

# Grundwasseraufbereitung

ITVA-Arbeitshilfe H1-14

**Altenbockum / Beitinger / Brandt**

Ingenieurtechnischer Verband für Altlastenmanagement und Flächenrecycling e.V. (ITVA)

[www.itv-altlasten.de](http://www.itv-altlasten.de)

#### **Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek**

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie. Detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://www.dnb.d-nb.de> abrufbar.

## **IMPRESSUM**

#### **Herausgeber und Vertrieb:**

Ingenieurtechnischer Verband für Altlastenmanagement  
und Flächenrecycling e.V. (ITVA)  
Invalidenstraße 34  
D-10115 Berlin  
Tel.: 030 / 48 63 82 80  
Fax: 030 / 48 63 82 82  
E-Mail: [info@itv-altlasten.de](mailto:info@itv-altlasten.de)  
Internet: [www.itv-altlasten.de](http://www.itv-altlasten.de)

#### **Autoren**

Michael Altenbockum, Altenbockum & Partner, Geologen, Lothringerstr. 61, 52070 Aachen  
Eberhard Beitinger, Ing.-Büro E. Beitinger, Talstr. 64, 69198 Schriesheim  
Dr. Doreen Brandt, eneotech Umwelt GmbH, Mallaustraße 72, 68219 Mannheim

#### **unter Mitarbeit von**

Katharina Berens, Aachen; Martin Cornelsen, Essen; Andreas Feige-Munzig, München;  
Dr. Andrea Herch, Neu-Isenburg; Reiner Melzer, Neu-Isenburg; Marc Pavonet, Aachen;  
Dr. Gerd Rippen, Göttingen

#### **Bildnachweis**

Abb. 3, 4: ACO Beton, Bürstadt; Abb. 45, 49: BDZ – Bildungs- und Demonstrationszentrum für dezentrale Abwasserbehandlung; Abb. 30, 31: DELTA Engineering & Chemistry GmbH; Abb. 27: dm Dehydrat AG; Abb. 38: Donau Carbon GmbH & Co. KG; Abb. 6, 7: Eberhard Beitinger; Abb. 15: EKOF Flotation GmbH; Abb. 14: Encyclopaedia Britannica Inc.; Abb. 5, 36: Stefan Neumann / eneotech Umwelt GmbH; Abb. 11: Tobias Zierner / eneotech Umwelt GmbH; Abb. 48: Thomas Rötche / eneotech Umwelt GmbH; Abb. 26: Flottweg SE; Abb. 21: FuMA-Tech GmbH; Abb. 46: Horst Bruns / Horst Bruns Umwelttechnik; Abb. 28: IBL UMWELT-UND BIOTECHNIK GmbH; Abb. 25: KRAUSSE FILTRATION; Abb. 40: Lausitzer Mitteldeutsche Bergbau-Verwaltungsgesellschaft mbh (LMBV); Abb. 9, 16, 17, 18, 19, 29, 33, 37: Michael Altenbockum; Abb. 12, 13: Nordic Water GmbH; Abb. 47: PIA e.V.; Abb. 34: Prantner GmbH Verfahrenstechnik, [www.prantner.de](http://www.prantner.de); Abb. 8: Redox Water Technology B.V.; Abb.: 39: VWS MPP Systems B.V.; Abb. 20: W.E.T. Wasser.Energie.Technologie GmbH; Abb. 22: Zweckverband Wasserversorgungsgruppe Mühlbach, Bad Rappenau, [www.wvg-muehlbach.de](http://www.wvg-muehlbach.de)

Endredaktion, Layout: Sabine Gier, ITVA e.V.

© 2012 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, Übersetzungen, Mikroverfilmungen und die Einspeicherung und Verarbeitung in elektronischen Systemen.

Für den Inhalt sind die Autoren verantwortlich. Empfehlungen haben keinerlei rechtliche Verbindlichkeit.

Autoren und Herausgeber übernehmen keine Gewährleistung und Haftung für die Richtigkeit, Zuverlässigkeit, Aktualität, Qualität oder Vollständigkeit der bereitgestellten Informationen sowie die Beachtung privater Rechte Dritter.

**ISBN 978-3-00-038566-7**

## Inhaltsverzeichnis

|                                                                        | Seite |
|------------------------------------------------------------------------|-------|
| Tabellenverzeichnis.....                                               | IV    |
| Abbildungsverzeichnis.....                                             | IV    |
| Abkürzungsverzeichnis.....                                             | VI    |
| 1. Veranlassung und Zielsetzung .....                                  | 1     |
| 2. Einführung.....                                                     | 1     |
| 3. Begriffe und Definitionen .....                                     | 4     |
| 3.1 Stand der Technik .....                                            | 4     |
| 3.2 Beste verfügbare Technik .....                                     | 6     |
| 3.3 Sonstige Begriffsbestimmungen.....                                 | 8     |
| 4. Rahmenbedingungen .....                                             | 9     |
| 4.1 Rechtliche Rahmenbedingungen .....                                 | 9     |
| 4.2 Honorierung von Planungsleistungen.....                            | 10    |
| 4.3 Arbeitsschutz und Anlagensicherheit.....                           | 10    |
| 4.3.1 Arbeitsschutz .....                                              | 10    |
| 4.3.2 Gefährdungen durch Kampfmittel.....                              | 11    |
| 4.3.3 Arbeiten in kontaminierten Bereichen.....                        | 11    |
| 4.3.4 Anforderungen der europäischen Maschinenrichtlinie .....         | 12    |
| 4.3.5 Anforderungen der Betriebssicherheitsverordnung (BetrSichV)..... | 12    |
| 4.4 Technische Rahmenbedingungen .....                                 | 13    |
| 4.4.1 Allgemeine Rahmenbedingungen .....                               | 13    |
| 4.4.2 Standortbedingungen und Aufstellungsart.....                     | 14    |
| 4.4.3 Infrastruktur .....                                              | 14    |
| 4.4.4 Nebenanlagen.....                                                | 15    |
| 4.4.5 Umgebungsschutz .....                                            | 15    |
| 4.4.6 Steuerung .....                                                  | 15    |
| 4.4.7 Datenfernüberwachung / -übertragung (DFÜ) .....                  | 17    |
| 4.4.8 Wartung und Reparatur.....                                       | 17    |
| 5. Anwendungsvoraussetzungen .....                                     | 18    |
| 5.1 Hydraulische Eigenschaften .....                                   | 18    |
| 5.2 Wasserspezifisch relevante Parameter und Störstoffe .....          | 19    |
| 5.3 Stoffgruppenspezifische Eigenschaften.....                         | 20    |
| 5.4 Monitoring und Überwachung.....                                    | 24    |

---

|       |                                                                                    |    |
|-------|------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 6.    | Wasserförderung.....                                                               | 25 |
| 7.    | Chemisch-physikalische Verfahren .....                                             | 26 |
| 7.1   | Phasenabtrennung .....                                                             | 27 |
| 7.2   | Härtestabilisierung .....                                                          | 30 |
| 7.3   | pH-Wert-Einstellung .....                                                          | 33 |
| 7.4   | Fällung .....                                                                      | 36 |
| 7.5   | Flockung .....                                                                     | 39 |
| 7.6   | Sedimentation .....                                                                | 42 |
| 7.7   | Flotation .....                                                                    | 45 |
| 7.8   | Sand-/Kiesfiltration .....                                                         | 48 |
| 7.9   | Membranfiltration .....                                                            | 51 |
| 7.10  | Ionenaustausch.....                                                                | 54 |
| 7.11  | Schlammmentwässerung .....                                                         | 57 |
| 7.12  | (Chemische) Oxidation .....                                                        | 60 |
| 7.13  | (Chemische) Reduktion.....                                                         | 63 |
| 7.14  | Katalytische Oxidation.....                                                        | 66 |
| 7.15  | Strippung (Desorption) .....                                                       | 68 |
| 7.16  | Aktivkohleadsorption .....                                                         | 71 |
| 7.17  | Extraktion .....                                                                   | 75 |
| 8.    | Biologische Verfahren .....                                                        | 78 |
| 8.1   | Grundlegendes zum biologischen Abbau .....                                         | 78 |
| 8.1.1 | Anwendungsbereich von biologischen Prozessen bei der<br>Grundwassersanierung ..... | 79 |
| 8.1.2 | Prozessrelevante Parameter .....                                                   | 79 |
| 8.1.3 | Zusatzstoffe .....                                                                 | 80 |
| 8.2   | Verfahrensüberblick .....                                                          | 81 |
| 8.2.1 | Verfahren mit suspendierter Biomasse.....                                          | 81 |
| 8.2.2 | Verfahren mit sessiler Biomasse .....                                              | 81 |
| 8.2.3 | Kombinierte Verfahren .....                                                        | 82 |
| 8.3   | Verfahrensweisen .....                                                             | 82 |
| 8.3.1 | Kontinuierlich durchflossene Systeme.....                                          | 82 |
| 8.3.2 | Diskontinuierlich betriebene Systeme.....                                          | 83 |
| 8.3.3 | Kombination mit anderen Verfahren .....                                            | 84 |
| 8.4   | Reaktortypen und Auslegung .....                                                   | 85 |
| 9.    | Verfahrensauswahl .....                                                            | 87 |
| 10.   | Grundwasserableitung .....                                                         | 89 |
| 11.   | Kosten und Wirtschaftlichkeit .....                                                | 90 |

---

|           |                                                                                                    |     |
|-----------|----------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 11.1      | Kostenfaktoren .....                                                                               | 90  |
| 11.1.1    | Investitionskosten.....                                                                            | 90  |
| 11.1.2    | Betriebskosten .....                                                                               | 91  |
| 11.1.3    | Rückbaukosten .....                                                                                | 91  |
| 11.2      | Wirtschaftlichkeit .....                                                                           | 91  |
| 11.3      | Optimierung .....                                                                                  | 92  |
| 12.       | Umweltauswirkungen .....                                                                           | 93  |
| 13.       | Fazit & Ausblick.....                                                                              | 95  |
|           | Literaturverzeichnis .....                                                                         | 96  |
| Anhang    |                                                                                                    |     |
| Anhang 1: | Chemisch-physikalische Stoffeigenschaften relevanter LCKW .....                                    | 104 |
| Anhang 2: | Chemisch-physikalische Stoffeigenschaften ausgesuchter Mineral-<br>ölkohlenwasserstoffe (MKW)..... | 105 |
| Anhang 3: | Chemisch-physikalische Stoffeigenschaften monoaromatischer<br>Verbindungen (BTEX) .....            | 107 |
| Anhang 4: | Chemisch-physikalische Stoffeigenschaften aromatischer<br>Verbindungen (PAK) nach EPA.....         | 108 |
| Anhang 5: | Chemisch-physikalische Stoffeigenschaften perfluorierter Tenside<br>(PFT).....                     | 110 |

## Tabellenverzeichnis

|                                                                                           |    |
|-------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Tabelle 1: Tätigkeiten, Rechtsgrundlagen und Maßnahmen bei der Grundwassersanierung ..... | 9  |
| Tabelle 2: Matrix Schad- und Störstoffe – Verfahren.....                                  | 87 |

## Abbildungsverzeichnis

|                                                                                                                                                                                                                                    |    |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Abb. 1: Fahnenlängen ausgesuchter altlastenrelevanter Schadstoffgruppen.....                                                                                                                                                       | 21 |
| Abb. 2: Prinzipschema Ölabscheiderabscheider mit vorgeschalteter Schlammtrennung (Quelle: Fachdokumente online, <a href="http://www.fachdokumente.lubw.badenwuerttemberg.de">www.fachdokumente.lubw.badenwuerttemberg.de</a> ..... | 27 |
| Abb. 3: Ölabscheider .....                                                                                                                                                                                                         | 27 |
| Abb. 4: Koaleszenzabscheider (Quelle: <a href="http://www.eco-2.de">www.eco-2.de</a> ) .....                                                                                                                                       | 27 |
| Abb. 5: Schnellreaktor .....                                                                                                                                                                                                       | 30 |
| Abb. 6: Neutralisierung mit Spezialkalk im Filterbehälter .....                                                                                                                                                                    | 33 |
| Abb. 7: Rieselanlage zur Ausfällung von Eisen .....                                                                                                                                                                                | 36 |
| Abb. 8: Inline-Flockungsreaktor (Quelle: <a href="http://www.redox-wt.nl">www.redox-wt.nl</a> ).....                                                                                                                               | 39 |
| Abb. 9: Flockung .....                                                                                                                                                                                                             | 39 |
| Abb. 10: Verfahrensschema Flockung und Sedimentation (JEKEL 1987) .....                                                                                                                                                            | 39 |
| Abb. 11: Überlauf Lamellenabscheider.....                                                                                                                                                                                          | 42 |
| Abb. 12: Lamellenabscheider (Johnson Lamella Separator®).....                                                                                                                                                                      | 42 |
| Abb. 13: Prinzipskizze Lamellenabscheider.....                                                                                                                                                                                     | 42 |
| Abb. 14: Funktionsweise der Flotation.....                                                                                                                                                                                         | 45 |
| Abb. 15: Flotationsreaktor .....                                                                                                                                                                                                   | 45 |
| Abb. 16: Druckfilterbehälter mit Armaturen und Mannloch.....                                                                                                                                                                       | 48 |
| Abb. 17: Düsenboden mit Filterdüsen im Inneren des Druckfilterbehälters .....                                                                                                                                                      | 48 |
| Abb. 18: Düsenstern im Innern eines Druckfilters .....                                                                                                                                                                             | 49 |
| Abb. 19: Arten der Membranverfahren .....                                                                                                                                                                                          | 51 |
| Abb. 20: Aufbau und Betrieb der Membran der Ultrafiltrationsanlage .....                                                                                                                                                           | 51 |
| Abb. 21: Prinzip der Nanofiltration (Quelle: <a href="http://www.fumatech.de">www.fumatech.de</a> ).....                                                                                                                           | 52 |
| Abb. 22: Nanofiltrationsanlage.....                                                                                                                                                                                                | 52 |
| Abb. 23: Betrieb von Ionenaustauscherharzen in Säulen (ROHM AND HAAS 2008.- In: Ionenaustausch für Laien; <a href="http://www.wallner-wasser.at">www.wallner-wasser.at</a> ).....                                                  | 54 |
| Abb. 24: Ionenaustauscheranlage (ROHM AND HAAS 2008.- In: Ionenaustausch für Laien; <a href="http://www.wallner-wasser.at">www.wallner-wasser.at</a> ).....                                                                        | 54 |

|          |                                                                                                                                                   |    |
|----------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Abb. 25: | Vollautomatische Kammerfilterpresse (Quelle: <a href="http://www.krausse-filtration.de">www.krausse-filtration.de</a> ) .....                     | 57 |
| Abb. 26: | Dekanter .....                                                                                                                                    | 57 |
| Abb. 27: | Funktionsschema Siebbandpresse.....                                                                                                               | 57 |
| Abb. 28: | UV-Photooxidationsanlage zur Behandlung von Grundwasser.....                                                                                      | 60 |
| Abb. 29: | Reduktionsstufe einer Grundwasser-Aufbereitungsanlage .....                                                                                       | 63 |
| Abb. 30: | Funktionsskizze der katalytischen Oxidation .....                                                                                                 | 66 |
| Abb. 31: | Anlage zur katalytischen Oxidation.....                                                                                                           | 66 |
| Abb. 32: | Fließschema einer Strippanlage (TOUISSANT et al. 1998).....                                                                                       | 68 |
| Abb. 33: | Kunststofffüllkörper .....                                                                                                                        | 68 |
| Abb. 34: | Strippverfahren (Quelle: <a href="http://www.prantner.de">www.prantner.de</a> ) .....                                                             | 69 |
| Abb. 36: | Mehrstufige Aktivkohlefiltration.....                                                                                                             | 71 |
| Abb. 35: | Prinzip der Adsorption an Aktivkohle (VON KIENTLE & BÄDER 1980) .....                                                                             | 71 |
| Abb. 37: | Aktivkohle.....                                                                                                                                   | 72 |
| Abb. 38: | Adsorptionsisotherme.....                                                                                                                         | 72 |
| Abb. 39: | Poröse Trägeroberfläche.....                                                                                                                      | 75 |
| Abb. 40: | MPPE-Anlage Grundwassersanierung Schwarze Pumpe (LMBV).....                                                                                       | 75 |
| Abb. 41: | Schema eines SBR-Zyklus (WETTER & BRÜGGING 2004) .....                                                                                            | 83 |
| Abb. 43: | Prinzipskizze eines Festbettreaktors (Quelle: <a href="http://www.wasser-wissen.de">www.wasser-wissen.de</a> ) .....                              | 85 |
| Abb. 44: | belüfteter Wirbelbettreaktor (Quelle: <a href="http://www.sanying.com.tw">www.sanying.com.tw</a> ).....                                           | 85 |
| Abb. 45: | Schematische Darstellung eines Wirbelbettverfahrens (Quelle: <a href="http://www.abwasser-dezentral.de">www.abwasser-dezentral.de</a> ) .....     | 85 |
| Abb. 42: | Prinzipskizze Belebungsverfahren (Quelle: <a href="http://www.wasser-wissen.de">www.wasser-wissen.de</a> ) .....                                  | 85 |
| Abb. 46: | Walzentauchkörper (Quelle: <a href="http://www.brunsumwelttechnik.de">www.brunsumwelttechnik.de</a> ) .....                                       | 86 |
| Abb. 47: | Schematische Darstellung eines Rotationstauchkörpers (Quelle: <a href="http://www.bdz-abwasser.de">www.bdz-abwasser.de</a> ) .....                | 86 |
| Abb. 48: | Pflanzenkläranlage in Lauchhammer .....                                                                                                           | 86 |
| Abb. 49: | Schematische Darstellung eines bewachsenen Bodenfilters (Quelle: <a href="http://www.abwasser-dezentral.de">www.abwasser-dezentral.de</a> ) ..... | 86 |
| Abb. 50: | Typische Bausteine einer Grundwasseraufbereitung .....                                                                                            | 88 |

## Abkürzungsverzeichnis

|                |                                                                                                            |
|----------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| ArbSchG        | Arbeitsschutzgesetz                                                                                        |
| AK             | Aktivkohle                                                                                                 |
| AOP            | Advanced Oxidation Processes                                                                               |
| BAT            | Best Available Technology – Beste verfügbare Technik (BVT)                                                 |
| BET-Oberfläche | Kennzahl für die aktive Oberfläche von Kohlen                                                              |
| BBodSchG       | Bundesbodenschutzgesetz                                                                                    |
| BetrSichV      | Betriebssicherheitsverordnung                                                                              |
| BGBI.          | Bundesgesetzblatt                                                                                          |
| BGI            | Berufsgenossenschaftliche Information                                                                      |
| BGR            | Berufsgenossenschaftliche Regel                                                                            |
| BImSchG        | Bundes-Immissionsschutzgesetz                                                                              |
| BImSchV        | Bundes-Immissionsschutzverordnung                                                                          |
| BSB            | Biologischer Sauerstoffbedarf                                                                              |
| BTEX           | Aromatische Kohlenwasserstoffe,<br>Benzol, Toluol, Ethylbenzol , Xylol                                     |
| BVT            | Beste verfügbare Technik(en)                                                                               |
| ChemVerbotsV   | Chemikalien-Verbotsverordnung                                                                              |
| CPU            | Central Processing Unit                                                                                    |
| CSB            | Chemischer Sauerstoffbedarf                                                                                |
| DFÜ            | Datenfernübertragung                                                                                       |
| DNAPL          | Dense Non Aqueous Phase Liquid (Schwerphase)                                                               |
| EDTA           | Ethylendiamin-tetraacetat<br>als organische Säure ein hervorragender Komplexbildner für viele Me-<br>talle |
| EN             | Europäische Norm                                                                                           |
| GefStoffV      | Gefahrstoffverordnung                                                                                      |
| GFK            | Glasfaserverstärkter Kunststoff                                                                            |
| GPSG           | Geräte- und Produktsicherheitsgesetz                                                                       |
| GPSGV          | Geräte- und Produktsicherheitsgesetzesverordnung                                                           |



|       |                                                                                                                                                                                                                                                                                             |
|-------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| HMX   | Cyclotetramethylentetranitramin, Oktogen, Sprengstoff                                                                                                                                                                                                                                       |
| HSE   | Health Safety Environment                                                                                                                                                                                                                                                                   |
| ISCO  | In Situ Chemical Oxidation                                                                                                                                                                                                                                                                  |
| KCN   | Kaliumcyanid                                                                                                                                                                                                                                                                                |
| KrWG  | Kreislaufwirtschaftsgesetz                                                                                                                                                                                                                                                                  |
| LCKW  | Leichtflüchtige chlorierte Kohlenwasserstoffverbindungen                                                                                                                                                                                                                                    |
| LHKW  | Leichtflüchtige halogenierte Kohlenwasserstoffverbindungen                                                                                                                                                                                                                                  |
| LNAPL | Light Non Aqueous Phase Liquid (Leichtphase)                                                                                                                                                                                                                                                |
| MBBR  | Moving Bed Biofilm Reaktor                                                                                                                                                                                                                                                                  |
| MKW   | Mineralölkohlenwasserstoffverbindungen                                                                                                                                                                                                                                                      |
| MNA   | Monitored Natural Attenuation                                                                                                                                                                                                                                                               |
| MPPE  | Macro Porous Polymer Extraction                                                                                                                                                                                                                                                             |
| MSR   | Messen Steuern Regeln                                                                                                                                                                                                                                                                       |
| MTBE  | Methyl-tert-butylether                                                                                                                                                                                                                                                                      |
| NTA   | Nitrilotriessigsäure.<br>Komplexbildner. In wässriger Lösung bildet NTA stabile Komplexverbindungen mit Metallionen                                                                                                                                                                         |
| OEG   | Obere Explosionsgrenze                                                                                                                                                                                                                                                                      |
| PAK   | Polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe                                                                                                                                                                                                                                                |
| PCB   | Polychlorierte Biphenyle                                                                                                                                                                                                                                                                    |
| PE    | Polyethylen                                                                                                                                                                                                                                                                                 |
| PFT   | Perfluorierte Tenside:<br><ul style="list-style-type: none"> <li>- perfluorierte Alkylsulfonate (PFAS); häufigster Vertreter PFOS</li> <li>- perfluorierte Carbonsäuren (PFCA); häufigster Vertreter PFOA</li> <li>- Fluortelomeralkohole (FTOH); häufigster Vertreter: 8:2 FTOH</li> </ul> |
| PSA   | Persönliche Schutzausrüstung                                                                                                                                                                                                                                                                |
| PUR   | Polyurethan                                                                                                                                                                                                                                                                                 |
| PVC   | Polyvinylchlorid                                                                                                                                                                                                                                                                            |
| POP   | Persistent Organic Pollutants                                                                                                                                                                                                                                                               |
| RDX   | Royal Demolition Explosive: Cyclotrimethylentrinitramin                                                                                                                                                                                                                                     |
| SBBR  | Sequencing-Batch-Biofilm-Reaktor                                                                                                                                                                                                                                                            |
| SBR   | Sequencing-Batch-Reaktor                                                                                                                                                                                                                                                                    |

|                |                                              |
|----------------|----------------------------------------------|
| SCN            | Thyocyanat                                   |
| SPS            | Speicherprogrammierbare Steuerung            |
| TA Lärm        | Technische Anleitung Lärm                    |
| TA Luft        | Technische Anleitung Luft                    |
| TNT            | Trinitrotoluol                               |
| TRGS           | Technische Regeln Gefahrstoffe               |
| TS             | Trockensubstanzgehalt                        |
| UEG            | Untere Explosionsgrenze                      |
| UV-Bestrahlung | Bestrahlung mit ultravioletem Licht          |
| VC             | Vinylchlorid                                 |
| VOB            | Verdingungsordnung für Bauleistungen         |
| VOF            | Vergabeordnung für freiberufliche Leistungen |
| WHG            | Wasserhaushaltsgesetz                        |

## 1. Veranlassung und Zielsetzung

Mit der 1998 veröffentlichten ITVA-Arbeitshilfe H1-9 „Grundwasserreinigung“ (ITVA 1998) wurde den zuständigen Behörden, den mit der Problematik beauftragten Ingenieurbüros und den Sanierungspflichtigen eine Beschreibung des Ist-Zustandes von Grundwasseraufbereitungsverfahren als Entscheidungshilfe für die Auswahl und sachgerechte Anwendung dieser Verfahren zur Verfügung gestellt. In dieser wurden die Grundprinzipien, Anwendungsbereiche, allgemeine Verfahrensprinzipien und Kosten verfügbarer Grundwasseraufbereitungsverfahren komprimiert beschrieben und weiterführende Literatur aufgezeigt.

Die verfügbaren Techniken zur Grundwasseraufbereitung sind i.d.R. Stand der Technik, bewährt und erprobt. Die im Jahr 1998 erschienene Arbeitshilfe H1-9 hat Umfang und Anwendung der verfügbaren Techniken nur unzureichend wieder gegeben. Daher war eine grundlegende Überarbeitung erforderlich, die zu der vorliegenden Arbeitshilfe **H1-14 „Grundwasseraufbereitung“** geführt hat.

Unter **Grundwasseraufbereitung** im Sinne dieser Arbeitshilfe wird der technische Prozess der Entfernung von Stör- und Schadstoffen aus zu Tage geförderten Grundwässern verstanden.

Die vorliegende Arbeitshilfe beschreibt die Rahmenbedingungen einer Grundwassersanierungsmaßnahme, wobei der Schwerpunkt auf der Technik zur Grundwasseraufbereitung liegt. Hydraulische Maßnahmen sowie innovative In-situ-Sanierungsverfahren 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 Grundwasseraufbereitungsverfahren im jeweiligen Einzelfall zu erleichtern, um eine qualifizierte Anwendung zu ermöglichen.

## 2. Einführung

Bei der Grundwassersanierung wird kontaminiertes Grundwasser mittels Verfahren aufbereitet, die auf physikalischen, chemischen und/ oder biologischen Prozessen basieren. Die in einer Grundwasseraufbereitungsanlage nacheinander oder parallel ablaufenden Prozesse führen zu einer Umwandlung der Schad- und Störstoffe und/ oder ihrer Entfernung aus dem geförderten Grundwasser.

Die Prozesse können sich wechselseitig beeinflussen und/ oder ergänzen. So können biologische Prozesse 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.

Die Grundwasseraufbereitung ist der wesentliche Teil jeder aktiven Grundwassersanierung, dazu kommen die Grundwasserentnahme und die Ableitung des gereinigten Grundwassers, die im Wasserhaushaltsgesetz (WHG) geregelt sind.

Diese Arbeitshilfe berücksichtigt nicht Entscheidungswege zur Verfahrensauswahl für oder gegen eine aktive Grundwassersanierungsmaßnahme. Diesen Entscheidungsweg, der dem Bundes-Bodenschutzgesetz (BBodSchG) folgend üblicherweise von einer Gefährdungsabschätzung über die Sanierungsuntersuchung geht und damit den Weg für eine ordnungsbehördliche Verhältnismäßigkeitsprüfung vorbereitet, beschreibt die ITVA-Arbeitshilfe **H1-5 Sanierungsuntersuchung** (ITVA 1997). Allerdings liefert die vorliegende Arbeitshilfe Hinweise auf den Umfang einer technischen Grundwasseraufbereitung sowie die dafür zu berücksichtigenden Rahmenbedingungen, die für die Vorbereitung der behördlichen Entscheidung hilfreich sein können.

Die Grundwasserentnahme erfolgt mittels hydraulischer Maßnahmen, die im Abstrom oder im Schadenszentrum einer Grundwasserkontamination ihre Wirkung entfalten. Die Belange der Grundwasserentnahme und -förderung werden umfassend in der ITVA-Arbeitshilfe **H1-10 Hydraulische Maßnahmen** (ITVA 1999) erläutert.

Den Bau der Wasseraufbereitungsanlage regelt das Baurecht, wobei die landesspezifischen Regelungen der jeweiligen Landesbauordnung zu berücksichtigen sind. Die Genehmigung kann auch durch die konzentrierende Wirkung eines für verbindlich erklärten Sanierungsplanes oder durch eine/einen Sanierungsanordnung/-bescheid der zuständigen Behörde erwirkt werden.

Die Ableitung des Reinwassers wird mit ihren verschiedenen, rechtlich zulässigen Möglichkeiten erläutert. Hier werden auch die hydrochemischen Auswirkungen und die spezifischen Risiken der jeweiligen Vorgehensweisen aufgezeigt.

Neben der aktiven Grundwassersanierung finden vermehrt sogenannte Innovative In-situ-Sanierungsverfahren oder MNA-Konzepte beim Umgang mit Grundwasserkontaminationen erfolgreich Anwendung. Diese Themen werden in der ITVA-Arbeitshilfe **H1-13 Innovative In-situ-Sanierungsverfahren** (ITVA 2010) bzw. in der ITVA-Arbeitshilfe **H1-12 Monitored Natural Attenuation** (ITVA 2004) ausführlich behandelt.

Die eigentliche Grundwasseraufbereitung hat das Ziel, die Schadstoffe aus dem Grundwasser zu entfernen oder umzuwandeln bzw. die chemisch-physikalischen Eigenschaften des Grundwassers zu verändern. Sie erfolgt mit speziell auszuwählenden Verfahren, wie sie in dieser Arbeitshilfe beschrieben werden. Dabei ist die Auswahl der Verfahren nicht nur von der Art der Schadstoffe, ihrer Konzentration und dem Aggregatzustand abhängig, in dem die jeweiligen Schadstoffe vorliegen. Ebenso kann die natürliche hydrochemische Zusammensetzung die Verfahrensauswahl beeinflussen und mitunter ein Kosten bestimmender Faktor beim Umgang mit kontaminiertem Grundwasser sein.

Ausschlaggebend für die Auswahl der Reinigungsverfahren sind die hydrogeologischen und hydrochemischen Verhältnisse sowie das Schadstoffinventar. Weitere für die Auswahl einer Behandlungsmethode maßgebende Kriterien sind die natürlichen Wasserinhaltsstoffe, die Schadstoffarten und Schadstoffmengen, die angestrebten Reinigungszielwerte und der aufzubereitende Volumenstrom.

Die langjährige Praxis aktiver Grundwassersanierungsmaßnahmen zeigt, dass dem Reinigungsgrad allerdings eine eher vernachlässigbare Bedeutung zukommt. Viele der genannten Reinigungsverfahren reduzieren den Schadstoffgehalt, ohne dass der Reinigungsgrad technisch beeinflusst werden kann. Die Schadstoffentfernung geht damit oft über die geforderten Restgehalte hinaus, so dass ein vorgegebener Einleitwert auch deutlich unterschritten werden kann. Dies entspricht nicht immer wirtschaftlichen Überlegungen bei der Auslegung, ist aber im Sinne des Grundwasserschutzes auch nicht unerwünscht.

Die hier vorgestellten Verfahren entsprechen dem Stand der Technik, wenn sie zum Teil auch nicht standardmäßig zur Aufbereitung kontaminierter Grundwässer eingesetzt werden. Ebenso ist es Stand der Technik, dass die bei der Wasseraufbereitung aus dem Grundwasser entfernten Stoffe tatsächlich und dauerhaft der Umwelt entzogen werden. Das Erreichen von Reinigungszielwerten durch Verlagerung in andere Aggregatzustände oder Verdünnung ist kein legitimes Ziel einer Grundwassersanierungsmaßnahme.

Gemäß den verschiedenen Wirkprinzipien werden die in der vorliegenden Arbeitshilfe vorgestellten Verfahren wie folgt gegliedert:

### Physikalisch-chemische Verfahren

- Abtrennung von Phase
- Härtestabilisierung
- pH-Einstellung
- Fällung
- Flockung
- Sedimentation
- Flotation
- Filtration
- Ionenaustausch
- Schlamm entwässerung
- Oxidation und Reduktion mit und ohne Katalysator
- Desorption
- Adsorption
- Extraktion

### Biologische Verfahren

- Aerobe und anaerobe Verfahren
- kontinuierliche und diskontinuierliche Verfahren
- Verfahren mit suspendierter und mit sessiler Biomasse

Weiterhin werden dem Nutzer durch die Arbeitshilfe Beurteilungskriterien zur Eignung der jeweiligen Aufbereitungstechnik bei alleiniger und/ oder bei kombinierter Anwendung mit anderen hier beschriebenen Techniken in Abhängigkeit von den jeweils vorhandenen Stoffprofilen vermittelt.

Abschließend werden Kosten bestimmende Faktoren für die Grundwasseraufbereitung benannt, Möglichkeiten und Anforderungen eines wirtschaftlichen Betriebes erläutert und die Umweltauswirkungen der hier genannten Aufbereitungstechniken aufgezeigt.

### 3. Begriffe und Definitionen

#### 3.1 Stand der Technik

Der „Stand der Technik“ (engl. State of the Art) ist insbesondere im Umweltrecht das Kriterium zur Beurteilung des Entwicklungsstandes von Verfahren, Einrichtungen oder Betriebsweisen. Dabei ist der Stand der Technik in den verschiedenen Umweltvorschriften, z.B. § 3 Nr. 11 WHG<sup>1</sup>, § 3 Abs. 6 BImSchG<sup>2</sup> und § 28 Abs. 3 KrWG<sup>3</sup> wie folgt gleichlautend gesetzlich definiert:

*„der Entwicklungsstand fortschrittlicher Verfahren, Einrichtungen oder Betriebsweisen, der die praktische Eignung einer Maßnahme zur Begrenzung von Emissionen in Luft, Wasser und Boden, zur Gewährleistung der Anlagensicherheit, zur Gewährleistung einer umweltverträglichen Abfallentsorgung oder sonst zur Vermeidung oder Verminderung von Auswirkungen auf die Umwelt zur Erreichung eines allgemein hohen Schutzniveaus für die Umwelt insgesamt gesichert erscheinen lässt.“*

§ 2 Abs. 11 GefStV<sup>4</sup> definiert:

*„Der Stand der Technik ist der Entwicklungsstand fortschrittlicher Verfahren, Einrichtungen oder Betriebsweisen, der die praktische Eignung einer Maßnahme zum Schutz der Gesundheit und zur Sicherheit der Beschäftigten gesichert erscheinen lässt. Bei der Bestimmung des Stands der Technik sind insbesondere vergleichbare Verfahren, Einrichtungen oder Betriebsweisen heranzuziehen, die mit Erfolg in der Praxis erprobt worden sind. Gleiches gilt für die Anforderungen an die Arbeitsmedizin und die Arbeitsplatzhygiene.“*

Der Stand der Technik wird u.a. auch im Arbeitsschutzgesetz (ArbSchG), in der Betriebssicherheitsverordnung (BetrSichV) und in der TA Luft gefordert.

Der „Stand der Technik“ enthält das Fachleuten verfügbare Fachwissen:

- wissenschaftlich und technisch begründet und gesichert,
- wirtschaftlich machbar,
- praktisch erprobt,
- ausreichend bewährt.

Die betreffenden Verfahren, Einrichtungen oder Betriebsweisen müssen noch nicht allgemein anerkannt, d.h. in der Form von Regeln als Mosaikstein für ein umfassendes Regelwerk kodifiziert sein. Vorausgesetzt wird in Entwicklungsstand, der die praktische Eignung im technischen Maßstab gesichert erscheinen lässt. Was Stand der Technik für einzelne Produkte, Verfahren und Dienstleistungen ist, wird durch Sachverständigengutachten, Vergleichsverfahren, Auswerten des Schrifttums und von Kongressen und anderen Fachveranstaltungen nachgewiesen. Es wird aus dem Vergleich von Produkten, deren Wirksamkeit und Zuverlässigkeit im Einzelfall für einen bestimmten Zeitpunkt und die jeweilige Anwendung abgeleitet und begründet.

---

<sup>1</sup> Wasserhaushaltsgesetz (WHG) vom 31. Juli 2009 (BGBl. I S. 2585), das zuletzt durch Artikel 5 Absatz 9 des Gesetzes vom 24. Februar 2012 (BGBl. I S. 212) geändert worden ist

<sup>2</sup> Bundes-Immissionsschutzgesetz (BImSchG) in der Fassung der Bekanntmachung vom 26. September 2002 (BGBl. I S. 3830), das zuletzt durch Artikel 2 des Gesetzes vom 24. Februar 2012 (BGBl. I S. 212) geändert worden ist

<sup>3</sup> Kreislaufwirtschaftsgesetz (KrWG) vom 24.02.2012 (BGBl. I S. 212)

<sup>4</sup> Verordnung zum Schutz vor Gefahrstoffen (Gefahrstoffverordnung (GefStoffV) vom 26. November 2010 (BGBl. I S. 1643, 1644), die durch Artikel 2 des Gesetzes vom 28. Juli 2011 (BGBl. I S. 1622) geändert worden ist

Mit der Vorgabe des Standes der Technik soll zum einen gewährleistet werden, dass das jeweils beste Verfahren zur Anwendung kommt, zum anderen ist der Stand der Technik ein Kriterium zur Beurteilung des Entwicklungsstandes von Immissionen ausstoßenden Anlagen. Im Unterschied zu dem im Baurecht verwendeten Maßstab der **allgemein anerkannten Regeln der Technik** ist der Stand der Technik gekennzeichnet durch das Fehlen einer langjährigen Erprobung.

Gemäß Europäischer Norm EN 45020 "Normung und damit zusammenhängende Tätigkeiten – Allgemeine Begriffe" ist der Stand der Technik definiert als

*„entwickeltes Stadium der technischen Möglichkeiten zu einem bestimmten Zeitpunkt, soweit Produkte, Prozesse und Dienstleistungen betroffen sind, basierend auf entsprechenden gesicherten Erkenntnissen von Wissenschaft, Technik und Erfahrung“*

Das Patentrecht definiert den Stand der Technik als diejenigen Verfahren und Komponenten, die allgemein bekannt sind und bereits veröffentlicht wurden.

In Anlage 1 zu § 3 Nummer 1 WHG, im Anhang zu § 3, Abs. 6 BImSchG und in Anlage 3 zu § 3 Abs. 28 KrWG sind 12 Kriterien zur Bestimmung des Standes der Technik festgelegt. Diese Kriterien reichen von der Ressourceneffizienz der Verfahren (Abfall, gefährliche Stoffe, Emissionen, Rohstoffverbrauch) über Arbeitsschutz (Unfallverhütung, Emissionsminderung) bis hin zur Erprobtheit des Verfahrens und der laufenden technischen und wissenschaftlichen Entwicklung.

#### **Kriterien zur Bestimmung des Standes der Technik**

1. Einsatz abfallarmer Technologie,
2. Einsatz weniger gefährlicher Stoffe,
3. Förderung der Rückgewinnung und Wiederverwertung der bei den einzelnen Verfahren erzeugten und verwendeten Stoffe und gegebenenfalls der Abfälle,
4. vergleichbare Verfahren, Vorrichtungen und Betriebsmethoden, die mit Erfolg im Betrieb erprobt wurden,
5. Fortschritte in der Technologie und in den wissenschaftlichen Erkenntnissen,
6. Art, Auswirkungen und Menge der jeweiligen Emissionen,
7. Zeitpunkte der Inbetriebnahme der neuen oder der bestehenden Anlagen,
8. die für die Einführung einer besseren verfügbaren Technik erforderliche Zeit,
9. Verbrauch an Rohstoffen und Art der bei den einzelnen Verfahren verwendeten Rohstoffe (einschließlich Wasser) sowie Energieeffizienz,
10. Notwendigkeit, die Gesamtwirkung der Emissionen und die Gefahren für den Menschen und die Umwelt so weit wie möglich zu vermeiden oder zu verringern,
11. Notwendigkeit, Unfällen vorzubeugen und deren Folgen für den Menschen und die Umwelt zu verringern,
12. Informationen, die von der Kommission der Europäischen Gemeinschaften gemäß Artikel 17 Absatz 2 der Richtlinie 2008/1/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 15. Januar 2008 über die integrierte Vermeidung und Verminderung der Umweltverschmutzung (ABl. L 24 vom 29.1.2008, S. 8) oder von internationalen Organisationen veröffentlicht werden.

Die in dieser Arbeitshilfe erläuterten Verfahren entsprechen in diesem Sinn dem Stand der Technik.



### 3.2 Beste verfügbare Technik

Die **beste verfügbare Technik** (BVT, engl.: best available technology - BAT) ist eine europäische Technik Klausel und entspricht weitgehend dem in Deutschland traditionell verwendeten Konzept des Standes der Technik, orientiert sich aber am Leitbild der nachhaltigen Produktion. Der Rechtsbegriff BVT wird vor allem durch das Gemeinschaftsrecht der Europäischen Union, unter anderem die Richtlinie 96/61/EG des Rates vom 24. September 1996 über die integrierte Vermeidung und Verminderung der Umweltverschmutzung (IVU-Richtlinie) und nunmehr durch die Industrieemissionsrichtlinie (Richtlinie 2010/75/EU über Industrieemissionen (integrierte Vermeidung und Verminderung der Umweltverschmutzung) vom 24.11.2010), in das nationale Recht eingeführt. Gemäß der IVU-Richtlinie und jetzt der Industrieemissionsrichtlinie müssen in der Europäischen Union die besonders umweltrelevanten Industrieanlagen auf der Basis der besten verfügbaren Techniken genehmigt werden. Auch ältere (bestehende) Anlagen müssen seit dem 30. Oktober 2007 auf Grundlage der BVT betrieben werden.

Mit der Umsetzung der IVU-Richtlinie in nationales Recht<sup>5</sup> wurde die Begriffsbestimmung des Standes der Technik erweitert. Zwar wurde auch zuvor schon darauf geachtet, dass es nicht zu Verlagerungen von Emissionen von einem Medium in ein anderes kommt. Mit dem Artikelgesetz wurden jedoch auch medienübergreifenden Aspekte explizit einbezogen, indem Maßnahmen zur Begrenzung von Emissionen in Boden, Luft und Wasser zu treffen sind. Die Definition des Standes der Technik wurde gleichlautend in das Bundes-Immissionsschutzgesetz, das Wasserhaushaltsgesetz sowie das Kreislaufwirtschaftsgesetz aufgenommen, um den integrierten Ansatz der IED-Richtlinie sicherzustellen. Auch die Kriterien nach Anhang IV der IVU-Richtlinie bzw. Anhang III der IED-Richtlinie sind bei der Bestimmung des Standes der Technik zu berücksichtigen (s. Kap. 3.1).

