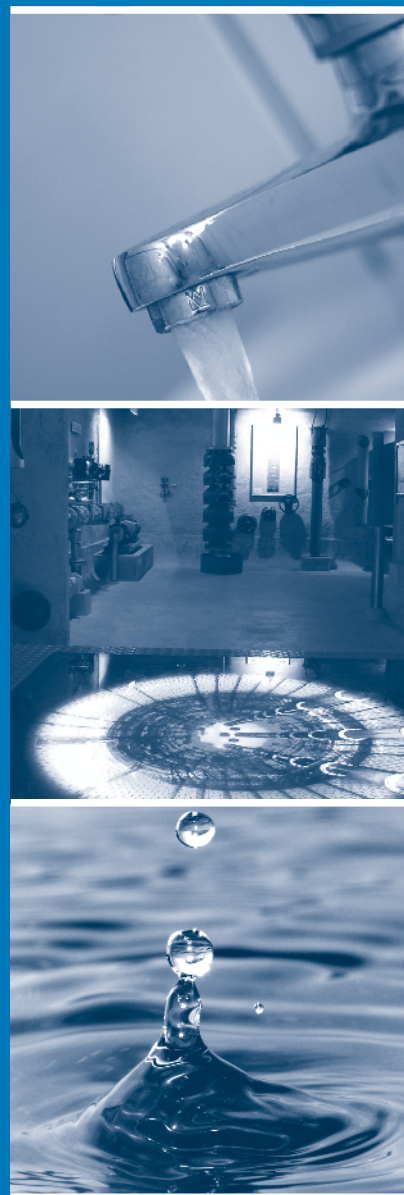


# Anerkannte Aufbereitungsverfahren für Trinkwasser



Schweizerische Eidgenossenschaft  
Confédération suisse  
Confederazione Svizzera  
Confederaziun svizra

Eidgenössisches Departement des Innern EDI  
**Bundesamt für Gesundheit BAG**



# Anerkannte Aufbereitungsverfahren für Trinkwasser

## Inhaltsverzeichnis

<b>1. Vorwort</b>	<b>2</b>
<b>2. Einleitung</b>	<b>3</b>
Evaluation der Gefährdungsquellen im Einzugsgebiet	3
Einfluss der Rohwasserqualität	3
Auswertung bestehender Daten	7
Messkampagne	7
Chemisch-physikalischer sowie mikrobiologischer Beschrieb des Rohwassers	8
Wasserbedarf und Wasserdargebot	8
Labortests und Pilotierung von Aufbereitungsanlagen	8
<b>3. Mikroorganismen</b>	<b>10</b>
Einleitung	10
Bakterien	10
Viren	12
Protozoen	14
Vergleich der Verfahren	15
<b>4. Wasserinhaltsstoffe</b>	<b>17</b>
Einleitung	17
Haupt- und Nebenbestandteile	17
Natürliche und synthetische, organische Verbindungen	25
<b>5. Verfahren in der Trinkwasseraufbereitung</b>	<b>34</b>
Einleitung	34
Vorbehandlung	36
Filtration	41
Desinfektion/Oxidation	50
Weitere Verfahren in der Trinkwasseraufbereitung	68
Verfahrenskombination	72
<b>6. Überwachungsmethoden</b>	<b>75</b>
Chlor	75
Chlordioxid	75
Leitfähigkeit	76
Ozon	76
Partikel	76
pH-Wert	77
Sauerstoff	77
UV-Absorption/Transmission	77
Trübung	78
<b>7. Kriterien für die Einführung neuer Verfahren</b>	<b>79</b>
Spurenstoffe	81
Mikroorganismen	84
<b>8. Gesetzliche Grundlagen</b>	<b>86</b>
1. Trinkwassergesetzgebung in der Schweiz	86
1.1 Anforderungen an das Trinkwasser	86
1.2 Anforderungen an die Trinkwasserproduktion	87
1.3 Anforderungen an das Trinkwasser in einer Notlage	87
2. Auszüge aus den gesetzlichen Grundlagen für die Trinkwasserversorgung	87
<b>9. Glossar</b>	<b>95</b>
<b>10. Literaturverzeichnis</b>	<b>100</b>
<b>11. Hinweis</b>	<b>104</b>

# 1. Vorwort

An die Qualität von Trinkwasser werden sehr hohe Anforderungen gestellt. Das Rohwasser aus Grundwasser und Oberflächengewässern kann diese mikrobiologischen und chemischen Anforderungen nicht jederzeit erfüllen, weshalb das Wasser vor dem Konsum aufbereitet werden muss. Die Wahl des geeignetsten Verfahrens stellt die Verantwortlichen in den Wasserversorgungen, die beratenden Ingenieurbüros und die Kantone jedoch oft vor Schwierigkeiten, da mehrere Möglichkeiten der Aufbereitung vorhanden sind, die allerdings alle Vor- und Nachteile haben. In der Praxis kommt es daher trotz der vorhandenen Trinkwasseraufbereitung immer wieder zur Überschreitung von Toleranzwerten, insbesondere von Mikroorganismen im Trinkwassernetz.

Die Vollzugshilfe zeigt auf, welches Verfahren zur Elimination von bestimmten chemischen Stoffen oder Stoffgruppen und von Mikroorganismen am besten angewendet wird, welche Voraussetzungen bezüglich Rohwasserqualität gegeben sein müssen, um ein bestimmtes Verfahren sinnvollerweise anwenden zu können, und wie die Aufbereitungsanlage überwacht werden soll. Die Planung von neuen Trinkwasseraufbereitungsanlagen kann damit verbessert und bestehende Anlagen können auf ihre Betriebstauglichkeit überprüft werden. Zudem kann die Selbstkontrolle den anlagespezifischen Risiken optimaler angepasst werden. Das Zielpublikum der Broschüre sind Betreiber von Wasserversorgungen, Ingenieurbüros und die kantonalen Fachstellen.

Die Vollzugshilfe wurde unter der Leitung des BAG in enger Zusammenarbeit mit Spezialisten für Fragen der Trinkwasseraufbereitung an der Eawag erarbeitet. Wir hoffen, dass die Vollzugshilfe rege benutzt und dadurch die Trinkwasserqualität weiter verbessert und der Vollzug in den Kantonen vereinheitlicht wird.

Bundesamt für Gesundheit  
Michael Beer

## 2. Einleitung

Das oberste Ziel einer Wasserversorgung - die Herstellung eines qualitativ hochstehenden Trinkwassers - stellt hohe Anforderungen an die Planung und den Betrieb der entsprechenden Anlagen. Die Evaluation geeigneter Verfahren zur Aufbereitung von Grundwasser oder Oberflächenwasser zu Trinkwasser erfordert detaillierte Kenntnisse über die Einflüsse im Einzugsgebiet der Fassung, die Herkunft und die Eigenschaften des Rohwassers und den Wasserbedarf. Um eine verlässliche Entscheidungsgrundlage zu schaffen, müssen bestehende Daten ausgewertet und allenfalls neue, spezifische Datenerhebungen durchgeführt werden. Aufgrund dieser Daten werden die Reduktionsraten für Stoffe und Mikroorganismen festgelegt und die Anforderungen an die Aufbereitung klar beschrieben. Erst mit dieser Zielformulierung ist die Wahl der Verfahren und Methoden zur Aufbereitung möglich. Im Folgenden wird kurz auf die Faktoren eingegangen, welche bei der Evaluation geeigneter Verfahren berücksichtigt werden müssen.

### **Evaluation der Gefährdungsquellen im Einzugsgebiet**

Eine erste Voraussetzung, um eine Trinkwasseraufbereitungsanlage optimal an die Rohwasserqualität anzupassen, ist die Ausscheidung des Einzugsgebietes der Fassung nach hydrogeologischen Methoden. In Praxishilfen des Bundesamtes für Umwelt (BAFU) ist die Vorgehensweise dafür im Detail beschrieben.

Als mögliche Gefährdungsquellen sind sämtliche Faktoren im Einzugsgebiet zu berücksichtigen, welche die Qualität und Quantität des Rohwassers und damit die Art der Aufbereitung beeinflussen können. In Frage kommen mögliche Gefährdungen durch Verunreinigungen durch Altlasten, Abwasser,

Verkehr, Industrie und Landwirtschaft. Wie stark sich diese Gefährdungsquellen auf die Rohwasserqualität selbst auswirken, ist wesentlich abhängig von der Art der Wasserressource.

### **Einfluss der Rohwasserqualität**

In der Schweiz stammt das Rohwasser, welches zur Trinkwasseraufbereitung verwendet wird, aus Grundwasserleitern oder Oberflächengewässern und weist daher sehr unterschiedliche Zusammensetzungen und Eigenschaften auf. Die darin vorkommenden Inhaltsstoffe können unerwünschte Mikroorganismen und Krankheitserreger, partikuläre oder gelöste (an)organische Stoffe, gesundheitlich unbedenkliche Stoffe oder chemische Schadstoffe sein, welche entfernt, umgewandelt oder inaktiviert werden müssen. Für die Aufbereitung sind die Zusammensetzung und die Eigenschaften des verwendeten Rohwassers die entscheidenden Faktoren. Aufgrund der Kenntnis der Rohwasserherkunft können bereits erste Abschätzung und Aussagen über den Aufbereitungsaufwand sowie die Wahl der Aufbereitungsverfahren gemacht werden. Diese reichen von keiner Aufbereitung bei hochwertigem Grundwasser, über eine einfache Desinfektion, bis hin zur mehrstufigen Aufbereitungskette bei Oberflächenwasser oder oberflächlich beeinflusstem Grundwasser.

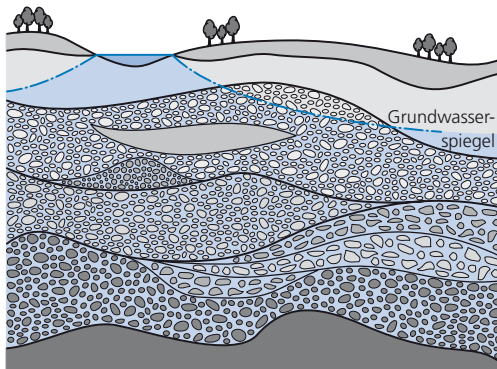
### **Lockergesteinsgrundwasser**

Lockergesteinsgrundwasserleiter bestehen aus Ablagerungen von losem Gesteinsmaterial unterschiedlicher Herkunft (fluviale Ablagerungen, Gletschermoränen, Schutttablagerungen aus Rutschungen oder Bergstürzen, etc.) mit variabler mineralischer Zusammensetzung. Sie zeichnen sich durch hohe Porosität, grosse Speicherkapazität und niedere Fliessgeschwindigkeiten aus.

*Rohwasser weist sehr unterschiedliche Zusammensetzungen auf*

*hohe Porosität, grosse Speicherkapazität, niedere Fliessgeschwindigkeiten*

## 2. Einleitung



**Abbildung 1: Lockergesteinsgrundwasserleiter.** Typisch sind die heterogenen Verhältnisse bezüglich Porosität, Fließgeschwindigkeit und mineralischer Zusammensetzung

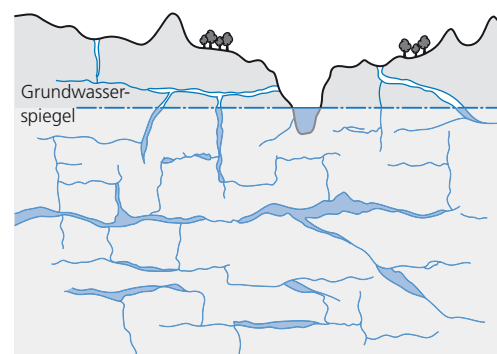
Im Lockergesteinsgrundwasser können sowohl oxidierende als auch reduzierende Verhältnisse herrschen, auch der pH-Wert hängt stark von den Bedingungen und der mineralischen Zusammensetzung des Lockergesteins ab. Lockergesteinsgrundwasserleiter sind sehr häufig von einer mehr oder weniger mächtigen, biologisch aktiven Bodenschicht überdeckt. Sie weisen somit ein hohes Adsorptions- und Rückhaltevermögen auf und verfügen über eine hohe Abbauleistung. Die hohe Filterleistung und die im Vergleich zu den anderen Grundwasserleitern langen Aufenthaltszeiten sorgen für geringe Trübung (meist  $\ll 2$  NTU), konstante chemische Qualität (pH, Temperatur, stoffliche Belastung, etc.) und eine geringe mikrobiologische Belastung. Lockergesteinsgrundwasserleiter sind zwar relativ gut geschützt gegen äussere Einflüsse, einmal aufgetretene Verunreinigungen können aber über lange Zeit bestehen und sind nur mit grossem Aufwand zu sanieren. Häufig liegen Lockergesteinsgrundwasserleiter in landwirtschaftlich stark genutzten Gebieten und sind damit anfällig auf erhöhte Nitrat- und Pestizidkonzentrationen. Eine weitere Gefährdung geht von Kanalisationen, Tankanlagen, Sickerwässern (Strassenabwasser, Luftschadstoffe, Tausalze, etc.) und Altlasten aus.

Eine Besonderheit bei den Lockergesteinsgrundwasserleitern sind die Grundwasserfassungen in der Nähe von Fließgewässern. Diese Fassungen können bei Hochwasser einen erhöhten Anteil an jungem, infiltrierendem Flusswasser mit einer sehr kurzen Aufenthaltszeit (Stunden bis Tage) fördern. Während dieser Zeit können Schadstoffe und Mikroorganismen in die Fassung gelangen. Bei der Beurteilung der Grund- und Trinkwasserqualität sind deshalb die herrschenden Witterungseinflüsse unbedingt zu berücksichtigen, was routinemässig in den meisten Wasserversorgungen jedoch nur selten gemacht wird. Für die Systembeschreibung genügt es nicht, nur eine Probe pro Hochwasserereignis zu nehmen. Vielmehr muss das Systemverhalten mit mehreren Probenahmen - unter Umständen alle paar Stunden - und verschiedenen Parametern untersucht werden.

### Karst- und Kluftgrundwasser

Karst- und Kluftgrundwasserleiter zeichnen sich durch ein dreidimensionales Netz von Rissen, Klüften, Spalten und Höhlen aus. Typisch ist ein duales Fließsystem mit grossen Bereichen in denen das Grundwasser langsam fliesst (Aufenthaltszeit von mehreren Wochen) und die eine gute Reinigungsleistung aufweisen. Daneben gibt es relativ

*duales Fließsystem*



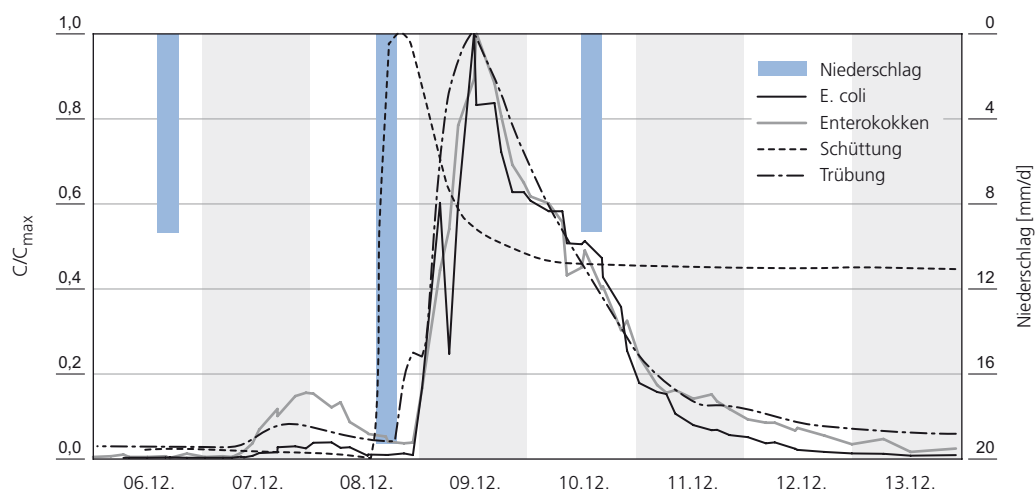
**Abbildung 2: Karstgrundwasserleiter mit dualem Fließsystem (langsamer Grundwasserfluss in feinen Rissen, schnelles Fließen in grossen Spalten und Klüften)**

kleine Bereiche, in denen schnelle Fließwege mit geringer Filterleistung ausgebildet sind.

In Trockenzeiten bestimmen hauptsächlich die langsamen Fließwege den Wasserfluss, während bei Regenereignissen oder bei der Schneeschmelze vor allem die schnellen Fließwege die Wasserqualität beeinflussen. Hinzu kommt, dass bei Karst- und Kluftsystemen die Infiltration durch den Boden gering oder sogar fehlend ist. Dadurch weisen Karst- und Kluftgrundwasserleiter ein geringes Adsorptions- und Rückhaltevermögen auf, wodurch Verdünnung oft die einzige Form der Reduktion von Schadstoffkonzentrationen ist. In der Regel herrschen in diesen Systemen aerobe Verhältnisse. Die mikrobiologische Belastung durch Landwirtschaft, Wildbestand oder Abwasser ist aufgrund der fehlenden Filterwirkung meist höher als in Lockergesteinsgrundwasser. Ebenso werden Kontaminationen durch Abfallablagerungen sowie durch land- und forstwirtschaftliche Aktivitäten (Pestizide, Düngemittel, Mineralöle, etc.) schnell ins System eingetragen und verbreitet. Karstgrundwasserleiter zeichnen sich vor allem durch eine schnelle Reaktion

auf Wetterereignisse aus (schneller Wasseranstieg, hohe Feststofffrachten, rascher Trübungsanstieg, allg. höhere Belastung durch Mikroorganismen, NOM, etc.). Die Fließgeschwindigkeiten können mehrere 100 m/Tag bis einige km/Tag betragen. Entsprechend schlecht ist dabei die Wasserqualität. Wie Abbildung 3 zeigt, kann die effektive Belastung von Karstquellen nur mit ereignisbezogenen Messungen erfasst werden.

Im Gegensatz zu Karstgrundwasserleitern kommen Kluftgrundwasserleiter vor allem in kristallinen Gesteinen vor (seltener auch in nicht verkarsteten Kalken, Mergelkalken und Kalkschiefern). Dies hat vor allem einen Einfluss auf die mineralische Zusammensetzung des Wassers (geringere Kalkgehalte, meist leicht saurer pH). Je nach Kluftgröße weisen sie sehr unterschiedliche Reinigungsleistungen und Fließgeschwindigkeiten auf. Abhängig vom Zerklüftungsgrad entspricht die Grundwasserqualität derjenigen von gut ausgebildeten Karstgrundwasserleitern oder derjenigen von Lockergesteinsgrundwasserleitern.



**Abbildung 3: Reaktion einer Karstquelle auf Niederschlagsereignisse. Neben der Schüttung korrelieren auch die Trübung und wie hier dargestellt die Belastung mit *E. coli* und Enterokokken stark mit einzelnen Regenereignissen. Die dauernde Belastung mit Mikroorganismen zeigt zudem deutlich, dass die Filterwirkung des Untergrundes relativ schwach ausgeprägt ist.**

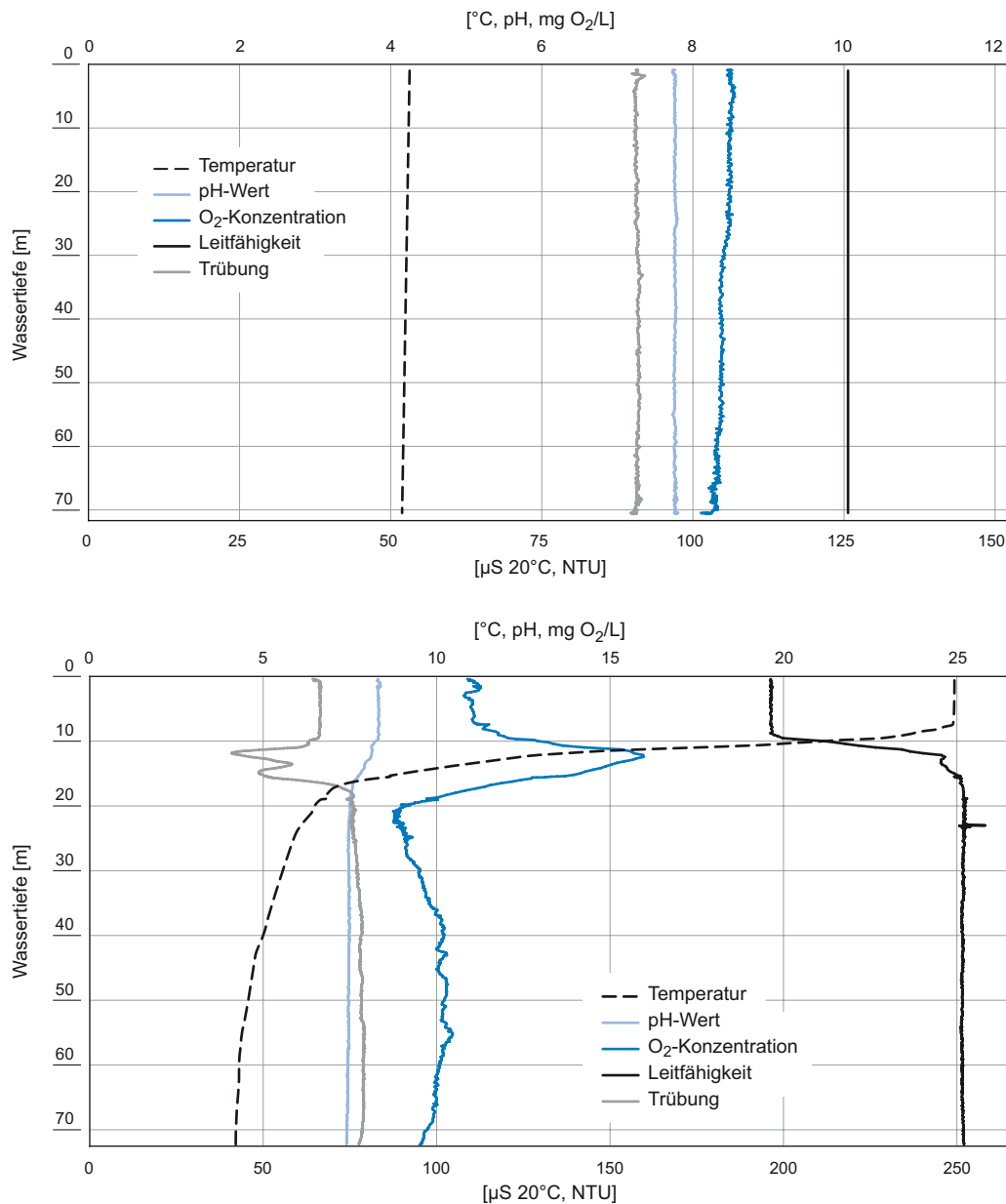
## 2. Einleitung

### Oberflächenwasser

Die Rohwasserqualität von Oberflächenwasser ist stark abhängig von jahreszeitlichen Entwicklungen (Algen- und Planktonwachstum, etc.) und meteorologischen Ereignissen. Aufgrund von fehlenden Filtrations- und nur geringen Adsorptionsmechanismen (Wasser-

Sediment-Interaktionen) werden Feststoffe und gelöste Stoffe sehr schnell verbreitet und sorgen so für eine stark schwankende Qualität. Die mikrobiologische Belastung ist in der Regel sehr hoch. Mögliche Gefährdungen gehen von Abschwemmungen land- und forstwirtschaftlicher Nutzungsflächen

stark schwankende Qualität



**Abbildung 4:** Typisches Tiefenprofil eines Sees während der Durchmischung im Frühjahr bzw. Herbst (obere Grafik) und während der sommerlichen Schichtung (untere Grafik). Die Verhältnisse in grösseren Tiefen (hier > 25 m) bleiben trotz jahreszeitlicher Schwankungen an der Oberfläche relativ konstant.

(Düngemittel, Pestizide, Hofdünger), Abwassereinleitungen, Deposition von Luftschadstoffen und Unfallereignissen aus.

Seewasser wird in der Regel aus tieferen Wasserschichten unterhalb der sommerlichen Sprungschicht entnommen (meist > 30 m). Die jahreszeitlichen Schwankungen und meteorologischen Ereignisse wirken so nur abgeschwächt auf das System ein, was konstantere Rohwasserbedingungen (chemische und physikalische Parameter) garantiert. Qualitative Veränderungen können vor allem im Frühjahr und im Herbst bei der Umwälzung des Sees und aufgrund von Massenvermehrungen von Algen auftreten.

Auf Flusswasser wirken sich äussere Einflüsse stärker aus und Schadstoffeinträge werden sehr rasch weitertransportiert. Auch die Abflussmenge, und somit das Wasserdargebot, kann starke Schwankungen aufweisen. Deshalb wird Flusswasser in der Schweiz nicht direkt zur Aufbereitung genutzt. Es wird entweder als Uferfiltrat gewonnen oder nach einer Vorbehandlung zur künstlichen Grundwasseranreicherung verwendet.

Um die Rohwasserqualität nun spezifisch auf die gegebene Situation einer Wasserversorgung beschreiben zu können, müssen bestehende hydrogeologische Daten und Analyseresultate ausgewertet, allenfalls neue Messkampagnen durchgeführt und sämtliche Daten interpretiert werden.

### **Auswertung bestehender Daten**

Als erster Schritt einer Untersuchung steht immer die Auswertung und Überprüfung der bereits vorhandenen Datengrundlage. Dabei werden sämtliche Informationen zu den hydrogeologischen Gegebenheiten, der chemischen und

mikrobiologischen Zusammensetzung des Wassers, dem Wasserdargebot, dem Wasserbedarf, den meteorologischen Eigenschaften des Einzugsgebietes, etc. zusammengetragen und beurteilt. In diesem Zusammenhang interessiert vor allem die Analyse langer Zeiträume sowie von Regen- und Hochwasserereignissen, um Schwankungen, Trends oder neu auftretende Stoffe feststellen zu können. In der Regel sind die Daten aus Routinemessungen (2 - 6 Messungen pro Jahr) für eine aussagekräftige Beurteilung nicht ausreichend, können aber erste Hinweise auf mögliche Eigenschaften und Probleme liefern. Speziell beim Ausbau bestehender Anlagen sind in der Regel viele Daten vorhanden, die hinzugezogen werden können.

### **Messkampagne**

Um die Situation ganzheitlich beurteilen zu können, ist eine umfassende Messkampagne notwendig. Dabei sollen möglichst viele Parameter kontinuierlich (Trübung, Temperatur, elektrische Leitfähigkeit, etc.) oder in kurzen Abständen (Mikroorganismen, organische Schadstoffe, etc.) gemessen werden. Die Messintervalle sollen der zeitlichen Veränderung der Wasserqualität angepasst werden. Um Belastungsspeaks beispielsweise in Karstgrundwasserleitern oder in Fassungen in Flussnähe erfassen zu können, sind möglicherweise mehrere Probenahmen pro Tag erforderlich. In gut geschützten Lockergesteinsgrundwasserfassungen sind hingegen unter Umständen wöchentliche Probenahmen ausreichend. Speziell Schwankungen sowie das Auftreten von Extremereignissen sind ausschlaggebend für die Auslegung und die Dimensionierung einer Trinkwasseraufbereitungsanlage. Neben kurzfristigen Schwankungen sind auch jahreszeitlichen Unterschiede, beispielsweise des Wasserbedarfes

*Parameter  
kontinuierlich  
messen*

*Auswertung  
vorhandenen  
Datengrund-  
lage*



## 2. Einleitung

oder der Belastung durch organische Schadstoffe (z.B. Pestizide) zu erfassen. Die Messperiode soll sich daher über mindestens ein Jahr erstrecken.

### **Chemisch-physikalischer sowie mikrobiologischer Beschrieb des Rohwassers**

Die Charakterisierung des Rohwassers umfasst zum einen die grundlegenden physikalisch-chemischen Parameter wie Temperatur, pH-Wert oder Leitfähigkeit sowie die gesamte chemische und mikrobiologische Zusammensetzung des Rohwassers. Die unerwünschten Inhaltsstoffe bestimmen die notwendigen Aufbereitungsverfahren, gleichzeitig beeinflussen aber auch die Wasserinhaltsstoffe die einzelnen Verfahren und Methoden. So stellen gewisse Inhaltsstoffe (z. B. Assimilierbarer organischer Kohlenstoff (AOC)) potentielle Nährstoffe für eine mögliche Wiederverkeimung durch Mikroorganismen im Trinkwassernetz dar. Weiter vermindert eine zu starke Trübung die Wirksamkeit der Desinfektion mit chemischen Desinfektionsmitteln und UV-Strahlen. Der erhöhte Gehalt an natürlichem organischem Material (NOM) führt zu einer verstärkten Zehrung von chemischen Oxidationsmitteln und führt zur vermehrten Bildung von unerwünschten Reaktionsnebenprodukten (z. B. Trihalomethane (THM)). Eine verminderte Desinfektionsleistung und ein erhöhter Chemikalienbedarf sind die Folgen. Auch konkurriert NOM die Adsorption von Spurenstoffen an Aktivkohle. Die Daten sollen in Form von Diagrammen ausgewertet werden, um die zeitliche Entwicklung und mögliche Zusammenhänge zwischen Parametern darstellen und interpretieren zu können.

