 2a\_A-3:**  
in Kombination mit einer Mehrphasenextraktion (MPE)
- **4c\_B:**  
Fluortelomeralkohole FTOH: sind bei dieser Bewertung noch nicht berücksichtigt (Oktober 2024)

### **Verfahrensdetails:**

Die Air-Sparging-Technologie besteht in einer kombinierten In-situ-Sanierung der ungesättigten und gesättigten Bodenzone nach folgendem Verfahrensprinzip:

- Impulsartiges Einblasen von Druckluft an der Basis der Grundwasserkontamination bzw. des Grundwasserleiters, also Intervall-Injektionsbetrieb
- In-situ-Strippen leichtflüchtiger Schadstoffe (LCKW, BTEX) bei der lateralen Ausbreitung und beim vertikalen Aufsteigen der Luftbläschen im grundwassererfüllten Porenraum
- Sofortiger Stop des anaeroben Abbaus von LCKW zu kritischen Metaboliten wie Vinylchlorid
- Gleichzeitige Anregung des mikrobiologischen Abbaus von BTEX und MKW durch Aerobisierung
- Übergang der Strippluft in die ungesättigte Bodenzone

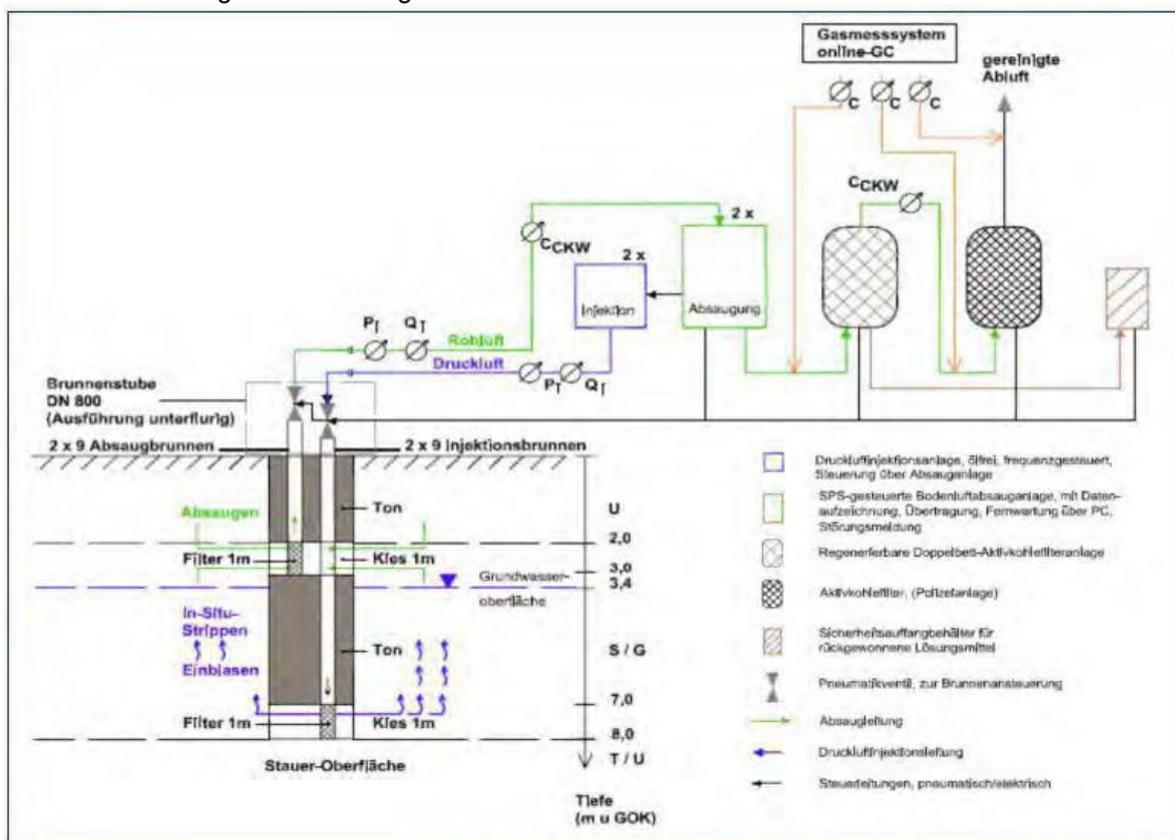
## 11.1.1 Air-Sparging (AS)

- Gleichzeitige Bodenluftabsaugung der ausgestrippten und ggf. der in der ungesättigten Bodenzone vorhandenen leichtflüchtigen Schadstoffe (Synergieeffekt), bei deutlich höheren Absaug- als Einblasmengen
- Übertägige Abreinigung der kontaminierten Rohluft (z.B. mittels Luftaktivkohlefilter, Lösemittelrückgewinnung oder katalytische Nachverbrennung), bei Bedarf mit Gewährleistung des Explosionsschutzes
- Komplette Anlagensteuerung mit Prozessvisualisierung und Remote Control.

Durch die Möglichkeit, jeden einzelnen Airsparging-Brunnen eines flächendeckenden Sanierungssystems mit differenzierten Injektionshorizonten gezielt anzusteuern, wird ein natürlicher physikalischer und aerob-biologischer no-wall-Reaktor im Untergrund etabliert.

Dabei können verschiedene Sanierungszonen nach ihren geologischen, hydrogeologischen und schadstoffrelevanten Gegebenheiten gezielt angesteuert werden, um die optimale Luftmengenversorgung zum In-situ-Strippen der Schadstoffe zu erreichen.

Auf diese Weise ist die bestmögliche Aktivierung jeder einzelnen Zone und die Erfassung des gesamten Schadensgebietes sichergestellt.

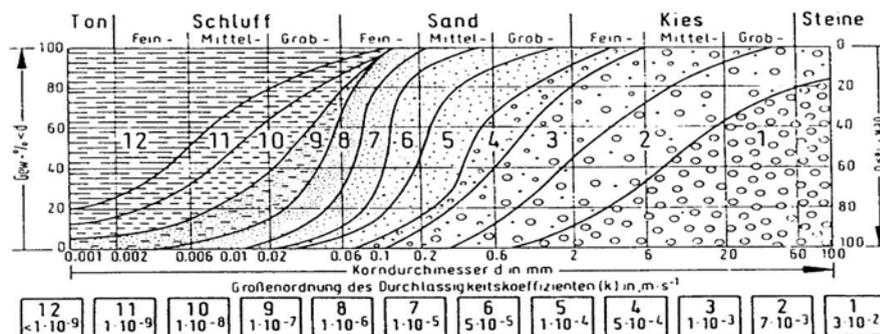


Schematische Darstellung zur Airsparging-Technologie. Quelle: CDM Smith

## 11.1.1 Air-Sparging (AS)

### Anwendungsbereiche:

- gut bis mäßig gut durchlässiger Boden (Sand bis schluffiger Feinsand)



*Quelle:* Abhängigkeit des Durchlässigkeitsbeiwerts ( $k_r$ ) von der Korngrößenverteilung von Lockergesteinen nach Krapp [Prinz, H.: Abriß der Ingenieurgeologie, 1997. ISBN: 3-432-92333-3]

UZ:

GZ:

*Quelle:* ITVA H1

Bei heterogenem Untergrund mit teilweise gering durchlässigen Schichten ist AS limitiert. Bei einer Kombination mit thermischen in-situ Sanierungsverfahren werden die Limitierungen durch Heterogenitäten und geringe Durchlässigkeiten überwunden.

### Machbarkeitsstudien:

Die Durchführung von Machbarkeitsstudien in Form von Pilotversuchen wird empfohlen, um Dimensionierung, Reichweite und Verlaufsprognose zu untersetzen.

### Essenzielle Verfahrens- und Messtechnik:

- Air-Sparging-Brunnen (bestehend aus Injektions- und Absaugbrunnen),
- Einblas- und Absaugleitungen,
- Druckluftinjektor, Bodenluftabsauggebläse, (bei Bedarf) Ex-Schutzüberwachung,
- automatischer Wasserabscheider,
- Rohluftabreinigung (Luft-Aktivkohlefilter, KatOx-Anlage oder Lösemittelrückgewinnungsanlage),
- Datenfernübertragung / Remote Control, SPS-Steuerung,
- empfohlen: Prozessvisualisierung, online-GC oder Gasphotometer

### Grundanforderungen:

- Variabel steuerbarer Intervallbetrieb mit mehr Bodenluftabsaugung als Druckluftinjektion

### Endprodukte – Reinigung/Entsorgung:

- Abwasser (BE, Sanitär- und S/W-Anlage) extern entsorgen
- schadstoffhaltige Abluft vor Ort reinigen
- Kondenswasser vor Ort reinigen und ableiten
- zurückgewonnene Lösemittel abscheiden, sammeln und extern entsorgen

### Besonderheiten:

Bei KW- oder BTEX-Schäden auch als Biosparging ohne Absaugung möglich.  
Bei kombinierten LCKW-BTEX-Schäden cometabolische Bioabbauwirkung möglich.

### Vorteile:

- aus homogenen Grundwasserleitern: gute Mobilisierung u. Entfernung leichtflüchtiger Schadstoffe
- in der Praxis bewährt und gut zur Hauptentfrachtung
- modularer Anlagenbau, moderater Aufwand für den Anlagenbetrieb, flexible Anlagensteuerung
- mit entsprechender Verkürzung der Sanierungszeiten (ggü. z.B. Pump&Treat)
- gut testbar im kleinskaligen Feldmaßstab
- gute Austragsbilanzierung zur Plausibilisierung des Sanierungsfortschritts
- Schräginjektionsbohrungen möglich
- auch im Gebäudebestand anwendbar

### Nachteile:

- Voraussetzungen sind relativ homogene, hydraulische gut leitfähige Grundwasserleiter und eine hinreichende pneumatische Durchlässigkeit der ungesättigten Bodenzone für die begleitende Bodenluftabsaugung

## 11.1.1 Air-Sparging (AS)

- nur sehr eingeschränkt in gespannten GWL anwendbar (mit Kiesfenstern)
- problematisch bei Schadstoffphasen (Problemlösung: Kombibetrieb mit MPE, TUBA o. THERIS)
- problematisch bei niedrigen Restbelastungen im Grundwasser (meist kein Stand-Alone-Verfahren bei LCKW. Lösung: Treatment Train).

### **Mögliche Verfahrenskombinationen:**

- Je nach Fallkonstellation kann eine hydraulische Abstomsicherung notwendig / sinnvoll sein.
- Bei heterogenem Untergrund und Schadstoffbelastungen in bindigen Schichten bietet sich eine Kombination mit thermischen in-situ Verfahren an.
- Restbelastungen können oft mit ISCO endsaniert werden, wenn sie für ISCO zugänglich sind.

### **Projektbeispiele (Auswahl):**

- [1] **Menschner, Munkelt:** Innovative kombinierte In-Situ-Sanierung der gesättigten und der ungesättigten Bodenzone mittels Air-Sparging-Technologie. Veröff. Vortrag XVI. Sächsisches Altlastenkolloquium, Dresden, 3./4.11.2005
- [2] **D. Krüger, K. Menschner:** Nachhaltige Sanierung eines Kontaminationsherdes an einer Deponie durch Bodenaustausch und nachgeschaltete In-situ-Sanierung mittels Air-Sparging-Technologie. - Müll&Abfall 8-08, S. 410 ff.
- [3] **Menschner, Heise, Funk:** In-situ-Sanierung eines massiven Ölschadens im Tanklager Magdeburg zum attraktiven Festpreis. - Veröff. Vortrag XXI. Sächsisches Altlastenkolloquium, Dresden, 2./3.11.2010



Airsparging Anlagentechnik. Quelle: CDM Smith



Beispiel Airsparging Sanierungsfeld. Quelle: CDM Smith

## 11.1.2 Mehr-Phasen-Extraktion (MPE)

Bei einer **Mehr-Phasen-Extraktion (MPE)** werden verschiedene Fluide (Gas und Flüssigkeiten) aus einem Brunnen mittels hohen Unterdrucks entnommen. Die Schadstoffe aus der entnommene Bodenluft und dem entnommenen Wasser werden z.B. mittels Aktivkohlefilter, Phasenabscheider oder katalytischer Oxidation gereinigt.

### **Kreuzmatrix SCHADSTOFF(-gruppe) (NAPL, gelöst, Feststoff) – QUELLEN-TYP:**

| Medium  | Schadstoffe / Schadstoffgruppe  | Schadstoffquellen-Typen            |                                  |                                  |                   |  |  |  |     |
|---|---|------------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|-------------------|--|--|--|-----|
|   |   | A-1                                | A-2                              |                                  | A-3               | B<br>ungesättigte und gesättigte Zone: gelöste Schadstoffe u. gut wasserlösliche Phase | C-1  | C-2  | C-3 |
|   |   | NAPL                               |                                  |                                  | feste Schadstoffe |  |  |  |     |
|   |   | NAPL nur in der ungesättigten Zone | LNAPL bis in die gesättigte Zone | DNAPL bis in die gesättigte Zone |                   | mit wasserlös. Anteilen: lösl. Metalle(oxide), Salze, Pestizide u.a.                   | Transport als Suspension (z.B. im Kluft-GW-Leiter) | wasserlös. Anteil u. flücht. Transformationsprodukte |     |
| NAPL (Flüssigphasen)                            | 1 Organische Leichtphase (LNAPL) inkl. Suspension: BTEX, KW                                     | ++                                 | ++                               |                                  |                   |  |  |  |     |
|   | 2 Organische Schwerphase (DNAPL) inkl. Suspension: a) LHKW, Naphthalin b) PAK, Teeröl (flüssig) | ++                                 |                                  | ++                               |                   |  |  |  |     |
|   | 3 Mineralische Reinphase: z.B. Quecksilber  | ++                                 |                                  | ++                               |                   |  |  |  |     |
| in der Bodenluft: GELÖSTE flüchtige Schadstoffe | 4a Organische Schadstoffe (BTEX, MKW, usw.)   |                                    |                                  |                                  | +++               |  |  |  |     |
|   | 4b Halogen-organische Schadstoffe (z.B. LHKW)   |                                    |                                  |                                  | +++               |  |  |  |     |
|   | 4c PFAS-FTOH  |                                    |                                  |                                  | (+)               |  |  |  |     |
|   | 5 Anorganische Schadstoffe (Quecksilber, Arsin, usw.)   |                                    |                                  |                                  | +++               |  |  |  |     |
|   | 6 Organ. Schadstoffe (Poren-, Schicht-, Grundwasser) alle                                       |                                    |                                  |                                  | +++               |  |  |  |     |
| im Wasser: GELÖSTE Schadst.                     | 7 PFAS (Poren-, Schicht-, Grundwasser)  |                                    |                                  |                                  | ++                |  |  |  |     |
|   | 8 Mineral. Schadstoffe (Poren-, Schicht-, Grundwasser)  |                                    |                                  |                                  | +++               |  |  |  |     |
| FESTSTOFFE, feststoffartige Schadst.            | 9 Mineralische Feststoffe, Cyanide, Zink, Zinn, Blei, Schwermetalle                             |                                    |                                  |                                  |                   | -  | -  | -  |     |
|   | 10 Organische Feststoffe: fester Teer, Polymer-Ausschussabfälle                                 |                                    |                                  |                                  |                   | -  | -  | -  |     |
|   | 11 Stark sorbierte Organika (z.B. PFAS, PAK, PCB, PCDD/F)                                       |                                    |                                  |                                  |                   | -  |  | -  |     |

#### Erläuterung:

**DEFINITION: PHASE (NAPL) = flüssig bei 10-15°C**

Schematische Anwendungsübersicht zur Erstbewertung - ersetzt keine Einzelfallprüfung!

#### Bewertung:

|  |   |
|--|---|
|  | gute Anwendungsmöglichkeiten bei bestimmten Randbedingungen               |
|  | prinzipiell für alle oder einzelne Schadstoffe dieser Stoffgruppe möglich |
|  | keine Anwendung möglich   |
|  | keine Fallüberschneidung / Anwendung                                      |

+++ : sehr gut geeignet  
 ++ : gut geeignet i.d.R.  
 + : bedingt geeignet  
 - : nicht geeignet

### **Besondere Hinweise (Schadstoffgruppe – Quellentyp):**

- **3-A-3: Mineralische Reinphase**  
erfordert spezielle Sicherheitsanforderungen
- **4c-B: PFAS-PFOS**  
bislang erfolgte dafür noch keine praktische Anwendung

### **Verfahrensdetails:**

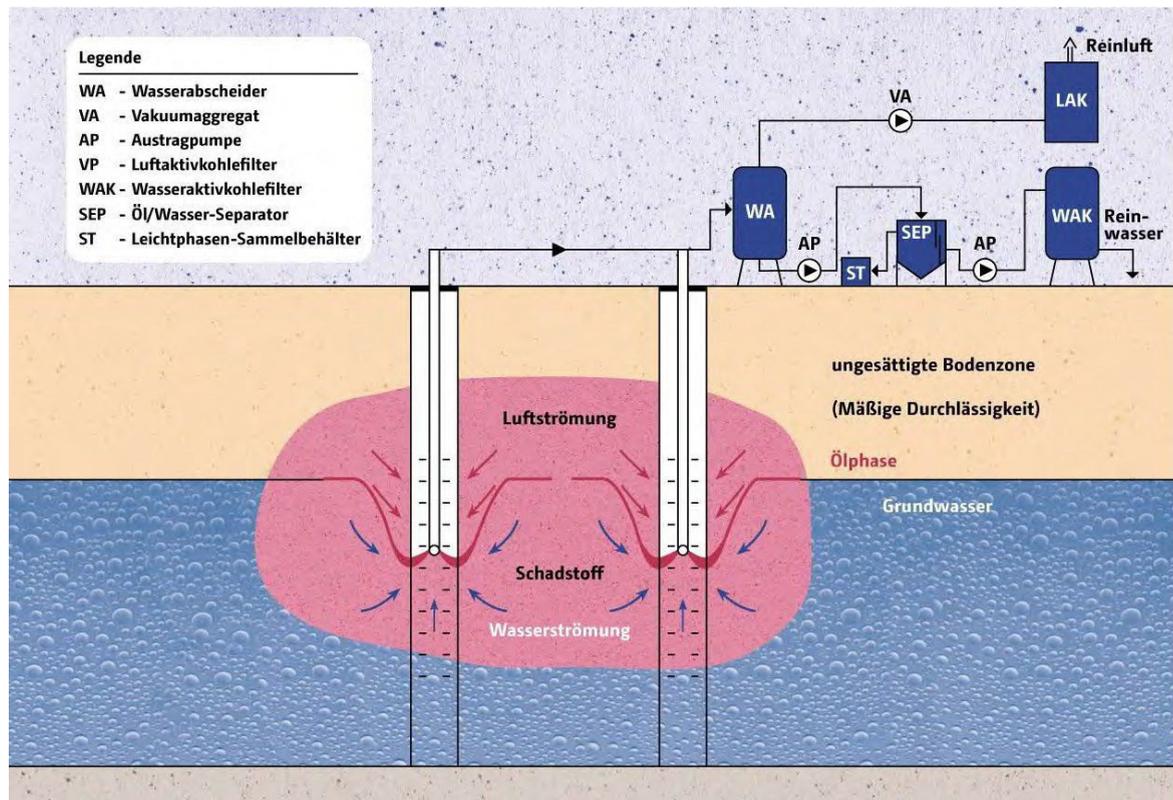
Das physikalische Prinzip des Unterdruckes, welcher in der ungesättigten und gesättigten Zone angelegt wird, bewirkt sowohl ein Absaugen von Bodenluft als auch ein Abschlürfen von Grundwasser und - sofern vorhanden - ein Abschlürfen von aufschwimmender Leichtphase.

In der Regel wird in einem Brunnen eine dünne Sauglanze installiert, die unterhalb der Grundwasseroberfläche endet. Ein Vakuumpaggregat erzeugt einen hohen Unterdruck, so dass nach dem Strohhalm-Prinzip eine Mischung aus Grundwasser, Bodenluft u/o aufschwimmender Leichtphase abgesaugt wird (sog. schlürfende Absaugung). Innerhalb der MPE-Anlage werden die verschiedenen Fluide in einem Flüssigkeitsabscheider wieder getrennt. Das Schlürfen führt zu einer Absenkung des Grundwasserspiegels in dem Brunnen und kann u.U. geringmächtige Aquifere vollständig trockenlegen. Ein MPE-Absaugsystem saugt meist mehrere Brunnen gleichzeitig ab.

Unter Dual Phase Extraction (DPE, Zwei-Phasen-Extraktion) wird die Absaugung bzw. Entnahme von nur zwei verschiedenen Fluiden aus einem Brunnen verstanden. Darunter kann beispielsweise die Förderung von Grundwasser bei gleichzeitiger Absaugung der Bodenluft oder die Förderung von Grundwasser bei gleichzeitiger Förderung aufschwimmender Phase verstanden werden.

## 11.1.2 Mehr-Phasen-Extraktion (MPE)

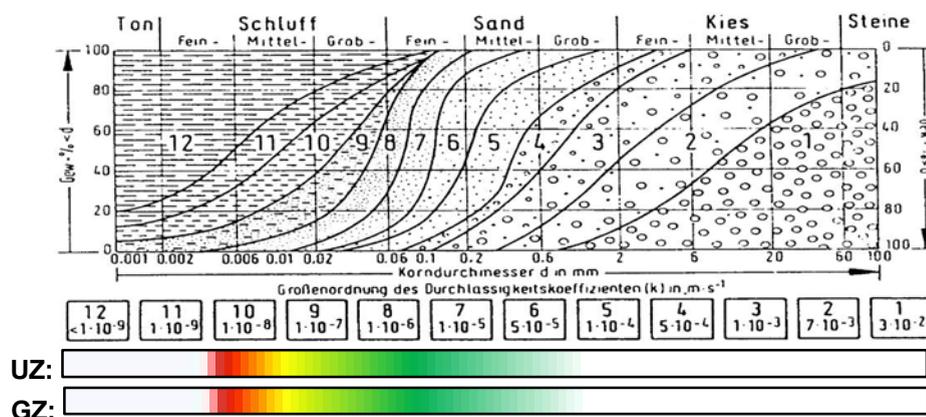
Je nach Art (Gasphase, Flüssigphase, Leichtphase) der entnommenen Phase und in Abhängigkeit von deren Kontaminationsgrad werden dem MPE/DPE-Systemen entsprechende Separations- u/o Aufbereitungsstufen nachgeschaltet (Abluftreinigung, Wasserreinigung, Öl-Wasser-Separator, Leichtphasen-Sammelbehälter).