Gemäß Artikel 3 Nr. 10 der Industrieemissionsrichtlinie bezeichnet der Ausdruck „beste verfügbare Techniken“

*den effizientesten und fortschrittlichsten Entwicklungsstand der Tätigkeiten und entsprechenden Betriebsmethoden, der spezielle Techniken als praktisch geeignet erscheinen lässt, grundsätzlich als Grundlage für die Emissionsgrenzwerte zu dienen, um Emissionen in und Auswirkungen auf die gesamte Umwelt allgemein zu vermeiden oder, wenn dies nicht möglich ist, zu vermindern:*

- a) *"Techniken": sowohl die angewandte Technologie als auch die Art und Weise, wie die Anlage geplant, gebaut, gewartet, betrieben und stillgelegt wird;*
- b) *"verfügbar": die Techniken, die in einem Maßstab entwickelt sind, der unter Berücksichtigung des Kosten/Nutzen-Verhältnisses die Anwendung unter in dem betreffenden industriellen Sektor wirtschaftlich und technisch vertretbaren Verhältnissen ermöglicht, gleich, ob diese Techniken innerhalb des betreffenden Mitgliedstaats verwendet oder hergestellt werden, sofern sie zu vertretbaren Bedingungen für den Betreiber zugänglich sind;*
- c) *"beste": die Techniken, die am wirksamsten zur Erreichung eines allgemein hohen Schutzniveaus für die Umwelt insgesamt sind."*

---

<sup>5</sup> Gesetz zur Umsetzung der UVP-Änderungsrichtlinie, der IVU-Richtlinie und weiterer EG-Richtlinien zum Umweltschutz vom 27.7.2001 (BGBl. Nr. 40 vom 2.8.2001, S. 1950 – 2021)



Die Definition von BVT erfordert eine Entwicklung der Technik in einem Maßstab, der eine branchenspezifische Umsetzung ermöglicht. Technik bedeutet dabei *„sowohl die angewandte Technologie als auch die Art und Weise, wie die Anlage geplant, gebaut, gewartet, betrieben und stillgelegt wird“*. Der Betrieb einer Anlage gemäß den BVT soll die Erreichung möglichst niedriger Verbrauchs- und Emissionsniveaus gewährleisten und zielt damit auf das eigentliche Ziel der Richtlinie ab, nämlich eine integrierte Vermeidung und Verminderung der Umweltverschmutzung.

Die besten verfügbaren Techniken werden für jede betroffene Branche in einem Informationsaustausch zwischen Mitgliedstaaten, Industrie und Umweltverbänden erarbeitet und in **BVT-Merkblättern** (BREF – Best Available Technique Reference Document) festgelegt.

Mit der neuen IED-Richtlinie wird das Leitbild der nachhaltigen Produktion weiterentwickelt. Ziel ist es, ein hohes Schutzniveau für die Umwelt insgesamt zu erreichen. Dazu dient der integrative Ansatz: Es müssen neben den Schadstoffemissionen in die verschiedenen Medien auch alle Produktionsprozesse berücksichtigt werden, um den Verbrauch an Ressourcen und Energie und sonstige Umweltbelastungen während des Betriebs und nach der Stilllegung einer Industrieanlage zu mindern.

Die Richtlinie über Industrieemissionen stärkt nun die Bedeutung der BVT, indem aus den Merkblättern BVT-Schlussfolgerungen entwickelt und verabschiedet werden. Die BVT-Schlussfolgerungen beschreiben den europäischen Stand der Technik und werden als eigenständige Rechtsdokumente im Amtsblatt der EU veröffentlicht. Die BVT-Schlussfolgerungen enthalten u.a. Schlussfolgerungen über BVT, mit denen Spannbreiten von Emissionswerten für Luft und Wasser verbunden sind. Diese Spannbreiten der Emissionswerte (BAT AELs) dürfen von den Anlagen in der EU in der Regel nicht überschritten werden. In diesem Sinne sind die neuen BVT-Schlussfolgerungen als verbindlich anzusehen.

Alle Emissionen einer Anlage in die Luft, das Wasser und den Boden sind gemäß IED-Richtlinie zu erfassen. Dabei müssen abfallwirtschaftliche Belange, Aspekte der Ressourcen- und Energieeffizienz sowie der Vorbeugung von Unfällen Berücksichtigung finden.

Für Anlagen, die einer Genehmigung bedürfen, müssen den zuständigen Behörden gem. Art. 12 IED die folgenden Informationen zur Verfügung gestellt werden:

- Beschreibung der Anlage, Art und Umfang ihrer Tätigkeiten;
- Roh- und Hilfsstoffe, sonstige Stoffe und Energie, die in der Anlage verwendet oder erzeugt werden;
- Quellen der Emissionen aus der Anlage;
- Zustand des Anlagengeländes;
- Gegebenenfalls einen Bericht über den Ausgangszustand nach Artikel 22 Abs. 2;
- Art und Menge der vorhersehbaren Emissionen aus der Anlage in jedes einzelne Umweltmedium sowie Auswirkungen der Emissionen auf die Umwelt;
- vorgesehene Technologie und sonstige Techniken zur Vermeidung der Emissionen aus der Anlage oder; sofern dies nicht möglich ist, Verminderung derselben;
- Maßnahmen zur Vermeidung, zur Vorbereitung, zur Wiederverwendung, zum Recycling und zur Verwertung der von der Anlage erzeugten Abfälle;
- Sonstige vorgesehene Maßnahmen zur Erfüllung der Vorschriften bezüglich der allgemeinen Prinzipien der Grundpflichten der Betreiber gem. Artikel 11;

- Vorgesehene Maßnahmen zur Überwachung der Emissionen in die Umwelt;
- Die wichtigsten vom Antragsteller geprüften Alternativen zu den vorgeschlagenen Technologien, Techniken und Maßnahmen in einer Übersicht.

Diese Auflistung zeigt, dass die Anforderungen der IED-Richtlinie auch im Bereich der Grundwasseraufbereitung praktisch Anwendung finden.

Der Betrieb von Grundwasseraufbereitungsanlagen unterliegt in Deutschland einem hohen Kostendruck. Vor diesem Hintergrund ist die Auswahl von Verfahren, die wenige Ressourcen (Energie und Chemikalien) verbrauchen, in wirtschaftlicher Hinsicht *ohnehin* naheliegend. Die Maschinenrichtlinie und die Betriebssicherheitsverordnung geben Leitlinien für die Berücksichtigung des Arbeitsschutzes bei Anlagenplanung und -betrieb vor.

Die in dieser Arbeitshilfe beschriebenen Verfahren erfüllen, bei richtiger Anwendung und Berücksichtigung der gesetzlichen Anforderungen, die Anforderungen der IED-Richtlinie.

### 3.3 Sonstige Begriffsbestimmungen

**Schadstoffe** im Sinne dieser Arbeitshilfe sind Stoffe,

- die im Boden und/ oder Grundwasser in allen Aggregatzuständen vorliegen können  
und
- die natürlicherweise im Boden und / oder Grundwasser vorkommen oder durch eine menschliche Tätigkeit, d.h. eine Altlast (definiert im Bundes-Bodenschutzgesetz), eingebracht worden sind  
und
- die in aller Regel einen schädlichen Einfluss auf die Umwelt im allgemeinen und den menschlichen Organismus im Besonderen haben.

Der Begriff **Altlast** ist im Bundes-Bodenschutzgesetz (BBodSchG) wie folgt definiert:

*„Altlasten im Sinne dieses Gesetzes sind*

- *stillgelegte Abfallbeseitigungsanlagen sowie sonstige Grundstücke, auf denen Abfälle behandelt, gelagert oder abgelagert worden sind (Altablagerungen), und*
- *Grundstücke stillgelegter Anlagen und sonstige Grundstücke, auf denen mit umweltgefährdenden Stoffen umgegangen worden ist, ausgenommen Anlagen, deren Stilllegung einer Genehmigung nach dem Atomgesetz bedarf (Altstandorte),*

*durch die schädliche Bodenveränderungen oder sonstige Gefahren für den einzelnen oder die Allgemeinheit hervorgerufen werden.“*

**Störstoffe** im Sinne dieser Arbeitshilfe sind alle festen, flüssigen oder gelösten Stoffe, die den Prozess der Entfernung von Schadstoffen be- oder verhindern. Störstoffe können sowohl natürlichen Ursprungs sein (z.B. Sand, Eisen, Carbonat) als auch durch eine Altlast in den Boden gebracht worden sein (z.B. EDTA als Komplexbildner in ehemaligen Galvaniken).

## 4. Rahmenbedingungen

### 4.1 Rechtliche Rahmenbedingungen

Bei der Grundwassersanierung sind die Grundwasserentnahme und die Ableitung des gereinigten Grundwassers sowie die Grundwasseraufbereitung die wesentlichen Teile jeder aktiven Sanierungsmaßnahme.

Während die Förderung und die Ableitung des Grundwassers bzw. des gereinigten Wassers im Wasserhaushaltsgesetz (WHG) geregelt sind, ist bei der Aufbereitung eine Vielzahl von Rechtsbereichen zu berücksichtigen. Einen entsprechenden Überblick gibt Tabelle 1, in der die jeweiligen Tätigkeiten den entsprechenden Rechtsgrundlagen sowie den durch Auftraggeber zu erbringenden bzw. sicherzustellenden Maßnahmen gegenübergestellt sind.

**Tabelle 1: Tätigkeiten, Rechtsgrundlagen und Maßnahmen bei der Grundwassersanierung**

| <b>Tätigkeit</b>                                                        | <b>Rechtsgrundlage</b>                                                                           | <b>Maßnahme</b>                                                           |
|-------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------|
| - Grundwassersanierung bei Altlasten und schädlichen Bodenveränderungen | BBodSchG, BBodSchV, WHG                                                                          | Wasserrechtsantrag und wasserrechtliche Erlaubnis *); ggf. Sanierungsplan |
| - Grundwassersanierung bei einem GW-Schaden                             | WHG                                                                                              | Wasserrechtsantrag und wasserrechtliche Erlaubnis *)                      |
| - Wasserförderung                                                       | WHG                                                                                              | Wasserrechtsantrag und wasserrechtliche Erlaubnis *)                      |
| - Wasserableitung                                                       | WHG                                                                                              | Wasserrechtsantrag und wasserrechtliche Erlaubnis *)                      |
| - Kampfmittel (optional)                                                | BGI 833                                                                                          | Kampfmittelfreigabe                                                       |
| - Errichtung (und Betrieb) einer Grundwasseraufbereitungsanlage         | BauGB, Bau-Ordnungen der Bundesländer                                                            | Bauantrag und Baugenehmigung **) ggf. WR-Genehmigung                      |
| - Arbeitsschutz                                                         | TRGS 524                                                                                         | Gefährdungsanalyse, Arbeits- und Sicherheitsplan                          |
| - Arbeiten in kontaminierten Bereichen                                  | TRGS 524<br>GefStoffV                                                                            | Gefährdungsanalyse, Arbeits- und Sicherheitsplan                          |
| - Maschinensicherheit                                                   | EG-Maschinenrichtlinie (2006/42/EU)<br>9. GPSGV                                                  | CE-Kennzeichnung der Maschinen<br>EU-Konformitätserklärung                |
| - Betrieb der Anlage                                                    | EG-Maschinenrichtlinie (2006/42/EU)<br>9. GPSGV<br>BetrSichV<br>GefStoffV<br>TRGS 524<br>BGI 833 | Betriebsanleitung<br>Nachweise<br>Dokumentation                           |
| - Honorierung                                                           | HOAI, frei vereinbar<br>VOF, Vergabeverfahren                                                    | Vertrag, Auftrag                                                          |

\*) Die wasserrechtliche Erlaubnis kann im Rahmen der konzentrierenden Wirkung eines für verbindlich erklärten Sanierungsplans in der Genehmigung erteilt werden, entbindet jedoch nicht von der Verpflichtung der Erstellung eines Wasserrecht-Antrages

\*\*) Die Baugenehmigung kann im Rahmen der konzentrierenden Wirkung eines für verbindlich erklärten Sanierungsplans in der Genehmigung erteilt werden, entbindet jedoch nicht von der Verpflichtung der Erstellung eines Bauantrages

## 4.2 Honorierung von Planungsleistungen

Das Honorar für Beratungs- und Planungsleistungen für Anlagen zur Grundwasseraufbereitung kann frei vereinbart werden.

In der bis 2009 gültigen Honorarordnung für Architekten und Ingenieure (HOAI) war in § 52 Abs. 9 geregelt, dass das Honorar für Leistungen bei hydraulischer Sanierung von Altablagerungen und kontaminierten Standorten frei vereinbart werden konnte. Seit dem 18.08.2009 ist die neue HOAI in Kraft. Der bisherige § 52 Absatz 9 wurde gestrichen, da darin lediglich die Möglichkeit der freien Vereinbarung eingeräumt wird, ohne dass die Vorschrift eine Preisregelung enthielt. Wie in der alten Regelung auch, unterliegen die in Absatz 9 aufgeführten Leistungen auch weiterhin nicht der HOAI. Anlagen zur Grundwasserreinigung sind im Anwendungsbereich für Ingenieurbauwerke (§ 40) nicht explizit aufgeführt. Durch die Streichung des alten § 52 Abs. 9 wird daher die Möglichkeit der freien Vereinbarung nicht berührt.

Die sog. Beratungsleistungen unterliegen keiner Preisbindung. Zeithonorare und Stundensätze sind nicht mehr geregelt und unterliegen keiner Preisbindung.

## 4.3 Arbeitsschutz und Anlagensicherheit

### 4.3.1 Arbeitsschutz

Bei Planung und Durchführung des bei Arbeiten zur Grundwassersanierung notwendigen Arbeitsschutzes sind staatliche und berufsgenossenschaftliche Regelungen zu beachten, die sich je nach Verantwortlichkeit an alle am Planungs- und Ausführungsprozess Beteiligten richten – Auftraggeber, Planer/Gutachter, Anlagenhersteller, Bohr- bzw. Bauunternehmen, Anlagenbetreiber. In Bezug auf den Auftraggeber sind dies in der Regel besondere Informationspflichten gegenüber den mit Liefer-, Bau- und Betriebsleistungen beauftragten Unternehmen.

Gefährdungen bei Arbeiten zur Grundwassersanierung bestehen regelhaft durch den möglichen Kontakt zu Gefahrstoffen und auf bestimmten Standorten auch zu biologischen Arbeitsstoffen ("Arbeiten in kontaminierten Bereichen"), sowie durch den Betrieb der Sanierungsanlage inkl. der entsprechend notwendigen Bauarbeiten. Weitere Gefährdungen können durch Kampfmittel verursacht werden – Blindgänger verschiedener Art, weggeworfene oder zurückgelassene Munition und vieles anderes mehr.

Seitens des Auftraggebers ist während der Planungsphase Folgendes zu leisten:

- Klärung der Kampfmittelsituation;
- Erarbeitung des Arbeits- und Sicherheitsplans für Arbeiten in kontaminierten Bereichen gemäß BGR 128 bzw. TRGS 524;
- Festlegung der Verantwortlichkeiten bzgl. der sicherheitstechnischen Anforderungen an die Grundwassersanierungsanlage;
- Falls vorhanden und erforderlich, Bereitstellung von Informationen zum Standort (z.B. bereits geltende HSE-Anweisungen auf dem Gelände, spezifische Gefahrenquellen und Verhaltensregeln am Standort, Wasser- und Bodenluftbelastungen, ggf. bereits vorhandene Zonenklassifizierung innerhalb des Standortes).

### 4.3.2 Gefährdungen durch Kampfmittel

Die Kampfmittelsituation ist durch eine Anfrage beim zuständigen Kampfmittelbeseitigungsdienst zu klären. Bei positivem Befund, d.h. bei konkretem Kampfmittelverdacht, ist vor Beginn der Bau- und Bohrarbeiten eine Kampfmittelräumung durchzuführen. Die sogenannte „baubegleitende Kampfmittelräumung“ ist nur dann statthaft, wenn die Prüfung der zur Verfügung stehenden gängigen Such- und Sondiervverfahren ergibt, dass sie unter den speziellen Umständen des betreffenden Standortes nicht eingesetzt werden können. In diesem Fall ist zu empfehlen, die Maßnahmen mit dem örtlich zuständigen staatlichen Kampfmittelbeseitigungsdienst abzustimmen.

Die entsprechenden Ermittlungen sowie die Erstellung eines Räumkonzeptes gehören zu den Planungsaufgaben des Bauherrn. Das Räumkonzept beschreibt sowohl die gemäß der historischen Ermittlung zu erwartenden Kampfmittel nach Art und ggf. Menge als auch die die Gefährdung und die Schutzmaßnahmen beeinflussenden Bedingungen des Räumfeldes (*siehe BGI 833 - Handlungsanleitung zur Gefährdungsbeurteilung und Festlegung von Schutzmaßnahmen bei der Kampfmittelräumung*). In diesem Sinne ist das Räumkonzept des Bauherrn eine sowohl für die Gefährdungsbeurteilung des ausführenden Fachunternehmens als auch für die entsprechende Kostenkalkulation zwingend notwendige Informationsquelle.

### 4.3.3 Arbeiten in kontaminierten Bereichen

Arbeiten zur Grundwassersanierung, die einen Eingriff in den kontaminierten Untergrund erfordern (Erkundung, Bau- und Bohrarbeiten, Rohrleitungsbau, bauliche Vorbereitungen zur Errichtung der Sanierungsanlagen) gehören zum Anwendungsbereich der für Arbeiten in kontaminierten Bereichen einschlägigen BG-Regel "Kontaminierte Bereiche – BGR 128" und der TRGS 524 – „Schutzmaßnahmen für Tätigkeiten in kontaminierten Bereichen“.

Gemäß diesen Berufsgenossenschaftlichen bzw. Technischen Regeln ist seitens des Bauherrn/Auftraggebers bzw. dessen gemäß BGR 128 sachkundigen Fachplaners ein "Arbeits- und Sicherheitsplan" zu erstellen, der die stoffliche Situation am Standort zusammenfasst, eine tätigkeitsbezogene Gefährdungsabschätzung vornimmt und die notwendigen Schutzmaßnahmen beschreibt (zu den Inhalten siehe BGR 128 bzw. TRGS

524). Dem Bauherrn/Auftraggeber dient der Arbeits- und Sicherheitsplan zur Ausschreibung der für die Arbeiten in kontaminierten Bereichen notwendigen Schutzmaßnahmen (siehe dazu VOB C DIN 18299, Kap. 4.2.5 - Besondere Leistungen). Mit Herausgabe der neuen ATV als DIN Norm – Ausgabe September 2012 – ist die VOB Teil C verbindlich anzuwenden.

Nach der Gefahrstoffverordnung (GefStoffV) ist die Aufnahme von Tätigkeiten mit Gefahrstoffen erst dann gestattet, wenn die Gefährdungsbeurteilung vorliegt und die Schutzmaßnahmen festgelegt sind. Die Zuwiderhandlung, d.h. allein das Fehlen der Gefährdungsbeurteilung bzw. der entsprechenden Dokumentation, kann mit Bußgeld geahndet werden. Somit darf nach geltendem Recht der Auftragnehmer seine Arbeiten erst dann beginnen, wenn er die dafür notwendigen Informationen des Auftraggebers, d.h. den Arbeits- und Sicherheitsplan erhalten hat. Der Arbeits- und Sicherheitsplan ist daher für den Auftragnehmer einerseits die wichtigste Informationsquelle zur Kostenkalkulation der Schutzmaßnahmen, andererseits aber auch unabdingbare Grundlage zur Erfüllung seiner gesetzlichen Arbeitgeberpflichten.

Gemäß den o.g. Regeln enthält der Arbeits- und Sicherheitsplan des Auftraggebers eine Gefährdungsabschätzung und eine Beschreibung der notwendigen Schutzmaßnahmen. Der Auftragnehmer darf diese Angaben aber nicht einfach übernehmen, sondern in seiner Funktion als

Arbeitgeber hat er die Pflicht, die Angaben des Arbeits- und Sicherheitsplans zu Gefährdungsbeurteilung und Schutzmaßnahmen zu prüfen und selbst in eigener Verantwortung die letztgültigen Festlegungen zu treffen.

Gemäß § 7 (1) GefStoffV ist die Durchführung der Gefährdungsbeurteilung einer sogenannten "fachkundigen Person" vorbehalten. Für Arbeiten in kontaminierten Bereichen sind neben den allgemeinen Kenntnissen zu den lt. Gefahrstoffrecht gängigen Vorgehensweisen spezielle Kenntnisse notwendig, die in der BGR 128 als "Sachkunde" bezeichnet werden. Auch die TRGS 524 fordert diese Kenntnisse und entsprechend der Terminologie der GefStoffV werden dort die Anforderungen an die jeweilig notwendige "Fachkunde" beschrieben (Anlage 2A zu TRGS 524). Im Hinblick auf die Verbindung zwischen BGR 128 und TRGS 524 wird dort auch festgelegt, dass "diejenige Person, die den Nachweis der Sachkunde nach BGR 128 erbringt, auch die Anforderungen der TRGS 524 an die Fachkunde erfüllt".

Unter Berücksichtigung der oben geschilderten Umstände wird deutlich, dass sowohl die Erarbeitung des Arbeits- und Sicherheitsplans durch einen Sach-/Fachkundigen erfolgen muss, als auch in den ausführenden Unternehmen entsprechend sach-/fachkundige Personen vorhanden sein müssen. Zumindest für die Ausschreibung der Leistungen, die zum Geltungsbereich der genannten Regeln gehören, ist die Formulierung entsprechender Vorgaben obligatorisch.

#### **4.3.4 Anforderungen der europäischen Maschinenrichtlinie**

Eine Anlage zur Grundwassersanierung kann im Sinne der EG-Maschinenrichtlinie (2006/42/EG) als eine Gesamtheit von Maschinen verstanden werden (GMBI 2011, Nr. 12, Seite 233 ff). Somit fallen diese Anlagen i.d.R. unter die Bestimmungen der europäischen Maschinenrichtlinie bzw. unter deren nationale Umsetzung in Deutschland (das Geräte- und Produktsicherheitsgesetz – PSG und die 9. Maschinenverordnung – GPSGV).

Aufgrund der notwendigen Anpassung an die örtlich anzutreffenden Umstände und Gegebenheiten sind Anlagen zur Grundwassersanierung i.d.R. Einzelanfertigungen. Somit erfordert die Bearbeitung der sicherheitstechnischen Anforderungen auch eine umfassende Betrachtung der Gesamtumstände, d.h. neben Komplexität und Komponentenreihenfolge der "Maschine" auch die Einbeziehung des Standortes sowie eine Bewertung sämtlicher Lebensphasen und Betriebszustände der Grundwassersanierungsanlage.

Im Vertragstext sollten somit die Gesamtumstände inklusive der „Baustellensituation“ eindeutig beschrieben sein. Weiterhin sind die Verantwortlichkeiten für das Inverkehrbringen (Herstellung der Maschine inklusive CE-Kennzeichnung, Ausstellen der EG-Konformitätserklärung und der Dokumentation), für den Aufbau der Anlage sowie deren erstmalige Inbetriebnahme klar zu regeln. Um allen diesen Anforderungen gerecht zu werden, hat der Planer die vorliegenden Umstände so exakt wie möglich zu beschreiben und die darin festgestellten Verantwortlichkeiten zuzuordnen (FRITSCH 2010, 2011).

#### **4.3.5 Anforderungen der Betriebssicherheitsverordnung (BetrSichV)**

Nach der ersten Inbetriebnahme oder ggf. nach einem Probetrieb wird i.d.R. die Anlage dem Betreiber übergeben. Betreiber kann sein der Hersteller, der Inverkehrbringer, der Aufbauer oder auch der Besteller selbst. Gleich wer es ist, den Betreiber, der als Arbeitgeber Tätigkeiten zum Betrieb der Anlage von eigenem Personal oder auch als Auftraggeber von Dritten ausführen lässt (z.B. Wartungs- und Instandhaltungsarbeiten), treffen die Anforderungen der Betriebssicherheitsverordnung, insbesondere die Pflicht zur Gefährdungsbeurteilung und zur Festlegung von Schutzmaßnahmen.



In diesem Zusammenhang kommt der vom Hersteller/Errichter anzufertigenden Betriebsanleitung zum Regelbetrieb der Anlage und zu den ggf. bei Wartungs- und Instandhaltungsarbeiten besonders zu berücksichtigenden Umständen eine besondere Rolle zu. Sie ist als "mitgelieferte Gefährdungsbeurteilung" zu verstehen, die der Betreiber für seine eigenen Betrachtungen heranziehen kann. Somit sollte er selbst ein Interesse daran haben und darauf achten, alle notwendigen Unterlagen zu erhalten (s.o. "Maschinenrichtlinie").

### In Bezug genommene Vorschriften und Regeln:

- Europäische Maschinenrichtlinie (2006/42/EG)
- Maschinenverordnung (9. GPSGV)
- Betriebssicherheitsverordnung
- Gefahrstoffverordnung (ggf. Biostoffverordnung)
- TRGS 524 – Schutzmaßnahmen bei Tätigkeiten in kontaminierten Bereichen
- BG-Regel 128 – Kontaminierte Bereiche
- BG-Information 833 – Handlungsanleitung zur Gefährdungsbeurteilung und Festlegung von Schutzmaßnahmen bei der Kampfmittelräumung

## **4.4 Technische Rahmenbedingungen**

### **4.4.1 Allgemeine Rahmenbedingungen**

Folgende allgemeine Rahmenbedingungen sind bei der Auswahl und Auslegung der Aufbereitungsanlagen zu beachten:

- Die Förderleistung (hydraulische Belastung); maximale, minimale und durchschnittliche Grundwassermenge pro Zeiteinheit (Regelungsbereich);
- Kontinuierliche oder diskontinuierliche Beaufschlagung;
- Wechselnde Förderleistungen im Sanierungszeitraum;
- Voraussichtliche Zeitdauer der Sanierung (Monate oder Jahre);
- Kauf oder Miete (Zeitdauer der Maßnahme);
- Modulare Bauweise wegen sich ändernder Rahmenbedingungen (Durchsatzleistung, Zeit, sich ändernde Schadstoffarten oder -belastungen) erwünscht;
- Reinigungszielwerte;
- Chemisch-physikalische Eigenschaften des Grundwassers;
- Jahreszeitlich bedingte Änderungen der Rahmenbedingungen;
- Ort und Art der Einleitung des gereinigten Grundwassers.

Oft bietet es sich an, die Auslegung der Grundwasseraufbereitungsanlage so zu gestalten, dass man diese an veränderte Rahmenbedingungen anpassen kann. Dieses sind beispielsweise eine sich ändernde Förderleistung, eine Abnahme der Schadstoffkonzentrationen oder das Auftreten zusätzlicher Schadstoffe, mit denen man aufgrund der Standortuntersuchungen nicht rechnen musste. Auch die chemisch-physikalischen Eigenschaften können sich längerfristig beispielsweise aufgrund der Absenkung des Grundwasserspiegels ändern.

Die genannten Punkte sind in der Regel keine gesonderte Planungsleistung (Ausnahme Miet-Betrachtung), sondern sind im Rahmen einer Sanierungsuntersuchung vom Gutachter zu erbringen. Diese fachliche Voraussetzung benötigt die zuständige Behörde für die im Rahmen ihrer Zuständigkeit liegende Verhältnismäßigkeitsprüfung.

#### **4.4.2 Standortbedingungen und Aufstellungsart**

Im Rahmen der Planung von Aufbereitungsanlagen zur Grundwasseraufbereitung sind die Standortbedingungen sorgfältig zu prüfen. Hierzu gehören insbesondere:

- topografische Bedingungen;
- Lage im oder zu Wasserschutzgebieten;
- Nutzung des Standortes als Industrie-, Gewerbe- oder Wohngebiet bzw. als Brachland, insbesondere vor dem Hintergrund auftretender Emissionen;
- Verkehrsanbindung;
- Zugänglichkeit für die Aufstellung und für Dritte;
- Umzäunung und Sicherung des Standortes;
- Klimatische Bedingungen (insbesondere Winterbetrieb und die damit erforderliche Frostsicherung);
- Aufstellung im Freien oder in einem Gebäude (oder Container);
- Aspekte des Natur- und Landschaftsschutzes.

#### **4.4.3 Infrastruktur**

Eine Wasseraufbereitungsanlage benötigt üblicherweise die folgenden Anbindungen an die Infrastruktur oder sie muss ersatzweise autark versorgt werden:

- Stromanschluss (Spannung, Frequenz, Stromstärke) oder Eigenstromversorgung über dieselbetriebenes Stromaggregat;
- Wasseranschluss oder Frischwasserversorgung über Brunnen;
- Abwasseranschluss (Kanal) oder Direkteinleitung in den Vorfluter (Einleitbedingungen für Direkt- und Indirekt-Einleiter beachten) oder Möglichkeit der Wiederversickerung;
- Telefonanschluss für die Kommunikation und die Datenübertragung, ersatzweise per Funkübertragung;
- Zufahrt je nach Größe der Anlage auch für LKW geeignet (Montage, Anlieferung von Hilfsstoffen und Chemikalien), Wendekreis beachten.



#### 4.4.4 Nebenanlagen

Typische Nebenanlagen sind (je nach Größe und Komplexität der Anlage):

- Energieversorgung;
- Tankanlagen;
- Silos oder Lagerbereiche;
- Büro, Aufenthaltsräume, Toiletten, ggf. Duschmöglichkeit mit Schwarz-Weiß-Bereich;
- Umzäunung, ggf. Kameraüberwachung / Alarmanlage;
- Außenbeleuchtung

#### 4.4.5 Umgebungsschutz

Der Umgebungsschutz ist bei der Planung einer Aufbereitungsanlage und den verbindenden Rohrleitungen zu beachten (siehe auch Kap. 12 Umweltauswirkungen).

Hierzu zählen insbesondere:

- Die Ableitung von Abwasser und von gereinigten Wässern in den Kanal, die Vorflut oder zurück in den Grundwasserkörper;
- Ordnungsgemäße Entsorgung der festen und schlammigen Rückstände;
- Schutz von Fauna und Flora;
- Vollständiger Rückbau der oberirdischen Anlagen und Wiederherstellung des Ausgangszustandes nach Beendigung der Maßnahme.

Die Emissionen, die von einer Grundwasseraufbereitungsanlage ausgehen können, sind gemäß den einschlägigen Vorschriften zu vermeiden bzw. begrenzen. Dies gilt insbesondere für die nachfolgend aufgeführten Emissionen:

- wassergefährdende Stoffe (Dieseltank, Chemikalienbehälter, Abwasser etc.) sind so zu sichern, dass sie nicht in den Boden oder das Grundwasser entweichen können (Lagerungsvorschriften, Tankwannen, Auffangbehälter, Dichtigkeitsprüfungen, Notwendigkeit einer Bodenplatte nach WHG mit ausreichendem Auffangvolumen prüfen etc.);
- Lärm, die Lärmschutzverordnungen sind zu beachten (z.B. TA Lärm);
- gasförmige Stoffe und sonstige luftgetragene Schadstoffe (BImSchG und BImSchV, TA Luft).

#### 4.4.6 Steuerung

In der Regel sind die Förderbrunnen für das kontaminierte Grundwasser mit der Aufbereitungsanlage mess-, steuer- und regeltechnisch verbunden. Die Aufbereitungsanlage ist in der Regel für einen bestimmten Wasserdurchfluss ( $\text{m}^3/\text{h}$ ) dimensioniert worden. Unter Umständen müssen aus verfahrenstechnischen Gründen Zwischenbehälter vorgesehen werden, um einen Ausgleich zwischen Förderung, Reinigung und Ableitung zu erzielen.

Förderbrunnen sind üblicherweise mit folgenden MSR-Einrichtungen ausgestattet:

- Trockenlaufschutz Pumpe, Aus-Schalter (Niveauregler im Brunnen und im Vorlagebehälter, zentraler Ausschalter),
- Min/Max-Schaltung der Pumpe,
- Optional Niveauregelung;
- Niveaumessung (Wasserstand im Brunnen, z.B. bezüglich Setzung in umliegenden Gebäuden),
- Durchflussmesser (in den einzelnen Brunnen und ggf. in der Sammelleitung).

Wasseraufbereitungsanlagen können manuell, halbautomatisch oder vollautomatisch gesteuert werden. Bei mittleren und großen Anlagen ist es heute üblich, speicherprogrammierbare Steuerungen (SPS) einzubauen.

Übliche MSR-Ausstattung einer Anlage, je nach Verfahren:

- Füllstandsmessung und -schalter (level switch), vorwiegend in Behältern, z.B. als Überfüllsicherung, Trockenlaufschutz der Pumpen, Steuerung von Pumpen, Sicherung von doppelwandigen Chemikalienbehältern;
- Vor-Ort-Parameter (pH-Wert, Sauerstoffgehalt, Redoxpotential, Leitfähigkeit, Temperatur), z.B. Steuerung von Dosierpumpen (Lauge/Säure), Ablaufüberwachung, Steuerung von Belüftungsaggregaten;
- (Differenz-) Druckmessung, z.B. Überwachung Druckbehälter, Leckagesicherung, Überdrucksicherung Pumpen;
- Durchflussmessung, z.B. Steuerung von Pumpen und Gebläsen, Anlagenbilanzierung, Steuerung Chemikaliendosierung;
- Schlammdichte, z.B. Steuerung von Absetz- und Entwässerungsverfahren;
- Absperrarmaturen (z.B. Magnetventile, Drosselklappen) z.B. zur Durchflussregelung, Notabschaltung;
- Elektronische Umdrehungsregelung (Frequenzsteuerung) oder Sanftanlauf für Pumpen, Gebläse und Rührwerke etc.;
- Schaltschrank mit CPU und Datenerfassung/-speicherung (PC);
- Prozessvisualisierung;
- Störmelder mittels SMS, Fax o.ä.;
- Datenfernübertragung

#### **4.4.7 Datenfernüberwachung / -übertragung (DFÜ)**

Die Aufbereitungsanlagen können aus der Ferne gesteuert (Anlagenbetreiber) und überwacht (z.B. Ingenieurbüro, Behörden) werden. Hierzu sind die entsprechenden Datenleitungen, Datenübertragungseinrichtungen und Software zu installieren, um von jedem gewünschten Ort Zugriff auf die Anlage zu ermöglichen.

In jedem Fall erhöht eine Datenfernübertragung die Betriebssicherheit und Anlagenverfügbarkeit und vermindert ggf. den Aufwand für Vor-Ort-Kontrollen.

#### **4.4.8 Wartung und Reparatur**

Die Wasseraufbereitungsanlage und die Förderbrunnen müssen regelmäßig gewartet und bei Bedarf repariert werden. Je nach Komplexität der Anlage und nach geforderter Anlagenverfügbarkeit sollten wichtige Ersatz- und Verschleißteile vorgehalten werden, damit im Bedarfsfall die Ausfallszeit möglichst gering gehalten werden kann.

Grundwasseraufbereitungsanlagen erreichen heutzutage hohe Verfügbarkeiten, die bei mindestens 95% der vorgesehenen Betriebszeit liegen sollten. In aller Regel laufen sie im Dauerbetrieb rund um die Uhr.

Je nach Priorität der Anlage und je nach geforderter Anlagenverfügbarkeit ist die Notwendigkeit redundanter Anlagenkomponenten zu prüfen. Auch monatliche Wartungsgänge und vorab vereinbarte Stillstandzeiten für umfangreiche Wartungsarbeiten sowie externe Wartungsverträge können die Verfügbarkeit und Betriebszeit einer Anlage deutlich verbessern.

Die Anforderungen an die technische Überwachung besonderer Anlagenteile (z.B. Gasbehälter, Druckbehälter, Schaltschrank, elektrische Betriebsmittel) sind zu beachten.

## 5. Anwendungsvoraussetzungen

Bei der Betrachtung von Schad- und Störstoffen im Rahmen von aktiven Sanierungsmaßnahmen sind unterschiedliche Bemessungsparameter zur Planung einer Grundwasseraufbereitungsanlage zu berücksichtigen. Im Folgenden werden diese Bemessungsparameter unter drei Gesichtspunkten diskutiert: hydraulische, wasserspezifische und stoffgruppenspezifische Eigenschaften.

Zudem sind detaillierte Kenntnisse über die Schadenssituation (Art, Ausbreitung und räumliche Verteilung, Menge, physikalische und chemische Eigenschaften, ggf. biologische Abbaubarkeit und Bioverfügbarkeit der Schadstoffe und der im Rohwasser gelösten natürlichen Inhaltsstoffe) sowie Kenntnisse über Verfügbarkeit und Leistungsfähigkeit bzw. Anwendungsgrenzen verfügbarer Technologien nach dem Stand der Technik erforderlich.

### 5.1 Hydraulische Eigenschaften

In der vorliegenden Arbeitshilfe wird auf die Wasserförderung nicht näher eingegangen. Für detaillierte Informationen bezüglich der hydraulischen Eigenschaften eines Aquifers und deren entsprechende Berücksichtigung bei der Konzeption einer hydraulischen Maßnahme wird auf die ITVA Arbeitshilfe H1-10/99 "Hydraulische Maßnahmen" verwiesen.

Die Wasserförderung wird im Wesentlichen von den Sanierungszielen gesteuert und ist technisch vorrangig vom Wasserandrang an einem Brunnen bestimmt. Eine erste deutliche Differenzierung ergibt sich aus dem Umstand, ob es sich um einen Porengrundwasserleiter oder um einen Kluftgrundwasserleiter handelt. Um eine Idee über die hydraulischen Bedingungen zu erhalten, ist es notwendig, in Voruntersuchungen entsprechende Grundlagendaten zu generieren. So wird aus Abstichmessungen, die an mindestens drei Grundwassermessstellen erfolgen sollten, ein Grundwassergleichenplan erstellt. Wird zudem, beispielsweise durch einen Pumpversuch, der Durchlässigkeitsbeiwert ( $k_f$ -Wert) ermittelt und ist die Mächtigkeit des betrachteten Aquifers bekannt, kann mit der Darcy-Gleichung unter zu berücksichtigenden Voraussetzungen der Durchfluss berechnet werden:

$$Q = A \cdot i \cdot k_f$$

|       |                         |
|-------|-------------------------|
| Q     | Durchfluss              |
| A     | durchströmte Fläche     |
| i     | hydraulischer Gradient  |
| $k_f$ | Durchlässigkeitsbeiwert |

Des Weiteren können Immissionspumpversuche durchgeführt werden, um einen besseren Eindruck von den Schadstofftransportbedingungen und der Erfassung der Schadstoffbelastung zu erhalten.

## 5.2 Wasserspezifisch relevante Parameter und Störstoffe

Unter den wasserspezifischen Eigenschaften werden in diesem Zusammenhang die vor-Ort-Parameter sowie weitere relevante Parameter verstanden, die die chemischen und physikalischen Eigenschaften des Grundwassers charakterisieren:

- Temperatur;
- pH-Wert;
- Redoxpotential;
- Leitfähigkeit/Salinität;
- Härte;
- Sauerstoffgehalt;
- Kohlensäuresättigung/ $\text{CaCO}_3$ -Gehalt;
- Konzentration von Eisen und Mangan.

Die hydrochemische Zusammensetzung im Grundwasserleiter kann stark variieren. Da sie Auswirkungen auf die Sanierungsplanung hat, wird an dieser Stelle der Einfluss auf die aktive Sanierung erläutert. Dabei ist insbesondere zu berücksichtigen, dass die zuvor genannten Parameter sich auch untereinander mehr oder weniger stark beeinflussen.

Die **Temperatur** ist ein Parameter, der grundsätzlich Berücksichtigung finden muss, da eine Vielzahl anderer Wasserparameter temperaturabhängig sind und ggf. eine Temperaturkompensation stattfinden muss. Grundwasser hat direkt nach der Förderung üblicherweise eine Temperatur zwischen 8 und 12°C.

Der **pH-Wert** ist wie die Temperatur ein Basisparameter, der bei jeder Probenahme berücksichtigt werden sollte. Die Löslichkeit von Salzen hängt maßgebend vom pH-Wert ab. Ebenso gibt der pH-Wert Auskunft darüber, in welcher Bindungsform einige Stoffe vorliegen. Der pH-Wert der meisten kontaminierten Grundwässer wird im normalen Bereich 6,0 - 8,0 liegen. Es gibt aber durchaus Altlasten, bei denen stark abweichende pH-Werte auftreten. Extreme pH-Werte im stark sauren oder basischen Bereich sind typisch für Sickerwässer aus Altablagerungen.

Das **Redoxpotential** gibt Auskunft darüber, ob sich das Wasser in einem oxidierten oder reduzierten Zustand befindet und damit Hinweise darauf, in welcher Bindungsform sich z.B. Metalle befinden und welche biologischen Abbauprozesse möglicherweise bereits im Boden stattgefunden haben. Das Redoxpotential ist eine Funktion von Temperatur und pH-Wert.

Die **Leitfähigkeit** ist eine Kenngröße für die im Wasser gelösten Salze und dient vor allem der Überwachung von Veränderungen im Grundwasserraum. So können Wässer unterschiedlicher Grundwasserstockwerke verschiedene Salinitäten aufweisen und über die Leitfähigkeit differenziert werden. Auch hydraulische Fenster können so unter bestimmten Voraussetzungen identifiziert werden.