*Charakterisierung Rohwasser*

### **Wasserbedarf und Wasserdargebot**

Neben der Wasserqualität ist auch die Quantität ein wichtiger Faktor zur Planung einer Wasseraufbereitungsanlage. Dabei spielen sowohl der Bedarf als auch das Dargebot eine wichtige Rolle. Wiederum sind vor allem die Schwankungsbreiten und Extremwerte von Interesse. So sind beispielsweise minimale Grundwasserstände oder Quellschüttungen massgebend für die maximal zur Verfügung stehende Wassermenge. Berücksichtigt werden muss auch der Wasserbedarf der einzelnen Verfahren, bei Schnell- oder Membranfiltern kann die zusätzliche Wassermenge zur Reinigung bis zu 15% betragen.

*Grundwasserstände oder Quellschüttungen*

### **Labortests und Pilotierung von Aufbereitungsanlagen**

Nach einer ersten Evaluation der Verfahren ist es sinnvoll, diese als erstes im Labor und anschliessend auf einer Pilotanlage zu testen. Dies gilt insbesondere für mehrstufige und komplexe Verfahren. Umfassende Laborversuche liefern wertvolle Erkenntnisse zum Verhalten eines Verfahrens mit dem entsprechenden Rohwasser. Die Resultate aus Versuchen im Labormassstab und unter Laborbedingungen lassen sich allerdings nicht in jedem Fall direkt auf eine Grossanlage übertragen. Eine Pilotanlage bringt den Vorteil, dass ein Verfahren oder eine Verfahrenskombination unter realen Bedingungen (Rohwasser, Dimensionierung, etc.) getestet werden kann. Beim Betrieb von Pilotanlagen über einen längeren Zeitraum werden zusätzlich Faktoren wie Reife- oder Alterungsprozesse der Anlage berücksichtigt. Die Anlage muss dabei so konzipiert werden, dass anlagenspezifische Parameter wie Aufenthalts- und Kontaktzeiten oder Dosiermengen von

*Pilotanlage für mehrstufige und komplexe Verfahren*

Zusätzen mit denen der Grossanlage übereinstimmen. So lassen sich wertvolle Hinweise für eine grosstechnische Anlage gewinnen. Allfälligen Problemen kann frühzeitig begegnet werden.

#### Randbedingungen

Oft stellen Vor- und Nachbehandlungsverfahren zusätzliche Randbedingungen (speziell beim Ausbau bestehender Anlagen), welche besonders zu berücksichtigen sind. Im Weiteren können Personalbedarf/Personalqualifikation, Raumbedarf, die Entsorgung von anfallenden Rückständen, der Einsatz von Chemikalien oder der Umfang und Aufwand notwendiger Voruntersuchungen ausschlaggebend für die Wahl eines Verfahrens sein.

Die folgenden Kapitel geben einen Überblick über die zu erwartenden Wasserinhaltsstoffe, inklusive Mikroorganismen, und zeigen auf, mit welchen Methoden und Verfahren diese am effektivsten behandelt werden können. Sie sollen als Grundlage für die Grobevaluation dienen und bei der Entscheidungsfindung unterstützen. Eine detaillierte Abklärung über die Eignung eines Verfahrens im Einzelfall bleibt unerlässlich.

# 3. Mikroorganismen

## Einleitung

Die mikrobiologische Beeinträchtigung des Trinkwassers und die damit auftretenden Probleme waren die ausschlaggebenden Gründe für die Entwicklung und Einführung der ersten Verfahren zur Trinkwasseraufbereitung. Die Verunreinigung durch Mikroorganismen stellt eine grosse Gefährdung für die Gesundheit des Menschen dar.

Die Beurteilung der mikrobiologischen Belastung von Roh- und Trinkwasser basiert auf dem Konzept der Indikatorkeime. Die Idee ist, dass mit der Untersuchung einiger weniger, repräsentativer Keime eine verlässliche Aussage über die allgemeine Belastung und mögliche gesundheitliche Gefährdung des Menschen gemacht werden kann. Diese Indikatorkeime müssen ähnliche Eigenschaften (Vorkommen, Ausbreitung, Umweltresistenz, Empfindlichkeit gegen Desinfektion, etc.) aufweisen wie die pathogenen Organismen und sollten zudem leicht nachzuweisen sein.

Im Folgenden werden die in der Schweiz häufigsten und aus hygienischer Sicht wichtigsten Mikroorganismen kurz beschrieben, unterteilt in Bakterien, Viren und Protozoen. Diese Liste ist nicht abschliessend, enthält aber diejenigen Mikroorganismen, welche als Indikatororganismen dienen können oder für welche in der Schweiz gesetzliche Vorschriften bestehen. Es existiert eine Vielzahl weiterer pathogener Keime, welche durch Wasser übertragen werden können. Das Vorkommen solcher Organismen ist aber höchstwahrscheinlich verbunden mit dem gleichzeitigen Auftreten der hier beschriebenen Mikroorganismen. Gemäss Hygieneverordnung (HyV) des EDI bestehen folgende Toleranzwerte:

**Tabelle 1: Zusammenstellung der in der HyV verankerten Toleranzwerte für Mikroorganismen in unbehandeltem und behandeltem Trinkwasser (Stand am 1. April 2007). Für *E. coli* und Enterokokken gelten für beide Wasserarten die selben Toleranzwerte.**

	<b>Toleranzwert</b>
<i>E. coli</i>	nn /100 mL
aerobe mesophile Keime an der Fassung	100 KBE/mL
aerobe mesophile Keime mit Behandlung	20 KBE/mL
aerobe mesophile Keime im Verteilnetz	300 KBE/mL
Enterokokken	nn/100 mL
nn: nicht nachweisbar	

## Bakterien

### Aerobe mesophile Keime

Der Summenparameter der aeroben mesophilen Keime (AMK) umfasst alle Mikroorganismen natürlichen und anthropogenen Ursprungs (Bakterien, Hefen, Pilze), die auf nährstoffreichem unspezifischem Substrat bei Standardbedingungen (30°C, Luftsauerstoff, 72 h) wachsen. Es handelt sich dabei um einen Indikator für die allgemeine Keimbelastung im Roh- und Trinkwasser. Die Hygieneverordnung (HyV) schreibt für aufbereitetes Trinkwasser einen Toleranzwert von maximal 20 aerobmesophile Keime/mL vor. Eine Erhöhung im Verteilnetz durch Wiederverkeimung wird bis zu einem Wert von 300 KBE/mL toleriert. Die AMK repräsentieren nur einen kleinen Ausschnitt aller vorhandener Keime im Wasser. Die Gesamtkeimzahl, bestimmt mittels Flowzytometrie, liegt bis zu einem Faktor 1000 höher. Zwischen Keimzahlen ermittelt mit den beiden Methoden besteht zudem keine oder nur eine sehr geringe Korrelation. Die AMK sind somit nur bedingt geeignet, um die Desinfektionsleistung einer Anlage zu beurteilen.

Indikatorkeime

Rinder, Schafe,  
Schweine, Geflü-  
gel und Wildtiere  
als Wirte

### **Campylobacter**

*Campylobacter* sind stäbchenförmige, gramnegative Bakterien. Sie sind begeißelt, rund 0,2-0,5 µm dick und 0,5-5 µm lang und von Tieren auf den Menschen übertragbar (zoonotisch), wobei speziell Rinder, Schafe, Schweine, Geflügel und Wildtiere als Wirte dienen. Meist bleibt jedoch bei Tieren eine Infektion symptomlos und somit un bemerkt. *Campylobacter* wandert in die Darmschleimhaut ein und führt zu entzündlichen Durchfallerkrankungen (Enteritis), wahrscheinlich ausgelöst durch die Produktion von Enterotoxinen. In rund 90% der Erkrankungen ist *Campylobacter jejuni* der Auslöser, welcher gegen mehrere Antibiotika resistent ist. *Campylobacter* wird meist durch Lebensmittel tierischer Herkunft, namentlich Geflügelfleisch und Milchprodukte, übertragen (Lebensmittelvergiftung). In Oberflächengewässern der Schweiz wird *Campylobacter* häufig gefunden, auch im Rohwasser von Karstquellen konnten *Campylobacter* nach Niederschlagsereignissen nachgewiesen werden. Im Wasser ist *Campylobacter* über mehrere Wochen (als kultivierbare Stäbchen) bis mehrere Monate (in coccoider Form) überlebensfähig. *Campylobacter* kann sich aber nicht ausserhalb eines Wirtes vermehren. Der Nachweis von *Campylobacter* ist sehr aufwändig und zeitintensiv.

### **Clostridien**

*Clostridien* sind grampositive, anaerobe Bakterien, welche sich aktiv fortbewegen (Geißel) und gegen sehr viele Umwelteinflüsse resistente Endosporen bilden. Sie sind stäbchenförmig, rund 1 µm dick und 3-8 µm lang. Die meisten der ubiquitär (v. a. Böden und Verdauungstrakt von Menschen & Tieren) vorkommenden *Clostridien* sind apathogen, also für den Menschen ungefähr-

lich und häufig von biotechnologischem Nutzen. Nur wenige Arten sind für den Menschen gefährlich, dies aufgrund der produzierten Toxine. *Clostridien* oder deren Toxine sind Auslöser für Gasbrand, Enteritis, Tetanus (Wundstarrkrampf) oder Botulismus. *Clostridien* können als Fäkalindikator dienen und werden, analog zu *B. subtilis* Sporen, aufgrund der sehr resistenten Sporen als Indikatorkeim für die Inaktivierung von *Cryptosporidium*, *Giardia* oder Bakteriensporen vorgeschlagen.

### **Enterokokken**

Enterokokken sind grampositive, fakultativ anaerobe Milchsäurebakterien, die meist in Paaren oder kurzen Ketten angeordnet sind. Sie kommen in der Umwelt, im Verdauungssystem von Menschen und Tieren sowie in Lebensmitteln (Milchprodukte, Wurstwaren) vor und weisen eine hohe Hitzeresistenz auf. Im Lebensmittelbereich (Trinkwasser, Nahrungsmittel) kommt Enterokokken die Funktion eines Fäkalindikators zu. Für die Beurteilung der Desinfektionsleistung sind Enterokokken aufgrund ihrer geringen Resistenz nicht geeignet. Eine humanpathogene Wirkung entfalten Enterokokken vor allem bei Menschen mit geschwächtem Immunsystem. Enterokokken lösen in seltenen Fällen verschiedene Infektionen wie Sepsis (Blutvergiftung), Endokarditis (Herzinnenhautentzündung) oder Infektionen des Harntraktes aus. Von besonderer Bedeutung ist die zunehmende Antibiotikaresistenz von Enterokokken. Laut HyV dürfen Enterokokken im Trinkwasser in 100 ml nicht nachweisbar sein (Toleranzwert).

### **Escherichia coli**

*E. coli* ist ein gramnegatives, fakultativ anaerobes Bakterium, das natürlicherweise im Verdauungssystem von

in der Umwelt,  
im Verdauungs-  
system von  
Menschen und  
Tieren sowie in  
Lebensmitteln

Bakterien der  
menschlichen  
Darmflora

### 3. Mikroorganismen

Menschen und Tieren vorkommt. *E. coli* ist eine der häufigsten Bakterien der menschlichen Darmflora, gewisse Stämme können aber ausserhalb des Darmes eine pathogene Wirkung entfalten. Unter geeigneten Bedingungen ist *E. coli* über einen längeren Zeitraum überlebensfähig, weist aber nur eine sehr geringe Resistenz gegenüber Desinfektionsmitteln auf. *E. coli* kann Auslöser für Harnwegsinfekte, Meningitis bei Neugeborenen und andere Infektionen sein. Zunehmende Relevanz erhalten Verotoxin bildende *E. coli* (VTEC, synonym STEC, EHEC). Diese Stämme gelangen über tierische Lebensmittel in die Nahrung und lösen Infektionen mit schweren Komplikationen aus (hämorrhagische Colitis, hämolytisch-urämisches Syndrom). Im Trinkwasser dient es als wichtigster Fäkalindikator zur Beurteilung von Rohwasser. Als Indikator für die Beurteilung einer Desinfektion ist *E. coli* aufgrund seiner geringen Resistenz gegenüber Desinfektionsmitteln jedoch nicht geeignet. Gemäss HyV darf *E. coli* in 100 ml aufbereitetem Trinkwasser nicht nachweisbar sein (Toleranzwert), das gleiche gilt für Trinkwasser im Verteilnetz.

#### Salmonellen

*Salmonellen* sind gramnegative, fakultativ anaerobe Bakterien (2-5 µm lang und 0.8-1.5 µm dick), die eng mit der Gattung *Escherichia* verwandt sind. Die durch *Salmonellen* ausgelösten Erkrankungen (Gastroenteritis, Typhus) gehören zu den Zoonosen und werden sehr häufig durch Nahrungsmittel übertragen. Vor allem bei Risikogruppen wie Säuglingen/Kleinkindern, älteren Menschen und immungeschwächten Personen können schwere Infektionen hervorgerufen werden. Ausserhalb des menschlichen oder tierischen Körpers sind *Salmonellen* wochelang überlebensfähig. UV-Strahlung, Hitzeeinwirkung und chemische Desinfektionsmittel beschleunigen jedoch das Absterben des Erregers.

durch Nahrungsmittel übertragen

#### Shigellen

*Shigellen* sind gramnegative, meist aerobe Stäbchenbakterien (1-6 µm lang und 0.3-1 µm dick), die bislang nur beim Menschen und bei Primaten nachgewiesen wurden. Übertragen werden *Shigellen* hauptsächlich über verschmutztes Wasser oder Nahrungsmittel, sowie auf fäkal-oralem Wege. Alle bekannten Arten sind Auslöser von Shigellosen (Bakterienruhr). Dabei wird die Darmschleimhaut angegriffen, was zu schmerzhaften Krämpfen führt. Betroffen sind meist Kinder, ältere und immungeschwächte Personen. Weiter produzieren einige Arten das Shiga-Toxin, welches zu schwerwiegenden Vergiftungen führen kann. Da *Shigellen* ausserhalb des Verdauungstraktes relativ schnell absterben, weist ihr Vorhandensein im Trinkwasser auf eine sehr frische Verunreinigung hin. *Shigellen* weisen eine zunehmende Antibiotikaresistenz auf.

nur beim Menschen nachgewiesen

#### Vibrio cholerae

*V. cholerae* ist ein gramnegatives, fakultativ anaerobes und begeisseltes Bakterium und ist der hauptsächliche Verursacher von Cholera. *V. cholerae* vermehrt sich im Dünndarm sehr stark und produziert ein wirksames Enterotoxin. Unbehandelt endet Cholera in rund 50% der Fälle tödlich. Die Aufnahme der Erreger erfolgt meist oral aufgrund mangelnder hygienischer Verhältnisse (Wasser, Nahrungsmittel). Als natürliches Habitat von *V. cholerae* gelten Küsten- und Oberflächengewässer sowie Meerestiere (v. a. Muscheln).

natürliches Habitat Oberflächengewässer

#### Viren

##### Adenoviren

Die humanpathogenen Adenoviren gehören zu den unbehüllten Viren. Dadurch weisen sie eine hohe Stabilität gegenüber physikalischen und chemischen Umwelteinflüssen auf. Dies führt wiederum zu einer langen Über-

lebenszeit ausserhalb des Wirtkörpers. Die Grösse der Viren liegt im Bereich von 70-90 nm. Übertragen werden Adenoviren bei direktem Kontakt (z. B. Tröpfcheninfektion), fäkal-oral und teilweise über verschmutztes Wasser. Adenoviren lösen Atemwegserkrankungen von Erkältung und Bronchitis bis zu Pneumonie (Lungenentzündung) aus. Ebenso kann es zu Infektionen des Hals- und Rachenraumes, der Augen sowie des Magen-Darm-Traktes kommen.

### **Enteroviren**

Zu den Enteroviren gehören die Gruppen der Polioviren, der Coxsackieviren und der Echo-Viren. Diese kleinsten animalische Viren erreichen nur Grössen von 20-30 nm. Enteroviren weisen eine hohe Persistenz gegenüber Umweltbedingungen (hohe Säurestabilität, etc.) auf und bleiben so auch ausserhalb des Wirtkörpers über einen längeren Zeitraum infektiös. Das einzige bekannte Erregerreservoir ist der Mensch. Eine Infektion erfolgt meist über direkten Kontakt (Tröpfcheninfektion), fäkal-orale Übertragung oder über verunreinigte Lebensmittel. Das Krankheitsbild einer Enterovireninfektion ist sehr breit und reicht von Grippe über Meningitis, Enzephalitis, Hepatitis, Pneumonie bis hin zur Schädigung des Zentralnervensystems (Poliomyelitis, Kinderlähmung). Enteroviren können häufig in Abwasser, Grundwasser sowie in Flüssen und Seen nachgewiesen werden. Erhöhte Konzentrationen werden vor allem im Sommer und Herbst beobachtet.

### **Noroviren (Norwalkviren, Norwalk-like Viren)**

Noroviren (ehemals Norwalk-like Viren) sind unbehüllte RNA-Viren mit einer Grösse von 25-40 nm. Aufgrund der fehlenden Hülle sind Noroviren resistent gegen Umwelteinflüsse. Für die

drei humanpathogenen Genogruppen (sogenannte humane Noroviren) stellt der Mensch das einzige Erregerreservoir dar. Eine Infektion führt typischerweise zu einer Gastroenteritis. Noroviren zählen zu den häufigsten Ursachen nicht bakteriell bedingter Magen-Darm-Erkrankungen. Die Übertragung erfolgt dabei in der Regel fäkal-oral über Nahrungsmittel, Wasser und Aerosole, wobei bereits 10-100 Virenpartikel für eine Infektion ausreichend sind (hohe Infektiosität). In der Umwelt können Noroviren häufig in geklärtem Abwasser, Oberflächenwasser und teilweise auch in Karstquellwasser nachgewiesen werden. Eine saisonale Häufung der Noro-Virus-Infektionen ist in den Wintermonaten zu beobachten.

### **Rotaviren**

Rotaviren sind rund 50-70 nm grosse, unbehüllte RNA-Viren. Sie sind ausserordentlich resistent gegenüber äusseren Einflüssen, speziell auch gegenüber einer Desinfektion mittels UV oder Chlor, und bleiben im Wasser über mehrere Wochen infektiös. Rotaviren sind im Tierreich weit verbreitet und Infektionen haben in der Viehzucht (v. a. Kälber) eine grosse wirtschaftliche Bedeutung. Bei Menschen führt eine Infektion zu Erbrechen, Fieber und Diarrhoe. Die Übertragung von Rotaviren geschieht meist fäkal-oral oder über verunreinigte Nahrungsmittel und Trinkwasser. Bereits einzelne Viruspartikel können eine Infektion auslösen. Von einem schweren Krankheitsverlauf sind vor allem Kinder, ältere Menschen und immunsupprimierte Personen betroffen. In der Schweiz werden Rotaviren häufig in gereinigtem Abwasser, in Oberflächenwasser sowie im Grundwasser gefunden.

*10-100 Virenpartikel für eine Infektion ausreichend*

*resistent gegenüber einer Desinfektion mittels UV oder Chlor*

*hohe Persistenz gegenüber Umweltbedingungen*

### 3. Mikroorganismen

#### Protozoen

##### Cryptosporidium

*Cryptosporidium* ist ein weltweit vorkommender, 4-6 µm grosser Parasit. Die für den Menschen wichtigste Art ist *Cryptosporidium parvum*. Bei Kryptosporidien handelt es sich um zoonotische Erreger, wobei die wichtigsten Träger Kälber und weitere Wirbeltiere sind. Übertragen werden die Dauerstadien, sogenannte Oozysten (~3 µm). Die Übertragung geschieht meist über verunreinigtes Wasser oder bei direktem Kontakt auf fäkal-oralem Weg. Eine Infektion mit Kryptosporidien führt zu leichtem Fieber, Schwindel, Bauchkrämpfen und Durchfallerkrankungen. Bereits geringe Infektionsdosen von rund 10 Oozysten reichen bei gesunden erwachsenen Personen für eine Infektion aus. Speziell bei immunsupprimierten Personen kann eine Infektion zu gefährlichen chronischen Durchfallerkrankungen führen. Die Oozysten weisen eine sehr hohe Umweltresistenz auf und bleiben im Wasser mehrere Monate lebensfähig. In Schweizer Oberflächengewässern, Grundwasser und Karstquellwasser können *Cryptosporidium* Oozysten teilweise nachgewiesen werden. In der Trinkwasseraufbereitung bereitet vor allem die hohe Resistenz der Oozysten gegenüber chemischen Desinfektionsmittel grosse Probleme, als effektiv erwiesen haben sich aber Abtrennverfahren (Membranfiltration) und die UV-Desinfektion.

Oozysten verunreinigtes Wasser

##### Giardia

*Giardia* ist ein fakultativ pathogener Parasit aus der Gruppe der Flagellaten. In der Entwicklung durchlaufen sie zwei Stadien, Vermehrungsstadium (Trophozoiten, 11-19 µm) und Dauerstadium (Zysten, 10-15 µm). Die wichtigste Art für den Menschen ist *G. lamblia* (synonym *G. intestinalis*, *G. duodenalis*). Das Wirtsspektrum ist breit und umfasst

Wirtsspektrum

Wirbeltiere wie Wiederkäuer, Katzen, Hunde, Pferde, Schweine, Nagetiere, etc., sowie den Menschen. Die Infektionsdosis ist sehr niedrig, bereits einzelne (1-10) Zysten können eine Infektion auslösen. Der wichtigste Übertragungsweg ist der Kontakt mit verunreinigtem Wasser (Trinkwasser, Baden), ebenso die fäkal-orale Übertragung, beispielsweise durch Nahrungsaufnahme. Die Trophozoiten heften sich an die Schleimhautzellen des Dünndarmes und führen zu einer Einschränkung ihrer Funktion sowie zu Entzündungen. Als Folge treten Durchfall, Blähungen, leichtes Fieber und in schweren Fällen Symptome von Mangelernährung auf. In Oberflächengewässern können die umweltresistenten *Giardia* Zysten bis zu mehreren Monaten überleben, in feuchten Böden noch mehrere Wochen. In der Schweiz werden regelmässig Zysten in Oberflächengewässern nachgewiesen. Zur Entfernung von *Giardia* haben sich Membranverfahren (Ultrafiltration, Nanofiltration), sowie die Desinfektion mittels Ozon und UV bewährt.

## Vergleich der Verfahren

Folgende Tabellen geben einen Überblick über die Abtrennung und Inaktivierung der oben beschriebenen Mikroorganismen mit den in diesem Dokument beschriebenen Aufbereitungsverfahren.

**Tabelle 2: Verfahren zur Abtrennung der beschriebenen Mikroorganismen. Die Beurteilung der Abtrennungseffizienz basiert auf der Grösse der einzelnen Organismen. Eine detaillierte Abklärung ist aber in jedem Fall notwendig**

Bakterien	Abtrennung							
	SED	SF	LSF	AK	MF <sup>Δ</sup>	UF	NF	RO
aerobe mesophile Keime	-	+*	+	+/-	+	++	++	++
<i>Campylobacter</i>	-	+*	+	+/-	+	++	++	++
Clostridien	-	+*	+	+/-	+	++	++	++
Enterokokken	-	+*	+	+/-	+	++	++	++
Escherichia coli	-	+*	+	+/-	+	++	++	++
Salmonellen	-	+*	+	+/-	+	++	++	++
Shigellen	-	+*	+	+/-	+	++	++	++
Vibrio cholerae	-	+*	+	+/-	+	++	++	++

### Viren

Adenoviren	-	+/-*	+	-	-	++	++	++
Enteroviren	-	+/-*	+	-	-	++	++	++
Noroviren	-	+/-*	+	-	-	++	++	++
Rotaviren	-	+/-*	+	-	-	++	++	++

### Protozoen

<i>Cryptosporidium</i>	-	+*	+	+/-	+	++	++	++
<i>Giardia</i>	-	+*	+	+/-	+	++	++	++

SED : Sedimentation	++ : gut geeignet
SF : Schnellfiltration	+ : geeignet
LSF : Langsamsandfiltration	+/- : bedingt geeignet
AK : Aktivkohle	- : ungeeignet
MF : Mikrofiltration	
UF : Ultrafiltration	* : mit Flockungsmittel
NF : Nanofiltration	Δ : stark abhängig von der Porengrösse
RO : Umkehrosmose	



### 3. Mikroorganismen

c\*t-Werten

Die Inaktivierungseffizienz in Tabelle 3 wird in c\*t-Werten, dem Produkt aus wirksamer Desinfektionsmittelkonzentration c und Einwirkzeit t, angegeben. Die typische Einwirkzeit auf den Organismus beträgt in Trinkwasseraufbereitungsanlagen im Minimum 5 – 10

Minuten. Die Konzentrationen der zudosierten Desinfektionsmittel müssen an die Kontaktzeit angepasst werden.

Analog zu den c\*t-Werten wird die Inaktivierungseffizienz bei der UV-Desinfektion mittels UV-Dosis, dem Produkt aus Bestrahlungsstärke und Bestrahlungszeit, angegeben.

**Tabelle 3: Verfahren zur Inaktivierung von Mikroorganismen im Vergleich. Als Mass dienen c\*t-Werte [mg\*min/L] bzw. die UV-Dosis [J/m<sup>2</sup>], bei denen es zu einer Inaktivierung um zwei Zehnerpotenzen (99%) der angegebenen Mikroorganismen kommt. Faktoren wie Trübung oder weitere Wasserinhaltsstoffe können einen wesentlichen Einfluss auf die Desinfektionsleistung haben. Die Angaben gelten für einen neutralen pH und eine Temperatur von 5°C. Die angegebenen Werte sind als Richtwerte zu verstehen. Wo keine c\*t- bzw. Dosis-Werte vorliegen, bedeutet ++, dass das Verfahren gut geeignet zur Inaktivierung ist, - hingegen bedeutet, dass es nicht geeignet ist.**

Bakterien	Inaktivierung (c*t-Werte, UV-Dosis bzw. Eignung für Inaktivierung)			
	Chlor	Chlordioxid	Ozon	UV
Aerobe mesophile Keime	0.08	0.13	0.02	++
<i>Campylobacter jejuni</i>	++	++	++	34
Enterokokken	++	++	++	++
<i>Escherichia coli</i>	0.03 - 0.05	0.04 - 0.08	0.01 - 0.02	30 - 80
Salmonellen	++	++	++	20 - 120
Shigellen	++	++	++	12 - 49
<i>Vibrio cholerae</i>	++	++	++	14
<b>Viren</b>				
Adenoviren	0.7 – 2.5			450 - 1050
Enteroviren	1.1 – 4.0	6.7 – 12.8	0.1 – 0.8	70 - 180
Noroviren	+/-	++	++	+
Rotaviren	0.01 -0.05	0.2 – 2.1	0.01 – 0.06	150 - 190
<b>Protozoen</b>				
Kryptosporidien Oozysten	510 - 7200	40 - 120	5 - 10	< 10 - 58
Giardien Zysten	12 - 630	7.2 - 42	0.3 – 2.0	< 20 - 100

# 4. Wasserinhaltsstoffe

## Einleitung

Natürliche Wässer enthalten neben Wasser immer auch ein vielfältiges Gemisch weiterer Substanzen und Stoffe. Diese gelangen natürlicherweise durch Lösungsprozesse oder biologische Aktivität ins Oberflächen- und Grundwasser. Die Zusammensetzung variiert sehr stark, je nach Herkunft des Wassers. Einige dieser Substanzen (z. B. Arsen) können bereits natürlicherweise Konzentrationen erreichen, die für den Menschen eine Gefährdung darstellen. Viele Stoffe gelangen aber erst durch menschliche Aktivitäten in den Wasserkreislauf. Dabei handelt es sich einerseits um natürlich vorkommende Substanzen (z. B. Kochsalz), deren Konzentration aber stark erhöht wird, und andererseits um synthetische Stoffe (z. B. Pestizide, MTBE, etc.), die einzig aufgrund anthropogener Aktivitäten in die Umwelt gelangen. Viele dieser Inhaltsstoffe können negative Auswirkungen auf die menschliche Gesundheit haben. Für einige unerwünschte Substanzen sind in der Lebensmittelgesetzgebung Grenz- und Toleranzwerte festgelegt. Oberstes Ziel soll die Vermeidung des Eintrags solcher Substanzen sein. Werden sie dennoch im Rohwasser nachgewiesen, so sind geeignete Verfahren für deren Entfernung oder Umwandlung einzusetzen. Ein wichtiger Faktor bei der Wahl von geeigneten Aufbereitungsverfahren ist die Bildung von möglichen Nebenprodukten. Die Bildung solcher Reaktionsnebenprodukte soll vermieden oder innerhalb der Höchstkonzentrationen gehalten werden.

In der Verordnung des Eidgenössischen Departements des Innern (EDI) über Fremd- und Inhaltsstoffe in Lebensmitteln (FIV) sind die Begriffe Grenz- und Toleranzwert in Artikel 2 Absatz 3 & 4, folgendermassen definiert:

- „Der Grenzwert ist die Höchstkonzentration, bei dessen Überschreitung das Lebensmittel für die menschliche Ernährung als ungeeignet gilt“
- „Der Toleranzwert ist die Höchstkonzentration, bei dessen Überschreitung das Lebensmittel als verunreinigt oder sonst im Wert vermindert gilt“

Im Folgenden werden die häufigsten und wichtigsten Wasserinhaltsstoffe kurz vorgestellt und deren Relevanz erklärt. In zwei Tabellen wird das Verhalten dieser Substanzen bei den gebräuchlichsten Aufbereitungsverfahren aufgezeigt.