Die Verwendung der Abbildung erfolgt mit freundlicher Genehmigung der Cornelsen Umwelttechnologie GmbH (© Cornelsen)

### Anwendungsbereiche:

- mäßig durchlässiger Boden (schluffiger Feinsand) und bei geringer Aquifermächtigkeit



Quelle: Abhängigkeit des Durchlässigkeitsbeiwerts ( $k_f$ ) von der Korngrößenverteilung von Lockergesteinen nach Krapp (Prinz, H. Abriß der Ingenieurgeologie., 1997. ISBN: 3-432-92333-3)

Quelle: ITVA H1

Folgende Randbedingungen sind zu empfehlen:

- Quelle und deren Nahbereich in der ungesättigte und gesättigte Bodenzone
- optimal anwendbar bei mäßiger Durchlässigkeit u/o geringer Ergiebigkeit
- umsetzbar bis in eine Tiefe von maximal 12-13 m

### Machbarkeitsstudien:

Die Durchführung von Machbarkeitsstudien in Form von Labor- oder Pilotversuchen ist nicht erforderlich, da die sanierungsrelevanten Prozesse hinreichend bekannt sind.

## 11.1.2 Mehr-Phasen-Extraktion (MPE)

### Essenzielle Verfahrens- und Messtechnik:

- Wasserabscheider
- Austragspumpen
- Öl/Wasser-Separator
- Vakuumaggregat
- Leichtphasen-Sammelbehälter
- Wasser-Aktivkohlefilter
- Gas-Aktivkohlefilter oder katalytische Nachverbrennung
- Messtechnik + Steuerung
- Bei Erfordernis Ex-ausstattung

### Grundanforderungen:

- Aufstellfläche für Anlagentechnik
- Absaug-/Schlürfburgen
- Einleitmöglichkeit einschl. Genehmigung für aufbereitetes Grundwasser
- Sicherheitsprüfungen, insb. im Zusammenhang mit Ex-Schutz

### Endprodukte – Reinigung/Entsorgung:

- schadstoffhaltige Abluft vor Ort reinigen
- schadstoffhaltiges Grundwasser vor Ort reinigen und ableiten
- bei Ölphasenmobilisierung: Ölphase abscheiden, sammeln und extern entsorgen

### Besonderheiten:

Diese Technologie wird teilweise auch als vacuum-enhanced extraction bezeichnet; selten auch als Bioslurping. Aufgrund der häufig zu erreichenden sehr hohen Schadstoffabreicherungen sind hohe Gehalte an Schadstoff in der abgesaugten Bodenluft zu erwarten. Dieses ist bei der Erstellung und dem Betrieb der MPE-Anlage und der ggf. nachfolgenden Wasser- und Gasreinigung zu beachten. Die einschlägigen Gesetze und Verordnungen für den Bau und den Betrieb solcher Anlagen bei einer Abreicherung explosionsfähiger Konzentrationen sind zu beachten.

### Vorteile:

- dort sehr geeignet, um überhaupt Grundwasser aus der mäßigen durchlässigen Bodenzone entnehmen zu können, sofern konventionelle Brunnenpumpen aufgrund eines zu geringen Wasser-nachflusses zum Brunnen stark takten (schnelle Brunnenleerung, langsamer Nachfluss)
- erzeugen eines konstanten hydraulischen Gefälles zur Optimierung der Fluidnachflusses
- weiterhin sehr geeignet zur Reinigung und vollständigen Trockenlegung geringmächtiger Aquifere sowie zur Entnahme von Schicht- u. Stauwasser
- geochemische und hydrochemische Standortbedingungen haben keine besondere Relevanz
- gut geeignet für flüchtige organische Schadstoffe, wie z.B. BTEX, Benzin, LCKW sowie aufschwimmende Produktphase (LNAPL)
- aufgrund des Schadstoffspektrums kann eine Anwendung bei Tankstellenschäden und Tanklagern sinnvoll sein

### Nachteile:

Anwendungsgrenzen für die MPE-Technologie sind gegeben bei:

- bei zu hoher Durchlässigkeit (Mittelsand und besser) kann kein hinreichender Unterdruck zum Schlürfern im Brunnen aufgebaut werden
- sehr schlecht durchlässige Böden (Ton)
- sehr mächtiger Leichtphase

## 11.1.2 Mehr-Phasen-Extraktion (MPE)

### Mögliche Verfahrenskombinationen:

MPE kann mit thermischen in-situ Verfahren kombiniert werden. Die Sanierungszeit von MPE verkürzt sich mit TUBA oder THERIS auf wenige Monate [1].

### Projektbeispiele (Auswahl):

- [1] U. Hiester u. L. Bieber: [Dominierende Prozesse bei der thermischen In-situ-Sanierung \(TISS\) kontaminierter Geringleiter](#). Grundwasser – Zeitschrift der Fachsektion Hydrogeologie (2017) 22: 185-195, ISSN 1430-483X print. DOI:10.1007/s00767-017-0366-z



MPE-Anlage nach ATEX-Standard, eingebaut in 10'-Container (Quelle: M: Cornelsen, 2018)



MPE-Schlürfbrunnen mit Schlauchverbindung zur MPE-Anlage (Quelle: Q. Hulm, 2017)

## 11.1.3 Dampf-Luft-Injektion (z.B. TUBA-Verfahren)

Beim **TUBA-Verfahren** werden Boden und Grundwasser durch eine Dampf-injektion erwärmt. Durch diesen vornehmlich konvektiven Wärmeeintrag werden organische Schadstoffe gezielt mobilisiert:

- leichtflüchtige Schadstoffe werden verdampft (Stoffsiedepunkt bis ca. 220 °C),
- Öle, Teer- und Schweröl-Phase werden verflüssigt (von zähflüssig zu dünnflüssig).

Die mobilisierten Schadstoffe werden gezielt über eine Bodenluftabsaugung u/o eine Mehrphasenextraktion gefasst. Eine unkontrollierte Schadstoffmigration wird unterbunden. Eine zusätzliche Injektion von Luft in den Dampfstrom beschleunigt den Schadstoffübergang in die Bodenluft. Herdsanierungen sind meist in 3 bis 6 Monaten je Sanierungsfeld abgeschlossen.

### Kreuzmatrix SCHADSTOFF(-gruppe) (NAPL, gelöst, Feststoff) – QUELLEN-TYP:

| Medium   | Schadstoffe / Schadstoffgruppe  | Schadstoffquellen-Typen          |   |  |   |  |     |     |
|--|---|----------------------------------|---|--|---|--|-----|-----|
|  |   | A-1                              | A-2   | A-3  | B   | C-1  | C-2 | C-3 |
|  |   | NAPL                             |   |  | ungesättigte und gesättigte Zone: gelöste Schadstoffe u. gut wasserlösliche Phase | feste Schadstoffe  |     |     |
| NAPL nur in der ungesättigten Zone             | LNAPL bis in die gesättigte Zone  | DNAPL bis in die gesättigte Zone | mit wasserlöslichen: Metalle(oide), Salze, Pestizide u.a. | Transport als Suspension (z.B. im Kluft-GW-Leiter) |   | wasserlöslich. Anteil u. flücht. Transformationsprodukte |     |     |
| NAPL (Flüssigphasen)                           | 1 Organische Leichtphase (LNAPL) inkl. Suspension: BTEX, KW                                     | +++                              | +++   |  |   |  |     |     |
|  | 2 Organische Schwerphase (DNAPL) inkl. Suspension: a) LHKW, Naphthalin b) PAK, Teeröl (flüssig) | +++                              |   | +++  |   |  |     |     |
|  | 3 Mineralische Reinphase: z.B. Quecksilber  | (+)                              |   | (+)  |   |  |     |     |
| In der Bodenluft GELÖSTE-flüchtige Schadstoffe | 4a Organische Schadstoffe (BTEX, MKW, usw.)   |                                  |   |  | ++ bis +++  |  |     |     |
|  | 4b Halogen-organische Schadstoffe (z.B. LHKW)   |                                  |   |  | ++ bis +++  |  |     |     |
|  | 4c PFAS-FTOH  |                                  |   |  | -   |  |     |     |
|  | 5 Anorganische Schadstoffe (Quecksilber, Arsin, usw.)   |                                  |   |  | (+)   |  |     |     |
| Im Wasser GELÖSTE Schadst.                     | 6 Organ. Schadstoffe (Poren-, Schicht-, Grundwasser) alle                                       |                                  |   |  | ++ bis +++  |  |     |     |
|  | 7 PFAS (Poren-, Schicht-, Grundwasser)  |                                  |   |  | -   |  |     |     |
|  | 8 Mineral. Schadstoffe (Poren-, Schicht-, Grundwasser)  |                                  |   |  | -   |  |     |     |
| FESTSTOFFE, feststoffartige Schadst.           | 9 Mineralische Feststoffe, Cyanide, Zink, Zinn, Blei, Schwermetalle                             |                                  |   |  |   | -  | -   | -   |
|  | 10 Organische Feststoffe: fester Teer, Polymer-Ausschussabfälle                                 |                                  |   |  |   | -  | -   | -   |
|  | 11 Stark sorbierte Organika (z.B. PFAS, PAK, PCB, PCDD/F)                                       |                                  |   |  |   | nur C-1a   |     | -   |

**Erläuterung:** DEFINITION: PHASE (NAPL) = flüssig bei 10-15°C

Schematische Anwendungsübersicht zur Erstbewertung - ersetzt keine Einzelfallprüfung!

**Bewertung:**

|  |   |
|--|---|
|  | gute Anwendungsmöglichkeiten bei bestimmten Randbedingungen               |
|  | prinzipiell für alle oder einzelne Schadstoffe dieser Stoffgruppe möglich |
|  | keine Anwendung möglich   |
|  | keine Fallüberschneidung / Anwendung                                      |

|     |                       |
|-----|-----------------------|
| +++ | : sehr gut geeignet   |
| ++  | : gut geeignet i.d.R. |
| +   | : bedingt geeignet    |
| -   | : nicht geeignet      |

### Besondere Hinweise (Schadstoffgruppe – Quellentyp):

- **1\_A-1, 1\_A-2, 2a\_A-1: bei Ölgemischen:**  
(1) zunächst Mobilisierung u. Massenauswurf, (2) dann Auswurf der leichter flüchtigen Bestandteile und (3) zuletzt ggf. Immobilisierung (nach der Abkühlung) der verbleibenden Ölphasenbestandteile.
- **3\_A-1 u. 3\_A-3 u. 5: Quecksilber**  
Lässt sich mit Wärme gut verdampfen. Quecksilber-Rückstände in den Rohrleitungen und Anlagen sind zu erwarten. Bislang keine angewandten Projekte (Stand Feb. 2023).
- **11\_C-1: PAK, PCB**  
Temperaturerhöhung wirkt desorbieren und mobilisierend, ist aber ein Nebeneffekt bei einer Sanierung der Quelltypen A und B.

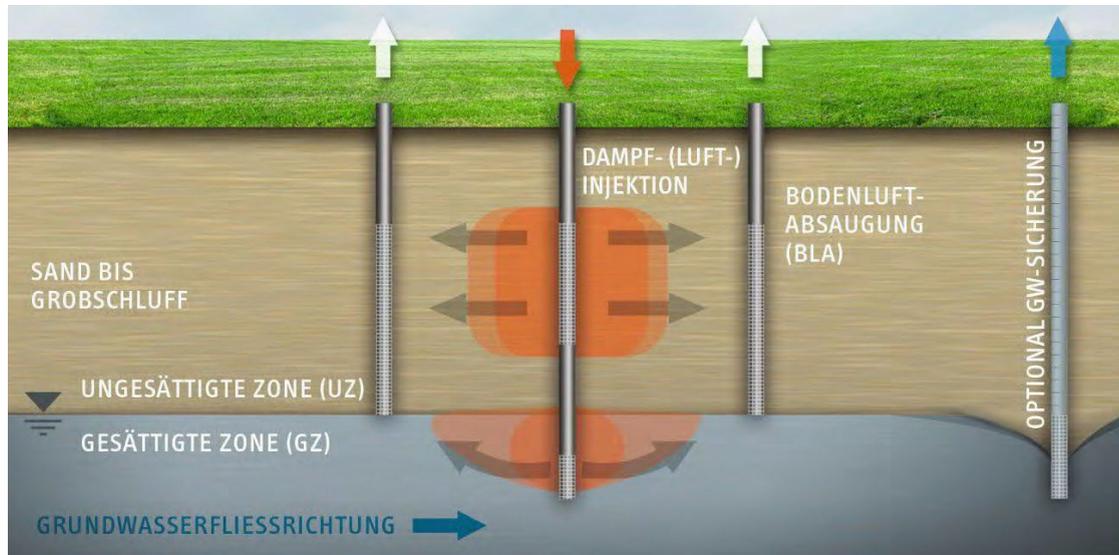
### Verfahrensdetails:

Sowohl zum Beheizen von Boden u/o Grundwasser als auch zur Schadstoffförderung können mehrere Brunnen zu einem Strang zusammengefasst werden, wenn die hydrogeologischen Randbedingungen ähnlich sind.

Die nachgeschalteten Reinigungsstufen der Medien (Bodenluft, Grundwasser) nutzen konventionelle Verfahren wie Abtrennung der Schadstoffphase (meist Ölphase), Aktivkohlefilter oder kata-

## 11.1.3 Dampf-Luft-Injektion (z.B. TUBA-Verfahren)

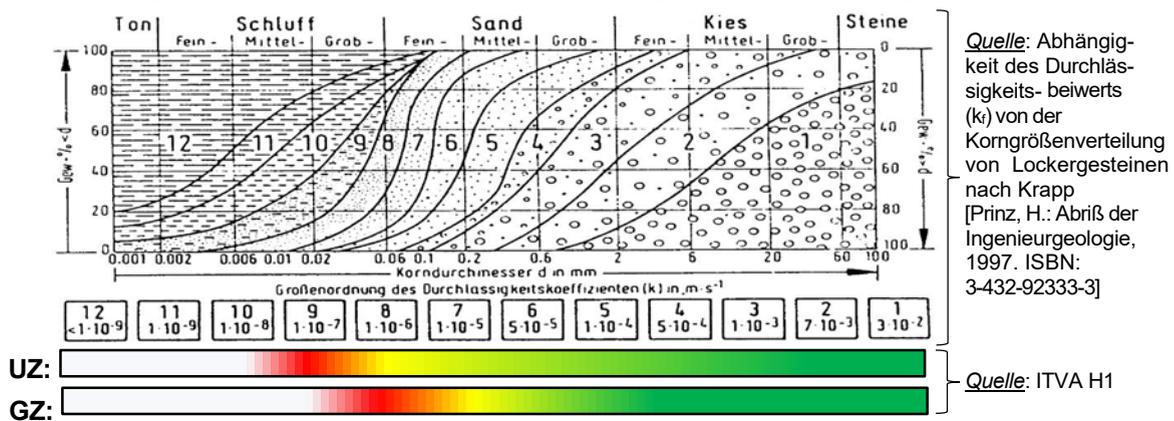
lytische Oxidation. Teilweise ist eine vorgeschaltete Konditionierung der zu reinigenden Medien erforderlich (z.B. Abkühlung vor der Reinigung).



Die Verwendung der Abbildung erfolgt mit freundlicher Genehmigung der reconsite GmbH (© reconsite)

### Anwendungsbereiche:

- gut bis mäßig gut durchlässiger Boden (Sand bis schluffiger Feinsand) u. Kluffgestein



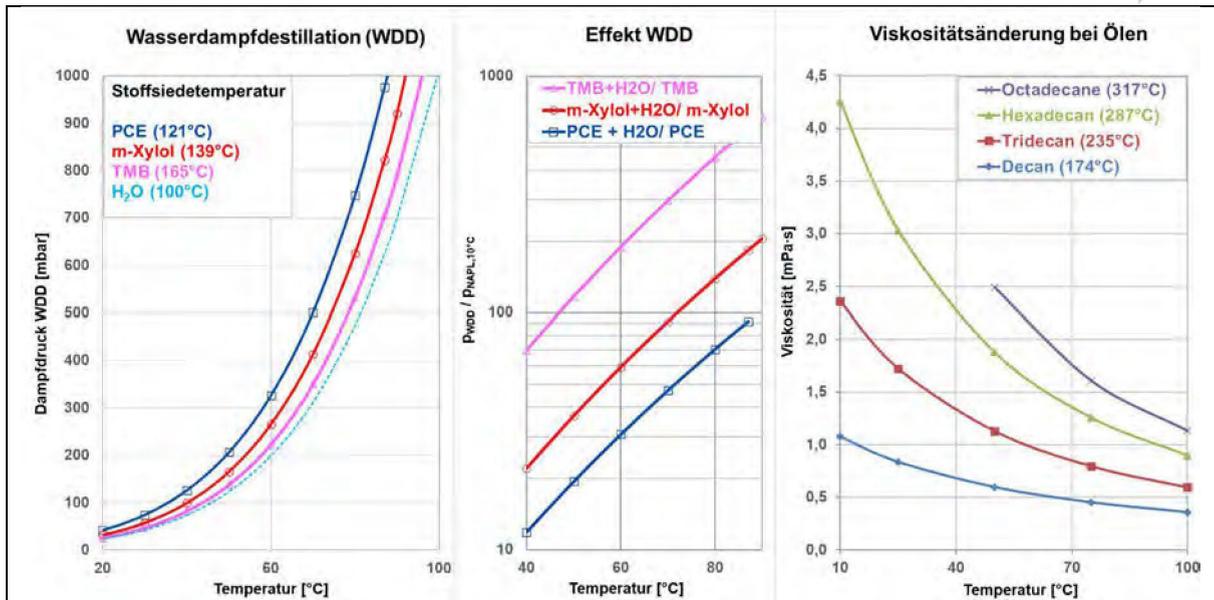
Bei heterogenem Untergrund mit teilweise gering durchlässigen Schichten kann sich die Erwärmungs- bzw. Sanierungszeit erhöhen. Hier kann eine Kombination mit dem THERIS-Verfahren vorteilhaft sein.

### Machbarkeitsstudien:

Die Durchführung von Machbarkeitsstudien in Form von Labor- oder Pilotversuchen ist nicht notwendig. Die sanierungsrelevanten Prozesse sind hinreichend verstanden. Praxiserfahrung bei verschiedensten Randbedingungen liegen seit über 20 Jahren vor:

- Verdampfung von Leichtflüchtern: Der mit steigender Temperatur exponentiell ansteigende Dampfdruck ( $p_{NAPL}$ ) und die einsetzende Wasserdampfdestillation ( $p_{WDD}$ ) dominieren den Sanierungsprozess.
  - Verflüssigung von Ölen: steigende Temperatur mindert die Viskosität u. erhöht die Fließfähigkeit
- Technisch-finanzielle Machbarkeitsstudien bieten daher üblicherweise keinen Mehrwert.

## 11.1.3 Dampf-Luft-Injektion (z.B. TUBA-Verfahren)



Ausnahme: Bei der Ölphasenmobilisierung können aus der Literatur meist nur Stoffeigenschaften einzelner Schadstoffe/Öl-Komponenten (Viskosität, Oberflächenspannung, Dichte etc.) abgeschätzt werden. Bei bestimmten Ölgemischen kann daher die Quantifizierung des Temperatureinflusses auf die Fließeigenschaften des Ölgemisches anhand von Laboruntersuchungen / Fraktionierungsuntersuchungen zur engeren Abgrenzung von Zieltemperaturen sinnvoll sein (z.B. C<sub>10-22</sub> vs. C<sub>10-40</sub>).

### Essenzielle Verfahrens- und Messtechnik:

- Dampferzeuger zur Erwärmung des Untergrunds
- Bodenluftabsaugung zur Erfassung der mobilisierten Schadstoffe sowie eine Abluftreinigung
- Abhängig von behördlichen Vorgaben u/o technischem Erfordernis ggf. hydraulische GW-Sicherung / -reinigung
- Messtechnische Überwachung des Untergrunds und der Sanierungsanlage (Temperatur, Austragsüberwachung/-bilanzierung)

### Grundanforderungen:

- Aufstellfläche für Anlagentechnik, Frischwasseranschluss
- Stromanschluss: Dampferzeuger, Bodenluftabsaugung, Messtechnik, ggf. Grundwasserpumpen
- ggf. Heizöltank, Gasanschluss für Dampferzeuger (je nach Typ)
- Einleitmöglichkeit und -genehmigungen für Abschlammwasser (Kanalisation)
- Sicherheitsprüfungen: Ex-Schutz, elektr. Abnahme, Abgaswegeprüfung)
- Erkennen von präferenziellen Wegsamkeiten

### Endprodukte – Reinigung/Entsorgung:

- schadstoffhaltige Abluft vor Ort reinigen
- schadstoffhaltiges Grundwasser vor Ort reinigen und ableiten
- bei Ölphasenmobilisierung: Ölphase abscheiden, sammeln und extern entsorgen
- Abschlammwasser des Dampferzeugers ableiten

### Besonderheiten:

- Sanierungen **neben und unter Gebäuden** sind erprobt:
  - Gebäudesubstanz, Rissen am Gebäude → Riss-Dokumentation vor und Monitoring während der San. mit Rissmarken. Ggf. Gebäudevermessung (z.B. Schiefstellung von Stützen),
  - Setzungsmessungen: besonders empfindl. können Böden mit organ. Anteil von >10 % sein. Aber: auch erfolgreich abgeschlossene Sanierungen von torfigen und muddigen Lagen, Vermessung vor und während der San. kann standortspez. sinnvoll sein (ca. ¼ aller Projekte),
  - Raumluftüberwachung → Innenraummessungen, auch mit mobilem GC möglich.
- Vermeidung einer **unkontrollierten Schadstoffmigration durch die Dampfinjektion:**
  - Fachgerechte Standorterkundung (u.a. alte Bohrungen, Pegel, präf. Fließwege),
  - nur gemeinsamer Betrieb von Bodenluftabsaugung und Dampfinjektion.
- **Ex-Schutz** prüfen: besonders bei Stoffgruppen wie BTEX, AKW u.ä. relevant.