Die **Wasserhärte** wird nach DIN 38409-6 (1986) definiert als die Summe der Calcium- und Magnesium-Ionenkonzentrationen in einem Wasser. Ein als „hart“ bezeichnetes Wasser ist reich, ein „weiches“ Wasser arm an Calcium- und Magnesium-Ionen. Weitere Härtebildner sind die Erdalkalien Strontium und Barium, die nur in Sonderfällen berücksichtigt werden müssen. Bei sehr harten Wässern kann es temperatur- und pH-Wert-abhängig zur Bildung von Kesselstein kommen, wobei es sich um ausgefallene Salze des Magnesiums und Calciums handelt (Magnesium- und Calciumcarbonat). Dies kann zum Verstopfen von zum Beispiel Filterböden bei der Filtration oder von Düsen und Füllkörpern bei der Strippung führen.

Der **Gehalt an Sauerstoff** wird ermittelt, um das Potential für mögliche chemische und/ oder biologische Reaktionen abschätzen zu können.

Des Weiteren ist der **Gehalt an freier Kohlensäure** im Grundwasser zu berücksichtigen, da diese primär den Säuregehalt in natürlichen Wässern steuert. Bei der Betrachtung von Grundwassersanierungsanlagen ist besonders die aggressive Kohlensäure zu berücksichtigen. Sie kann sowohl kalklösend als auch eisenlösend wirken. Daher kann es bei Wässern mit einem hohen CO<sub>2</sub>-Gehalt auch zu Korrosionsschäden an Sanierungsanlagen kommen.

Bei Verschiebung des Kalk-Kohlensäure-Gleichgewichts (z.B. bei CO<sub>2</sub>-Strippung) kann es zu ungewollter Kalkausfällung durch Versinterung der Anlage oder Inkrustierung von Rohrleitungen kommen.

**Eisen und Mangan** werden im Altlastenbereich i.d.R. nicht als Schad-, sondern als Störstoffe eingeordnet. Sie können – je nach gewählten Verfahren zur Schadstoffentfernung – zu unerwünschten Ausfällungen in Brunnen, Wasseraufbereitungsanlagen und Versickerungseinrichtungen führen (KIRFEL & ALTENBOCKUM 2010). Eisen- und Mangankonzentrationen im zu behandelndem Grundwasser sind deshalb standardmäßig zu ermitteln und die Notwendigkeit ihrer gezielten Entfernung zu berücksichtigen.

### 5.3 Stoffgruppenspezifische Eigenschaften

Neben den genannten Vor-Ort-Parametern sind besonders die Eigenschaften von Schad- und Störstoffen zu berücksichtigen. Hierzu gehören

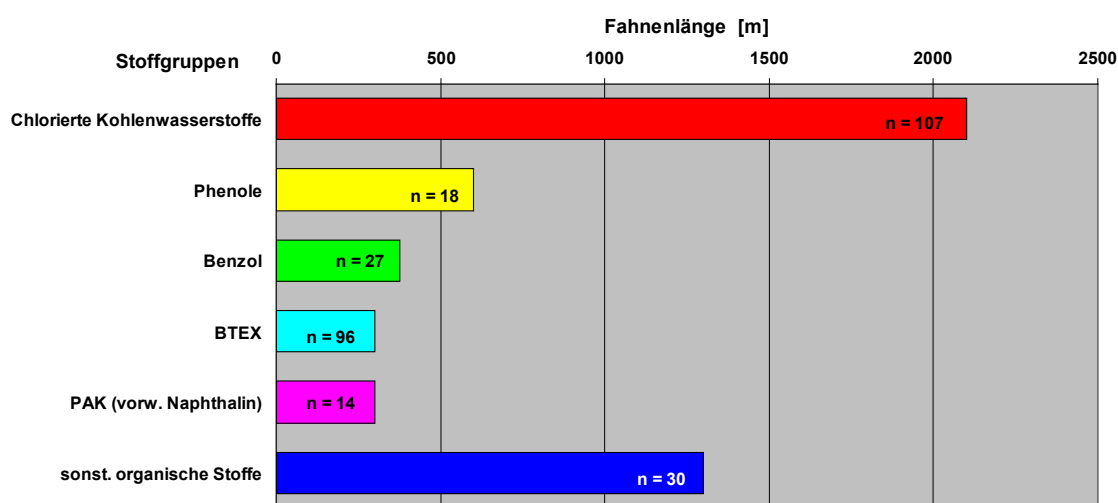
- Dichte;
- Siedepunkt;
- Wasserlöslichkeit;
- Dampfdruck;
- Aggregatzustand;
- Henry-Koeffizient/Dampf-Wasser-Verteilungskoeffizient → Flüchtigkeit;
- Oktanol-Wasser-Verteilungskoeffizient (K<sub>ow</sub>) → Sorptionsfähigkeit;
- Untere und obere Explosionsgrenze (UEG/OEG).

Die Humantoxizität (insbesondere die Krebs erzeugende Wirkung, die Mutagenität, eine mögliche Aufnahme über die Haut und eine sensibilisierende Wirkung) ist jeweils stoffbezogen im Hinblick auf den Arbeitsschutz zu betrachten.

Es ist zu berücksichtigen, dass die Begrifflichkeit „gute Wasserlöslichkeit“ nicht in Relation zu Wasserlöslichkeit im Allgemeinen gesetzt werden kann, z.B. in Relation zu Kochsalz. Vielmehr handelt es sich dann um eine „gute“ Wasserlöslichkeit, wenn sie in Relation zu anderen organischen Verbindungen bewertet wird.

Im Folgenden werden die Hauptschadstoffgruppen, welche in Deutschland die meisten Grundwasserschadensfälle ausmachen, vorgestellt. Einige Kenngrößen und zugehörige Strukturformeln für diese Schadstoffgruppen sind in den Anhängen 1 - 5 in tabellarischer Form zusammengefasst.

Um die wasserwirtschaftliche Relevanz organischer Schadstoffe zu beurteilen, ist die Betrachtung der Mobilität zielführend. Abbildung 1 zeigt die aus bekannten Sanierungsfällen ermittelten durchschnittlichen Fahnenlängen der wichtigsten Vertreter organischer Schadstoffgruppen.



**Abb. 1: Fahnenlängen ausgesuchter altlastenrelevanter Schadstoffgruppen**

**LHKW** – leichtflüchtige halogenierte Kohlenwasserstoffe – umfassen per definitionem halogenierte C1- und C2-Kohlenwasserstoffe, also die einfach und mehrfach halogenierten Verbindungen von Methan, Ethan und Ethen. Diese können sowohl einfach als auch höher halogeniert sein. Wegen ihrer häufigen Verwendung als Löse-, Entfettungs-, Extraktionsmittel in der chemischen Reinigung, Kunststoff- und Gummiindustrie werden in Grundwässern fast ausschließlich die chlorierten Vertreter (LCKW) angetroffen. Die chemisch-physikalischen Stoffeigenschaften relevanter LCKW sind in Anhang 1 aufgeführt.

Sie zeichnen sich durch eine hohe Wasserlöslichkeit, eine hohe Flüchtigkeit, eine höhere Dichte als Wasser und eine geringe Viskosität aus (siehe Anhang 1). Aufgrund der hohen Dichte können sie im Grundwasserraum häufig ungelöst als DNAPL (Dense Non Aqueous Phase Liquid) transportiert werden. Infolge der hohen Wasserlöslichkeit und ihrer begrenzten mikrobiellen Abbaubarkeit im Grundwasserraum bilden LHKW lange Schadstofffahnen aus (siehe Abb. 1). Zu berücksichtigen ist, dass die Eigenschaften mit dem als Substituent auftretenden Element sowie mit der Höhe der Halogenierung schwanken.

**MKW** – Mineralölkohlenwasserstoffe – sind Produkte, die bei der Verarbeitung von Rohölen in Raffinerien entstehen. Man unterscheidet u.a. zwischen aliphatischen und cyclischen Kohlenwasserstoffen sowie nach der Kettenlänge der linearen Komponente (E-DIN ISO 11504:2010-12). Die Dichte der MKW ist geringer als von Wasser (LNAPL- Light Non Aqueous Phase Liquid). Dampfdruck und Flüchtigkeit sind stark von der Kettenlänge und der Anzahl von Ringen abhängig und variieren daher stark von immobil bis sehr mobil. Die Wasserlöslichkeit ist dagegen mit weniger als 0,1 - 0,01 g/l generell sehr gering, die Sorptionsneigung entsprechend hoch. Die chemisch-physikalischen Eigenschaften ausgesuchter Mineralölkohlenwasserstoffe sind in Anhang 2 aufgeführt.

**BTEX** – Benzol, Toluol, Ethylbenzol sowie o-, m- und p-Xylol sind monoaromatische Verbindungen. Aufgrund ihrer ähnlichen Eigenschaften werden sie unter diesem Kürzel zusammengefasst. Alle haben eine geringere Dichte als Wasser und werden folglich als LNAPL transportiert. Sie zeigen eine geringe Sorptionsneigung an organische Bodenbestandteile (z.B. Humus) und an Tonminerale. In Anhang 3 sind die zugehörigen Strukturformeln und chemisch-physikalischen Kenngrößen der BTEX zu finden.

Verwendet werden BTEX in Lösungsmitteln und in Treibstoffen, weshalb die meisten Schadensfälle im Abstrom von Tankstellen, Raffinerien, Tanklagern und Flugplätzen liegen.

**PAK** – polycyclische aromatische Kohlenwasserstoffe – bestehen aus mindestens zwei anelierten aromatischen Kohlenwasserstoffen (anneliert: zwei Ringe sind über eine C-C-Verbindung verknüpft). Da es möglich ist, dass eine Vielzahl von Benzolringen aneliert sind und zahlreiche Derivate existieren, ist die Gruppe der PAK mit einer Größenordnung von einigen hundert zu beziffern. Aufgrund dieser großen Zahl unterschiedlicher Verbindungen hat die US Environmental Protection Agency (EPA) eine Liste mit 16 Substanzen aufgestellt, welche als Repräsentanten für die Schadstoffgruppe gelten. PAK zeichnen sich durch eine hohe Persistenz sowie hohe Schmelz- und Siedepunkte aus und sind unpolar (→ und daher schwer wasserlöslich). Mit steigender Anzahl kondensierter Ringe nehmen Wasserlöslichkeit und Flüchtigkeit ab. Die chemisch-physikalischen Eigenschaften ausgesuchter polycyclischer aromatischer Kohlenwasserstoffe sind in Anhang 4 zusammengefasst.

PAK haben eine hohe Sorptionsneigung an Bodenbestandteile. In Folge der geringen Mobilität ist die Fahnenlänge (meist zwei-kernige PAK) begrenzt (Abb. 1). Wenn höhermolekulare PAK im Abstrom einer Schadstoffquelle gemessen werden, ist dies im Regelfall entweder auf Schadstofftransport in Phase zurückzuführen oder auf das Mitführen von Partikeln, an denen die PAK adsorbiert sind. Eine längere Fahnenlänge weisen bestimmte PAK mit N-, S- oder O-Fremdatomen im Molekül auf, sog. heterozyklische Aromaten (KORA-TV-2-Leitfaden [1]).

PAK entstehen bei der unvollständigen Verbrennung von organischen Materialien und sind aus diesem Grund ubiquitär verteilt. Altlasten bzw. Altlastenverdachtsflächen sind häufig Altstandorte von Kokereien und Gaswerken sowie Altablagerungen von Aschen und Altölen.

**Cyanide** bezeichnet die Summe aller Cyanid-Verbindungen. Cyanid (CN) ist ein einwertiges Anion der Blausäure (Cyanwasserstoff). Am bekanntesten ist Kaliumcyanid (Zyankali, KCN). Schwermetall-Cyanid-Verbindungen liegen meist als Komplexe vor. Die Löslichkeit der einfachen Cyanide ist gut, die der Schwermetallcyanide ist stark vom jeweiligen Komplex abhängig und schwankt von gut bis nahezu nicht in Wasser löslich. Im Allgemeinen weisen Cyanid-Verbindungen eine hohe Sorptionsfähigkeit auf. Daher sind große Fahnen, wie sie bei der Verbreitung von LHKW entstehen, bei den Cyaniden sehr selten.



Cyanide werden in zahlreichen Industriebranchen produziert und verbraucht. Hierzu gehören die Farb- und Lackindustrie, die chemische und pharmazeutische Industrie sowie die Kohle- und Stahlindustrie.

**PFT** – perfluorierte Tenside – sind synthetisch hergestellte, langlebige organische Chemikalien, die in der Natur nicht vorkommen. Sie werden seit mehr als 50 Jahren produziert. PFT bestehen aus einer vollständig oder teilweise fluorierten unpolaren (lipophilen) Kohlenwasserstoffkette und einer polaren (hydrophilen) Kopfgruppe. Nach letzteren werden die PFT in drei Untergruppen eingeteilt: Perfluorierte Alkylsulfonate (PFAS), perfluorierte Carbonsäuren (PFCA) und Fluortelomeralkohole (FTOH). Zu den bekanntesten Vertretern der PFAS gehören die PFOS (Perfluoroktansulfonate). PFOA (Perfluorooctansäure) ist der bekannteste Vertreter der PFCA. In Anhang 5 sind die Strukturformeln und – soweit bekannt – ihre jeweiligen Stoffeigenschaften der bekanntesten Vertreter zusammengefasst (HESSELMANN 2011).

Wie alle Tenside weisen PFT-Verbindungen eine hohe Oberflächenaktivität auf. Ein natürlicher Abbau von PFT findet nicht statt, sie sind schwer flüchtig und weisen eine geringe Neigung zu dauerhafter Sorption auf. Anwendung finden perfluorierte Verbindungen in zahlreichen Industrie- und Konsumprodukten, hauptsächlich im Bereich der Oberflächen- und Papierveredelung und der Spezialchemie. Sie werden als wasserabweisende Beschichtung von Papier und Verpackungen, Textilien (wasserdichte und atmungsaktive Funktionskleidung), Möbeln und Baumaterialien (Kabel-Ummantelung) eingesetzt und zur Beschichtung von Pfannen und Töpfen, denn sie sind außerdem hitzestabil. Darüber hinaus finden sie Anwendung in Farben, Reinigungsmitteln, Kosmetikartikeln, Pflanzenschutzmitteln, Feuerlöschschäumen und hydraulischen Flüssigkeiten. Zudem werden PFOS-Verbindungen in der chemischen Synthese, der Metallierung, der Foto- und Halbleiterindustrie sowie der Medizintechnik verwendet.

Ende 2006 wurden auf europäischer Ebene erste Maßnahmen zur Beschränkung des Einsatzes bestimmter PFT auf der Grundlage einer Risikobewertung getroffen. Mit der Richtlinie 2006/122/EG vom 12. Dezember 2006 wurde auf die Gefahren durch die Verwendung der zur Stoff-Familie der PFT gehörenden Stoffe Perfluoroktansulfonsäure (PFOS) und Perfluoroktansäure (PFOA) und deren Verbindungen aufmerksam gemacht und die Verwendung von PFOS eingeschränkt. Die europäische Richtlinie wurde in das deutsche Chemikalienrecht übernommen (Elfte Verordnung zur Änderung chemikalienrechtlicher Verordnungen vom 12. Oktober 2007). Seit 2008 gilt ein generelles Verbreitungsverbot (ChemVerbotsV). 2009 wurden die PFOS gemäß Stockholmer Konvention als Persistent Organic Pollutant (POP) eingestuft. Seit August 2010 gilt ein EU-weites Anwendungsverbot für PFOS. Für PFOA gibt es derzeit noch keine Beschränkungen. Da diese chemische Stoffgruppe ein ähnliches Risikopotenzial aufweist wie die PFOS, prüft die EU-Kommission, ob die Verwendungsbeschränkungen auch auf PFOA auszudehnen sind. Insbesondere der Einsatz bei Löschschäumen hat sanierungsbedürftige Boden- und Grundwasserbelastungen verursacht (UMWELTBUNDESAMT 2006, LANUV NRW 2011). Die Erkundung, Beurteilung und Sanierung dieser Schadensfälle gestaltet sich, wie die bisherigen vorliegenden Erfahrungen zeigen, in der Regel problematisch, da die notwendigen fachlichen Grundlagen bzw. Techniken nicht im ausreichenden Umfang zur Verfügung stehen.

**Metalle/Schwermetalle** sind anorganische Elemente, die im Wasser als Ionen vorliegen. Eine einheitliche wissenschaftlich akzeptierte Definition des Begriffs „Schwermetalle“ liegt bisher nicht vor. Im diesem Rahmen werden daher die als altlastenrelevant bekannten Metalle mit einer Dichte  $> 5 \text{ g/cm}^3$  als Schwermetalle bezeichnet. Hierzu zählen: Blei, Quecksilber, Kupfer, Cadmium, Chrom, Nickel und Zink. Diese werden üblicherweise analytisch erfasst.

Ihre Löslichkeit und damit Mobilität in Wasser ist stark vom pH-Wert abhängig. Mit sinkendem pH-Wert, also mit saurer werdendem Milieu, erhöht sich die Löslichkeit und Mobilität. Sie neigen zu Sorption an Bestandteile des Bodens.

Für Altlasten ebenfalls von Bedeutung ist das Halbmetall **Arsen**, das sowohl Eigenschaften von Metallen als auch klassischen Nichtleitern aufweist. As(III) liegt bei pH-Werten  $< 9$  als ungeladener Komplex vor, deshalb wird es nicht sorbiert und ist damit sehr mobil. As(V) liegt als negativ geladener Komplex vor und kann durch Ionenaustausch fixiert werden. Im Gegensatz zu den meisten Metallen ist Arsen unter reduzierenden Bedingungen besser löslich und mobiler als unter oxidierenden Bedingungen; es verhält sich damit hydrogeochemisch in etwa wie Eisen.

## 5.4 Monitoring und Überwachung

Grundlegende Voraussetzung für eine erfolgreiche aktive Grundwassersanierungsmaßnahme und damit auch für einen erfolgreichen Aufbereitungsprozess ist die vor der eigentlichen Anlagenplanung erworbene Kenntnis der Grundwasserchemie. Die Erfassung dieser Daten erfolgt üblicherweise im Rahmen der orientierenden Untersuchung, einer nachfolgenden Detailuntersuchung und der für die Planung letzten Untersuchungsphase der Sanierungsuntersuchung. Im Rahmen der Sanierungsuntersuchung sind auch die notwendigen Vorversuche durchzuführen.

Durch die Errichtung eines dem Schaden und der Geologie angepassten Messstellennetzes (eine beschränkte Anzahl von nur 3 - 4 Grundwassermessstellen kann das üblicherweise nicht leisten) und mehrfache Untersuchungen der stofflichen Zusammensetzung in den Grundwassermessstellen lassen sich Prognosen für die spätere Rohwasserqualität mit engen Fehlergrenzen ( $\pm 20\%$ ) abschätzen. Dazu ist die umfassende Untersuchung der Kontamination nach Art und Umfang erforderlich.

Nach der Ableitung und Berechnung der Wirkung der geeigneten hydraulischen Maßnahme (Entnahmebereiche mit hydraulischem Nachweis) ist die Qualität des Rohwassers plausibel darzustellen. Bei der Anlagenplanung ist zu berücksichtigen, dass die oft in einem Schadenszentrum ermittelte hohe Schadstoffbelastung nach der Einstellung des sogenannten hydraulischen Gleichgewichtes (stationärer Zustand der Grundwasserentnahme) deutlich abnehmen kann. Rückgänge der Konzentrationen um bis zu 90% können hierbei auftreten. Auch die förderbaren Wassermengen können sich im Laufe der Sanierungsmaßnahme aus unterschiedlichen Gründen verändern. Dies sollte bei der Anlagenplanung berücksichtigt werden.

Aus vorgenannten Gründen lässt sich unmittelbar die Notwendigkeit der Überwachung der Veränderung der Rohwasserqualität im Sanierungsbetrieb ableiten. Der Nachweis der einwandfreien Funktion der Anlage und ihrer Komponenten ist mit der Eigenüberwachung vom Anlagenbetreiber zu erbringen.

Als ein Bestandteil der Fremdüberwachung können mittels eines regelmäßigen Monitorings im Aquifer rechtzeitig chemisch-physikalische Veränderungen des Rohwasserzulaufes erkannt werden, was ggf. zu erheblichen Kostenreduzierungen führen kann. Zudem schafft ein solches Monitoring eine entsprechende Datenbasis zur Optimierung der jeweiligen Sanierungsstrategie zu einem späteren Zeitpunkt. Ohne eine solche Datengrundlage lässt sich ein Sanierungserfolg selten nachweisen.

Die Überwachung der Einhaltung der geforderten Reinwasserwerte sowie das Erkennen möglicher Aufbereitungsprobleme stellen eine Aufgabe des Pflichtigen dar.

## 6. Wasserförderung

In Abhängigkeit von der natürlichen Ergiebigkeit des Grundwasserleiters wird das kontaminierte Grundwasser über Einzelbrunnen oder Brunnengalerien, die im Abstrom des Schadensherdes oder im Schadenszentrum selbst installiert werden müssen, an die Oberfläche gefördert, wo anschließend in einer Behandlungsanlage die Elimination der Schadstoffe erfolgt. Die Voraussetzung für eine erfolgreiche Dekontamination ist eine gute Wasserlöslichkeit der einzelnen Schadstoffe. Die Förderung von Schadstoffen in Phase ist eher die Ausnahme.

Ein wesentlicher limitierender Faktor der Grundwasserförderung können die natürlichen geologischen Verhältnisse (z.B. feinkörnige Matrix mit niedrigen  $k_f$ -Werten  $< 1 \times 10^{-8}$  m/s, geringe Aquifermächtigkeit) sein (HÖLTING 2009). Da die aus der Schadstoffverbreitung abzuleitende Gesamtfördermenge aber kostenbestimmender Faktor einer nachfolgenden aktiven Sanierung sein wird, ist es in jedem Fall erforderlich, vor Beginn der Planung durch geeignete Versuche sowohl die zu erwartende Gesamtfördermenge als auch die Wasserqualität neben der eigentlichen Schadstoffsituation belastbar zu ermitteln.

Grundlagen für die auszuwählenden hydraulischen Maßnahmen werden in der ITVA-Arbeitshilfe H1-10 „Hydraulische Maßnahmen“ vorgestellt. In jedem Fall gehört aber ein entsprechend ausführlicher hydraulischer Pumpversuch zur Grundlagenermittlung hinzu. Durch diesen kann dann die erforderliche Wassermenge und auch eine zu erwartende Mischwasserkonzentration abgeleitet werden. Gerade die Ermittlung einer Mischwasserkonzentration hat sich als kostendämpfend herausgestellt, da in der Regel die Mischwasserkonzentration aus einem Aquifer deutlich geringere Konzentrationen aufweist als einzelne Grundwassermessstellen in der Nähe der Eintragsstelle.

## 7. Chemisch-physikalische Verfahren

Auf den folgenden Seiten sind die gängigsten chemisch-physikalischen Verfahren zur Aufbereitung von kontaminiertem Grundwasser und ihre Anwendung beschrieben. Nicht aufgenommen wurden Verfahren, die bei der Grundwasseraufbereitung nur selten eingesetzt werden. Alle aufgenommenen Verfahren entsprechen dem Stand der Technik.

Die Verfahren lassen sich einteilen

### nach der Art der abzutrennenden Stoffe

- ⇒ Entfernung ungelöster Stoffe, die als Flüssigphase vorliegen
  - ⇒ Phasenabtrennung
- ⇒ Entfernung ungelöster Stoffe, die als Feststoff vorliegen
  - ⇒ Flockung, Sedimentation, Filtration, Flotation, Schlammeindickung und -entwässerung
- ⇒ Entfernung gelöster Stoffe
  - ⇒ Membranfiltration, Desorption, Adsorption, Extraktion, Oxidation, Fällung, Ionenaustausch

### nach der Art der Elimination aus dem Wasser

- ⇒ Zersetzung des Stoffes und Überführung in Kohlendioxid, Wasser und Gase (durch Oxidation oder Reduktion)
  - ⇒ Chemische (katalytische) Oxidation
- ⇒ Verlagerung des Stoffes in ein anderes Medium
  - ⇒ Desorption, Adsorption, Fällung, Flockung, Sedimentation, Flotation, Filtration, Ionenaustausch, Schlammeindickung und -entwässerung
- ⇒ Rückgewinnung des Stoffes
  - ⇒ Phasenabtrennung, Extraktion

## 7.1 Phasenabtrennung

### Prinzip:

Zwei wenig mischbare Flüssigkeiten werden aufgrund ihrer unterschiedlichen Dichte voneinander getrennt. Die Abtrennung von leichter Phase (nicht gelöste flüssige Schadstoffe, die leichter als Wasser sind z.B. Mineralöl, LNAPL) erfolgt durch Aufschwimmen und Abschöpfen. Die Abtrennung von schwerer Phase (ungelöste Schadstoffe, die schwerer wie Wasser sind, z.B. LHKW, DNAPL) erfolgt durch Absetzen und Absaugen.

### Aufbau und Beschreibung:

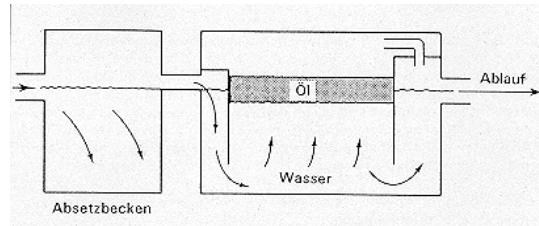
Bei der Phasentrennung werden außerhalb des Förderbrunnens die Leichtphase und die im Wasser geringfügig emulgierten Leichtstoffbestandteile sowie die Schwerphase abgetrennt. Hierzu dienen Behälter, welche bei einer niedrigen Strömungsgeschwindigkeit dem Medium eine ausreichende Verweilzeit zur Trennung ermöglichen.

Unterstützt wird die Abtrennung häufig durch die Anordnung von Koaleszenz- und/ oder Plattenabscheidern. Die Abscheidung an der Flüssigkeitsoberfläche oder am Boden selbst erfolgt meist durch mechanische Einrichtungen (Skimmer).

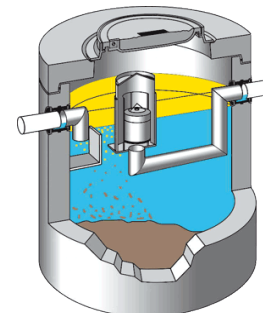
Bei sehr fein verteilten und kleinen Öltröpfchen versagt das Prinzip des Aufschwimmens in einem Ruhebehälter, da aufgrund der geringen Größe der Öltröpfchen die Verweilzeit in einem normalen Ölabscheider nicht ausreichend ist, um die Öltröpfchen an die Wasseroberfläche steigen zu lassen. Hier wird zur Abtrennung ein physikalischer Effekt genutzt, der bewirkt, dass sich fein verteilte Öltröpfchen auf speziellen Oberflächen anlagern und sich schließlich zu einem Ölfilm zusammenfügen können, d.h. sie koaleszieren. Nach Erreichen einer gewissen Schichtdicke reißt der Ölfilm ab und bildet einen größeren Öltröpfchen, der im Wasser aufsteigt und abgeschieden wird. Die nach diesem Prinzip arbeitenden Abscheider werden Koaleszenzabscheider genannt.

Bei größeren Mengen an Schwebstoffen oder Ölschlamm sollte eine Schlammabtrennung (Sedimentation) vorgeschaltet oder im Abscheider integriert sein.

Die Phasentrennung kann auch bereits im Brunnen erfolgen, indem dort über geeignete Filter/ Skimmersysteme und/ oder mehrere Pumpen die Leichtphase von der Feststoffphase getrennt abgepumpt wird. Damit kann die Problematik der Emulgierung deutlich reduziert werden.

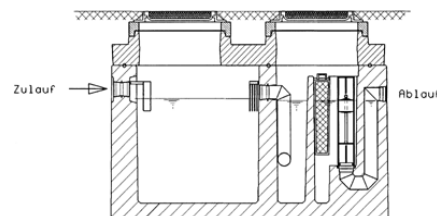


**Abb. 2: Prinzipschema Ölabscheiderabscheider mit vorgeschalteter Schlammabtrennung**  
(Quelle: Fachdokumente online, [www.fachdokumente.lubw.badenwuerttemberg.de](http://www.fachdokumente.lubw.badenwuerttemberg.de))



© ACO Beton, Bürstadt

**Abb. 3: Ölabscheider**



© ACO Beton, Bürstadt

**Abb. 4: Koaleszenzabscheider**  
(Quelle: [www.eco-2.de](http://www.eco-2.de))

**Anwendungsbereich:**

- Schadstoffe: alle ungelösten flüssigen Schadstoffe im Wasser, deren Dichte kleiner (Öl, nicht chlorierte Lösungsmittel) oder größer (CKW, DNAPL) ist als die Dichte von Wasser
- Störstoffe: Emulgatoren, oberflächenaktive Stoffe

**Reinigungsleistung:**

- Eine Regelbarkeit der Restbelastungen ist nicht gegeben, allerdings beeinflusst die hydraulische Überbelastung die Güte der Abtrennung.
- Erreichbare Ablaufwerte: Entfernung der ungelösten Flüssigkeiten, der gelöste Anteil verbleibt und muss auf anderen Wegen entfernt werden. Für Ölabscheider nach DIN 1999-100 gelten 20 mg/l und für Koaleszenzabscheider gelten 5 mg/l als Maximalkonzentration an Mineralölkohlenwasserstoffen am Ausgang. In der Praxis können diese Werte teilweise unterschritten werden.

**Anwendungsgrenzen:**

- im Prinzip keine Begrenzung der Zulaufkonzentrationen und -frachten
- Stoffgemische bei DNAPL sind problematisch

**Bemessung:**

Hydraulisch, Dichteunterschied, Aufenthaltszeit; Abschöpfraten.

Ölabscheider nach DIN 1999 werden durch Beaufschlagung eines Öl/Wassergemisches über ein Gefälle von 5% geprüft. Während bei dieser Prüfung das Gemisch mit eigener Kraft durch den Ölabscheider fließt, werden in der Praxis der Grundwasserreinigung dafür immer Pumpen verwendet. Je nach Art der verwendeten Pumpe kann es zu einem Dispergieren des Öl/Wassergemisches kommen, was zu einer erschwerten Abscheidung führt. Bei Ausschreibungen und Angeboten sollte deshalb auf erzielbare Restgehalte im Sanierungsbetrieb geachtet werden und nicht nur auf die nach DIN erzielten Restgehalte.

Die Wasserfüllung im Abscheider ist unbedingte Voraussetzung für ein Funktionieren der Leichtstoffabtrennung.

Die Durchführung von Vorversuchen ist ratsam.

**Betriebskosten:**

- sehr gering (ohne Entsorgungskosten);
- in Einzelfällen kann das abgetrennte Öl oder der Treibstoff direkt wiederverwendet werden;
- Abscheider muss regelmäßig gereinigt werden;
- keine oder wenige Verschleißteile.

**Besonderheiten, Hinweise, Risiken:**

Die Anwesenheit bestimmter Substanzen, z.B. von Tensiden bewirkt, dass fein verteilte Öltröpfchen im Wasser im Schwebezustand gehalten werden und durch die beiden oben beschriebenen Verfahren nicht abgetrennt werden können. Dies wird als chemisch stabile Emulsion bezeichnet. Für solche Abwässer sind weitergehende Behandlungsanlagen, z.B. Emulsionsspaltanlagen, erforderlich.

Problematisch sind auch Förderpumpen im Brunnen, die das Wasser mit dem Öl in den Turbinenrädern stark emulgieren. Ratsam ist die getrennte Förderung der unterschiedlichen Phasen, damit keine Vermischung oder Emulgierung stattfindet (siehe auch ITVA-Arbeitshilfe H1-10 Hydraulische Verfahren).

Auf einen ausreichenden Ex-Schutz ist zu achten.

**Entwicklungsstand bzw. Verbreitung:**

- Stand der Technik; weit verbreitet, sehr gut entwickelt mit großem Erfahrungsschatz
- Es existieren allgemein anerkannte Regeln der Technik (DIN-Norm 1999-100).

**Anforderungen an MSR:**

- keine bzw. geringe, da hydraulische Selbstregulierung;
- Der Abzug der Phase ist zu regeln;
- ggf. Ex-Schutz beachten.

**Kombination mit anderen Verfahren:**

- Ist in der Regel die erste Behandlungsstufe.
- Wird oft mit Schlammabtrennung, Absetzbecken oder Sandfängen kombiniert.
- Eine Stufe zur Entfernung der gelösten Stoffe muss nachgeschaltet werden.

**Referenzen:**

An jeder Tankstelle im Einsatz.

**Ausgewählte Literatur:**

- LANDESANSTALT FÜR UMWELTSCHUTZ BADEN-WÜRTTEMBERG (1995): Grundwasseraufbereitung bei der Bearbeitung von Altlasten und Schadensfällen.- Handbuch Altlasten und Grundwasserschadensfälle, Bd. 17.- Fachdokumente online;  
<http://www.lubw.baden-wuerttemberg.de/servlet/is/16793/>
- DIN EN 858-1, DIN EN 858-2 und DIN 1999-100.



## 7.2 Härtestabilisierung

### Prinzip:

Oft wird durch die Grundwasserförderung und die nachfolgende Aufbereitung das Kalk-Kohlensäure-Gleichgewicht gestört, so dass es ohne entsprechende Gegenmaßnahmen zu unerwünschten Kalkausfällungen kommt. Die Härtestabilisierung soll die Abscheidung von Kalk in den Anlagenteilen, in Rohrleitungen und ggf. in Versickerungseinrichtungen verhindern.

### Aufbau und Beschreibung:

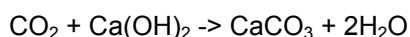
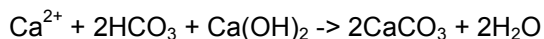
Unter Härtestabilisierung versteht man die Zudosierung geringer Mengen natürlicher Mineralstoffe, Polyamide oder Polyphosphate, welche die Härtebildner im Wasser auch bei Erwärmung in Lösung halten und in den Leitungen eine dauerhafte Schutzschicht ausbilden.

Als Entcarbonisierung werden Verfahren der Wasseraufbereitung bezeichnet, bei denen zur Verminderung der Wasserhärte die Carbonathärte (temporäre Härte), jedoch nicht die permanente Härte des Wassers vermindert oder beseitigt wird, so dass keine Ausfällungen mehr auftreten.

Folgende wesentliche Verfahren stehen für die Entcarbonisierung zur Verfügung:

Zusatz von Säuren - durch die Dosierung von Salz- oder Schwefelsäure wird die Carbonathärte in permanente Härte umgewandelt;

Langsamentcarbonisierung - Durch Zugabe von Kalkmilch werden die Hydrogencarbonationen und die freie Kohlensäure neutralisiert und als Calciumcarbonat ausgefällt:



Schnellentcarbonisierung: beschleunigte Kalkfällung durch Zugabe von Lauge und Sand. Der Reaktionsablauf ist wie bei der Langsamentcarbonisierung. Calciumcarbonat kristallisiert auf feinem Sand aus und wird in Form sich bildender Pellets abgeschieden.

Kationenaustauscher - ein Kationen-Ionenaustauscher kann Calcium- (und Magnesiumionen) austauschen.



Foto: St. Neumann / © eneotech Umwelt GmbH

**Abb. 5: Schnellreaktor**

Die Regenerierung eines erschöpften Kationenaustauscherharzes erfolgt mit einer 8-12 %-igen Natriumchlorid-Lösung (Regeneriersalz). Bei der Regeneration wird die vom Ionenaustauscharz aufgenommene Härte (Calcium- und Magnesiumionen) gegen die Natriumionen der Salzlösung wieder ausgetauscht.

Chemikalien zur Wasserenthärtung gehen starke Wechselwirkungen mit den Erdalkali-Kationen ein, die dann nicht mehr für störende Reaktionen zur Verfügung stehen. Die Erdalkali-Kationen werden dabei nicht aus dem Wasser entfernt, sondern „maskiert“. Das Wasser zeigt das Verhalten weichen Wassers. Typische Chemikalien sind Zeolithe, Schichtsilikate, Triphosphate, EDTA und NTA.



**Planungsgrundlagen:**

- Art und Menge der Härtebildner Magnesium und Calcium,
- Leitfähigkeit, pH-Wert,
- Wassermenge,
- geplante Resthärte.

Bei den Enthärtungsverfahren ist zu beachten, dass neben der Reduzierung des Härtebildners Calcium auch eine Reihe anderer Eigenschaften und Inhaltsstoffe in Abhängigkeit vom Verfahren verändert werden. Dies sind die Reduzierung von Hydrogencarbonat, die Reduzierung der Kohlendioxidkonzentration, die Änderung des pH-Wertes und z.B. die Anreicherung mit Natrium-Ionen bei Ionen-Austauschverfahren.

**Anwendungsbereich:**

- Schadstoffe: Härtebildner Magnesium (permanente Härte) und Calcium (temporäre Härte) führen zu Kesselsteinbildung und Ausfällungen in Oxidationsanlagen (z.B. Strippanlagen)
- Störstoffe: keine.

**Reinigungsleistung:**

- Erreichbare Ablaufwerte: Die verbleibende Härte kann stufenlos über die Wahl des Verfahrens und die Dosierung der Zuschlagstoffe erzielt werden; bei Enthärtung: weiches Wasser bis 0,1 °dH möglich;
- Entcarbonisierung: Niveau wird so eingestellt, dass das aufbereitete Wasser kalklösend und nicht kalkabsondernd ist.

**Anwendungsgrenzen:**

- Zulaufkonzentrationen und -frachten: keine Begrenzung.

**Bemessung:**

- Durchsatzleistung;
- Enthärtungsgrad;
- Dosierleistung.

**Betriebskosten:**

Folgende Kostenfaktoren sind zu berücksichtigen:

- Wassermenge,
- Härtegrad im Rohwasser,
- Enthärtungsgrad.

Kostenfaktoren sind Chemikalien und ggf. die Entsorgung des Regenerates oder des ausgefällten Kalkschlammes.

**Besonderheiten, Hinweise, Risiken:**

Die Enthärtungsverfahren sind keine Entsalzungsverfahren. Um den Salzgehalt des Wassers zu reduzieren oder zu entfernen, müssen andere bzw. ergänzende Verfahren zur Teilentsalzung zum Einsatz kommen, wie beispielsweise die Umkehrosmose. Nach einer Enthärtung kann es zu Korrosionsschutzproblemen in den Rohrleitungen kommen, wenn sich keine Kalkschuttschicht ausbilden kann.

**Entwicklungsstand bzw. Verbreitung:**

Stand der Technik. Vielfach eingesetzt und erprobt.

**Anforderungen an MSR:**

Ionentauscher: Über einen Wasserzähler wird nach Durchfluss des berechneten Hartwasservolumens die Regeneration ausgelöst. Aus einem beigestellten Salzlösetank wird über einen Saugstrahler die Salzsole in den Austauscherbehälter eingespeist, wodurch das Harz regeneriert wird. Durch die Steuerung der Anlage werden die zur Regeneration notwendigen Zyklen automatisch abgefahren, so dass kein Bedienungspersonal für eine Enthärtungsanlage notwendig ist.

**Kombination mit anderen Verfahren:**

Meist als Vorreinigungsstufe z.B. vor Stripanlagen und die Ausfällung von Härtebildnern zu vermeiden, die die Stripanlage verstopfen.

**Referenzen:**

Industrieanlagen, Hauswasseranlagen, Entsalzungsanlagen.

**Ausgewählte Literatur:**

- MUTSCHMANN, J. & STIMMELMAYR, F. (2011): Taschenbuch der Wasserversorgung.- 15. vollst. überarb. und aktual. Aufl., 15. Auflage. Vieweg+Teubner Verlag, Wiesbaden
- VEOLIA WATER SOLUTIONS & TECHNOLOGIES [Hrsg] (2009): VEOLIA Handbuch Wasser.- Verfahrenstechnologien der Aufbereitung.- 10. Auflage, (vormals WABAG Handbuch Wasser), Vulkan Verlag, Essen

### 7.3 pH-Wert-Einstellung

#### Prinzip:

Durch Zugabe von Säuren und Laugen wird eine chemische Veränderung des pH-Wertes erzielt. Dieser kann aber auch durch physikalische Methoden, beispielsweise die Belüftung verändert werden.

#### Aufbau und Beschreibung:

Die Einstellung des pH-Wertes ist beispielsweise bei der Fällung von Metallen erforderlich und/oder wenn das gereinigte Wasser vor der Ableitung zurück in das Grundwasser oder in einen Vorfluter neutralisiert werden muss.

Für die Anhebung des pH-Wertes kommen folgende Methoden zum Einsatz:

- Verminderung des im Wasser gelösten Kohlendioxids durch Ausgasen, z.B. durch Kaskaden oder mittels anderer Belüftungseinrichtungen;
- Zugabe von  $\text{OH}^-$  durch Dosierung von Natriumhydroxid (Natronlauge) oder Calciumhydroxid (Kalkmilch, Kalkwasser).

Für die Senkung des pH-Wertes kommen folgende Methoden zum Einsatz:

- Strippen mit Kohlendioxid,
- Zugabe von  $\text{H}^+$  durch Dosierung von Säure (z.B. Salzsäure, Schwefelsäure, Kohlensäure).



Foto: E. Beitingner

**Abb. 6: Neutralisierung mit Spezialkalk im Filterbehälter**

Mit der Manipulation des pH-Wertes ist in der Regel ein Anstieg des Salzgehaltes im Wasser verbunden. Insbesondere wenn zunächst aus verfahrenstechnischen Gründen eine starke Lauge oder eine starke Säure eingestellt werden muss, um diese anschließend wieder zu neutralisieren.

#### Planungsgrundlagen:

- hydraulische Durchsatzleistung;
- Entscheidung für einen kontinuierlichen Durchlaufbetrieb oder für einen Batch-Reaktor (diskontinuierlicher Betrieb);
- der angestrebte pH-Wert;
- die Ausgangsqualität des Grundwassers.