## Haupt- und Nebenbestandteile

Bei den im Rohwasser auftretenden Haupt- und Nebenbestandteilen handelt es sich um Ionen, Moleküle, Summenparameter und gelöste Gase. Zusätzlich kommen aus der Trinkwasseraufbereitung stammende Desinfektions- und Reduktionsmittel sowie einzelne Reaktionsnebenprodukte hinzu.

## Aluminium

Aluminium ist das häufigste Metall der Erdkruste, ist in der Natur aber nie in gediegener Form zu finden, sondern meist in Form von Aluminosilikaten oder Oxiden (z. B. Bauxit). Unter sauren Bodenbedingungen wird Aluminium mobil und kann ins Grundwasser ausgewaschen werden. Für den Menschen ist Aluminium kein essentielles Element und stört bei höheren Dosen den Stoffwechsel, speziell die Aufnahme anderer Metalle wie Magnesium oder Eisen. Aluminium (Al(III)) wird in der Wasseraufbereitung häufig als Flockungsmittel eingesetzt. Dies kann zu einer unerwünschten Erhöhung der Aluminiumkonzentration im Trinkwasser führen. Die FIV nennt einen Toleranzwert von 0.2 mg/L im Trinkwasser, im SLMB ist ein Erfahrungswert für das Rohwasser von 0.05 mg/L gegeben.

(Al(III))  
Flockungsmittel

Grenz- und  
Toleranzwerte

## 4. Wasserinhaltsstoffe

Lösungsprozessen im Grundwasserleiter

### Arsen

Arsen ist ein Halbmetall und kommt natürlicherweise meist in Form von Sulfiden oder als Arsenat gebunden an Eisen(III)(hydr)oxide vor. Die Arsenkonzentrationen im Rohwasser stammen vorwiegend aus Lösungsprozessen im Grundwasserleiter. Eine chronische Belastung mit Arsen führt zur Störung der zellulären Reparatur-, Stoffwechsel- und Transportvorgänge. Dadurch treten Schäden an Haut und Blutgefässen sowie Tumore auf. Der Grenzwert für Arsen im Trinkwasser ist 50 µg/L (FIV). In der EU liegt der Höchstwert im Trinkwasser bei 10 µg/L. In der Schweiz liegen die Arsenkonzentrationen im Mittel bei rund 2 µg/L, es werde jedoch auch Höchstwerte im Bereich von 100 µg/L gemessen. Aktuelle Untersuchungen des BAG zeigen, dass eine Anpassung des Grenzwertes an die europäische Norm einzelnen Wasserversorgungen im Alpenraum (Wallis, Tessin, Graubünden) Probleme bereiten würde.

### Barium

Das Erdalkalimetall Barium kommt in der Natur vor allem als Baryt ( $\text{BaSO}_4$ ) vor, kann aber in vielen Mineralien auch Calcium oder Kalium ersetzen. Alle wasserlöslichen Bariumverbindungen sind giftig. Im Körper wirkt Barium auf Muskeln (Krämpfe, Herzrhythmusstörungen) und auf das Zentralnervensystem (Lähmungserscheinungen). Barium im Rohwasser ist meist geogenen Ursprungs, kann aber auch über Abwasser (Keramik- und Glasindustrie, Bohrspülungen, Feuerwerk, etc.) in die Umwelt gelangen. In der Schweiz ist Barium sehr häufig als Spurenelement nachweisbar, im Mittel werden im Grundwasser rund 35-40 µg/L gefunden, während die Höchstwerte im Bereich von 750-800 µg/L liegen. In der Schweiz sind keine Höchstwerte für Barium festgelegt, die WHO führt einen Richtwert von 0.7 mg/L auf.

### Blei

Das Schwermetall Blei kommt in der Natur am häufigsten in der Form von Bleisulfid ( $\text{PbS}$ , Galenit) vor. Blei ist als umweltgefährlich und giftig eingestuft. Vor allem die löslichen Formen der Bleiverbindungen weisen eine ausgesprochene Toxizität auf. Blei akkumuliert im Körper, insbesondere in den Knochen. Bei regelmässiger Aufnahme relativ geringer Bleimengen sind adverse Effekte wie verminderte Blutbildung, Nierentoxizität und insbesondere die Beeinträchtigung der Entwicklung des Nervensystems für die gesundheitliche Bewertung relevant. Blei im Trinkwasser ist vor allem ein Leitungs- und Armaturenproblem, die Konzentrationen im Rohwasser sind in der Regel unbedeutend. Die FIV nennt einen Grenzwert für Blei von 0.01 mg/L ab Wasserhahn nach fünfminütigem Laufen lassen. Der Erfahrungswert aus dem SLMB liegt bei < 0.001 mg/L.

### Bor

Das Halbmetall Bor kommt natürlicherweise nur als sauerstoffhaltige Verbindungen vor. Bor wird in hohen Konzentrationen als gesundheitsschädlich eingestuft und führt zu Übelkeit, Erbrechen oder Kreislaufproblemen. Es besitzt eine gute Mobilität und nur ein geringes Transformationspotenzial, weswegen seine Ausbreitungswahrscheinlichkeit relativ hoch ist. Bor stammt grösstenteils aus dem Abwasser und wird in den meisten Grund- und Oberflächengewässern in der Schweiz in kleinen Konzentrationen nachgewiesen. Die FIV nennt keine Höchstkonzentration, in den Richtlinien der WHO wird 0.5 mg/L als Richtwert angegeben.

Bor stammt grösstenteils aus Abwasser

### Brom (Bromid, Bromat)

Brom gehört zur Gruppe der Halogene und kommt natürlicherweise vor allem in Salzen als Bromid vor (Kalisalze). In der Trinkwasseraufbereitung wird

Bromat bei der Ozonung von bromidhaltigem Rohwasser gebildet. Dies ist insofern unerwünscht, da Bromat als potentiell krebserregend gilt. Bromat ist schwierig zu entfernen, weshalb die Bildung über eine kontrollierte Oxidation begrenzt werden muss. Für aus der Trinkwasseraufbereitung stammendes Bromat besteht in der Schweiz ein Toleranzwert im Trinkwasser von 0.01 mg/L. Ebenso werden in der Trinkwasseraufbereitung (Chlorung) bromorganische Verbindungen gebildet. Speziell erwähnt in der FIV sind die drei THM Bromdichlormethan ( $\text{CHCl}_2\text{Br}$ : 0.015 mg/L), Dibromchlormethan ( $\text{CHClBr}_2$ : 0.1 mg/L) und Bromoform ( $\text{CHBr}_3$ : 0.1 mg/L).

### **Cadmium**

Cadmium ist ein als sehr giftig eingestuftes Schwermetall mit grossem Umweltgefährdungspotential. Im menschlichen Körper hat Cadmium keine Funktion. Bei regelmässiger oraler Aufnahme kleiner Cadmiummengen sind Störungen des Mineralhaushaltes und insbesondere Schädigungen der Nieren von Bedeutung. In die Umwelt gelangt Cadmium vorwiegend durch die Metallindustrie (Gewinnung von Zink, Blei & Kupfer), ist aber auch in Pestiziden und als Verunreinigung in phosphathaltigen Mineräldüngern zu finden. Im Gegensatz zu anderen Schwermetallen weist Cadmium eine höhere Mobilität auf. Die FIV führt deshalb einen Grenzwert für Cadmium von 5 µg/L auf, der Erfahrungswert aus dem SLMB liegt bei 0.5 µg/L. Im Schweizer Trinkwasser hat Cadmium nur eine geringe Relevanz.

### **Calcium**

Calcium kommt vor allem in Carbonaten und Sulfaten (z. B. Gips) oder in gelöster Form als zweiwertiges Kation ( $\text{Ca}^{2+}$ ) vor. Calcium ist für den Menschen essentiell und spielt eine wich-

tige Rolle beim Aufbau von Knochen und Zähnen. Im Rohwasser ist Calcium das dominierende Kation, ist ausschlaggebend für die Wasserhärte und gelangt vorwiegend durch Verwitterung calciumhaltiger Mineralien ins Rohwasser. Ab einer Konzentration von 200 mg/L führt Calcium zu einer geschmacklichen Beeinträchtigung. Für Calcium bestehen weder in der Schweiz noch bei der WHO Angaben zu Höchstkonzentrationen.

### **Chlor (Chlorid, Chlordioxid, Chlorat, Chlorit etc.)**

Chlor gehört zur Gruppe der Halogene. In der Umwelt kommt Chlor aufgrund seiner Reaktivität vorwiegend als Anion (Chlorid,  $\text{Cl}^-$ ) vor. Chlorsalze sind sehr gut löslich, nicht toxisch und für den Menschen essentiell. Im Rohwasser ist Chlorid meist geogenen Ursprungs, erhöhte Konzentrationen können aber auch aufgrund von Abschwemmungen (Tausalze, etc.), Abwassereinleitungen/-Versickerungen und industriellen Prozessen hervorgerufen werden. Das SLMB listet für Chlorid einen Erfahrungswert in unbelastetem Rohwasser von < 20 mg/L auf, ab 200 mg/L macht sich Chlorid geschmacklich bemerkbar. Die WHO schlägt deshalb einen Richtwert für Chlorid von 250 mg/L vor. Als Gas oder in gelöster Form (Hypochlorit) wird Chlor in der Trinkwasseraufbereitung als Desinfektionsmittel eingesetzt. Chlordioxid ist eine Alternative dazu und zerfällt/reagiert zu Chlorit und Chlorat. Beide gelten als Blutgifte. Der Toleranzwert für Chlorit und Chlorat aus der Trinkwasseraufbereitung beträgt gemässe FIV jeweils 0.2 mg/L. Derjenige für freies Chlor wird in der FIV durch den Toleranzwert von 0.1 mg/L begrenzt. Die Limitierung der Chlorit- sowie Chloratkonzentration führt zu einer maximalen Chlordioxidosisierung von 0.4 mg/L.

## 4. Wasserinhaltsstoffe

### Chrom

Chrom kommt häufig in den Oxidationsstufen +III und +VI vor. Die sechswertige Form (Cr(VI)) ist als äusserst giftig und krebserregend einzustufen. Die dreiwertige Form ist sehr schlecht wasserlöslich und bindet vorwiegend an Partikel. Im Gegensatz dazu weist die sechswertige Form eine hohe Wasserlöslichkeit auf. Die Hauptemittenten sind die Eisen- und Stahlveredelungsindustrie (z. B. Galvanisierungsbetriebe) sowie Gerbereien. Somit gelangt Chrom häufig über Abwasser in Oberflächengewässer, aber auch durch Versickerung und Altlasten. In der Schweiz kann Chrom teilweise auch im Grundwasser nachgewiesen werden. Der Grenzwert für sechswertiges Chrom beträgt gemäss FIV 20 µg/L, während das SLMB einen Erfahrungswert von 1 µg/L aufführt.

### Cyanid

Zu den Cyaniden gehören Salze und andere Verbindungen der Blausäure (HCN). Die hohe Toxizität vieler dieser Verbindungen liegt vor allem in der Abspaltung von Blausäure begründet. Die Wirkung von Blausäure basiert auf einer Enzymhemmung in der Atmungskette. In der Natur kommen Cyanide sehr häufig in Pflanzen (Kerne von Aprikosen und Kirschen, Maniok, allgemein Euphorbiacea, etc.) vor. Erhöhte Konzentrationen im Wasser deuten auf eine industrielle Verschmutzung (vor allem Bergbau) hin. In der Schweiz besteht zurzeit ein Grenzwert von 0.05 mg/L bezogen auf Hydrogencyanid (HCN). In der Wegleitung Grundwasserschutz ist ein Indikatorwert für das Rohwasser von < 0.025 mg/L aufgeführt.

### DOC

DOC (dissolved organic carbon) ist ein Summenparameter für den gesamten gelösten organischen Kohlenstoff. Gelöst bedeutet dabei, dass gelöste Stoffe und Partikel < 0.45 µm erfasst

werden. Die Konzentration von DOC ist ein Mass für natürliches organisches Material (NOM) und umfasst Stoffe wie Humin- und Fulvinsäuren, Fette, Proteine, Kohlenhydrate und unzählige weitere Verbindungen mit unbekannter chemischer Struktur. Es handelt sich dabei meist um Abbau- und Stoffwechselprodukte. Der Gehalt an NOM, gemessen als DOC, ist auch für die Verfärbung des Wassers ausschlaggebend. Als Quellen für hohe DOC-Gehalte kommen Moorböden, Feuchtgebiete, Wälder, starkes Algenwachstum, etc. in Frage. Eine Fraktion des DOC, der AOC ist die hauptsächliche Nahrungsquelle für Mikroorganismen im Wasser und beeinflusst somit direkt die mikrobiologische Stabilität des aufbereiteten Trinkwassers. Im SLMB gilt eine DOC-Konzentration von < 1 mg/L als unbelastetes Trinkwasser. Anstelle des DOC wird häufig noch der Kaliumpermanganatverbrauch (KMnO<sub>4</sub>) gemessen. In unbelastetem Wasser sollte dieser gemäss SLMB nicht über 3 mg/L liegen. Die Wegleitung Grundwasserschutz nennt als Anforderung für die Trinkwasseraufbereitung einen DOC-Gehalt im Rohwasser von < 2 mg/L.

### Eisen

Im Gegensatz zu Eisen(III) ist die zweiwertige Form (Fe(II)) gut wasserlöslich. Fe(II) kommt ausschliesslich in reduzierten Wässern vor und sorgt für geschmackliche Beeinträchtigung und bei Kontakt mit Luftsauerstoff für farbliche Veränderung des Trinkwassers. Weiter kommt es zu Ausfällungen in der Anlage und im Leitungssystem. Die mittleren Konzentrationen von totalem Eisen im Grundwasser bewegen sich in der Schweiz im Bereich von 35 - 40 µg/L. In reduziertem Grundwasser können aber auch Konzentrationen von mehreren mg/L erreicht werden. Der Toleranzwert für Eisen im Trinkwasser beträgt gemäss FIV 0.3 mg/L.

*Summenparameter für gelösten organischen Kohlenstoff*

### Fluor

Fluor tritt in der Umwelt vorwiegend in Form von Fluoriden auf. Diese Salze sind in geringen Konzentrationen in vielen Wässern zu finden. Obwohl Fluor ein essentielles Element darstellt, können erhöhte Fluoridkonzentrationen Störungen des Knochengewebes und der Zähne verursachen (Fluorose) sowie verschiedene enzymatische Abläufe beeinträchtigen. Die FIV nennt daher einen Toleranzwert für Fluorid von 1.5 mg/L.

### Hydrazin

Die Stickstoffverbindung Hydrazin ( $N_2H_4$ ) ist giftig, potenziell krebserregend und wirkt äusserst toxisch auf Wasserorganismen. Hydrazin wird vorwiegend in der Industrie als Treibstoff und Energielieferant eingesetzt (Raum- und Luftfahrt, chemische Industrie, etc.) Die orale Aufnahme von grösseren Mengen (akute Toxizität) führt beim Menschen zu Erbrechen, Krämpfen, Bewusstseinsstörungen bis hin zur Bewusstlosigkeit. Hydrazin reagiert rasch und teilweise heftig mit vielen Oxidationsmitteln. In der FIV ist ein Grenzwert von 5 µg/L angegeben.

### Kalium

Kalium kommt in der Natur als einwertiges Kation ( $K^+$ ) in Kaliumverbindungen vor. Für den Menschen ist Kalium ein essentielles Metall und spielt eine wichtige Rolle bei der Regulation des Membranpotentials. In unbelastetem Rohwasser stammt Kalium meist aus der Verwitterung von Kaliumglimmern, Kalifeldspat oder Kaliumsalzen wobei die Konzentrationen in der Regel gering sind. Der Einsatz von Düngemitteln und Deponiesickerwässern können für einen anthropogenen Eintrag sorgen. Zurzeit bestehen in der Schweiz keine gesetzlichen Höchstkonzentrationen für Kalium.

### Kupfer

Kupfer ist ein für den Menschen essentielles Spurenelement (Schwermetall) mit einer eher geringen akuten Toxizität. Chronische Vergiftungserscheinungen aufgrund einer überhöhten Kupferaufnahme treten erst bei Überschreitung der Ausscheidungskapazität der Leber auf; es können Leberentzündungen, Leberzirrhose und Blutarmut auftreten. Säuglinge und Kleinkinder reagieren besonders empfindlich auf ein Kupfer-Überangebot, da die volle diesbezügliche Leistungsfähigkeit der Leber erst im Laufe der ersten Lebensjahre erreicht wird. Frühkindliche Leberzirrhosen wurden bei Verwendung von stark kupferhaltigem Trinkwasser (>10 mg/l) beobachtet. Die stabilste Form im Wasser ist das  $Cu(II)$ . Unter normalen Umständen ist Kupfer kein Problemstoff im Rohwasser. Eine erhöhte Kupferkonzentration im Rohwasser weist meist auf eine Altlast im Einzugsgebiet hin. Im Verteilnetz kann die Konzentration unter Umständen (stehendes Wasser, Kupferleitungen, tiefer pH, etc.) signifikant ansteigen. Ab rund 2.5 mg Cu/L beginnt Wasser bitter zu schmecken. Im Mittel werden im Grundwasser der Schweiz rund 4 µg/L nachgewiesen, mit Höchstkonzentrationen bei rund 500 µg/L. Der Toleranzwert für Kupfer liegt in der Schweiz bei 1.5 mg/L.

### Magnesium

In der Natur kommt Magnesium meist in Form von Mineralien (Karbonate, Silikate, Chloride, Sulfate) oder gelöst als  $Mg^{2+}$  vor. Neben Calcium ist Magnesium der zweite härtebildende Bestandteil im Wasser. Magnesium ist ein essentielles Metall, hohe Konzentrationen können jedoch Auslöser für Durchfall und geschmackliche Veränderungen im Trinkwasser sein. In der FIV ist keine Höchstkonzentration für Magnesium festgelegt, auch die WHO nennt keine Werte bezüglich Magnesium.

*erhöhte Konzentration weist auf Altlast*

## 4. Wasserinhaltsstoffe

### Mangan

Mangan ist ein für den Menschen essentielles Element und kommt in der Umwelt sehr häufig zusammen mit Eisen vor. Die reduzierte Form (Mn(II)) ist gut wasserlöslich, weshalb Mangan vorwiegend in reduziertem Grundwasser auftritt. Im Kontakt mit Luftsauerstoff wird Mn(II) zu Mn(IV) oxidiert, was zu schwarzen Ausfällungen und Ablagerungen führt. In der Trinkwasseraufbereitung findet Mangan in Form von Kaliumpermanganat ( $\text{KMnO}_4$ ) als starkes Oxidationsmittel Anwendung. In der Schweiz ist der Einsatz von  $\text{KMnO}_4$  jedoch nur für die Entmanganung zugelassen. Mangan weist eine sehr geringe akute Toxizität auf, jedoch kann eine chronische Aufnahme hoher Mangankonzentrationen negative Auswirkungen auf das Nervensystem (Muskelkrämpfe, Psychosen, etc.) haben. Im Mittel liegen die Mangankonzentrationen im Grundwasser sehr tief, es werden aber auch Höchstwerte von  $> 800 \mu\text{g/L}$  gefunden. Der Toleranzwert für Mangan im Trinkwasser beträgt gemäss FIV  $0.05 \text{ mg/L}$ .

### Natrium

Natrium gehört zu den Alkalimetallen und kommt in Form von Salzen als  $\text{Na}^+$  vor.  $\text{Na}^+$  ist sehr gut wasserlöslich. Natürlicherweise sind die Natriumkonzentrationen im Rohwasser eher gering. Natrium gelangt aber aus verschiedenen anthropogenen Quellen (Tausalze, Abwasser aus Siedlung und Industrie, Deponiesickerwasser, etc.) ins Grund- und Oberflächenwasser. In der Wasseraufbereitung kann speziell der Ionentausch zu einer signifikanten Erhöhung der Natriumkonzentration führen. Ab einer Konzentration von rund  $200 \text{ mg/L}$  kann sich Natrium organoleptisch bemerkbar machen. In der FIV sind keine Werte für Natrium angegeben, das SLMB listet aber einen Erfahrungswert von  $20 \text{ mg/L}$  auf, die Trinkwasserrichtlinie der EU eine Höchstkonzentration von  $200 \text{ mg/L}$ .

### Nickel

Das Spurenelement Nickel gehört zu den Schwermetallen. Oral aufgenommene Nickelsalze können in grösseren Mengen unerwünschte Auswirkungen auf die Nieren, die Milz, die Lungen und das Knochenmark haben. Bei Nickel-sensibilisierten Personen mit einer allergischen Kontaktdermatitis können sich nach oraler Exposition mit Nickel Ekzeme entwickeln. In der Natur liegt Nickel meist zweiwertig in gemischten Erzen in Form von Sulfiden oder Arseniden vor. Nur gewisse Verbindungen wie beispielsweise Nickelchlorid oder Nickelcarbonat sind gut wasserlöslich. Anthropogen verursachte Nickeleinträge stammen meist aus diffusen Quellen wie Verbrennungsprozessen, aus der Metall- oder der Galvanikindustrie, aber auch aus phosphathaltigen Düngern. Organische Stoffe adsorbieren Nickel recht gut. Im Trinkwasser ist Nickel hauptsächlich ein Leitungs- und Armaturenproblem. Die FIV definiert keine Höchstkonzentration für Nickel, die Trinkwasserrichtlinie der EU nennt  $0.02 \text{ mg/L}$ , die der WHO  $0.07 \text{ mg/L}$ .

### Phosphat

Als Phosphate werden generell die Salze der Phosphorsäure ( $\text{H}_3\text{PO}_4$ ) bezeichnet. In der Natur kommen sie hauptsächlich als Phosphatminerale oder in organisch gebundener Form vor und sind im Boden nur sehr begrenzt mobil. Phosphat ist ein wichtiger Nährstoff für den Menschen und spielt eine tragende Rolle beim Aufbau der DNA sowie der Knochen. Ebenso ist Phosphat ein entscheidender Faktor im Energiestoffwechsel. In der Regel sind die natürlichen Konzentrationen an Phosphat in Grund- und Quellwasser  $< 0.01 \text{ mg P/L}$ , erhöhte Gehalte weisen auf eine Infiltration von Oberflächenwasser oder eine Kontamination mit Abwasser oder Düngemitteln hin. Der Toleranzwert für Phosphat liegt gemäss FIV bei  $1 \text{ mg/L}$  in warmem

Wasser (Zugabe von Korrosionsschutzmitteln) und berechnet als Phosphor. Das SLMB empfiehlt einen Wert von  $< 0.05$  mg/L im Rohwasser.

### Quecksilber

Quecksilber ist das einzige Metall, das unter Normbedingungen flüssig ist. In die Umwelt gelangt Quecksilber durch Prozesse wie die Kohleverbrennung, Zementproduktion, Chlorherstellung oder die Goldgewinnung. Problematisch für den Menschen sind sowohl die Quecksilberdämpfe sowie Quecksilber und Quecksilbersalze, die über Wasser und Nahrung aufgenommen werden. Eine besondere Bedeutung haben organische Verbindungen, z. B. Methylquecksilber, die von bestimmten Bakterien in belasteten Wässern produziert werden können. Methylquecksilber ist deutlich toxischer als anorganisches Quecksilber, weil es gut aus dem Magen-Darm-Trakt resorbiert wird, eine lange Halbwertszeit aufweist und sowohl die Blut-Hirn-Schranke als auch die Plazentaschranke leicht passiert. Methylquecksilber wirkt toxisch auf das Nervensystem, insbesondere auf das sich entwickelnde Gehirn (geistige und motorische Defizite beim Neugeborenen). Der Grenzwert für Trinkwasser beträgt  $1 \mu\text{g/L}$  sowohl in der FIV als auch in der Trinkwasserrichtlinie der WHO.

### Schwefel (Sulfat, Sulfid)

Schwefel ist für den Menschen ein essentielles Element und kommt häufig in Aminosäuren und Enzymen vor. In der Umwelt ist Schwefel sehr häufig in sulfidischen Mineralien (z. B. Pyrit) und Sulfaten (z. B. Gips) zu finden. Sulfat ( $\text{SO}_4^{2-}$ ) gelangt natürlich durch Lösung von Sulfatmineralien, die Oxidation sulfidischer Mineralien sowie durch den Abbau von Biomasse ins Rohwasser. Anthropogen bedingt wird Sulfat über Düngemittel, nasse Deposition (saurer Regen), Abwasser und

Deponiesickerwässer eingetragen. Die FIV nennt keine Höchstkonzentration für Sulfat im Trinkwasser. Im SLMB ist aber für anthropogen unbelastetes Trinkwasser ein Wert von  $10-50$  mg/L angegeben, für belastete Wässer von  $> 200$  mg/L. Dieser Wert basiert auf der Limitierung der Korrosion durch Sulfat. Für das Grundwasser wird in der GSchV eine numerische Anforderung an das Rohwasser von  $40$  mg/L gestellt. Sulfid wird unter anaeroben Bedingungen bei der Reduktion von Sulfat zu Schwefelwasserstoff ( $\text{H}_2\text{S}$ ) gebildet. Dies führt zu einer geruchlichen Beeinträchtigung (faule Eier). Gemäss FIV darf Sulfid im Trinkwasser organoleptisch nicht nachweisbar sein, auf eine Konzentrationsangabe wird verzichtet.

### Selen

Das Halbmetall Selen ist zwar ein essentielles Spurenelement, wird aber in hohen Dosen als giftig eingestuft. Wasserlöslich sind nur gewisse Selenverbindungen wie beispielsweise die Selensäure. Selenvergiftungen sind selten und führen zu Erbrechen, Magenschmerzen oder Atembeschwerden. Der Grenzwert für Selen beträgt gemäss FIV  $0.01$  mg/L, auch die WHO nennt denselben Richtwert.

### Silicium

Das Element Silicium zählt zu den Halbmetallen und ist das zweithäufigste Elemente der Erde. Es ist in sehr vielen Mineralien zu finden, im Wasser kommt Silicium hauptsächlich in Form von gelöster Kieselsäure ( $\text{Si}(\text{OH})_4$ ) vor. Die Löslichkeit von Siliciumverbindungen ist sehr gering. Die im Wasser vorkommende Kieselsäure wird als für den Menschen unbedenklich eingestuft. Natürliche Siliciumkonzentrationen können durch anthropogene Einträge aus Deponiesickerwasser, der metallverarbeitenden, der chemischen sowie der elektronischen Industrie erhöht werden. Weder die FIV noch die Richt-

*Korrosion durch Sulfat*



## 4. Wasserinhaltsstoffe

linie der WHO listet Höchstwerte für Silicium auf.

### **Stickstoff (Ammonium/Ammoniak, Nitrat, Nitrit)**

In aquatischen Systemen sind vor allem die Verbindungen Ammonium/Ammoniak, Nitrat und Nitrit von zentraler Bedeutung.

Ammonium/Ammoniak in der Umwelt stammt aus natürlichen Stoffwechselprozessen, aus der Landwirtschaft sowie aus chemischen Prozessen. Der natürliche Gehalt in oxidiertem Grundwasser ist eher gering ( $\mu\text{g/L}$  Bereich), während für reduzierte Grundwässer die Konzentrationen wesentlich höher ( $\text{mg/L}$  Bereich) liegen können. Erhöhte Konzentrationen an Ammonium/Ammoniak können ein Indikator für mögliche Verschmutzungen durch Abwasser oder landwirtschaftliche Nutzung sein. Die gesundheitliche Bedeutung von Ammonium im Trinkwasser ist eher gering, toxische Effekte treten erst bei Dosen von  $> 200 \text{ mg/kg}$  Körpergewicht auf. Wichtig in der Trinkwasseraufbereitung ist die Ammoniumkonzentration jedoch bei einer Chlorung, wo Chloramine gebildet werden, welche eine wesentlich geringere desinfizierende Wirkung haben. Bei einem Masseverhältnis Chlor:Ammonium von 6 geht die desinfizierende Wirkung vollständig verloren. Kritisch einzustufen sind auch die geschmackliche Beeinträchtigung und die Bildung von Nitrit. Die FIV nennt einen Toleranzwert für Ammonium von  $0.1 \text{ mg/L}$  für jedes Trinkwasser mit Ausnahme des reduzierten Typus ( $0.5 \text{ mg/L}$ ). Nitrat wird in landwirtschaftlich aktiven und dicht besiedelten Regionen häufig in nennenswerten Konzentrationen ( $\geq 10 \text{ mg/L}$ ) im Rohwasser (Grund- und Oberflächenwasser) festgestellt, während Nitrit natürlicherweise nur

in sehr geringen Konzentrationen in der Umwelt vorkommt. Hauptquellen sind biologische Prozesse, der Einsatz von Düngemitteln und Abwasser aus Siedlung und Industrie. Erhöhte Nitratgehalte sind demnach in den meisten Fällen ein Hinweis auf anthropogene Beeinflussung. Nitrit wird vor allem unter anaeroben Bedingungen bei der Nitratreduktion (mikrobiologisch) sowohl in Umweltsystemen als auch endogen gebildet. Auch die Nitrifikation im Verteilnetz führt zur Bildung von  $\text{NO}_2^-$ . Nitrit ist toxisch und kann vor allem bei Kindern Methämoglobinämie auslösen. Ebenso wird vermutet, dass Nitrit an der Bildung von krebserregenden Nitrosaminen beteiligt ist. Die Bedeutung dieser Reaktionen ist aber noch immer unklar. Der Toleranzwert für Nitrat liegt gemäss FIV bei  $40 \text{ mg/L}$  und für Nitrit bei  $0.1 \text{ mg/L}$ .