## 11.1.3 Dampf-Luft-Injektion (z.B. TUBA-Verfahren)

### Vorteile:

- Sanierungszeit meist 3-6 Monate je Sanierungsfeld
- Sanierung unterhalb der Stoff siedetemperatur, daher keine vollständige Bodentrocknung
- gute Anpassung an Standortbedingungen:  
Gebäude und Infrastruktur, Heterogenitäten, Schadstoffverteilungen, Sanierungsziele u.ä.
- Erwärmung beschleunigt den Schadstoffaustrag u. reduziert den Energieeinsatz je kg Schadstoff
- automatisierte Verfahrensüberwachung, Datenvisualisierung, Austragsbilanzierung zur Plausibilisierung des Sanierungsfortschritts
- erneuerbare Energien können zum Betrieb des TUBA-Verfahrens genutzt werden

### Nachteile:

- komplexere Anlagen- und Verfahrenstechnik gegenüber konventioneller BLA o. P&T
- gutes Prozessverständnis zum Sanierungsmanagement erforderlich

### Mögliche Verfahrenskombinationen:

Die Sanierungszeit kann bei stark heterogenem Untergrund durch eine Verfahrenskombination mit dem THERIS-Verfahren deutlich verkürzt werden.

Bei vorliegender Phase kann zudem ein zeitgleicher Betrieb einer Mehrphasen-Extraktion zielführend sein. Im Falle von Schwerphase (LHKW-Phase) im Förderbrunnen ist eine Mehrphasenförderung vor dem Sanierungsbeginn zu empfehlen.

Unter Ausnutzung der Abwärme zur gesteigerten Stoffumsetzung kann im Nachgang zur Sanierung z.B. in der Fahne der Einsatz von mikrobiologischen oder ISCO/ ISCR-Verfahren sinnvoll sein.

### Projektbeispiele (Auswahl):

- [1] **M. Wolf und U. Hiester:** [Verfahrensumstellung nach 25 Jahren BLA und P&T - was bringt jetzt noch eine thermische Sanierung?](#) in: Tagungsunterlagen "Altlasten und Schadensfälle - Neue Entwicklungen". Hessisches Landesamt für Naturschutz, Umwelt und Geologie (HLNUG), Idstein, 05.-06.06.2018, ISBN: 978-3-89531-877-1, pp. 43-51.
- [2] **U. Hiester, L. Bieber, M. Müller:** [Energiesparende, nachhaltige Grundwassersanierung - Erfahrungen mit einer thermischen In-situ-Sanierung \(TISS\)](#). altlasten spektrum 27 (2018), 3, ISSN 0942-3818, S. 108-114.
- [3] **L. Bieber:** [Prognose der Grundwasserbelastung nach einer thermischen Quellensanierung](#). altlasten spektrum 27 (2018), 3, ISSN 0942-3818, S. 103-107.



Kombination TUBA- & THERIS-Verfahren neben einem Bahngleis (© *reconsite*)



Tanklagersanierung mit dem TUBA-Verfahren (10.000m<sup>2</sup>) – Austrag: über 280 Tonnen in 17 Monaten (© *reconsite*)

# 11.1.4 Thermische Verfahren mit fester Wärmequelle (z.B. THERIS-Verfahren)

Beim **THERIS-Verfahren** werden Boden und Grundwasser mit elektrisch betriebenen Heizstäben erhitzt. Durch diesen konduktiven Wärmeeintrag werden auch geringdurchlässige und bindige Böden erhitzt und auch hier organische Schadstoffe gezielt mobilisiert:

- leichtflüchtige Schadstoffe werden verdampft (Stoffsiedepunkt bis ca. 220 °C),
- Öle, Teer- und Schweröl-Phase werden verflüssigt (von zähflüssig zu dünnflüssig).

Die mobilisierten Schadstoffe werden gezielt über eine Bodenluftabsaugung u/o eine Mehrphasenextraktion gefasst. Eine unkontrollierte Schadstoffmigration wird unterbunden. Herdsanierungen sind meist in 3 bis 6 Monaten je Sanierungsfeld abgeschlossen.

## Kreuzmatrix **SCHADSTOFF(-gruppe) (NAPL, gelöst, Feststoff) – QUELLEN-TYP:**

| Medium  | Schadstoffe / Schadstoffgruppe  | Schadstoffquellen-Typen          |   |   |   |  |     |     |
|---|---|----------------------------------|---|---|---|--|-----|-----|
|   |   | A-1                              | A-2   | A-3   | B   | C-1  | C-2 | C-3 |
|   |   | NAPL                             |   |   | ungesättigte und gesättigte Zone: gelöste Schadstoffe u. gut wasserlösliche Phase | feste Schadstoffe  |     |     |
| NAPL nur in der ungesättigten Zone              | LNAPL bis in die gesättigte Zone  | DNAPL bis in die gesättigte Zone | mit wasserlöslichen Anteilen: lösl. Metalle(oxide), Salze, Pestizide u.a. | Transport als Suspension (z.B. im Klufft-GW-Leiter) |   | wasserlöslich. Anteil u. flücht. Transformationsprodukte |     |     |
| NAPL (Flüssigphasen)                            | 1 Organische Leichtphase (LNAPL) inkl. Suspension: BTEX, KW                                     | +++                              | +++   |   |   |  |     |     |
|   | 2 Organische Schwerphase (DNAPL) inkl. Suspension: a) LHKW, Naphthalin b) PAK, Teeröl (flüssig) | +++                              |   | +++   |   |  |     |     |
|   | 3 Mineralische Reinphase: z.B. Quecksilber  | (+)                              |   | (+)   |   |  |     |     |
| in der Bodenluft GELÖSTE, flüchtige Schadstoffe | 4a Organische Schadstoffe (BTEX, MKW, usw.)   |                                  |   |   | ++ bis +++  |  |     |     |
|   | 4b Halogen-organische Schadstoffe (z.B. LHKW)   |                                  |   |   | ++ bis +++  |  |     |     |
|   | 4c PFAS-FTOH  |                                  |   |   | -   |  |     |     |
|   | 5 Anorganische Schadstoffe (Quecksilber, Arsin, usw.)   |                                  |   |   | (+)   |  |     |     |
| im Wasser GELÖSTE Schadst.                      | 6 Organ. Schadstoffe (Poren-, Schicht-, Grundwasser) alle                                       |                                  |   |   | ++ bis +++  |  |     |     |
|   | 7 PFAS (Poren-, Schicht-, Grundwasser)  |                                  |   |   | -   |  |     |     |
|   | 8 Mineral. Schadstoffe (Poren-, Schicht-, Grundwasser)  |                                  |   |   | -   |  |     |     |
| FESTSTOFFE, feststoffartige Schadst.            | 9 Mineralische Feststoffe, Cyanide, Zink, Zinn, Blei, Schwermetalle                             |                                  |   |   |   | -  | -   | -   |
|   | 10 Organische Feststoffe: fester Teer, Polymer-Ausschussabfälle                                 |                                  |   |   |   | -  | -   | -   |
|   | 11 Starksorbierte Organika (z.B. PFAS, PAK, PCB, PCDD/F)  |                                  |   |   |   | nur C-1a   |     | -   |

**Erläuterung:** DEFINITION: PHASE (NAPL) = flüssig bei 10-15°C

Schematische Anwendungsübersicht zur Erstbewertung - ersetzt keine Einzelfallprüfung!

**Bewertung:**

|  |   |
|--|---|
|  | gute Anwendungsmöglichkeiten bei bestimmten Randbedingungen               |
|  | prinzipiell für alle oder einzelne Schadstoffe dieser Stoffgruppe möglich |
|  | keine Anwendung möglich   |
|  | keine Fallüberschneidung / Anwendung                                      |

|     |                       |
|-----|-----------------------|
| +++ | : sehr gut geeignet   |
| ++  | : gut geeignet i.d.R. |
| +   | : bedingt geeignet    |
| -   | : nicht geeignet      |

### Besondere Hinweise (Schadstoffgruppe – Quellentyp):

- **1\_A-1, 1\_A-2, 2a\_A-1: bei Ölgemischen:**  
(1) zunächst Mobilisierung u. Massenauswurf, (2) dann Auswurf der leichter flüchtigen Bestandteile und (3) zuletzt ggf. Immobilisierung (nach der Abkühlung) der verbleibenden Ölphasenbestandteile.
- **3\_A-1 u. 3\_A-3 u. 5: Quecksilber**  
Lässt sich mit Wärme gut verdampfen. Quecksilber-Rückstände in den Rohrleitungen und Anlagen sind zu erwarten. Bislang keine angewandten Projekte (Stand Feb. 2023).
- **11\_C-1: PAK, PCB**  
Temperaturerhöhung wirkt desorbieren und mobilisierend, ist aber ein Nebeneffekt bei einer Sanierung der Quelltypen A und B.

### Verfahrensdetails:

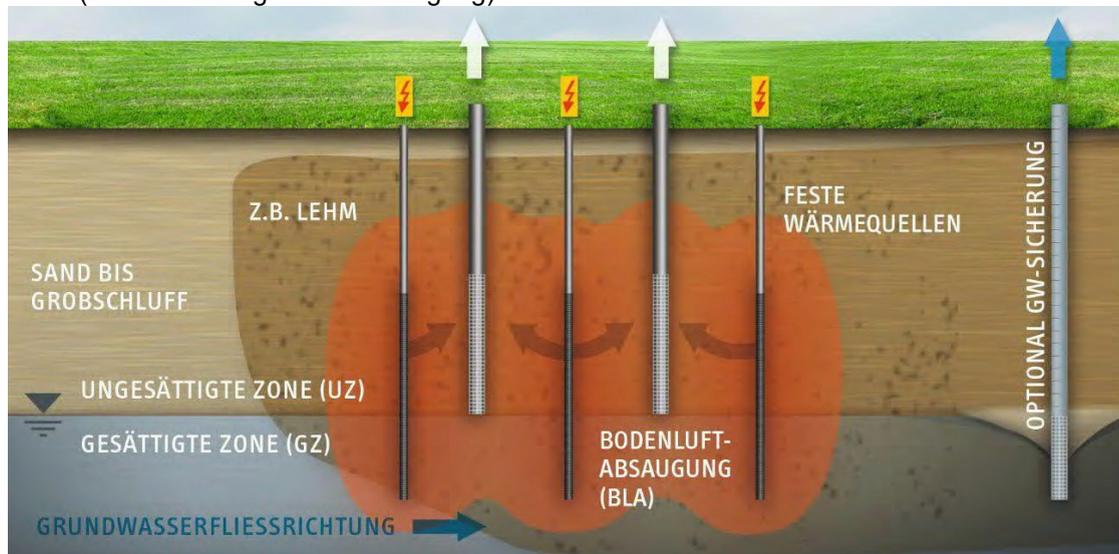
Sowohl zum Beheizen von Boden u/o Grundwasser als auch zur Schadstoffförderung können mehrere Brunnen zu einem Strang zusammengefasst werden, wenn die hydrogeologischen Randbedingungen ähnlich sind.

Die nachgeschalteten Reinigungsstufen der Medien (Bodenluft, Grundwasser) nutzen konventionelle Verfahren wie Abtrennung der Schadstoffphase (meist Ölphase), Aktivkohlefilter oder kata-

# 11.1.4 Thermische Verfahren mit fester Wärmequelle (z.B. THERIS-Verfahren)



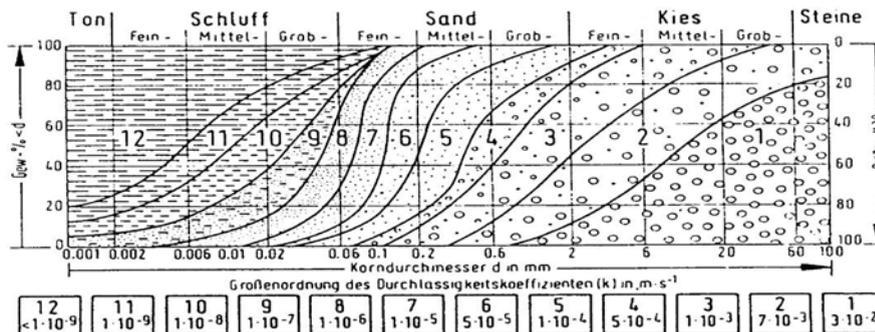
lytische Oxidation. Teilweise ist eine vorgeschaltete Konditionierung der zu reinigenden Medien erforderlich (z.B. Abkühlung vor der Reinigung).



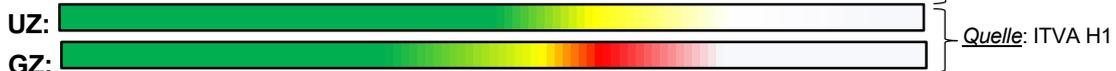
Die Verwendung der Abbildung erfolgt mit freundlicher Genehmigung der reconsite GmbH (© reconsite)

## Anwendungsbereiche:

- mäßig bis gering durchlässiger Boden (z.B. Schluff, Lehm, Ton) u. Kluffgestein



Quelle: Abhängigkeit des Durchlässigkeitsbeiwerts ( $k_r$ ) von der Korngrößenverteilung von Lockergesteinen nach Krapp (Prinz, H. Abriß der Ingenieurgeologie., 1997. ISBN: 3-432-92333-3)



Quelle: ITVA H1

Anwendungsgrenzen für das THERIS-Verfahren ergeben sich bei hohen Grundwasserständen. Durch das Grundwasser wird eine effektive Erwärmung des Untergrunds gehemmt und die Erwärmungs- bzw. Sanierungszeit deutlich erhöht.

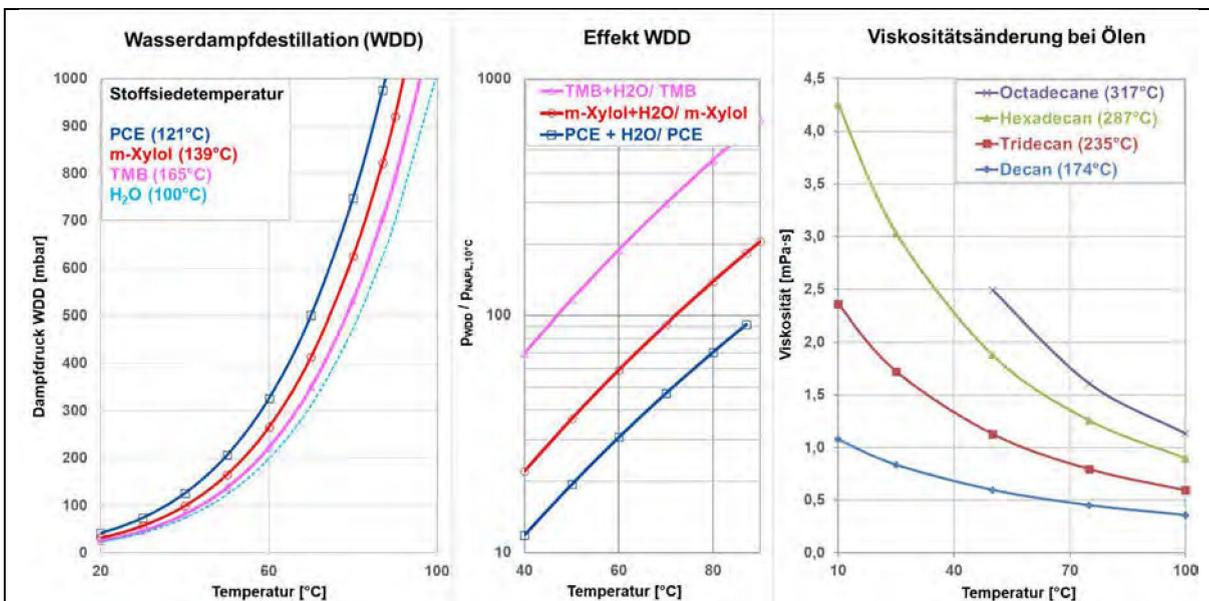
## Machbarkeitsstudien:

Die Durchführung von Machbarkeitsstudien in Form von Labor- oder Pilotversuchen ist nicht notwendig. Die sanierungsrelevanten Prozesse sind hinreichend verstanden. Praxiserfahrung bei verschiedensten Randbedingungen liegen seit über 20 Jahren vor.

- Verdampfung von Leichtflüchtern: Der mit steigender Temperatur exponentiell ansteigende Dampfdruck ( $p_{NAPL}$ ) und die einsetzende Wasserdampfdestillation ( $p_{WDD}$ ) dominieren den Sanierungsprozess.
- Verflüssigung von Ölen: steigende Temperatur mindert die Viskosität u. erhöht die Fließfähigkeit und die hydraulische Durchlässigkeit

Technisch-finanzielle Machbarkeitsstudien bieten daher üblicherweise keinen Mehrwert.

## 11.1.4 Thermische Verfahren mit fester Wärmequelle (z.B. THERIS-Verfahren)



Ausnahme: Bei der Ölphasenmobilisierung können aus der Literatur meist nur Stoffeigenschaften einzelner Schadstoffe/Öl-Komponenten (Viskosität, Oberflächenspannung, Dichte etc.) abgeschätzt werden. Bei bestimmten Ölgemischen kann daher die Quantifizierung des Temperatureinflusses auf die Fließeigenschaften des Ölgemisches anhand von Laboruntersuchungen / Fraktionierungsuntersuchungen zur engeren Abgrenzung von Zieltemperaturen sinnvoll sein (z.B. C<sub>10-22</sub> vs. C<sub>10-40</sub>).

### Essenzielle Verfahrens- und Messtechnik:

- Elektrisch betriebene Heizelemente zur Erwärmung des Untergrunds
- Bodenluftabsaugung zur Erfassung der mobilisierten Schadstoffe sowie eine Abluftreinigung
- Abhängig von behördlichen Vorgaben u/o technischem Erfordernis ggf. hydraulische GW-Sicherung / -reinigung
- Messtechnische Überwachung des Untergrunds und der Sanierungsanlage (Temperatur, Austragsüberwachung/-bilanzierung)

### Grundanforderungen:

- Aufstellfläche f. Anlagentechnik
- Stromanschluss für Heizelemente, Bodenluftabsaugung, Messtechnik, ggf. Grundwasserpumpen
- Sicherheitsprüfungen: Ex-Schutz, elektr. Abnahme
- Erkennen von präferenziellen Wegsamkeiten

### Endprodukte – Reinigung/Entsorgung:

- schadstoffhaltige Abluft vor Ort reinigen
- schadstoffhaltiges Grundwasser vor Ort reinigen und ableiten
- bei Ölphasenmobilisierung: Ölphase abscheiden, sammeln und extern entsorgen

### Besonderheiten:

- Sanierungen **neben und unter Gebäuden** sind erprobt:
  - Gebäudesubstanz, Rissen am Gebäude → Riss-Dokumentation vor und Monitoring während der San. mit Rissmarken. Ggf. Gebäudevermessung (z.B. Schiefstellung von Stützen),
  - Setzungsmessungen: besonders empfindl. können Böden mit organ. Anteil von >10 % sein. Aber: auch erfolgreich abgeschlossene Sanierungen von torfigen und muddigen Lagen, Vermessung vor und während der San. kann standortspez. sinnvoll sein (ca. ¼ aller Projekte).
  - Raumluftüberwachung → Innenraummessungen, auch mit mobilem GC möglich,
- **Ex-Schutz** prüfen: besonders bei Stoffgruppen wie BTEX, AKW u.ä. relevant,
- **Lärmschutz:** Intermittierender Sanierungsbetrieb ist möglich.

## 11.1.4 Thermische Verfahren mit fester Wärmequelle (z.B. THERIS-Verfahren)

### Vorteile:

- Sanierungszeit meist 3-6 Monate je Sanierungsfeld
- Sanierung unterhalb der Stoffsiedetemperatur, daher keine vollständige Bodentrocknung
- gute Anpassung an Standortbedingungen:  
Gebäude und Infrastruktur, Heterogenitäten, Schadstoffverteilungen, Sanierungsziele u.ä.
- Erwärmung beschleunigt den Schadstoffaustrag u. reduziert den Energieeinsatz je kg Schadstoff
- automatisierte Verfahrensüberwachung, Datenvisualisierung, Austragsbilanzierung zur Plausibilisierung des Sanierungsfortschritts
- Das THERIS-Verfahren kann vollständig mit erneuerbaren Energien betrieben werden.

### Nachteile:

- komplexere Anlagen- und Verfahrenstechnik gegenüber konventioneller BLA o. P&T
- gutes Prozessverständnis zum Sanierungsmanagement erforderlich

### Mögliche Verfahrenskombinationen:

Die Sanierungszeit kann bei stark heterogenem Untergrund durch eine Verfahrenskombination mit dem TUBA-Verfahren deutlich verkürzt werden. Zudem kann bei gelösten Schadstoffen im Grundwasser der Schadstoffübergang in die ungesättigte Zone durch eine zusätzliche Druckluft-Injektion (Airsparging) während des Sanierungsbetriebs beschleunigt werden.