**Anwendungsbereich:**

Zur pH-Wert-Verschiebung, um folgende Effekte zu erreichen:

- Fällung von Metallen, insbesondere Schwermetallen;
- Prozessoptimierung für diverse nachgeschaltete Verfahren (Adsorption, Absorption etc.);
- Einstellung Kalk-Kohlensäure-Gleichgewicht;
- Enthärtung;
- Enteisung;
- Neutralisation.

**Reinigungsleistung:**

Der pH-Wert kann durch eine entsprechende Regelung der Dosierung von Säure oder Lauge beliebig eingestellt werden.

**Anwendungsgrenzen:**

Keine. Der Gesamtsalzgehalt im Ablauf muss u.U. kontrolliert werden, wenn dieser eine bestimmte Konzentration nicht übersteigen darf.

**Bemessung:**

Die pH-Einstellung mit Säure oder Lauge erfolgt in einem durchmischten Behälter oder direkt in eine Rohrleitung mit statischem oder dynamischem Mischer. Über eine Dosieranlage wird die Säure oder Lauge in den Behälter (oder die Rohrleitung) eingegeben. Durch Messung des pH-Wertes im Mischwasser wird die Dosierung gesteuert.

Eine exakte Berechnung der erforderlichen Menge Säure oder Lauge ist nicht möglich, da diese stark von der gesamten Wassermatrix abhängt.

**Betriebskosten:**

Folgende Kostenfaktoren sind maßgeblich:

- Hydraulische Belastung,
- pH-Wert im Rohwasser,
- angestrebter pH-Wert,

Wesentlicher Kostenfaktor sind Chemikalien.

**Besonderheiten, Hinweise, Risiken:**

Säuren und Laugen sind stark ätzend und wassergefährdend. Der unsachgemäße Umgang kann die menschliche Gesundheit und die gute Wasserqualität erheblich schädigen. Die Vorgaben gemäß WHG zur Lagerung von Chemikalien sind zu beachten. Der Materialbeständigkeit von Behältern, Rohrleitungen, Armaturen und Messtechnik ist besondere Aufmerksamkeit zu schenken. Auffangwannen sind meist mit keramischen Auskleidungen versehen.

**Entwicklungsstand bzw. Verbreitung:**

Stand der Technik. Sehr große Verbreitung im Wasser und Abwasserbereich sowie bei industriellen Prozessen.

**Anforderungen an MSR:**

- Messtechnische Erfassung der Wassermengen;
- Messung des pH-Wertes on-line;
- regelbare Dosieranlagen;
- Berührungslose Füllstandmessungen an den Säure- und Laugebehältern.

**Kombination mit anderen Verfahren:**

Kombination mit allen anderen Aufbereitungsverfahren ist möglich – der pH-Wert ist entsprechend anzupassen, so dass die nachgeschalteten Verfahren optimal betrieben werden können. Oft ist die Neutralisation die letzte Verfahrensstufe einer Grundwasseraufbereitungsanlage.

**Referenzen:**

Vielzahl realisierter Anlagen in allen Bereichen der Wasser- und Abwasseraufbereitung.

**Ausgewählte Literatur:**

- ITRC (Interstate Technology & Regulatory Council) (2006): Above Ground Treatment Technologies. RPO-4. Washington, D.C.: Interstate Technology & Regulatory Council, Remediation Process Optimization Team. [www.itrcweb.org](http://www.itrcweb.org)
- LANDESANSTALT FÜR UMWELTSCHUTZ BADEN-WÜRTTEMBERG (1995): Grundwasseraufbereitung bei der Bearbeitung von Altlasten und Schadensfällen Handbuch Altlasten und Grundwasserschadensfälle, Bd. 17.- Fachdokumente online; <http://www.lubw.baden-wuerttemberg.de/servlet/is/16793/>
- NYER, E.K. [ed.] (2009): Groundwater Treatment Technology.- 3rd ed. (Wiley).
- [http://www.wasseraufbereitungsseiten.de/enteisenerg\\_faq.htm](http://www.wasseraufbereitungsseiten.de/enteisenerg_faq.htm)

## 7.4 Fällung

### Prinzip:

Mit der Fällung werden gelöste Stoffe mit Hilfe chemischer Reaktionen in unlösliche Stoffe überführt. Die Niederschläge der ausgefällten Feststoffe sind zunächst meist mikrokristallin oder amorph, mit der Zeit kann durch Umkristallisation die Bildung einer stabileren Kristallmodifikation stattfinden.

### Aufbau und Beschreibung:

Die Fällung ist in der Regel die Vorstufe zu Flockung und Sedimentation. Die Ausfällung kann auf mehrere Arten ausgelöst werden:

- durch eine Fällungschemikalie;
- durch eine Veränderung des pH-Werts;
- durch das Überschreiten des Löslichkeitsprodukts.

Metalle, Metallverbindungen, Schwermetalle und Schwermetallverbindungen können als Sulfide oder Hydroxide aus dem Grundwasser entfernt werden.

Die gebildeten Sulfide und Hydroxide fallen infolge ihres Löslichkeitsproduktes in Abhängigkeit vom pH-Wert aus. Die Fällung kann dabei durch eine Oxidation eingeleitet oder durch Fällungsmittel bewirkt werden.

Typische chemische Fällungsmittel sind Eisen(II)-sulfat, Eisen(III)chlorid, Aluminiumchlorid, Natriumaluminat oder Polyaluminiumchlorid.



Foto: E. Beitingner

**Abb. 7: Rieselanlage zur Ausfällung von Eisen**

### Planungsgrundlagen:

- hydraulischen Kenngrößen (Wassermenge, Aufenthaltszeit, Volumen des Behälters, Schlammfang);
- Art und Konzentration der gelösten Stoffe;
- Art und Menge des Fällungsmittels;
- Inhibitoren (Hemm- oder Störstoffe);
- pH-Wert.

### Anwendungsbereich:

Die Fällung wird bei der Grundwasseraufbereitung insbesondere zur Entfernung von Eisen und Mangan, aber auch zur Enthärtung eingesetzt.

- Schadstoffe: Eisen, Mangan, Chrom, sonst. Schwermetalle, Arsen u.a.
- Störstoffe (Nebenreaktionen): Stoffe, die die Fällungsreaktion behindern oder verzögern. Es sollten keine oder nur schwache Komplexbildner vorhanden sein.

**Reinigungsleistung:**

Die Effektivität von Fällungsreaktionen kann durch die Wahl des pH-Wertes und die Dosierung des Fällmittels in einem gewissen Rahmen gezielt beeinflusst werden.

**Anwendungsgrenzen:**

- Zulaufkonzentrationen und -frachten: unbegrenzt.
- Erreichbare Ablaufwerte: je nach Schadstoff und Einstellung der Anlage.
- Vorversuche sind zur Ermittlung der Ablaufwerte sinnvoll.

**Bemessung:**

- Aufenthaltszeit bzw. Reaktionszeit der Fällungsmittel;
- Einstellung des optimalen pH-Wertes.
- Die Durchführung von Vorversuchen wird empfohlen.
- Sinnvolle Kombination mit nachfolgender Flockung.

**Betriebskosten:**

Kostenbestimmende Faktoren sind:

- Hydraulische Belastung,
- Art und Konzentration der Schadstoffe,
- Art und Menge der Fällungsmittel (Überstöchiometrische Dosierung der Fällungsmittel ist üblich);
- Personalintensive Steuerung und Überwachung.

Die Kosten für die Entsorgung des Schlammes fallen im Bereich der Sedimentation, Filtration und Schlamm entwässerung an. Auch die Entsorgung muss in den Gesamtkosten berücksichtigt werden.

**Besonderheiten, Hinweise, Risiken:**

- Entsorgung des Schlammes notwendig;
- Nachbehandlung durch Sedimentation, Flotation und/ oder Filtration;
- Beschleunigung und Verbesserung der Sedimentation/Flotation durch Koagulation/Flockung.
- Durch pH-Wert-Regulierung ist eine Aufsalzung des Wassers möglich.

**Entwicklungsstand bzw. Verbreitung:**

Stand der Technik.

**Anforderungen an MSR:**

- Messung und Regulierung des pH-Wertes über Dosimeter;
- Meist kontinuierlicher Betrieb (bei der industriellen Fällung auch Batch-Betrieb);
- Hydraulische Regulierung der Wassermengen;
- Überfüllsicherungen.



**Kombination mit anderen Verfahren:**

Vorstufe von Flockung und Sedimentation/Flotation.

**Referenzen:**

- Wasseraufbereitungsanlagen mit z.B. hohen Eisengehalten
- Galvanikbetriebe

**Ausgewählte Literatur:**

- MUTSCHMANN, J. & STIMMELMAYR, F. (2011): Taschenbuch der Wasserversorgung.- 15. vollst. überarb. und aktual. Aufl., 15. Auflage. Vieweg+Teubner Verlag, Wiesbaden
- VEOLIA WATER Solutions & Technologies [Hrsg] (2009): VEOLIA Handbuch Wasser.- Verfahrenstechnologien der Aufbereitung.- 10. Auflage, (vormals WABAG Handbuch Wasser), Vulkan Verlag, Essen
- HARTINGER, L. (1991): Handbuch der Abwasser- und Recyclingtechnik für die metallverarbeitende Industrie.- 2. Auflage, Fachbuchverlag Leipzig

## 7.5 Flockung

### Prinzip:

Durch die Flockung können im Wasser enthaltene feinste Partikel zu größeren Verbänden koagulierte werden, so dass diese größeren Teilchen besser absetzbar, flotierbar und/ oder abfiltrierbar werden.

### Aufbau und Beschreibung:

Die Flockung erfolgt mit Hilfe geeigneter Chemikalien, die entweder als Flockungsmittel oder Flockungshilfsmittel einzuordnen sind. Als Flockungsmittel werden zu meist dreiwertige Metallsalze wie Eisen(III)-Salze und Aluminiumsalze, aber auch andere Hydroxid-Bildner wie Kalkmilch, Natriumlauge oder Natriumaluminat verwendet.

Als Flockungshilfsmittel kommen meist unterschiedliche Polyelektrolyte zum Einsatz.

### Einsatzgebiete:

- Entfernung von Feststoffen und Trübe, insbesondere von Kolloiden;
- Phosphatreduzierung in Kläranlagen;
- Schlamm entwässerung;
- Fällungsverfahren.



© Redox Water Technology B.V.

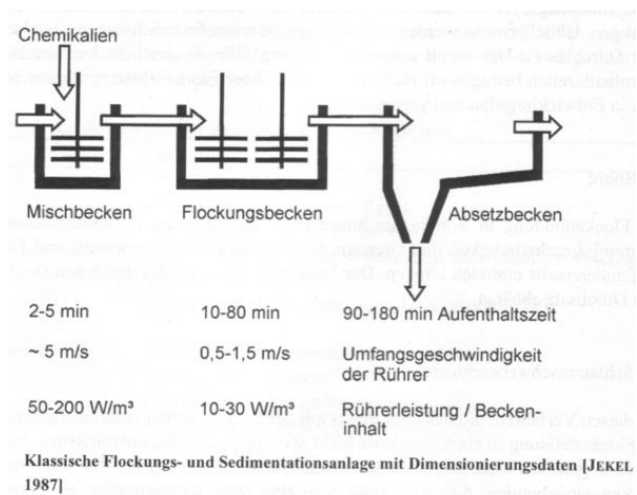
**Abb. 8: Inline-Flockungsreaktor**  
(Quelle: [www.redox-wt.nl](http://www.redox-wt.nl))



Foto: M. Altenbockum

**Abb. 9: Flockung**

Flockungshilfsmittel beschleunigen die Sedimentation oder Flotation von suspendierten Feststoffteilchen und erhöhen die Entwässerbarkeit des Schlammes, so dass die Ergebnisse der nachgeschalteten statischen oder maschinellen Entwässerungsverfahren deutlich verbessert werden



**Abb. 10: Verfahrensschema Flockung und Sedimentation (JEKEL 1987)**

|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Planungsgrundlagen:</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Hydraulische Belastung;</li> <li>• Art und Menge der Kolloide und Schwebstoffe;</li> <li>• Auswahl geeigneter Flockungsmittel und Flockungshilfsmittel;</li> <li>• anschließende Verfahrensstufen zur Schlammabtrennung und -entwässerung.</li> </ul>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           |
| <b>Anwendungsbereich:</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Schadstoffe: Mittels einer Flockung können feinste <a href="#">suspendierte</a> oder <a href="#">kolloidale</a>, ungelöste Feststoffpartikel mit einer Korngrösse <math>&gt;1\mu\text{m}</math> im Wasser unter Nutzung elektrochemischer Kräfte, die an der Partikeloberfläche wirken, koaguliert werden, um sie so aus dem Wasser durch Sedimentation oder Filtration besser abscheiden und entfernen zu können. Es ist aber auch möglich, gelöste Substanzen mittels Flockung aus dem Wasser zu entfernen, wie zum Beispiel <a href="#">Phosphat</a> oder auch Anteile des <a href="#">gelösten organischen Kohlenstoffs</a>. Die Flockung findet auch Anwendung bei der Entfernung von Metallen und deren Verbindungen.</li> <li>• Störstoffe: Oberflächenaktive Stoffe, Tenside.</li> </ul> |
| <b>Reinigungsleistung:</b> <p>Die Flockung wird so eingestellt, dass eine optimale Flockenbildung erzielt wird. Eine Restbelastung an Partikeln im Reinwasser über die Zugabemenge an Flockungsmittel steuern zu wollen, funktioniert in der Regel nicht.</p>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       |
| <b>Bemessung:</b> <p>Durchfluss, Aufenthaltszeiten, Rührergeschwindigkeiten, Leistungsaufnahme Rührer. Die Durchführung von Vorversuchen wird empfohlen.</p>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        |
| <b>Betriebskosten:</b> <p>Kostenfaktoren sind:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Hydraulische Belastung,</li> <li>• Art und Menge der Flockungsmittel.</li> <li>• Betrieblicher Überwachungsaufwand.</li> </ul>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          |
| <b>Besonderheiten, Hinweise, Risiken:</b> <p>Koagulation und Agglomeration laufen in der Regel parallel ab. Bei der praktischen Anwendung der Flockung können Mischbedingungen (Rührbedingungen) und Reifezeit eine wichtige Rolle für die Effizienz der Abscheidung spielen, besonders bei Systemen mit geringem Feststoffgehalt (z.B. Oberflächenwasser). Die Flockung wird auch bei der Schlammmentwässerung oder in Klär- und Entwässerungsprozessen der Industrie (Papierherstellung, Bergbau, Chemieprozesse) angewendet. Sie kann aber auch zur Entfernung von <a href="#">Phosphat</a> eingesetzt werden.</p>                                                                                                                                                                                                                                               |
| <b>Entwicklungsstand bzw. Verbreitung:</b> <p>Stand der Technik.</p>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                |
| <b>Anforderungen an MSR:</b> <p>Durchflussmessung, Wasserstandsmessung in den Behältern, Aufenthaltszeiten und Rührzeiten regeln.</p>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               |
| <b>Kombination mit anderen Verfahren:</b> <p>Flockung eventuell nach vorgeschalteter Fällung, danach Sedimentation, Filtration oder Flotation, Schlammverdickung und -entwässerung.</p>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |

**Referenzen:**

Übliches und oft eingesetztes Verfahren in der Wasseraufbereitung und in der Klärtechnik.

**Ausgewählte Literatur:**

- MUTSCHMANN, J. & STIMMELMAYR, F. (2011): Taschenbuch der Wasserversorgung.- 15. vollst. überarb. und aktual. Aufl., 15. Auflage. Vieweg+Teubner Verlag, Wiesbaden
- VEOLIA WATER Solutions & Technologies [Hrsg] (2009): VEOLIA Handbuch Wasser.- Verfahrenstechnologien der Aufbereitung.- 10. Auflage, (vormals WABAG Handbuch Wasser), Vulkan Verlag, Essen
- HARTINGER, L. (1991): Handbuch der Abwasser- und Recyclingtechnik für die metallverarbeitende Industrie.- 2. Auflage, Fachbuchverlag Leipzig

## 7.6 Sedimentation

### Prinzip:

Sedimentation (auch Klärung, Absetzen, Eindicken, Trennen) ist das Ablagern/Absetzen von festen Teilchen im Wasser unter dem Einfluss der [Schwerkraft](#). Je nach Partikelgröße und der Korndichte findet dieser Absetzvorgang mit unterschiedlichen Sinkgeschwindigkeiten statt, so dass sich in der Regel eine Fraktionierung der abgelagerten Sinkstoffe in der Ablagerungsschicht (Sediment) einstellt.

### Aufbau und Beschreibung:

Der Sedimentation voraus geht üblicherweise eine Fällung und/ oder Flockung. Die Sedimentation selbst findet in Absetzbecken verschiedener Bauform statt. Der Absetzvorgang selbst und die sich anschließende Eindickung des abgesetzten Schlammes kann durch Einbauten verbessert werden, z.B. Lamellen in Lamellenabscheidern, Krählerwerke in Eindickern etc.). In Sonderfällen kann die Sedimentation auch zur Dichtentrennung von Partikeln eingesetzt werden (Wendelabscheider).

Zur Verbesserung der Sedimentation kann die Teilchengröße in einem vorausgehenden Schritt erhöht werden (siehe Kap. 7.5 Flockung) oder gelöste Stoffe in feste Partikel ausgefällt (siehe Kap. 7.4 Fällung) werden.

Typische Sedimentationsvorrichtungen sind:

- Absetzbecken (rund oder eckig),
- Sandfänge,
- Lamellenabscheider und
- Eindicker.



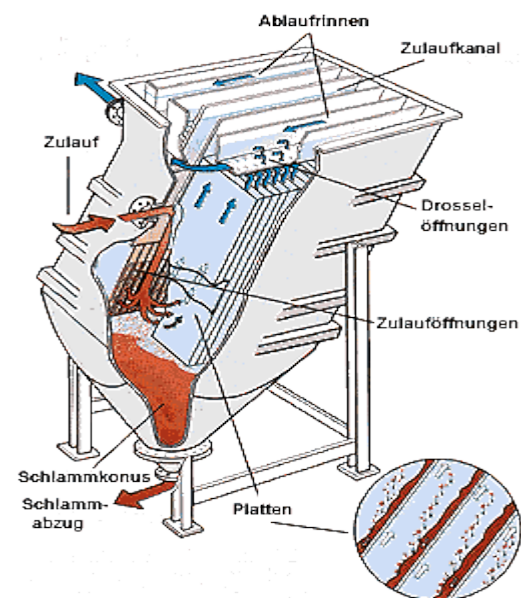
Foto: T. Zierner / © eneotech Umwelt GmbH

**Abb. 11: Überlauf Lamellenabscheider**



© Nordic Water GmbH

**Abb. 12: Lamellenabscheider (Johnson Lamella Separator®)**



© Nordic Water GmbH

**Abb. 13: Prinzipskizze Lamellenabscheider**

**Planungsgrundlagen:**

Als Planungsgrundlagen sind zu beachten:

- Wassermenge;
- Feststoffgehalt vor und nach der Sedimentation;
- Dichte, Größe und Sinkgeschwindigkeit der Partikel;
- Viskosität des Mediums;
- Temperatur (klimatische Verhältnisse);
- Platzbedarf.

Die Durchführung von Vorversuchen insbesondere zur Ermittlung der Sinkgeschwindigkeit in m/h ist zu empfehlen.

**Anwendungsbereich:**

- Schadstoffe: feste ungelöste Partikel jeder Größe und Dichte, die absinken und nicht in Schwebel bleiben
- Störstoffe bzw. störende Einflüsse: Schwebstoffe, Kolloide, die Viskosität des Wassers absenkende Einflüsse (Kälte, Salzgehalt), Turbulenz, ungenügende Verweilzeit. Ein beträchtlicher Anteil an Chloriden oder Schwebstoffen erhöht die Dichte (des Wassers) erheblich und beeinträchtigt das Absetzverhalten.

**Reinigungsleistung:**

- Erreichbare Ablaufwerte: je nach Aufenthaltszeit und Korngröße kann Partikelfreiheit erzielt werden, oft mit Hilfe einer vorhergehenden Fällung/Flockung. Der Ablauf ist klar, soweit es sich nicht um Kolloide oder Partikel handelt, die in Schwebel bleiben. Höchste Ansprüche sind auch durch nachgeschaltete Filteranlagen, z.B. Sand- oder Kiesfilter zu erzielen. Organische Partikel, die über einen geringen Dichteunterschied zum Wasser verfügen sind nur schwierig zur Sedimentation zu bewegen.

**Anwendungsgrenzen:**

- Die Zulaufkonzentrationen und -frachten sind nicht beschränkt. Allerdings können sich Partikel gegenseitig beim Absetzvorgang behindern, wenn deren Konzentration zu hoch ist. Hohe Zulaufkonzentrationen und -konzentrationen erhöhen in der Regel die Effizienz der Anlagen.
- Voraussetzung für einen effektiven Einsatz der Sedimentation ist das Erreichen einer ausreichend hohen Sinkgeschwindigkeit der Partikel ggf. unter Einsatz geeigneter Fällungs- und/ oder Flockungsmittel und Flockungshilfsmittel.

**Bemessung:**

Die Bemessung erfolgt im Wesentlichen über die Absetzgeschwindigkeit (in m/h), die wiederum von Korngröße, Partikeldichte und Viskosität des Wassers abhängt. Als Bemessungsgrößen werden die Flächenbeschickung (Verhältnis der Zulaufmenge zur Oberfläche des Absetzbehälters in m/h) und die Aufenthaltszeit (Quotient aus dem Volumen des Absetzraumes zur Zulaufmenge) herangezogen..

Absetzbecken sollten eine möglichst geringe Turbulenz aufweisen.

**Betriebskosten:**

Die Betriebskosten sind relativ niedrig. Es können große Wassermengen mit hohen Feststoffanteilen zu relativ geringen Kosten behandelt werden. Zur Verringerung der Entsorgungskosten kann eine statische oder maschinelle Schlammwässerung sinnvoll sein.



**Besonderheiten, Hinweise, Risiken:**

Große, oberflurig aufgestellte Absetzbecken bergen die Gefahr, keine ausreichende Standsicherheit aufzuweisen. Die abgesetzten Sedimente können sehr unterschiedliche physikalische (und chemische) Eigenschaften aufweisen. Absetzanlagen sind ausreichend gegen potentielle Emissionen von Schadstoffen zu schützen, da der Absetzvorgang i.d.R. vor der eigentlichen Schadstoffentfernung stattfindet.

**Entwicklungsstand bzw. Verbreitung:**

- Stand der Technik.
- Sedimentation ist eine uralte Kulturtechnik, die sich vielfach bewährt hat.

**Anforderungen an MSR:**

Die Anforderungen an das Messen, Regeln und Steuern von Sedimentationsanlagen sind relativ gering. Der Durchfluss sollte immer messtechnisch erfasst werden. Ebenso kann die Trübe gemessen werden. Partikelgröße und Absetzverhalten können in normierten Laborversuchen ermittelt werden. Der Einsatz von Überfüllsicherungen und Schlammabzugsteuerungen ist üblich.

**Kombination mit anderen Verfahren:**

Die Sedimentation wird üblicherweise mit Verfahren der Fällung und Flockung kombiniert. Hier kommen zum Einsatz:

- Oxidation/Reduktion bei Bedarf;
- Fällung und Flockung sehr häufig.

Nachgeschaltete Verfahren:

- Filtration zur Entfernung der Resttrübung;
- ggf. Schlammbehandlung für die abgesetzten Sedimente;
- ggf. Verfahren zur Entfernung der organischen Schadstoffe.

**Referenzen:**

Vielfach weltweit im Einsatz. Die Sedimentation ist eine der ältesten Kulturtechniken.

**Ausgewählte Literatur:**

- MUTSCHMANN, J. & STIMMELMAYR, F. (2011): Taschenbuch der Wasserversorgung.- 15. vollst. überarb. und aktual. Aufl., 15. Auflage. Vieweg+Teubner Verlag, Wiesbaden
- VEOLIA WATER SOLUTIONS & TECHNOLOGIES [Hrsg] (2009): VEOLIA Handbuch Wasser.- Verfahrenstechnologien der Aufbereitung.- 10. Auflage, (vormals WABAG Handbuch Wasser), Vulkan Verlag, Essen
- GROHMANN, A., HÄSSELBARTH, U. SCHWERDTFEGGER, W. (Hrsg.) (2002): Die Trinkwasserverordnung. Einführung und Erläuterungen für Wasserversorgungsunternehmen und Überwachungsbehörden.- 4. Neu bearbeitete Auflage, Erich Schmidt Verlag, Berlin



## 7.7 Flotation

### Prinzip:

Mittels der Flotation können ungelöste Kohlenwasserstoffe oder sich in Schwebelage befindliche Partikel entfernt werden.

### Aufbau und Beschreibung:

Unter Flotation versteht man das Aufschwimmen eines Partikels bei hinreichender Verweilzeit in einem Behälter unter Einwirkung einer Auftriebskraft. Die Auftriebskraft wird durch die Anlagerung von Gasbläschen, die z.B. durch Luft- oder Gaseinblasung hergestellt werden, erzeugt.

Die Flotation in wässrigen Suspensionen kann durch Zusätze von Chemikalien (Flotationshilfsstoffe) verbessert werden:

**Sammler** hydrophobieren die abzutrennenden Partikel. Durch chemische und/ oder physikalische Adsorption werden sie mit dem meist polaren Ende des Moleküls an der Oberfläche gebunden und ragen mit ihrem unpolaren Teil in die wässrige Phase hinein. Die Sammler werden nach ihren aktiven (polaren) Gruppen eingeteilt und es wird zwischen anionen- und kationenaktiven Sammlern unterschieden.

**Schäumer** zerteilen die eingeblasene Luft in möglichst viele kleine Bläschen und stabilisieren den gebildeten Schaum (u.a. aliphatische KW);

**Aktivatoren** begünstigen die Sorption der Sammlerionen an den abzutrennenden Partikeln. Lässt man an der Oberfläche von Partikeln mehrwertige Metallionen adsorbieren, so ziehen diese Ionen mit ihren Restvalenzen negative Sammlerionen stark an und machen die vorher passiven Mineralien schwimmfähig.

**Drücker oder Passivatoren** verhindern die Bildung von Sammlerfilmen auf gewissen Materialien und finden vor allem bei der selektiven Trennung von Erzmineralien Verwendung. Die Flotierbarkeit kann dadurch soweit unterdrückt werden, dass die positiven Restvalenzen durch negative Ionen besetzt werden und auf diese Weise die Sorption der ebenfalls negativ geladenen Sammlerionen behindert wird.

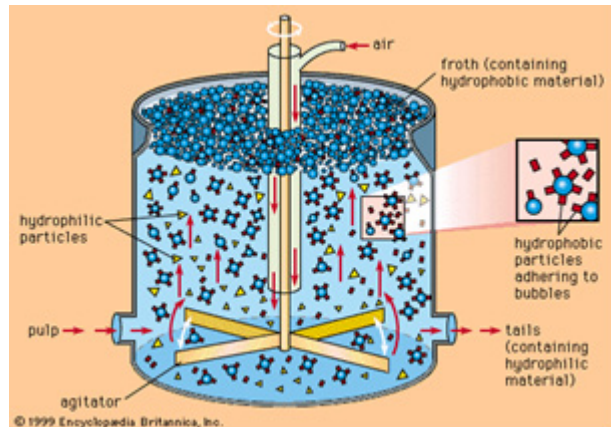
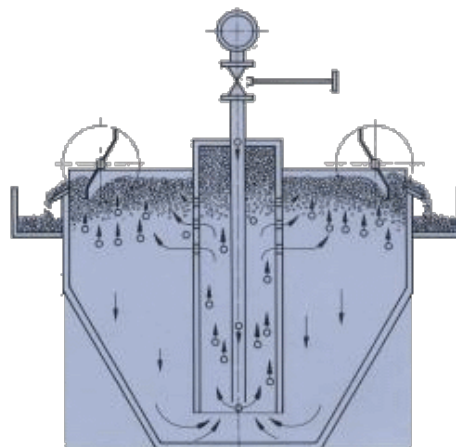


Abb. 14: Funktionsweise der Flotation

Nach Art der Erzeugung feiner Gasbläschen unterscheidet man:

- Turbulenzflotation;
- Elektroflotation;
- Entspannungsflotation.



© EKOF Flotation GmbH

Abb. 15: Flotationsreaktor

Für den Abzug des Flotates kommen geeignete Räume zum Einsatz.

**Planungsgrundlagen:**

- Hydraulische Bedingungen;
- Art und Menge der hydrophoben und hydrophilen Partikel
- Eine wichtige Rolle bei den Grenzflächenreaktionen spielt der pH-Wert, der auf die optimalen Werte eingestellt werden muss.

**Anwendungsbereich:**

Schadstoffe: Öltröpfchen, ungelöste Kohlenwasserstoffe, Schwebstoffe, Schwermetallhydroxide. Hydrophobe Partikel heften sich an die Gasblasen und steigen mit ihnen an die Oberfläche der Trübe, wo sie mit dem Schaum als Konzentrat abgestrichen werden können.

Störstoffe: Oberflächenaktive Stoffe, z.B. Tenside. Hydrophile Teilchen, die von einem adsorbierten Wasserfilm umgeben sind, verbleiben in der Trübe.

Die Flockung wird so eingestellt, dass eine optimale Flockenbildung erzielt wird. Eine Restbelastung an Partikeln im Reinwasser über die Dosierung an Flockungsmittel steuern zu wollen, funktioniert in der Regel nicht.

**Reinigungsleistung:**

Erreichbare Ablaufwerte: je nach Art und Menge der Schwebstoffe;

Eine Nachbehandlung zur Entfernung der Flotationshilfsstoffe ist in der Regel erforderlich. Auch aus diesem Grund wird die Flotation in der Grundwasserbehandlung selten eingesetzt. Sie findet eher im Abwasserbereich oder in der industriellen Erzaufbereitung Anwendung.

**Anwendungsgrenzen:**

Vorbereitende Reagenzien beseitigen die flotationsstörenden Ionen in der Trübe, verhindern durch Bildung von Schutzkolloiden die Flockung und stellen den für die optimale Wirkung der Sammler und Schäumer günstigen pH-Wert ein.

Zulaufkonzentrationen und -frachten: begrenzt.

**Bemessung:**

Maßgebende Bemessungsgröße für eine Flotationsanlage ist wie bei der Sedimentation die Oberflächenbeschickung (5-10 m/h). Weitere Bemessungsgrößen sind die Schadstofffracht und die Aufenthaltszeit, die Größe und Menge der Gasblasen sowie die Zugabe von Hilfsstoffen. Labor und Pilotversuche sind bei nicht erprobten Schwebstoffzusammensetzungen dringend zu empfehlen.

**Betriebskosten:**

Werden allgemein als gering angegeben. Konkrete Zahlen sind nur schwer erhältlich.

**Besonderheiten, Hinweise, Risiken:**

Die Auslegung einer Flotationsstufe ist komplex. Bei Wechsel von Wasserqualität und Eigenschaften der Schwebstoffe ändert sich die Effektivität der Flotation rasch und dramatisch. Für jedes aufzubereitende Material muss die optimale Reagenzienkombination und -menge im Labor ermittelt werden.

**Entwicklungsstand bzw. Verbreitung:**

Die Flotation ist ein bekanntes und in der Industrie bewährtes Verfahren. Wird in der Grundwasseraufbereitung allerdings selten eingesetzt. Ist Stand der Technik.

**Anforderungen an MSR:**

Durchflussmessung, regelmäßiger Abzug des Flotatschlammes, Steuerung der Reagenzienzugabe.

**Kombination mit anderen Verfahren:**

Flotationsverfahren werden i.d.R. in Kombination mit anderen Trennverfahren eingesetzt, insbesondere mit vorgehender Flockung/Fällung und nachfolgender Filtration. Eventuell müssen über eine nachgeschaltete Aktivkohleabsorption die Flotationshilfsstoffe entfernt werden.

**Referenzen:**

Deponie Georgswerder Hamburg, Reinigung der Stauflüssigkeiten;  
ÖGP Bitterfeld/Wolfen, Reinigung von Grundwasser  
Rüstungsalzstandort Hessisch Lichtenau

**Ausgewählte Literatur:**

- PATAT, F., KIRCHNER, K. (1985): Praktikum der Technischen Chemie,- 4. Auflage Walter de Gruyter, Berlin New York
- METCALF & EDDY, INC. (2003): Wastewater Engineering: Treatment and Reuse.- Fourth Edition, revised, Mc Graw-Hill series in civil and environmental engineering

## 7.8 Sand-/Kiesfiltration

### Prinzip:

Unter Sand- bzw. Kiesfiltration versteht man die Abscheidung von Feststoffpartikeln aus einer Suspension mit Hilfe mineralischer Filtermedien verschiedener Körnung. Die Sandfiltration ist oft der letzte Verfahrensschritt zur Feststoffabtrennung nach vorgehender Fällung/Flockung, Sedimentation oder Flotation. Bei niedrigen Feststoffkonzentrationen kann eine Sandfiltration ohne vorherige Sedimentation oder Flotation ausreichen.

### Aufbau und Beschreibung:

Sand- und Kiesfilter zählen zu den Schnellfiltern mit Tiefenwirkung. Durch ihren Einsatz können nachgeschaltete Behandlungsstufen geschützt werden. Die Trübstoffe bestehen meistens aus mineralischen Sedimentpartikeln (Schluff), die aus neuen Brunnen oder Baugruben ausgetragen werden oder ausgefällten Schwermetallen.

Sand- und Kiesfilter können als Schwerkraftfiltration oder als Druckfiltration ausgeführt sein. Üblich im Bereich der Grundwassersanierung sind Druckfilter, die in Stahl oder Kunststoff (GFK) ausgeführt werden. In der Regel besitzen sie einen Düsenboden mit Filterdüsen oder einen Filterstern.

Durch die Beladung des Filters reduziert sich der freie Porenraum (frei durchströmbare Querschnitt). Dies führt zu einem Anstieg des Druckverlustes im Filter. Das beladene Filterbett wird durch Rückspülen, d.h. Durchspülen in entgegengesetzter Richtung mit Wasser und/ oder Luft, von den Feststoffen befreit. Beim Rückspülen werden die im Filter gehaltenen Partikel ausgetragen, müssen aufgefangen und entsorgt werden. Je nach Erfordernis kann die Rückspülung mit entsprechender Technik von Hand oder voll automatisiert durchgeführt werden. Zur Rückspülung muss sauberes Wasser in ausreichender Menge zur Verfügung gestellt werden, dies erfolgt i.d.R. in Sammelbehältern.



Foto: M. Altenbockum

**Abb. 16: Druckfilterbehälter mit Armaturen und Mannloch**

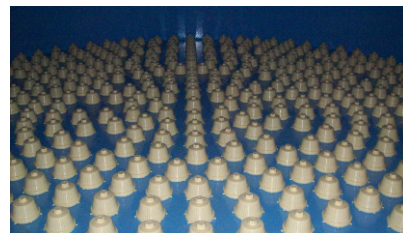


Foto: M. Altenbockum

**Abb. 17: Düsenboden mit Filterdüsen im Inneren des Druckfilterbehälters**

Die Filtermaterialien bestehen zumeist aus Quarzsand bzw. Quarzkies, die auf eine Stützschrift eingebracht werden. Die Stützschrift besteht aus mehrfach gewaschenem Quarzfilterkies der Körnung 2,0 bis 3,15 mm und wird per Hand eingebaut. Die typische Korngröße für Quarzsandfilter ist 0,7 - 1,2 mm. Bei Korngrößen ab 2 mm spricht man von Kiesfiltern. Werden Kies und Sand in Kombination verwendet, so spricht man von einem **Mehrschichtfilter**. Das Filterbett ist zwischen 0,5 m und 2,5 m hoch. Die Größe des Filterbehälters richtet sich vor allem nach dem zu reinigenden Volumenstrom und der Schwebstofffracht sowie der gewünschten **Filtergeschwindigkeit** (3 – 20 m/h).

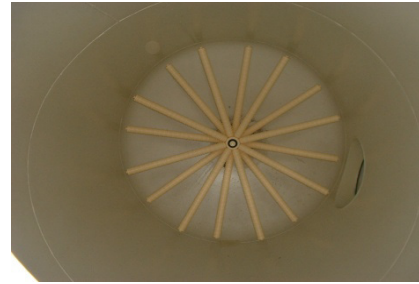


Foto: M. Altenbockum

**Abb. 18: Düsenstern im Innern eines Druckfilters**

**Planungsgrundlagen:**

- Standortnutzung//Flächenbedarf;
- Hydraulischer Durchfluss;
- Feststofffracht.

**Anwendungsbereich:**

- alle Bereiche der Wasseraufbereitung;
- Entfernung von Trübstoffen (mineralische Sedimente, Eisenocker) zum Schutz der nachgeschalteten Behandlungsstufen;
- bei langen Standzeiten biologische Entmanganung möglich.

**Reinigungsleistung:**

- Entfernung von Schwebstoffen und Partikeln bis auf die Nachweisgrenze (< 10 mg/l)

**Anwendungsgrenzen:**

- Nicht zur Entfernung gelöster Stoffe geeignet
- bei hohen Feststoffkonzentrationen ist eine Vorabscheidung (Sedimentation oder Flotation) erforderlich

**Bemessung:**

- zulässige Filtergeschwindigkeit;
- erforderliche Filterfläche (abhängig vom Durchfluss und von der Fracht);
- Filtermaterial;
- Höhe des Filters;
- Filterlaufzeit.

**Betriebskosten:**

- eher gering

**Besonderheiten, Hinweise, Risiken:**

- Rückspülbarkeit

|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Entwicklungsstand bzw. Verbreitung:</b> <ul style="list-style-type: none"><li>• Stand der Technik</li></ul>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   |
| <b>Anforderungen an MSR:</b> <ul style="list-style-type: none"><li>• bei regelmäßiger Vorortkontrolle für kleine Anlagen manuelle Rückspülung ausreichend;</li><li>• zur Überwachung permanente Differenzdruckmessung zwingend;</li><li>• hoher Aufwand bei automatisierter Rückspülung;</li><li>• ggf. Überdrucksicherung der Behälter.</li></ul>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               |
| <b>Kombination mit anderen Verfahren:</b> <ul style="list-style-type: none"><li>• als Nachreinigung bei vorhergehender Fällung/Flockung, Sedimentation oder Flotation;</li><li>• als Schutz der folgenden Stufen (z.B. Aktivkohlefiltration) vor Verstopfung</li></ul>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           |
| <b>Referenzen:</b> <ul style="list-style-type: none"><li>• weit verbreitet</li></ul>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |
| <b>Ausgewählte Literatur:</b> <ul style="list-style-type: none"><li>- FEßMANN, J., &amp; ORTH, H. (2002): Angewandte Chemie und Umwelttechnik für Ingenieure – Handbuch für Studium und betriebliche Praxis, 2. Auflage, Ecomed Verlagsgesellschaft</li><li>- MUTSCHMANN, J. &amp; STIMMELMAYR, F. (2011): Taschenbuch der Wasserversorgung.- 15. vollst. überarb. und aktual. Aufl., 15. Auflage. Vieweg+Teubner Verlag, Wiesbaden</li><li>- METCALF &amp; EDDY, INC. (2003): Wastewater Engineering: Treatment and Reuse.- Fourth Edition, revised, Mc Graw-Hill series in civil and environmental engineering</li><li>- WILHELM, S. (2008): Wasseraufbereitung. Chemie und chemische Verfahrenstechnik.- 7., aktualisierte und ergänzte Auflage, Springer Verlag, Berlin Heidelberg</li></ul> |



## 7.9 Membranfiltration

### Prinzip:

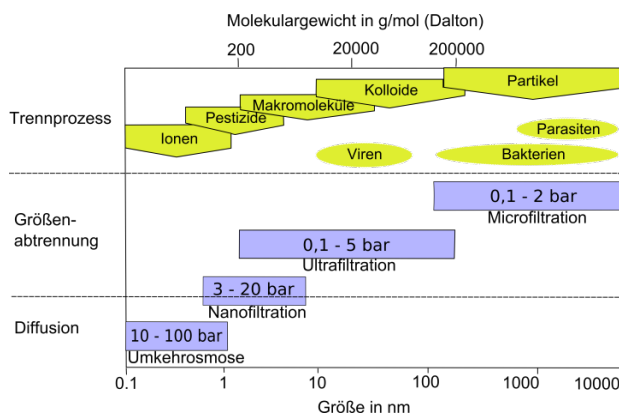
Membranen sind in der Lage, den Stofftransport zu selektieren. Als Trennkriterien sind neben der Größe auch die Polarität oder andere chemische Eigenschaften der Stoffe zu beachten. Das Trennprinzip beruht auf einem Potentialunterschied (Konzentration oder Druck) auf beiden Seiten der Membran, der zu einem selektiven Stofftransport führt. Im Unterschied zur klassischen Filtration wirkt die Membranfiltration bis in den molekularen Bereich trennend. Es können also auch höhermolekulare von niedrigmolekularen Stoffen getrennt werden.

### Aufbau und Beschreibung:

Zu den Membranverfahren gehören:

- Mikrofiltration,
- Ultrafiltration,
- Nanofiltration
- Umkehrosmose.

Ihre Trennwirkung ist in Abb. 19 dargestellt. Bei der Mikro- und Ultrafiltration werden poröse Membranen, bei der Nanofiltration und Umkehrosmose nicht-poröse Membranen verwendet.



**Abb. 19: Arten der Membranverfahren**

Das zu behandelnde Rohwasser wird unter Druck durch die Membran geführt, wobei die Druckdifferenz wie in Abb. 19 dargestellt für jedes Verfahren in einem bestimmten Bereich liegen sollte. Der Rückstand wird als Konzentrat bezeichnet, welches ggf. einer Entsorgung zuzuführen ist. Das durch die Membran geführte Reinwasser ist das Permeat.