### **Zink**

Zink ist ein Metall und gehört zu den essentiellen Spurenelementen für den Menschen, wird aber als umweltgefährlich eingestuft. Obwohl die natürliche Belastung in der Regel gering ist, können sich die Konzentrationen im Leitungssystem aufgrund von Lösungsprozessen (verzinkte Leitungen) deutlich erhöhen. In der Schweiz liegen die Mittelwerte bei rund  $30 \mu\text{g/L}$ , mit gemessenen Höchstwerten um  $4.5 \text{ mg/L}$ . Der Toleranzwert gemäss FIV liegt bei  $5 \text{ mg/L}$ .

### **Natürliche und synthetische, organische Verbindungen**

Organische Substanzen im Trinkwasser können sowohl durch natürliche Prozesse (Stoffwechselprozesse, biologischer Abbau, etc.) als auch aufgrund anthropogener Einträge (Abwasser, Industrie, Verbrennungsprozesse, etc.) ins Wasser gelangen. Die Vielfalt der organischen Verbindung macht eine Einzelstoffbetrachtung zu umfangreich und somit werden, mit wenigen Ausnahmen, häufig ganze Stoffgruppen betrachtet.

#### **Acrylamid**

Acrylamid im Trinkwasser stammt hauptsächlich aus dem Einsatz von Polyacrylamiden als Flockungshilfsmittel. Es gilt als potentiell krebserregend. Mit den herkömmlichen Verfahren der Trinkwasseraufbereitung kann Acrylamid nicht aus dem Wasser entfernt werden. Die Konzentration muss demnach über den Gehalt im Flockungshilfsmittel und über dessen Zudosierung kontrolliert werden. In der FIV ist keine Höchstkonzentration für Acrylamid im Trinkwasser festgelegt, die WHO nennt einen Wert von 0.5 µg/L.

#### **Adsorbierbare organische Halogene (AOX)**

AOX ist ein Summenparameter für die an Aktivkohle adsorbierbaren organischen Chlor-, Brom- und Iodverbindungen. Der Parameter ermöglicht begrenzte Aussagen über die Belastung einer Probe mit halogenorganischen Verbindungen, jedoch nicht über die toxikologische Bedeutung dieser Belastung. So werden sowohl praktisch unschädliche Verbindungen als auch hochtoxische (Dioxine, Furane, PCB, DDT) erfasst. Die toxischen Stoffe sind

häufig krebserregend, biologisch nur schlecht abbaubar und reichern sich aufgrund ihrer Adsorptionsneigung in Organismen an (Bioakkumulation). Die anthropogenen Einträge stammen größtenteils aus industriellen Abwässern und Altlasten, sowie aus dem Einsatz halogenhaltiger Pestizide. Die GSchV nennt eine numerische Anforderung für AOX an das Rohwasser von 0.01 mg/L, berechnet und angegeben in Chloräquivalenten.

#### **Ethylendiamintetraessigsäure/Nitri- lotriessigsäure (EDTA/NTA)**

EDTA ist einer der am häufigsten verwendeten Komplexbildner (Detergentien, Lebensmittel, Kosmetika, industrielle Reinigung, Papierindustrie, etc.) und gelangt fast ausschliesslich über das Abwasser in die Umwelt. Unter normalen Umweltbedingungen ist EDTA nur schwer abbaubar und adsorbiert bei neutralem pH kaum an mineralische Oberflächen (hohe Mobilität im Grundwasser). Die Toxizität für den Menschen ist sehr gering und beruht auf der Komplexierung von essentiellen Metallen wie beispielsweise Zink. In der FIV sind ein Toleranzwert von 0.005 mg/L sowie ein Grenzwert von 0.2 mg/L aufgeführt. Auch NTA ist ein starker Komplexbildner und bildet in wässriger Lösung stabile Komplexe mit Metallionen. Eingesetzt wird NTA teilweise in Waschmitteln zur Enthärtung und kann in der Regel gut abgebaut werden. Dies kann zu einer ungewollten Mobilisierung von Schwermetallen führen. In Gewässern liegt NTA hauptsächlich in Form von Calcium- oder Eisenkomplexen vor. NTA steht im Verdacht, möglicherweise indirekt krebserregend zu sein. Die FIV führt einen Toleranzwert von 3 µg/L sowie einen Grenzwert von 0.2 mg/L auf.

*Komplexbildner*

*Flockungshilfsmittel*

## 4. Wasserinhaltsstoffe

### Flüchtige halogenierte Kohlenwasserstoffe (FHKW)

Bei den FHKW soll hier unterschieden werden zwischen Stoffen, welche während der Trinkwasseraufbereitung gebildet werden (z. B. THM), und solchen, die aus industriellen Anwendungen stammen (z. B. PER, Vinylchlorid oder Trichlormethan). In der FIV ist ein Toleranzwert für die Summe aller FHKW von 0.02 mg Chlor/L aus der Aufbereitung und von 8 µg/L aus einer Umweltkontamination stammend, festgelegt. Trihalomethane (THM) entstehen hauptsächlich bei der Chlorung. Verstärkt wird die Bildung von THM durch bromid- oder iodidhaltiges Rohwasser. Diese Trihalomethane gelten als potentiell krebserregend. Für die 4 chlor- und bromhaltigen THM gibt es folgende Grenzwerte: Trichlormethan ( $\text{CHCl}_3$ ): 0.04 mg/L, Bromdichlormethan ( $\text{CHCl}_2\text{Br}$ ): 0.015 mg/L, Dibromchlormethan ( $\text{CHClBr}_2$ ): 0.1 mg/L, Bromoform ( $\text{CHBr}_3$ ): 0.1 mg/L. Tetrachlorethen (PER) gehört zu den leichtflüchtigen chlorierten Kohlenwasserstoffen (LCKW) und wird vorwiegend zu Entfettungs- und Reinigungsprozessen eingesetzt. PER ist nicht brennbar, weist eine höhere Dichte als Wasser auf (DNAPL) und ist biologisch nur sehr langsam abbaubar. Aufgrund der grossen eingesetzten Stoffmengen in Industrie und Gewerbe gehört PER zu den wichtigsten Kontaminanten im Grundwasser. Der reduktive Abbau von PER geschieht über die Kette Trichlorethen (TRI) - Dichlorethen - Vinylchlorid - Ethen/Ethan. Wie PER sind die chlorierten Zwischenprodukte toxisch und gelten als potentiell krebserregend. Das leichtflüchtige Vinylchlorid weist dabei die höchste Toxizität dieser Verbindungen auf. In der FIV sind für diese Stoffe folgende Grenzwerte aufgeführt:

PER 0.04 mg/L, Trichlorethen 0.07 mg/L und 1,1-Dichlorethen 0.03 mg/L.

Eine Reihe weiterer FHKW aus industriellen Anwendungen sind in der FIV mit Grenzwerten versehen. Dies sind namentlich: 1,2-Dichlorethan mit 3 µg/L, 1,1-Dichlorethen mit 0.03 mg/L, 1,2-Dichlorethen mit 0.05 mg/L, Dichlormethan mit 0.02 mg/L, Tetrachlormethan mit 2 µg/L und 1,1,1-Trichlorethan mit 2 mg/L.

### Grenzflächenaktive Stoffe

Grenzflächenaktive Stoffe sind organische Verbindungen (z. B. Tenside) mit einem hydrophilen (wasserlöslichen) und einem hydrophoben (wasserabstossenden) Teil. Diese werden sowohl natürlich (z. B. Lecithin) als auch synthetisch gebildet. Sie haben die Eigenschaft, sich an Grenzflächen stark anzureichern und so die Grenzflächenspannung heraufzusetzen. Der Toleranzwert für die Summe der grenzflächenaktiven Stoffe beträgt gemäss FIV 0.1 mg/L.

### Kohlenwasserstoffe

Die Kohlenwasserstoffe (KWS) beinhalten sämtliche Verbindungen, die nur aus Kohlenstoff und Wasserstoff bestehen. Die C-Atome können dabei in Ketten (z. B. Alkane, Alkene, Alkine) oder ringförmigen (z. B. Aromate) Strukturen vorliegen und kommen vorwiegend als Bestandteil von Erdgas, Erdöl oder Kohle vor. In der Regel sind KWS in Wasser unlöslich. Einige KWS sind als gesundheitsschädlich und krebserregend bekannt (z. B. Polyzyklische Aromatisierte Kohlenwasserstoffe). In der FIV sind für Kohlenwasserstoffe (KWS) folgende allgemeinen Toleranzwerte aufgeführt: für wasserlösliche KWS 1 µg/L und für schwerlösliche KWS 20 µg/L.

*MTBE organoleptischen Schwelle von 2 - 50 µg/L*

### **Methyltert-Butylether (MTBE)**

MTBE ist eine farblose, leicht flüchtige und gut lösliche Flüssigkeit mit einer tiefen organoleptischen Schwelle von 2 - 50 µg/L. Die Hauptanwendung liegt im Ersatz von Tetraethylblei in Kraftstoffen (Antiklopfmittel). Die Substanz weist zwar eine geringe akute Toxizität auf, ist aber potentiell krebserregend. In der Luft wird MTBE innert Tagen abgebaut, während die Halbwertszeit im Grundwasser mehrere Jahre betragen kann (biologisch schwer abbaubar). Verschärft wird dieses Problem durch die gute Wasserlöslichkeit und die hohe Mobilität im Boden. MTBE kann häufig im Grundwasser nachgewiesen werden, dieses stammt hauptsächlich aus Leckagen an Tanks und Leitungen, aber auch zu einem gewissen Teil aus der Luftdeposition. In der Schweiz existiert zurzeit nur ein Indikatorwert aus der Wegleitung Grundwasserschutz von 2 µg/L. Die WHO listet eine Höchstkonzentration von 10 µg/L auf.

### **Monozyklische aromatische Kohlenwasserstoffe (MAKW)**

MAKW sind hauptsächlich in Treibstoffen wie Benzin, Diesel, Kerosin oder Heizöl zu finden und werden häufig als Ausgangsstoffe für chemische Synthesen verwendet. Diese Stoffe sind leicht flüchtig und weisen nur eine geringe Löslichkeit auf. Sie verteilen sich daher nicht im gesamten (Grund-)Wasserkörper, sondern befinden sich meist im Bereich des (Grund-)Wasserspiegels und der ungesättigten Zone. Die wichtigsten Stoffe sind dabei Benzol, Toluol, Ethylbenzol und Xylol (BTEX). Speziell Benzol wirkt blutschädigend und krebserregend. Viele der MAKW sind unter aeroben und teilweise auch unter anaeroben Verhältnissen

biologisch abbaubar. Die dominanten Eintragswege sind der unsachgemäße Umgang, die falsche Entsorgung sowie Leckagen an Tank- und Leitungsanlagen. Für Benzol ist in der FIV ein Toleranzwert von 1 µg/L festgelegt. In der GSchV wird eine numerische Anforderung an Rohwasser von 1 µg/L je Einzelstoff gestellt.

### **Phenole**

Zur Gruppe der Phenole gehören Verbindungen, die aus einem aromatischen Ring und einer oder mehreren angehängten Hydroxylgruppen (-OH) bestehen. Bekannte Vertreter der Phenole sind Verbindungen wie Salicylsäure, Adrenalin, Tannine und viele Aromastoffe (z. B. Vanillin oder Zimtaldehyd). Viele Phenolverbindungen sind gering wasserlöslich und weisen eine schlechte biologische Abbaubarkeit auf. Sie werden als stark wassergefährdend eingestuft und können bereits in sehr geringen Konzentrationen den Geschmack beeinträchtigen. Die FIV listet zwei verschiedene Werte für Phenole auf, einen Toleranzwert von 5 µg/L je Substanz, und zudem einen Toleranzwert für wasserdampfgefährliche Phenole von 10 µg/L, berechnet als Phenol. In der Trinkwasseraufbereitung spielen besonders auch die bei der Chlorung phenolhaltiger Rohwässer entstehenden Chlorphenole eine wichtige Rolle. Diese machen das Wasser aus organoleptischer Sicht ungeniessbar. Speziell das auch in der Holz- und Textilbearbeitung eingesetzte Pentachlorphenol (PCP) ist schwer abbaubar und wirkt stark toxisch. Gemäss WHO ist PCP als potentiell krebserregend eingestuft. Im SLMB wird daher ein separater Erfahrungswert für Chlorphenole von 1 µg/L genannt.

*In der Trinkwasseraufbereitung spielen Chlorphenole eine Rolle*

## 4. Wasserinhaltsstoffe

### Polycyclische aromatische Kohlenwasserstoffe (PAK)

PAK sind meist neutrale, unpolare organische Verbindungen, die aus zwei oder mehr verbundenen Benzolringen bestehen. Sie sind gering wasserlöslich und mit zunehmender Molekülgrösse immer schwerer flüchtig. Fast alle PAK sind krebserregend und toxisch. PAK entstehen durch unvollständige Verbrennungsprozesse und gelangen durch Deposition in den Boden und ins Wasser. In der FIV ist ein Toleranzwert für die Summe der PAK von 0.2 µg/L angegeben. Diese Summe umfasst die Stoffe Benzo(a)pyren, Fluoranthen, Benzo(b)fluoranthen, Benzo(k)fluoranthen, Benzo(ghi)perylene und Indenol(1,2,3-cd)pyren. Die GSchV stellt eine numerische Anforderung für PAK an das Rohwasser von 0.1 µg/L je Einzelstoff.

### Pestizide

Der Begriff Pestizide umfasst eine grosse Gruppe von chemischen Verbindungen mit sehr unterschiedlichen Eigenschaften, die als Pflanzenschutz- oder Schädlingsbekämpfungsmittel eingesetzt werden. Die Gesetzgebung betrachtet keine Einzelverbindungen, sondern legt in der FIV lediglich einen Toleranzwert für alle Pestizide, deren Metabolite sowie Abbau- und Reaktionsprodukte von 0.1 µg/L je Einzelstoff und von 0.5 µg/L für die Summe aller organischer Pestizide fest. Die Pestizide können aufgrund ihrer Zielorganismen weiter unterteilt werden in:

### Akarizide

Mittel gegen Milben und Spinnentiere. Sie werden vor allem in der Landwirtschaft im Obst- und Weinbau eingesetzt.

### Algizide

Mittel gegen Algen. Sind häufig dieselben Wirkstoffe wie in Herbiziden (beispielsweise Atrazin oder Diuron). Algizide werden speziell in Siedlungsgebieten als Schutz von Fassadenanstrichen oder Dämmmaterialien eingesetzt. Ein direkter Eintrag in Oberflächengewässer findet durch Schutzanstriche von Booten statt.

### Bakterizide

Mittel gegen Bakterien. Hierbei handelt es sich hauptsächlich um Antibiotika und Desinfektionsmittel.

### Fungizide

Mittel gegen Pilze und pilzliche Krankheitserreger. Einige Wirkstoffgruppen wie z. B. Triazole oder Benzimidazole sind sehr gut wasserlöslich und stellen somit eine besondere Gefahr für Grund- und Oberflächenwässer dar.

### Herbizide

Mittel gegen Unkräuter und Ungräser. Die Wirkung basiert auf unterschiedlichen Mechanismen wie z. B. die Funktion als Wachstumshormone, Photosynthesehemmer oder Keimhemmer. Die einzelnen Substanzen weisen sehr unterschiedliche chemische Eigenschaften auf und zeigen somit auch ein differenziertes Umweltverhalten. Beispiele für Stoffklassen bei den Herbiziden sind Anilide (stark toxisch), Sulfonate (persistent und gut wasserlöslich) oder Triazine (schlechte Adsorption, häufiger Nachweis in Schweizer Grundwässern).

### Insektizide

Mittel zur Bekämpfung von Insekten und deren Entwicklungsstadien. Insektizide können in Frass-, Kontakt- und Atemgifte unterteilt werden und wirken meist als Nervengifte. Zu den bekanntesten Stoffklassen gehören die Carbamate (toxisch, umweltpersistent über mehrere Wochen), organische Phosphorsäureester

*Algizide*

*Bakterizide*

*Fungizide*

*Herbizide*

*Insektizide*

*Pestizide umfassen eine grosse Gruppe von chemischen Verbindungen*

*Akarizide*

(leicht abbaubar, hohe Toxizität) oder Pyrethroide (hohe Fischtoxizität).

*Molluskizide*

**Molluskizide**

Mittel gegen Schnecken. Molluskizide enthalten häufig Aluminiumsulfat oder Eisenphosphat.

**Nematizide**

*Nematizide*

Mittel gegen Fadenwürmer (Nematoden) und andere im Boden lebenden Schädlinge. Die eingesetzten Substanzen sind entweder gasförmig oder weisen eine gute Wasserlöslichkeit auf.

**Tabelle 4 Überblick über die in der Schweiz am häufigsten nachgewiesenen Pestizide (inklusive Abbauprodukte) sowie Konzentrationsbereiche, in welchen sie in Grund- und Oberflächenwasser gefunden werden.**

Stoffgruppe		Konzentrationsbereiche CH [µg/L]			Aufretenshäufigkeit CH		
		Grundwasser	Oberflächenwasser	Trinkwasser	Grundwasser (NAQUA)	Oberflächenwasser	
					[%]	von n Proben	[%]
Alachlor	Anilide	< 0.005 - 0.05	< 0.01 - 0.03	-	0.4	270	-
Aminomethylphosphonsäure (AMPA)	Metabolit Glyphosat	< 0.05	-	< 0.04	-	-	-
Atrazin	Triazine	< 0.002 - 0.97	< 0.009 - 1.5	< 0.007 - 0.12	33.0	1114	22.0
Bentazon	-	< 0.01 - 0.06	< 0.01 - 0.64	-	13.0	15	2.0
Chlortoluron	Phenylharnstoffe	< 0.002 - 0.199	-	-	0.4	510	-
Cyanazin	Triazine	< 0.001 - 0.138	-	-	4.0	421	-
Desethylatrazin	Metabolit Atrazin	< 0.002 - 1.17	< 0.001 - 0.3	< 0.005 - 0.22	39.7	1114	12.0
Desethylterbutylazin	Metabolit Terbutylazin	< 0.005 - 0.013	-	-	68.8	32	-
Desisopropylatrazin	Metabolit Atrazin	< 0.005 - 0.147	-	< 0.02	7.2	1101	-
Diuron	Phenylharnstoffe	< 0.001 - 0.57	< 0.001 - 1.1	-	1.1	981	1.0
Glyphosat		-	-	< 0.03	-	-	-
Isoproturon	Phenylharnstoffe	< 0.001 - 0.38	< 0.04 - 10.0	-	0.4	970	12.0
Mecoprop (MCP)	Phenoxycarbonsäure	< 0.01	< 0.001 - 3.9	-	0	15	33.0
Metolachlor	Anilide	< 0.002 - 0.16	< 0.001 - 1.3	-	2.4	595	3.0
Metolachlor ESA/OXA	Metabolit Metolachlor	< 0.002 - 0.48/0.15	-	-	47/18	-	-
Simazin	Triazine	< 0.002 - 0.128	< 0.001 - 0.6	-	18.0	1114	2.0
Sulcotrion	Triketone	< 0.05	-	-	0	217	-
Terbutylazin	Triazine	< 0.001 - 0.13	< 0.001 - 1.2	-	2.9	1114	1.0
Konzentrationsbereiche Grundwasser (NAQUA):		2002 - 2003, 2006					
Häufigkeit Grundwasser (NAQUA):		2003					
Konzentrationsbereiche Oberflächengewässer (AG, ZH):		1999 - 2003					
Häufigkeit Oberflächengewässer (AG, ZH):		1999 - 2003					
Konzentrationsbereich Trinkwasser (AG, BE, SH, TG, ZH):		2005 - 2007					

#### 4. Wasserinhaltsstoffe

In den folgenden Tabellen 5 und 6 sind die Wasserinhaltsstoffe den gängigen Wasseraufbereitungsverfahren gegenüber gestellt und bezüglich Abtrennung sowie oxidativer Transformation beurteilt.

**Tabelle 5: Zusammenstellung der Wasserinhaltsstoffe und der Verfahren zu deren Abtrennung**

Haupt- und Nebenbestandteile	Abtrennung									
	SED	SF	LSF	AK	MF	UF	NF	RO	IT	
Arsen	-	++*	++*	-	+/-*	+	++*	++*	++	
Blei	Im Rohwasser meist unbedeutend (Leistungs- und Armaturenproblem)									
Brom										
<i>Bromid</i>	-	-	-	-	-	-	-	++	-	
<i>Bromat</i>	Minimierung der Bildung bei der Aufbereitung									
Cadmium	+/-*	++*	++*	-	-	-	-	+	++	
Calcium	-	-	-	-	-	-	+	++	++	
Chlor										
<i>Chlorid</i>	-	-	-	-	-	-	-	++	+	
<i>Chlorit, Chlorat</i>	Minimierung der Bildung bei der Aufbereitung									
Chrom	-	-	-	-	-	-	-	+	++	
Cyanid	-	-	-	-	-	-	-	+	-	
DOC	-	+/-#	+#	++ <sup>s</sup>	-	-	+	++	-	
Eisen	+/- <sup>Δ</sup>	+ <sup>Δ</sup>	++ <sup>Δ</sup>	-	+ <sup>Δ</sup>	+ <sup>Δ</sup>	+ <sup>Δ</sup>	++	+/-	
Fluor	-	-	-	+	-	-	+/-	+	+	
Hydrazin	-	-	-	-	-	-	-	+/-	-	
Kupfer	Im Rohwasser meist unbedeutend (Leistungs- und Armaturenproblem)									
Magnesium	-	-	-	-	-	-	+	++	++	
Mangan	+/- <sup>Δ</sup>	+ <sup>Δ</sup>	+ <sup>Δ</sup>	-	+ <sup>Δ</sup>	+ <sup>Δ</sup>	+/- <sup>Δ</sup>	+	+	
Nickel	Im Rohwasser meist unbedeutend (Leistungs- und Armaturenproblem)									
Quecksilber	-	-	-	+/-	-	-	+/-	++	-	
Schwefel										
<i>Sulfide</i>	-	-	-	-	-	-	-	+	-	
<i>Sulfat</i>	-	-	-	-	-	-	+	++	++	
Silicium	-	-	-	-	-	-	-	++	-	
Stickstoff										
<i>Ammonium</i>	-	+/-	+ <sup>o</sup>	+ <sup>o</sup>	-	-	-	++	+	
<i>Nitrat</i>	-	-	-	-	-	-	+	++	++	
<i>Nitrit</i>	-	-	-	-	-	-	+	++	+	
Zink	Im Rohwasser meist unbedeutend (Leistungs- und Armaturenproblem)									

Tabelle 5 (Fortsetzung): Zusammenstellung der Wasserinhaltsstoffe und der Verfahren zu deren Abtrennung

organische Verbindungen Haupt- und Nebenbestandteile	Abtrennung								
	SED	SF	LSF	AK	MF	UF	NF	RO	IT
Acrylamid	-	-	-	-	-	-	-	+	-
AOX	-	-	-	++ <sup>§</sup>	-	-	-	++	-
EDTA/NTA	-	-	-	-	-	-	-	++	-
FHKW									
<i>Bromoform</i>	-	-	-	+/-	-	-	-	++	-
<i>Bromdichlormethan</i>	-	-	-	+/-	-	-	+	++	-
<i>Dibromchlormethan</i>	-	-	-	+/-	-	-	+	++	-
<i>Chloroform</i>	-	-	-	+/-	-	-	+	++	-
<i>Tetrachlorethen</i>	-	-	-	+	-	-	+	++	-
<i>Trichlorethen</i>	-	-	-	+	-	-	+	++	-
<i>Dichlorethen</i>	-	-	-	+	-	-	+	++	-
Grenzflächenaktive Stoffe	-	-	-	-	-	-	++	++	-
MTBE	-	-	-	-	-	-	-	+	-
Benzol	-	-	-	++	-	-	+	++	+
Phenole	-	-	-	++	-	-	+	++	+
PAK	-	-	-	++	-	-	+	++	+
Pestizide	hängt stark von Stoffeigenschaften wie Wasserlöslichkeit, Polarität, etc. ab								
Pharmazeutika	hängt stark von Stoffeigenschaften wie Wasserlöslichkeit, Polarität, etc. ab								
SED	: Sedimentation			++ : gut geeignet					
SF	: Schnellfiltration			+ : geeignet					
LSF	: Langsamsandfiltration			+/- : bedingt geeignet					
AK	: Aktivkohle			- : ungeeignet					
MF	: Mikrofiltration			# : biol. abbaubarer Teil					
UF	: Ultrafiltration			§ : Adsorption auf frischer AK					
NF	: Nanofiltration			* : mit Flockung/Fällung					
RO	: Umkehrosmose			° : biologisch aktiv					
IT	: Ionentausch			Δ : mit Oxidation					



## 4. Wasserinhaltsstoffe

Tabelle 6: Zusammenstellung der Wasserinhaltsstoffe und der Verfahren zur oxidativen Transformation

Haupt- und Nebenbestandteile	Oxidative Transformation									
	Chlor	ClO <sub>2</sub>	O <sub>3</sub>	UV	AOP					
Arsen (III)	++	+	++	-	++					
Blei	Leitungs- und Armaturenproblem									
Brom	Minimierung der Bildung bei der Aufbereitung									
<i>Bromid</i>						+	-	+	-	++
<i>Bromat</i>										
Cadmium	-	-	-	-	-					
Calcium	-	-	-	-	-					
Chlor	Minimierung der Bildung bei der Aufbereitung									
<i>Chlorid</i>						-	-	-	-	-
<i>Chlorat</i>										
<i>Chlorit</i>	+	-	++	-	++					
Chrom (VI)	-	-	-	-	-					
Cyanid	++	+	++	-	++					
DOC	+	+	++	-	++					
Eisen (II)	++	++	++	-	++					
Fluor										
<i>Fluorid</i>						-	-	-	-	-
Hydrazin	+	*	++	-	++					
Kupfer	Leitungs- und Armaturenproblem									
Magnesium	-	-	-	-	-					
Mangan	+/-°	++	++	-	++					
Nickel	Leitungs- und Armaturenproblem									
Quecksilber	-	-	-	-	-					
Schwefel										
<i>Sulfid</i>						++	++	++	-	++
<i>Sulfat</i>	-	-	-	-	-					
Silicium	-	-	-	-	-					
Stickstoff										
<i>Ammonium</i>						++	-	-	-	-
<i>Nitrat</i>						-	-	-	-	-
<i>Nitrit</i>	++	+	++	-	++					
Zink	Leitungs- und Armaturenproblem									

Tabelle 6 (Fortsetzung): Zusammenstellung der Wasserinhaltsstoffe und der Verfahren zur oxidativen Transformation

organische Verbindungen Haupt- und Nebenbestandteile	Oxidative Transformation				
	Chlor	ClO <sub>2</sub>	O <sub>3</sub>	UV	AOP
Acrylamid	-	-	-	-	-
AOX					
EDTA/NTA	Abhängig vom gebildeten Komplex				
FHKW					
<i>Bromoform</i>	-	-	-	-	+/-
<i>Bromdichlormethan</i>	-	-	-	-	+/-
<i>Dibromchlormethan</i>	-	-	-	-	+/-
<i>Chloroform</i>	-	-	-	-	+/-
<i>Tetrachlorethen</i>	-	-	-	-	+/-
<i>Trichlorethen</i>	-	-	+/-	-	+
<i>Dichlorethen</i>	-	-	+	-	++
Grenzflächenaktive Stoffe					
MTBE	-	-	-	-	+
Benzol	-	-	+/-	-	++
Phenole	+	++	++	+/-	++
PAK	+/-	*	+	*	++
Pestizide	hängt stark von Stoffeigenschaften ab				- bis ++
Pharmazeutika	hängt stark von Stoffeigenschaften ab				- bis ++
++ : gut oxidiert					
+ : oxidiert					
+/- : bedingt oxidiert					
- : nicht oxidiert					
* : keine Angaben					
° : nur auf Oberfläche (heterogen)					

# 5. Verfahren in der Trinkwasseraufbereitung

## Einleitung

Die Beurteilung des Rohwassers bezüglich Herkunft, Inhaltsstoffe und Qualität (Voruntersuchungen) legt zusammen mit den gesetzlichen Anforderungen (FIV, HyV, etc.) an das Produkt Trinkwasser die Bedingungen fest, welche eine Aufbereitungsanlage erfüllen muss.