Bei vorliegender Phase kann zudem ein zeitgleicher Betrieb einer Mehrphasen-Extraktion zielführend sein. Im Falle von Schwerphase (LHKW-Phase) im Förderbrunnen ist eine Mehrphasenförderung vor dem Sanierungsbeginn zu empfehlen.

Unter Ausnutzung der Abwärme zur gesteigerten Stoffumsetzung kann im Nachgang zur Sanierung z.B. in der Fahne der Einsatz von mikrobiologischen oder ISCO/ ISCR-Verfahren sinnvoll sein.

### Projektbeispiele (Auswahl):

- [1] **M. Wolf und U. Hiester:** [Verfahrensumstellung nach 25 Jahren BLA und P&T - was bringt jetzt noch eine thermische Sanierung?](#) in: Tagungsunterlagen "Altlasten und Schadensfälle - Neue Entwicklungen". Hessisches Landesamt für Naturschutz, Umwelt und Geologie (HLNUG), Idstein, 05.-06.06.2018, ISBN: 978-3-89531-877-1, pp. 43-51.
- [2] **U. Hiester, L. Bieber, M. Müller:** [Energiesparende, nachhaltige Grundwassersanierung - Erfahrungen mit einer thermischen In-situ-Sanierung \(TISS\)](#). altlasten spektrum 27 (2018), 3, ISSN 0942-3818, S. 108-114.
- [3] **L. Bieber:** [Prognose der Grundwasserbelastung nach einer thermischen Quellensanierung](#). altlasten spektrum 27 (2018), 3, ISSN 0942-3818, S. 103-107.



Innerstädtische THERIS-Sanierung neben Gebäuden (© reconsite)



THERIS-Sanierung eines LHKW-BTEX-Schadens bis 20 m Tiefe (© reconsite)

## 11.1.5 In-situ Waschung

Bei einer **in-situ Waschung der ungesättigten Bodenzone** werden die an der Bodenmatrix anhaftenden Schadstoffe in einem Spülkreislauf mit einem Waschmittel oder Löslichkeitsvermittler ausgezogen. Die dazu angewendeten Waschmittel können Tenside sein, aber auch adsorptiv wirksame Hilfsstoffe wie z.B. kolloidal gelöste Aktivkohle oder Polymere. Die Waschlösung wird zusammen mit den darin enthaltenen Schadstoffen direkt im Schadensbereich, ggf. aus dem Kapillarsaumbereich oder oberflächennahen Grundwasser abgepumpt. Anschließend wird die geförderte Waschlösung so regeneriert, dass die Schadstoffe abgespalten werden. Das gereinigte Wasser kann zusammen mit dem Waschmittel/dem Löslichkeitsvermittler wieder infiltriert werden.

### Kreuzmatrix **SCHADSTOFF**(-gruppe) (NAPL, gelöst, Feststoff) – **QUELLEN-TYP**:

| Medium  | Schadstoffe / Schadstoffgruppe  | Schadstoffquellen-Typen          |   |  |   |  |           |           |
|---|---|----------------------------------|---|--|---|--|-----------|-----------|
|   |   | A-1                              | A-2   | A-3  | B   | C-1  | C-2       | C-3       |
|   |   | NAPL                             |   |  | ungesättigte und gesättigte Zone: gelöste Schadstoffe u. gut wasserlösliche | feste Schadstoffe                                    |           |           |
| NAPL nur in der ungesättigten Zone                    | LNAPL bis in die gesättigte Zone  | DNAPL bis in die gesättigte Zone | mit wasserlös. Anteile: lösl. Metalle (oide), Salze, Pestizide u.a. | Transport als Suspension (z.B. im Kluff-GW-Leiter) |   | wasserlös. Anteil u. flücht. Transformationsprodukte |           |           |
| NAPL (Flüssigphasen)                                  | 1 Organische Leichtphase (LNAPL) inkl. Suspension: BTEX, KW                                     | (+)                              | (+)   |  |   |  |           |           |
|   | 2 Organische Schwerphase (DNAPL) inkl. Suspension: a) LHKW, Naphthalin b) PAK, Teeröl (flüssig) | + bis ++                         |   | -  |   |  |           |           |
|   | 3 Mineralische Reinphase: z.B. Quecksilber  | (+)                              |   | -  |   |  |           |           |
| in der Bodenluft<br>GELÖSTE, flüchtige<br>Schadstoffe | 4a Organische Schadstoffe (BTEX, MKW, usw.)   |                                  |   |  | -   |  |           |           |
|   | 4b Halogen-organische Schadstoffe (z.B. LHKW)   |                                  |   |  | -   |  |           |           |
|   | 4c PFAS-FTOH  |                                  |   |  | -   |  |           |           |
|   | 5 Anorganische Schadstoffe (Quecksilber, Arsin, usw.)   |                                  |   |  | -   |  |           |           |
| im Wasser<br>GELÖSTE Schadst.                         | 6 Organ. Schadstoffe (Poren-, Schicht-, Grundwasser) alle                                       |                                  |   |  | (+)   |  |           |           |
|   | 7 PFAS (Poren-, Schicht-, Grundwasser)  |                                  |   |  | (+)   |  |           |           |
|   | 8 Mineral. Schadstoffe (Poren-, Schicht-, Grundwasser)  |                                  |   |  | (+)   |  |           |           |
| FESTstoffe,<br>feststoffartige Schadst.               | 9 Mineralische Feststoffe, Cyanide, Zink, Zinn, Blei, Schwermetalle                             |                                  |   |  |   | + bis +++  | + bis +++ | + bis +++ |
|   | 10 Organische Feststoffe: fester Teer, Polymer-Ausschussabfälle                                 |                                  |   |  |   | + bis +++  | + bis +++ | + bis +++ |
|   | 11 Stark sorbierte Organika (z.B. PFAS, PAK, PCB, PCDD/F)                                       |                                  |   |  |   | (+)  |           | + bis +++ |

Erläuterung: DEFINITION: PHASE (NAPL) = flüssig bei 10-15°C  
Schematische Anwendungsübersicht zur Erstbewertung - ersetzt keine Einzelfallprüfung!

#### Bewertung:

|  |   |
|--|---|
|  | gute Anwendungsmöglichkeiten bei bestimmten Randbedingungen               |
|  | prinzipiell für alle oder einzelne Schadstoffe dieser Stoffgruppe möglich |
|  | keine Anwendung möglich   |
|  | keine Fallüberschneidung / Anwendung                                      |

|     |                       |
|-----|-----------------------|
| +++ | : sehr gut geeignet   |
| ++  | : gut geeignet i.d.R. |
| +   | : bedingt geeignet    |
| -   | : nicht geeignet      |

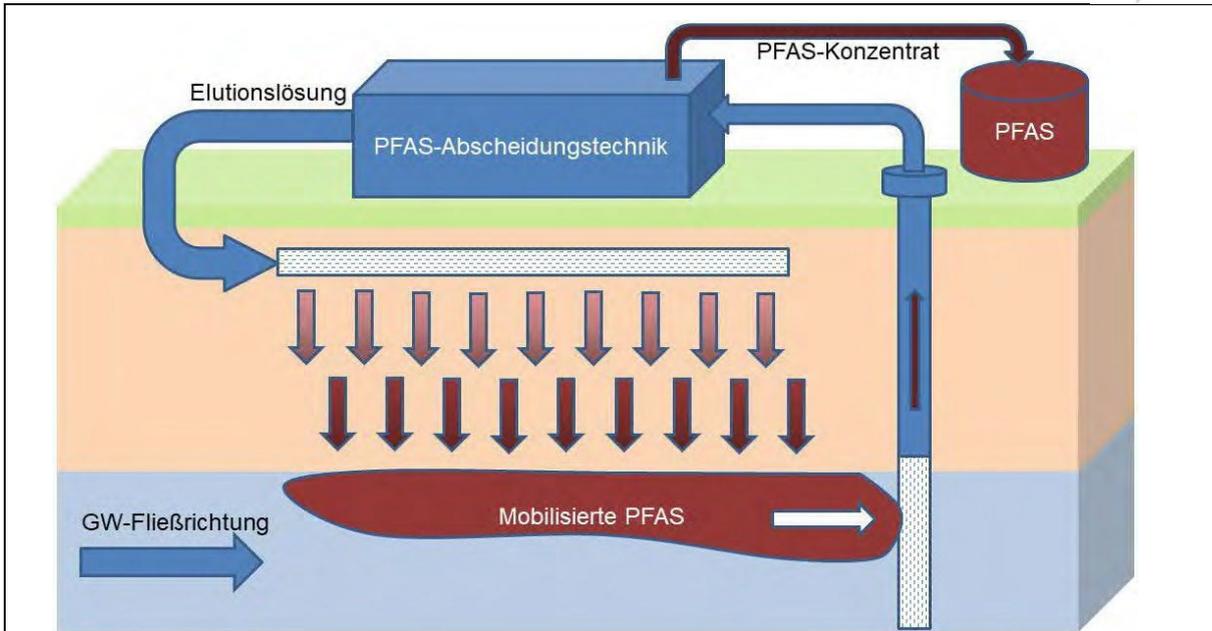
### Besondere Hinweise (Schadstoffgruppe – Quellentyp):

- **1\_A-1, 1\_A-2, 1\_A-3:**  
Nur bei zusätzlicher Anwendung von Tensiden/Biopolymeren o. anderen Löslichkeitsvermittlern
- **6\_B; 7\_B: xxx**  
nur bei zusätzlicher Anwendung von Tensiden/Biopolymeren o. anderen Löslichkeitsvermittlern

### Verfahrensdetails:

Das Beispiel in Abb. 1 zeigt die in-situ Auswaschung von PFAS mittels Biopolymeren auf Proteinbasis.

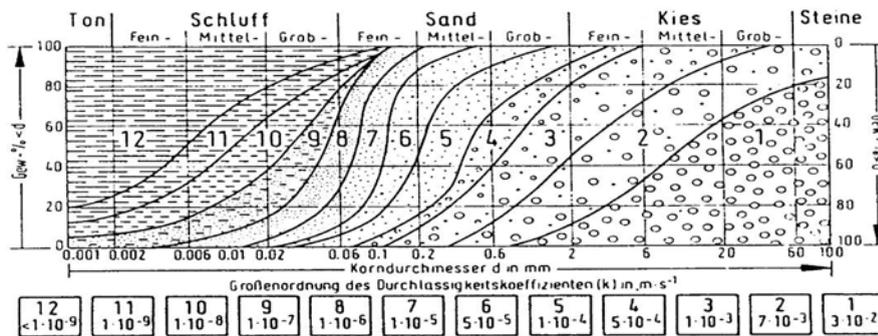
## 11.1.5 In-situ Waschung



Quelle: Sensatec GmbH

### Anwendungsbereiche:

- gut bis mäßig gut durchlässiger Boden (Sand bis schluffiger Feinsand)



Quelle: Abhängigkeit des Durchlässigkeitsbeiwerts ( $k_f$ ) von der Korngrößenverteilung von Lockergesteinen nach Krapp [Prinz, H.: Abriß der Ingenieurgeologie, 1997. ISBN: 3-432-92333-3]

UZ:

GZ:

Quelle: ITVA H1

Bei heterogenem Untergrund mit teilweise gering durchlässigen Schichten ist eine In-situ-Bodenwäsche in seiner Anwendung limitiert.

### Machbarkeitsstudien:

Die Durchführung von Machbarkeitsstudien im Labor und, wenn möglich, auch im Gelände mit Pilottests wird dringend empfohlen, damit die Dimensionierung der Behandlung zur technischen Anwendungssicherheit und Budgetsicherheit führt.

Im Rahmen der Machbarkeitsuntersuchungen müssen folgende Faktoren geprüft werden:

- Wirksamkeit der zugeführten Waschmittel/Löslichkeitsvermittler für die spezifische Bodenstruktur zur Schadstoffabtrennung
- Quantifizierung der unspezifischen Wirkstoffverluste
- Reichweitenanalyse der Waschmittel/Löslichkeitsvermittler
- Analyse ggf. unerwünschter Begleitprozesse (Fällungsreaktionen, pH-Veränderungen)

## 11.1.5 In-situ Waschung

### **Essenzielle Verfahrens- und Messtechnik:**

Im Bodenwaschprozess muss sichergestellt sein, dass die mobilisierten Schadstoffe sicher innerhalb des Spülkreislaufes erfasst werden und nicht abströmen. Diese Forderung lässt sich durch eine genaue hydraulische Überwachung des Spülkreislaufes erfüllen. Darüber hinaus müssen Schadstoffe im Waschkreislaufsystem und Flüssigkeiten vor und nach der Einbringung in den Untergrund sowie nach der Waschmittelaufbereitung und Schadstoffabscheidung überwacht werden.

Überwachungselemente sind:

- Hydraulische Überwachung
- Schadstoffanalysen
- Wirkstoffanalysen, ggf. als sensorische Überwachung von el. Leitfähigkeit, Oberflächenspannung

### **Grundanforderungen:**

- Ausreichende Kenntnis der Geologie und Hydrogeologie, Schadstoffverteilung, Berechnung der Waschlösungsverteilung sowie Labor- und/oder Feldtest-Daten zur Durchlässigkeit, Schadstoffausbeute und Kreislauf Waschmittlrückgewinnung, etc.

### **Endprodukte – Reinigung/Entsorgung:**

- Das geförderte Waschmittel mit Schadstoffbeaufschlagung wird zurückgewonnen und die Schadstoffe zur Entsorgung (oder Recycling) abgespalten.
- Bei PFAS sind die gewonnenen Konzentrate einer geregelten Entsorgung und thermischen Zerstörung zuzuführen.

### **Besonderheiten:**

- Untergrundverhältnisse wie geologische Schichtung, Durchlässigkeiten, relevante Sorptionsstrukturen wie z.B. organogene Horizonte, Schadstoffverteilung, hydrodynamische Prozesse in Sickerwässern und Grundwasser, etc. müssen berücksichtigt werden.

### **Vorteile:**

- Als in-situ-Quellen-Sanierungsmethode kann diese Technologie erhebliche Sanierungskosten einsparen und große Schadstoffmengen austragen und zurückgewinnen. (Quelle: Karg & Hüttmann, 2023; Wilken, Reinke, 2021)

### **Nachteile:**

- Potenziell nennenswerte Verluste der zugeführten Waschmittel/Löslichkeitsvermittler an der Bodenmatrix sind möglich und sollten in einer Machbarkeitsstudie quantifiziert werden.

### **Mögliche Verfahrenskombinationen:**

- Die Sanierungsmethode kann mit thermischen Verfahren (Überwindung der Limitierung durch Heterogenitäten), mit MPE sowie in einigen Fällen mit mikrobiologischen Technologien kombiniert werden.

### **Projektbeispiele (Auswahl):**

- [1] Hüttmann, S., Wilken, A., und Karg, F. (2023): In-situ Treatments of PFAS in contaminated Soil and Groundwater, Washing with Protein Bio-polymers. International PFAS-Congress. Congress Minutes, Paris, 14 June 2023.
- [2] Karg, F. (2023): In-situ Treatments of Soluble Emerging Pollutants in Soil & Groundwater – Examples of Site Developments with HET-NSO & PFAS Contaminations. Congress Minutes, INTER-SOL, Lille, 30 March 2023.
- [3] Wilken, A., Reinke, D. (2020) et al.: Elimination von PFAS durch ein In-situ-Bodenwaschverfahren - Vorstellung der Ergebnisse des Feldversuches – Perspektiven für die Praxisanwendung. Dechema- Symposium Strategien zur Sanierung von Boden & Grundwasser 2020. Frankfurt a.M.

## 11.1.5 In-situ Waschung



FOTO: Sensatec GmbH



FOTO: Sensatec GmbH

## 11.2.1 Mikrobiologische in-situ Verfahren

Bei der **mikrobiologischen in-situ-Quellensanierung** werden Schadstoffe abgebaut und gleichzeitig auch toxische und stabile Metaboliten mitbehandelt. Die anwendbaren Methoden sind z.B. DNBA, ENA, etc. Die **DNBA** (Dynamisierte Natural-Bio-Attenuation) wird z.B. mit Verstärkung bereits vorhandener mikrobiologischer Abbauphänomene und dem Einsatz von standorteigenen Bakterienkonsortien angewendet, welche am Standort entnommen, (PCRq-)selektioniert und gezüchtet werden um diese dann wieder z.B. zusammen mit standortgeeigneten Substraten, Nährstoffen, etc. wieder in den Untergrund einzugeben. Dies kann unter aeroben oder anaeroben Bedingungen erfolgen und führt zu einer stark erhöhten mikrobiologischen Eigendynamik des Schadstoffabbaus. DNBA hat sich als Begriff eingebürgert, wenn eine natürlicher Natural-Bio- Attenuation- „Reaktor“ durch gezielte Anwendung von standortspezifisch, z.B. PCRq-selektionierten Bakterienkonsortien und Substraten & Nutriments zum verstärkten Schadstoffabbau mit mikrobiologischer Eigendynamik führt.

**ENA** (Enhanced Natural Attenuation) kann z.B. durch die einfache Erhöhung der nötigen Elektrodenakzeptoren erfolgen, wie z.B. die Zugabe im Grundwasser von Sulfat, Nitrat oder Luftsauerstoff durch BAS: Bio-Air-Sparging etc.

Natürliche mikrobiologische Aktivitäten ohne unterstützende Maßnahmen sind üblicherweise nicht zur Quellensanierung geeignet.

### Kreuzmatrix **SCHADSTOFF(-gruppe) (NAPL, gelöst, Feststoff) – QUELLEN-TYP:**

| Medium   | Schadstoffe / Schadstoffgruppe  | Schadstoffquellen-Typen          |  |   |   |  |     |     |
|--|---|----------------------------------|--|---|---|--|-----|-----|
|  |   | A-1                              | A-2  | A-3   | B   | C-1  | C-2 | C-3 |
|  |   | NAPL                             |  |   | ungesättigte und gesättigte Zone: gelöste Schadstoffe u. gut wasserlösliche Phase | feste Schadstoffe                                    |     |     |
| NAPL nur in der ungesättigten Zone               | LNAPL bis in die gesättigte Zone  | DNAPL bis in die gesättigte Zone | mit wasserlös. Anteilen: lösl. Metalle(oxide), Salze, Pestizide u.a. | Transport als Suspension (z.B. im Klufft-GW-Leiter) |   | wasserlös. Anteil u. flücht. Transformationsprodukte |     |     |
| NAPL (Flüssigphasen)                             | 1 Organische Leichtphase (LNAPL) inkl. Suspension: BTEX, KW                                     | (+)                              | (+)  |   |   |  |     |     |
|  | 2 Organische Schwerphase (DNAPL) inkl. Suspension: a) LHKW, Naphthalin b) PAK, Teeröl (flüssig) | (+)                              |  | (+)   |   |  |     |     |
|  | 3 Mineralische Reinphase: z.B. Quecksilber  | -                                |  | -   |   |  |     |     |
| in der Bodenluft, GELÖSTE, flüchtige Schadstoffe | 4a Organische Schadstoffe (BTEX, MKW, usw.)   |                                  |  |   | ++ bis +++  |  |     |     |
|  | 4b Halogen-organische Schadstoffe (z.B. LHKW)   |                                  |  |   | + bis ++  |  |     |     |
|  | 4c PFAS-FTOH  |                                  |  |   | -   |  |     |     |
|  | 5 Anorganische Schadstoffe (Quecksilber, Arsin, usw.)   |                                  |  |   | -   |  |     |     |
| im Wasser, GELÖSTE Schadst.                      | 6 Organ. Schadstoffe (Poren-, Schicht-, Grundwasser) alle                                       |                                  |  |   | + bis ++  |  |     |     |
|  | 7 PFAS (Poren-, Schicht-, Grundwasser)  |                                  |  |   | -   |  |     |     |
|  | 8 Mineral. Schadstoffe (Poren-, Schicht-, Grundwasser)  |                                  |  |   | +   |  |     |     |
| FESTSTOFFE, feststoffartige Schadst.             | 9 Mineralische Feststoffe, Cyanide, Zink, Zinn, Blei, Schwermetalle                             |                                  |  |   |   | -  | -   | -   |
|  | 10 Organische Feststoffe: fester Teer, Polymer-Ausschussabfälle                                 |                                  |  |   |   | -  | -   | -   |
|  | 11 Stark sorbierte Organika (z.B. PFAS, PAK, PCB, PCDD/F)                                       |                                  |  |   |   | -  |     | +   |

**Erläuterung:** DEFINITION: PHASE (NAPL) = flüssig bei 10-15°C

Schematische Anwendungsübersicht zur Erstbewertung - ersetzt keine Einzelfallprüfung!