Abbildung 20 zeigt das Wirkprinzip der Membran einer Ultrafiltrationsanlage

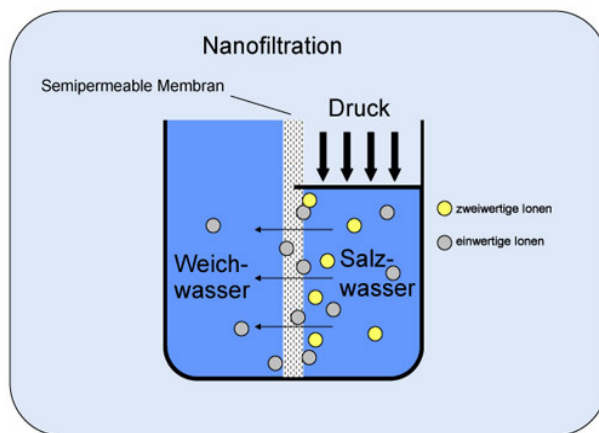


© W.E.T. Wasser.Energie.Technologie GmbH

**Abb. 20: Aufbau und Betrieb der Membran der Ultrafiltrationsanlage**



**Nanofiltration:** Mit diesem Verfahren können gelöste organische Bestandteile und vorzugsweise 2-wertige Ionen zurückgehalten werden. Die treibende Kraft für den Prozess ist die Druckdifferenz zwischen Vorder- und Rückseite der Membran. Zudem besteht ein stetes Bestreben nach Ladungs- und Konzentrationsausgleich. Das zu behandelnde Rohwasser wird unter Druck durch die nicht poröse Membran geführt, wobei die Druckdifferenz zwischen 3 und 20 bar liegen sollte. Wie in Abbildung 21 zu sehen, werden die relevanten Stoffe, hier 2-wertige Ionen, an der Membran zurückgehalten.



© FuMA-Tech GmbH

**Abb. 21: Prinzip der Nanofiltration**  
(Quelle: [www.fumatech.de](http://www.fumatech.de))

Um Scaling und Ablagerungen an der Membran zu verhindern, werden spezielle Chemikalienzusätze benutzt.



© Zweckverband Wasserversorgungsgruppe Mühlbach, Bad Rappenau; [www.wvg-muehlbach.de](http://www.wvg-muehlbach.de)

**Abb. 22: Nanofiltrationsanlage**

#### Planungsgrundlagen:

- Fracht;
- Partikelart und -größe;
- gewünschter Wirkungsgrad;
- Reinigungsfrequenzen.
- Wichtig ist die Kenntnis über Art und Konzentration der gelösten Stoffe.

#### Anwendungsbereich:

- Mikrofiltration: Abtrennung vom Schmutz und Öl aus Entfettungsbädern; Rückgewinnung von Pigmenten aus Abwasser; Abtrennung von Hydroxidflocken aus Abwasser, Abtrennung von Algen und Bakterien.
- Ultrafiltration: Trennung von Öl/Wassergemischen (Emulsionsspaltung), Abtrennung von Trübstoffen, Viren, Plankton
- Nanofiltration: Entfärbung, Enthärtung, CSB-/BSB-Senkung und Entsalzung, Abtrennung von Pestiziden und Huminstoffen.
- Umkehrosmose: Entsalzung, Reinstwasserherstellung, Keimentfernung, Aufbereitung von Deponiesickerwässern, Konzentrierung von z.B. Lacken und Farbstoffen

#### Reinigungsleistung:

- Je nach Verfahren und Gehalt an trennbaren Substanzen.

|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Anwendungsgrenzen:</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Nicht jedes Stoffgemisch ist mit jeder Membran abtrennbar. Vorversuche sind erforderlich.</li> <li>• Die zu filtrierende Lösung muss vorgereinigt (Feststoffabtrennung) werden.</li> <li>• Die Rückhaltung von einzelnen Ionen in Ionengemischen ist schwierig, da das Ion mit der höchsten Rückhaltung die der übrigen bestimmt.</li> </ul>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            |
| <b>Bemessung:</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Wasservolumenstrom,</li> <li>• Molekülgröße.</li> </ul>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |
| <b>Betriebskosten:</b><br>Die bestimmenden Faktoren sind: <ul style="list-style-type: none"> <li>• Hydraulischer Durchfluss;</li> <li>• Trennschnitt, Reinigungsziele;</li> <li>• Konzentration der Stoffe.</li> </ul>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     |
| <b>Entwicklungsstand bzw. Verbreitung:</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>• häufig eingesetzt zur Betriebswasser- und Trinkwasseraufbereitung, Entsalzung und Enthärtung sowie Deponiesickerwasserbehandlung;</li> <li>• bei der Grundwasseraufbereitung derzeit in der Versuchsphase.</li> </ul>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |
| <b>Anforderungen an MSR:</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>• kontinuierliche Differenzdrucküberwachung,</li> <li>• automatisierte Rückspülung.</li> </ul>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |
| <b>Kombination mit anderen Verfahren:</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Können, je nach gewünschter Reinigungsleistung, mit konventionellen Filtrationsverfahren kombiniert werden.</li> </ul>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |
| <b>Referenzen:</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Meerwasseraufbereitung, Abwassertechnik, wird seltener im Grundwasserbereich angewandt.</li> </ul>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |
| <b>Ausgewählte Literatur:</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>- MUTSCHMANN, J. &amp; STIMMELMAYR, F. (2011): Taschenbuch der Wasserversorgung.- 15. vollst. überarb. und aktual. Aufl., 15. Auflage. Vieweg+Teubner Verlag, Wiesbaden</li> <li>- GRÄF, R., LOHMEYER, S. &amp; SCHWERING, H.-U. (2002), WEKA Praxishandbuch: Abwassertechnik in der Produktion – Verminderung, Behandlung, Rückgewinnung. - Weka-Verlag, Augsburg; Auflage: 2., überarb. A. (38. Ergänzungslieferung, November 2002)</li> <li>- METCALF &amp; EDDY, INC. (2003): Wastewater Engineering: Treatment and Reuse.- Fourth Edition, revised, Mc Graw-Hill series in civil and environmental engineering</li> <li>- WILHELM, S. (2008): Wasseraufbereitung. Chemie und chemische Verfahrenstechnik.- 7., aktualisierte und ergänzte Auflage, Springer Verlag, Berlin Heidelberg</li> </ul> |

## 7.10 Ionenaustausch

### Prinzip:

Als Ionenaustauscher werden Materialien bezeichnet, an denen Ionen durch andere Ionen der gleichen Ladung ersetzt werden können.

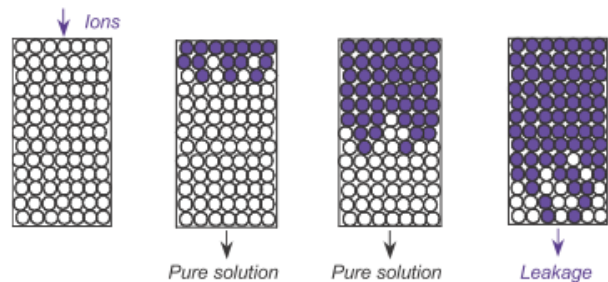
### Aufbau und Beschreibung:

Ionenaustauscheranlagen sind i.d.R. Säulen, die mit einem Ionenaustauschermaterial gefüllt sind und durch die das Wasser mit dem zu entfernenden Ion geführt wird. Es werden Kationen- und Anionenaustauscher unterschieden, die in Abhängigkeit von der aus dem Fluid zu entfernenden Komponente zum Einsatz kommen. Typische Ionentauscher-Materialien sind natürliche oder künstliche Zeolithe, Tonminerale und Kunstharz. Je nach funktioneller Gruppe des Materials werden die Austauscher in stark oder schwach saure bzw. stark oder schwach basische Austauscher unterschieden.

Ionentauscher finden in einer Vielzahl von Prozessen der Wasserenthärtung und Entsalzung Verwendung.

Die Ionentauscher-Technologie findet sowohl als Membranen, welche vom zu behandelnden Fluid durchströmt werden, als auch als Säulen, welche mit dem eigentlichen Ionentauscher-Material gefüllt sind, Anwendung. Letztere kommen aufgrund der zumeist großen Volumenströme bei Trink- oder Grundwasseraufbereitungen zum Einsatz.

Ionenaustauscher sind vor Ort oder extern regenerierbar. In der Praxis kann es trotz technischer Machbarkeit wirtschaftlicher sein kann, belegte Ionenaustauscher zu ersetzen statt zu regenerieren. Bei der Regenerierung wird sich zu Nutze gemacht, dass die Belegungsreaktion eine Gleichgewichtsreaktion und damit reversibel ist. Kationenaustauscher lassen sich durch verdünnte Schwefelsäure oder Salzsäure, Anionenaustauscher durch wässriges Ammoniak oder verdünnte Natronlauge mit Natriumcarbonat regenerieren. Wässrige Kochsalzlösung eignet sich für beide Ionentauschertypen.



**Abb. 23: Betrieb von Ionenaustauscherharzen in Säulen (ROHM AND HAAS 2008.- In: Ionenaustausch für Laien; [www.wallner-wasser.at](http://www.wallner-wasser.at))**



**Abb. 24: Ionenaustauscheranlage (ROHM AND HAAS 2008.- In: Ionenaustausch für Laien; [www.wallner-wasser.at](http://www.wallner-wasser.at))**

|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Planungsgrundlagen:</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Art und Konzentration der zu entfernenden Stoffe;</li> <li>• Art und Konzentration von Ionen, für die das Ionentauschermaterial eine größere Affinität hat als für den eigentlichen Schadstoff;</li> <li>• Volumenstrom.</li> </ul>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                |
| <b>Anwendungsbereich:</b> <p>Ionenaustauscherverfahren eignen sich besonders zur Wasserenthärtung und bei Verunreinigungen des Wassers mit Schwermetallen, Salzen oder Säuren.</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Schadstoffe: Schwermetalle (Pb, Cd, Co), Salze, Härtebildner (Ca, Mg), alle in ionisierter Form vorliegenden Schadstoffe (z.B. As, CN)</li> <li>• Störstoffe: Trübstoffe, Eisen, Mangan, Aluminium, Öle, Tenside, Komplexbildner, organische Substanzen können zu Harzblockierungen führen</li> <li>• Konkurrierende Stoffe können die Austauschleistung deutlich herab setzen.</li> </ul> |
| <b>Reinigungsleistung:</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Reinigung bis unter die Nachweisgrenze in Abhängigkeit von Störstoffen und Zulaufkonzentration möglich</li> <li>• Die Reinigungsleistung und damit der Kostenaufwand ist stark von den Begleitstoffen abhängig. Das kann das Ionenaustauschverfahren in einigen Fällen unattraktiv machen.</li> </ul>                                                                                                                                                                                                                                              |
| <b>Anwendungsgrenzen:</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Zulaufkonzentrationen und -frachten: niedrige Schadstoffkonzentrationen</li> <li>• Erreichbare Ablaufwerte: Die Ablaufwerte liegen für Schwermetalle in der Regel unter 10 µg/L.</li> </ul>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |
| <b>Bemessung:</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Wassermenge;</li> <li>• Schadstoffkonzentration;</li> <li>• pH-Wert des Rohwassers;</li> <li>• Austauschkapazität des Materials;</li> <li>• Bettausdehnung.</li> </ul>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      |
| <b>Betriebskosten:</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Einfache, wartungsarme Betriebsweise;</li> <li>• Investitionskosten abhängig vom Wasserdurchsatz;</li> <li>• Entsorgung oder Regenerierung des Austauschermaterials, frachtabhängig;</li> <li>• Regenerierung vor Ort ist technisch aufwendig und i.d.R. unwirtschaftlich;</li> <li>• Kostenentwicklung für Austauschermaterial führte in den letzten Jahren zu einer deutlichen Reduzierung der Betriebskosten.</li> </ul>                                                                                                                            |
| <b>Besonderheiten, Hinweise, Risiken:</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Regenerierung vor Ort nur bei großen Wassermengen und Frachten</li> <li>• Umgang mit Abwasser (Regenerat) aufwendig</li> </ul>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      |

**Entwicklungsstand bzw. Verbreitung:**

- Weite Verbreitung bei der Verwendung von Ionenaustauschern: Elektroindustrie, Urangewinnung, Abwasserreinigung, Herstellung von demineralisiertem Wasser

**Anforderungen an MSR:**

- Schaltungsarten der Ionenaustauscher im Kreislaufverfahren: Straßenschaltung (abwechselnder Betrieb jeweils einer Straße), Reihenschaltung, Parallelschaltung
- Beschickung im Gleich- oder Gegenstrom
- Drucküberwachung zum Schutz vor Verblockungen

**Kombination mit anderen Verfahren:**

- Vorbehandlung zur Abscheidung ungelöster Stoffe (z.B. Partikelfilter) wird ausdrücklich empfohlen

**Referenzen:**

Abscheidung von Metallen und Salzen, Enthärtung

**Ausgewählte Literatur**

- GRÄF, R., LOHMEYER, S. & SCHWERING, H.-U. (2002), WEKA Praxishandbuch: Abwassertechnik in der Produktion – Verminderung, Behandlung, Rückgewinnung. - Weka-Verlag, Augsburg; Auflage: 2., überarb. A. (38. Ergänzungslieferung, November 2002)
- ROHM AND HAAS (2008): Ionenaustausch für Laien – Eine Einführung.- [http://www.wallner-wasser.at/de/downloads/IX\\_fuer\\_Laien.pdf](http://www.wallner-wasser.at/de/downloads/IX_fuer_Laien.pdf)
- NEUMANN, ST. (2010): Kreislaufanlagen-Wasserrecycling mit Ionenaustauschern,, Löhnberger Abwassertage
- MUTSCHMANN, J. & STIMMELMAYR, F. (2011): Taschenbuch der Wasserversorgung.- 15. vollst. überarb. und aktual. Aufl., 15. Auflage. Vieweg+Teubner Verlag, Wiesbaden
- ECKER, M. (2008): Entfernung von Chrom aus Wasser mit Absorptionsmittel 3,- Galvanotechnik, 99/1

## 7.11 Schlammmentwässerung

### Prinzip:

Aus dem Schlamm wird mittels unterschiedlicher Verfahren Wasser abgeschieden. Es kommen dabei vorwiegend physikalische Verfahren zum Einsatz, die durch die Zugabe von Chemikalien unterstützt werden können.

### Aufbau und Beschreibung:

Mit einer Schlammmentwässerung wird der Feststoffgehalt im Schlamm gegenüber dem Wassergehalt deutlich erhöht. Schlämme aus der Wasseraufbereitung besitzen in der Regel nur einen Feststoffgehalt von einigen Promilleanteilen (bis zu 3 %). Ziel ist es, die Entsorgungskosten durch die Erhöhung des Feststoffanteiles im Schlamm zu verringern.

Zur Schlammmentwässerung gibt es eine Vielzahl von unterschiedlichen Verfahren, die sich im Wesentlichen durch den Bedarf an Zeit, zur Verfügung stehenden Flächen und dem angestrebten Restwassergehalt sowie den Kosten unterscheiden:

- Schwerkraftentwässerung in Schlammcontainern;
- Eindicker mit oder ohne Krählerwerke und Chemikalienzugabe;
- Dekanter und Zentrifugen;
- Siebbandpressen;
- Kammerfilterpressen.

Der erreichbare TS-Gehalt hängt von der Art des Schlammes organisch/anorganisch), von den Zusatzstoffen (Flockung) und von der gewählten Entwässerungsmethode ab. Mit Kammerfilterpressen kann ein stichfester Schlamm erzeugt werden, der 30 % TS und mehr aufweist. Geringere Entwässerungsleistungen bringen Dekanter und Siebbandpressen.

Die Rückführung des abgetrennten Filtratwassers erfolgt üblicherweise in die Aufbereitungsanlage selber.



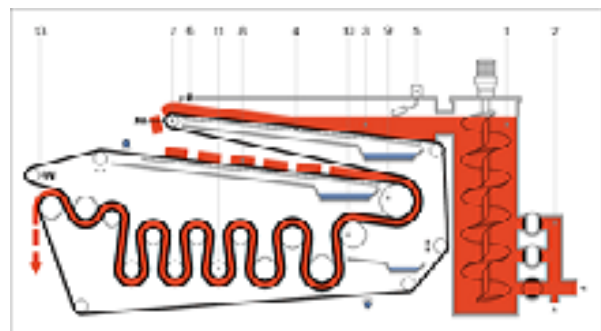
© KRAUSSE FILTRATION

**Abb. 25: Vollautomatische Kammerfilterpresse**  
(Quelle: [www.krausse-filtration.de](http://www.krausse-filtration.de))



© Flottweg SE

**Abb. 26: Dekanter**



© dm Dehydrat AG

**Abb. 27: Funktionsschema Siebbandpresse**



**Planungsgrundlagen:**

- Hydraulische Bemessung: Durchflussmenge;
- Feststoffbelastung: Feststoffgehalt, Korngröße und Korndichte;
- Verwendung von Flockungsmitteln und Flockungshilfsmitteln;
- angestrebter Feststoffgehalt.

**Anwendungsbereich:**

- Schadstoffe: Entwässerung des Feststoffanteils (Schlamm)
- Störstoffe: Stoffe und pH-Wert, die die Flockung behindern bzw. die Entwässerbarkeit des Schlammes beeinträchtigen können.

**Reinigungsleistung:**

Der Restwassergehalt wird maßgebend durch die prinzipielle Auswahl der Apparatur bestimmt. In der Regel wird ein möglichst hoher Feststoffanteil im entwässerten Schlamm angestrebt. In geringen Maß kann der Entwässerungsgrad durch die Polymerdosierung beeinflusst werden, wobei Kosten und Nutzen abzuwägen sind.

**Anwendungsgrenzen:**

- Zulaufkonzentrationen und -frachten: Schlamm wird u.U. verdünnt und es werden Flockungsmittel eingemischt (in der Regel wenige % Feststoffgehalt (TS))
- Erreichbare Ablaufwerte: je nach Verfahren bis zu 30% und mehr Feststoffgehalt, klares Ablaufwasser.

**Bemessung:**

Hydraulisch und nach dem Feststoffgehalt und der Feststoffart (z.B. vorwiegend mineralisch oder organisch). Bei unbekannten Schlämmen sollten Pilotversuche durchgeführt werden!

**Betriebskosten:**

- je nach Schlammart und -zusammensetzung sowie der Art und Menge der Flockungsmittel.
- Die Entsorgungskosten für den entwässerten Schlamm sind zu berücksichtigen.

**Besonderheiten, Hinweise, Risiken:**

Organische Schlämme lassen sich in der Regel schwieriger und schlechter entwässern, als mineralische, gut geeignet für Schluffe und Sande. Die Vorschaltung von Eindickern empfiehlt sich in vielen Fällen.

Mobile Serviceunternehmen bieten die Schlammentwässerung im Lohnauftrag an und kommen hierzu mit fahrbaren Anlagen an den Ort des Schlammanfalls.

Der Schadstoffgehalt im zu entsorgenden Schlamm ist sorgfältig zu überprüfen und gegebenenfalls ist die Schadstoffbilanz des Gesamtverfahrens über eine Validierung zu überprüfen.

Die Wahl des Flockungshilfsmittels muss immer an das gewählte Verfahren angepasst werden (Versuche zu empfehlen).

**Entwicklungsstand bzw. Verbreitung:**

Stand der Technik. Die Verfahren zur Schlammentwässerung sind großtechnisch entwickelt und erprobt und vielfältig im Einsatz auch außerhalb der Wasserreinigung z.B. bei der Papierherstellung und in der Lebensmittelindustrie.



**Anforderungen an MSR:**

- Wassermengen- oder -durchflussmessung, Steuerung der Dosierungspumpen für die Zugabe von Flockungsmitteln, ggf. optische Überwachung, Feststoffgehalt regelmäßig messen (vor Ort oder im Labor)

**Kombination mit anderen Verfahren:**

Klärschlamm wird für den weiteren Entsorgungsweg entwässert, dabei können folgende Verfahrensstufen genutzt werden: Eindicken, Konditionieren, Hygienisieren, Trocknen und Verbrennen. Welche Verfahren dabei angewendet werden und in welcher Reihenfolge dies erfolgt, kann unterschiedlich sein.

Kombination mit Schlammeindickung und anderen Trennverfahren üblich. Das meist klare Filtratwasser muss in der Regel weiterbehandelt werden. Die Rückführung des abgetrennten Wassers in die Aufbereitungsanlage ist üblich (Recycling).

**Referenzen:**

Häufige Anwendung bei der Grundwasseraufbereitung mit größeren Schlamm-mengen, in Kläranlagen, in der Papierindustrie, Metha-Anlage in Hamburg zur Hafenschlammmentwässerung u.v.m.

**Ausgewählte Literatur:**

- ABWASSERTECHNISCHE VEREINIGUNG E.V. (ATV) (1996): ATV-Handbuch Klärschlamm.- 4. Auflage, Ernst & Sohn Berlin

## 7.12 (Chemische) Oxidation

### Prinzip:

Unter Oxidation versteht man eine chemische Reaktion, bei der Elemente, Ionen oder Verbindungen Elektronen abgeben, so dass ihre Oxidationszahl sich erhöht. Als Oxidation im ursprünglichen Sinn bezeichnete man früher die chemische Reaktion eines Stoffes mit Sauerstoff.

### Aufbau und Beschreibung:

Bei der chemischen Oxidation erfolgt die Zersetzung des Schadstoffes durch Zugabe eines geeigneten Oxidationsmittels. Mögliche Oxidationsmittel im Bereich der Wasseraufbereitung sind:

- Sauerstoff;
- Wasserstoffperoxid;
- Ozon;
- Permanganat;
- Natriumpersulfat.

Die chemischen Oxidationsmittel können prinzipiell eine Vielzahl organischer Schadstoffe zu Kohlendioxid, Wasser und anderen anorganischen Produkten oxidieren. Außerdem werden gelöste Metalle oxidiert und damit in ihre weniger oder nicht lösliche Form überführt, z.B. Eisen, Arsen und Nickel.

Zur Reinigung kontaminierter Grundwässer kommen häufig Luftsauerstoff und Wasserstoffperoxid zum Einsatz und zwar vorrangig für die Oxidation von Metallen. Eine gezielte Schadstoffelimination nur mit Sauerstoff oder Wasserstoffperoxid ist in aller Regel nicht möglich oder nicht wirtschaftlich. Dazu ist der zusätzliche Einsatz von Katalysatoren erforderlich (siehe Kap. 7.14)



© IBL Umwelt- und Biotechnik GmbH

**Abb. 28: UV-Photooxidationsanlage zur Behandlung von Grundwasser**

Organische Schadstoffe lassen sich gut mit sogenannten AOP-Verfahren (Advanced Oxidation Processes) zersetzen. Dabei handelt es sich um Kombinationen von z.B.

- Ozon/Wasserstoffperoxid
- Ozon/UV
- Wasserstoffperoxid/UV.

### Planungsgrundlagen:

Die Wahl eines Oxidationsmittels oder einer Mischung verschiedener Oxidationsmittel hängt in großem Maße davon ab, welche Bandbreite an Stoffen behandelt werden sollen, sowie von Faktoren die das Einbringen und Verteilen der Oxidationsmittel beeinflussen sowie von entstehenden Nebenprodukten.

Die chemische Oxidation ist ein nicht selektiver Prozess; d.h. alle oxidierbaren Stoffe werden auch mehr oder weniger oxidiert und konkurrieren um das Oxidationsmittel. Die Auswahl von Oxidationsverfahren alternativ zu anderen Verfahren hängt letztendlich davon ab, ob ein geeignetes Oxidationsmittel zur Verfügung steht und ob die Reaktionskinetik ausreichend schnell ist.

**Anwendungsbereich:**

Schadstoffe: Oxidationsverfahren können prinzipiell bei der Behandlung von anorganischen und organischen Stoffen eingesetzt. Weit verbreitet ist die Oxidation im Hinblick auf die Fällung von anorganischen Stoffen z.B. Eisen und Arsen. Für die Oxidation organischer Schadstoffe benötigt man im Allgemeinen Ozon oder setzt AOP-Verfahren ein.

Störstoffe: Störend ist bei der Oxidation das Vorhandensein anderer (nicht schädlicher) organischer Stoffe, die zu einem hohen Verzehr des Oxidationsmittels führen können, oder von Inhaltsstoffen, die ebenfalls oxidiert und ausgefällt werden, ohne dass dies erwünscht ist.

**Reinigungsleistung:**

- Eine Regelung des Oxidationsgrades ist über die Dosierung des Oxidationsmittels möglich.
- Die Effektivität der Oxidation ist sehr stark von den Begleitstoffen abhängig. Eine selektive Oxidation ist in den allermeisten Fällen nicht möglich.

**Anwendungsgrenzen:**

- Organische Schadstoffe sind durch einfache Oxidation mit Sauerstoff oder Wasserstoffperoxid nicht angreifbar.
- Die Zulaufkonzentrationen und -frachten sind unbegrenzt. Je nach Art und Menge der eingesetzten Oxidationsmittel sind die behördlicherseits geforderten Ablaufwerte erreichbar, wobei Kosten und Nutzen abzuwägen sind.
- Suspendierte Partikel und Trübstoffe stören durch Absorption der UV-Strahlung, wodurch die Radikalbildung eingeschränkt werden kann.
- Huminstoffe konkurrieren um Oxidationsmittel; durch Absorption der UV-Strahlung kann die Radikalbildung eingeschränkt werden.
- $\text{Fe}^{2+}$ ,  $\text{Mn}^{2+}$ , Sulfide,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{NO}_2^-$ ,  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{NH}_4^+$  konkurrieren um das Oxidationsmittel.
- Nitratkonzentrationen  $> 100 \text{ mg/l}$  absorbieren UV-Strahlung und können sich auf die Radikalbildung einschränkend auswirken.

**Bemessung:**

- Kontaktzeit mit dem Oxidationsmittel;
- Eintragsart des Oxidationsmittels.

**Betriebskosten:**

Die Betriebskosten hängen von folgenden Kostenfaktoren ab:

- Schadstoffart und -konzentration;
- Art und Menge des Oxidationsmittels;
- Art und Menge der Störstoffe;
- Reinigungsziel (Restkonzentration im gereinigten Grundwasser).

**Besonderheiten, Hinweise, Risiken:**

Oxidationsmittel können in flüssiger Form oder als Gas dem zu reinigenden Wasser in einem Mischbehälter oder in eine Rohrleitung ggf. unter Nutzung eines statischen oder dynamischen Inline-Mischers zugeführt werden

Zur Auswahl eines geeigneten Oxidationsmittels (oder einer Mischung aus mehreren Mitteln) müssen in der Regel Laborversuche durchgeführt werden. Basierend auf den Laborversuchen werden der Umfang der Behandlung und die benötigte Menge an Oxidationsmittel abgeschätzt.

Bei Methoden mit Ozon wird dieses direkt vor Ort in der Wasseraufbereitungsanlage hergestellt, da es sehr instabil ist.

**Entwicklungsstand bzw. Verbreitung:**

- Stand der Technik.
- Sauerstoff und Wasserstoffperoxid weit verbreitet zur Schwermetalloxidation.

**Anforderungen an MSR:**

- Dosierung der Oxidationsmittel in Abhängigkeit von der Wassermenge und der Konzentration der zu oxidierenden Stoffe;
- Messung und Einstellung des pH-Wertes

**Kombination mit anderen Verfahren:**

Eine Kombination ist prinzipiell mit allen anderen Verfahren möglich. Die Oxidation von Eisen und Mangan ist in der Regel anderen Verfahrensschritten vorangestellt. Der Oxidation zur Ausfällung von Metallen folgt üblicherweise die Sedimentation oder Filtration der Fällungsprodukte. Die chemische Oxidation organischer Inhaltsstoffe ist oft die letzte Stufe des Aufbereitungsprozesses.

**Referenzen:**

Vielzahl realisierter Anlagen.

**Ausgewählte Literatur:**

- FEDERAL REMEDIATION TECHNOLOGIES ROUNDTABLE (FRTR): Remediation Technologies and Screening Matrix and Reference Guide, Version 4.0.-  
<http://www.frtr.gov/matrix2/section1/toc.html>
- FRIMMEL, F.H., ZWIENER, C. & KLEISER, G. (2000): Oxidationsverfahren in der Wasseraufbereitung.- Nachrichten aus der Chemie, 48
- ITRC (Interstate Technology & Regulatory Council) (2006): Above Ground Treatment Technologies. RPO-4.- Washington, D.C.: Interstate Technology & Regulatory Council, Remediation Process Optimization Team. [www.itrcweb.org](http://www.itrcweb.org)
- KURZMANN, G. E. (1993): Ozonanwendung in der Wasseraufbereitung. Kontakt & Studium Bd. 118 , 2. Auflage, expert-Verlag, Ehningen
- LANDESANSTALT FÜR UMWELTSCHUTZ BADEN-WÜRTTEMBERG (1995): Grundwasseraufbereitung bei der Bearbeitung von Altlasten und Schadensfällen.- Handbuch Altlasten und Grundwasserschadensfälle, Bd. 17.- Fachdokumente online,  
<http://www.lubw.baden-wuerttemberg.de/servlet/is/16793/>
- NYER, E.K. [ed.] (2009): Groundwater Treatment Technology.- 3rd ed. (Wiley).
- [http://www.wasseraufbereitungsseiten.de/enteisung\\_faq.htm](http://www.wasseraufbereitungsseiten.de/enteisung_faq.htm)
- [http://www.wasseraufbereitungsseiten.de/nitratentfernung\\_faq.htm](http://www.wasseraufbereitungsseiten.de/nitratentfernung_faq.htm)

## 7.13 (Chemische) Reduktion

### Prinzip:

Unter Reduktion wird eine chemische Reaktion verstanden, bei der Elektronen von einem Element, Ion oder Molekül aufgenommen werden. Die Oxidationszahl erniedrigt sich. Oxidation und Reduktion sind stets miteinander in einer Redoxreaktion verbunden.

### Aufbau und Beschreibung:

Bei der chemischen Reduktion erfolgt der Schadstoffabbau durch Zugabe eines geeigneten Reduktionsmittels. Für die Wasseraufbereitung zur Entfernung von Metallen werden durch die reduktiven Verfahren die Metalle in der Regel in Spezies überführt, deren Löslichkeit gegenüber der Ausgangsspezies deutlich geringer ist.

Für die Behandlung chromathaltiger Wässer wird das hexavalente Chrom zu dreiwertigem Chrom reduziert.  $\text{Cr}^{3+}$  kann dann entweder als Hydroxid ausgefällt oder über Adsorptionsverfahren aus dem Wasser entfernt werden.

Die abiotische reduktive Dechlorierung von höher chlorierten Ethenen (Tri- und Tetrachlorethen) zu cis-Dichlorethen mittels  $\text{Fe}^0$ -Granulat in Durchlaufreaktoren (sog. Bernareaktor) wird als Vorstufe zur Nachreinigung mit Aktivkohle eingesetzt.



Foto: M. Altenbockum

**Abb. 29: Reduktionsstufe einer Grundwasser-Aufbereitungsanlage**

Neben dem Bedarf zur Reaktion der Schadstoffe muss genügend Reduktionsmittel eingesetzt werden, um den Bedarf anderer konkurrierender organischer und anorganischer Stoffe im Wasser zu decken.

### Planungsgrundlagen:

$\text{Fe}^{2+}$ ,  $\text{Mn}^{2+}$ , Sulfide,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{NO}_2^-$ ,  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{NH}_4^+$  konkurrieren um die Reduktionsmittel; die Abschätzung der Konzentration und Mengen des benötigten Reduktionsmittels bzw. der Effizienz muss diese mit einbeziehen. Eine eventuell erforderliche pH-Wert-Regulierung ist in der Planung zu berücksichtigen.

### Anwendungsbereich:

Schadstoffe: Reduktionsverfahren können in der Grundwasseraufbereitung bei der Behandlung von anorganischen und organischen Stoffen eingesetzt werden:

- Reduktion von Cr, Hg, Pb, Ag, Ni, Cu, Zn,
- Reduktion von organischen Substanzen, z.B. LHKW.

Die Erfahrungen mit der chemischen Reduktion zur ex-situ Behandlung von Grundwasser, das mit organischen Stoffen belastet ist, basiert bisher auf vereinzelt Anwendungen der abiotischen Dehalogenierung chlorierter Ethene mit  $\text{Fe}^0$ -Granulat.

Störstoffe: Alle reduzierbaren Nicht-Schadstoffe, Feststoffe.

**Reinigungsleistung:**

- Eine Regelung des Reduktionsgrades ist über die Dosierung des Reduktionsmittels möglich.
- Die Effektivität der Reduktion ist sehr stark von den Begleitstoffen abhängig. Eine selektive Reduktion ist in den allermeisten Fällen nicht möglich.

**Bemessung:**

Maßgeblich sind die Wassermenge (hydraulische Bemessung) und der Bedarf an Chemikalien, die zur Reduktion erforderlich sind. In der Regel wird überstöchiometrisch dosiert. Der Verbleib bzw. die Entfernung der nicht abreagierten Reaktionsmittel ist zu klären.

Die chemische Reduktion ist ein nicht selektiver Prozess; d.h. alle reduzierbaren Stoffe im Grundwasser konkurrieren um das Reduktionsmittel. Die Auswahl von Reduktionsverfahren gegenüber anderen Verfahren hängt letztendlich davon ab, ob ein geeignetes Reduktionsmittel zur Verfügung steht und ob die Reaktionskinetik ausreichend schnell ist.

**Betriebskosten:**

Die Betriebskosten hängen von folgenden Kostenfaktoren ab:

- Schadstoffart und -konzentration;
- Art und Menge des Oxidationsmittels;
- Art und Menge der Störstoffe;
- Reinigungsziel (Restkonzentration im gereinigten Grundwasser).

**Besonderheiten, Hinweise, Risiken:**

Zur Auswahl eines geeigneten Reduktionsmittels (oder einer Mischung aus mehreren Mitteln) sollten in der Regel Laborversuche durchgeführt werden. Basierend auf den Laborversuchen wird der Umfang der Behandlung und die benötigte Menge an Reduktionsmittel abgeschätzt und sonstige Bedingungen zur optimalen Funktion ermittelt.

**Entwicklungsstand bzw. Verbreitung:**

Stand der Technik. Sehr weit Verbreitung bei der Sanierung von Chromschäden im Grundwasser.

**Anforderungen an MSR:**

- Dosierung des Reduktionsmittels in Abhängigkeit von der Wassermenge und der Konzentration der Zulaufstoffe;
- Messung und Einstellung des pH-Wertes;
- Messung und Überwachung des Sauerstoffgehaltes/des Redoxpotentials.

**Kombination mit anderen Verfahren:**

Eine Kombination mit anderen Verfahrensschritten zur Grundwasserreinigung ist möglich bzw. erforderlich, wenn beispielsweise LHKW, Feststoffe oder Eisen im Grundwasser enthalten sind. Die Verfahren können vor- oder nachgeschaltet sein (Aktivkohlefilter, Strippanlage, Enteisung etc.).

Bei der Schermetallentfernung erfolgt in der Regel nachfolgend eine Fällung/Flockung und Schlammabtrennung.

**Referenzen:**

- Weite Verbreitung insbesondere zur Aufbereitung chromhaltiger Grundwässer;
- Modelprojekt zur reduktiven Dehalogenierung von LHKW mit Fe0 (Rheine, Bernau).

**Ausgewählte Literatur:**

- FEDERAL REMEDIATION TECHNOLOGIES ROUNDTABLE (FRTR): Remediation Technologies and Screening Matrix and Reference Guide, Version 4.0.-  
<http://www.frtr.gov/matrix2/section1/toc.html>.
- HEIN, P., ZITZWITZ, M., PISTIOLIS, I., MOSCHICK, A., FREYGANG, M. & GROßMANN, J. (2008): In-situ-Abreinigung von Trichlorethen im Grundwasser mit regenerierbarem Fe(0)-Reaktor.- *altlasten spektrum* 2/2008, 53 – 59.
- ITRC (Interstate Technology & Regulatory Council) (2006): Above Ground Treatment Technologies. RPO-4. Washington, D.C.: Interstate Technology & Regulatory Council, Remediation Process Optimization Team. [www.itrcweb.org](http://www.itrcweb.org)
- NYER, E.K. [ed.] (2009): Groundwater Treatment Technology.- 3rd ed. (Wiley)
- LANDESANSTALT FÜR UMWELTSCHUTZ BADEN-WÜRTTEMBERG (1995): Grundwasseraufbereitung bei der Bearbeitung von Altlasten und Schadensfällen.- Handbuch Altlasten und Grundwasserschadensfälle, Bd. 17.- Fachdokumente Online;  
<http://www.lubw.baden-wuerttemberg.de/servlet/is/16793/>



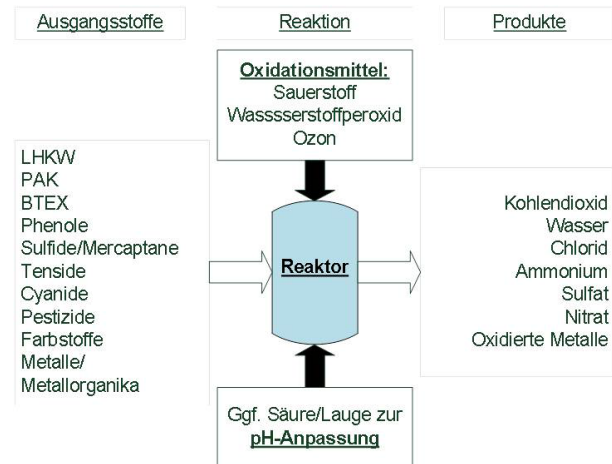
## 7.14 Katalytische Oxidation

### Prinzip:

Die Schadstoffeliminierung erfolgt durch heterogen katalysierte Oxidation an oberflächenmodifizierten, porösen Trägerstoffen.

Durch die Erzeugung reaktiver Hydroxyradikale aus Oxidantien wie Wasserstoffperoxid und/oder Ozon an der katalytisch aktiven Trägeroberfläche wird eine hohe Oxidationseffektivität erreicht.

In der Regel wird eine effektive Oxidation organischer Schadstoffe durch den Einsatz von Katalysatoren erst möglich gemacht.



© Delta Engineering & Chemistry GmbH

**Abb. 30: Funktionsskizze der katalytischen Oxidation**

### Aufbau und Beschreibung:

Dem möglichst partikelfreien Wasser wird das Oxidationsmittel zugegeben. Die Dosiermenge richtet sich nach den Schadstoffkonzentrationen bzw. nach dem Gehalt oxidierbarer Verunreinigungen (CSB).



© Delta Engineering & Chemistry GmbH

**Abb. 31: Anlage zur katalytischen Oxidation**

Danach wird das katalytisch aktive Trägergranulat vertikal von unten nach oben durchströmt, so dass keine Verstopfungsanfälligkeit besteht. Der Oxidationsprozess findet unter pH-neutralen Bedingungen ohne zusätzliche Druck und Temperaturerhöhung statt.

Dabei fallen keine schadstoffhaltigen Emissionen (rückstandsfreie Grund- und Abwasserreinigung) an.

### Planungsgrundlagen:

Für die Anlagenprojektierung und -auslegung sind Angaben zu Schadstoffgehalten, Durchflussmengen und allgemeinen Wasserinhaltsstoffen erforderlich.

### Anwendungsbereich:

- Schadstoffe: Phenole, PAK, CN, BTEX, LHKW, MTBE (siehe Abb. 30)
- Störstoffe: Radikalfänger, Feststoffe

|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Reinigungsleistung</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Erreichbare Ablaufwerte: keine Einschränkungen gem. Zielvorgaben</li> <li>• Steuerung der Reinigungsleistung über die Dosierung des Oxidationsmittels ist theoretisch denkbar</li> </ul>                                                                                                                                          |
| <b>Anwendungsgrenzen:</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Zulaufkonzentrationen und -frachten :CSB &lt; 800 mg/l</li> </ul>                                                                                                                                                                                                                                                                 |
| <b>Betriebskosten:</b><br>Kostenfaktoren sind: <ul style="list-style-type: none"> <li>• Oxidationsmittel,</li> <li>• In großen Abständen Austausch des Trägermaterials.</li> </ul>                                                                                                                                                                                                                   |
| <b>Besonderheiten, Hinweise, Risiken:</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Beachtung der Regeln zum Umgang mit Gefahrstoffen (z.B. Wasserstoffperoxid, Ozon),</li> <li>• Katalysatoren sind i.d.R. patentiert, werden aber von diversen Unternehmen angeboten</li> </ul>                                                                                                                     |
| <b>Entwicklungsstand bzw. Verbreitung:</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Stand der Technik,</li> <li>• hohe Prozesssicherheit und Anlagenverfügbarkeit,</li> <li>• hoher Automatisierungsgrad,</li> <li>• hoher Wirkungsgrad,</li> <li>• keine vorherige Schwermetalloxidation (z.B. Eisen) erforderlich.</li> </ul>                                                                      |
| <b>Anforderungen an MSR:</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Volumenstromabhängige Dosierung des Oxidationsmittels.</li> </ul>                                                                                                                                                                                                                                                              |
| <b>Kombination mit anderen Verfahren:</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>• bei feststoffhaltigem Wasser Vorschaltung einer Filtrationstufe;</li> <li>• ggf. Polzeistufe nach der katalytischen Oxidation anordnen;</li> <li>• als Vorbehandlungsstufe für die biologische Verfahren.</li> </ul>                                                                                              |
| <b>Referenzen:</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Abwasserreinigung und Entkeimung Elektroindustrie, Berlin</li> <li>• Grundwasserreinigung (CKW, CSB) für die Automobilindustrie, Wolfsburg</li> <li>• Grundwasserreinigung (PAK, BTEX) an einem ehem. Kokereisstandort, Zwickau</li> </ul>                                                                                               |
| <b>Ausgewählte Literatur:</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>- FREIER, U. &amp; HOFFMANN, J. (2005): Abbau von Pestiziden, Pharmainhaltsstoffen und anderen toxischen Verbindungen im Grundwasser durch heterogen-katalytische Oxidation. – Abschlussbericht zum Förderprojekt 2462 der Max-Buchner-Stiftung. Institut für Nichtklassische Chemie e.V. an der Universität Leipzig</li> </ul> |

## 7.15 Strippung (Desorption)

### Prinzip:

Unter Desorption (Strippung), auch als Gasaustausch bezeichnet, versteht man einen Prozess, bei dem ein oder mehrere flüchtige Stoffe von einem weniger flüchtigen Stoff, wie z.B. Wasser, getrennt werden. Als Strippgas wird i.d.R. Luft verwendet. Die Desorption wird begünstigt durch niedrige Siedepunkte und geringe Löslichkeiten der Komponenten. Die Strippung ist das bei der Grundwassersanierung mit leichtflüchtigen Schadstoffen am häufigsten verwendete Verfahren.