Die einzelnen Verfahren ihrerseits unterliegen jeweils spezifischen Randbedingungen, die eingehalten werden müssen, um eine einwandfreie Funktion gewährleisten zu können. All diese Aspekte müssen in die Beurteilung und Evaluation von Verfahren oder Verfahrensketten einfließen. Aufgrund dieser ganzheitlichen Beurteilung können neue Anlagen und Verfahrensketten eruiert oder bereits bestehende sinnvoll an die neuen Erfordernisse angepasst und ergänzt werden.

Die Verfahren zur Trinkwasseraufbereitung können nach ihrer Funktion aufgeteilt werden in Verfahren zur Vorbehandlung, Filtration, Desinfektion/Oxidation sowie weitergehende Behandlung des Rohwassers. Nachfolgend werden die einzelnen Verfahren steckbriefartig beschrieben.

Tabelle 7 gibt einen Überblick über die beschriebenen und heute in der Schweiz eingesetzten und bewilligten Verfahren in der Trinkwasseraufbereitung.

**Tabelle 7: Übersicht über die Anwendung der detailliert beschriebenen Verfahren. Diese Zusammenstellung zeigt die Prozesse, welche mit dem jeweiligen Verfahren beeinflusst werden, macht aber keine Bewertung, wie effizient diese im konkreten Fall sind. Sie dient lediglich der Auswahl möglicher Verfahren, detaillierte Abklärungen über die Eignung für die Behandlung eines bestimmten Rohwassers bleiben unerlässlich (°: in Kombination beispielsweise mit H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>)**

<b>Verfahrens- Anwendungen</b>	Entfernung von Partikel	Entfernung gelöster Stoffe	Entfernung Mikroorganismen	biologischer Abbau	Adsorption gel. Stoffe	Desinfektion	Oxidation	Koagulation	Entf. Härtebildner	Nitratelimination	Entsalzung	pH-Ausgleich	<b>Grösse Wasserversorgung (++ gross, + mittel, - klein)</b>
Flockung/Fällung	x	x	x					x					-/+ / ++
Sedimentation	x												+ / ++
Langsamsandfiltration	x	x	x	x									+ / ++
Schnellfiltration	x		x	x									- / + / ++
Membranfiltration	x	x	x						x	x	x		- / + / ++
Chlorung						x	x						- / + / ++
Chlordioxid						x	x						+ / ++
Ozonung						x	x	x					+ / ++
UV-Verfahren						x	x <sup>°</sup>						- / + / ++
Aktivkohle	x			x	x								- / + / ++
Ionentausch		x			x				x	x	x		- / +
Entsäuerung/Enthärtung		x							x			x	- / + / ++
Weitergehende Oxidation							x						- / + / ++

## 5. Verfahren in der Trinkwasseraufbereitung

### Vorbehandlung

Stark belastetes Rohwasser oder Rohwasser mit stark schwankender Qualität verlangt häufig nach einer Vorbehandlung, um die Voraussetzungen für das einwandfreie Funktionieren der Aufbereitungskette zu schaffen. Die Vorbehandlung besteht im Wesentlichen aus der Abtrennung grober suspendierter Partikel und der Reduktion einzelner gelöster Stoffe.

### Verfahren: Flockung und Fällung

#### **Einsatzbereich: Koagulation partikulärer und Fällung gelöster oder kolloidaler Stoffe**

Die Flockung eignet sich zur Unterstützung der Elimination fein verteilter, schwer entfernbarer kolloidaler Partikel. Diese werden in grössere Agglomerate überführt und können durch Sedimentation, Flotation oder Filtration effizienter entfernt werden. Aus verfahrenstechnischen Gründen wird der Prozess der Flockung meist in eine kombinierte Flockungs- und Sedimentationsanlage oder eine Flockungsfiltration integriert. Mit einer Flockung und anschliessender Flockenabtrennung können Rohwässer im Bereich von 5 - 200 NTU aufbereitet werden. Mit Hilfe von Chemikalien, meist Fe(III)- und Al(III)- Salzen, werden die Abstossungskräfte (negative Oberflächenladungen) überwunden, so dass sich die Partikel zu grösseren Aggregaten und Flocken zusammenballen. Typische Dosiermengen für Eisen- und Aluminiumsalze liegen zwischen 0.6 und 12 mg/L. Die Zugabe von Flockungshilfsmitteln (z. B. organische Polymere wie Polyacrylamide oder Stärkeprodukte) unterstützt die Ausbildung grösserer Flocken und beschleunigt die anschliessende Partikelentfernung. Dabei werden auch Mikroorganismen und Algen mit in die Flocken eingebunden. Die Dosierung von Flockungshilfs-

mitteln liegt in der Regel zwischen 0.1 und 1 mg/L. Der Einsatz von Flockungshilfsmitteln reduziert die erforderlichen Flockungsmitteldosen in beträchtlichem Masse (40 - 60%). Ebenso kann durch die Zugabe von Chemikalien (z. B. Oxidationsmittel, Laugen, etc.) eine Fällung bestimmter gelöster Wasserinhaltsstoffe induziert werden (z. B. Enthärtung, Enteisenung, Entmanganung). Die Art der Zugabe und die Einmischung der Chemikalien, sowie die Turbulenz im Reaktor sind entscheidend für eine erfolgreiche Flockung. Durch die Zugabe des Flockungsmittels bei hoher Turbulenz entstehen Mikroflocken. Anschliessend an die Mikroflockenbildung kann bei tieferer Turbulenz durch die Zudosierung von Flockungshilfsmitteln die Makroflockenbildung induziert werden, was die Partikelentfernung beschleunigt. Ein zeitlicher Abstand der beiden Prozesse von mindestens 30 s verhindert eine übermässige Zehrung von Polymeren.

#### **Probleme**

Der Flockungsprozess ist stark abhängig von der Dosierung, den Einmischungsverhältnissen und der Reaktionszeit. Bei stark schwankender Rohwasserqualität (Oberflächenwasser, Karst- und Kluftgrundwasser) ergeben sich dadurch Probleme mit der Dosierung von Flockungs- und Flockungshilfsmitteln. Die genaue Dosierung für eine gute Flockung muss im Labor (Jar-Test) oder in Versuchen auf der Anlage erarbeitet werden. Eine zu geringe Dosierung ergibt eine schwache Flockenbildung, während eine Überdosierung wieder zu einem Rückgang der Flockungsleistung führt. Der Einsatz von chemischen Flockungsmitteln ist immer verbunden mit einem Eintrag unerwünschter Substanzen (Eisen, Aluminium, Polyacrylamide, etc.). Diese müssen während des Flockungsprozesses oder in nachgeschal-

teten Verfahrensstufen auf ein Minimum (Toleranzwert) reduziert werden. Erhöhte Flockungshilfsmittelkonzentrationen können mit einer zusätzlichen Flockungsmittelzugabe, sog. Nachflockung, vor einer nachgeschalteten Filtration entfernt werden. Prinzipiell ist jedoch dasjenige Flockungs(hilfs)mittel auszuwählen, welches mit der geringsten Zudosierung die Aufbereitungsziele erreicht. Lagerung, Entwässerung und Entsorgung der anfallenden Rückstände (Schlämme) sind in die Planung mit einzubeziehen. Sind bei der Zudosierung von Flockungshilfsmitteln noch Oxidationsmittel im Wasser vorhanden, führt dies zu einer verstärkten Zehrung und zur Bildung von Nebenprodukten.

### Reaktor

Die Zugabe und Einmischung des Flockungsmittels erfolgt in einem separaten, gut durchmischten Reaktor. Das Wasser hat dabei typische Aufenthaltszeiten von wenigen Minuten. In diesem Reaktor findet die Mikroflokkung statt. Für die möglichst schnelle und gleichmässige Adsorption des Flockungshilfsmittels sind turbulente Strömungsverhältnisse notwendig. Die Zudosierung erfolgt dabei meist in der Zuleitung als Querstrominjektion (Durchflussgeschwindigkeit  $\geq 0.5$  m/s). Eine möglichst hohe Verdünnung der Flockungshilfsmittellösung ( $\sim 0.1$  Vol-%) erleichtert die rasche und gleichmässige Verteilung im Wasser. Die anschliessende Makroflokkung erfordert

eine sehr geringe Turbulenz, da sonst die entstehenden Flocken aufgrund zu grosser Scherkräfte wieder zerstört werden.

Bei der Zudosierung im Zulauf zu Filtern übernehmen der Filterüberstau und die turbulente Strömung im Filtermedium die Funktion des Reaktors. Diese sogenannte Flockungsfiltration eignet sich jedoch nur für Rohwässer mit geringen Konzentrationen an kolloidal gelösten Verunreinigungen.

### Mögliche Vor-/Nachbehandlungen

Die Flockung wird in der Wasseraufbereitung meist als einer der ersten Aufbereitungsschritte bei Rohwasser mit hohem Feststoffgehalt (Oberflächenwasser) eingesetzt. Zur Abtrennung der gebildeten Aggregate (Flocken, Fällungsprodukte) kommen Sedimentation oder Filtration in Frage. Diese Kombinationen alleine sind nicht ausreichend, um qualitativ hochstehendes Trinkwasser herzustellen. Jedoch werden bei hohen Feststoffgehalten im Rohwasser die Bedingungen für eine weitergehende Aufbereitung (Sandfiltration, Membranverfahren, Desinfektion, etc.) geschaffen. Eine Vorozonung kann den Flockungsprozess unterstützen und den Einsatz von Chemikalien verringern oder gar unnötig machen.

### Grenzwerte/Toleranzwerte

Der Einsatz von Flockungsmitteln, z. B. in Form von Fe(III)- und Al(III)-Salzen,

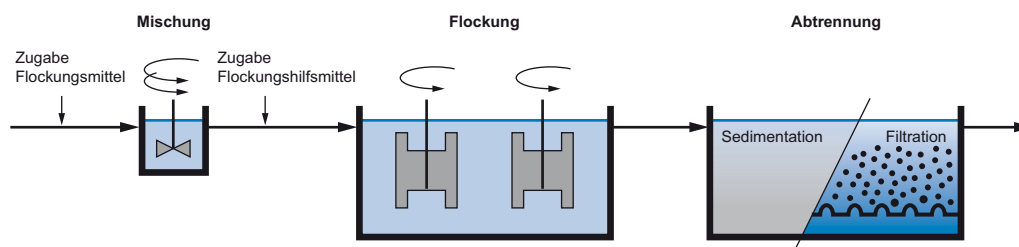


Abbildung 5: Schematischer Aufbau einer Flockungsanlage mit anschliessender Partikelentfernung (Sedimentation, Filtration)

## 5. Verfahren in der Trinkwasseraufbereitung

verlangt eine Bestimmung der Restgehalte im Filtrat. Gemäss FIV gilt für totales Eisen ein Toleranzwert von 0.3 mg Fe/L und für Aluminium 0.2 mg Al/L. Bei der Verwendung von Polyacrylamiden als Flockungshilfsmittel ist darauf zu achten, dass der Restgehalt an monomerem Acrylamid so gering wie möglich gehalten wird. Monomeres Acrylamid gilt gemäss BAG als wahrscheinlich krebserregend. In der Schweiz gibt es zurzeit keine Höchstkonzentration für Acrylamid im Trinkwasser. In den Trinkwasserrichtlinien der WHO ist 0.5 µg/L angegeben, die EU hat 0.1 µg/L als maximale zulässige Höchstkonzentration. Diese Werte liegen jedoch im Bereich der Nachweisgrenze und müssen dementsprechend vorsichtig interpretiert werden. Für einen zuverlässigeren Nachweis ist der Gehalt an monomerem Acrylamid im Konzentrat (zudosierte Lösung) zu bestimmen und über die Verdünnung auf das aufbereitete Wasser umzurechnen.

### **Beurteilung/Kontrolle des Verfahrens**

Die Dosierung der Flockungs(hilfs)mittel erfolgt proportional zum Volumenstrom des Wassers, welcher demnach kontinuierlich bestimmt werden muss. Ebenso ist die Konzentration in der Dosierlösung zu überwachen. Bei der Flockung mit Hilfe von Metallsalzen müssen die Restgehalte dieser Stoffe nach der Flockenabtrennung in regelmässigen Abständen (z. B. monatlich) gemessen werden, um die Dosierung entsprechend anpassen zu können. Dasselbe gilt für die Verwendung von Flockungshilfsmitteln wie Polyacrylamiden. Die Messung des spektralen Absorptionskoeffizienten bei 254 nm (SAK254) ermöglicht Aussagen über die Eliminationsleistung von NOM und ist somit auch ein Mass für die Reinigungsleistung der Aufbereitungsstufe.

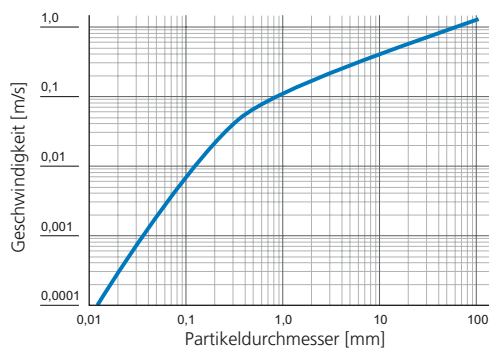
### **Produkte und Vorsichtsmassnahmen**

Eingesetzt werden meist anorganische Flockungsmittel, oft in Kombination mit organischen Polymeren (Flockungshilfsmittel). Die häufigsten anorganischen Flockungsmittel (primäre Flockungsmittel) sind hydrolysierbare Eisen- und Aluminiumsalze. Diese Salze sind als Sulfate, Chloride, Hydroxidchloride, Hydroxidsulfate oder Mischungen dieser Verbindungen erhältlich. Die Lösungen dieser Salze sind stark sauer (pH 2-3) und erniedrigen dadurch die Pufferkapazität und allenfalls den pH-Wert des Wassers. Die Anionen verbleiben nach dem Prozess im aufbereiteten Wasser. Bei den organischen Flockungshilfsmitteln handelt es sich im Wesentlichen um polymere, wasserlösliche Polyelektrolyte (anionisch, kationisch oder nichtionisch). Die Wirkung der Polyelektrolyte beruht auf einer irreversiblen Grenzflächenadsorption. Somit ist eine möglichst schnelle und homogene Verteilung erforderlich. Die organischen Flockungshilfsmittel werden in pulvriger oder granulierter Form gelagert und bei Bedarf chargenweise mit aufbereitetem, nicht desinfiziertem Wasser angesetzt. Die Polymerlösungen haben nur eine begrenzte Lagerungsstabilität (Verlust der Wirksamkeit) und es besteht die Gefahr der Verkeimung (v. a. bei Stärkeprodukten). Die Lösungen sollen daher maximal eine Woche gelagert werden. Sie erfordern hingegen zum Erlangen ihrer vollen Wirksamkeit produktespezifische Reifezeiten, welche vom Hersteller vorgegeben werden. Diese bewegen sich meist im Bereich von einigen Stunden.

## Verfahren: Sedimentation

### **Einsatzbereich: Elimination von Feststoffen**

Der Sedimentationsschritt dient der weitgehenden Entfernung von partikulären Stoffen unter Einwirkung der Gravitationskraft. Bei der Sedimentation handelt es sich um ein betriebstechnisch einfaches Verfahren, welches ohne grossen Energieaufwand auskommt. Der Einsatz beschränkt sich jedoch auf Rohwasser mit hohen Feststoffgehalten und Partikeln mit guten Absetzeigenschaften (hohe Dichte, vgl. Abbildung 6).



**Abbildung 6: Verlauf der Sedimentationsgeschwindigkeit mit zunehmendem Partikeldurchmesser (Dichte der Partikel 2650 kg/m<sup>3</sup>)**

Deutlich ist die starke Abnahme der Sedimentationsgeschwindigkeit für Partikeldurchmesser < 0.1 mm. Für sehr feine Suspensionen ist die Sedimentation demnach eher ungeeignet. Die entscheidenden Einflussgrössen der Sedimentation sind die Verteilung der Absetzgeschwindigkeiten der Partikel sowie die Reaktorgeometrie. Der Sedimentationsprozess kann zum einen verbessert werden durch die Veränderung der Partikeleigenschaften (Einsatz von Flockungsmitteln) und zum anderen durch die Erhöhung der Sedimentationsoberfläche, respektive die Reduktion der Sedimentationswege

(z. B. Lamellenabscheider). Die durchschnittliche Aufenthaltszeit in Sedimentationsbecken beträgt typischerweise einige Stunden. Aufgrund der hohen Rohwasserqualität in der Schweiz hat die Sedimentation eine geringe Bedeutung in der Trinkwasseraufbereitung. Eine besondere Bedeutung kann der Sedimentation jedoch bei der Behandlung von Spülwasser aus der Filtration zukommen.

### **Probleme**

Die in der Wasseraufbereitung vorkommenden Suspensionen weisen Partikel unterschiedlicher Form, Grösse und Dichte auf. Diese Faktoren sind alle unbekannt und somit ist eine verlässliche Voraussage über die Effizienz der Sedimentation unmöglich. Die Absetzeigenschaften können nur experimentell als Summenparameter ermittelt werden. Dabei müssen dieselben Randbedingungen (Wasserinhaltsstoffe, Flockungsmittel, Strömungen, etc.) wie auf der Anlage eingehalten werden. In solchen Experimenten werden alle Partikeleigenschaften wie Grössenverteilung oder Dichte umfassend betrachtet. Sedimentationsanlagen weisen einen hohen Platzbedarf auf, was in bebautem Gebiet oder auf kleineren Anlagen zu Problemen führen kann.

### **Reaktor**

In Sedimentationsbecken wird eine möglichst laminare Strömung angestrebt. Die einzelnen Wasserpakete sollen eine möglichst gleich lange Aufenthaltszeit im Reaktor aufweisen. Als Mass für die Dimensionierung von Sedimentationsbecken dient die so genannte Oberflächenbelastung  $V_{so} = Q/A$ . Dabei ist  $Q$  der Durchfluss und  $A$  die Sedimentationsoberfläche (Breite  $B$  mal Länge  $L$  des Beckens). Die Zeit  $t$ , die erforderlich ist, dass ein Partikel mit einer Absetzgeschwindigkeit  $v$  bis



## 5. Verfahren in der Trinkwasseraufbereitung

auf den Boden (Beckenhöhe  $H$ ) absinkt, wird zu  $t = H/v$ . Typische Werte für Sedimentationsgeschwindigkeiten liegen im Bereich von 0.5 m/h ohne und 5 - 10 m/h mit Einsatz von Flockungs(hilfs-)mitteln. Aus diesen Grössen lässt sich bei bekannten Absetzgeschwindigkeiten theoretisch die Dimension des Sedimentationsbeckens ableiten. In der Praxis sind die Strömungsbedingungen jedoch nie ideal und bei der Dimensionierung kann das Verhältnis von Breite und Länge der Absetzbecken nicht beliebig gewählt werden. Die hydraulischen Gegebenheiten müssen ein möglichst ungestörtes Absetzen erlauben. Dazu müssen Kurzschlussströmungen durch die richtige Bemessung der Becken (stabile Strömung, keine Resuspension, Auslegung Ein-/Auslauf, etc.) vermieden werden.

### **Mögliche Vor-/Nachbehandlung**

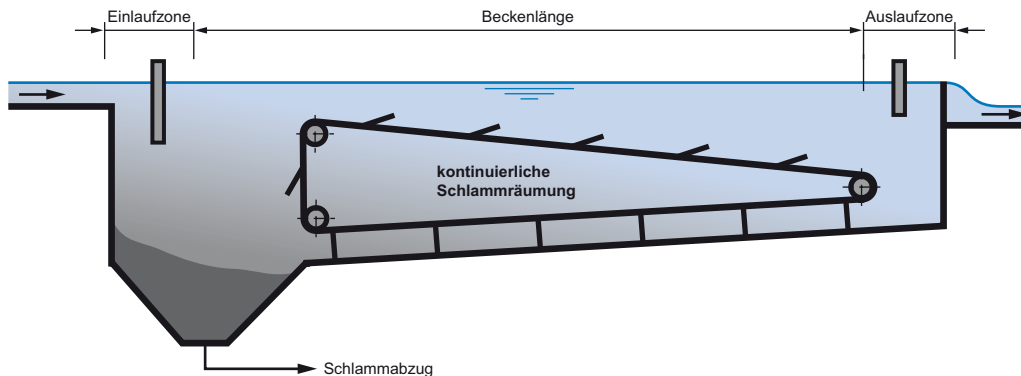
Sehr häufig wird die Sedimentation in Kombination mit einer Flockung/Fällung eingesetzt. Dabei werden die Sedimentationseigenschaften der Partikel soweit verändert, dass eine rasche und weitgehende Abtrennung erfolgen kann. Sedimentation alleine reicht jedoch nicht aus, um qualitativ hochstehendes Trinkwasser zu produzieren. Die Restkonzentration an suspendierten Stoffen ist zu hoch und ermöglicht keine zuverlässige Desinfektion. Somit werden nur die idealen Voraussetzungen (geringe und sehr konstante Trübung/Partikelkonzentration) für eine weitere Partikel- und Trübungselimination (Filtration, Membranverfahren) geschaffen.

### **Überwachung/Kontrolle des Verfahrens**

Zur Überwachung der Effizienz von Sedimentation kann eine Trübungsmessung hinzugezogen werden. Sie gibt Auskunft über den Abtrennungsprozess partikulärer Stoffe. Im Allgemeinen genügt diese Messung, da jeweils weitere Verfahren folgen. Bei einer integrierten Flockung sind nach der Sedimentation die Restgehalte an Flockungs(hilfs-)mitteln (Aluminium, Eisen, Polyacrylamide, etc.) zu bestimmen und allfällige Korrekturen bei der Dosierung vorzunehmen.

### **Produkte und Vorsichtsmassnahmen**

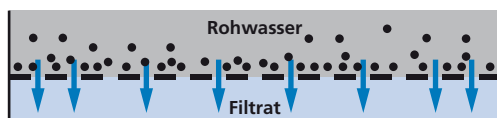
Traditionelle Sedimentationsbecken werden üblicherweise als längs durchströmte Rechteckbecken oder als Rundbecken gestaltet. Rundbecken können mit einem zentralen oder peripheren Einlauf ausgestattet sein. Der Schlammabzug erfolgt dabei kontinuierlich. In Kombination mit Flockung kommen kombinierte Flockungs-Sedimentationsreaktoren zum Einsatz. Diese sind im Allgemeinen mit einer turbulenten Einmischzone und einer strömungsberuhigten Absetzzone ausgestattet. Zur Verbesserung der konventionellen Sedimentation werden Sedimentationsbecken mit Einbauten versehen. Dadurch werden die Sedimentationswege kürzer und die mögliche hydraulische Belastung wesentlich grösser. Solche Platten- oder Lamellenabscheider werden meist im Gegenstromverfahren (Wasser-Schlamm) betrieben. Anstelle von Lamellen kommen auch Kiesschüttungen zum Einsatz. Solche Sedimentationsanlagen werden oft auch als „Kiesfilter“ bezeichnet. Der Mechanismus bei solchen „Filtern“ ist jedoch ebenfalls die Sedimentation. Gespült werden Kiesfilter mit hohen Wassergeschwindigkeiten von oben nach unten.



**Abbildung 7: Schematische Darstellung eines längs durchströmten Sedimentationsbeckens mit Ein- und Auslaufzone, Schlammräumungseinrichtung und Sammeltrichter inklusive Schlammabzug**

## Filtration

In der Trinkwasseraufbereitung dient die Filtration der Abtrennung von Feststoffen. Zielprodukt ist jeweils das Filtrat oder bei Membranfiltern das Permeat. Der Betrieb von Filtrationsanlagen geschieht in der Trinkwasseraufbereitung diskontinuierlich, das heisst, der einzelne Filter wird periodisch ausser Betrieb genommen, um die angesammelten Feststoffe zu entfernen und so die Wirksamkeit des Filters aufrecht zu erhalten. Als Kriterien für die Reinigungsleistung eines Filters dienen in der Regel die Druckdifferenz, die Filtratqualität (Trübung, Partikelzahl) oder die Laufzeit des Filters. Überschreitet die Druckdifferenz nutzbare und/oder wirtschaftliche Werte, wird eine Reinigung notwendig. Ebenso, wenn die Filtratqualität ungenügend wird. Die Filtrationsverfahren können aufgrund ihrer Abtrennmechanismen grob unterteilt werden in Flächenfiltration und Raumfiltration.



**Abbildung 8: Schematische Darstellung der Flächenfiltration. Partikel werden an einer Oberfläche abgeschieden und bilden einen Filterkuchen**

## Flächenfiltration

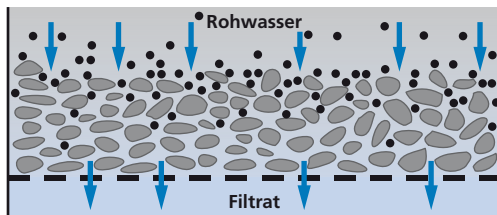
Bei der Flächenfiltration werden die Feststoffe an einer dünnen, flächenartigen Filterschicht abgetrennt. Dabei kommen hauptsächlich physikalische Abtrennmechanismen zum Tragen. Aufgrund der fest definierten Porengrösse weisen Flächenfilter relativ scharfe Trenngrenzen auf. Mit zunehmender Feststoffanlagerung steigt der Druckverlust exponentiell an. Beispiele für Flächenfilter sind Mikrosiebe oder Tuchfilter. Eine spezielle Form der Flächenfiltration stellen die Membranverfahren dar. Diese werden aufgrund der Porengrösse unterteilt in Mikro-, Ultra- und Nanofiltration sowie Umkehrosmose.

## Raumfiltration

In Raumfiltern werden die Feststoffe in einer porösen, räumlichen Matrix abgeschieden, dabei spielen sowohl physikalische wie auch chemische Prozesse eine wichtige Rolle. Beispiele dafür sind Schnellfilter, Langsamsandfilter oder Aktivkohlefilter. Im Wesentlichen bestimmen drei Elemente, wie effizient partikuläre Stoffe abgetrennt werden können; die charakteristischen Eigenschaften der Partikel (Grösse,

## 5. Verfahren in der Trinkwasseraufbereitung

Form, Oberflächenchemie), die sie umgebende Flüssigkeit (gelöste Stoffe, Adsorption, etc.) und der eigentliche Filter (Porosität, Filtergeschwindigkeit, Grösse, Form, etc.). Die Partikelabtrennung erfasst alle Grössenklassen und beinhaltet zwei Schritte, einen Transport- und einen Anlagerungsschritt.



**Abbildung 9: Schematische Darstellung der Raumfiltration. Die Partikel dringen in das Filtermaterial ein und werden durch chemische und physikalische Prozesse zurückgehalten**

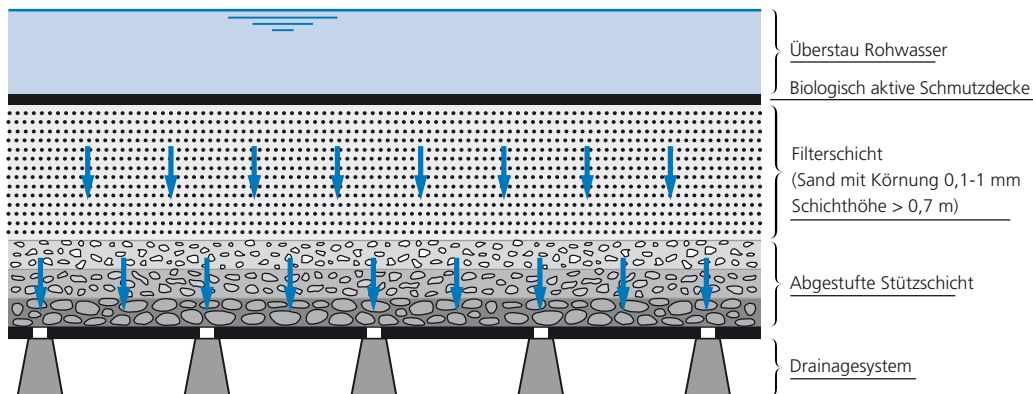
Der Konzentrationsanstieg im Filtrat mit zunehmender Akkumulation wird als Durchbruchskurve bezeichnet. Die Zunahme des Druckverlustes verläuft bei richtig ausgelegten Raumfiltern nahezu linear.