**Bewertung:**

|  |   |
|--|---|
|  | gute Anwendungsmöglichkeiten bei bestimmten Randbedingungen               |
|  | prinzipiell für alle oder einzelne Schadstoffe dieser Stoffgruppe möglich |
|  | keine Anwendung möglich   |
|  | keine Fallüberschneidung / Anwendung                                      |

|     |                     |
|-----|---------------------|
| +++ | sehr gut geeignet   |
| ++  | gut geeignet i.d.R. |
| +   | bedingt geeignet    |
| -   | nicht geeignet      |

### **Besondere Hinweise (Schadstoffgruppe – Quellentyp):**

- **A-1, A-2:**  
Schadstoffabbau bei gelösten Schadstoffen sowie eventuell auch bei Emulsionen sinnvoll, nicht jedoch bei geschlossenen Phase-Pools
- **A-1, A-3:**  
vorzugsweise in der Verfahrenskombination mit Biotensiden oder mit ISCR oder ISCO.
- **B:** Mikrobiologie zur Elementreduktion / -oxidation (Cr(VI) --> zu Cr(II) & Cr(III), etc.) sowie Cyanid-abbau

## 11.2.1 Mikrobiologische in-situ Verfahren

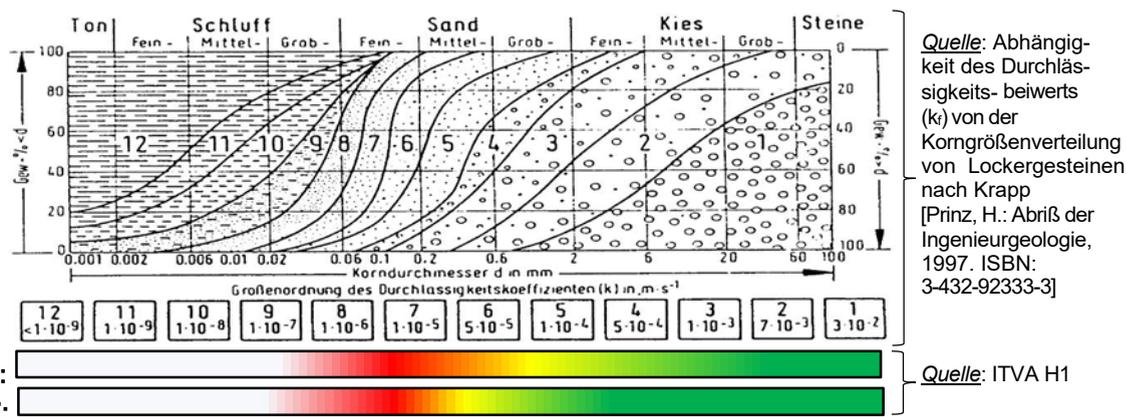
### Verfahrensdetails:

Die Anwendung bei Schadstoffen der mikrobiologischen aeroben in-situ-Quellensanierung ist vor allem möglich bei aliphatischen und aromatischen Kohlenwasserstoffen wie BTEX und relativ niederkernigen (bis maximal fünfkernigen) PAK, polaren Lösemitteln (wie Alkohole, Ketone, etc.), Phenolen, Kresolen, NSO-Heterocyclen, Nitroaromaten etc. LHKW, Amino-Aromaten, Chlorbenzole, Chlorphenole, etlichen Pestizidgruppen und teilweise bei niederchlorierten PCB und PCDD/F, u.a. können anaerob abgebaut werden.

Nitroaromaten sollten zuerst anaerob und deren Amino-Aromaten-Metaboliten dann aerob abgebaut werden.

### Anwendungsbereiche:

- gut bis mäßig gut durchlässiger Boden (Sand bis schluffiger Feinsand), um die Abbauprozesse hydraulisch steuern zu können



### Machbarkeitsstudien:

Die Durchführung von Machbarkeitsstudien im Labor und wenn möglich auch im Gelände mit Feld-/Pilottests wird zwingend empfohlen, damit die Dimensionierung der Behandlung zur technischen Anwendungssicherheit und Budgetsicherheit führt.

Die dazu notwendigen Begrifflichkeiten sind folgende:

- DNBA: Dynamised Natural Bio-Attenuation,
- ENA: Enhanced Natural Attenuation (aktiv verstärkte natürliche Schadstoffreduktion (inklusive Verdünnung)),
- MNA: Monitored Natural Attenuation (inklusive Verdünnung)
- MNBA: Monitored Natural Bio-Attenuation
- NBA: Natural Bio-Attenuation.

Folgende mikrobiologische und chemische Erkundungs- und Machbarkeitsstudien sollten im Rahmen von technischen & ökonomischen Machbarkeitsstudien berücksichtigt werden.

Zusammengefasst sollte zuerst der Schadstoffverteilungszustand erkundet werden (Quellen, Fahnen, Metaboliten, etc.). Danach muss ermittelt werden, ob bereits natürliche mikrobiologische Schadstoffabbauvorgänge (ein natürlicher Bioreaktor) in Form von **Natural Bio-Attenuation (NBA)** vorhanden sind und ob diese ausreichen oder ob auf diesen aufgebaut werden kann, um aktiv die mikrobiologischen Abbaueffekte zu verstärken.

Sollte **MNBA (Monitored Natural Bio-Attenuation)** nicht ausreichen, dann sollte die Machbarkeitsstudie in Richtung einer **aktiven DNBA (Dynamisierten Natural-Bio-Attenuation)** als aktive in-situ mikrobiologische Sanierungsanwendung weiterverfolgt werden.

Einzelschritte der **NBA-Erkundung** (Natural Bio-Attenuation):

- Untersuchungen der **Schadstoffe und Metabolite, Hydrolysate**, etc.
- **Bio-geochemische Parameter** (Elektronenakzeptoren, usw.)
- **PCRq** (quantitative Polymerase Chain Reaction): Erkundung der mikrobiologisch, genetischen Schadstoffabbau-Kapazitäten bezüglich Bakterien mit DNA-Sequenzen, die die Produktion von Enzymen garantieren welche die Zielschadstoffe abbauen

## 11.2.1 Mikrobiologische in-situ Verfahren

- **Isotopenfraktionierung** zur Bestimmung mikrobiologischen Abbauzonen und von in-situ-Abbauraten
- **Mikrobiologische Ökotoxizitätstests** und Ermittlung von zu berücksichtigenden „Hemmungszonen“ der bakteriologischen Entwicklung
- **Bestimmung von erreichbaren Abbauraten** über vorhandene Elektronenakzeptoren in stöchiometrischen Verhältnissen zu Elektronendonatoren sowie physiko-chemische und mikrobiologische Abbauzonen des natürlichen Bioreaktors

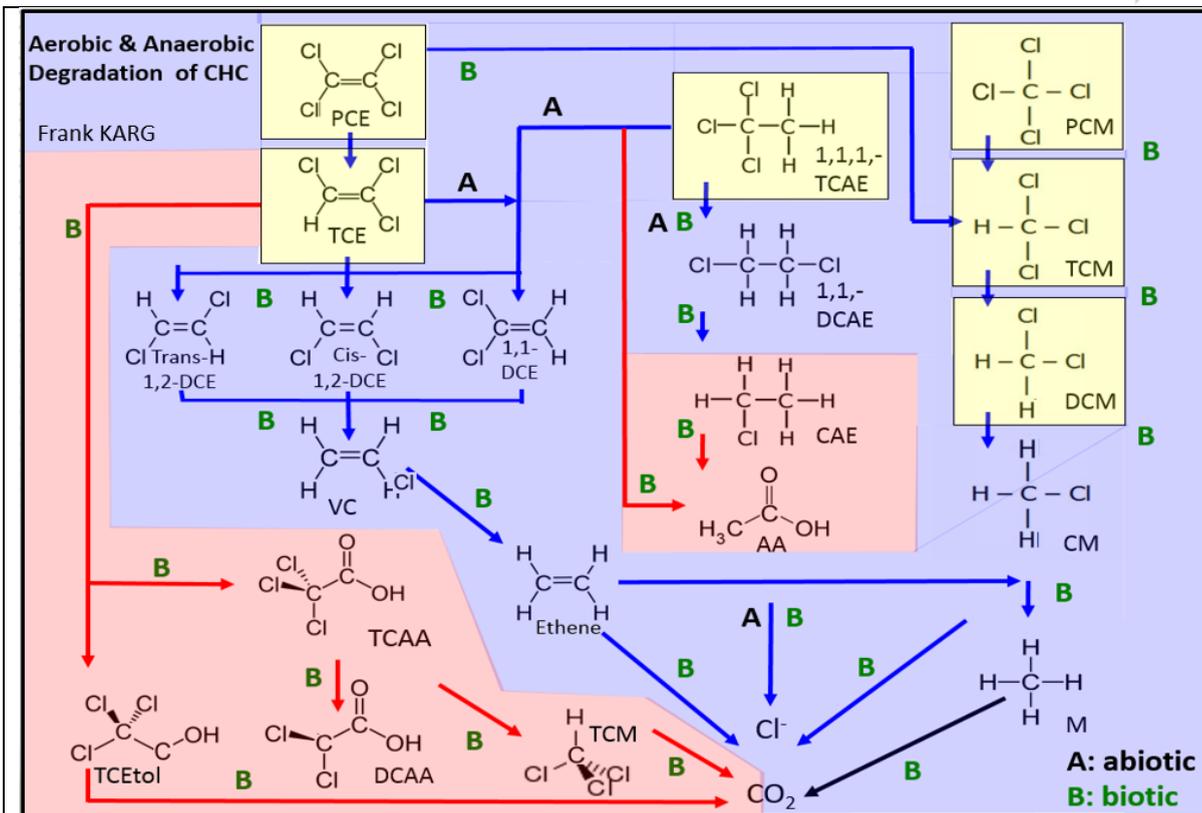
**Einzelschritte der DNBA-Erkundung** (Dynamisierte Natural Bio-Attenuation) (Quelle: F. Karg 2006 – 2020):

- **Selektion per PCRq (quantitative Polymerase Chain Reaction) der genetisch best-geeigneten standorteigenen Bakterien** und falls nötig Zugabe weiterer geeigneter schadstoffabbauender Bakterien
- **Mineralisations- & Respirations-Tests** (Ermittlung der Dynamisierbarkeit des natürlichen Schadstoffabbaus)
- **Challenge-Tests** (Ermittlung der maximalen Bio-Akzeptanz und maximal mikrobiologisch abbaubaren Schadstoffkonzentrationen, vor allem in Schadstoffquellen, etc.)
- **Laborversuche sowie Feldversuche** mit Anwendung von standortspezifisch produzierten Bakterienkonsortien, Nährstoffen, Substraten, Enzymen, Katalysatoren, Elektronenakzeptoren, etc.)
- **Bestimmung von potenziellen Dynamisierungszonen** und erreichbaren Abbauraten
- **Eventuell vergleichende Machbarkeitsstudie** (Techniken & Kosten/Nutzen) und Stofftransportmodellierung zum Vergleich der MNBA, DNBA und P&T, usw.

| Reaktion           | Reaktionsgleichung des TCE-Abbaus  |
|--------------------|--|
| Sauerstoffzehrung  | $\text{C}_2\text{HCl}_3 + \text{O}_2 \rightarrow \text{C}_2\text{Cl}_3\text{O}_2\text{H} \rightarrow \text{C}_2\text{Cl}_3\text{O}_2\text{H} + \text{O}_2 + 2 \text{H}^+ \rightarrow 2 \text{CO}_2 + 3 \text{H}^+ + 3 \text{Cl}^-$   |
| Nitratreduktion    | $3 \text{C}_2\text{HCl}_3 + 2 \text{NO}_3^- \rightarrow 3 \text{C}_2\text{Cl}_3\text{O}_2\text{H} + \text{N}_2 \rightarrow 3 \text{C}_2\text{Cl}_3\text{O}_2\text{H} + 2 \text{NO}_3^- + 6 \text{H}^+ \rightarrow 6 \text{CO}_2 + \text{N}_2 + 9 \text{H}^+ + 9 \text{Cl}^-$   |
| Nitratreduktion    | $3 \text{C}_2\text{HCl}_3 + 2 \text{NO}_3^- + 6 \text{H}^+ \rightarrow 3 \text{C}_2\text{Cl}_3\text{O}_2\text{H} + 2 \text{NH}_3^+ \rightarrow 3 \text{C}_2\text{Cl}_3\text{O}_2\text{H} + 2 \text{NO}_3^- + 6 \text{H}^+ \rightarrow 6 \text{CO}_2 + 2 \text{NH}_3^+ + 9 \text{H}^+ + 9 \text{Cl}^-$                      |
| Mangan-Reduzierung | $3 \text{C}_2\text{HCl}_3 + 3 \text{MnO}_2 \rightarrow 3 \text{C}_2\text{Cl}_3\text{O}_2\text{H} + 3 \text{Mn}^{2+} \rightarrow 3 \text{C}_2\text{Cl}_3\text{O}_2\text{H} + 3 \text{MnO}_2 + 6 \text{H}^+ \rightarrow 6 \text{CO}_2 + 3 \text{Mn}^{2+} + 9 \text{H}^+ + 9 \text{Cl}^-$                                     |
| Eisen-Reduzierung  | $3 \text{C}_2\text{HCl}_3 + 3 \text{Fe}^3\text{O}(\text{OH}) \rightarrow 3 \text{C}_2\text{Cl}_3\text{O}_2\text{H} + 3 \text{Fe}^{2+} \rightarrow 3 \text{C}_2\text{Cl}_3\text{O}_2\text{H} + 3 \text{Fe}^3\text{O}(\text{OH}) + 6 \text{H}^+ \rightarrow 6 \text{CO}_2 + 3 \text{Fe}^{2+} + 9 \text{H}^+ + 9 \text{Cl}^-$ |
| Sulfat-Reduktion   | $2 \text{C}_2\text{HCl}_3 + \text{SO}_4^{2-} + 10 \text{H}^+ \rightarrow \text{C}_2\text{H}_4 + 2 \text{CO}_2 + \text{H}_2\text{S} + 6 \text{H}^+ + 6 \text{Cl}^-$   |
| Methanogenese      | $2 \text{C}_2\text{HCl}_3 + 4 \text{H}_2\text{O} + 4 \text{H}^+ \rightarrow 2 \text{CH}_4 + 2 \text{CO}_2 + 6 \text{H}^+ + 6 \text{Cl}^-$  |

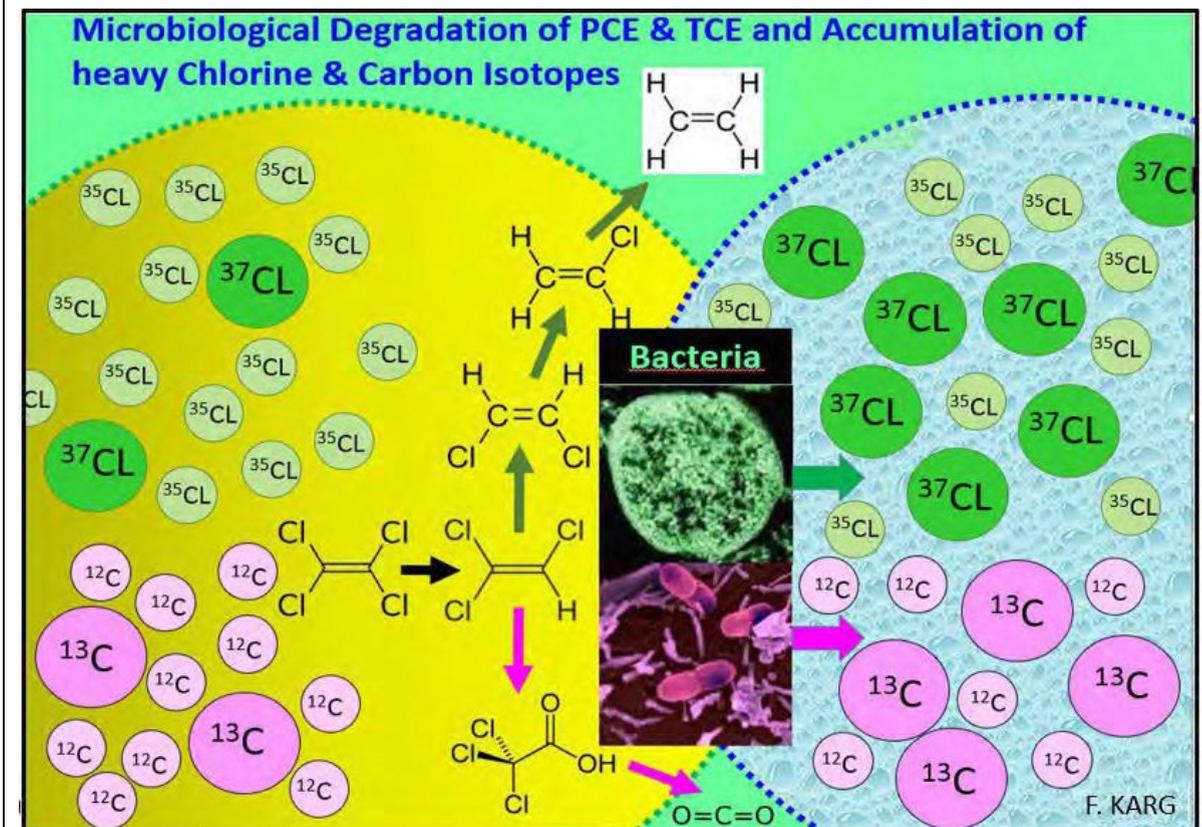
*Nutzung von Elektronenakzeptoren beim mikrobiologischen Schadstoffabbau (Quelle: F. KARG 2020). Anmerkungen: Der TCE-Abbau unter Nitrat-reduzierenden Bedingungen ist eher gering. Unter aeroben Verhältnissen (O<sub>2</sub>-Anwesenheit) wird u.a. der toxische Metabolit Trichloressigsäure gebildet.*

# 11.2.1 Mikrobiologische in-situ Verfahren



Aerobe und anaerobe mikrobiologische Abbaupfade von LCKW. (Quelle: F. KARG 2020) [\*Aerobes Abbau (aerob) bei Sauerstoffanwesenheit und Redoxpotentialen deutlich über +50 mV].

[Anaerobes Abbau (anaerob) bei weitgehender Sauerstoffabwesenheit, z.B. hier beim LHKW-Abbau bei Redoxpotenzialen von -75 bis -300 mV]



## 11.2.1 Mikrobiologische in-situ Verfahren

Schema: *Isotopenfraktionierung und Anreicherung von <sup>13</sup>C-, <sup>37</sup>Cl-Isotopen (Quelle: F. KARG 2020)*  
 [Gelber Bereich: Schadstoffe ohne mikrobiologische Anreicherung von schweren, stabilen Isotopen.  
 Blauer Bereich: Schadstoffe nach mikrobiologischen Abbauvorgängen mit Anreicherung von schweren, stabilen Isotopen]

Die folgende Tabelle zeigt die Details der Erkundungsschritte der NBA- & DNBA-Machbarkeitsstudie:

| Schritt | Untersuchung   |
|---------|--|
| 1       | <b>Erkundung Schadstoffausbreitung:</b> Eine Grundvoraussetzung zur eventuellen DNBA-Anwendung ist eine vollständige Erkundung der Schadstoffquelle, inklusive relevanter Metaboliten, Hydrolysate, etc. Kartierung von Isokonzentrationen.  |
| 2       | <b>Ermittlung aktueller Abbauverhältnisse</b> zur potenziellen MNBA-Anwendung: Bestimmung natürlicher mikrobiologischer Abbaumilieus (aerob / anaerob). Nutzung spez. Elektronenakzeptoren d. Untersuchung biogeochemischer Parameter. Nutzung von in-situ-Redox-Milieu-Detektoren (RMD). Kartierung von Isokonzentrationen der Elektronenakzeptoren und Biotransformationsprodukte. |
| 3       | <b>Nachweis eines mikrobiologischen Abbaus, Bestimmung des mikrobiologischen Abbaumilieus:</b> Nachweis von relevanten schadstoffabbauenden Mikroorganismen über DNA-Gentests per quantitativer PCR (Polymerase Chain Reaction). Kartierung der DNBA-Abbaupotentiale.  |
| 4       | <b>Ermittlung der aktuellen „In-Situ“-Abbauraten:</b> Isotopenfraktionierung u. Kartierung d. aktuellen In-situ-Iso-Abbauraten ( $\mu\text{g/l}\cdot\text{T}$ ). Zehrung d. <sup>12</sup> C-, <sup>35</sup> C- etc. Isotopen in den gemessenen Schadstoffen im Abstrom: <sup>13</sup> C-, <sup>37</sup> C- Anreicherung über die GC-IRMS-Messung (Isotopenfraktionierung).           |
| 5       | <b>Ermittlung potenzieller Abbauraten</b> im relevanten hydrochemisch-mikrobiologischen Milieu über die verfügbaren Elektronenakzeptoren. Kartierung der potenziellen Iso-Abbauraten ( $\mu\text{g/l}\cdot\text{T}$ ).   |
| 6       | Ermittlung Sorptionskapazität (und Verdünnung) im Aquifer: Evtl. p. GW-Modellierung, Kartierung der Iso-Sorptionskapazitäten sowie der Durchlässigkeitsbeiwerte.   |
| 7       | Festlegung von aktuellen mikrobiologischen Abbauzonen mit problematischen und unproblematischen mikrobiologischen Öko-Toxizitäten. Indirekter Nachweis toxischer Metaboliten. Kartierung der Iso-Toxizitäten.  |
| Schritt | Untersuchung   |
| 8       | <b>Bestimmung v. Einflussparametern auf die mikrobiologische Ökotoxizität:</b> Ermittlung v. Hemmstoffen (Schwermetalle u.a.). Kartierung d. Hemmparameter.  |
| 9       | <b>Bestimmung der allgemein nutzbaren mikrobiologischen Aktivität</b> (aerob+anaerob) per Respirationstests und Iso-Kartierung der ermittelten Druckabfälle.   |
| 10      | <b>Bestimmung der erreichbaren Abbauraten</b> (aerob + anaerob) per Mineralisationstests und Iso-Kartierung der erreichbaren Abbauraten.   |
| 11      | <b>Bestimmung maximal abbaubarer Schadstoffkonzentrationen</b> per Challenge-Tests und Iso-Kartierung der maximal abbaubaren Schadstoffkonzentrationen: Ermittlung von eventuellen Zonen, welche nicht mit DNBA behandelbar sind.  |
| 12      | <b>Option:</b> Detailliertere Untersuchungen bezüglich der optimalen hydrochemischen Abbaumilieus mit Referenzkulturen (Mikrokosmos-Studien).  |
| 13      | <b>Empfehlungen zur Anwendung von DNBA</b> und Definition der Anwendungsbedingungen.   |

### Essenzielle Verfahrens- und Messtechnik:

- Überwachung und Monitoring sollte zu Schadstoffen, potenziellen toxischen Metaboliten, hydrochemischen Parametern, wie pH, Eh, Elektronenakzeptoren und Substraten, etc. erfolgen.