### Aufbau und Beschreibung:

Das Fließschema einer typischen Strippanlage mit Abluftreinigung (hier über Luftaktivkohle) zeigt Abb. 32. Das kontaminierte Grundwasser wird am Kopf in eine Strippkolonne geleitet und rieselt nach der Verdüsung als Film über die Füllkörper. Im Gegenstrom von unten nach oben wird das Strippgas, meist Luft, durch die Anlage geführt. Die flüchtigen Schadstoffe gehen aus dem Wasser in die Luft über. Der Wirkungsgrad dieses Stoffüberganges steigt tendenziell u.a.:

- mit steigendem Luft : Wasser-Verhältnis;
- mit steigender Phasengrenzfläche Wasser/Luft;
- mit steigender Flüchtigkeit der Schadstoffe (Henry-Konstante);
- mit steigender Temperatur;
- mit sinkendem Druck.

Eine Verschiebung des pH-Wertes kann einige Stoffe erst in eine strippbare Form überführen (z.B. Ammonium bzw. Ammoniak bei basischen pH).

Das eingestellte Luft-Wasser-Verhältnis ist vor allem schadstoffabhängig und liegt zwischen 5:1 (z.B. VC) und 200:1 (z.B. MTBE).

In der Grundwassersanierung werden bevorzugt zwei Bauformen als Strippkolonne verwendet:

- Füllkörperkolonnen: zylinderförmige Behälter mit bis zu 10 m Höhe, die mit Füllkörper gefüllt sind;
- Kaskadenstripper (siehe Abb. 34) ohne Füllkörper, die Verrieselung erfolgt über gelochte Böden;

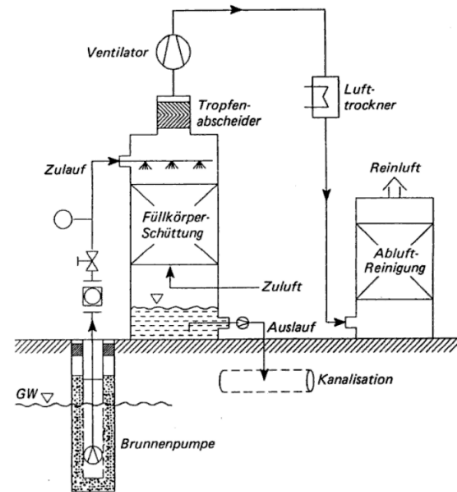


Abb. 32: Fließschema einer Strippanlage (TOUISSANT et al. 1998)



Foto: M. Altenbockum

Abb. 33: Kunststofffüllkörper

Als Strippgas wird in aller Regel Luft eingesetzt. Die mit Schadstoffen beladene Luft wird üblicherweise durch Luftaktivkohlefilter oder katalytische Oxidation gereinigt.

Die Belüftung des zu behandelnden Wassers bei der Strippung kann je nach Wassermatrix (Härte, Eisen- und Mangan-gehalt) zur Überschreitung des Sättigungs-pH-Wertes und somit zum Ausfall von z.B. Kalk und Eisen führen.

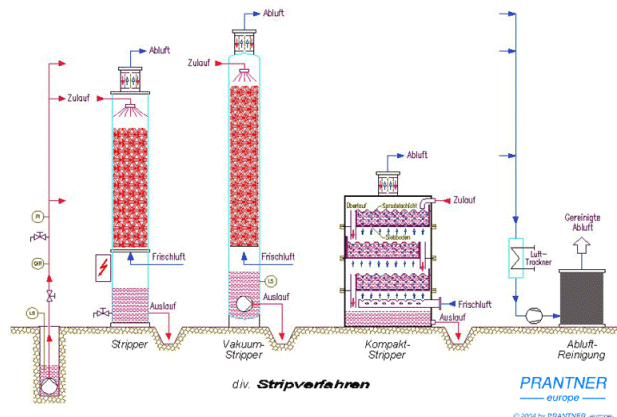


Abb. 34: Strippverfahren (Quelle: [www.prantner.de](http://www.prantner.de))

Prinzipiell möglich ist eine gesteuerte Schadstoffreduktion bis auf optimale Zulaufkonzentrationen für nachgeschaltete Behandlungsstufen (z.B. Aktivkohleadsorption zur Wasserreinigung, Reduzierung der zu behandelnden Prozessluft), ein 100%iger Rückhalt der Schadstoffe innerhalb einer derartigen Reinigungsanlage ist Stand der Technik.

#### Planungsgrundlagen:

- Hydraulischer Durchfluss;
- Art und Konzentration der Schadstoffe;
- Wassermatrix zur Beurteilung des Potentials für unerwünschte Ausfällungen;
- Ablaufgrenzwerte der Anlage oder Zulaufkonzentrationen für die nachfolgende Behandlungsstufe.

#### Anwendungsbereich:

- LCKW, BTEX
- alle Stoffe mit hohem Dampfdruck (= leichtflüchtig)
- Steuerung der Selektion einzelner Stoffe möglich

#### Reinigungsleistung:

- Von der 100%igen bis zur selektiven Entfernung einzelner Stoffe (z.B. VC-Entfernung ohne Eliminierung höher chlorierter Chlorethene) möglich in Abhängigkeit vom Luft : Wasser-Verhältnis. Bei Rohwasserkonzentrationen < 1mg/L Schadstoffgehalten ist die Desorption in aller Regel unwirtschaftlich.

#### Anwendungsgrenzen:

- Schadstoffe mit niedriger Henry-Konstante und damit sehr hohem erforderlichen Luft : Wasser-Verhältnis;
- Wasser mit extremem Ausfällungspotential.

**Bemessung:**

- Wahl des Kolonnentypes je nach Standort (z.B. Höhenbegrenzung, Lärmemission)
- Wahl des Luft : Wasser-Verhältnisses in Abhängigkeit vom Schadstoffprofil und dem zu erreichenden Reinigungsgrad. Dabei ist die potentielle Bildung explosionsfähiger Gemische zu berücksichtigen bzw. zu vermeiden;
- Wahl des Füllkörpers je nach erwartetem Ausmaß von Ablagerungen;
- Kolonnendurchmesser in Abhängigkeit vom Luftvolumenstrom;
- Kolonnenhöhe in Abhängigkeit vom gewünschten Abreinigungsgrad und vom gewählten Füllkörper.

**Betriebskosten:**

- Zwischen den unterschiedlichen Anlagentypen gibt es starke Schwankungen der Betriebskosten. Diese sind individuell für die unterschiedlichen Anlagentypen und Ausführungen zu berechnen.

**Besonderheiten, Hinweise, Risiken:**

- Problematisch: Schadstoffverlagerungspotential --> Desorption erfordert immer eine Abluftreinigung und einen entsprechenden Energieaufwand;
- Bei der Wahl der Füllkörpergröße muss oft eine hohe Oberfläche kleiner Füllkörper gegen eine geringere Verstopfungsanfälligkeit großer Füllkörper abgewogen werden.

**Entwicklungsstand bzw. Verbreitung:**

- Bei der Grundwasserreinigung mit leichtflüchtigen Stoffen das am häufigsten eingesetzte Verfahren.
- Sehr weit verbreitet, umfassend erprobt

**Anforderungen an MSR:**

- kontinuierliche Füllstandsmessung im Strippsumpf erforderlich (Überlaufsicherung)
- Steuerung Luft-Wasser-Verhältnis ist energetisch meist sinnvoll

**Kombination mit anderen Verfahren:**

- Luftaktivkohle- und/ oder Katoxanlagen zur Abreinigung der Abluft
- Nachreinigung des Wassers in Abhängigkeit vom Wirkungsgrad der Strippung
- Ggf. Vorreinigung des Wassers zur Entfernung von Störstoffen, die bei der Strippung ausfallen (z.B. Eisen, Carbonat)

**Ausgewählte Literatur:**

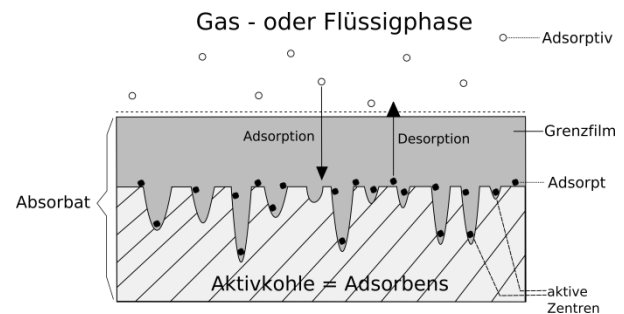
- MUTSCHMANN, J. & STIMMELMAYR, F. (2011): Taschenbuch der Wasserversorgung.- 15. vollst. überarb. und aktual. Aufl., 15. Auflage. Vieweg+Teubner Verlag, Wiesbaden
- TOUSSAINT, B.; REHNER, G., HELD, TH. (1998): Sanierung von Grundwasserschäden – Defizite der Grundwassererkundung – Möglichkeiten und Grenzen konventioneller und neuer Sanierungsverfahren,-, Kontakt & Studium Bd. 563, 1. Auflage, Expert-Verlag, Renningen

## 7.16 Aktivkohleadsorption

### Prinzip:

Bei der physikalischen Adsorption sorgen vor allem van-der-Waalsche Kräfte für eine Bindung an ein Adsorbens. Die Adsorption kann sowohl aus der Gasphase als auch aus Flüssigkeiten erfolgen.

Das am häufigsten bei der Grundwasserreinigung eingesetzte Adsorbens ist Aktivkohle. Weitere Adsorbentien können Aktivtonerde, Kieselgel (Silicagel) und Zeolithe.



**Abb. 35: Prinzip der Adsorption an Aktivkohle (VON KIENTLE & BÄDER 1980)**

### Aufbau und Beschreibung:

Bei der Aktivkohlefiltration wird das zu reinigende Grundwasser durch einen Druckfilter (i.d.R. Stahl oder GFK) gefördert, der meist von oben nach unten durchströmt wird. Die Druckbehälter besitzen am Boden einen Düsenboden mit Filterdüsen oder einen Filterstern, in die das gereinigte Wasser eintreten kann, ohne Aktivkohle mitzureißen.

Innerhalb der Säule stellt sich ein Konzentrationsgefälle ein. Zwischen Zu- und Ablauf bildet sich eine mehr oder weniger mächtige Adsorptionszone. Die sogenannte Beladungsfront verlagert sich sukzessive zum Ablauf hin bis der erste Stoff mit der niedrigsten Adsorptionsfähigkeit durchbricht. Die Beladungsfront wird durch unsachgemäßes Rückspülen verwirbelt, was zu einem vorzeitigen Durchbruch der Aktivkohle führen kann.



Foto: St. Neumann / © eneotech Umwelt GmbH

**Abb. 36: Mehrstufige Aktivkohlefiltration**

Zum sicheren Betrieb einer Aktivkohlefiltration sind mindestens zwei Filter (Arbeitsfilter, Polizeifilter) mit entsprechenden Probenahmestellen erforderlich. Ein Aktivkohlefilter dient aber auch häufig als Polizeistufe für andere Verfahren wie z.B. die Stripping.

Aktivkohle kann aus verschiedenen kohlenstoffhaltigen Ausgangsmaterialien hergestellt werden, wie zum Beispiel Holz, Braun- und Steinkohle, Sägespäne und Kokosnussschalen. Parameter zur Charakterisierung einer AK sind:

- Körnung;
- Form;
- Basisprodukt;
- Jodzahl;
- BET-Oberfläche;
- Melassezahl.



Diese Informationen werden vom Hersteller in Form von Datenblättern zur Verfügung gestellt. Üblicherweise liefern Hersteller auch Informationen zum Druckverlust in der Schüttung und zur empfohlenen Klarpülgeschwindigkeit sowie Adsorptionsisothermen (siehe Abb. 38), die experimentell ermittelt werden und den Zusammenhang zwischen Restkonzentration im Wasser und der erreichten Beladung der Aktivkohle in Einstoffgemischen widerspiegelt.



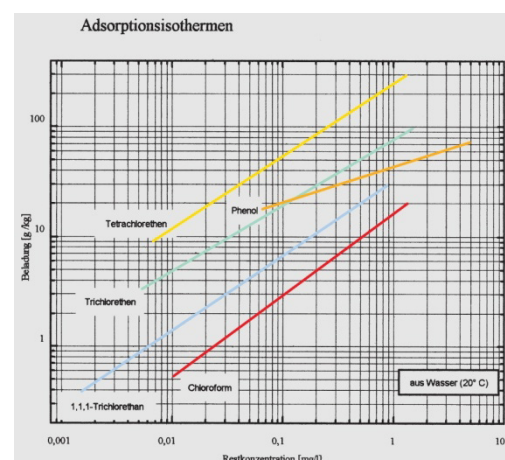
Foto: M. Altenbockum

**Abb. 37: Aktivkohle**

Isothermen sind keine belastbare Basis für die Berechnung von Aktivkohlebeladungen unter praktischen Bedingungen. Für Stoffgemische wird die Durchführung von Versuchen zur Bestimmung der Adsorptionskapazität empfohlen.

Bei der Grundwassersanierung wird Aktivkohle als Granulat eingesetzt. Gekörnte Aktivkohle bietet den Vorteil, dass der Druckabfall im Kohlebett gering ist. Zudem kann sie regeneriert und wiederverwendet werden. Bei der thermischen Reaktivierung werden die adsorbierten Substanzen desorbiert und thermisch zersetzt. Die Reaktivierung ist nicht nur aus Kostengründen, sondern auch im Hinblick auf Nachhaltigkeit eine gute Alternative zur Entsorgung beladener Aktivkohle.

Eine unzureichende Vorreinigung des Wassers, z.B. durch einen Kiesfilter, kann die Adsorptionskapazität der Aktivkohle reduzieren.



© Donau Carbon GmbH & Co. KG

**Abb. 38: Adsorptionsisotherme**

#### Planungsgrundlagen:

- Art und Konzentration der Stoffe;
- Volumenstrom;
- Vorversuche zur Ermittlung der Adsorptionskapazität bei Gemischen werden empfohlen.

#### Anwendungsbereich:

- Durch die Adsorption von bevorzugt organischen Schadstoffen an Aktivkohle können mittel bis schwach belastete Grund- oder Sickerwässer, aber auch alle anderen Arten von Wässern gereinigt werden. Aktivkohleadsorption ist für fast alle organischen Schadstoffe geeignet. Hierdurch können auch Summenparameter wie hohe CSB-, AOX-, DOC- und TOC-Gehalte reduziert werden.



**Reinigungsleistung:**

- Generell ist für die meisten organischen Schadstoffe eine vollständige Entfernung durch Aktivkohle möglich, aber je nach Adsorptionsneigung nicht unbedingt kostengünstig.
- Die Beladungskapazität der Aktivkohle hängt vom Stoffgemisch im Wasser, von den geforderten Ablaufwerten, von den Zulaufkonzentrationen, von der gewählten Aktivkohle und von der Verweilzeit im Filter ab. Generell sind Einsparungen beim Aktivkohleverbrauch abzuwägen gegen größere Filtervolumina und damit verbundene längere Kontaktzeiten.
- Ohne Vorversuche ist bei Mischkonzentrationen organischer Stoffe eine Kalkulation der Beladungskapazität und der Standzeit der Kohlen spekulativ.

**Anwendungsgrenzen:**

- Natürliche organische Stoffe, wie z.B. Huminstoffe werden bevorzugt adsorbiert, sodass der Aktivkohlefilter nicht mehr die volle Beladungskapazität für beispielsweise CKW oder PAK aufweist (Fouling).
- Bei der Adsorption gibt es erhebliche Unterschiede in der Adsorbierbarkeit der einzelnen LCKW, wobei folgende Reihenfolge abnehmender Adsorbierbarkeit vorliegt:  
Tetrachlorethen > Trichlorethen > Tetrachlorkohlenstoff > 1.1.1.-Trichlorethan > 1.1.-Dichlorethan > cis 1,2-Dichlorethan > Chloroform > Vinylchlorid  
Vinylchlorid ist sehr schlecht auf Wasseraktivkohle adsorbierbar, d.h. die Beladungskapazität einer Aktivkohle verringert sich durch die Anwesenheit von Vinylchlorid im zu behandelndem Wasser erheblich.  
PFT sind noch schlechter adsorbierbar als CKW.

**Bemessung:**

- Wasservolumenstrom;
- Schadstoffe;
- Konzentrationen im Zu- und Ablauf;
- Filtergeschwindigkeit (5- 20 m/h);
- Übliche Kontaktzeiten 15 – 60 min.

**Betriebskosten:**

- kostenbestimmende Faktoren: Durchfluss, Fracht, Aktivkohlequalität, bei Schadstoffgemischen Konzentration des am schlechtesten adsorbierbaren Stoffes
- nur nach Vorversuchen kalkulierbar, fehlende Kenntnis -> hohes Kostenrisiko

**Besonderheiten, Hinweise, Risiken:**

Die adsorbierte Menge an Schadstoffen ist i.d.R. höher bei

- größerer innerer Oberfläche der Aktivkohle;
- größerer Schadstoffkonzentration im Zulauf;
- größerem Molekulargewicht und Siedepunkt des Schadstoffs;
- niedrigerer Temperatur;
- niedrigerer Luftfeuchtigkeit.

**Entwicklungsstand bzw. Verbreitung:**

- Sehr weit verbreitet. Stand der Technik.

**Anforderungen an MSR:**

- nur geringe Anforderungen
- Druck(differenz)überwachung obligatorisch, bei Bedarf automatisiert

**Kombination mit anderen Verfahren:**

- Vorreinigung mittels Sand- oder Kiesfiltration

**Ausgewählte Literatur:**

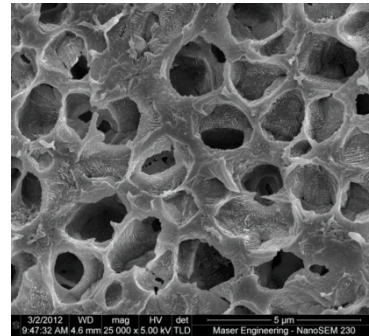
- MUTSCHMANN, J. & STIMMELMAYR, F. (2011): Taschenbuch der Wasserversorgung.- 15. vollst. überarb. und aktual. Aufl., 15. Auflage. Vieweg+Teubner Verlag, Wiesbaden
- SONTHEIMER, H. (1985): Adsorptionsverfahren in der Wasserreinigung DVGW-Forschungsstelle am Engler-Bunte-Inst. d. Univ. Karlsruhe (TH). Unter Mitarb. von: Snoeyink, Chen, Voudrias.-ZfGW-Verlag, Frankfurt/Main
- VON KIENTLE, H. VON & BÄDER, E. (1980): Aktivkohle und ihre industrielle Anwendung,- Ferdinand-Enke Verlag, Stuttgart

## 7.17 Extraktion

### Prinzip:

Die Extraktion ist ein physikalisch-chemisches Trennverfahren, bei dem mit einem flüssigen Extraktionsmittel ein Stoff oder mehrere aus einer Flüssigkeit oder einem Feststoff heraus gelöst werden.

Nach Kenntnis der Autoren gibt es derzeit mit dem patentierten MPPE-Verfahren (= Macro Porous Polymer Extraction) nur ein bekanntes Verfahren, das im Altlastenbereich zur Anwendung kommt. Bei diesem Verfahren liegt das Extraktionsmittel in den Poren eines makroporösen Trägermaterials vor. Ist die Kapazität des Extraktionsmittels erschöpft, wird es mittels Dampf regeneriert. Die rückgewonnene Phase wird entsorgt oder weiter verwendet.



© VWS MPP Systems B.V.

**Abb. 39: Poröse Trägeroberfläche**



© LMBV

**Abb. 40: MPPE-Anlage Grundwassersanierung Schwarze Pumpe (LMBV)**

### Aufbau und Beschreibung:

Das zu behandelnde Wasser wird durch eine Kolonne gepumpt, die mit einem speziellen Polymer gefüllt ist. Das Extraktionsmittel, das sich in den Poren des Polymers befindet, absorbiert die Schadstoffe. Das gereinigte Wasser läuft drucklos ab.

Ist die Kapazität des Extraktionsmittels erschöpft, erfolgt die Regeneration mit Dampf. Der mit Schadstoff beladene Dampf wird kondensiert, Leicht-, Schwer- und Wasserphase werden getrennt. Die Wasserphase wird in den Prozess zurückgeführt. Leicht- und Schwerphase werden getrennt aufgefangen. Sie können wieder verwendet werden.

### Planungsgrundlagen:

Für die Anlagenprojektierung und -auslegung sind Angaben zu Schadstoffgehalt, Einleitgrenzwerten, Durchflussmengen und allg. Wasserinhaltsstoffen erforderlich.

|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Anwendungsbereich:</b> <ul style="list-style-type: none"><li>• Schadstoffe: BTEX, halogenierte Kohlenwasserstoffe, MTBE, PCB, PAK, Aliphate, Olefine</li><li>• Störstoffe: Feststoffe (Vorschaltung einer Filters)</li><li>• keine vorherige Schwermetallentfernung (z.B. Eisen) erforderlich, wenn diese in gelöster Form vorliegen</li><li>• unempfindlich gegen Huminsäuren, hohe Salzfrachten und hohe Eisenkonzentrationen</li></ul> |
| <b>Reinigungsleistung</b> <ul style="list-style-type: none"><li>• Erreichbare Ablaufwerte: sehr hohe Reinigungsgrade bis in den µg-Bereich</li><li>• Steuerung der Reinigungsleistung über die Variation der Regenerationszyklen ist theoretisch denkbar</li></ul>                                                                                                                                                                           |
| <b>Anwendungsgrenzen:</b> <ul style="list-style-type: none"><li>• Zulaufkonzentrationen und -frachten: nicht limitiert</li></ul>                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |
| <b>Bemessung:</b> <ul style="list-style-type: none"><li>• Reaktorvolumen (Kontaktzeit)</li></ul>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |
| <b>Betriebskosten:</b> <ul style="list-style-type: none"><li>• Bereitstellung von Dampf</li><li>• Anlagenfernüberwachung i.d.R. durch den Hersteller (Patentinhaber)</li><li>• ggf. Reststoffentsorgung, falls die rückgewonnene Phase nicht weiter verwendet wird</li></ul>                                                                                                                                                                 |
| <b>Besonderheiten, Hinweise, Risiken:</b> <ul style="list-style-type: none"><li>• Ex-Schutz in der Nähe des Separators, da reine Phase zurück gewonnen wird;</li><li>• Dampferzeugung für die Regenerierung, vorhandenes Dampfnetz senkt die Betriebskosten erheblich;</li><li>• Hochwertige und kostenintensive Anlagentechnik, die sich besonders bei anspruchsvollen Prozessbedingungen rechnet.</li></ul>                                |
| <b>Rechtliche Hinweise:</b> <ul style="list-style-type: none"><li>• Verfahren ist patentiert.</li><li>• Das Verfahren wurde zwar bereits häufig eingesetzt (siehe Referenzen), dennoch sollte der Anbieter garantieren, dass das Extraktionsmittel nicht in relevanten Konzentrationen in das Grundwasser gelangt.</li></ul>                                                                                                                 |

**Entwicklungsstand bzw. Verbreitung:**

- Stand der Technik;
- hohe Prozesssicherheit und Anlagenverfügbarkeit;
- hoher Automatisierungsgrad;
- sehr hoher Wirkungsgrad;
- besonders sinnvoll bei vorhandenem Dampfnetz und Möglichkeit der Wiederverwendung der rückgewonnenen Phase.

**Anforderungen an MSR:**

- Vollautomatisch laufende Anlagenmodule mit Fernsteuerung

**Kombination mit anderen Verfahren:**

Der Wirkungsgrad der Schadstoffentfernung ist so hoch, dass eine Nachbehandlung für die extrahierbaren Stoffe nicht erforderlich ist (abgesehen von einer Polzeistufe, falls gefordert).

Für die nicht extrahierbaren Schadstoffe sind entsprechende Verfahrensstufen separat vorzusehen, i.d.R. nach der MPPE-Stufe.

**Referenzen:**

In Deutschland: LMBV Lauchhammer, LMBV Schwarze Pumpe, Stadtwerke Flensburg

**Ausgewählte Literatur:**

- VAUCK, W. R. A., MÜLLER, H. A. (2000): Grundoperationen chemischer Verfahrenstechnik.- 11., überarb. u. erw. Aufl., Wiley-VCH, Darmstadt
- [www.vwsmppsystems.com](http://www.vwsmppsystems.com)

## 8. Biologische Verfahren

### 8.1 Grundlegendes zum biologischen Abbau

Unter vollständigem biologischem Abbau wird im Allgemeinen die Zersetzung eines Stoffes durch die Stoffwechselaktivität von Mikroorganismen zu gasförmigen Stoffen und Wasser verstanden. Erfolgt der Abbau eines Stoffes nicht vollständig, bilden sich sogenannte Metaboliten.

Daneben können biologisch induzierte Reaktionen auftreten wie z.B. die Fällung von Schwermetallen nach vorheriger biologischer Reduktion von Sulfat zu Sulfid.

Für jeden Abbauprozess wird eine Kohlenstoffquelle benötigt, aus der die Mikroorganismen ihre Zellsubstanz aufbauen, und eine Energiequelle, aus der die Mikroorganismen ihren Energiebedarf decken. Nach der Art der Kohlenstoffquelle, der Energiequelle und der Energiegewinnung lassen sich die Stoffwechselarten und damit die Mikroorganismen klassifizieren.

Nach der Art der Kohlenstoffquelle:

**Autotrophe** Organismen verwenden Kohlendioxid als Kohlenstoffquelle.

**Heterotrophe** Organismen verwenden organische Stoffe als Kohlenstoffquelle.

**Methanotrophe** Organismen verwenden Methan als Kohlenstoffquelle.

Nach der Art der Energiequelle, d.h. des Elektronendonators:

**Phototrophe** Organismen verwenden Licht als Energiequelle.

**Chemotrophe** Organismen verwenden chemische Verbindungen als Energiequelle. Bei **lithotrophen** Organismen sind das anorganische Verbindungen, bei **organotrophen** Organismen dagegen organische Verbindungen.

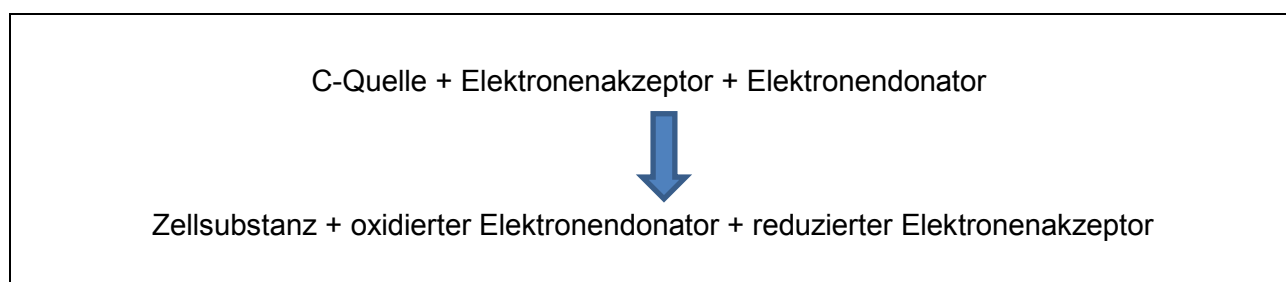
Nach der Art der Energiegewinnung d.h. des Elektronenakzeptors:

Von **aerober Atmung** spricht man, wenn die Energiegewinnung durch Übertragung von Reduktionsäquivalenten auf Sauerstoff erfolgt. Sauerstoff ist hier der Elektronenakzeptor.

Bei der **anaeroben Atmung** tritt anstelle des Sauerstoffes eine anorganische Verbindung als Elektronenakzeptor.

Fungiert eine organische Verbindung als Elektronenakzeptor, spricht man von **Fermentation**.

Vereinfacht lässt sich somit jeder biologische Abbauprozess wie folgt darstellen:



Der Schadstoff kann dabei Elektronenakzeptor, Elektronendonator und /oder Kohlenstoffquelle sein oder nur in einer Nebenreaktion beim Abbau eines sogenannten Auxiliarsubstrates (auch Cosubstrat) angegriffen werden.

Dient der Schadstoff selbst als Kohlenstoff- und Energiequelle, spricht man von produktivem Abbau. Ist dagegen ein Auxiliarsubstrat erforderlich, spricht man von cometabolischem Abbau.

Als Inhibitoren bezeichnet man Stoffe, die die Geschwindigkeit eines biologischen Prozesses stark mindern, weil sie toxisch auf die beteiligten Organismen wirken oder in Konkurrenz zum eigentlich abzubauenen Schadstoff treten. Inhibitoren können sein: die Schadstoffe selbst, Metabolite des Schadstoffabbaus und nicht am eigentlichen biologischen Prozess beteiligte Substanzen. Die Hemmung kann reversibel oder dauerhaft sein.

### 8.1.1 Anwendungsbereich von biologischen Prozessen bei der Grundwassersanierung

Biologische Prozesse bei der Reinigung von Grundwasser sind einsetzbar für:

- den Abbau bzw. Teilabbau von ring- und kettenförmigen Kohlenwasserstoffen, mit und ohne Substitute,
- die Oxidation von Ammonium zu Nitrat,
- die Denitrifikation von Nitrat zu molekularem Stickstoff,
- den Abbau von freien Cyaniden.

### 8.1.2 Prozessrelevante Parameter

Wichtige Parameter für die Auswahl und Bemessung einer biologischen Verfahrensstufe sind:

**pH-Wert:** Das pH-Optimum liegt allgemein zwischen pH 6 und 8. Ggf. ist eine pH-Regulierung notwendig.

**Temperatur:** Biologische Prozesse laufen mit einer effektiv nutzbaren Geschwindigkeit erst ab Temperaturen von 12° C ab.

**Redoxpotential und Sauerstoffgehalt:** Kommt das Wasser anerob oder aerob aus dem Boden?

**Leitfähigkeit:** Hohe Salzgehalte beeinträchtigen das Wachstum von Mikroorganismen.

**Schadstoffspektrum:** Festlegung der erforderlichen Milieubedingungen und Zusatzstoffe wie Elektronenakzeptoren und -donatoren

**Schadstoffkonzentrationen und -frachten:** danach richten sich Verfahrensauswahl und Bemessung der Reaktoren

**Natürlicher Gehalt an Nährstoffen (Stickstoff und Phosphor):** ggf. müssen Nährstoffe dosiert werden. Als optimales C:N:P-Verhältnis wird häufig 100:5:1 genannt. Dieses Verhältnis kann aber je nach Abbauprozess stark variieren.

**Schwermetalle:** Diese können inhibierend auf die biologischen Prozesse wirken. Einige Schwermetalle können das Verfahren an sich stören. So würde z.B. Eisen in einem aeroben Verfahren mitoxidiert werden und ausfallen, was zu Verockerungen führen würde.



**CSB/TOC/DOC:** Gibt es neben den eigentlichen Schadstoffen organische Hintergrundbelastungen, die bei der Bemessung berücksichtigt werden müssen?<sup>6</sup>

**Sulfat:** Bei hohen Sulfatkonzentrationen und Verfahren ohne Sauerstoffeintrag wird relativ schnell als Konkurrenzreaktion Sulfat biologisch zu Sulfid reduziert werden. Letzteres hat ein hohes toxisches Potential.

Zwei Fragen sind grundsätzlich zu klären, um die Entscheidung für oder gegen den Einsatz eines biologischen Verfahrens treffen zu können:

### 1. Unter welchen Bedingungen ist der Schadstoffe biologisch abbaubar?

Ist der Abbau vollständig oder bilden sich möglicherweise Metaboliten? Welche Milieubedingungen werden benötigt? Sind Dosierungen von Nährstoffen und Substraten erforderlich?

Diese Frage kann nach Kenntnis der o.g. Parameter im Regelfall durch eine Literaturrecherche beantwortet werden.

### 2. Wie schnell und wie effektiv wird der Abbau sein?

Diese Frage kann zumindest bei organischen Schadstoffen nicht generell gültig beantwortet werden. Prinzipiell sind dazu mehrmonatige Vorversuche mit dem ausgewählten Reaktortyp erforderlich. Mit Hilfe solcher Versuche können belastbare Bemessungsgrößen für die Auslegung der Reaktoren und die Dosierung von Hilfsstoffen ermittelt werden. Außerdem können Abbaugrade und Metaboliten ermittelt werden, was maßgebend dafür ist, ob und in welcher Größenordnung eine Nachbehandlung des Grundwassers erforderlich ist. Erst mit diesen Angaben sind die Kosten für die biologische Grundwasserbehandlung und Nachbehandlung ermittelbar und damit vergleichbar mit anderen Verfahren.

#### 8.1.3 Zusatzstoffe

Je nach Schadstoffspektrum wird es im Normalfall erforderlich sein, eine oder mehrere Komponenten in das Wasser zu dosieren, um den Schadstoffabbau zu ermöglichen und/ oder zu optimieren. Im Grundwassersanierungsbereich verbreitete Zusatzstoffe sind:

#### Elektronenakzeptoren

- Luft-Sauerstoff
- technischer Sauerstoff
- Wasserstoffperoxid als Sauerstofflieferant
- Nitrat

<sup>6</sup> Anmerkung zum BSB5: Der biologische Sauerstoffbedarf ist ein Parameter aus der kommunalen Klärtechnik, der es in Relation zum CSB ermöglicht, die Abbaubarkeit der im Wasser enthaltenen Stoffe zu beurteilen. Dabei wird die Probe mit adaptierter Biomasse versetzt und der Sauerstoffverbrauch für den biologischen Abbau über 5 Tage ermittelt. Für den Bereich der Grundwassersanierung ist der Parameter BSB5 nur sehr bedingt aussagekräftig, da in der Regel keine adaptierten Kulturen zur Verfügung stehen.

**Auxiliarsubstrate als Kohlenstoffquelle und/ oder Elektronendonator**

- Melasse
- Organische Säuren wie Lactat (Milchsäure), Propionat (Propionsäure), Acetat (Essigsäure), Formiat
- Alkohole wie Ethanol und Methanol
- Ethen

**Nährstoffe zum Zellwachstum**

- Phosphorsäure oder Phosphorsalze wie Natriumhydrogenphosphat als P-Quelle
- Ammonium- oder Nitratsalze als N-Quelle

**8.2      Verfahrensüberblick****8.2.1      Verfahren mit suspendierter Biomasse**

Beim Belebungsverfahren liegen die Mikroorganismen resp. die Biomasse in suspendierter Form im zu behandelnden Wasser vor. Die Biomasse wird durch die Belüftung und/ oder Rührwerke oder durch den Wasserstrom selbst in Schwebe gehalten.

Verfahren mit suspendierter Biomasse können sowohl kontinuierlich als auch diskontinuierlich betrieben werden. Die diskontinuierliche Fahrweise wird als Sequencing-Batch-Reactor (SBR-Verfahren) bezeichnet.

**8.2.2      Verfahren mit sessiler Biomasse**

Bei Biofilmverfahren liegen die Mikroorganismen sessil als Biofilm im zu behandelnden Wasser vor. Sie wachsen auf einem Trägermaterial, das fest installiert oder beweglich ist. Die wichtigsten Verfahren mit sessiler Biomasse sind:

Biofilmverfahren mit fixiertem Trägermaterial

- Überstautes Festbett
- Biofilter
- Tropfkörper

Biofilmverfahren mit geordnet bewegtem Trägermaterial

- Scheibentauchkörper
- Walzentauchkörper

Biofilmverfahren mit ungeordnet bewegtem Trägermaterial (Moving Bed Verfahren)

- Fließbett
- Wirbelbett
- Schwebebett

Als Trägermaterialien kommen vielfältige Materialien und Formen zum Einsatz, z.B.:

- Diverse Kunststoffe z.B. PE, PVC in verschiedenen Formen;
- Aufgeschäumte Kunststoffe wie PUR (LINPOR);
- Aktivkohle;
- Mineralische Stoffe wie Kies, Blähton;
- Seile;
- Materialien mit integrierter Kohlenstoffquelle.

Biofilmverfahren haben gegenüber Belebungsverfahren einige Vorteile, die auch bei der Reinigung von kontaminiertem Grundwasser zum Tragen kommen:

- Durch die Immobilisierung der Biomasse werden prinzipiell hohe Biomassekonzentrationen und damit hohe Raumumsätze möglich.
- Auch bei geringen Verweilzeiten des Wassers im Reaktor werden langsam wachsende Spezies angereichert, da die Verweilzeiten von Biomasse und Wasser entkoppelt sind. Die Biomasse muss – im Gegensatz zum Belebungsverfahren – nicht rezirkuliert werden, um das erforderliche Schlammalter im Reaktor zu erreichen.
- Die Biozönose auf dem Trägermaterial bietet im Vergleich zur suspendierten Biomasse einen besseren Schutz gegen äußere Einflüsse und schwankende Zusammensetzungen des Wassers.

Aus den genannten Gründen sind Biofilmverfahren prädestiniert für die Anwendung im Grundwasserbereich.

Biofilmverfahren können sowohl kontinuierlich als auch diskontinuierlich betrieben werden. Die diskontinuierliche Fahrweise wird als Sequencing-Batch-Biofilm-Reaktor (SBBR-Verfahren) bezeichnet.

### 8.2.3 Kombinierte Verfahren

Biofilm und suspendierte Biomasse können auch kombiniert eingesetzt werden. Das ist besonders für die Aufrüstung überlasteter Belebungsverfahren interessant. Bekannte Verfahren, die suspendierte und immobilisierte Biomasse kombinieren, sind z.B. LINPOR, EvU, Kaldnes, Pegazur. Alle diese Verfahren kommen nach derzeitigem Wissensstand im Grundwasserbereich nicht zum Einsatz.

## 8.3 Verfahrensweisen

### 8.3.1 Kontinuierlich durchflossene Systeme

Bei einem kontinuierlichen Verfahren durchfließt das Wasser einen Reaktor, in dem sich die Biomasse befindet. Die Verweilzeit des Wassers im Reaktor und damit der Zeitraum, der für den Abbauprozess zur Verfügung steht, ergeben sich aus dem Volumenstrom des Wassers und dem Reaktorvolumen.

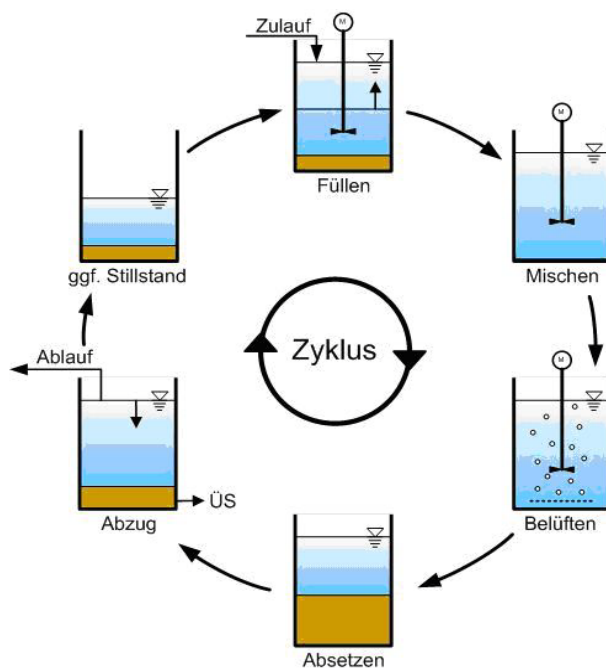
Liegt die Biomasse im Reaktor in suspendierter Form vor, entspricht die Verweilzeit der Biomasse im Reaktor – das sogenannte Schlammalter – der Verweilzeit des Wassers. Da die Verweilzeit des Wassers im Reaktor im Normalfall deutlich kürzer sein wird, als das erforderliche

Schlammalter der Biomasse, wird die Biomasse nach der Biologie abgetrennt, i.d.R. durch Sedimentation, und in den Reaktor zurückgeführt. Auf diese Weise lässt sich das Schlammalter und die Schlammkonzentration im Reaktor einstellen. Prinzipiell gilt: je unspezifischer der Abbauprozess ist, umso geringer ist das erforderliche Schlammalter.

Liegt die Biomasse als Biofilm vor, sind Verweilzeit des Wassers und Schlammalter ohnehin entkoppelt. Eine Rezirkulation der Biomasse entfällt. Die Reaktorauslegung erfolgt nach der Raumbelastung [kg abzubauenen Schadstoff/m<sup>3</sup> Trägermaterial/Tag] oder der Flächenbelastung [kg abzubauenen Schadstoff/m<sup>2</sup> Aufwuchsfläche/Tag].