### Langsandsandfiltration

#### **Einsatzbereich: Partikelentfernung, Sorption partikulärer Stoffe, biologischer Abbau**

Die Langsandsandfiltration ist ein Verfahren zur umfassenden Partikelentfernung mit feinkörnigem Sand (~0.1 - 1 mm) und Filtergeschwindigkeiten von 0.06 - 0.3 m/h (meist 0.1 - 0.2 m/h). Sie wird häufig als letzte Aufbereitungsstufe vor dem Netzschutz eingesetzt. Durch die langen Aufenthaltszeiten im Filtermedium von 5 - 10 h (Filtermächtigkeit 0.7 - 1.2 m) wirken je nach Filtermaterial Siebung, Filtration sowie Sorption partikulärer und gelöster Verunreinigungen zusammen. Gleichzeitig kommt es zum Absterben von patho-

genen Mikroorganismen (Nährstoffmangel, Temperatur, Prädation, etc.) und zur Ausbildung einer biologischen Aktivität, was zu einem erheblichen Abbau von gelösten biologisch verfügbaren Stoffen (AOC) führt. Von besonderer Bedeutung ist dabei die so genannte Schmutzdecke, eine wenige Zentimeter dicke Partikelschicht auf dem Filtermaterial. Die Schmutzdecke ist biologisch aktiv und es finden Prozesse wie Filtration, Nitrifikation oder Mineralisation organischer Stoffe statt. Dadurch ergeben sich dank langen Filterlaufzeiten und feinem Filterkorn sehr hohe Reinigungsleistungen. Der einfache Aufbau (keine beweglichen Teile, keine Chemikalien, natürliches Gefälle) und Betrieb von Langsandsandfiltern machen diese besonders interessant für kleinere Wasserversorgungen und Seewasserwerke. Dem gegenüber steht jedoch ein grosser Platzbedarf. Für einen optimalen Betrieb sollte die Trübung maximal 10 NTU und/oder der Feststoffgehalt maximal 10 mg TSS/L (besser max. 3 mg TSS/L) betragen, allenfalls ist eine Vorbehandlung (z. B. Sedimentation, Schnellfiltration) vorzuschalten. Auch auf die Filterschicht aufgebrachte Vliesmatten oder eine Vorozonung können die Leistung und den Betrieb erheblich verbessern. Die Gesamtkeimzahl kann mit der Langsandsandfiltration um 3 - 4 Zehnerpotenzen reduziert werden. Die oberste Schicht von Langsandsandfiltern, also die so genannte Schmutzdecke, muss periodisch abgeschält werden. Die volle (biologische) Wirksamkeit erreicht ein Langsandsandfilter erst wieder nach einer mehrwöchigen Regenerationszeit und bei ausreichendem Sauerstoffgehalt im Rohwasser. Je länger ein Filter im Betrieb steht, desto bessere Reinigungsleistungen können erwartet werden.



**Abbildung 10: Aufbau eines Langsandsandfilters. Die Schmutzdecke für eine biologische Reinigung und Stoffumwandlung. Die anschliessende feinkörnige Sandschicht filtert das Wasser auf physikalisch-chemischem Wege**

### **Probleme**

Aufgrund des geringen Durchsatzes und der langen Einarbeitszeiten resultiert ein grosser Flächenbedarf von rund 0.3 m<sup>2</sup> pro aufbereitetem Kubikmeter Wasser und Tag. Wasserinhaltsstoffe wie Algen, Eisen, Mangan oder Härtebildner können zu Verbackung, Verockerung oder Kalkausscheidungen führen. Folgen sind steigender Filterwiderstand und das Auftreten von hydraulischen Kurzschlüssen. Es werden weniger Keime aus dem Rohwasser entfernt. Zudem können im kontinuierlichen Betrieb Organismen der Sandlückenfau- na (Pilze, Protozoen, Würmer, etc.) ins filtrierte Wasser (Filtrat) ausgewaschen werden. Eine anschliessende Desinfektion wird unter Umständen notwendig. Tiefe Temperaturen (4°C) und Filtergeschwindigkeiten ab 0.3 m/h können zu erhöhten Keimdurchbrüchen führen. Bei offenen oder beleuchteten Filterbecken kommt es im Überstau zu verstärkter biologischer Aktivität (vor allem Algenwachstum). Dies führt einerseits zu wünschenswerten Umwandlungs- und Abbauprozessen, andererseits führt eine übermässige biologische Aktivität auch zu grosser Biomasseentwicklung und zu einer schnellen Verstopfung der obersten Filterschicht. Ebenso kommt

es dabei zu einer Sauerstoff(über)- sättigung; dies kann durch Ausgasen in Unterdruckzonen im Filter eine vollständige Verstopfung des Filters zur Folge haben. Aufgrund der hohen Biomasseentwicklung kann die Sauerstoffzehrung (biologischer Abbau) in der Schmutzdecke zu einer unerwünschten Anaerobie im Filter führen. Folgen der anaeroben Verhältnisse sind Auswaschung von Bakterien, Rücklösung von Eisen und Mangan sowie das Auftreten von Geruchs- und Geschmacksproblemen. Typische Filterlaufzeiten liegen im Bereich von 3 - 24 Monaten, bei einer intensiven Vorbehandlung können diese aber auch mehrere Jahre erreichen. Bei kürzeren Laufzeiten sollte eine Vorbehandlung des Wassers erfolgen.

### **Mögliche Vor-/Nachbehandlungen**

Die Massnahmen gegen Filterverstopfungen und zu starkes Algenwachstum beinhalten im Wesentlichen eine Vorbehandlung mit Sedimentation oder Schnellfiltern, den Einsatz von Filtermatten (synthetische Vliese) sowie die Abdeckung/Beschattung der Filteranlagen. Dabei stellen Kiesfilter eine sehr einfache Vorbehandlung dar, die speziell geeignet ist zur Behandlung von Wasser mit grossem und/oder stark variablem Gehalt an suspendierten Stoffen.

## 5. Verfahren in der Trinkwasseraufbereitung

Eine Vorozonung kann einen Teil des natürlichen organischen Materials (NOM) oxidieren und in biologisch abbaubare Stoffe umwandeln. Zusätzlich kann partikuläres organisches Material teilweise oxidiert werden, was eine verbesserte Koagulation der Feststoffe zur Folge hat. Eisen und Mangan wird ebenfalls vollständig oxidiert. Weiter kommt es zu einer teilweisen Entfärbung des Wassers und zur Inaktivierung von Algen (siehe Ozonung). Vereinzelt wird Aktivkohle als Zwischenschicht eingebaut, sie soll als Schutz vor unvorhersehbaren Verschmutzungen dienen (Stossbelastungen). Dieser Schutz ist nur einige Monate wirksam.

### **Beurteilung/Kontrolle des Verfahrens**

Für die Kontrolle des Verfahrens ist eine kontinuierliche Trübungsmessung erforderlich (Trübung < 1 NTU gemäss FIV, < 0.2 gemäss Erfahrungswert SLMB). Mit Hilfe der Trübungsmessung können allfällige Filterdurchbrüche festgestellt werden. Neben dieser summarischen Bestimmung besteht zur Ergänzung die Partikelanalyse für eine bessere Charakterisierung der Filtrat Inhaltsstoffe. Der Vorteil dieser detaillierten Messung besteht darin, dass man Informationen zu Anzahl und Grössenverteilung der Partikel erhält. Dies wiederum gibt Aufschluss über die mikrobielle Belastung des Filtrates. Zur Beurteilung des Filtermilieus und der biologischen Aktivität im Filter kann eine Sauerstoffmessung durchgeführt werden. Ausschlaggebend für das Abschälen der Schmutzdecke (jeweils 1-3 cm) und die anschliessende Regeneration des Filters (Wiedererlangen der vollen biologischen Aktivität) ist das Überschreiten des maximalen Filterwiderstandes, welcher kontinuierlich überwacht werden muss. Dieser wird von den baulichen Voraussetzungen bestimmt (Überstauhöhe) und liegt im

Bereich von 1 - 2 m Wassersäule. Nach neuen Erkenntnissen ist eine regelmässige Überwachung der mikrobiologischen Parameter (beispielsweise gemäss HyV: *E.Coli*, Enterokokken und aerobe mesophile Keime) sinnvoll.

### **Produkte und Vorsichtsmassnahmen**

Langsamsandfilter werden meist als offene Betonbecken ausgeführt und je nach Anforderung zusätzlich überdacht. Aufgrund des grossen Flächenbedarfs werden Langsamsandfilter im Allgemeinen nur noch für kleinere Wasserversorgungen neu erstellt. Als Filtermaterial findet vorwiegend Quarzsand mit einer Körnung von 0.1 - 0.4 mm und einem möglichst geringen Unförmigkeitsgrad ( $U < 5$ , besser  $U < 3$ ) Verwendung. Um ein Auswaschen des Filtersandes in die Drainage zu verhindern, ist eine sorgfältig abgestufte Stüttschicht über dem Drainagesystem erforderlich.

### **Schnellfiltration**

#### **Einsatzbereich: Partikelentfernung**

Die Schnellfiltration eignet sich hauptsächlich zur intensiven Vorreinigung bei Rohwasser mit grosser Trübung oder relativ hohem Partikelgehalt (Stossbelastungen von max. 50 mg TSS/L). Dabei wird eine Partikelreduktion von rund 80 - 90% erreicht. Entfernt werden dabei anorganische und organische Partikel, Mikroorganismen und partikulär gebundene Schadstoffe. Die Grössenordnung abtrennbarer Partikel liegt im Bereich von  $> 1 \mu\text{m}$ . Zudem ist ein teilweiser biologischer Abbau von organischen Substanzen, beispielsweise von AOC, möglich. Die Schnellfiltration wird selten als einzelnes Aufbereitungsverfahren eingesetzt, sondern nur in Kombination mit anderen Verfahrensschritten (z. B. Desinfektion, Sedimentation, Langsamsandfiltration

oder Membranverfahren). Zum Einsatz kommen, je nach Rohwasserqualität und Anforderungen an die Reinigungsleistung, Ein- oder Mehrschichtfilter mit unterschiedlichen Filtermaterialien und typischen Filtergeschwindigkeiten von 6 - 20 m/h (ab 15 m/h nur noch als Druckfilter realisierbar). Bei Zwei- und Mehrschichtfiltern weisen die oberen Filterschichten eine höhere Porosität im Vergleich zu unteren Schichten auf. Die oberen Filterschichten dienen dabei der Entfernung gröberer Partikel, während die unteren Schichten die Feinfiltration übernehmen. Bei der Raumfiltration spielen sowohl physikalische wie auch chemische Prozesse eine wichtige Rolle. Die Zugabe von geringen Mengen an Flockungsmitteln kann die Filterleistung beträchtlich verbessern. Die Kombination eines Zweischichtfilters mit Flockungsmittelzugabe ermöglicht eine Reduktion um zusätzlich 1 - 1.5 Zehnerpotenzen für Bakterien und von zwei Zehnerpotenzen für Protozoen.

### **Probleme**

Bei stark belastetem Rohwasser führen die häufigen Rückspülungen der Filter zu grossen Mengen an schlammhaltigem Spülwasser und Erstfiltrat (Anlaufzeiten nach Rückspülung). Die stark erhöhten Konzentrationen von NOM oder Mikroorganismen im Spülwasser erfordern oft eine separate Behandlung. Der Bedarf an Rückspülwasser und Erstfiltrat sollte weniger als 5% des Filtrates ausmachen. Die Entfernung von stabilen Kolloiden ist ohne die Zugabe von Flockungsmitteln meist ungenügend. Erfolgt die Rückspülung unvollständig oder ungenügend abgestimmt auf den Filter, so kommt es zu Verlagerungen der Filter- und Stützsichten, welche wiederum die Leistung erheblich beeinflussen können. Mit konstruktiven Massnahmen (z. B. Einbauten) kann Wandströmungen

(präferenzielle Fliesswege) begegnet werden. Die Anlagentechnik für Schnellfilter ist sehr aufwändig, zusätzlich zu den eigentlichen Filtern (mehrere parallel geschaltete Filtereinheiten) werden Spülwasserbecken, Schlammwasserbecken und Druckluftbehälter für die Spülluft benötigt.

### **Grenzwerte/Toleranzwerte**

Mit der Schnellfiltration sind Trübungswerte im Filtrat von  $< 0.2$  NTU anzustreben. Toleranzwerte für Wasserinhaltsstoffe sind in der Schnellfiltration vor allem dann ausschlaggebend, wenn zusätzlich eine Flockung integriert wird. Bei Zugabe von Eisen- und/oder Aluminiumsalzen als Flockungsmittel sind Werte von  $0.3$  mg Fe/L respektive  $0.2$  mg Al/L (gemäss FIV) einzuhalten.

### **Mögliche Vor-/Nachbehandlung**

Bei Trübungswerten im Rohwasser von  $< 5$  NTU können die Anforderungen an die Trübung in der Regel mit einer einstufigen Filtration erreicht werden. Das Ziel einer weitgehenden Elimination von hygienisch relevanten Partikeln ist jedoch sehr häufig nur mit einer zusätzlichen Flockung (Zugabe von Fe(III)- und Al(III)-Salzen, ev. zusätzlich Polyelektrolyte) zu erreichen. Konstant hohe Feststoffgehalte über  $30$  mg TSS/L erfordern eine Vorbehandlung, beispielsweise Flockung-Sedimentation, Mikrofiltration, Flotation oder Kiesfiltration. Dadurch kann die Laufzeit der Schnellfilter verlängert und die Rückspülrate, und damit auch die Filtratverluste, reduziert werden. Eine Vorozonung verbessert im Allgemeinen die Filtration durch Mikroflokkung, jedoch hat die Zugabe von zu grossen Ozondosen eine gegenteilige Wirkung. Als Nachbehandlung kommen alle weiteren Verfahren (Oxidation, Aktivkohlefiltration, Langsamsandfiltration, Desinfektion etc.) in Frage. Sie dienen

## 5. Verfahren in der Trinkwasseraufbereitung

der weitergehenden Aufbereitung (Entfernung von Spurenstoffen, Desinfektion, biologische Stabilisierung, etc.).

### **Beurteilung/Kontrolle des Verfahrens**

Die Wirksamkeit der Schnellfiltration wird mit Hilfe einer kontinuierlichen Trübungsmessung überwacht. Die Filterrückspülungen erfolgen in der Regel in festen zeitlichen Intervallen. So wird eine übermässige biologische Aktivität, die Verbackungsgefahr und der Druckverlust in Grenzen gehalten. Bei der Steuerung über den Filterwiderstand wird beim Erreichen des technisch/betrieblich und ökonomisch sinnvollen Maximalwertes (offene Filter 1 - 2 m Wassersäule, Druckfilter 4 - 6 m Wassersäule) die Spülung automatisch ausgelöst. Die Rückspülung muss vor Eintreten eines allfälligen Filterdurchbruches erfolgen. Weiter können Volumenströme, Rohwasser oder Filtrat, zusätzliche Auskunft über die Funktion des Filters liefern. Eine optische Beurteilung der Rückspülung erlaubt Rückschlüsse über die Funktion der Anlage (z. B. defekte Rückspüldüsen) und den Zustand des Filtermaterials (z. B. vorhandene Verbackungen). Dazu wird während der Filterspülung die Wasseroberfläche beobachtet und auf Unregelmässigkeiten (z. B. unregelmässiger Luftaustritt, ausreichende Filterbettexpansion) untersucht. Die Rückspülung der Filter erfolgt entweder nur mit Wasser oder mit einer Kombination Wasser/Luft. Die Luft ermöglicht dabei eine stärkere Auflockerung des Filtermaterials, dadurch werden Verunreinigungen und Verklebungen besser entfernt.

### **Produkte und Vorsichtsmassnahmen**

Als Filtermaterial kommen vielfältige Produkte zum Einsatz, darunter Quarzsand, Bims, Basalt, Anthrazit, Blähschiefer und Blähton, Aktivkohle, Kalk und Dolomit. Heutzutage wird in Einschichtfiltern meist Quarzsand und in Mehrschichtfiltern eine Kombination von Quarzsand mit Bims und/oder Anthrazit eingesetzt. Die Wahl der Materialien muss spezifisch auf die Rohwasserqualität und die gewünschte Leistung abgestimmt werden. Dabei sorgen die Dichteunterschiede der Materialien für einen stabilen Filteraufbau. Der Unförmigkeitsgrad der Filtermaterialien soll 1.5 nicht überschreiten. Für die Rückspülung wird optimalerweise das Filtrat des jeweiligen Filters verwendet. Dies hat zum Ziel, die Reaktionsbedingungen im Filter nicht zu verändern (pH-Wert, Redoxpotential, Desinfektionsmittelkonzentration, etc.) und somit unerwünschte Reaktionen (z. B. Fällung, etc.) zu vermeiden. In der Regel wird das Rückspülwasser verworfen und über eine Abwasseraufbereitungsanlage entsorgt.

### **Membranfiltration**

#### **Einsatzbereich: Entfernung partikulärer und gelöster Verunreinigungen**

Die Membranfiltration eignet sich zur weitgehenden Entfernung von partikulären bis hin zu gelösten Wasserinhaltsstoffen und wird oft als weitergehende Reinigung eingesetzt. Aufgrund der Porengrösse weisen Membranfilter scharfe Abtrennungskriterien auf und können so auf die spezifischen Anforderungen abgestimmt werden:

- Mikrofiltration (MF): Porengrösse 0.1 - 10 µm (MWCO > 500 kDa), Elimination von Partikeln > 0.1 µm mit transmembranen Drücken von 0.5 - 3 bar, einer geringen DOC-Reduktion und einer gewissen Reduktion von Mikroorganismen (Bakterien, Viren, Protozoen).
- Ultrafiltration (UF): Porengrösse 0.001 - 0.01 µm (MWCO 1 - 500 kDa), Elimination von Makromolekülen (hochmolekulare organische Verbindungen), Viren, Protozoen und Bakterien mit transmembranen Drücken von 1 - 8 bar und einer teilweisen DOC-Reduktion.
- Nanofiltration (NF): Porengrösse 0.0005 - 0.007 µm (MWCO 100 - 1'000 Da), Elimination von Molekülen (organische Stoffe) und teilweise von Ionen (Ca<sup>2+</sup>, Mg<sup>2+</sup>) mit transmembranen Drücken von 5 - 12 bar, kann zur teilweisen Wasserenthärtung und Elimination von Sulfat und Nitrat (> 95%), DOC sowie Mikroverunreinigungen eingesetzt werden.
- Umkehrosmose (RO): Porengrösse < 0.001 µm (MWCO < 100 Da. Elimination von Ionen (z. B. Meerwasserentsalzung, Wasserrecycling) mit maximalen Betriebsdrücken von 30 - 100 bar (abhängig vom osmotischen Druck).

Die einzelnen Membranen werden in Module zusammengefasst. Die zurückgehaltenen Wasserinhaltsstoffe führen zu einer Belagsbildung auf der Membran (Fouling, Scaling), welche den transmembranen Druck erhöht und eine regelmässige Spülung bei Übertreten des Höchstwertes erfordert. Diese Maximalwerte werden aufgrund von Materialeigenschaften vom Hersteller festgelegt. Zudem müssen die Membranen regelmässig chemisch gereinigt werden. Dazu werden Chlor, Säuren, Laugen, Wasserstoffperoxid oder Detergentien eingesetzt. Nur so kann die Permeabilität der Membran über längere Zeit konstant gehalten werden.

### Probleme

Ein hoher Feststoffgehalt im Rohwasser fördert die Verblockungsneigung, was zu einer erhöhten Spülrate und damit zu steigendem Energieverbrauch sowie Filtratverlust führt. Die hohe Frequenz von bis zu 4 Rückspülungen pro Stunde für trübstoffhaltiges Rohwasser erfordert grössere Mengen an Spülwasser, was 5 - 15% der Filtratmenge ausmachen kann. Ein Umstand, der vor allem bei knappem Wasserdargebot (schwankende Quellschüttung, tiefe Wasserstände,

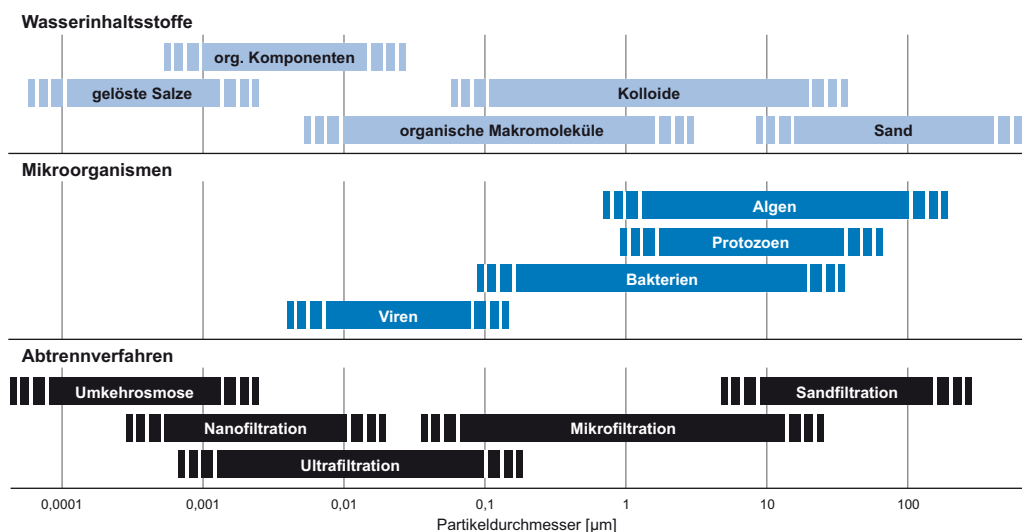


Abbildung 11: Vergleich von Partikelgrössen und Abtrennverfahren. Die Trennlinien sind meist nicht scharf, sondern weisen Übergangsbereiche auf



## 5. Verfahren in der Trinkwasseraufbereitung

etc.) zu beachten ist. Eine hohe organische Belastung (NOM), gemessen als DOC, fördert das Fouling. Dabei sind namentlich Polysaccharide und Huminstoffe ausschlaggebend. Bei hohem AOC-Gehalt besteht die Gefahr einer Biofilmbildung und somit von Biofouling, was wiederum zu verblockten Poren und erhöhtem Filterwiderstand führt. Biofouling kann durch häufigere chemische Reinigung oder die Zugabe von Desinfektionsmitteln ins Spülwasser begrenzt werden. Je nach Materialeigenschaften der Membran können eingesetzte Oxidationsmittel zu einer Schädigung derselben führen. Werden die Membranen mit chlorhaltigen Lösungen gespült, so kann es zur Bildung von Trihalomethanen (THM) und adsorbierbaren organischen Chlorverbindungen (AOX) kommen, was bei der Entsorgung der schlammhaltigen Spülwässer zu beachten ist. Weitere Möglichkeiten zur Begrenzung von Fouling und Biofouling bestehen in einer Reduktion der Oberflächenbelastung oder der Zudosierung von Pulveraktivkohle im Filterzulauf (Cristal® Prozess).

### **Grenzwerte/Toleranzwerte**

Für die Trübung im Trinkwasser gilt in der Schweiz ein Toleranzwert von 1 NTU, der jedoch bei jeder Form der Membranfiltration problemlos eingehalten werden kann. *E. coli* und Enterokokken dürfen gemäss HyV in 100 ml nicht nachweisbar sein. Die Zahl der aeroben mesophilen Keime muss im aufbereiteten Wasser < 20 KBE/ml betragen. Bei intakten Membranfiltern sind auch diese Werte problemlos einzuhalten.

### **Mögliche Vor-/Nachbehandlungen**

Abhängig von der Rohwasserqualität ist keine, eine geringfügige oder eine umfangreiche Vorbehandlung notwendig. Die Rohwasserqualität bestimmt auch die Durchflussmengen und Rückspülraten. Somit kann bei konstant hoher Feststofffracht eine Vorbehandlung sinnvoll sein. Die Vorbehandlungsstufen für Ultrafiltration, Nanofiltration und Umkehrosmose verfolgen im Wesentlichen die Ziele Trübstoffe zu entfernen (Flockung, Filtration) und Ausfällungen an der Membran zu verhindern (pH-Korrektur). Die Mikrofiltration wird in der Trinkwasseraufbereitung kaum eingesetzt. Durch den vollständigen Rückhalt von Mikroorganismen und Viren können Ultra- und Nanofiltration als letzte Verfahrensstufe eingesetzt werden. Bei hohem AOC-Gehalt im aufbereiteten Wasser besteht jedoch die Gefahr der Wiederverkeimung. In solchen Fällen kann ein Netzschutz eingesetzt werden, um die hygienische Qualität im Leitungsnetz zu garantieren. Mit dem Einsatz von Pulveraktivkohle (PAC) vor der Membranfiltration kann der DOC-Gehalt reduziert und so ein Fouling teilweise begrenzt werden. Zusätzlich werden auch Spurenstoffe eliminiert. Daraus folgen jedoch auch höhere Betriebskosten. Polysaccharide, welche ebenfalls zum Fouling beitragen, können jedoch mit PAC nur schlecht entfernt werden. Mit dem Zusatz von Flockungsmitteln lassen sich, abhängig von der Beschaffenheit des Rohwassers, die Laufzeiten verlängern und die Effizienz und Effektivität der Rückspülung optimieren. Eine Mikroflokkung durch Vorozonung hat einen ähnlichen Effekt. Dabei ist aber zu beachten, dass polymere Membranen in der Regel nicht ozonresistent sind und somit das Wasser kein Restozon mehr enthalten darf.

### **Beurteilung/Kontrolle des Verfahrens**

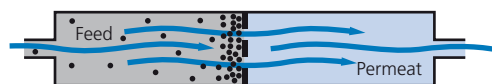
Eine Trübungsmessung gibt nur bedingt Auskunft über die Funktion einer Membrananlage. Die Trübungswerte sind im Allgemeinen so gering, dass nur eine Partikelmessung und die Analyse hygienischer Parameter Information bezüglich der Integrität der Membranen liefern kann. Die Rückspülung erfolgt in regelmässigen Zeitabständen. Die kontinuierliche Messung des Differenzdrucks über die Membran dient der zusätzlichen Sicherheit.

#### *Integritätstest für Membrane*

Zur Überwachung der Integrität von Membran stehen neben der Partikelmessung noch weitere Methoden zur Verfügung. Beim Druckhalte- oder Diffusionstest wird auf der einen Seite der Membran ein Luftüberdruck angelegt. Die Abnahme des Druckes über einen festgelegten Zeitraum wird ermittelt. Die Diffusion von Luft durch die Membran wird berücksichtigt. Dieser Test wird anfänglich mit ganzen Modulen durchgeführt, bei Verdacht wird er an einzelnen Elementen wiederholt. Für die Ermittlung defekter Hohlfasermembrane wird der Blasentest angewendet. Dabei befindet sich auf der einen Membranseite Wasser und auf der anderen Luft (Überdruck). Defekte Hohlfasern werden durch Austritt von kleinen Luftblasen erkannt und können ersetzt werden. Empfindlicher als Druckhalte- oder Diffusionstest ist der Wasserverdrängungstest, bei dem auf der Filtratseite ein Luftüberdruck angelegt wird und auf der Rohwasserseite das Volumen des verdrängten Wassers gemessen wird.

### **Produkte und Vorsichtsmassnahmen**

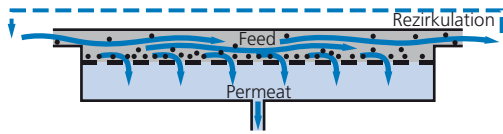
Zur genauen Festlegung der Dimensionierungs- (Material, Porengrössen, Membranfläche, Pumpendrucke, etc.) und Betriebsparameter (Betriebsmodus, Spülhäufigkeit, Einsatz von Desinfektionsmitteln, Spülwasserbedarf, etc.) sind umfangreiche, einsatzspezifische Versuche durchzuführen. Dabei sollten die ungünstigsten Bedingungen der Rohwasserbeschaffenheit berücksichtigt werden. Abgestimmt auf die definierten Zielsetzungen kommen unterschiedliche Varianten von Membranen in Frage. Von der Form her werden rohrförmige (Hohlfasern, Kapillaren) und flache Membrane unterschieden. Während Hohlfasern bündelweise zusammengefasst werden, werden flache Membranen als Kissen- oder Spiralwickelmodule eingesetzt. Zwei Betriebsarten sind möglich, Dead-End- oder Cross-Flow-Modus. Beim Dead-End-Modus strömt das Rohwasser senkrecht auf die Membran und wird durch diese hindurch gepresst. In der Wasserversorgung wird wegen des geringen Energieaufwands meistens der Dead-End-Modus verwendet.



**Abbildung 12: Schematische Darstellung der Dead-End-Filtration. Das Rohwasser wird vollständig durch die Membran geleitet, die Partikel lagern sich an der Oberfläche ab**

Im Gegensatz dazu fließt im Cross-Flow-Modus das Rohwasser über die Membran hinweg, während das Filtrat durch die Membran hindurch gelangt. Der Cross-Flow-Modus ist vor allem bei hohem Trübstoffgehalt im Rohwasser vorteilhaft. Durch die Strömung über die Membran hinweg werden die angesammelten Rückstände teilweise kontinuierlich von der Membranoberfläche entfernt.

## 5. Verfahren in der Trinkwasseraufbereitung



**Abbildung 13: Schematische Darstellung der Cross-Flow-Filtration. Das Wasser fließt über die Membran hinweg und wird nur teilweise durch die Membran gedrückt/gesogen. Partikel werden teilweise weitertransportiert**

Weiter wird zwischen gesaugter und gedrückter Filtration unterschieden, je nachdem ob das Rohwasser von aussen in die Hohlfaser (gesaugt) oder von innen nach aussen (gedrückt) strömt. Hergestellt werden die Membranen entweder aus organischen Polymeren wie Zellulosederivate, Polyethersulfon, etc. oder aus anorganischen Materialien wie beispielsweise Keramik. Unbedingt zu beachten sind die Herstellerangaben zu Stoffeigenschaften, Druckfestigkeit und Resistenz gegen Oxidationsmittel, um eine Beschädigung der Membran zu verhindern und einen korrekten Betrieb zu gewährleisten.