### Grundanforderungen:

- Die Machbarkeitsstudien, inklusive Labor- und/oder Feldtests sollten die vorherig angegebenen Schritte 1 – 13 beinhalten.

### Endprodukte – Reinigung/Entsorgung:

- Endprodukte sollten nicht- oder kaum-toxisch sein und keine oder kaum-vorhandene toxische Metaboliten beinhalten, um auch das Verschlechterungsverbot zu berücksichtigen. Meist gilt auch als Sanierungsziel ein Verschlechterungsverbot der Schadstoffkonzentrationen und/oder -frachten. Ggf. ist für Metabolite eine Risikobewertung erforderlich.

## 11.2.1 Mikrobiologische in-situ Verfahren

### **Besonderheiten:**

- Eine detaillierte Machbarkeitsstudie mit Labor- u/o Feld-Pilottests ist nötig.

### **Vorteile:**

- angeregte mikrobiologische Prozesse können eine Eigendynamik entwickeln (unkontrollierte Verfahren ohne detaillierte Machbarkeitsstudie) erreichen keinen Stand der Technik und fallen aus dieser Arbeitshilfe.
- Behandlung v. Schadstoffquellen im Grundwasser (Aquifer), aber auch in der ungesättigten Zone
- Schwermetall-Immobilisierung: z.B. durch mikrobiologische Aktivität. Führt zur Ausfällung von ursprünglich löslichen Speziationen wie z.B. CrVI zu unlöslichen und am Mineralkorn adsorbierten Speziationen z.B. CrII & CrIII.

### **Nachteile:**

- Mikrobiologische Prozesse können zu weiterhin toxischen und stabilen Biotransformationsprodukten führen (z.B. der Umbau von polyfluorierten PFAS zu perfluorierten PFAS).
- Störfaktoren, z.B. mit mikrobiologischer Ökotoxizität können auftreten, z.B. gelöstes Quecksilber.

### **Mögliche Verfahrenskombinationen:**

Eine mikrobiologische Abbauleistung zur Schadstoffbeseitigung kann bei LHKW, BTEX, MKW u.a. deutlich gesteigert werden, wenn zunächst mit thermischen in-situ Sanierungsverfahren (TUBA, THERIS) die Quellstärke so reduziert wurde, dass die verbleibenden Belastungen dann sicher mikrobiologischen Abbauprozessen zur Verfügung stehen [1]. Weitere Kombinationen mit ISCR & ISCO sind möglich.

## 11.2.1 Mikrobiologische in-situ Verfahren

### Projektbeispiele (Auswahl):

- [1] U. Hiester, L. Bieber, M. Müller: Energiesparende, nachhaltige Grundwassersanierung - Erfahrungen mit einer thermischen In-situ-Sanierung (TISS). *altlasten spektrum* 27 (2018), 3, ISSN 0942-3818, S. 108-114.
- [2] Karg, F., Hintzen, U., Portune, T. & Olk, C. (2006): Feldtesterfahrungen zur Anwendung der DNBA (Dynamisierte Natural Bio-Attenuation) und Prozessoptimierung: Standort Rütgers Chemicals AG, Hanau. Tagungshandbuch Symposium In-Situ-Sanierungen DECHEMA / Frankfurt: 21/11/2006.
- [3] Karg, F., Hintzen, U., Portune, T. & Domalski, R. (2007): Feldtesterfahrungen zur Anwendung der DNBA (Dynamisierte Natural Bio-Attenuation) zur Prozessoptimierung: Standort RÜTGERS Chemicals AG, Hanau: - Altlastenspektrum: 2/2007, S. 61-67.
- [4] Karg (2007): Groundwater Treatment by Dynamized Natural Bio-Attenuation. Case Study: HAH, BTEX, PAH. Kongresshandbuch INTERSOL 2007, 29/03/2007, Ivry-sur-Seine.
- [5] Widman, S., Karg, F., Hintzen, U. & Portune, T. (2008). Fallbeispiel "PAK-Schadensfall". In HLOG (Ed.): *Altlasten Annual 2007* (pp.153-163). Wiesbaden: HLOG
- [6] Karg, F., Hintzen, U., Portune, T. & Domalski, R. (2007): Groundwater treatment by dynamized natural bio-attenuation (DNBA): Case study HAH, BTEX, PAH. 3rd European Conference on Natural Attenuation and In-situ Remediation. DECHEMA, Frankfurt 21/11/2007. Kongressbuch.
- [7] Karg, F. (2010): Green Remediation by Dynamization of Natural Bio-Reactors for Degradation of PAH, BTEX, HCH and chlorinated Solvents: Case Studies in France and Germany. SARCLE: Sustainable Approaches in Remediation of Contaminated Land in Europe (SARCLE-2010), Minutes of Congress, Ghent / Belgium 08-10/06/2010.
- [8] Karg, F. & Legendre, L. (2011): Case study of Sustainable Development: microbiological in-situ groundwater remediation (chlorinated solvents & Cr VI) via application of isotope fractioning and PCR for dynamization investigations of natural bio-reactors -. Minutes INTERSOL, Lyon le 30/03/2011.
- [9] Karg, F. (2011): Mikrobiologische Sanierung TCE- und PCE-kontaminierter Grundwasser-leiter durch DNBA (Dynamisierte Natural Bio-Attenuation. Vortragsbuch: Umgang mit Risiken von CKW-Altlasten. ChloroNet Solothurn / Schweiz 03/11/2011.
- [10] Portune, T. & Karg, F. (2011) : Dynamisierung eines aeroben und anaeroben mikrobiellen Abbaus von im Grundwasser gelösten Teerölinhaltstoffen durch Bio-Air Sparging an einem teerölverarbeitenden Standort in Hanau (Enhancing of aerobic and anaerobic microbial degradation of dissolved tar oil ingredients in the groundwater by bio-air sparging on a tar oil-processing site in Hanau) : *Altlastenspektrum* 6/2011, S. 251-256. . <https://altlastendigital.de/ce/dynamisierung-eines-aeroben-und-anaeroben-mikrobiellen-abbaus-von-im-grundwasser-geloesten-teeroelinhaltstoffen-durch-bio-air-sparging-an-einem-teerolverarbeitenden-standort-in-hanau/detail.html>
- [11] Karg, F. (2015) : Traitement in situ des polluants hétérocycliques NSO dans les eaux Souterraines par DNBA aérobie (In situ remediation of heterocyclic NSO pollutants in groundwater by aerobic DNBA). Minutes of INTERSOL Paris 25.03.2015
- [12] Karg, F., Grauf, T. & Hintzen, U. (2016): Practical example of a microbiological and chemical in situ remediation of a TCE, PCE, DCE, VC & CrVI contamination in a fractured aquifer (DNBA). [Exemple concret de la décontamination microbiologique et chimique in situ d'un aquifère karstique contenant des TCE, PCE, DCE, VC et CrVI (BAND)]. *Intersol Congress Minutes*, Lille 17th of March 2016.
- [13] Karg, F. (2020): Case Studies in Normandy and Central France of DNBA for Groundwater Remediation : Polar & chlorinated solvents (TCE, PCE, DCE, VC, BTEX, etc.) & best Cost-effectiveness (Dynamized Natural Bio-Attenuation). Etudes de cas en Normandie et Centre de la France de l'application de la BAND pour la dépollution des eaux souterraines : Solvants polaires & chlorés (TCE, PCE, DCE, VC, BTEX, etc.) et meilleurs coûts-avantages (BAND : Bio-Atténuation Naturelle Dynamisée). Minutes of Congress INTERSOL 06/2020.

## 11.2.1 Mikrobiologische in-situ Verfahren



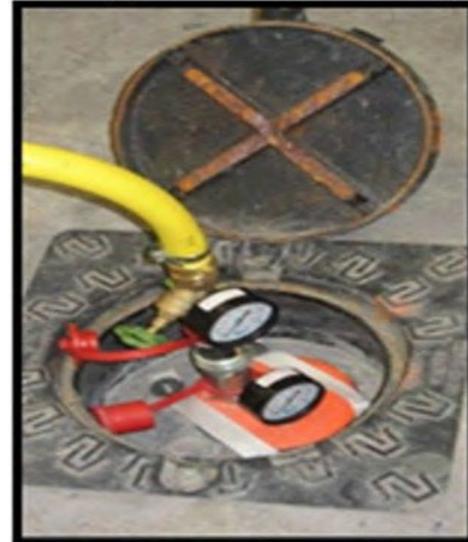
*Produktion von Bakterienkonsortien im Fermenter (Quelle: F. KARG 2020)*



*Beispiel einer DNBA-Substratum & Nährstoffverteilungsanlage zur Grundwassersanierung (LHKW) (Quelle: F. KARG 2020)*



*Injektion von anaeroben Schadstoffabbauenden Bakterien unter Stickstoff (Quelle: F. KARG 2020).*



*Injektion von Substraten & Nährstoffen (Quelle: F. KARG 2020).*

## 11.3.1 In-situ Immobilisierung

Bei einer **in-situ Immobilisierung** werden Schadstoffe mit einem Bindemittel so fixiert, dass eine weitere Migration oder Schadstoffausbreitung vermieden oder unterbunden wird. Diese Bindemittel können adsorptiv wirksame oder chemische reaktiv bindende Hilfsstoffe sein.  
Adsorptiv wirksame Hilfsstoffe sind z.B. partikuläre oder kolloidale Aktivkohlen oder Polymere.

### Kreuzmatrix **SCHADSTOFF(-gruppe) (NAPL, gelöst, Feststoff) – QUELLEN-TYP:**

| Medium  | Schadstoffe / Schadstoffgruppe  | Schadstoffquellen-Typen          |  |  |   |  |            |            |
|---|---|----------------------------------|--|--|---|--|------------|------------|
|   |   | A-1                              | A-2  | A-3  | B   | C-1  | C-2        | C-3        |
|   |   | NAPL                             |  |  | ungesättigte und gesättigte Zone: gelöste Schadstoffe u. gut wasserlösliche Phase | feste Schadstoffe                              |            |            |
| NAPL nur in der ungesättigten Zone              | LNAPL bis in die gesättigte Zone  | DNAPL bis in die gesättigte Zone | mit wasserlöslichen: lösl. Metalle(oxide), Salze, Pestizide u.a. | Transport als Suspension (z.B. im Kluft-GW-Leiter) |   | wasserlöslich. flücht. Transformationsprodukte |            |            |
| NAPL (flüssigphasen)                            | 1 Organische Leichtphase (LNAPL) inkl. Suspension: BTEX, KW                                     | -                                | -  |  |   |  |            |            |
|   | 2 Organische Schwerphase (DNAPL) inkl. Suspension: a) LHKW, Naphthalin b) PAK, Teeröl (flüssig) | -                                |  | -  |   |  |            |            |
|   | 3 Mineralische Reinphase: z.B. Quecksilber  | -                                |  | -  |   |  |            |            |
| in der Bodenluft- GELÖSTE flüchtige Schadstoffe | 4a Organische Schadstoffe (BTEX, MKW, usw.)   |                                  |  |  |   |  |            |            |
|   | 4b Halogen-organische Schadstoffe (z.B. LHKW)   |                                  |  |  |   |  |            |            |
|   | 4c PFAS-FTOH  |                                  |  |  |   |  |            |            |
|   | 5 Anorganische Schadstoffe (Quecksilber, Arsin, usw.)   |                                  |  |  |   |  |            |            |
| im Wasser GELÖSTES Schadst.                     | 6 Organ. Schadstoffe (Poren-, Schicht-, Grundwasser) alle                                       |                                  |  |  | ++ bis +++  |  |            |            |
|   | 7 PFAS (Poren-, Schicht-, Grundwasser)  |                                  |  |  | (+)   |  |            |            |
|   | 8 Mineral. Schadstoffe (Poren-, Schicht-, Grundwasser)  |                                  |  |  | + bis +++   |  |            |            |
| FESTSTOFFE, feststoffartige Schadst.            | 9 Mineralische Feststoffe, Cyanide, Zink, Zinn, Blei, Schwermetalle                             |                                  |  |  |   | ++ bis +++                                     | ++ bis +++ | ++ bis +++ |
|   | 10 Organische Feststoffe: fester Teer, Polymer-Ausschussabfälle                                 |                                  |  |  |   | ++ bis +++                                     | ++ bis +++ | ++ bis +++ |
|   | 11 Stark sorbierte Organika (z.B. PFAS, PAK, PCB, PCDD/F)                                       |                                  |  |  |   | (+ bei C-1a)                                   | -          | ++ bis +++ |

#### Erläuterung:

DEFINITION: PHASE (NAPL) = flüssig bei 10-15°C

Schematische Anwendungsübersicht zur Erstbewertung - ersetzt keine Einzelfallprüfung!

#### Bewertung:

|  |   |
|--|---|
|  | gute Anwendungsmöglichkeiten bei bestimmten Randbedingungen               |
|  | prinzipiell für alle oder einzelne Schadstoffe dieser Stoffgruppe möglich |
|  | keine Anwendung möglich   |
|  | keine Fallüberschneidung / Anwendung                                      |

+++ : sehr gut geeignet  
++ : gut geeignet i.d.R.  
+ : bedingt geeignet  
- : nicht geeignet

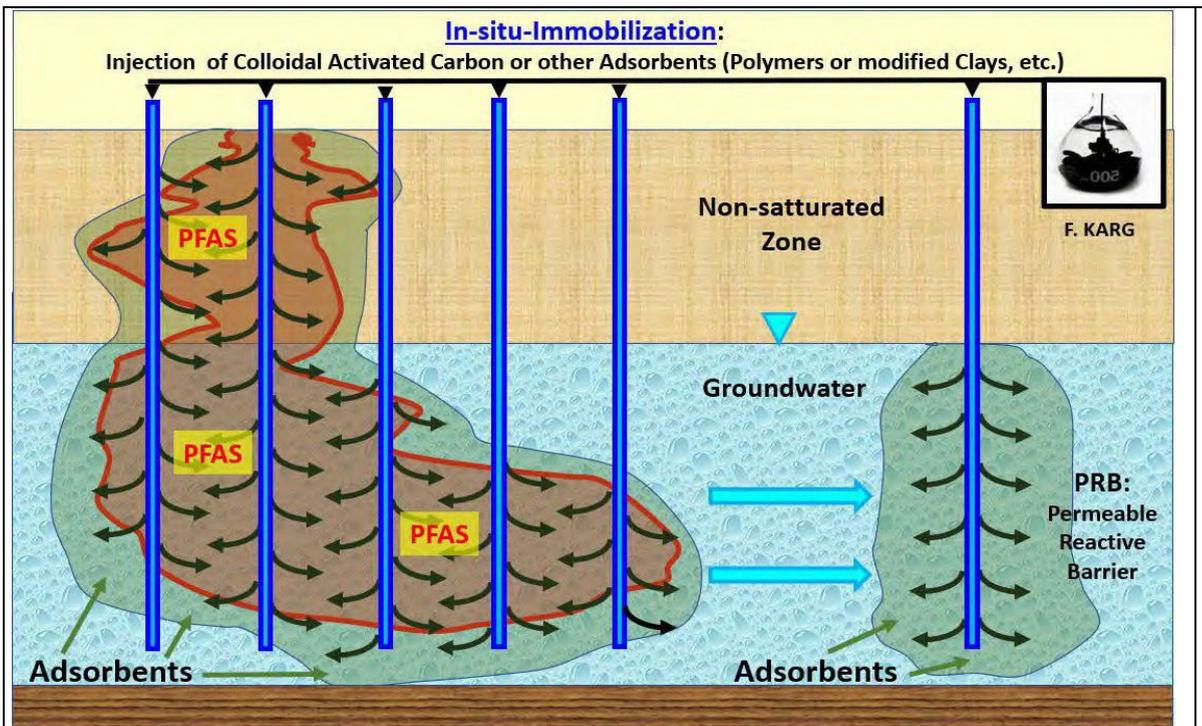
### Besondere Hinweise (Schadstoffgruppe – Quellentyp):

- **3\_A-1 u. 3\_A-3: mineral. Reinphase:**  
z.B. Quecksilber mit TMT15
- **7\_B: gelöste PFAS im Grundwasser**  
PFAS-Stabilisierung (temporär) z.B. kolloidale Aktivkohle
- **8\_B: gelöste mineralische Schadstoffe im Grundwasser**  
z.B. Umwandlung von löslichem, mobilen Cr VI in unlösliches Cr III

### Verfahrensdetails:

Das Beispiel zeigt die in-situ Immobilisierung von PFAS durch kolloidale Aktivkohle durch Injektionen in eine Schadstoffquelle oder auch zum Abschneiden von Schadstoffbahnen im Aquifer, z.B. als permeable reaktive Barriere (PRB: Permeable Reactive Barrier).

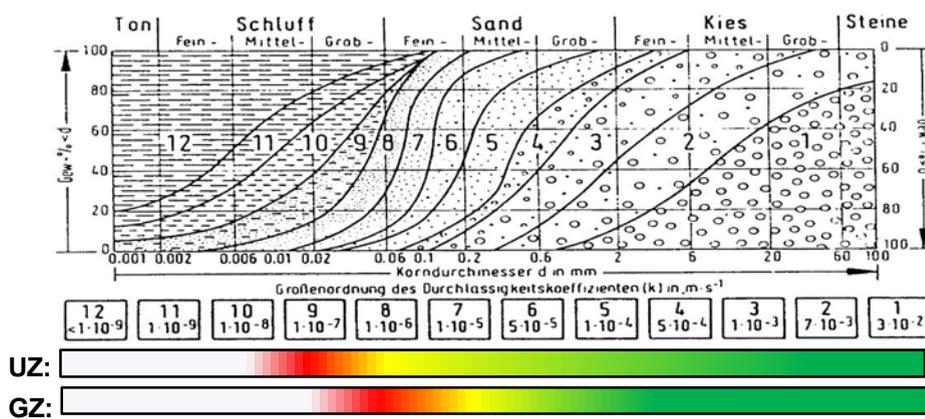
# 11.3.1 In-situ Immobilisierung



Quelle: In-situ-Immobilisierung von PFAS mit injizierter kolloidaler Aktivkohle in die Schadstoffquelle oder zum Abschneiden von Fahnen im Aquifer (F. KARG 2023).

## Anwendungsbereiche:

- gut bis mäßig gut durchlässiger Boden (Sand bis schluffiger Feinsand)
- Schadstoffen, die durch den in-situ Eintrag von kolloidaler Aktivkohle oder anderen Adsorptionsmitteln fixiert werden
- Schadstoffen, die mit Reaktionsmitteln abgebaut oder chemisch fixiert werden



Quelle: Abhängigkeit des Durchlässigkeitsbeiwerts ( $k_i$ ) von der Korngrößenverteilung von Lockergesteinen nach Krapp (Prinz, H.: Abriß der Ingenieurgeologie, 1997. ISBN: 3-432-92333-3)

Quelle: ITVA H1

## Machbarkeitsstudien:

Die Durchführung von Machbarkeitsstudien im Labor und wenn möglich auch im Gelände mit Feld-Pilottests wird dringend empfohlen, damit die Dimensionierung der Behandlung zur technischen Anwendungssicherheit und Budgetsicherheit führt.

Für die geeignete Dimensionierung einer in-situ Sorptionsbarriere müssen darüber hinaus möglichst genaue Informationen zur tiefenspezifischen Fracht der zu sorbierenden Schadstoffe vorliegen.

Machbarkeitsstudien müssen aus diesem Grund die folgenden Informationen bereitstellen:

- tiefenspezifische Grundwasserfließgeschwindigkeit
- tiefenspezifische Schadstoffkonzentrationen
- jahreszeitliche Stabilität von Grundwasserfließrichtung und -geschwindigkeit
- potenzielle konkurrierende Stoffe um die Sorptionsstellen des vorgesehenen Adsorbens

## 11.3.1 In-situ Immobilisierung

### Essenzielle Verfahrens- und Messtechnik:

Die schadstoffspezifische Adsorptionskapazität oder chemische, reaktive Bindungskapazität je kg der Bindemittel sollte regelmäßig geprüft werden. Potenzielle Lösungsvermittler, welche die Sorptionskapazitäten der Sorptionsmittel sowie Störstoffe, welche die chemischen Bindereaktionen vermindern können, sollten überwacht werden (z.B. Lösungsvermittler wie Phenole, polare Lösemittel oder Störstoffe, welche die chemischen Bindereaktionen abfangen können, wie z.B. lösliche Metalle, welche die Bindereaktion z.B. von TMT15 mit Quecksilber verringern können.).

### Grundanforderungen:

Ausreichende Kenntnis der Geologie und Hydrogeologie, Schadstoffverteilung sowie Labor- u/o Feldtest-Daten zur Durchlässigkeit, Sorptionsraten bzw. chemische Bindungsraten sowie Einfluss potentieller Störstoffe, usw..

### Endprodukte – Reinigung/Entsorgung:

Bodenmaterial mit adsorbierten, eingelagerten Schadstoffen oder chemisch gebundenen Schadstoffen mit deutlich verringerter Schadstoffmobilität und Löslichkeit in der Bodenluft und im Wasser.

### Besonderheiten:

- Untergrundverhältnisse wie geologische Schichtung, Durchlässigkeiten, Schadstofflöslichkeiten, Hydrochemie des Grundwassers (pH, Eh, Lösungsvermittler, konkurrierende Stoffe, etc.) müssen berücksichtigt werden.
- Labor- oder Feld-Machbarkeitstudien sollten durchgeführt werden.

### Vorteile:

Als in-situ-Quellen-Sanierungsmethode kann diese Technologie erhebliche Sanierungskosten einsparen und große Schadstoffmengen fixieren und immobilisieren.

### Nachteile:

Die Immobilisierung verlangt eine längerfristige Überwachung (5 – 10 Jahre), wie z.B. Grundwassermonitoring und eventuell auch Sickerwassermonitoring bei einer Anwendung in der ungesättigten Zone.