### 8.3.2 Diskontinuierlich betriebene Systeme

Bei diskontinuierlichen Verfahren wird der Bioreaktor mit dem zu behandelndem Wasser befüllt, das Wasser durchläuft die gewünschte Reaktion oder falls erforderlich mehrere Reaktionen (z.B. aerob/anaerob): Nach einer abschließenden Absetzphase wird der Bioreaktor wieder entleert, wobei die Biomasse im Reaktor verbleibt. Der Zyklus eines diskontinuierlichen Verfahrens ist daher stets



- (1) Füllen
- (2) Reaktion (ggf. mehrere)
- (3) Absetzen
- (4) Entleeren bzw. Dekantieren

(nach ATV 1996; FH Münster, Forschungskatalog 2004)

**Abb. 41: Schema eines SBR-Zyklus**  
(WETTER & BRÜGGING 2004)

Diskontinuierliche Verfahren mit suspendierter Biomasse werden als **S(equencing)B(atch)R(eactor)**-Verfahren bezeichnet. Diskontinuierlich betriebene Biofilmverfahren nennt man **S(equencing)B(atch)B(iofilm)R(eactor)**-Verfahren.

Diskontinuierliche Systeme haben einige Vorteile:

- Alle Prozesse laufen in einem Reaktor ab.
- Eine der Biologie folgende Schlammabtrennung entfällt auch bei einem Belebungsverfahren, weil die Schlammabtrennung im Bioreaktor selbst erfolgt.
- Das Schlammalter im Reaktor ist immer ausreichend, um auch langsam wachsende Spezies anzureichern. Der Schlammanfall ist aufgrund des hohen Schlammalters sehr gering. Der Schlamm ist aufgrund des hohen Schlammalters i.d.R. so stabil, dass eine Nachbehandlung entfallen kann. Oft fällt gar kein Überschussschlamm an, der entsorgt werden müsste.
- Die Dauer der Zyklusphasen kann stets an das Wasser und die zu erreichenden Grenzwerte angepasst werden.

Nachteil eines diskontinuierlichen Systems ist, dass ausreichende Speichermöglichkeiten für das Rohwasser und ggf. für das gereinigte Wasser vorzusehen sind. Dieser Nachteil kann zumindest teilweise durch den Betrieb mehrerer Reaktoren ausgeglichen werden, so dass ein quasi kontinuierlicher Betrieb möglich ist.

### 8.3.3 Kombination mit anderen Verfahren

Eine Biologie als alleinige Verfahrensstufe zur Grundwasseraufbereitung ist eher die Ausnahme als die Regel. Je nach Störstoffprofil wird eine Vorbehandlung erforderlich sein, um Ausfällungen im Bioreaktor zu vermeiden. Eine Polzeistufe nach dem Bioreaktor (z.B. Aktivkohle) sollte beim Abbau von organischen Schadstoffen ohnehin obligatorisch sein, um Schwankungen des Schadstoffabbaus aufzufangen. Bei offen belüfteten Systemen und flüchtigen Schadstoffen/Metaboliten ist der Bioreaktor geschlossen auszuführen und eine Abluftabsaugung und -behandlung vorzusehen. Dasselbe empfiehlt sich je nach Lage der Anlage (z.B. nahe an einem Wohngebiet) bei Geruchsbildung.

Vorbehandlung:

- Abscheidung von Feststoffen bei allen verstopfungsanfälligen Reaktoren
- Abscheidung von Eisen und Mangan vor aeroben verstopfungsanfälligen Systemen
- Abscheidung von Eisen und Mangan vor allen Anlagen mit Biomasserezirkulation
- Abscheidung von Eisen und Mangan vor Verrieselungssystemen (Tropfkörper)
- pH-Einstellung bei Erfordernis

Nachbehandlung:

- Polzeistufe für organische Schadstoffe obligatorisch
- Nachbehandlung generell bei unvollständigem Abbau
- Nachbehandlung ggf. bei Metabolitenbildung

Abluftreinigung

- Absaugung und Behandlung je nach Schadstoffspektrum, z.B. Luftaktivkohle

## 8.4 Reaktortypen und Auslegung

Die folgenden Verfahren bzw. Reaktortypen können im Grundwassersanierungsbereich am sinnvollsten eingesetzt werden:

### Kontinuierliches Belebungsverfahren

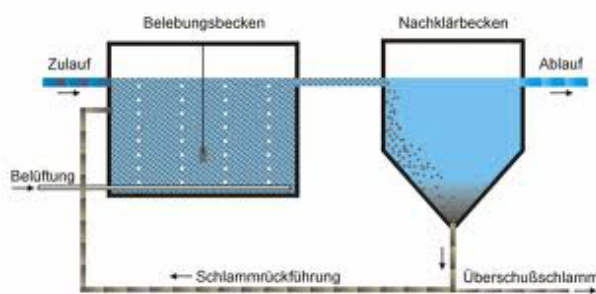


Abb. 42: Prinzipskizze Belebungsverfahren  
(Quelle: [www.wasser-wissen.de](http://www.wasser-wissen.de))

### Festbettverfahren

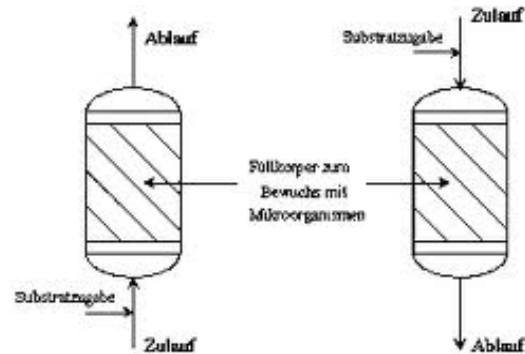


Abb. 43: Prinzipskizze eines Festbettreaktors  
(Quelle: [www.wasser-wissen.de](http://www.wasser-wissen.de))

### Wirbelbettverfahren (auch MBBR Moving Bed Biofilm Reactor)



Licensed by Kaldnes Miljøteknologi AS

Abb. 44: belüfteter Wirbelbettreaktor  
(Quelle: [www.sanying.com.tw](http://www.sanying.com.tw))

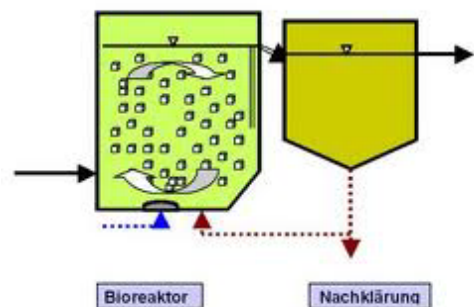


Abb. 45: Schematische Darstellung eines  
Wirbelbettverfahrens  
(Quelle: [www.abwasser-dezentral.de](http://www.abwasser-dezentral.de))



## Rotationstauchkörper

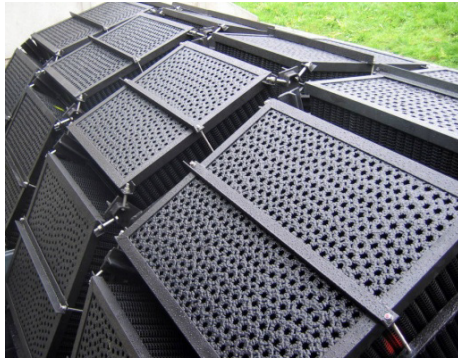
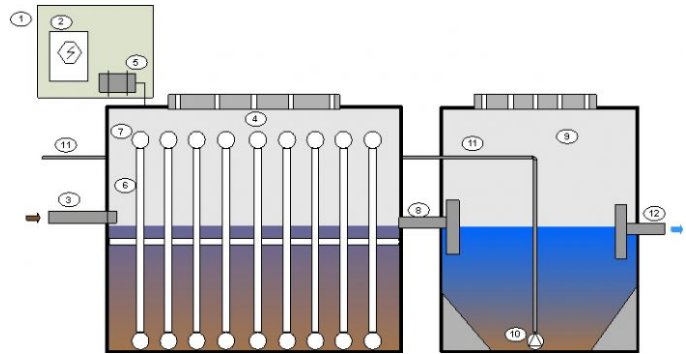


Foto: H. Bruns / © Horst Bruns Umwelttechnik

**Abb. 46: Walzentauchkörper**  
(Quelle: [www.brunsumwelttechnik.de](http://www.brunsumwelttechnik.de))



© PIA e.V.

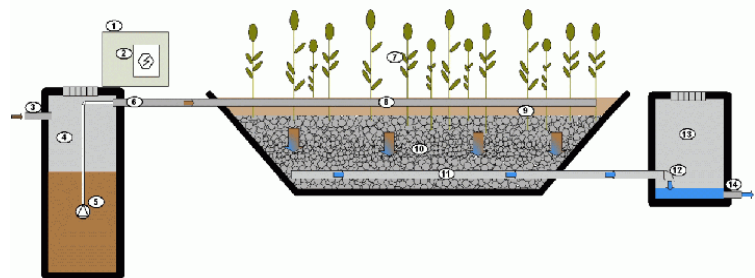
**Abb. 47: Schematische Darstellung eines Rotationstauchkörpers**  
(Quelle: [www.bdz-abwasser.de](http://www.bdz-abwasser.de))

## Pflanzenkläranlagen, bewachsene Bodenfilteranlagen



Foto: Th. Rötche / © eneotech Umwelt GmbH

**Abb. 48: Pflanzenkläranlage in Lauchhammer**



**Abb. 49: Schematische Darstellung eines bewachsenen Bodenfilters**  
(Quelle: [www.abwasser-dezentral.de](http://www.abwasser-dezentral.de))

Biologische Verfahren sind im Grundwassersanierungsbereich trotz weit reichender Forschungsaktivitäten und entsprechend umfassendem Kenntnisstand wenig verbreitet. Hauptgrund dafür ist sicherlich das Fehlen belastbarer allgemein gültiger Bemessungsparameter. Die Bemessung erfolgt bei Biofilmverfahren i.d.R. über die Raumabbauleistung (z.B. kg Schadstoff/m<sup>3</sup> Träger/Tag) oder die Flächenabbauleistung (z.B. kg Schadstoff/m<sup>2</sup> Aufwuchsfläche/Tag). Bei Belebungsverfahren erfolgt die Bemessung über die Verweilzeit von Wasser und Biomasse (Schlammalter). Pflanzenkläranlagen werden nach der Abbauleistung pro m<sup>2</sup> (kg Schadstoff/m<sup>2</sup>/d) ausgelegt. Die maßgebenden Auslegungsgrößen müssen im Grundwasserbereich i.d.R. experimentell ermittelt werden.

In Kapitel 9 ist aufgeführt, welche Schadstoffe generell biologisch abbaubar sind. Im Einzelfall ist jedoch stets zu prüfen, ob die generelle Aussage auch auf die spezifische Wassermatrix übertragbar ist.



## 9. Verfahrensauswahl

Die nachfolgende Tabelle 2 und Abbildung 50 sollen bei der Verfahrensauswahl in Abhängigkeit vom Schad- und Störstoffspektrum sowie der Anordnung der Verfahrensstufen in einer Anlage eine Hilfestellung geben.

In der Matrix sind Eignung und Verbreitung der einzelnen Verfahren für die Entfernung spezifischer Schad- und Störstoffe zusammen getragen worden. Die Matrix beruht auf der Einschätzung der Autoren und hat somit keinen statistischen Charakter.

Das Schema zeigt eine typische Abfolge von Verfahren in einer Grundwasseraufbereitungsabfolge. Allerdings kann unter bestimmten Umständen eine Änderung der Verschaltung sinnvoll sein. Die Abbildung ist insofern nicht als fixes Schema zu sehen.

**Tabelle 2: Matrix Schad- und Störstoffe – Verfahren**

| <b>Matrix Schadstoffe – Verfahren</b>        |                                      |                                                                                                                              |         |                      |         |         |         |          |         |     |      |         |         |         |         |    |         |         |    |
|----------------------------------------------|--------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------|----------------------|---------|---------|---------|----------|---------|-----|------|---------|---------|---------|---------|----|---------|---------|----|
|                                              |                                      | <u>Bewertung</u> gut geeignet und weit verbreitet + + +    geeignet und/oder wenig verbreitet ++    zum Teil geeignet +      |         |                      |         |         |         |          |         |     |      |         |         |         |         |    |         |         |    |
|                                              |                                      | *1    werden als Nebeneffekt mit oxidiert<br>*2    vorher Überführung der Schadstoffe in den ungelösten Zustand erforderlich |         |                      |         |         |         |          |         |     |      |         |         |         |         |    |         |         |    |
|                                              | ungelöst                             | gelöst                                                                                                                       |         |                      |         |         |         |          |         |     |      |         |         |         |         |    |         |         |    |
|                                              | Flüssigkeiten in Phase<br>Feststoffe | MKWAKW                                                                                                                       | LHKW    | halogenierte Benzole | Phenole | PAK     | BTEX    | Ammonium | Tensile | PFT | MTBE | PCB     | Cyanide | Fe      | Mn      | As | Cr      | Fluorid | Hg |
| Leichtphasen-<br>abscheidung                 | ++<br>+                              |                                                                                                                              |         |                      |         |         |         |          |         |     |      |         |         |         |         |    |         |         |    |
| Schwerphasen-<br>abscheidung                 | ++<br>+                              |                                                                                                                              |         |                      |         |         |         |          |         |     |      |         |         |         |         |    |         |         |    |
| Chem. Oxidation                              |                                      |                                                                                                                              | +       | +                    | +       | +       | +       | ++       |         |     |      |         | ++      | ++<br>+ | ++<br>+ | ++ |         |         |    |
| Chem. Reduktion                              |                                      |                                                                                                                              | +       |                      |         |         |         |          |         |     |      |         |         |         |         |    | ++      |         |    |
| Fällung                                      |                                      |                                                                                                                              |         |                      |         |         |         |          |         |     |      |         | ++      | ++<br>+ | ++<br>+ | ++ | ++      |         |    |
| Flockung                                     |                                      | ++<br>+                                                                                                                      |         |                      |         |         |         |          |         |     |      |         |         |         |         |    |         |         |    |
| Sedimentation                                |                                      | ++<br>+                                                                                                                      |         |                      |         |         |         |          |         |     |      |         | *2      | *2      | *2      | *2 | *2      |         |    |
| Flotation                                    | ++                                   | ++                                                                                                                           |         |                      |         |         |         |          |         |     |      |         |         |         |         |    |         |         |    |
| Filtration                                   |                                      | ++<br>+                                                                                                                      |         |                      |         |         |         |          |         |     |      |         | *2      | *2      | *2      | *2 | *2      |         |    |
| Schlamm-<br>eindickung und -<br>entwässerung |                                      | ++<br>+                                                                                                                      |         |                      |         |         |         |          |         |     |      |         | *2      | *2      | *2      | *2 | *2      |         |    |
| Ionenaustausch                               |                                      |                                                                                                                              |         |                      |         |         |         | ++       |         |     |      |         | ++      |         |         | +  | ++<br>+ | ++      |    |
| Strippung (Desorp-<br>tion)                  |                                      |                                                                                                                              | +       | ++<br>+              | +       | +       | ++<br>+ | +        |         |     | ++   |         |         |         |         |    |         |         |    |
| Kat. Oxidation                               |                                      |                                                                                                                              | ++      | ++                   | ++      | ++      | ++      | ++       | ++      |     | ++   |         | ++      | *1      | *1      | *1 |         |         |    |
| Extraktion                                   |                                      | ++                                                                                                                           | ++      |                      | ++      | ++      | ++      |          |         |     | ++   | ++      |         |         |         |    |         |         |    |
| Aktivkohle (Ad-<br>sorption)                 |                                      | ++<br>+                                                                                                                      | ++<br>+ | ++<br>+              | ++<br>+ | ++<br>+ | ++<br>+ |          |         | +   | +    | ++<br>+ |         |         |         |    |         |         | ++ |
| Biologie                                     |                                      | ++                                                                                                                           | ++      | ++                   | ++      | ++      | ++      | ++       | ++      |     | +    |         | ++      |         |         |    |         |         |    |

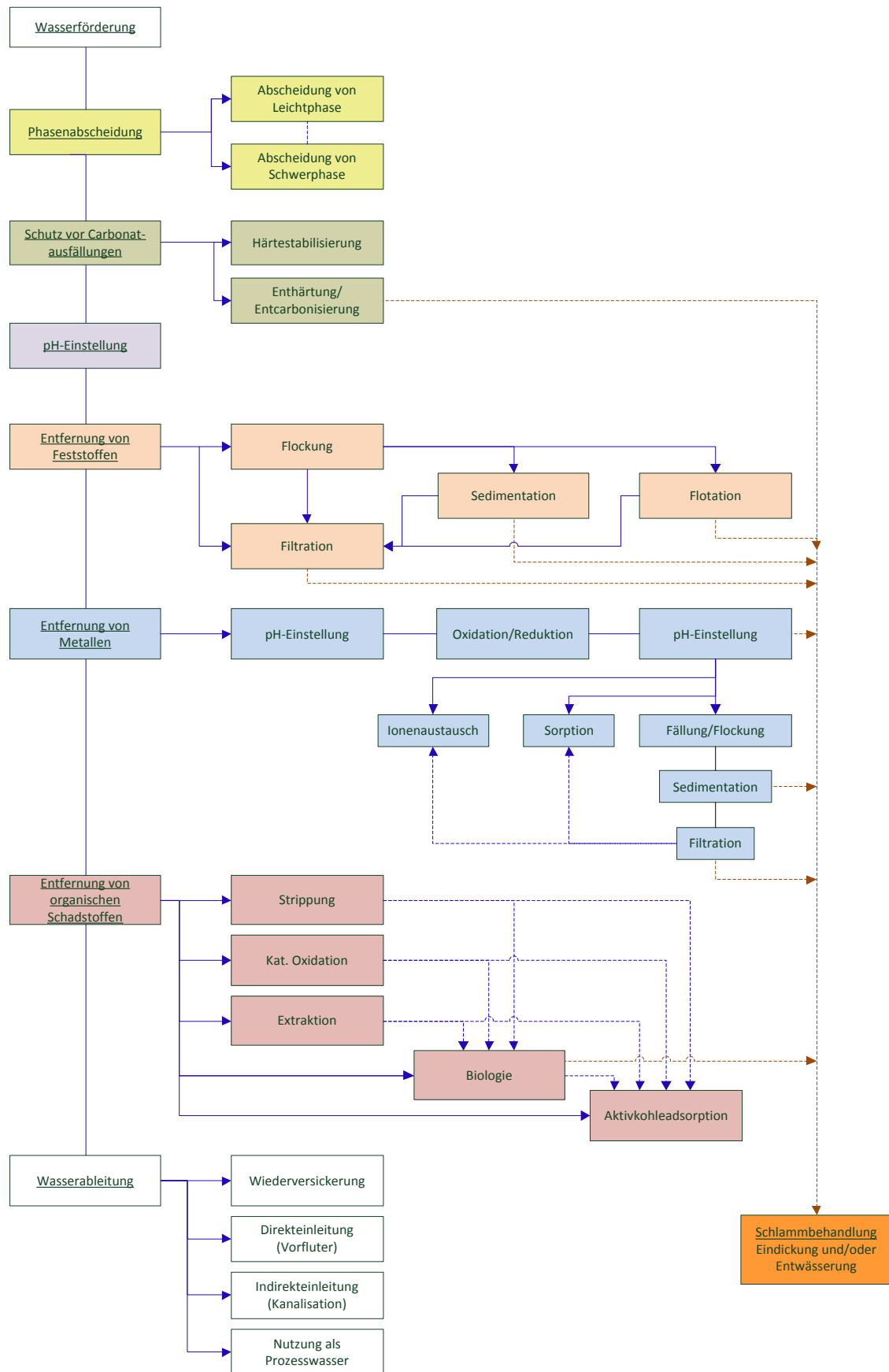


Abb. 50: Typische Bausteine einer Grundwasseraufbereitung

## 10. Grundwasserableitung

Der Verbleib des behandelten Grundwassers richtet sich nach dem geforderten bzw. technisch erreichbaren Reinigungsgrad und den örtlichen Einleitbedingungen. Dabei sind nicht nur die sanierungsauslösenden Schadstoffe sondern auch andere natürliche Inhaltsstoffe sowie dem Aufbereitungsprozess geschuldete Stoffveränderungen (z.B. Sauerstoffanreicherung, Veränderung des Kalk-Kohlensäure-Gleichgewichtes) relevant. Insbesondere die stofflichen Veränderungen können dazu führen, dass beim Aufeinandertreffen des Reinwassers mit dem an der Einleitstelle natürlich vorhandenen Gewässerchemismus dort hydrochemische Veränderungen (z.B. Verockerung, Fällungsreaktionen) ausgelöst werden. Diese unter Umständen nachteiligen Auswirkungen sind bei der Planung zwingend zu berücksichtigen.

Üblicherweise stellt die tatsächliche Reinigung des Rohwassers auf die geforderte Reinwasserqualität keine unverhältnismäßige Anforderung dar. Eine hohe Reinigungsleistung (Entfernung) der relevanten Schadstoffe in der Aufbereitungsanlage ist Stand der Technik. Eine mangelhafte Reinigungsleistung ist in der Regel durch eine unzureichende Erkundung der Wasserqualität, nicht plausible Prognosen der zu erwartenden Schadstoffkonzentration, eine unstimmgige Fördermenge, durch Unzulänglichkeiten bei der technischen Ausführung oder unzureichende analytische Überwachung des Anlagenbetriebes zu erklären.

Das Grundwasser kann nach dem Reinigungsverfahren reinfiltiert werden. Grundsätzlich muss bei der **Reinfiltration** das Verschlechterungsverbot nach § 34 Abs. 1 WHG beachtet werden, welches eine Einleitung von belastetem Grundwasser in unbelastetes Grundwasser und somit eine Verschlechterung am Ort der Einleitung verbietet.

Weiterhin besteht die Möglichkeit der **Einleitung des behandelten Grundwassers in den Vorfluter**. Hierbei muss eine Beeinträchtigung des Wohls der Allgemeinheit und eine Gefährdung der öffentlichen Wasserversorgung nach § 6 WHG ausgeschlossen werden. Mindestens darf die Qualität des Oberflächengewässers nicht nachteilig verändert werden. Und auch hier sind mögliche negative Effekte infolge der hydrochemischen Unterschiede zwischen Reinwasser und Vorfluter im Vorfeld durch geeignete Untersuchungen auszuschließen. Es gelten die Direkteinleitungsverordnungen der zuständigen Wasserbehörden.

Außerdem besteht die Möglichkeit einer **Indirekteinleitung in die öffentliche Kanalisation**. Dabei sind die kommunalen Abwassersatzungen (Indirekteinleiterverordnungen) zu beachten, da die Anforderungen an eine Einleitung regional sehr unterschiedlich sein können. Eine Einleitung in die Kanalisation ist in jedem Fall die teuerste Form der Reinwassereinleitung, da sie in der Regel mit Einleitgebühren belastet wird. Üblicherweise bietet sich die Einleitung in die Kanalisation bei Vorversuchen zur Ermittlung der Mischwasserqualität an. In jedem Fall ist eine Einleitung in die Kanalisation bis zum Nachweis des Einhaltens der geforderten Reinwasserwerte für andere (Direkt-)Einleitungen (Aquifer, Vorflut) Stand der Technik und obligatorisch.

Selten bietet sich die auch wasserwirtschaftlich in jedem Fall zu bevorzugende Variante der **Nutzung des Reinwassers als Brauchwasser für betriebliche Zwecke** an. Liegen die wasserwirtschaftlichen Vorteile auf der Hand (Reduzierung der Brauchwasserförderung, oft kostengünstiger wegen der geringeren Anforderungen an die Qualität), bestehen aber auch Risiken bei dieser Form der Nutzung des aufbereiteten Grundwassers. Es wird in jedem Fall in ein bestehendes Wasserrecht mit entsprechenden möglichen erweiterten Anforderungen eingegriffen. Auch ist nachzuweisen, dass die Restbelastungen im Reinwasser den vorhandenen Brauchwasserzwecken entsprechen (z.B. Kühlung, Nass-Reinigung) und diese Nutzung auch sicher weiterhin in Anspruch genommen werden kann. Zudem wird die Nachweisverpflichtung der schadlosen Ableitung des Brauchwassers zu erbringen sein.

## 11. Kosten und Wirtschaftlichkeit

### 11.1 Kostenfaktoren

Die Kosten für die einzelnen Aufbereitungsverfahren können nicht unabhängig von den vielen Faktoren benannt werden, die einen starken Einfluss auf die Kosten bewirken. Deshalb werden in dieser Arbeitshilfe keine Kosten aufgeführt, sondern lediglich die entscheidenden Kostenfaktoren, die bei einer Ermittlung der Investitions- bzw. Betriebskosten berücksichtigt werden sollten.

#### 11.1.1 Investitionskosten

Die Investitionskosten einer Anlage umfassen alle Planungs- und Baukosten einer Anlage inkl. ihrer Peripherie bis zur Inbetriebnahme. Kostenbeeinflussende Faktoren sind:

- 1) Menge des zu behandelnden Grundwassers, hydraulische Durchsatzleistung, Minimal- und Maximalleistung;
- 2) Kontinuierlicher Betrieb oder Batch-Betrieb;
- 3) Art der Schadstoffe und deren Menge bzw. Konzentration;
- 4) Art der Störstoffe und deren Menge bzw. Konzentration;
- 5) Geforderte Reinwasserqualität;
- 6) Ableitung des gereinigten Wassers in einen Vorfluter, einen Abwasserkanal oder durch Wiederversickerung zurück ins Grundwasser, Leitungen, Infiltrationsanlagen etc.;
- 7) Einsatzdauer, Winterbetrieb, Frostschutz, Begleitheizungen, oder nur temporärer bzw. saisonaler Betrieb;
- 8) Aufstellungsort: im Freien oder in einer heizbaren Halle, Witterungsschutz;
- 9) Infrastruktur: Zufahrten, Stromversorgung; Rohrleitungslängen, Beleuchtung;
- 10) Wasserfassungen (Brunnenbau);
- 11) geforderte Verfügbarkeit der Anlage;
- 12) Sicherheitstechnik, Arbeitsschutz, Grundwasserschutz (Leckagesicherheit, Auffangwannen etc), Einzäunung, Schutz vor Vandalismus;
- 13) Korrosionsschutz;
- 14) MSR-Technik und Explosionsschutz;
- 15) Umgebungsschutz (Lärm, Abluft, etc.);
- 16) Planung, Bauleitung, Dokumentation (Engineering);
- 17) Antransport und Montage
- 18) Gefährdungsbeurteilung, ggf. Explosionsschutzdokument und Konformitätserklärung.

Grundsätzlich können die Aufbereitungsanlagen entweder gekauft oder gemietet werden. Der Kauf bietet sich dann an, wenn die Anlage am Standort solange betrieben wird, dass sie abgeschrieben ist, bzw. wenn die Mietkosten die Kosten des Kaufs auf jeden Fall deutlich überschreiten.

### **11.1.2 Betriebskosten**

Beim Betrieb einer Anlage fallen regelmäßig folgende Kosten an:

- 1) Inbetriebnahme und ggf. Probetrieb;
- 2) Betriebspersonal inkl. der erforderlichen persönlichen Schutzausrüstung (PSA);
- 3) Reparatur und Wartung soweit nicht in den Personalkosten schon erfasst;
- 4) Verbrauchsstoffe wie Chemikalien, Aktivkohle, Ionenaustauscher etc.
- 5) Energiekosten, Strom, Diesel und Gas;
- 6) Entsorgung von Reststoffen;
- 7) Probenahme und Analytik;
- 8) Ableitung des gereinigten Wassers, Einleitungsgebühren;
- 9) Berichtswesen des Anlagenbetreibers an den Auftraggeber;
- 10) Gutachterliche Betreuung, Auswertung und Berichterstattung;
- 11) Wiederkehrende Prüfungen (z.B. Druckbehälter).

### **11.1.3 Rückbaukosten**

Beim Rückbau einer Anlage sind folgende Kosten zu berücksichtigen:

- 1) Demontage;
- 2) fachgerechte Entsorgung von Reststoffen und ggf. Anlagenkomponenten;
- 3) Abtransport;
- 4) Wiederherstellung des ursprünglichen Zustandes des Aufstellungsortes oder davon abweichende vertragliche Vereinbarungen.

## **11.2 Wirtschaftlichkeit**

Die Wirtschaftlichkeit ist das Maß für das Verhältnis zwischen Nutzen und Kosten. Sie ist dann hoch, wenn der Nutzen groß und die Kosten dafür relativ niedrig sind. Die Wirtschaftlichkeit ergibt sich aber auch über das Benchmarking gleicher Anlagentypen oder gleichartiger Aufbereitungsverfahren untereinander.

Oft stehen zwei oder mehrere Verfahrensarten für eine Reinigungsaufgabe zur Auswahl. Dann sollte nach Wirtschaftlichkeitsgesichtspunkten die für die Einsatzart kostengünstigste Variante gewählt werden. So können LHKW beispielsweise nur gestrippt oder nur an Aktivkohle adsorbiert werden bzw. in Kombination beider Verfahrensschritte entfernt werden. Bei der Auswahl müssen daher die Kosten für alle drei Varianten berechnet und danach das für den konkreten Einsatzfall wirtschaftlichste Verfahren ausgewählt werden.

Im konkreten Fall ist die Wahl davon abhängig, welche hydraulische Durchsatzleistung die Anlage haben soll, wie lange die vorgesehene Einsatzzeit ist, wie hoch die Konzentrationen der LHKW sind und welche Reinigungsleistung erzielt werden soll.

### 11.3 Optimierung

Eine Optimierung der Wasseraufbereitung und der zugehörigen Kosten ist grundsätzlich möglich und sollte bei der Anlagenplanung Berücksichtigung finden. Dabei wird vorausgesetzt, dass die Anlage bei der Planung bereits optimal an die Anforderungen angepasst wurde. Es handelt sich also im Wesentlichen darum, eine nachträgliche Optimierung durchführen zu können, die sich aus der Änderung der Rahmenbedingungen ergeben kann.

Folgende Optimierungsansätze sind denkbar:

- Veränderung der hydraulischen Dimensionierung, insbesondere der Durchsatzleistung;
- Veränderung der Schadstoffkonzentrationen;
- Veränderung der Art der Schadstoffe;
- Veränderung der chemisch-physikalischen Eigenschaften des Grundwassers.

Eine Optimierung ist insbesondere dann möglich, wenn die folgenden Planungsansätze beachtet wurden:

- Modulare Bauweise;
- Berücksichtigung zusätzlichen Platzbedarfs;
- Auslegung der MSR-Anlage für Reduzierung oder Erweiterungen der Anlagenteile;
- Ausbau nicht mehr erforderlicher Anlagenteile;
- Nachrüstung oder Umrüstung von Anlagenkomponenten nachträglich mit geringem Aufwand möglich.
- Umsetzbarkeit der Anlage an einen anderen Standort;
- Universelle Einsetzbarkeit (Standardisierung).

## 12. Umweltauswirkungen

Mit den nachfolgend aufgeführten Umweltauswirkungen einer Grundwasseraufbereitung (ohne die eigentliche Förderung des Grundwassers) ist zu rechnen (siehe auch Kap. 4.3.4 Umgebungsschutz):

- Am Aufstellungsort kommt es zu Belastungen des Grundstückes durch die Baumaßnahmen und oft auch zu einer Änderung der bisherigen Nutzung der Aufstellungs- und Betriebsfläche. Deshalb sollte ein vollständiger Rückbau der oberirdischen Anlagen und die Wiederherstellung des Ausgangszustandes nach Beendigung der Maßnahme vorgesehen und eingeplant werden.
- Das gereinigte Grundwasser muss an geeigneter Stelle eingeleitet werden – dies kann die Einleitung in einen Vorfluter, in die Kanalisation oder zurück in den Grundwasserkörper sein – je nach dem müssen dabei die einschlägigen Einleitvorschriften eingehalten werden.
- Alle bei der Aufbereitung entstehenden sonstigen Stoffströme müssen verwertet oder ordnungsgemäß entsorgt werden – dabei handelt es sich vorwiegend um Schlämme, Abwasser und Verbrauchsstoffe wie z.B. belastete Aktivkohle etc.;
- Verkehrsbelastungen durch An- und Abfahrten sowie Stofftransporte;
- Beeinträchtigungen von Fauna und Flora;
- Ressourcenverbrauch, in der Regel an anderen Orten (Chemikalien, Aktivkohle, Floccungsmittel etc.);
- Energieverbrauch, Strom; Gas oder andere Energieträger;
- Emissionen verursachen Immissionen;
- Wassergefährdende Stoffe (Dieseltank, Chemikalienbehälter, Abwasser etc.) sind so zu sichern, dass sie nicht in den Boden oder das Grundwasser entweichen können (Lagerungsvorschriften, Tankwannen, Auffangbehälter, Dichtigkeitsprüfungen etc.);
- Lärm- die Lärmschutzverordnungen sind zu beachten (z.B. TA Lärm);
- Gasförmige Stoffe und sonstige luftgetragene Schadstoffe (BImSchG und BImSchV, TA Luft).

Die Umweltauswirkungen sollen gering gehalten werden, insbesondere die Erzeugung klimaschädlicher Gase wie z.B. CO<sub>2</sub> ist zu minimieren. Im Sinne der Nachhaltigkeit soll das jeweils mildeste Mittel zur Erreichung der Ziele eingesetzt werden.



Unter den Begriffen „Green Remediation“ (<http://www.epa.gov./superfund/greenremediation>, <http://www.clu-in.org/greenremediation>, <http://www.epa.gov/owser/greenercleanups>), „Sustainable Remediation“ (<http://www.nicole.org>, SLENDERS 2011, NICOLE 2012) und „Grüne Sanierung“ (*altlastenforum* Baden-Württemberg 2011) wurden und werden Kriterien für eine nachhaltige Sanierung entwickelt. Es werden u.a. folgende Kriterien für eine nachhaltige/grüne Sanierung benannt:

- Minimierung des Energieverbrauchs;
- Nutzung regenerativer Energien;
- Minimierung der Emissionen (Luft und Lärm);
- Minimierung des Wasserverbrauchs;
- Minimierung des Flächenverbrauchs;
- Schutz der Ökosysteme;
- Reduzierung des Materialverbrauchs sowie Recycling von Materialien und Abfall.

Die Beurteilung, ob eine Sanierungstechnologie oder allgemein eine Sanierung „grün“ ist, muss standort- und schadstoffspezifisch in jedem Einzelfall erfolgen, da es hierfür (noch) keine allgemein gültigen Entscheidungskriterien gibt (DÖRR & KOSCHITZKY 2011).

## 13. Fazit & Ausblick

Die vorliegende Arbeitshilfe **H1-14 Grundwasseraufbereitung** wurde von einer Arbeitsgruppe des Fachausschusses H1 „Technologien und Verfahren“ des ITVA erarbeitet. Sie ersetzt die ITVA-Arbeitshilfe H1-9/98 "Grundwasserreinigung", deren inhaltlicher Umfang den heutigen Anforderungen an das Thema nicht mehr gerecht wurde.

Die Arbeitshilfe H1-14 Grundwasseraufbereitung zeigt auf, welches Spektrum an Randbedingungen bei Planung, Ausschreibung, Errichtung und Betrieb von Grundwasseraufbereitungsanlagen im Zusammenhang mit der Sanierung von Altlasten zu berücksichtigen ist – und zwar von allen Beteiligten: Sanierungspflichtigen, Behörden, Planern und Ausführenden. Deshalb beschäftigt sich diese Arbeitshilfe nicht nur mit relevanten Schadstoffen und ihren Eigenschaften sowie den für deren Eliminierung zur Verfügung stehenden Verfahren, sondern behandelt auch und insbesondere:

- Rechtliche Vorgaben;
- Anforderungen an den Arbeitsschutz;
- Anforderungen an die Anlagensicherheit;
- Technische Rahmenbedingungen, die bei jeder Pump-and-Treat-Maßnahme zu berücksichtigen sind;
- Kostenfaktoren und Wirtschaftlichkeitsbetrachtung;
- Umweltauswirkungen.

Der Erfolg einer aktiven Grundwassersanierungsmaßnahme mittels Pump-and-Treat und anschließender Grundwasseraufbereitung hängt maßgeblich von der fachgerechten Auswahl geeigneter Aufbereitungsverfahren für das geförderte Grundwasser und deren Kombination und Dimensionierung sowie dem optimalen Zusammenspiel aller Beteiligten ab. Die vorliegende Arbeitshilfe kann dabei unterstützen.