### Desinfektion/Oxidation

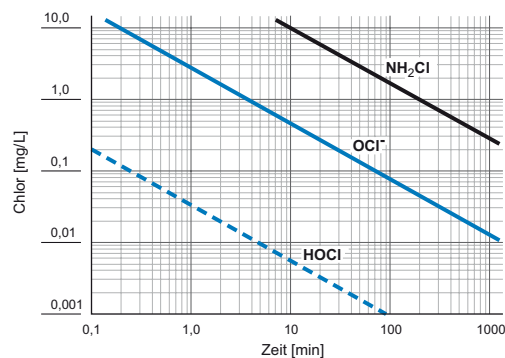
Die in der Trinkwasseraufbereitung verwendeten Verfahren und Stoffe zur Desinfektion bewirken meistens auch eine Transformation von Wasserinhaltsstoffen. Diese beiden Wirkungsmechanismen können deshalb nicht getrennt betrachtet werden. In der Trinkwasseraufbereitung dürfen nur Verfahren und Stoffe verwendet werden, die ausdrücklich für diesen Zweck zugelassen sind. Für die Schweiz sind diese Verfahren und Mittel im Informationsschreiben Nr. 109 (Juli 2005) des BAG zusammengefasst. Dazu gehören unter anderem Chlor ( $\text{Cl}_2$ ,  $\text{HOCl}$ ), Chlordioxid ( $\text{ClO}_2$ ), Wasserstoffperoxid ( $\text{H}_2\text{O}_2$ ), Ozon ( $\text{O}_3$ ), Kaliumpermanganat ( $\text{KMnO}_4$ ) und UV-Strahlung. Die Verfahren können prinzipiell aufgeteilt werden in die chemische Desinfektion ( $\text{O}_3$ ,  $\text{ClO}_2$ , etc.) und die

physikalische Desinfektion (UV). Eine weitere Möglichkeit ist die Desinfektion mittels Abtrennverfahren (z. B. Ultra- und Nanofiltration).

### Desinfektion

Die Desinfektion ist definiert als das Abtöten von Mikroorganismen (Bakterien, Viren, Protozoen) als Verursacher von Krankheiten ohne deren physikalische Abtrennung. Durch Trinkwasser übertragbare Krankheiten sollen so vermieden werden. Eine zunehmende Bedeutung haben dabei resistente Dauerformen wie Sporen oder (Oo-) Zysten. In der Trinkwasseraufbereitung ist die Desinfektion das häufigste, wichtigste und teilweise auch das einzige eingesetzte Verfahren. Zum Einsatz kommen beispielsweise chemische Oxidationsmittel (wie Ozon, Chlor oder Chlordioxid) oder UV-Strahlung. Für eine effiziente Abtötung oder Inaktivierung müssen alle Desinfektionsmittel direkt auf den Mikroorganismus einwirken können. Mikroorganismen, die an Partikeln oder Kolloiden haften oder von Biofilmen umgeben sind, werden jedoch wirkungsvoll gegen solche Einwirkungen abgeschirmt. Die wichtigste Voraussetzung für eine sichere Desinfektion von Rohwasser ist demnach eine weitestgehende Trübstoff- und Partikelfreiheit ( $< 1$  NTU). Dabei ist grundsätzlich zu unterscheiden zwischen Trübung und Transmission. Wasser mit hoher Transmission kann noch immer relevante Feststoffanteile enthalten. Eine sichere Desinfektion ist damit nicht automatisch gewährleistet. Die Wirkung von Desinfektionsmitteln wird weiter bestimmt durch die Widerstandsfähigkeit des Organismus, die wirksame Konzentration und die Einwirkzeit auf den Organismus. Zur Beurteilung der Wirksamkeit von chemischen Desinfektionsmitteln wird heute das  $c \cdot t$ -Konzept angewendet.

Der  $c \cdot t$ -Wert ist das Produkt aus Desinfektionsmittelkonzentration  $c$  im Wasser und der Einwirkzeit  $t$ .  $C \cdot t$ -Werte für eine bestimmte Reduktionsrate (z. B. 99%), ein Desinfektionsmittel und einen Mikroorganismus sind in der Fachliteratur in  $\text{mg} \cdot \text{min}/\text{L}$  verfügbar. Analog wird für die UV-Desinfektion die Dosis (Produkt aus Bestrahlungsstärke und -zeit) verwendet, und entsprechende Dosisangaben in  $\text{J}/\text{m}^2$ , um eine bestimmte Reduktion eines gegebenen Mikroorganismus zu erreichen, können ebenfalls in der Fachliteratur gefunden werden. Die im Labor ermittelten  $c \cdot t$ - bzw. Dosis-Werte sind in der Praxis mit Vorsicht anzuwenden, da in der Umwelt vorkommende Organismen sehr oft eine andere Empfindlichkeit, meist eine höhere Resistenz, gegenüber Desinfektionsmitteln aufweisen. Mitbestimmend für eine zuverlässige Desinfektion sind auch generelle Parameter der Wasserqualität wie pH-Wert, Temperatur, anorganische Inhaltsstoffe und DOC. Speziell weisen Desinfektionsprozesse eine starke Tempera-



**Abbildung 14: Desinfektionswirksamkeit unterschiedlicher Chlorspezies (unterchlorige Säure HOCl, Hypochlorit  $\text{OCl}^-$ , Monochloramin  $\text{NH}_2\text{Cl}$ ) für die 99% Inaktivierung von *E. coli***

turabhängigkeit auf. Der pH-Wert ist massgebend für die Spezierung der Oxidantien im Wasser. Dies ist vor allem bei Chlor ausschlaggebend, da im trinkwasserrelevanten Bereich eine aktive ( $\text{HOCl}$ ) und eine weniger aktive ( $\text{OCl}^-$ ) Spezies vorliegen.

Natürliches organisches Material reagiert mit chemischen Oxidationsmittel und vermindert somit die wirksame Konzentration im Wasser. Ebenso können anorganische Stoffe wie z.B.  $\text{Fe}(\text{II})$ ,  $\text{Mn}(\text{II})$  oder Sulfid zur raschen Zehrung und somit zu vorzeitigem Verbrauch des Desinfektionsmittels führen. Das jeweilige Zehrungsverhalten des aufzubereitenden Wassers muss bei der Bestimmung der wirksamen Desinfektionsmittelkonzentration  $c$  berücksichtigt werden. Deshalb sollten die Versuche mit dem entsprechenden Rohwasser durchgeführt werden. In der Praxis wird die Überwachung und Steuerung der ausreichenden Dosierung durch die Bestimmung einer Mindestrestkonzentration beim Ablauf (Ende der Reaktionszeit) des Reaktors sichergestellt.

Eine entscheidende Rolle bei der Desinfektion kommt auch der Auslegung und Hydraulik der Einmischung sowie des Reaktors zur Sicherstellung der notwendigen Reaktionszeit zu. Eine rasche und gleichmässige Einmischung des Desinfektionsmittels ist notwendig. Im Anschluss an die Einmischung sollten sämtliche Wasserpakete dieselbe Aufenthaltszeit im Reaktor aufweisen. Konventionelle Reaktoren bestehen meist aus mehreren Kammern (Serie von voll durchmischten Reaktoren). Theoretisch wird aber eine gleichmässige Aufenthaltszeit mit einem idealen Plug-Flow-Reaktor (Pfropfenströmung) erreicht. Dabei werden die Wasserpakete von einer laminaren Strömung ohne Durchmischung weiter transportiert. In der Praxis sollte eine Annäherung an diese Pfropfenströmung angestrebt werden. Versuche auf Pilotanlagen erlauben eine Optimierung der Reaktorhydraulik, mittels Einbauten können die Reaktoreigenschaften verbessert und hydraulische Kurzschlüsse vermieden werden. Für die umfassende Bewertung der Rohwasserqualität aus hygienischer Sicht sind mikrobiologische Untersuchungen unerlässlich. Diese sollen

## 5. Verfahren in der Trinkwasseraufbereitung

langfristig (> 1 Jahr) ausgelegt sein und auch ungünstige Wetterbedingungen berücksichtigen. Chlorhaltige Desinfektionsmittel sind dadurch gekennzeichnet, dass ihre Wirkung im Wasser über einen längeren Zeitraum aufrechterhalten werden kann. Als Netzschutz können deshalb nur Chlor oder Chlordioxid eingesetzt werden.

### Oxidation

Die Oxidation dient in der Trinkwasseraufbereitung dazu, organische und anorganische Wasserinhaltsstoffe so zu mineralisieren oder umzuwandeln, dass sie dem Wasser entzogen, durch biologische Prozesse abgebaut werden oder ihre toxische Wirkung verlieren. Die Komplexität und Verschiedenartigkeit der Rohwasserbeschaffenheit führt aber immer auch zur Bildung von Reaktionsnebenprodukten. Dabei kann es sich um unproblematische Stoffe handeln, die die Qualität des Trinkwassers nicht beeinflussen. Es werden aber auch Produkte gebildet, die als problematischer als ihre Ausgangsstoffe angesehen werden müssen. Beispiele hierfür sind die Bildung von Trihalomethanen (THM) beim Einsatz von Chlor und die Oxidation von Bromid zu Bromat bei der Ozonung. Bei der Auswahl des geeigneten Verfahrens müssen mögliche Reaktionsnebenprodukte mit einbezogen werden. Bei allen Oxidationsreaktionen spielt die Kinetik eine entscheidende Rolle. Sie bestimmt, wie schnell eine Reaktion abläuft und wie schnell ein Oxidations- oder Desinfektionsmittel verbraucht wird. Diese Abnahme kann meistens mit einer Reaktion pseudo 1. Ordnung bezüglich der Oxidationsmittelkonzentration beschrieben werden. Bei selektiven Oxidationsmitteln, wie Ozon, Chlor oder Chlordioxid sind diese Reaktionsgeschwindigkeiten sehr stark abhängig vom Stoff, der oxidiert wird (Reaktionspartner). Dadurch ergeben sich, in Abhängigkeit der Zusammensetzung

des aufzubereitenden Rohwassers, notwendige Aufenthalts- und Kontaktzeiten in den entsprechenden Reaktoren. Bei der weitergehenden Oxidation (AOP) werden sekundär gebildete OH-Radikale zur Oxidation von Spurenstoffen eingesetzt, die nicht oder nur teilweise mit anderen Oxidationsmitteln reagieren.

### Verfahren: Chlorung

#### **Einsatzbereich: Desinfektion, Oxidation**

##### *Desinfektion*

Die Chlorung ist geeignet zur Inaktivierung von Viren und vegetativen Bakterien. Für Viren und vegetative Bakterien sind die  $c \cdot t$ -Werte in der Regel  $< 1 \text{ mg} \cdot \text{min/L}$ . Chlor ist hingegen ungeeignet zur Inaktivierung von Bakteriosporen und Protozoen (z. B. *Giardia lamblia* Zysten, *Cryptosporidium parvum* Oozysten). Für diese Formen oder Organismen wird besser eine Ozonung, eine UV-Desinfektion oder eine (Membran)Filtration eingesetzt. Die Trübung des Wassers sollte  $< 1 \text{ NTU}$  sein, um sicher zu stellen, dass die Mikroorganismen nicht in Partikeln eingelagert und somit vor dem Desinfektionsmittel geschützt sind.

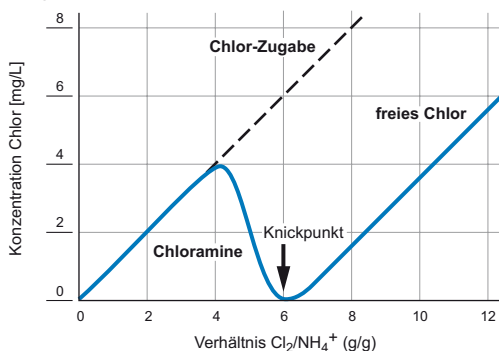
##### *Chemische Oxidation*

###### *Anorganische Stoffe*

Chlor ist geeignet zur Oxidation von reduzierten anorganischen Spezies wie etwa Eisen(II), Nitrit, Sulfid, Sulfid, etc. Mangan(II) wird in homogener Lösung nur sehr langsam oxidiert. Hier muss die Oxidation heterogen in einem mit Mangan(IV)oxid beschichtetem Filter erfolgen. Neben diesen erwünschten Reaktionen oxidiert Chlor auch Bromid und Iodid, was unter Umständen zur Bildung von bromierten und iodierten Nebenprodukten führt. Chlor reagiert rasch mit Ammonium zu Chloraminen, welche sehr viel schlechtere desinfizierende Eigenschaften haben als das

Chlor. Deshalb sollte das Wasser vor der Chlorung möglichst tiefe Ammoniumkonzentrationen aufweisen, was im Rohwasser (Wasser vor der Aufbereitung) in der Schweiz in der Regel der Fall ist. Bei einem Masseverhältnis von Chlor: Ammonium ( $\text{Cl}_2$ :  $\text{NH}_4^+$ ) von 6 kann die oxidierende Wirkung völlig verloren gehen.

### Organische Stoffe



**Abbildung 15: Chloraminbildung in Abhängigkeit der Ammoniumkonzentration. Bei einem Masseverhältnis von 6 geht die desinfizierende Wirkung fast vollständig verloren**

Chlor ist zur Oxidation von organischen Spurenstoffen ungeeignet, da zumeist chlorhaltige Produkte entstehen, die aus toxikologischer Sicht häufig problematischer sind als die Ausgangsstoffe (Edukte). In gewissen Fällen kann es auch zu Geschmacks- und Geruchsproblemen kommen (z. B. Chlorung von Phenolen)

### Probleme

Der Einsatz von Chlor zur Desinfektion und Oxidation ist immer verbunden mit Nebenreaktionen mit dem natürlichen organischen Material (NOM). Einerseits führt das zu einer raschen Chlorzehrung und andererseits resultieren daraus zahlreiche chlor- und bromhaltige Produkte, die zum Teil aus toxikologischer Sicht bedenklich sind. Bei einer DOC Konzentration von  $> 2$  mg/L kann die Chlorung deshalb problematisch sein. In der Schweiz wird als Indikator

für das Ausmass der Bildung solcher Produkte die Summe der chlorierten und bromierten Trihalomethane (THM: z.B. Chloroform  $\text{CHCl}_3$ ) gemessen. In iodhaltigen Wässern, die in der Schweiz die Ausnahme sind, können auch iodhaltige Produkte gebildet werden. Bei der Lagerung von Chlor (Javelwasser) nimmt der Gehalt an aktivem Chlor in Abhängigkeit der Konzentration des Chlors und der Temperatur ab

### Grenzwerte/Toleranzwerte

In der Schweiz gibt es einen Toleranzwert für freies Chlor in Trinkwasser von 0.1 mg/L. Dieser Wert ist vor allem aus organoleptischen Gründen festgelegt worden, da der Chlorgeschmack des Trinkwassers in der Schweiz eine sehr tiefe Akzeptanz bei den Konsumenten hat. Einzelne Individuen können Chlor aber auch in tieferen Konzentrationen wahrnehmen. Für die flüchtigen Halogenkohlenwasserstoffe (THM), welche während der Chlorung gebildet werden, gibt es in der Schweiz für die Summe einen Toleranzwert von 0.02 mg/L als Chlor. Für die 4 chlor- und bromhaltigen THM gibt es folgende Grenzwerte: Chloroform ( $\text{CHCl}_3$ ): 0.04 mg/L, Bromdichlormethan ( $\text{CHCl}_2\text{Br}$ ): 0.015 mg/L, Dibromchlormethan ( $\text{CHClBr}_2$ ): 0.1 mg/L, Bromoform ( $\text{CHBr}_3$ ): 0.1 mg/L.

### Beurteilung/Kontrolle des Verfahrens

Zur Beurteilung des Verfahrens muss die Chlorkonzentration mit elektrochemischen Sensoren kontinuierlich gemessen werden. Der Messbereich und die Kalibration dieser Geräte sind entscheidend für den Erfolg des Prozesses und die Garantie für die abgegebene Wasserqualität. Die Quantifikationslimite liegt bei den meisten kommerziell erhältlichen Geräten im Bereich von 0.05 mg/L. Tiefere Messwerte werden zwar angegeben, sind aber nicht quantitativ. Die Kalibration muss gemäss

## 5. Verfahren in der Trinkwasseraufbereitung

Herstellerangaben in regelmässigen Zeitabständen erfolgen. Die Kalibration der Geräte ist in einem tieferen Konzentrationsbereich nicht möglich, da die dazu verwendeten photometrischen Methoden die Quantifikationslimite bei ca. 0.05 mg/L haben. Die am häufigsten eingesetzte photometrische Methode ist die DPD-Methode, die auch als Messkit kommerziell erhältlich ist.

### **Produkte und Vorsichtsmassnahmen**

Chlor kann in verschiedenen Formen dem Trinkwasser zugegeben werden, als Gas ( $\text{Cl}_2$ ), in gelöster Form (in Javelwasser als Hypochlorit,  $\text{OCl}$ ) oder in fester Form als Chlorkalk ( $\text{CaClOCl}$ ). Wird Chlor gasförmig zugegeben, müssen die nötigen Vorsichtsmassnahmen getroffen werden, um einen Gasaustritt zu vermeiden, da Chlorgas sehr aggressiv und ätzend ist. Das Personal muss im Umgang mit Chlorgas geschult sein und die Anlagen müssen vorschriftsgemäss gesichert sein. Der MAK-Wert für Chlorgas beträgt gemäss SUVA 1.5 mg/m<sup>3</sup>. Die Anwendung von Chlor ist für kleinere Wasserversorgungen aufgrund des Handhabung nicht besonders geeignet. Falls jedoch Chlor zur Desinfektion eingesetzt wird, empfiehlt sich am ehesten die Anwendung von Javelwasser, da Lösungen einfach gelagert und dosiert werden können. Chlorkalk ist als Feststoff weniger geeignet zur kontinuierlichen Dosierung, kann aber z. B. zur Desinfektion von Reservoirs eingesetzt werden. Eine weitere Option ist die elektrochemische Herstellung vor Ort, bei welcher durch ein Elektrolyseverfahren Chlor aus einer Salzlösung hergestellt wird.

### **Verfahren: Chlordioxid ( $\text{ClO}_2$ )**

#### **Einsatzbereich: Desinfektion, Oxidation**

Chlordioxid eignet sich sowohl zur effizienten Desinfektion als auch zur selektiven Oxidation von Wasserinhalts-

stoffen. In der Schweiz wird Chlordioxid häufig anstelle von Chlor ( $\text{Cl}_2$ ) als Endstufendesinfektion vor der Einspeisung in Reservoirs oder ins Netz eingesetzt. Chlordioxid wird dem Wasser meist in Form einer wässrigen Lösung zugegeben. Im Rohwasser (speziell Oberflächenwasser) mit hohen NOM-Konzentrationen wird Chlordioxid relativ rasch gezehrt. Ab einer Konzentration von etwa 0.05 mg/L ist Chlordioxid organoleptisch wahrnehmbar. Im Gegensatz zu Chlor ist die Spezifizierung und Reaktivität von Chlordioxid pH-unabhängig, in hohen und tiefen pH-Bereichen sind einzig Disproportionierungsreaktionen zu berücksichtigen.

#### *Desinfektion*

Chlordioxid weist gute desinfizierende Eigenschaften auf. Es hat eine gute Wirksamkeit gegen viele wassergängige Mikroorganismen (Bakterien und Viren). Protozoen (z. B. *Cryptosporidium* Oozysten) können nur teilweise abgetötet werden. Die desinfizierende Wirkung von Chlordioxid ist bei gleicher Konzentration besser als die von Chlor. Für die Angabe der Wirkung wird das  $c \cdot t$ -Konzept verwendet. Die erforderliche Dosis wird massgeblich vom Zehungsverhalten des Wassers bestimmt. Für eine zuverlässige Desinfektion sind Trübungswerte < 1 NTU im Rohwasser unbedingt einzuhalten. Chlordioxid eignet sich aufgrund der langen Lebensdauer in aufbereitetem Wasser sehr gut als Netzschutz.

#### *Chemische Oxidation*

##### *Anorganische Stoffe*

Eisen(II) und Mangan(II) wird gut oxidiert und in schwerlösliche Verbindungen überführt. Diese können anschliessend in einer Filtration leichter abgetrennt werden. Chlordioxid oxidiert Bromid ( $\text{Br}^-$ ) nicht, es werden also kein Bromat und keine bromorganischen Verbindungen gebildet. Gegenüber

Chlor besitzt Chlordioxid den Vorteil, dass es keine Reaktion mit Ammonium ( $\text{NH}_4^+$ ) eingeht und somit auch in  $\text{NH}_4^+$ -haltigen Wässern keine Zehrung stattfindet.

#### *Organische Stoffe*

In der Regel oxidiert Chlordioxid organische Stoffe durch eine Elektronenübertragungsreaktion. Das gebildete organische Radikal reagiert dann mit einem weiteren Chlordioxid oder anderen Wasserinhaltsstoffen. Chlordioxid eignet sich zur selektiven Oxidation von Vorläufersubstanzen von Geruchs- und Geschmacksstoffen (z. B. Oxidation von Phenolverbindungen). Im Gegensatz zu Chlor werden kaum Trihalomethane (THM) gebildet. Zudem werden Humin- und Fulvinsäuren wirkungsvoll entfärbt.

#### *Matrix*

Die Flockung von Trübstoffen kann durch Chlordioxid je nach Wasserzusammensetzung begünstigt werden und somit eine nachfolgende Filtration unterstützen.

#### **Probleme**

Chlordioxid ist ein giftiges Gas und wird in der Regel direkt auf der Anlage hergestellt. Ab einer Konzentration von > 10 Vol-% ist gasförmiges Chlordioxid explosiv. Dies muss vor allem über einer wässrigen Lösung von mehr als 8 g/L beachtet werden. Ebenso sind Chloritlösungen feuergefährlich und entzünden brennbare organische Stoffe. Im üblichen pH-Bereich der Wasseraufbereitung reagiert Chlordioxid hauptsächlich zu Chlorit („Blutgift“) und nur teilweise zu Chlorat. Beide Stoffe sind im Trinkwasser unerwünscht. Um die Konzentrationen unterhalb der Toleranzwerte für Chlorit und Chlorat zu halten, dürfen maximal 0.4 mg  $\text{ClO}_2$ /L zudosiert werden. Chlordioxid hat bei Konzentrationen > 0.05 - 0.1 mg/L einen unangenehmen,

stechenden Geruch. Die Oxidation von phenolischen Verbindungen und von Huminstoffen kann zu einer gelblichen Sekundärverfärbung (Bildung von Chinonen und deren Sekundärprodukten) des Wassers führen. Dies ist vor allem bei huminstoffreichem Rohwasser der Fall und tritt dann ein, wenn die Oxidation nur unvollständig abläuft. Mit einer gut abgestimmten Dosierung oder einer allfälligen Voroxidation kann dem begegnet werden. Als weitere Nebenprodukte entstehen aus der Reaktion mit NOM sauerstoffhaltige Verbindungen wie Aldehyde und Ketone, die zu einer Erhöhung des AOC führen können.

#### **Mögliche Vor-/Nachbehandlungen**

Als Vorbehandlungen können, je nach Rohwasserbeschaffenheit, sämtliche Verfahren zur weitergehenden Trinkwasseraufbereitung eingesetzt werden. Eine Voroxidation (Chlorung, Ozonung) erhöht die Lebensdauer von Chlordioxid beträchtlich. Beim Einsatz von Ozon als primäres Desinfektionsmittel ohne anschließende Filtration ist zu beachten, dass Chlordioxid und Chlorit bei direktem Kontakt mit Ozon zu Chlorat oxidiert werden. Gelangt Chlordioxid in den Aktivkohlefilter so wird es zu Chlorit reduziert. Unter aeroben Bedingungen werden Chlorat oder Chlorit im Aktivkohlefilter nicht weiter transformiert.

#### **Grenzwerte/Toleranzwerte**

Aus organoleptischen Gründen schreibt in der Schweiz die FIV einen Toleranzwert für Chlordioxid von 0.05 mg/L im Trinkwasser vor. Zudem gilt für aus der Wasseraufbereitung stammendes Chlorat ( $\text{ClO}_3^-$ ) und Chlorit ( $\text{ClO}_2^-$ ) ein Toleranzwert von jeweils 0.2 mg/L.



## 5. Verfahren in der Trinkwasseraufbereitung

### **Beurteilung/Kontrolle des Verfahrens**

Zur korrekten Dosierung von Chlordioxidlösungen muss der Volumenstrom des Wassers kontinuierlich gemessen werden. Die Konzentrationen von Chlordioxid und Chlor sind im aufbereiteten Wasser kontinuierlich zu erfassen. Dies kann mit elektrochemischen Sensoren erfolgen. So kann zum einen der jeweilige Toleranzwert und zum anderen die genügende Zudosierung von Chlordioxid überprüft werden. Rohwasser mit einer Trübung > 1 NTU muss vorbehandelt werden, bevor eine Desinfektion stattfinden kann.

### **Produkte und Vorsichtsmassnahmen**

Sämtliche für die Chlordioxidherstellung benötigten Chemikalien sind gefährliche Arbeitsstoffe. Den entsprechenden Sicherheitsvorschriften ist Rechnung zu tragen. In der Regel wird Chlordioxid vor Ort aus Natriumchlorit hergestellt. Dies geschieht grundsätzlich auf zwei Arten. Beim Chlorit/Chlor-Verfahren wird Chlorit durch Chlor zu Chlordioxid oxidiert. Wird beim Chlorit/Chlor-Verfahren zusätzlich auch Säure eingesetzt, spricht man vom Drei-Komponenten-Verfahren. Beim Chlorit/Säure-Verfahren disproportioniert bei tiefem pH-Wert Chlorit zu Chlordioxid und Chlorid (Cl<sup>-</sup>). Beim Einsatz von Säure (HCl) darf diese wegen Explosionsgefahr nicht direkt mit Natriumchloritlösung in Kontakt kommen. Vorratsbehälter für Chlordioxidlösungen sind immer mit einer Be- und Entlüftung zu versehen. Der MAK-Wert für gasförmiges Chlordioxid beträgt 0.3 mg/m<sup>3</sup>.

### **Verfahren: Ozonung**

#### **Einsatzbereich: Desinfektion, Oxidation**

Ozon eignet sich gut für eine Voroxidation und/oder zur Primärdesinfektion nach einer Vorbehandlung zur Partikel- und Trübungsentfernung. Ozon kann in der Regel nicht als alleinige

Verfahrensstufe eingesetzt werden. Meist wird Ozonung in Kombination mit Schnell- oder Langsandsandfiltern oder Aktivkohle eingesetzt. Ozon weist in Wasser eine eher geringe Löslichkeit auf. Zusätzlich ist Ozon im Wasser relativ instabil und zerfällt unter Bildung von OH-Radikalen. Dies kann gezielt verwendet werden, um die Ozonung als weitergehende Oxidation (AOP) zu nutzen. Aufgrund der relativ kurzen Lebensdauer ist Ozon ungeeignet als Netzschutz.

#### *Desinfektion*

Ozon ist ein effizientes Desinfektionsmittel für Bakterien, Viren (Polio, Rotaviren, etc.) und teilweise auch für Protozoen (*Giardia*, Kryptosporidium, etc.). Für *Cryptosporidien* allerdings nur, wenn genügend hohe c\*t-Werte erreicht werden, unter Berücksichtigung der maximalen Ozonkonzentration (Toleranzwert 0.05 mg O<sub>3</sub>/L). Eine allfällig zu hohe Ozonkonzentration kann z. B. mit Aktivkohle entfernt werden. Voraussetzung für eine effektive und effiziente Desinfektion ist eine weitgehende Trübstofffreiheit des Wassers (< 1 NTU). Für die Abschätzung der Desinfektionswirkung wird das c\*t-Konzept angewendet (Produkt aus Konzentration c und mittlerer Reaktionszeit t).

#### *Chemische Oxidation*

##### *Anorganische Stoffe*

Die Oxidation anorganischer Stoffe erfolgt auf zwei Arten, direkt durch O<sub>3</sub> (selektiv) oder durch sekundär gebildete OH-Radikale (unselektiv). Anorganische Inhaltstoffe wie Eisen, Mangan, Cyanid, Sulfid oder Arsen werden schnell und direkt mit Ozon oxidiert. Durch die Oxidation von Sulfid zu Sulfat wird der unangenehme Geruch (faule Eier) entfernt. Bei bromidhaltigem Rohwasser wird durch Oxidation aus Bromid unterbromige Säure (HOBr/BrO<sup>-</sup>) gebildet. Dieses reagiert teilweise weiter zu

unerwünschtem Bromat und zu bromorganischen Verbindungen. Bei den in der Schweiz typischerweise vorkommenden Bromidkonzentrationen von 10 - 20 µg/L stellt die Bildung von Bromat bei sachgemäßem Einsatz von Ozon in der Regel kein Problem dar. Allgemein kann der Toleranzwert von Bromat von 10 µg/L bei Bromidkonzentrationen im Rohwasser unter 50 µg/L bei einem gut beherrschten Ozonungsprozess eingehalten werden.