### Mögliche Verfahrenskombinationen:

Diese Technologie kann mit fast allen anderen Verfahrenstechniken kombiniert werden, welche den Immobilisierungseffekt nicht abschwächen oder aufheben.

### Projektbeispiele (Auswahl):

1. Karg, F., Hintzen, U., Schoendorf, T., Biester, H; Villalobos, M-J. (2013): Sites pollués par du Mercure: Réhabilitation in-situ par des dispositifs novateurs de traitement / **Mercury Polluted Sites: In-situ Remediation devices for innovative treatments**. Minutes of Congress, Intersol Lyon / France : 26 – 28th of March 2013.
2. Karg, F., Hintzen, U., Schoendorf, T., Biester, H; Villalobos, M-J. (2012): In-situ Stabilization & Immobilization of Mercury contaminated Soils & Sediments and passive Groundwater Remediation with Effective Low Cost Alloy Materials: Case Studies in Germany and France. Minutes of Congress & <http://www.nicole.org/uploadedfiles/nicole-brussels-december2012.pdf>. Technical Meeting NICOLE on 4 December 2012 at Solvay in Brussels
3. Karg, F. (2022): PFAS: Management of Pollution and Health Risks: Site Investigations, Environmental Chemistry, Risk Assessment (sensitive ERP and others), Regulatory Thresholds and Treatments (including volatile PFAS FTOH in soils, groundwater, soil gas & ambient air). International PFAS Congress, Minutes of Congress, Paris 20 October 2022.
4. Karg, F. & Hintzen, U. (2023): PFAS preiswert und sicher sanieren. VDI-Umweltmagazin (Verein Deutscher Ingenieure), 1-2 / 2023, S. 46 – 49.
5. Gao J. et al. (2023): Organic amendments for in situ immobilization of heavy metals in soil: A review. Chemosphere, Volume 335, September 2023, 139088

## 11.3.2 In-situ chemische Oxidation (ISCO)

Beim **in-situ chemischen Oxidation (ISCO-Verfahren)** werden Oxidationsmittel in den Untergrund verbracht, um vor allem organische Schadstoffe oxidativ zu zerstören. Als Oxidationsmittel werden dabei vor allem Natrium- & Kaliumpermanganat ( $\text{NaMnO}_4$  und  $\text{KMnO}_4$ ) sowie Magnesiumperoxid ( $\text{MgO}_2$ ), Wasserstoffperoxid ( $\text{H}_2\text{O}_2$ ) oder Natriumpersulfat ( $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_8$ ), z.B. mit Aktivatoren (Katalysatoren), wie z.B. NaOH oder Eisencitratenzyme, etc. eingesetzt.

ISCO-Anwendungen eignen sich unter anderem auch für Quellensanierungen. Vorteile von ISCO sind vor allem die rasche Zerstörung der organischen Schadstoffe.

### Kreuzmatrix SCHADSTOFF(-gruppe) (NAPL, gelöst, Feststoff) – QUELLEN-TYP:

| Medium   | Schadstoffe / Schadstoffgruppe  | Schadstoffquellen-Typen               |                                     |                                     |                   |  |  |   |     |
|--|---|---------------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|-------------------|--|--|---|-----|
|  |   | A-1                                   | A-2                                 |                                     | A-3               | B<br>ungesättigte und<br>gesättigte Zone:<br>gelöste Schadstoffe<br>u. gut wasserlösliche<br>Phase | C-1  | C-2   | C-3 |
|  |   | NAPL                                  |                                     |                                     | feste Schadstoffe |  |  |   |     |
|  |   | NAPL nur in der<br>ungesättigten Zone | LNAPL bis in die<br>gesättigte Zone | DNAPL bis in die<br>gesättigte Zone |                   | mit wasserlös.<br>Anteilen:<br>lösliche Metalle(oxide),<br>Salze, Pestizide u.a.                   | Transport als<br>Suspension (z.B. im<br>Kluft-GW-Leiter) | wasserlösliche Anteil u.<br>flüchtige Transformationsprodukte |     |
| NAPL (Flüssigphasen)                                   | 1 Organische Leichtphase (LNAPL) inkl. Suspension: BTEX, KW   | -                                     | -                                   |                                     |                   |  |  |   |     |
|  | 2 Organische Schwerphase (DNAPL) inkl. Suspension:<br>a) LHKW, Naphthalin<br>b) PAK, Teeröl (flüssig) | -                                     |                                     | -                                   |                   |  |  |   |     |
|  | 3 Mineralische Reinphase: z.B. Quecksilber  | -                                     |                                     | -                                   |                   |  |  |   |     |
| in der Bodenluft,<br>GELÖSTE, flüchtige<br>Schadstoffe | 4a Organische Schadstoffe (BTEX, MKW, usw.)   |                                       |                                     |                                     | +++               |  |  |   |     |
|  | 4b Halogen-organische Schadstoffe (z.B. LHKW)   |                                       |                                     |                                     | +++               |  |  |   |     |
|  | 4c PFAS-FTOH  |                                       |                                     |                                     | -                 |  |  |   |     |
|  | 5 Anorganische Schadstoffe (Quecksilber, Arsin, usw.)   |                                       |                                     |                                     | -                 |  |  |   |     |
| im Wasser<br>GELÖSTE Schadst.                          | 6 Organ. Schadstoffe (Poren-, Schicht-, Grundwasser) alle   |                                       |                                     |                                     | +++               |  |  |   |     |
|  | 7 PFAS (Poren-, Schicht-, Grundwasser)  |                                       |                                     |                                     | -                 |  |  |   |     |
|  | 8 Mineral. Schadstoffe (Poren-, Schicht-, Grundwasser)  |                                       |                                     |                                     | +                 |  |  |   |     |
| FESTstoffe,<br>feststoffartige Schadst.                | 9 Mineralische Feststoffe, Cyanide, Zink, Zinn, Blei, Schwermetalle                                   |                                       |                                     |                                     |                   | -  | -  | -   |     |
|  | 10 Organische Feststoffe: fester Teer, Polymer-Ausschussabfälle                                       |                                       |                                     |                                     |                   | -  | -  | (+)   |     |
|  | 11 Stark sorbierte Organika (z.B. PFAS, PAK, PCB, PCDD/F)   |                                       |                                     |                                     |                   | (+)  | -  | (+)   |     |

**Erläuterung:** DEFINITION: PHASE (NAPL) = flüssig bei 10-15°C

Schematische Anwendungsübersicht zur Erstbewertung - ersetzt keine Einzelfallprüfung!

**Bewertung:**

|  |   |
|--|---|
|  | gute Anwendungsmöglichkeiten bei bestimmten Randbedingungen               |
|  | prinzipiell für alle oder einzelne Schadstoffe dieser Stoffgruppe möglich |
|  | keine Anwendung möglich   |
|  | keine Fallüberschneidung / Anwendung                                      |

|     |                       |
|-----|-----------------------|
| +++ | : sehr gut geeignet   |
| ++  | : gut geeignet i.d.R. |
| +   | : bedingt geeignet    |
| -   | : nicht geeignet      |

### Besondere Hinweise (Schadstoffgruppe – Quellentyp):

Folgende Schadstoffe können durch ISCO-Anwendungen behandelt werden:

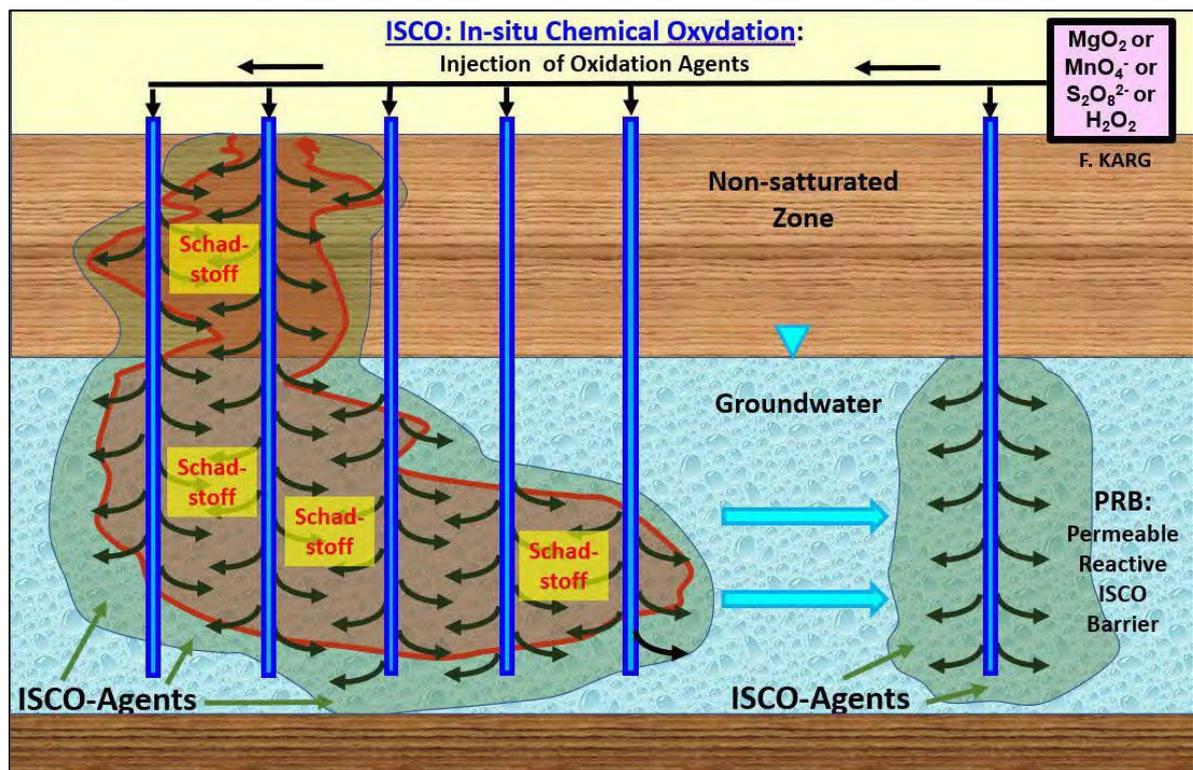
## 11.3.2 In-situ chemische Oxidation (ISCO)

| Schadstofftypen    | Permanganat | Magnesiumperoxid | Persulfat | Fentons Reagenz |
|--------------------|-------------|------------------|-----------|-----------------|
| PFAS               | -           | -                | -/+       | -               |
| PCB                | -           | -                | +         | -               |
| Chlorierte Ethene  | ++          | +                | ++        | ++              |
| Chlorierte Ethane  | -           | -                | + / ++    | + / -           |
| Chlorierte Methane | - / +       | -                | + / ++    | + / -           |
| KW (HC5-40)        | +           | +                | ++        | ++              |
| BTEX               | +           | +                | ++        | ++              |
| Benzol             | -           | +                | + / ++    | ++              |
| HET                | +           | +                | ++        | ++              |
| PAK                | + / ++      | - / +            | + / ++    | + / ++          |

++ sehr gut, + gut, - kaum

In manchen Fällen können ISCO-Verfahren zusätzlichen Sauerstoff für aerobe mikrobiologische Sanierungsanwendungen liefern und auch im weiteren hydrogeologischen Abstrom neue Elektronenakzeptoren für einen anaeroben mikrobiologischen Schadstoffabbau liefern.

Das nachfolgende Schema zeigt Anwendungen für ISCO-Anwendungen bei Schadstoffquellen und als permeable reaktive Barrieren um Schadstoffzonen abzuschneiden:



## 11.3.2 In-situ chemische Oxidation (ISCO)

### Verfahrensdetails:

Basierend auf technisch-ökonomische Machbarkeitsstudien werden für verschiedene Altlasten- bzw. Schadstoffquellen-Fragestellungen Oxidationsmittel und Injektions- oder Versickerungsanwendungen sowie nötige Mengen an Oxidationsmitteln ermittelt.

Bei der Praxisanwendung kann von folgenden Reaktionen der Oxidationsmittel ausgegangen werden, die dazu führen die organischen Schadstoffe zu zerstören oder anorganische Stoffe zu oxidieren:

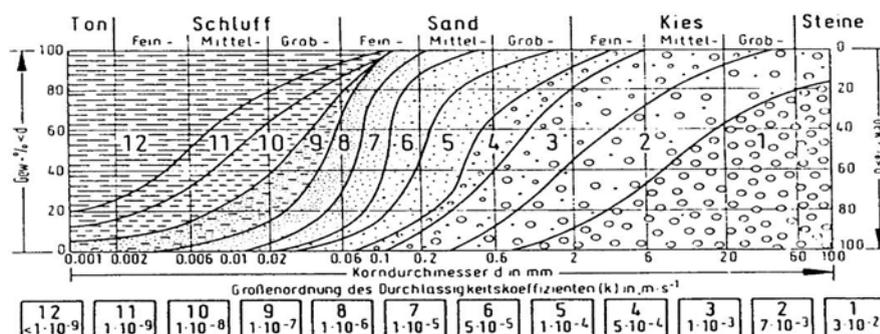
| Oxidationsmittel: | Redoxgleichung  | Eh [V] |
|-------------------|---|--------|
| Magnesiumperoxid  | $MgO_2 + 2 H^+ + 2 e^- \rightarrow Mg(OH)_2$              | 1,5    |
| Permanganat       | $MnO_4^- + 4 H^+ + 3 e^- \rightarrow MnO_2 + 2 H_2O$      | 1,7    |
| Peroxodisulfat    | $S_2O_8^{2-} + 2 H^+ + 2 e^- \rightarrow 2 HSO_4^-$       | 2,1    |
| Peroxodisulfat    | $S_2O_8^{2-} (+KAT) \rightarrow \cdot SO_4^- + SO_4^{2-}$ | 2,7    |
| Fenton's Reagens  | $H_2O_2 (Fe^{2+}) \rightarrow \cdot OH + OH^-$            | 2,8    |

Außer mit Schadstoffen reagieren die Oxidationsmittel auch mit Bodenmatrixbestandteilen, und können diese oxidieren, wie z.B.:  $Fe^{2+}$  zu  $Fe^{3+}$ ,  $Mn^{2+}$  zu  $Mn^{4+}$  und  $S^{2-}$  zu  $S^0$  oder zu  $SO_4$ .

Diese stehen dann bei einem darauffolgenden anaeroben mikrobiologischen Schadstoffabbau, z.B. im hydrogeologischen Abstrom, als Elektronenakzeptoren auch Bakterien wieder zur Verfügung.

### Anwendungsbereiche:

- gut bis mäßig gut durchlässiger Boden (Sand bis schluffiger Feinsand)



*Quelle:*  
Abhängigkeit des Durchlässigkeitsbeiwerts ( $k_i$ ) von der Korngrößenverteilung von Lockergesteinen nach Krapp (Prinz, H. Abriß der Ingenieurgeologie., 1997. ISBN: 3-432-92333-3)

UZ:

GZ:

*Quelle:* ITVA H1

### Machbarkeitsstudien:

Technisch-ökonomische Machbarkeitsstudien im Labor und als Feldversuche müssen ermitteln, welche Oxidationsmittel und Injektions- oder Versickerungsanwendungen sowie nötige Mengen an Oxidationsmitteln angewendet werden können.

### Essenzielle Verfahrens- und Messtechnik:

Wichtige Überwachungsmaßnahmen beziehen sich auf Redoxpotential (Eh), pH, Schadstoffe und Reaktionsprodukte.

## 11.3.2 In-situ chemische Oxidation (ISCO)

### Grundanforderungen:

Grundanforderungen sind eine ausreichende Altlastenerkundung, die Feststellung des Schadstoffmassenpotentials sowie technisch-ökonomische Machbarkeitsstudien im Labor und in Feldversuchen zur Ermittlung, welche Oxidationsmittel und Injektions- oder Versickerungsanwendungen sowie welche nötigen Mengen an Oxidationsmitteln angewendet werden müssen.

### Endprodukte – Reinigung/Entsorgung:

Endprodukte sind meist mineralisierte Schadstoffreaktionsprodukte.

### Besonderheiten:

Besonderheiten sind, dass außer mit den Schadstoffen die Oxidationsmittel auch mit Bodenmatrixbestandteilen reagieren. Dabei können diese oxidieren, wie z.B.:  $\text{Fe}^{2+}$  zu  $\text{Fe}^{3+}$ ,  $\text{Mn}^{2+}$  zu  $\text{Mn}^{4+}$  und  $\text{S}^{2-}$  zu  $\text{S}^0$  oder zu  $\text{SO}_4^{2-}$ . Diese stehen dann bei einem darauffolgenden anaeroben mikrobiologischen Schadstoffabbau, z.B. im hydrogeologischen Abstrom, als Elektronenakzeptoren auch Bakterien wieder zur Verfügung.

In manchen Fällen können ISCO-Verfahren zusätzlichen Sauerstoff für aerobe mikrobiologische Sanierungsanwendungen liefern

### Vorteile:

Schadstoffe können völlig zerstört werden. In manchen Fällen können ISCO-Verfahren zusätzlichen Sauerstoff für aerobe mikrobiologische Sanierungsanwendungen liefern.

Außer mit den Schadstoffen können die Oxidationsmittel auch mit Bodenmatrixbestandteilen reagieren. Dabei können diese oxidieren, wie z.B.:  $\text{Fe}^{2+}$  zu  $\text{Fe}^{3+}$ ,  $\text{Mn}^{2+}$  zu  $\text{Mn}^{4+}$  und  $\text{S}^{2-}$  zu  $\text{S}^0$  oder zu  $\text{SO}_4^{2-}$ . Diese stehen dann bei einem darauffolgenden anaeroben mikrobiologischen Schadstoffabbau, z.B. im hydrogeologischen Abstrom, als Elektronenakzeptoren auch Bakterien wieder zur Verfügung.

### Nachteile:

Bei starker Anwesenheit von natürlichen organischen Bodenbestandteilen, wie Huminstoffe, Torf und anderem organischen Kohlenstoff, können in einer Konkurrenzreaktion die Oxidationsmittel weggefangen werden und stehen den weniger oder fast nicht mehr zum Schadstoffabbau zur Verfügung. Diese potentiellen Nachteile müssen durch Machbarkeitsstudien vorab geklärt werden.

### Mögliche Verfahrenskombinationen:

ISCO-Anwendungen können mit darauffolgenden mikrobiologischen Anwendungen kombiniert werden. Dies muss aber vorab über Machbarkeitsstudien geklärt werden.

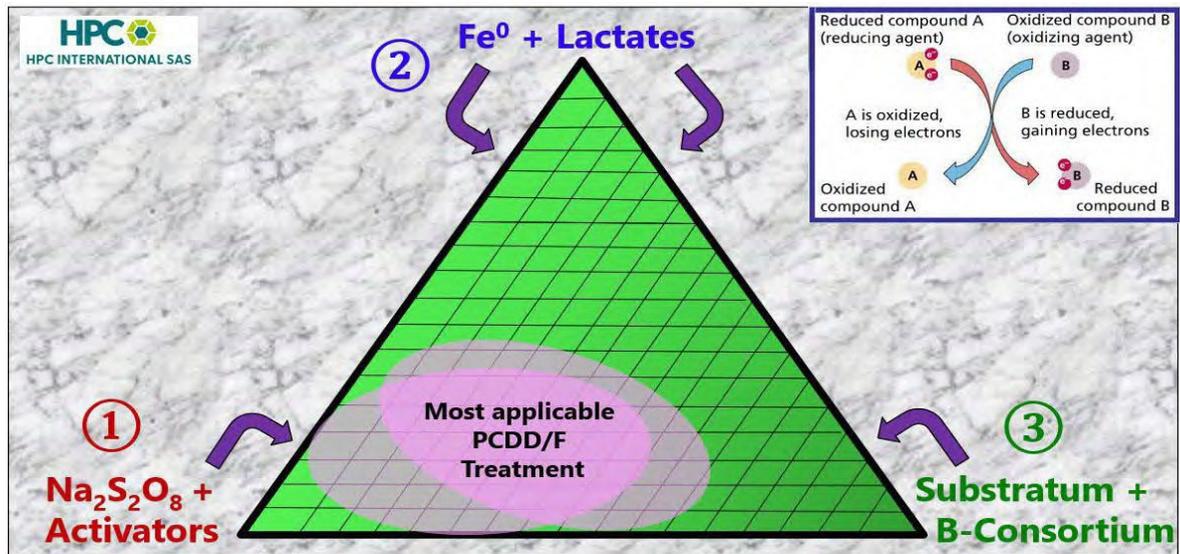
### Projektbeispiele (Auswahl):

Beispiel: Anwendung bei Dioxinkontaminationen (PCDD/F) zusammen mit Di- & Trichlorphenolen und 2,4-D- & 2,4,5-T-Pestiziden:

Es handelt sich hierbei um eine Verfahrenskombination aus ISCO zur Voroxidierung von PCDD/F, Di- & Trichlorphenolen und Phenoxyalkan-Carboxylsäure-Pestiziden sowie anschließender anaerober mikrobiologischer Dechlorierung eines kontaminierten Oberbodens:

## 11.3.2 In-situ chemische Oxidation (ISCO)

Anwendungskombination von ISCO mit Persulfat und anschließender anaerober mikrobiologische Behandlung von PCDD/F-, DCP-, TCP-, 2,4-D & 2,4,5-T-kontaminiertem Boden.