## Literaturverzeichnis

- ABWASSERTECHNISCHE VEREINIGUNG E.V. (ATV) (1996): ATV-Handbuch Klärschlamm. -. 4. Auflage, Ernst & Sohn Berlin
- ALTENBOCKUM, M. (2011): Präsentation Schadstoffe. - Unveröffentlichte Vorlesung „Umweltanalytik“.- Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule, Aachen
- ALTLASTENFORUM BADEN-WÜRTTEMBERG (2011): Diskussionspapier „Grüne Sanierung“, Stand 26.04.2011.- Arbeitskreis „Innovative Erkundungs-, Sanierungs- und Überwachungsmethoden; <http://www.altlastenforum-bw.de>
- AUSSCHUSS FÜR GEFÄHRSTOFFE (AGS) (2010): TRGS 524 „Schutzmaßnahmen bei Tätigkeiten in kontaminierten Bereichen“ -. GMBI Nr. 21 vom 1. April 2010, S. 419, zuletzt geändert und ergänzt: GMBI 2011 S. 1018-1019 [Nr. 49-51]
- BERUFSGENOSSENSCHAFT DER BAUWIRTSCHAFT (BG BAU) (2007): Handlungsanleitung zur Gefährdungsbeurteilung und Festlegung von Schutzmaßnahmen bei der Kampfmittelräumung. BG-Information 833.- BG Bau, Prävention, Berlin
- DÖRR, H. & KOSCHITZKY, H.-P. (2011): Grüne Sanierung – Green Remediation: eine neue, innovative Sanierungsstrategie?.- DECHEMA-Symposium „Strategien zur Grundwassersanierung“ (21. - 22. November 2011 Frankfurt am Main), Editor: DECHEMA Frankfurt, Eigenverlag, DECHEMA, 11/2011.
- ECKER, M. (2008): Entfernung von Chrom aus Wasser mit Absorptionsmittel 3,- Galvanotechnik, 99/1
- ENCYCLOPÆDIA BRITANNICA ONLINE, s. v. "flotation", accessed June 30, 2012, <http://www.britannica.com/EBchecked/topic/210944/flotation>.
- FEDERAL REMEDIATION TECHNOLOGIES ROUNDTABLE (FRTR): Remediation Technologies and Screening Matrix and Reference Guide, Version 4.0.-- <http://www.frtr.gov/matrix2/section1/toc.html>
- FEßMANN, J., & ORTH, H. (2002): Angewandte Chemie und Umwelttechnik für Ingenieure – Handbuch für Studium und betriebliche Praxis, 2. Auflage, Ecomed Verlagsgesellschaft
- FREIER, U. & HOFFMANN, J. (2005): Abbau von Pestiziden, Pharmainhaltsstoffen und anderen toxischen Verbindungen im Grundwasser durch heterogen-katalytische Oxidation. – Abschlussbericht zum Förderprojekt 2462 der Max-Buchner-Stiftung. Institut für Nichtklassische Chemie e.V. an der Universität Leipzig
- FRIMMEL, F.H., ZWIENER, C. & KLEISER, G. (2000): Oxidationsverfahren in der Wasseraufbereitung.- Nachrichten aus der Chemie, 48
- FRITSCH, K. (2010): Der „vergessene“ Aufwand bei Ausschreibung, Konzeption Bau und Betrieb von Altlastensanierungsanlagen.- *altlasten spektrum* 3/2010: 125 - 131
- FRITSCH, K. (2011): Anforderungen an die Sicherheit von Altlastensanierungsanlagen.- ITVA-/ LAF-Altlastensymposium 2011 (24. - 25.03.2011, Magdeburg), ITVA e.V., Berlin
- GRÄF, R., LOHMEYER, S. & SCHWERING, H.-U. (2002), WEKA Praxishandbuch: Abwassertechnik in der Produktion – Verminderung, Behandlung, Rückgewinnung. - Weka-Verlag, Augsburg; Auflage: 2., überarb. A. (38. Ergänzungslieferung, November 2002)
- GRANDEL, S. & DAHMKE, A. (2008): Natürliche Schadstoffminderung bei LCKW-kontaminierten Standorten. KORA Themenverbund 3: Chemische Industrie, Metallverarbeitung.- Institut für Geowissenschaften, Christian-Albrechts-Universität zu Kiel (KORA-TV-3-Leitfaden); [www.natural-attenuation.de/bestellung](http://www.natural-attenuation.de/bestellung)
- GROHMANN, A., HÄSSELBARTH, U. & SCHWERDTFEGGER, W. (2002), Die Trinkwasserverordnung.- 4. Neu bearbeitete Auflage, Erich Schmidt Verlag, Berlin
- GROHMANN, A., HÄSSELBARTH, U., SCHWERDTFEGGER, W. (Hrsg.) (2002): Die Trinkwasserverordnung. Einführung und Erläuterungen für Wasserversorgungsunternehmen und Überwachungsbehörden.- 4. Neu bearbeitete Auflage, Erich Schmidt Verlag, Berlin

- GROPPER, H., KOHLER, W., KOHLMEIER, E., SCHÖNDORF, TH., SCHRENK, V. & WABBELS, D. (2004): Ökobilanzierung von Altlastensanierungsverfahren.- Schriftenreihe altlastenforum Baden-Württemberg, Heft 9, Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung, Stuttgart
- HARTING, P., FREIER, U., & HOFFMANN, J. (2005): Abbau von Pestiziden, Pharmainhaltsstoffen und anderen toxischen Verbindungen im Grundwasser durch heterogen-katalytische Oxidation. Abschlussbericht zum Förderprojekt 2462 der Max-Buchner-Stiftung.- Institut für nichtklassische Chemie e.V. an der Universität Leipzig; [http://www.dechema.de/dechema\\_media/Downloads/mbf/2462-p-707.pdf](http://www.dechema.de/dechema_media/Downloads/mbf/2462-p-707.pdf); <http://www.uni-leipzig.de/inc>
- HARTINGER, L. (1991): Handbuch der Abwasser- und Recyclingtechnik für die metallverarbeitende Industrie.- 2. Auflage, Fachbuchverlag Leipzig
- HAUPTVERBAND DER GEWERBLICHEN BERUFSGENOSSENSCHAFTEN - HVBG (2006): Berufsgenossenschaftliche Regeln für Sicherheit und Gesundheit bei der Arbeit. BG-Regel „Kontaminierte Bereiche“ (BGR 128). Carl Heymanns Verlag München. – <http://www.arbeitssicherheit.de/servlet/PB/show/1224439/bgr128.pdf>
- HEIN, P., ZITWITZ, M., PISTIOLIS, I., MOSCHICK, A., FREYGANG, M. & GROßMANN, J. (2008): In-situ-Abreinigung von Trichlorethen im Grundwasser mit regenerierbarem Fe(0)-Reaktor.- altlasten spektrum 2/2008, 53 – 59.
- HELD, TH. (2011): Green and Sustainable Remediation – eine Perspektive bei der Altlastenbearbeitung? - DECHEMA-Symposium „Strategien zur Grundwassersanierung“ (21. - 22. November 2011 Frankfurt am Main), Editor: DECHEMA Frankfurt, Eigenverlag, DECHEMA, 11/2011.
- HESELNANN, J. (2011): Handhabung einer Kontamination perfluorierter Tenside (PFT) infolge eines Eintrags von Feuerlöschschäumen in Boden und Grundwasser.- Unveröffentlichte Diplomarbeit, Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen.
- HÖLTING, B. & COLDEWEY, W. G. (2009): Hydrogeologie – Einführung in die Allgemeine und Angewandte Hydrogeologie. - 7. Auflage. Spektrum Akademischer Verlag, Heidelberg.
- HOTH, N., RAMMLMAIR, D., GERTH, J. & HÄFNER, F. (2008): Natürliche Schadstoffminderungsprozesse an Bergbaukippen/-halden und Flussauensedimenten. Empfehlungen zur Untersuchung und Bewertung der natürlichen Quelltermminimierung. KORA-Themenverbund 6: Bergbau und Sedimente. Technische Universität Bergakademie Freiberg; [www.natural-attenuation.de/bestellung](http://www.natural-attenuation.de/bestellung)
- INGENIEURTECHNISCHER VERBAND ALTLASTEN E.V. (ITVA) (1997): Sanierungsuntersuchung. ITVA-Arbeitshilfe H1-5/97.- ITVA e.V., Berlin; <http://www.itv-altlasten.de/139.0.html>
- INGENIEURTECHNISCHER VERBAND ALTLASTEN E.V. (ITVA) (1998): Grundwasserreinigung. ITVA-Arbeitshilfe H1-9/98.- ITVA e.V., Berlin; <http://www.itv-altlasten.de/144.0.html>
- INGENIEURTECHNISCHER VERBAND ALTLASTEN E.V. (ITVA) (1999): Hydraulische Maßnahmen. ITVA-Arbeitshilfe H1-10/99.- ITVA e.V., Berlin; <http://www.itv-altlasten.de/146.0.html>
- INGENIEURTECHNISCHER VERBAND ALTLASTEN E.V. (ITVA) (2004): Monitored Natural Attenuation. ITVA-Arbeitshilfe H1-12/04.- ITVA e.V., Berlin; <http://www.itv-altlasten.de/154.0.html>
- INGENIEURTECHNISCHER VERBAND FÜR ALTLASTENMANAGEMENT UND FLÄCHENRECYCLING E.V. (ITVA) (2010): Innovative In-situ-Verfahren. ITVA-Arbeitshilfe H1-14/10.- ITVA e.V., Berlin
- ITRC (Interstate Technology & Regulatory Council) (2006): Above Ground Treatment Technologies. RPO-4.- Washington, D.C.: Interstate Technology & Regulatory Council, Remediation Process Optimization Team. [www.itrcweb.org](http://www.itrcweb.org)
- KIRFEL, N. & ALTENBOCKUM, M. (2010): Datenanalyse, Risiko- und Potentialabschätzung zur Vermeidung von Verblockung und Verockerungen bei Grundwassersanierungsanlagen zur Aufbereitung altlastenrelevanter Grundwasserschäden.- In: Franzius, V., Altenbockum, M. & Gerhold, Th. [Hrsg.]: Handbuch Altlastensanierung und Flächenmanagement (HdA), 61. Aktualisierung, 3. Auflage. C.F. Müller

- KURZMANN, G. E. (1993): Ozonanwendung in der Wasseraufbereitung. Kontakt & Studium Bd. 118 , 2. Auflage, expert-Verlag, Ehningen
- LANDESAMT FÜR NATUR, UMWELT UND VERBRAUCHERSCHUTZ NORDRHEIN-WESTFALEN (LANUV NRW) (2011): Verbreitung von PFT in der Umwelt. Ursachen, Ergebnisse, Maßnahmen. – LANUV-Fachbericht 34, LANUV NRW, Recklinghausen
- LANDESANSTALT FÜR UMWELTSCHUTZ BADEN-WÜRTTEMBERG (1995): Grundwasseraufbereitung bei der Bearbeitung von Altlasten und Schadensfällen Handbuch Altlasten und Grundwasserschadensfälle, Bd. 17. Fachdokumente online; <http://www.lubw.baden-wuerttemberg.de/servlet/is/16793/>
- LANDESUMWELTAMT NORDRHEIN WESTFALEN (LUA NRW ) (2005): Leistungsbuch Altlastensanierung und Flächenentwicklung 2004/2005. Materialien zur Altlastensanierung und zum Bodenschutz, Band 20. LUA NRW, Essen
- METCALF & EDDY, INC. (2003): Wastewater Engineering: Treatment and Reuse.- Fourth Edition, revised, Mc Graw-Hill series in civil and environmental engineering
- MUTSCHMANN, J. & STIMMELMAYR, F. (2011): Taschenbuch der Wasserversorgung.- 15. vollst. überarb. und aktual. Aufl., 15. Auflage. Vieweg+Teubner Verlag, Wiesbaden
- NEUMANN, ST. (2010): Kreislaufanlagen-Wasserrecycling mit Ionenaustauschern,, Löhnberger Abwassertage
- NICOLE (2012): How to implement Sustainable Remediation in a Contaminated Land Management Project? NICOLE Sustainable Remediation Work Group 2012 Report. <http://www.nicole.org>
- NICOLE Roadmap for Sustainable Remediation. – <http://www.nicole.org>
- NYER, E.K. [ed.] (2009): Groundwater Treatment Technology.- 3rd ed. (Wiley).
- PATAT, F. & KIRCHNER, K. (1985): Praktikum der Technischen Chemie,- 4. Auflage Walter de Gruyter, Berlin New York
- PUTSCHER, M. & DIEFENBACH, G. (1996): Praxisbezogene Entwässerungstechnik. Rückhalten schädlicher Stoffe Teil 1 – Leichtflüssigkeitsabscheider.- IKZ-HAUSTECHNIK, Ausgabe 7/1996, Seite 114 ff.
- RIPPEN, G.: Umweltchemikalien. CD-ROM. Landsberg: ecomed. Erstausgabe 12/98. Stand 25. Aktualisierung 11/2011
- ROHM AND HAAS (2008): Ionenaustausch für Laien – Eine Einführung.- [http://www.wallner-wasser.at/de/downloads/IX\\_fuer\\_Laien.pdf](http://www.wallner-wasser.at/de/downloads/IX_fuer_Laien.pdf)
- SCHRENK, V. (2005): Ökobilanzen zur Bewertung von Altlastensanierungsmaßnahmen.- Mitteilungen des Instituts für Wasserbau, Universität Stuttgart, Heft 141
- SLENDERS, H. (2011): NICOLE'S view on Sustainable Remediation. - DECHEMA-Symposium „Strategien zur Grundwassersanierung“ (21. - 22. November 2011 Frankfurt am Main), Editor: DECHEMA Frankfurt, Eigenverlag, DECHEMA, 11/2011.
- SONTHEIMER, H., FRICK, B. R., FETTIG, J., HÖRNER, G., HUBELE, C. & ZIMMER, G. (1985): Adsorptionsverfahren in der Wasserreinigung. DVGW-Forschungsstelle am Bunte-Engler-Institut der Universität Karlsruhe, Karlsruhe
- TOUSSAINT, B.; REHNER, G., HELD, TH. (1998): Sanierung von Grundwasserschäden – Defizite der Grundwassererkundung – Möglichkeiten und Grenzen konventioneller und neuer Sanierungsverfahren-, Kontakt & Studium Bd. 563, 1. Auflage, Expert-Verlag, Renningen
- UNITED STATES ENVIRONMENTAL AGENCY (US-EPA) (2009): Principles for Greener Cleanups; <http://www.epa.gov/oswer/greenercleanups/principles.html>
- UNITED STATES ENVIRONMENTAL AGENCY (US-EPA): Green Remediation Focus.- <http://www.clu-in.org/greenremediation>
- VAUCK, W. R. A., MÜLLER, H. A. (2000): Grundoperationen chemischer Verfahrenstechnik.- 11., überarb. u. erw. Aufl., Wiley-VCH, Darmstadt

- VEGTER, J., LOWE, J. & KASAMAS, H. (Eds.) (2002): Sustainable Management of Contaminated Land: An Overview.- Report Austrian Federal Agency 2002 on behalf of CLARINET;  
[http://www.commonforum.eu/publications\\_clarinet.asp](http://www.commonforum.eu/publications_clarinet.asp)
- VEOLIA WATER Solutions & Technologies [Hrsg] (2009): VEOLIA Handbuch Wasser.- Verfahrenstechnologien der Aufbereitung.- 10. Auflage, (vormals WABAG Handbuch Wasser), Vulkan Verlag, Essen
- VHV Versicherungen (2009):  
<http://www.bak.de/userfiles/bak/HOAI/hoai%20synopse%202009%202002.pdf>: Synopse HOAI 2002 – HOAI 2009, S. 146
- VON KIENTLE, H. VON & BÄDER, E. (1980): Aktivkohle und ihre industrielle Anwendung,- Ferdinand-Enke Verlag, Stuttgart
- WERNER, P., BÖRKE, P. & HÜSERS, N. (2008): Natürliche Schadstoffminderung bei Teeröfaltlasten – Gaswerke, Kokereien, Teerverarbeitung, (Holz-)Imprägnierung, im BMBF-Förderschwerpunkt KORA.- Schriftenreihe des Institutes für Abfallwirtschaft und Altlasten, Technische Universität Dresden, Bd. 58 (KORA-TV-2-Leitfaden); [www.natural-attenuation.de/bestellung](http://www.natural-attenuation.de/bestellung)
- WETTER, C. & BRÜGGING, E. (2004): PIUS – Optimierung der innerbetrieblichen Energienutzung einer Bäckerei und Verbesserung der Reinigungsleistung der Pflanzenkläranlage, FH-Münster;  
[https://en.fh-muenster.de/fb4/fue/fue\\_gebiete/energetische\\_und\\_stoffliche\\_optimierung\\_von\\_kmu/optimierung\\_der\\_pflanzenklaeranlage.php](https://en.fh-muenster.de/fb4/fue/fue_gebiete/energetische_und_stoffliche_optimierung_von_kmu/optimierung_der_pflanzenklaeranlage.php)
- WILHELM, S. (2008): Wasseraufbereitung. Chemie und chemische Verfahrenstechnik.- 7., aktualisierte und ergänzte Auflage, Springer Verlag, Berlin Heidelberg

## Normen

- DIN 18299 VOB Vergabe- und Vertragsordnung für Bauleistungen – Teil C: Allgemeine Technische Vertragsbedingungen für Bauleistungen (ATV) – Allgemeine Regelungen für Bauarbeiten jeder Art.
- DIN EN 858-1:2005-02 (D) - Abscheideranlagen für Leichtflüssigkeiten (z.B. Öl und Benzin) - Teil 1: Bau-, Funktions- und Prüfgrundsätze, Kennzeichnung und Güteüberwachung; Deutsche Fassung EN 858-1:2002 + A1:2004
- DIN EN 858-2:2003-10 (D) Abscheideranlagen für Leichtflüssigkeiten (z.B. Öl und Benzin) - Teil 2: Wahl der Nenngröße, Einbau, Betrieb und Wartung; Deutsche Fassung EN 858-2:2003.- Beuth Verlag GmbH, Berlin
- DIN 1999-100:2003-10 (D) Abscheideranlagen für Leichtflüssigkeiten- Teil 100: Anforderungen für die Anwendung von Abscheideranlagen nach DIN EN 858-1 und DIN EN 858-2.- Beuth Verlag GmbH, Berlin
- DIN EN 45020:2007-03 (D) Normung und damit zusammenhängende Tätigkeiten - Allgemeine Begriffe (ISO/IEC Guide 2:2004); Dreisprachige Fassung EN 45020:2006.- Beuth Verlag GmbH, Berlin
- E-DIN ISO 11504: 2010-12 Bodenbeschaffenheit – Beurteilung der Wirkung von und mit Mineralölkohlenwasserstoffen verunreinigten Böden.- Beuth Verlag GmbH, Berlin.
- DIN 38409-6 (D):1986-01 Deutsche Einheitsverfahren zur Wasser-, Abwasser- und Schlammuntersuchung; Summarische Wirkungs- und Stoffkenngrößen (Gruppe H); Härte eines Wassers (H 6) .- Beuth Verlag GmbH, Berlin

## Gesetze und Verordnungen

- Arbeitsschutzgesetz (ArbSchG) vom 7. August 1996 (BGBl. I S. 1246), das zuletzt durch Artikel 15 Absatz 89 des Gesetzes vom 5. Februar 2009 (BGBl. I S. 160) geändert worden ist
- Baugesetzbuch (BauGB) - Baugesetzbuch in der Fassung der Bekanntmachung vom 23. September 2004 (BGBl. I S. 2414), das zuletzt durch Artikel 1 des Gesetzes vom 22. Juli 2011 (BGBl. I S. 1509) geändert worden ist
- Bekanntmachung der Neufassung der Abwasserverordnung vom 17. Juni 2004 (BGBl. I S.1108, 2625), die zuletzt durch Artikel 5 Absatz 8 des Gesetzes vom 24. Februar 2021 (BGBl. I S. 212) geändert worden ist
- Betriebssicherheitsverordnung (BetrSichV) vom 27. September 2002 (BGBl. I S. 3777), die zuletzt durch Artikel 5 des Gesetzes vom 8. November 2011 (BGBl. I S. 2178) geändert worden ist"
- Bundes-Bodenschutz- und Altlastenverordnung (BBodSchV) vom 12. Juli 1999 (BGBl. I S. 1554), die zuletzt durch Artikel 5 Absatz 31 des Gesetzes vom 24. Februar 2012 (BGBl. I S. 212) geändert worden ist
- Bundes-Bodenschutzgesetz (BBodSchG) vom 17. März 1998 (BGBl. I S. 502), das zuletzt durch Artikel 5 Absatz 30 des Gesetzes vom 24. Februar 2012 (BGBl. I S. 212) geändert worden ist
- Bundes-Immissionsschutzgesetz (BImSchG) in der Fassung der Bekanntmachung vom 26. September 2002 (BGBl. I S. 3830), das zuletzt durch Artikel 2 des Gesetzes vom 24. Februar 2012 (BGBl. I S. 212) geändert worden ist
- Chemikalien-Verbotsverordnung in der Fassung der Bekanntmachung vom 13. Juni 2003 (BGBl. I S. 867), die zuletzt durch Artikel 5 Absatz 40 des Gesetzes vom 24. Februar 2012 (BGBl. I S. 212) geändert worden ist
- Elfte Verordnung zur Änderung chemikalienrechtlicher Verordnungen vom 12. Oktober 2007 (BGBl. I Nr 52 S. 2382)
- Erste Allgemeine Verwaltungsvorschrift zum Bundes-Immissionsschutzgesetz (Technische Anleitung zur Reinhaltung der Luft – TA Luft) vom 24.7.2002, GMBI 2002, H. 25-29, S. 511 – 605 vom 30.7.2002
- Geräte- und Produktsicherheitsgesetz (GPSG) vom 6. Januar 2004 (BGBl. I S. 2 (219)), zuletzt geändert durch Artikel 3 Abs. 33 des Gesetzes vom 7. Juli 2005 (BGBl. I S. 1970)



- Gesetz zur Umsetzung der UVP-Änderungsrichtlinie, der IVU-Richtlinie und weiterer EG-Richtlinien zum Umweltschutz vom 27.7.2001 (BGBl. Nr. 40 vom 2.8.2001, S. 1950 – 2021)
- Honorarordnung für Architekten und Ingenieure (HOAI) vom 11. August 2009 (BGBl. I S. 2732)
- Honorarordnung für Architekten und Ingenieure (HOAI) vom 17. September 1976 (BGBl. I S. 2805) in der Fassung des Gesetzes zur Umstellung von Gesetzen und Verordnungen im Zuständigkeitsbereich des Bundesministeriums für Wirtschaft und Technologie sowie des Bundesministeriums für Bildung und Forschung auf Euro (Neuntes Euro-Einführungsgesetz) vom 10. November 2001 (BGBl. I S. 2992)
- Interpretation des in der Maschinenverordnung bzw. EG-Maschinenrichtlinie 2006/42/EG benutzten Begriffes „Gesamtheit von Maschinen“ vom 5. Mai 2011, GMBI. 2011 Nr. 12
- Kreislaufwirtschaftsgesetz (KrWG) vom 24.02.2012 (BGBl. I S. 212)
- Neunte Verordnung zum Produktsicherheitsgesetz (Maschinenverordnung) (9. ProdSV) vom 12. Mai 1993 (BGBl. I S. 704), die zuletzt durch Artikel 19 des Gesetzes vom 8. November 2011 (BGBl. I S. 2178) geändert worden ist
- RICHTLINIE 2006/122/EG DES EUROPÄISCHEN PARLAMENTS UND DES RATES vom 12. Dezember 2006 zur dreißigsten Änderung der Richtlinie 76/769/EWG des Rates zur Angleichung der Rechts- und Verwaltungsvorschriften der Mitgliedstaaten für Beschränkungen des Inverkehrbringens und der Verwendung gewisser gefährlicher Stoffe und Zubereitungen (Perfluorooctansulfonate)
- RICHTLINIE 2006/42/EG DES EUROPÄISCHEN PARLAMENTS UND DES RATES vom 17. Mai 2006 über Maschinen und zur Änderung der Richtlinie 95/16/EG (Neufassung)
- RICHTLINIE 2008/1/EG DES EUROPÄISCHEN PARLAMENTS UND DES RATES vom 15. Januar 2008 über die integrierte Vermeidung und Verminderung der Umweltverschmutzung, ABI L 24 vom 29.01.2008, S. 9
- RICHTLINIE 2010/75/EU DES EUROPÄISCHEN PARLAMENTS UND DES RATES vom 24. November 2010 über Industrieemissionen (integrierte Vermeidung und Verminderung der Umweltverschmutzung) (Neufassung), ABI. L 334 vom 17.12.2010, S. 17
- RICHTLINIE 96/61/EG DES RATES vom 24. September 1996 über die integrierte Vermeidung und Verminderung der Umweltverschmutzung, ABI. L 257 vom 10.10.1996, S. 26
- Sechste Allgemeine Verwaltungsvorschrift zum Bundes-Immissionsschutzgesetz (Technische Anleitung zum Schutz gegen Lärm – TA Lärm)
- Vergabeordnung für freiberufliche Leistungen – VOF – Ausgabe 2009 vom 18. November 2009 (BAnz. Nr. 185a vom 8. Dezember 2009)
- Verordnung zum Schutz vor Gefahrstoffen (Gefahrstoffverordnung (GefStoffV) vom 26. November 2010 (BGBl. I S. 1643, 1644), die durch Artikel 2 des Gesetzes vom 28. Juli 2011 (BGBl. I S. 1622) geändert worden ist
- Wasserhaushaltsgesetz (WHG) vom 31. Juli 2009 (BGBl. I S. 2585), das zuletzt durch Artikel 5 Absatz 9 des Gesetzes vom 24. Februar 2012 (BGBl. I S. 212) geändert worden ist

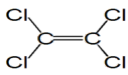
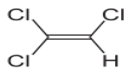
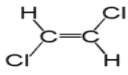
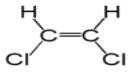
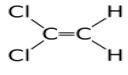
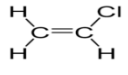
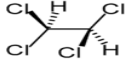
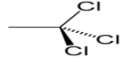
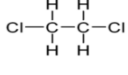
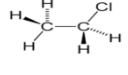
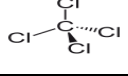
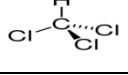
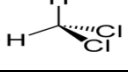
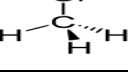
**Internetquellen**

<http://www.aco.com>  
<http://www.altenbockum.de>  
<http://www.bdz-abwasser.de>  
<http://www.brunsumwelttechnik.de>  
<http://www.clu-in.org/greenremediation>  
[http://www.commonforum.eu/publications\\_clarinet.asp](http://www.commonforum.eu/publications_clarinet.asp)  
<http://www.delta-ec.de>  
<http://www.dmdehydrat.ch>  
<http://www.donau-carbon.com>  
<http://www.ekof.de>  
<http://www.eneotech.de>  
<http://www.envirochemie.de>  
<http://www.envirodts.de>  
<http://www.epa.gov/oppt>: EPA's Office of Pollution Prevention Toxics and Syracuse Research Cooper  
<http://www.fachdokumente.lubw.baden-wuerttemberg.de/servlet/is/5121/>: Fachdokumente online  
<http://www.flottweg.com>  
<http://www.fumatech.com>  
<http://www.globalchemmade.com>  
<http://www.ibl-umweltfactory.de>  
<http://www.iuv.uni-bremen.de>  
<http://www.kaldnes.com>  
<http://www.krausse-filtration.de>  
<http://www.kroftaengineering.com>  
<http://www.krugerkaldnes.no/no/>  
<http://www.lmbv.de>  
<http://www.mpp-systems.eu>  
<http://www.nordic-water.de>  
<http://www.prantner.de>  
<http://www.redox-wt.nl>  
<http://www.sanying.com>  
<http://www.veoliawater.com>  
<http://www.vwsmppsystems.com>  
<http://www.wallner-wasser.at>  
[http://www.wasseraufbereitungsseiten.de/enteisenerung\\_faq.htm](http://www.wasseraufbereitungsseiten.de/enteisenerung_faq.htm)  
[http://www.wasseraufbereitungsseiten.de/nitratentfernung\\_faq.htm](http://www.wasseraufbereitungsseiten.de/nitratentfernung_faq.htm)  
<http://www.wasser-wissen.de>  
<http://www.wet-gmbh.com>  
<http://www.wvg-muehlbach.de>

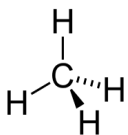
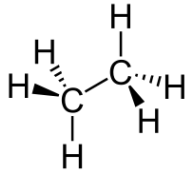
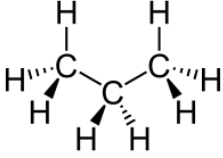
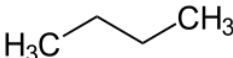
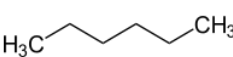
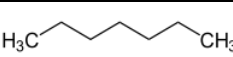
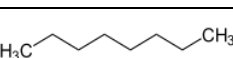
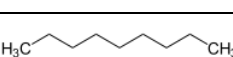
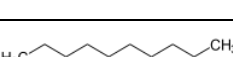
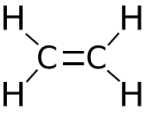
## Anhang

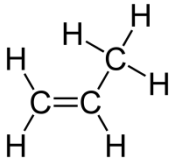
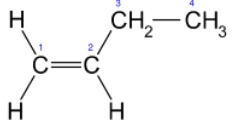
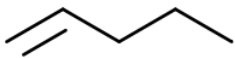
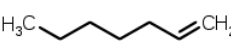
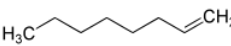
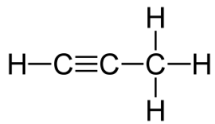
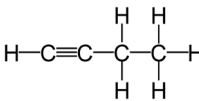
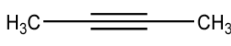
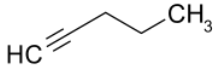
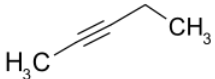
- Anhang 1: Chemisch-physikalische Stoffeigenschaften relevanter LCKW
- Anhang 2: Chemisch-physikalische Stoffeigenschaften ausgesuchter Mineralölkohlenwasserstoffe (MKW)
- Anhang 3: Chemisch-physikalische Stoffeigenschaften monoaromatischer Verbindungen (BTEX)
- Anhang 4: Chemisch-physikalische Stoffeigenschaften aromatischer Verbindungen (PAK) nach EPA
- Anhang 5: Chemisch-physikalische Stoffeigenschaften perfluorierter Tenside (PFT)

**Anhang 1: Chemisch-physikalische Stoffeigenschaften relevanter LCKW**

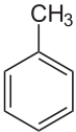
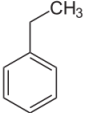
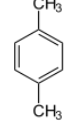
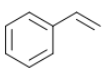
| Substanzen   | Name                            | Abkürzung    | Formel                                        | Strukturformel                                                                      | Dichte [g/cm <sup>3</sup> ] | Kinematische Viskosität [c S] | Wasserlöslichkeit [g/l] | H (20°C) [-] | H (10°C) [-] |
|--------------|---------------------------------|--------------|-----------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------|-------------------------------|-------------------------|--------------|--------------|
| Chlorethene  | Tetrachlorethen                 | PER/PCE      | C <sub>2</sub> Cl <sub>4</sub>                |    | 1,63                        | 0,54                          | 0,14                    | 0,57         | 0,36         |
|              | Trichlorethen                   | TRI/TCE      | C <sub>2</sub> HCl <sub>3</sub>               |    | 1,46                        | 0,39                          | 1,1                     | 0,34         | 0,21         |
|              | trans-1,2-Dichlorethen          | Trans (-DCE) | C <sub>2</sub> H <sub>2</sub> Cl <sub>2</sub> |    | 1,26                        | 0,32                          | 0,6                     | 0,35         | 0,25         |
|              | cis-1,2-Dichlorethen            | cis(-DCE)    | C <sub>2</sub> H <sub>2</sub> Cl <sub>2</sub> |    | 1,28                        | 0,38                          | 0,8                     | 0,144        | 0,116        |
|              | 1,1-Dichlorethen                | VDC          | C <sub>2</sub> H <sub>2</sub> Cl <sub>2</sub> |    | 1,25                        | -                             | -                       | 0,97         | 0,61         |
|              | Monochlorethen/<br>Vinylchlorid | VC           | C <sub>2</sub> H <sub>3</sub> Cl              |   | 0,91                        | -                             | 1,6                     | 0,90         | 0,64         |
| Chlorethane  | 1,1,2,2-Tetrachlorethan         | -            | C <sub>2</sub> H <sub>2</sub> Cl <sub>4</sub> |  | -                           | -                             | -                       | 0,0143       | 0,014        |
|              | 1,1,1-Trichlorethan             | 1,1,1-TCA    | C <sub>2</sub> H <sub>3</sub> Cl <sub>3</sub> |  | 1,35                        | 0,62                          | 0,87                    | 0,57         | 0,39         |
|              | 1,2-Dichlorethan                | 1,2-DCA      | C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> Cl <sub>2</sub> |  | 1,25                        | 0,67                          | 8,6                     | 0,047        | 0,05         |
|              | Chlorethan                      | CA           | C <sub>2</sub> H <sub>5</sub> Cl              |  | 0,92                        | -                             | 5,7                     | -            | -            |
| Chlormethane | Tetrachlormethan                | Tetra        | CCl <sub>4</sub>                              |  | 1,59                        | 0,61                          | 0,81                    | 0,93         | 0,60         |
|              | Trichlormethan                  | Chloroform   | CHCl <sub>3</sub>                             |  | 1,48                        | 0,38                          | 8,3                     | 0,127        | 0,07         |
|              | Dichlormethan                   | DCM          | CH <sub>2</sub> Cl <sub>2</sub>               |  | 1,33                        | 0,32                          | 17                      | 0,095        | 0,055        |
|              | Chlormethan                     | CM           | CH <sub>3</sub> Cl                            |  | 0,92                        | -                             | 7,2                     | -            | -            |

## Anhang 2: Chemisch-physikalische Stoffeigenschaften ausgesuchter Mineral- ölkohlenwasserstoffe (MKW)

| Name     | Formel                          | Strukturformel                                                                      | Dichte                          | Wasser-<br>löslichkeit        | H<br>(20°C)<br>[-]                                | H<br>(10°C)<br>[-] |
|----------|---------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------|-------------------------------|---------------------------------------------------|--------------------|
| Methan   | CH <sub>4</sub>                 |    | 0,667 kg/m <sup>3</sup>         | 26 ml/l                       | 30                                                | -                  |
| Ethan    | C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>   |    | 1,212 kg/m <sup>3</sup>         | 24 µl/g bei 20 °C             | Bei 25°C: 20                                      | -                  |
| Propan   | C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>   |   | 1,83 kg/m <sup>3</sup>          | 75 mg/l bei 20 °C             | 230<br>(berechnet);<br>bei 25°C: 29<br>(gemessen) | -                  |
| n-Butan  | C <sub>4</sub> H <sub>10</sub>  |  | 2,703 kg/m <sup>3</sup>         | 61 mg/l bei 20 °C             | -                                                 | -                  |
| n-Pentan | C <sub>5</sub> H <sub>12</sub>  |  | 0,626 g/cm <sup>3</sup>         | 40 mg/l bei 20 °C             | -                                                 | -                  |
| n-Hexan  | C <sub>6</sub> H <sub>14</sub>  |  | 0,659 g/cm <sup>3</sup>         | 50 mg/l bei 20 °C             | 57                                                | 10,2               |
| n-Heptan | C <sub>7</sub> H <sub>16</sub>  |  | 0,684 g/cm <sup>3</sup>         | 50 mg/l bei 20 °C             | -                                                 | -                  |
| n-Octan  | C <sub>8</sub> H <sub>18</sub>  |  | 0,718 g/cm <sup>3</sup>         | 0,7–2,5 mg/l bei 20 °C        | -                                                 | -                  |
| n-Nonan  | C <sub>9</sub> H <sub>20</sub>  |  | 0,733 g/cm <sup>3</sup>         | praktisch unlöslich in Wasser | 14                                                | 17                 |
| n-Decan  | C <sub>10</sub> H <sub>22</sub> |  | 0,73 g/cm <sup>3</sup>          | unlöslich in Wasser           | -                                                 | -                  |
| Ethen    | C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>   |  | 1,178 kg/m <sup>3</sup> (15 °C) | 130 mg/l                      | Bei 25°C: 8,7<br>(gemessen);<br>520 (berechnet)   |                    |

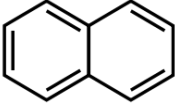
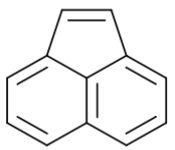
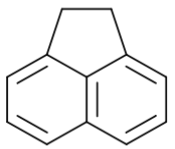
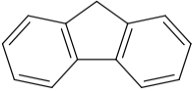
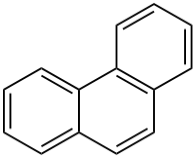
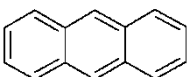
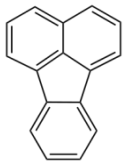
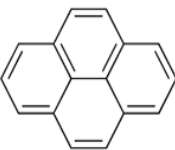
| Name     | Formel      | Strukturformel                                                                      | Dichte                                                   | Wasser-löslichkeit            | H (20°C) [-] | H (10°C) [-] |
|----------|-------------|-------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------|-------------------------------|--------------|--------------|
| Propen   | $C_3H_6$    |    | 1,91 kg/m <sup>3</sup><br>(0 °C, 1013 hPa)               | 384 mg/l, 20 °C, 0,1 MPa      | -            | -            |
| Buten    | $C_4H_8$    |    | 4,15 mol/l                                               | praktisch unlöslich in Wasser | -            | -            |
| Penten   | $C_5H_{10}$ |    |                                                          | unlöslich in Wasser           | -            | -            |
| 1-Hexen  | $C_6H_{12}$ |    | 0,67 g/cm <sup>3</sup>                                   | 50–100 mg/l bei 20 °C         | -            | -            |
| 1-Hepten | $C_7H_{14}$ |    | 0,697 g/cm <sup>3</sup>                                  | 20 mg/l bei 20 °C             | -            | -            |
| 1-Octen  | $C_8H_{16}$ |  | 0,72 g/cm <sup>3</sup>                                   | 4,1 mg/l bei 25 °C            | -            | -            |
| Ethin    | $C_2H_2$    | $H-C\equiv C-H$                                                                     | 1,18 g/l (0 °C, 1013 hPa)                                | 1,19 g/l bei 20 °C            | -            | -            |
| Propin   | $C_3H_4$    |  | 1,83 g/l (0 °C, 1013 hPa)                                | 3,07 g/l                      | -            | -            |
| 1-Butin  | $C_4H_6$    |  | 0,67 g/cm <sup>3</sup><br>(flüssige Phase am Siedepunkt) | 3,07 g/l                      | -            | -            |
| 2-Butin  | $C_4H_6$    |  | 0,69 g/cm <sup>3</sup><br>(20 °C)                        | unlöslich in Wasser           | -            | -            |
| 1-Pentin | $C_5H_8$    |  | 0,69 g/cm <sup>3</sup>                                   | 1,05 g/l                      | -            | -            |
| 2-Pentin | $C_5H_8$    |  | 0,71 g/cm <sup>3</sup>                                   | unlöslich in Wasser           | -            | -            |

### Anhang 3: Chemisch-physikalische Stoffeigenschaften monoaromatischer Verbindungen (BTEX)

| Name                                                | Formel                         | Strukturformel                                                                      | Dichte bei 20°C [g/cm³] | Dynamische Viskosität [mPa s] | Wasserlöslichkeit [g/l] | Sättigungskonzentration bei 20°C [g/m³] | Toxizität                                     | H (20°C) [-] | H (10°C) [-] |
|-----------------------------------------------------|--------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------|-------------------------------|-------------------------|-----------------------------------------|-----------------------------------------------|--------------|--------------|
| Benzol (Benzene)                                    | C <sub>6</sub> H <sub>6</sub>  |    | 0,87865                 | bei 20°C: 0,65                | bei 20-30°C: 1,76       | 320                                     | Mutagene und karzinogene Wirkungen (Leukämie) | 0,196        | 0,129        |
| Methylbenzol (Toluol, Phenylmethan)                 | C <sub>7</sub> H <sub>8</sub>  |    | 0,87                    | -                             | bei 20°C: 0,47          | -                                       | -                                             | 0,22         | 0,16         |
| Ethylbenzol (Ethylbenzen; Äthylbenzol; Phenylethan) | C <sub>8</sub> H <sub>10</sub> |    | 0,8670                  | bei 17°C 0,691                | bei 20-25°C: 0,17       | 41                                      | Gefahr der Hautresorption                     | 0,24         | 0,14         |
| O-Xylol (1,2-Dimethylbenzol)                        | C <sub>8</sub> H <sub>10</sub> |  | 0,8802                  | bei 20 °C: 0,810              | bei 20°C: 0,175         | 29                                      | Gefahr der Hautresorption                     | 0,167        | 0,123        |
| m-Xylol (1,3-Dimethylbenzol)                        | C <sub>8</sub> H <sub>10</sub> |  | 0,8642                  | bei 20 °C: 0,62               | bei 20-25°C: 0,16       | 35                                      | Gefahr der Hautresorption                     | 0,22         | 0,177        |
| P-Xylol (1,4-Dimethylbenzol)                        | C <sub>8</sub> H <sub>10</sub> |  | -                       | -                             | -                       | -                                       | -                                             | 0,21         | 0,181        |
| Styrol                                              | C <sub>8</sub> H <sub>8</sub>  |  | 0,9059                  | -                             | bei 20°C: 0,30          | 27                                      | Gefahr der Hautresorption                     | 0,09         | -            |
| Isopropylbenzol (Cumol; Cumen)                      | C <sub>9</sub> H <sub>12</sub> |  | 0,8618                  | -                             | bei 15-25°C: 0,057      | 21                                      | Gefahr der Hautresorption                     | -            | -            |



## Anhang 4: Chemisch-physikalische Stoffeigenschaften aromatischer Verbindungen (PAK) nach EPA

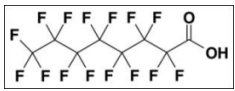
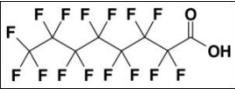
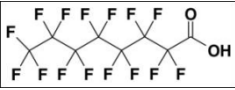
| Name          | Formel         | Strukturformel                                                                      | Wasser-löslichkeit bei 25°C [mg/l] | Toxizität/ Karzeno-genität/ Mutagenität | Toxi-zitäts-äquivalenz-faktoren (TEF) | H (20°C) [-]     | H (10°C) [-]      |
|---------------|----------------|-------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------|-----------------------------------------|---------------------------------------|------------------|-------------------|
| Naphthalin    | $C_{10}H_8$    |    | 32                                 | +/?/(-)                                 | 0,001                                 | 0,017            | -                 |
| Acenaphthylen | $C_{12}H_8$    |    | 4                                  | +/?/(-)                                 | 0,001                                 | -                | -                 |
| Acenaphthen   | $C_{12}H_{10}$ |    | 4                                  | +/?/+                                   | 0,001                                 | Bei 18°C: 0,0045 | Bei 11°C: 0,0027  |
| Fluoren       | $C_{13}H_{10}$ |  | 2                                  | +/?/?                                   | 0,001                                 | Bei 18°C: 0,0025 | Bei 11°C: 0,00150 |
| Phenanthren   | $C_{14}H_{10}$ |  | 1                                  | +/?/?                                   | 0,001                                 | 0,00119          | Bei 11°C: 0,00068 |
| Anthracen     | $C_{14}H_{10}$ |  | 1,5                                | +/-/-                                   | 0,01                                  | 0,00075          | Bei 11°C: 0,0009  |
| Fluoranthren  | $C_{16}H_{10}$ |  | 0,2                                | +/?/(+)                                 | 0,001                                 | 0,00036          | Bei 11°C: 0,00037 |
| Pyren         | $C_{16}H_{10}$ |  | 0,15                               | +/?/-                                   | 0,001                                 | 0,00050          | Bei 11°C: 0,00029 |

| Name                       | Formel         | Strukturformel | Wasser-<br>löslichkeit<br>bei 25°C<br>[mg/l] | Toxizität/<br>Karzeno-<br>genität/<br>Mutagenität | Toxi-zitäts-<br>äquivalenz-<br>faktoren<br>(TEF) | H<br>(20°C)<br>[-]    | H<br>(10°C)<br>[-]    |
|----------------------------|----------------|----------------|----------------------------------------------|---------------------------------------------------|--------------------------------------------------|-----------------------|-----------------------|
| Benzo(a)-an-<br>thracen    | $C_{18}H_{12}$ |                | 0,05                                         | +/+                                               | 0,1                                              | Bei 18°C:<br>0,00026  | Bei 11°C:<br>0,000131 |
| Chrysen                    | $C_{18}H_{12}$ |                | 0,005                                        | +/+                                               | 0,01                                             | -                     | -                     |
| Benzo(a)-pyren             | $C_{20}H_{12}$ |                | 0,01                                         | +/+                                               | 1                                                | 0,0139 *<br>$10^{-9}$ | -                     |
| Benzo(b)-fluor-<br>anthen  | $C_{20}H_{12}$ |                | 0,001                                        | +/+                                               | 0,1                                              | -                     | -                     |
| Benzo(k)-fluor-<br>anthen  | $C_{20}H_{12}$ |                | 0,01                                         | +/+                                               | 0,1                                              | -                     | -                     |
| Dibenzo(a,h)-<br>anthracen | $C_{22}H_{14}$ |                | >>0,001                                      | +/+                                               | 5*/1**                                           | 0,59 *<br>$10^{-6}$   | -                     |
| Indeno(1,2,3-<br>c,d)pyren | $C_{22}H_{12}$ |                | 0,06                                         | +/?                                               | 0,1                                              | -                     | -                     |
| Benz-ghi-perylen           | $C_{22}H_{12}$ |                | >>0,001                                      | +/?                                               | 0,01                                             | -                     | -                     |

**Zeichenerklärung:**

- + Wirkung ist nachgewiesen  
 ? Datenlage unzureichend oder nicht aussagekräftig, Wirkung unbekannt  
 () tendenzielle Wirkung, keine eindeutigen Ergebnisse  
 \* bei normalen Umweltbedingungen  
 - Wirkung wurde nicht nachgewiesen  
 \*\* bei hoher Konzentration

## Anhang 5: Chemisch-physikalische Stoffeigenschaften perfluorierter Tenside (PFT)

| Name     | Formel                                           | Strukturformel                                                                    | Wasser-<br>löslichkeit<br>[g/l] | Dampfdruck<br>[Pa]     | H<br>[atm*m <sup>3</sup> *mol <sup>-1</sup> ] | Log Kow          |
|----------|--------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------|------------------------|-----------------------------------------------|------------------|
| PFOA     | C <sub>8</sub> HF <sub>15</sub> O <sub>2</sub>   |  | 3,4 – 9,5                       | 70                     | 4,6 * 10 <sup>-6</sup>                        | Nicht bestimmbar |
| PFOS     | C <sub>8</sub> HF <sub>17</sub> O <sub>3</sub> S |  | 0,52                            | 3,3 * 10 <sup>-9</sup> | 3,4 * 10 <sup>-1</sup>                        | Nicht bestimmbar |
| 8:2 FTOH | C <sub>10</sub> H <sub>5</sub> F <sub>17</sub> O |  | 1,5 * 10 <sup>-4</sup>          | 212                    | 9,6 * 10 <sup>-2</sup>                        | -                |