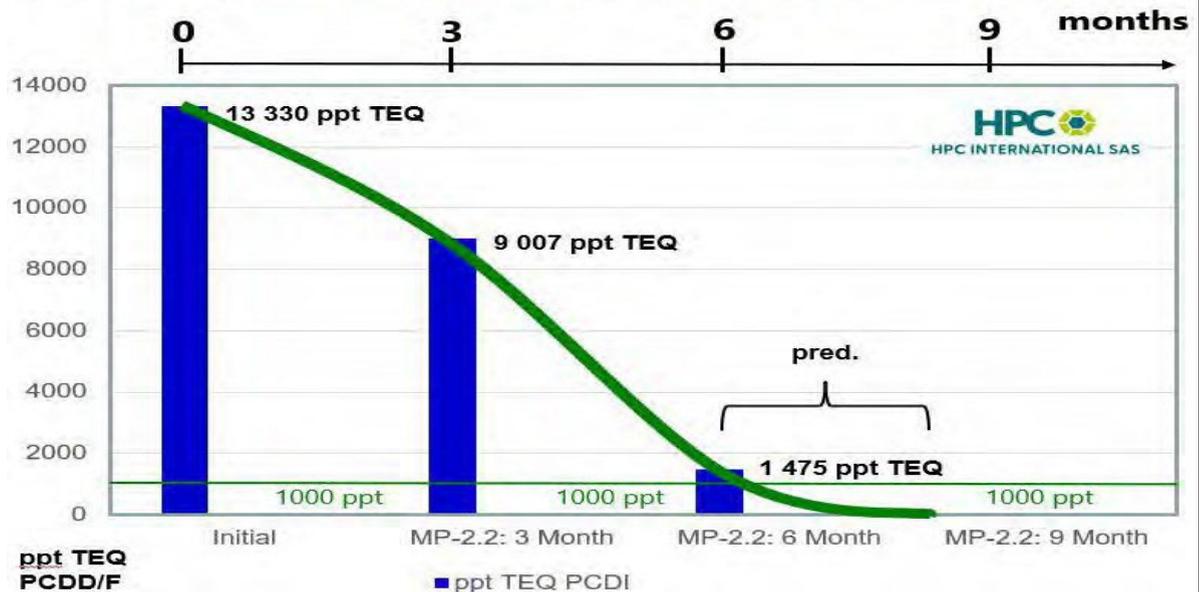


ISCO-Anwendung durch Versickerung und In-situ-Durchmischung des Oberbodens zur Behandlung der PCDD/F, DCP, TCP sowie 2,4-D- & 2,4,5-T-Kontaminationen (Quelle: F. Karg)



Kombinierter Anwendungserfolg von ISCO + Mikrobiologie bei PCDD/F nach 8 Monaten von 13 300 ng/kg TEC an PCDD/F auf < 1 500 ng/kg TEC an PCDD/F:

### PCDD/F-Treatment of Soil by HPC MP-2.2. after 8 months



Quelle: Frank KARG, 2023

## 11.3.2 In-situ chemische Oxidation (ISCO)

### Projektbeispiele (Auswahl):

1. Karg, F. (2013) : Health Risk based Dioxin & POP Management in EC: European Community: PCDD/F- & PCB-Contaminations & Methodology for site investigations, Health Risk Assessment and ISCO- & DNBA-Remediation. Sharing Lessons Learned - Dioxin/POPs Pollution Assessment and Remediation in Vietnam. Minutes of Congress of Ministry of Environment & USAID - Da Nang, Vietnam, December 1-4, 2013.
2. Siegrist, R.L. (2010): In situ chemical oxidation for groundwater remediation - technology practices manual. ESTCP Project ER-0623. [ER-200623](#)
3. ITRC (2005): Technical and Regulatory Guidance for In Situ Chemical Oxidation of Contaminated Soil and Groundwater. Council TITaR, editor. [Report pdf](#)
4. Huling, S. G., and Pivetz, B. E. (2006): In-situ chemical oxidation (No. EPA/600/R-06/072). Environmental Protection Agency, Washington, DC. Office of Water. [Report pdf](#)

## 11.3.3 In-situ Chemical Reduktion (ISCR)

Bei einer **in-situ chemischen Reduktion** werden zur Gefahrenabwehr Schadstoffe reaktiv so umgewandelt, dass es zu einer Verminderung von deren Toxizität, Löslichkeit, Biodisponibilität, u.s.w. führt.

### Kreuzmatrix **SCHADSTOFF(-gruppe) (NAPL, gelöst, Feststoff) – QUELLEN-TYP:**

| Medium   | Schadstoffe / Schadstoffgruppe  | Schadstoffquellen-Typen          |  |   |   |  |           |           |
|--|---|----------------------------------|--|---|---|--|-----------|-----------|
|  |   | A-1                              | A-2  | A-3   | B   | C-1  | C-2       | C-3       |
|  |   | NAPL                             |  |   | ungesättigte und gesättigte Zone: gelöste Schadstoffe u. gut wasserlösliche Phase | feste Schadstoffe                                      |           |           |
| NAPL nur in der ungesättigten Zone               | LNAPL bis in die gesättigte Zone  | DNAPL bis in die gesättigte Zone | mit wasserlös. Anteilen: lösli. Metalle(oide), Salze, Pestizide u.a. | Transport als Suspension (z.B. im Klufft-GW-Leiter) |   | wasserlösli. Anteil u. flücht. Transformationsprodukte |           |           |
| NAPL (Flüssigphasen)                             | 1 Organische Leichtphase (LNAPL) inkl. Suspension: BTEX, KW                                     | -                                | -  |   |   |  |           |           |
|  | 2 Organische Schwerphase (DNAPL) inkl. Suspension: a) LHKW, Naphthalin b) PAK, Teeröl (flüssig) | -                                |  | (+)   |   |  |           |           |
|  | 3 Mineralische Reinphase: z.B. Quecksilber  | -                                |  | -   |   |  |           |           |
| In der Bodennluft- GELÖSTE flüchtige Schadstoffe | 4a Organische Schadstoffe (BTEX, MKW, usw.)   |                                  |  |   | -   |  |           |           |
|  | 4b Halogen-organische Schadstoffe (z.B. LHKW)   |                                  |  |   | -   |  |           |           |
|  | 4c PFAS-FTOH  |                                  |  |   | -   |  |           |           |
|  | 5 Anorganische Schadstoffe (Quecksilber, Arsin, usw.)   |                                  |  |   | -   |  |           |           |
| im Wasser GELÖSTE Schadst.                       | 6 Organ. Schadstoffe (Poren-, Schicht-, Grundwasser) alle                                       |                                  |  |   | ++ bis +++  |  |           |           |
|  | 7 PFAS (Poren-, Schicht-, Grundwasser)  |                                  |  |   | -   |  |           |           |
|  | 8 Mineral. Schadstoffe (Poren-, Schicht-, Grundwasser)  |                                  |  |   | ++  |  |           |           |
| FESTSTOFFE, feststoffartige Schadst.             | 9 Mineralische Feststoffe, Cyanide, Zink, Zinn, Blei, Schwermetalle                             |                                  |  |   |   | + bis +++  | + bis +++ | + bis +++ |
|  | 10 Organische Feststoffe: fester Teer, Polymer-Ausschussabfälle                                 |                                  |  |   |   | + bis +++  | + bis +++ | + bis +++ |
|  | 11 Stark sorbierte Organika (z.B. PFAS, PAK, PCB, PCDD/F)                                       |                                  |  |   |   | -  |           | -         |

**Erläuterung:** DEFINITION: PHASE (NAPL) = flüssig bei 10-15°C

Schematische Anwendungsübersicht zur Erstbewertung - ersetzt keine Einzelfallprüfung!

**Bewertung:**

|  |   |
|--|---|
|  | gute Anwendungsmöglichkeiten bei bestimmten Randbedingungen               |
|  | prinzipiell für alle oder einzelne Schadstoffe dieser Stoffgruppe möglich |
|  | keine Anwendung möglich   |
|  | keine Fallüberschneidung / Anwendung                                      |

+++ : sehr gut geeignet  
 ++ : gut geeignet i.d.R.  
 + : bedingt geeignet  
 - : nicht geeignet

### **Besondere Hinweise (Schadstoffgruppe – Quellentyp):**

- **2\_A-3: bei LHKW:**  
erste Anwendungen bei LHKW-Emulsionen (s. Literaturhinweise)
- **6\_B: gelöste organische Schadstoffe im Wasser:**  
Bewertung bezieht sich auf halogenierte Kohlenwasserstoffe (LHKW, CKW, Chlorbenzole, Chlorphenole, Chlor-Pestizide, sowie auch PCDD/F im Boden usw.)
- **8\_B: gelöste mineralische Schadstoffe im Wasser:**  
z.B. Umwandlung von Chrom VI in Chrom II & III

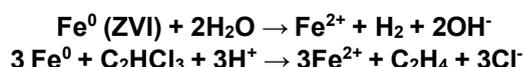
### **Verfahrensdetails:**

Beispiele für in-situ chemische reduktive Prozesse:

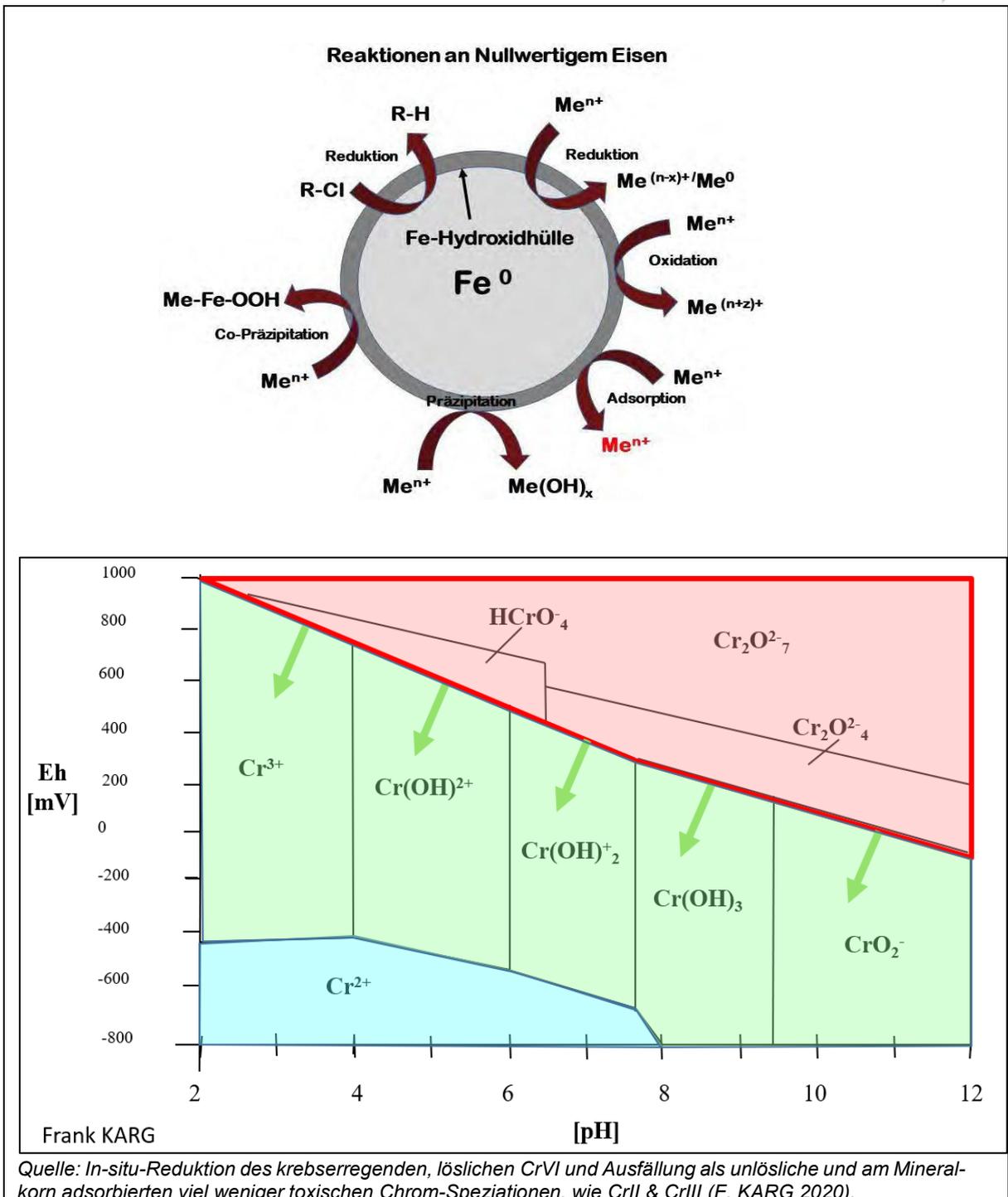
- Reduktion von krebserregendem, löslichem CrVI und Ausfällung als unlösliches und am Mineral-korn adsorbiertem CrII & CrIII (Abb.1).
- Reduktion durch null-valentem Eisen (ZVI: Zero Valent Iron) von halogenierten organischen Schadstoffen zu dehalogenierten, weniger toxischen Formen (Abb. 2).

Für ISCR gibt es am Markt verschiedene Produkte, die z.B. mit nullwertigen Eisen (ZVI) kombiniert werden und auch nano- oder mikro-metrisch eingesetzt werden.

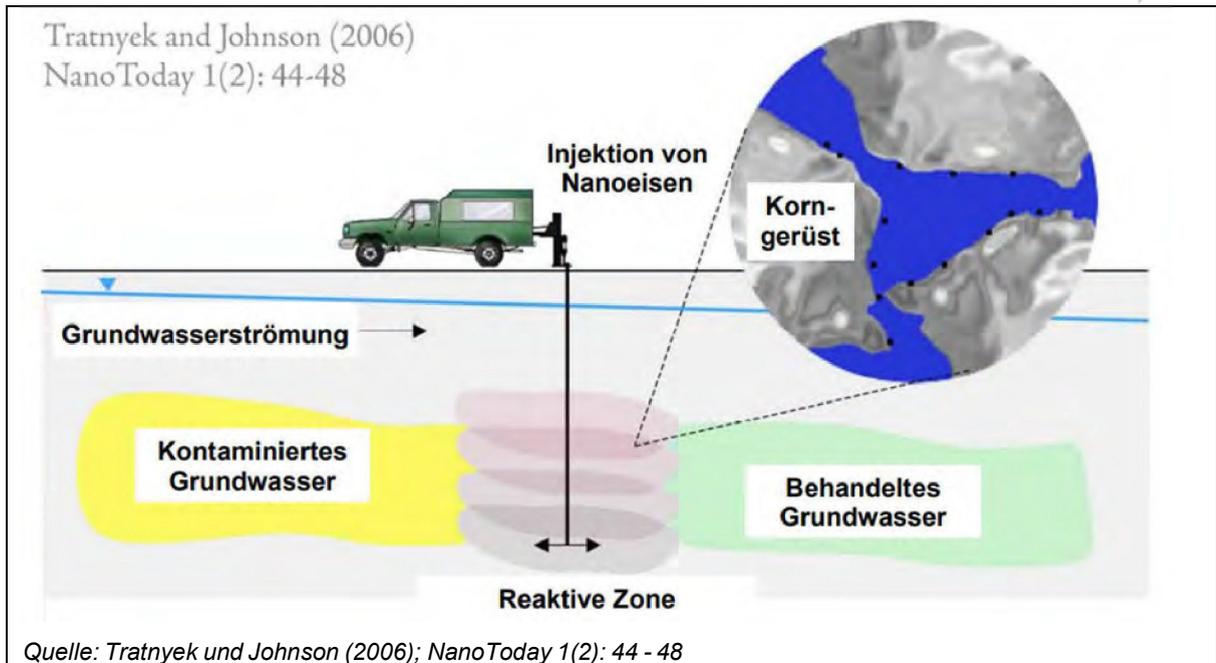
Die Reaktionen mit TCE (Trichlorethen) bis zum Ethen sind beispielsweise beim Einsatz von null- valentem Eisen (ZVI = Zero Valent Iron):



### 11.3.3 In-situ Chemical Reduktion (ISCR)

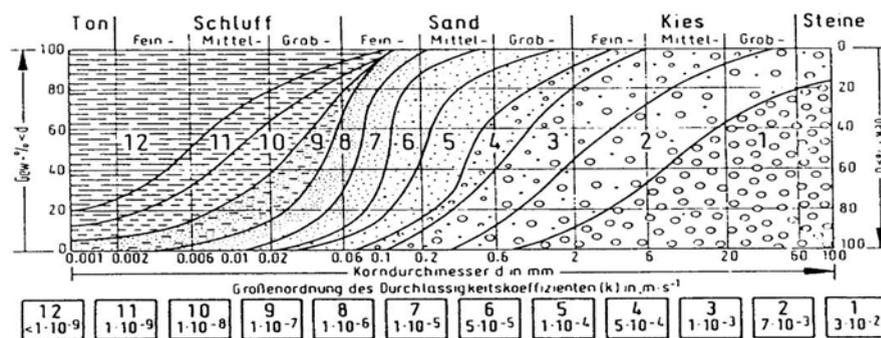


## 11.3.3 In-situ Chemical Reduktion (ISCR)



### Anwendungsbereiche:

- gut bis mäßig gut durchlässiger Boden (Sand bis schluffiger Feinsand)



Quelle: Abhängigkeit des Durchlässigkeitskoeffizienten ( $k_f$ ) von der Korngrößenverteilung von Lockergesteinen nach Krapp (Prinz, H. Abriß der Ingenieur-geologie., 1997. ISBN: 3-432-92333-3)

UZ:

GZ:

Quelle: ITVA H1

### Machbarkeitsstudien:

Die Durchführung von Machbarkeitsstudien im Labor und wenn möglich auch im Gelände mit Feld-Pilottests wird zwingend empfohlen. Ziel solcher Studien sind sichere Dimensionierungen der Behandlungsschritte bis zur technischen Anwendungssicherheit und zur Budgetsicherheit. Die Anwendung erfolgt z.B. durch Injektionen reduzierender Reaktanten, ähnlich den Substraten bei anaeroben mikrobiologischen in-situ Behandlungen. Bauwerke wie permeable reaktive Wände oder Funnel & Gate (PRB: Permeable Reactive Barrier) werden dabei eher zum Abschneiden von Grundwasserfahnen bzw. zur Sicherung von Schadstoffquellen verwendet. Hierbei sind die Unterhalts- und Betriebskosten dieser Bauwerke über mehrere Jahrzehnte zu berücksichtigen. Effekte des Klimawandels sollten über die Betriebszeit berücksichtigt werden (u.a. Grundwasserneubildung, sinkende GW-Spiegel).

### Essenzielle Verfahrens- und Messtechnik:

Das Anwendungsmilieu, wie z.B. das Redoxpotential und pH müssen genauso überwacht werden wie die Schadstoffe selbst und die eventuell erwünschten Reduktionsprodukte.

### Grundanforderungen:

Ausreichende Kenntnis der Geologie und Hydrogeologie, Schadstoffverteilung sowie Labor- und/oder Feldtest-Daten zur Durchlässigkeit, Reduktionsraten und eventuelle Reduktionsprodukte, usw.

## 11.3.3 In-situ Chemical Reduktion (ISCR)

### Endprodukte – Reinigung/Entsorgung:

Endprodukte sind entweder weniger kritische Stoffe, wie z.B. Ethen aus der PCE-, TCE-, DCE- und VC-Reduktion oder solche die sich so am Mineralkorn adsorbieren, dass diese nicht mehr nachweisbar sind (z.B. CrII & CrIII aus der CrVI-Reduktion).

Bei der Verwendung von nullwertigem Eisen als Reduktionsmittel können jedoch auch Ammoniumverbindungen aus Nitraten und elementarer Wasserstoff aus Protonen an den reaktiven Oberflächen entstehen. Dreiwertige, oxidierte Eisenverbindungen können zu löslichem zweiwertigem Eisen reduziert werden. Diese Aspekte sind im Rahmen eines entsprechenden Monitorings zu berücksichtigen.

### Besonderheiten:

- Untergrundverhältnisse wie geologische Schichtung, Durchlässigkeiten, Schadstofflöslichkeiten, Hydrochemie des Grundwassers (pH, Eh, Oxide, Sulfat, Nitrat, etc.) sind zu berücksichtigen.
- Fallende Grundwasserspiegel können sich auf den Betrieb einer PRB auswirken, wenn diese über Jahrzehnte ihre Funktion erhalten soll (u.a. GW-Flur-Abstand, Gradient, GW-Neubildung).

### Vorteile:

Als in-situ-Quellen-Sanierungsmethode kann diese Technologie erhebliche Sanierungskosten einsparen und schwierig-sanierbare Schadstoffe abbauen oder unschädlich machen.

### Nachteile:

- Eine starke Präsenz von Oxiden, Sulfat, Nitrat und hohen Redoxpotentialen (z.B. Eh > 50 mV) können die Wirkung von nullwertigem Eisen oder anderen Reduktionsmitteln vermindern, so dass ggf. Nachinjektionen erfolgen müssen.
- Labor u/o Feld-Machbarkeitsstudien sollten durchgeführt werden.

### Mögliche Verfahrenskombinationen:

ISCR kann bei manchen Schadstofftypen und hydrochemischen Verhältnissen mit anaeroben mikrobiologischen Sanierungstechnologien kombiniert werden.



Verpressung von EHC Feststoff Reagenzien (Zellulose mit nullwertigem Eisen) im Schadensherd mittels TSE® Injektion



### Projektbeispiele (Auswahl):

- [1] Karg, F., Grauf, T. & Hintzen, U. (2016): Practical example of a microbiological and chemical in situ remediation of a TCE, PCE, DCE, VC & CrVI contamination in a fractured aquifer (DNBA). Intersol Congress Minutes, Lille 17<sup>th</sup> March 2016.
- [2] Elsner, M., Schwarzenbach, R.P., Haderlein, S.B. (2004): Reactivity of Fe (II)-bearing minerals toward reductive transformation of organic contaminants. Environmental Science & Technology, 38(3), 799-807. doi:10.1021/es0345569 <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0045653523013553>
- [3] Nullwertige Eiseninjektion in Hanau zur chemischen LCKW-Reduktion, Quelle: Sensatec GmbH, Berlin.
- [4] Eisen(II)-Sulfatinjektion flüssig in Bochum zur Chromatreduktion, Quelle: Sensatec GmbH, Köln.