#### *Organische Stoffe*

Die Reaktion von Ozon mit gelöstem, natürlichem organischem Material (NOM), gemessen als DOC, führt in einer Teiloxidation zu polaren Reaktionsprodukten mit geringeren Molekülmassen. Diese Oxidationsprodukte (z. B. Aldehyde, Ketone, organische Säuren, etc., sogenannter AOC) sind biologisch besser abbaubar als die Ausgangsstoffe, werden aber in Aktivkohlefiltern schlechter zurückgehalten. Eine effektive Reduktion dieses AOC kann erst in einer biologischen Aufbereitungsstufe (z. B. biologische Aktivkohle, Langsam-sandfiltration, etc.) erreicht werden. Die Ozonung sollte demnach nicht als letzte Verfahrensstufe eingesetzt werden. Zudem ist die Ozonung zur weitgehenden Entfärbung des Wassers sowie zur Zerstörung von Geruchs- und Geschmacksstoffen geeignet. Der Vorteil von Ozon liegt in der geringen Bildung von unerwünschten Nebenprodukten. Bei einer anschliessenden Chlorung (Netzschutz) werden kleinere Mengen chlororganische Verbindungen als beim direkten Einsatz von Chlor gebildet.

#### *Matrix*

Hohe Gehalte an NOM beschleunigen den spontanen Zerfall von Ozon. Dem gegenüber stabilisieren höhere Konzentrationen an  $\text{HCO}_3^-$  (hartes Grund- und Quellwasser) das Ozon. Durch geringe Ozondosierung (0.2 - 0.5 mg  $\text{O}_3$ /mg DOC)

wird die Mikroflokkung gefördert. Dieser Effekt kann gezielt eingesetzt werden, um die Effektivität einer Filtration oder Sedimentation zu erhöhen. Bei zu hoher Dosierung von Ozon (0.5 - 2.0 mg  $\text{O}_3$ /mg DOC) kann es jedoch zum gegenteiligen Effekt kommen. Die optimale Ozondosis ist jeweils durch Versuche zu ermitteln.

#### **Probleme**

Ozon ist ein giftiges und in höheren Konzentrationen (> 9.5 Vol-%) explosives Gas. Die Stabilität von Ozon im Wasser ist stark abhängig vom pH-Wert, DOC-Gehalt und Alkalinität. Dies führt beim Mischen unterschiedlicher Rohwässer (z. B. See- und Quellwasser) oder stark schwankender Wasserqualität (z. B. Karstquellen) zu Problemen in der genauen Dosierung. Die Zudosierung wird aus diesem Grund über die Ozonrestkonzentration am Auslauf des Reaktors gesteuert. Die Erzeugung von Ozon erfordert einen Energieaufwand aus Luft von 12 - 18 kWh/kg  $\text{O}_3$  und aus Sauerstoff rund 6 - 10 kWh/kg. Bei der Ozonerzeugung aus Luft werden aus  $\text{N}_2$  Stickoxide gebildet, welche im Kontakt mit Wasser zu Salpetersäure ( $\text{HNO}_3$ ) führen. Um die Bildung von  $\text{HNO}_3$  (Korrosion im System) zu reduzieren, muss die Luft zur Ozonerzeugung getrocknet werden. Die gebildeten Stickoxide sowie die Ozonreste in der Abluft müssen vernichtet werden.

#### **Mögliche Vor-/Nachbehandlung**

Die Ozonung wird meist zu Beginn (Vorozonung) oder in der Mitte der Aufbereitung (Zwischenozonung) eingesetzt. Die Vorozonung hat eine Desinfektion und Mikroflokkung zum Ziel. Die Ausschöpfung der spontanen  $\text{O}_3$ -Zehrung durch Matrixstoffe während der Vorozonung ist erwünscht, da die anschliessenden chemischen Desinfektionsstufen effektiver betrieben

## 5. Verfahren in der Trinkwasseraufbereitung

werden können. Zudem werden aus der Reaktion mit NOM biologisch abbaubare Oxidationsprodukte gebildet, die in einer biologischen Filtration abgebaut werden können (AOC-Reduktion). Für eine kontrollierte Desinfektion muss bei trübstoffhaltigem Rohwasser eine vorgängige Partikelabscheidung (Flockung/Sedimentation, Filtration, etc.) erfolgen. Zur Elimination von zu hohen Restozonkonzentrationen nach der Ozonungsstufe kommen Aktivkohlefilter zum Einsatz. Dabei wird Ozon wieder zu Sauerstoff umgewandelt.

### **Grenzwerte/Toleranzwerte**

Der Toleranzwert für Ozon im Trinkwasser liegt gemäss FIV bei 0.05 mg/L. Die Reaktion von Ozon und OH-Radikalen mit Bromid kann zur Bildung von unerwünschtem Bromat führen. Der Toleranzwert für Bromat beträgt 0.01 mg/L. Bei der Ozonherstellung aus Luft entsteht Salpetersäure, gelöst im Wasser erhöht diese die Nitratkonzentration. In Kombination mit hohem Nitratgehalt im Rohwasser muss sichergestellt werden, dass der Toleranzwert von 40 mg NO<sub>3</sub><sup>-</sup>/L eingehalten wird.

### **Beurteilung/Kontrolle des Verfahrens**

Zur Steuerung und Überwachung der Ozonanlage ist eine kontinuierliche Messung der gelösten Ozonkonzentration erforderlich. Dies erfolgt mit amperometrischen Sensoren. Die Ozonrestkonzentration muss am Ablauf des Reaktors genügend hoch sein, um die Desinfektionswirkung zu gewährleisten. Das heisst, sie ist z.B. zur Inaktivierung von Kryptosporidien so festzulegen, dass der c\*t-Wert 5 -10 min\*mg/L beträgt (Messung 1 mg O<sub>3</sub>/L am Ende des Reaktors mit einer Durchflusszeit von 10 min).

Zur Bestimmung von Ozon in wässrigen Proben stehen auch photometrische Verfahren zur Verfügung (z. B. Indigo-Methode). Diese werden auch zur Kalibration der photometrischen Sensoren eingesetzt.

### **Produkte und Vorsichtsmassnahmen**

Ozon wird durch eine stille elektrische Entladung aus sauerstoffhaltigen Gasen gewonnen. Die Herstellung von Ozon geschieht vor Ort aus getrockneter Luft oder aus reinem Sauerstoff. Das Eintragsystem ist eine wichtige Komponente für den effektiven Einsatz von Ozon. Eingesetzt werden Injektor-Verfahren, Diffusoren oder statische Mischer. Restozon in der Abluft muss durch Katalysatoren oder durch thermische Behandlung vernichtet werden. Gasförmiges Ozon kann im Kontakt mit organischen Materialien (z. B. Aktivkohle, Fette, Gummi, etc.) zu Explosionen führen. Der MAK-Wert für Ozon wird von der SUVA mit 0.2 mg/m<sup>3</sup> angegeben. Aufgrund der relativ aufwändigen Produktion und Handhabung ist Ozon vor allem für grössere Trinkwasseraufbereitungsanlagen geeignet.

### **Verfahren: UV-Verfahren**

#### **Einsatzbereich: Desinfektion, Oxidation**

Die UV-Bestrahlung ist hauptsächlich ein Desinfektionsverfahren, führt aber je nach Dosis auch teilweise zu selektivem Abbau von gewissen Spurenstoffen. In Kombination mit Wasserstoffperoxid (H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>) kann UV-Bestrahlung aber auch zur Oxidation von weiteren Wasserinhaltsstoffen eingesetzt werden. Je nach Rohwasserbeschaffenheit kann die UV-Desinfektion als alleinige Verfahrensstufe eingesetzt werden (z. B. bei qualitativ hoch stehendem Grund- und Quellwasser). Die Wirkung basiert auf der Beschädigung des Erbgutes (DNA, resp. RNA) in der Zelle. Dadurch kommt es zur Störung des Stoffwechsels und zum Verlust der Teilungsfähigkeit. Die Bestrahlungsdosis ist nur gering, so dass eine photochemische Transformation von NOM praktisch keine Rolle spielt. Die für die Desinfektionsleistung massgebliche Grösse ist die UV-Dosis. Der SVGW hat für die UV-Desinfektion in der Wasser-

versorgung eine minimale UV-Dosis von 400 J/m<sup>2</sup> festgelegt. Die Desinfektionsleistung wird von vier Faktoren bestimmt, nämlich dem Durchfluss des Wassers (respektive Expositionszeit), den hydraulischen Bedingungen in der Bestrahlungskammer, der UV-Transmission des zu bestrahlenden Wassers und der Bestrahlungsstärke, die an der Bestrahlungskammer mit einem standardisierten UV-Sensor in W/m<sup>2</sup> gemessen wird. Die Bestrahlungsstärke wird wiederum durch die Strahlerleistung, das Strahleralter, eventuelle Belagsbildung am Strahlerhüllrohr und durch die UV-Transmission des zu bestrahlenden Wassers beeinflusst. Die Trübung des Rohwassers sollte 1 NTU (besser 0.3 NTU) nicht überschreiten. Im Gegensatz zur Anwendung von Chlor und Chlordioxid werden mit der UV-Desinfektion grundsätzlich auch parasitäre Erreger (*Cryptosporidium*, *Giardia*, Amöben, etc.) zuverlässig abgetötet. Dabei werden Reduktionsraten von 4 Zehnerpotenzen erreicht. Der Hauptvorteil der UV-Bestrahlung ist sicher die praktisch nebenproduktfreie Desinfektion ohne Einsatz von chemischen Mitteln. Auch Geruch und Geschmack werden nicht beeinflusst. UV-Verfahren bieten aber keinen Netzschutz. Um eine Wiederverkeimung im Netz zu vermeiden, ist entweder ein biologisch stabiles Wasser oder ein zusätzlicher Netzschutz (Chlor, Chlordioxid) erforderlich.

### **Probleme**

Eine wirksame Desinfektion findet nur dann statt, wenn die UV-Strahlung direkt auf die Mikroorganismen einwirken kann. Sind Mikroorganismen in Partikel eingebunden oder angelagert, so werden sie gegen UV-Strahlung mehr oder weniger geschützt (Abschattung). Daher sind möglichst geringe Trübungswerte (< 1 NTU) erforderlich. In der Praxis hat sich gezeigt, dass bei UV-Anlagen mit hoher Strahlungsdosis (> 400 J/m<sup>2</sup>) relativ trübes Rohwasser nicht immer verworfen wird, weil die UV-Sensoren zur Prozessü-

berwachung (Berücksichtigung der Transmission) einen genügend hohen Wert feststellen. Geschützt in Partikeln können dabei lebende Mikroorganismen ins Trinkwasser gelangen. Somit sollte prinzipiell, vor allem aber bei stark schwankenden Rohwasserbedingungen (z. B. bei Karstwasser), eine Trübungsmessung vorschaltet werden. Aufgrund der Strahleralterung und durch Abscheidungen auf den Strahlerhüllrohren kommt es zu einer stetigen Strahlungsverminderung. Eine regelmässige Reinigung sowie ein rechtzeitiger Ersatz sind notwendig. Bei hohen Nitratkonzentrationen im Rohwasser und Wellenlängen unter 235 nm kommt es zur Bildung von Nitrit. Nitrit gilt als Blutgift und ist im Trinkwasser unerwünscht. Mit entsprechenden Strahlerhüllrohren (Abschneiden der Strahlung unterhalb 235 nm) kann dies jedoch verhindert werden.

### **Reaktor**

Der Reaktorhydraulik kommt bei UV-Verfahren eine entscheidende Rolle zu. Die Strahler befinden sich in Hüllrohren aus Quarzglas und können senkrecht oder parallel zur Strömungsrichtung angeordnet sein. Wasser mit seinen Inhaltsstoffen absorbiert UV-Strahlung stärker als sichtbares Licht. Deshalb müssen die Strahler relativ dicht nebeneinander angeordnet werden. Die durchstrahlte Wasserschicht beträgt nur wenige Zentimeter (max. 0.5 m). Die Hydraulik (Verwirbelung, Vermeiden von Kurzschlüssen, etc.) muss so ausgelegt sein, dass eine genügend lange Aufenthaltszeit gewährleistet ist und jeder Organismus genügend nahe am Strahler vorbeikommt. In der Regel wird die Reaktorgeometrie vom Hersteller vorgegeben. Die Effizienz der Anlage muss vom Hersteller mit einer biodosimetrischen Prüfung nachgewiesen werden. Für die Zertifizierung von UV-Anlagen existieren zwei vom SVGW anerkannte Prüfverfahren, zum einen die Ö-Norm M5873 und das DVGW-Arbeitsblatt W294.

## 5. Verfahren in der Trinkwasseraufbereitung

### **Mögliche Vor-/Nachbehandlung**

Ob vor der Desinfektion eine Trübstoff- und Partikelentfernung erforderlich ist, hängt von der Belastung des Wassers ab. Wird der Wert von 1 NTU unterschritten und ist die mikrobiologische Belastung gering (meist bei Grund- und Quellwasser), so ist keine Aufbereitung erforderlich. Im Allgemeinen ist bei der Nutzung von Oberflächenwasser immer eine Trübstoff- und Partikelentfernung notwendig. Dazu eignen sich alle gängigen Verfahren zur Partikelabscheidung wie Schnellfiltration, Langsandsandfiltration oder Membranverfahren.

### **Grenzwerte/Toleranzwerte**

Bei hohen Nitratkonzentrationen (im Bereich des Toleranzwertes) im Rohwasser muss auch die Nitritkonzentration überwacht werden. In der FIV ist der Toleranzwert für Nitrit im Trinkwasser auf 0.1 mg  $\text{NO}_2^-/\text{L}$  festgelegt, derjenige für Nitrat auf 40 mg  $\text{NO}_3^-/\text{L}$ . Der Toleranzwert für Schwebstoffe (Trübung) beträgt 1.0 NTU.

### **Beurteilung/Kontrolle des Verfahrens**

Die Desinfektionswirksamkeit einer Anlage wird mit Hilfe der Kennwerte maximaler Durchfluss, Transmission und Referenzbestrahlungsstärke überwacht. Diese Kennwerte werden mit einer biosimetrischen Prüfung von einer qualifizierten Prüfstelle eruiert und sind Bestandteil der Zulassung. Die Anlage muss gemäss SVGW eine ausreichende Raumbestrahlung (Dosis, Fluenz) von mindestens 400  $\text{J}/\text{m}^2$  aufweisen. Die Überwachung erfolgt indirekt über die kontinuierliche Erfassung mittels UV-empfindlicher Sensoren für die Referenzbestrahlungsstärke. In Mehrstrahlergeräten ist es oft nicht praktikabel, jeden Strahler mit einem eigenen Sensor zu überwachen. Die Funktion der Strahler muss deshalb

über die Energieaufnahme überwacht werden. Weiter sind die Betriebszeit und die Zahl der Einschaltungen zu erfassen. Die Brenndauer führt vor allem bei Niederdruckstrahlern zu einer Abnahme der Strahlungsleistung. Typische Nutzlebensdauern von Niederdruckstrahlern reichen von 4'000 bis 10'000 Stunden, von Mitteldruckstrahlern liegen sie im Bereich von 10'000 Stunden. (Zum Beschrieb der Strahlertypen siehe Abschnitt Produkte und Vorsichtsmassnahmen).

Die minimale Aufenthaltszeit im Reaktor wird über die Regelung des Durchflusses sichergestellt und überwacht. Bei älteren Anlagen ist diese Durchflussmenge jedoch nicht immer minimiert. Zudem fehlen bei einigen Anlagen automatisierte Trübungsüberwachungen, was insbesondere bei Quellen mit stark schwankenden Schüttungen und Trübungen zu Verunreinigungen des Trinkwassers führt.

### **Biosimetrische Prüfung**

Die biosimetrische Prüfung basiert auf der unter Laborbedingungen ermittelten Empfindlichkeit (UV-Inaktivierungskurve) von *Bacillus subtilis* Sporen auf bestimmte UV-Dosen (Zeit \* Bestrahlungsstärke). Sie wird eingesetzt, um die ausreichende Strahlungsleistung von UV-Anlagen nachzuweisen oder zu überprüfen. Dabei werden dem Wasserstrom vor der UV-Anlage *B. subtilis* Sporen in einer Konzentration von etwa  $3 \times 10^3/\text{ml}$  konstant zugesetzt ( $N_0$ ). Nach vollständiger Einmischung und bei konstanten Durchflussbedingungen werden nach der UV-Anlage mindestens 5 Proben im Abstand von jeweils einer Minute entnommen ( $N$ ). Diese Proben werden mittels Plattenzählverfahren angesetzt und während 24 h bei 37°C inkubiert. Aus der berechneten Reduktion von aktiven *B. subtilis* Sporen ( $\lg(N/N_0)$ ) kann nun mit Hilfe der UV-Inaktivierungskurve auf die redukti-

onsäquivalente Fluenz (Strahlungsdosis) im Reaktor geschlossen werden. Diese so ermittelten Werte gelten immer für eine bestimmte Kombination von Durchfluss (Aufenthaltszeit) und Transmission. Die Tests können durch die Veränderung der Bedingungen auf zwei Arten verschärft werden. Zum einen wird durch Zugabe von Ligninsulfonat die Transmission des Wassers reduziert, jedoch die Strahler bei 100% Leistung betrieben (hohe Emission - hohe Absorption). Zum anderen wird bei natürlicher Transmission die Leistung der Strahler auf 70% (oder weniger) reduziert (tiefe Emission - tiefe Absorption). Ausschlaggebend für die Bewertung ist die jeweils konservativere Variante.

### Produkte und Vorsichtsmassnahmen

Zur Desinfektion von Trinkwasser werden Mittel- oder Niederdruckstrahler verwendet. Die Mitteldruckstrahler emittieren bei Wellenlängen von 200 - 300 nm und weisen einen relativ hohen Energiebedarf von 100 W pro cm Leuchtlänge auf. Die Wandtemperatur beträgt rund 900°C. Der Vorteil ist die sehr hohe Leistungsdichte und die einfache und schnelle Regelbarkeit. Mitteldruckstrahler eignen sich vor allem für grosse Durchflussmengen. Niederdruckstrahler dagegen emittieren bei 253.7 nm und benötigen 0.5 - 3 W/cm bei Betriebstemperaturen von 50 - 90°C. Die UV-Bestrahlungsanlage muss für die jeweilige Wasserbeschaffenheit ausgelegt werden. Die Referenzbestrahlungsstärke muss mit einem standardisierten UV-Sensor an einem standardisierten Messfenster überwacht werden. Die Strahler sind rechtzeitig auszuwechseln. Grundsätzlich sollen alle Strahler dieselbe Betriebszeit aufweisen. Beim Einschalten der Strahler ist darauf zu achten, dass die Geräte erst nach 3 - 6 min (Mitteldruckstrahler) oder 15 - 30 min (Niederdruckstrahler) die volle Leistung liefern. In der Planung von UV-Anlagen muss auch die Entsor-

gung von defekten und alten Strahlern berücksichtigt werden. Diese enthalten grössere Mengen an flüssigem oder gebundenem Quecksilber.

### Weitergehende Behandlung

Gewisse Verunreinigungen im Rohwasser können mit Filtration und Oxidation alleine nicht entfernt werden und verlangen eine zusätzliche Aufbereitung. Eine solche weitergehende Behandlung ist immer gezielt auf spezifische Substanzen/Parameter ausgerichtet und muss dementsprechend konzipiert werden. Speziell bei anthropogen stark belastetem Rohwasser sind weitergehende Verfahren notwendig, um die Qualitätsziele zu erreichen. Die im Folgenden beschriebenen Verfahren sind jeweils Bestandteile einer mehrstufigen Aufbereitungskette und kommen in der Regel nie einzeln zum Einsatz.

### Verfahren: Aktivkohle

#### Einsatzbereich: Adsorption, Filtration

Aktivkohle findet vor allem in der Elimination von gelösten organischen Spurenstoffen (z. B. Pestizide, Geschmacks- und Geruchsstoffe, chlorierte Kohlenwasserstoffe, etc.) Verwendung und kann als Schutz bei plötzlich auftretenden Verschmutzungen dienen. Sie ist ausgerichtet auf die Elimination von schwer oder nicht abbau-

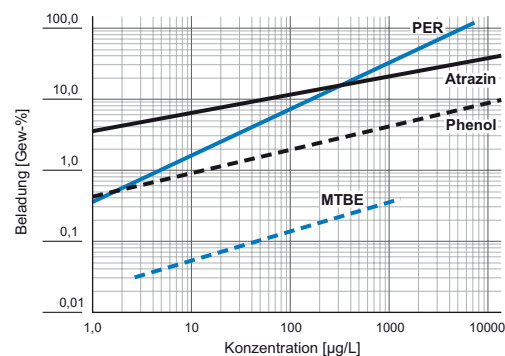


Abbildung 16: Adsorptions-Isothermen für ausgewählte organische Stoffe an frischer, unbelasteter Aktivkohle ohne konkurrierende Adsorption durch NOM

## 5. Verfahren in der Trinkwasseraufbereitung

baren Spurenstoffen. Im Allgemeinen adsorbieren nicht polare bis schwach polare Verbindungen, Verbindungen mit geringer Wasserlöslichkeit und solche mit hohen Oktanol/Wasser-Verteilungskoeffizienten ( $k_{ow}$ ) am besten. Weiter wird Aktivkohle eingesetzt, um Restkonzentrationen von Oxidations- und Desinfektionsmitteln zu eliminieren. Zusätzlich dient sie als Träger für erwünschte Mikroorganismen zum biologischen Abbau von organischen Substanzen. Zur Entwicklung einer aktiven biologischen Reinigung ist eine Einarbeitungszeit von 3 bis 9 Monaten erforderlich. Die biologische Aktivität in der Aktivkohle führt zu einem Abbau von biologisch verfügbaren organischen Stoffen (AOC). Diese Umwandlung ist erwünscht, da sie zu einer Zehrung der Nährstoffe führt und dadurch das Potential einer Wiederverkeimung im Netz verkleinert. Für die Entfernung von NOM werden anfänglich (bei frischer Aktivkohle) Eliminationsraten von bis zu 90% erreicht. Dieser Wert reduziert sich jedoch rasch und pendelt sich nach 3 - 6 Monaten bei rund 30% ein für einen einzelnen Adsorber (biologischer Abbau). Wird die Aktivkohle nur zur Adsorption von Spurenstoffen eingesetzt, so betragen die typischen Filterlaufzeiten nur einige wenige Monate bis rund ein Jahr. Dies ist vor allem auf die konkurrierende Belegung der Adsorptionsplätze und die Blockierung von Poren durch NOM zurückzuführen. Abfiltrierbare Stoffe lagern sich im Kohlebett ab und verursachen einen erhöhten Druckverlust und die Gefahr des Partikelaustrages nimmt zu. Die Filter müssen dadurch regelmässig gespült werden. Spülraten von mehrmals wöchentlich (hohe Trübung) bis monatlich (geringe Trübung) sind üblich. Die Aktivkohle wird einerseits in gekörnter Form (Körnung 1 - 3 mm) eingesetzt, entweder als Festbett oder Wirbelschicht. Andererseits kann sie als Pulveraktivkohle

(PAC) zudosiert und mittels Sedimentation oder Membranfiltration (sog. Cristal<sup>®</sup>Process) wieder entfernt werden. Der Einsatz von Pulveraktivkohle ist insbesondere dann sinnvoll, wenn nur kurz oder periodisch auftretende Probleme zu bewältigen sind (z. B. saisonal bedingtes Auftreten von Geruchs- oder Geschmacksstoffen). Bei genügender Adsorptionsleistungsreserve bietet Aktivkohle auch bei schwankenden Zulaufkonzentrationen eine konstante Wasserqualität.

### **Probleme**

Ein hoher Anteil an natürlichem organischem Material (NOM) im Zulauf verringert die Adsorptionskapazität der Aktivkohle für organische Verunreinigungen in beträchtlichem Masse. Dies geschieht aufgrund einer konkurrierenden Adsorption mit den zu entfernenden, unerwünschten Stoffen. Mit der Auswahl der Aktivkohle kann diesem Effekt teilweise begegnet werden. Aktivkohle weist nur eine begrenzte Adsorptionskapazität auf und muss bei vollständig belegter Oberfläche (erschöpfte Adsorptionskapazität) regeneriert werden. Dazu müssen Aktivkohlefilter entleert werden. Die Aktivierung geschieht in speziellen Aktivierungsöfen beim Hersteller. Bei der Reaktivierung treten Kohleverluste von rund 10% auf, welche mit Frischkohle ausgeglichen werden. Während des Betriebes von Wirbelschichtadsorbern und den häufigen Spülungen von Festbettfiltern kommt es zu signifikantem Abrieb der Aktivkohlekörner. Dieser Abrieb führt zu einem kontinuierlichen Materialverlust, verbunden mit einer möglichen Filtratkontamination durch den Abrieb. Das detaillierte Adsorptionsverhalten, speziell die konkurrierende Adsorption bei (Schad)Stoffgemischen, kann für ein spezifisches Wasser nicht vorhergesagt werden. Deshalb sind umfangreiche Vorversuche in Pilotanla-

gen notwendig. Nur so kann die Adsorptionskapazität einzelner Stoffe im Rohwasser bestimmt und die Anlage auf die spezifischen Bedürfnisse ausgerichtet werden.

#### **Mögliche Vor-/Nachbehandlung**

Für den wirtschaftlichen Betrieb von Aktivkohleadsorptionsanlagen ist eine vorgängige Reduktion von Partikeln und teilweise von organischem Material von Vorteil. Eine Vorozonung oxidiert einen Teil des NOM zu AOC. Kommt PAC zum Einsatz, ist eine anschließende Abtrennung mittels Sedimentation oder Membranfiltration nötig, wobei letztere eine modernere Variante darstellt. Oft wird jedoch die Aktivkohle als Filtermaterial in der Raumfiltration eingesetzt. Wird eine Langsam- oder Membranfiltration nachgeschaltet, kann eine weitergehende Reduktion von DOC und Mikroorganismen erreicht werden. Durch die biologische Aktivität können Mikroorganismen (insbesondere Pseudomonaden) ins Trinkwasser gelangen. Deshalb ist eine Desinfektion oder Membranfiltration (Ultra- oder Nanofiltration, Umkehrosiose) nach der Aktivkohle sinnvoll.

#### **Beurteilung/Kontrolle des Verfahrens**

Zur Überwachung der Beladung der Aktivkohle mit Schadstoffen muss die Konzentration definierter Parameter (z. B. Pestizide, Kohlenwasserstoffe, Cyanotoxine, etc.) im Rohwasser und im Filtrat kontrolliert werden. Beim Überschreiten einer vorgegebenen Höchstkonzentration muss die Aktivkohle regeneriert werden. Der langsame Konzentrationsanstieg im Filtrat wird als Durchbruchkurve bezeichnet und zeigt die Sättigung der Aktivkohle an. Eine Rückspülung wird dann erforderlich, wenn es im Kohlebett zu einem erhöhten Druckverlust kommt, ausgelöst durch die Ablagerung abfiltrierbarer Stoffe. Die Rückspülrate variiert stark in Abhängigkeit der Rohwasserbe-

schaffenheit und reicht von täglich bis zu monatlich. Die Elimination von NOM wird mit einer UV-Absorptionsmessung ( $SAK_{254}$ ) überwacht.

#### **Produkte und Vorsichtsmassnahmen**

Aktivkohle ist ein poröses, aus ungeordneten Graphitplättchen bestehendes Material mit sehr grosser innerer Oberfläche (600 - 1500 m<sup>2</sup>/g Aktivkohle). Als Rohstoffe dienen beispielsweise Steinkohle, Torf, Kokosnussschalen oder Holz, die unter anoxischen Bedingungen thermisch behandelt werden. Die einzelnen Aktivkohleprodukte unterscheiden sich stark in ihren Eigenschaften und müssen auf das jeweilige Rohwasser abgestimmt werden. So erfordert beispielsweise die Entfernung von Substanzen mit hohem Molekulargewicht ein Porensystem mit höherem Anteil grosser Poren. Genaue Informationen über die Eliminationsleistung können nur mit Pilotversuchen gewonnen werden, in denen die Verhältnisse (Anlagentyp, Rohwasserzusammensetzung, etc.) der späteren Anlage möglichst genau simuliert werden. Typische Kontaktzeiten in Aktivkohlefiltern liegen im Bereich von 5 - 20 Minuten. Bei biologischen Aktivkohlefiltern ist mit einem Austrag von Mikroorganismen und somit einer möglichen Wiederverkeimung des Trinkwassers zu rechnen. Aufgrund seiner hohen Reaktivität kann gasförmiges Ozon in Kontakt mit trockener Aktivkohle zu einer heftigen Reaktion oder sogar zu einer Explosion führen. Bei Einhaltung der sicherheitstechnischen Bestimmungen kann Ozon jedoch bedenkenlos eingesetzt werden.

#### **Verfahren: Ionenaustausch**

#### **Einsatzbereich: Enthärtung, Entsalzung, Elimination von $NO_3^-$ und Schwermetallen**

Das Verfahren des Ionenaustausches wird in kommunalen Anlagen zur Trink-



## 5. Verfahren in der Trinkwasseraufbereitung

wasseraufbereitung in der Schweiz praktisch nie angewendet, sondern findet vor allem im Haushalt Verwendung. Der Ionenaustausch wird hauptsächlich zur Wasserenthärtung sowie zur Abtrennung von Nitrat ( $\text{NO}_3^-$ ) und Huminstoffen eingesetzt. Die Wasserenthärtung basiert auf der Elimination von  $\text{Ca}^{2+}$  und  $\text{Mg}^{2+}$  im Austausch gegen Natrium ( $\text{Na}^+$ ). Die ausgetauschten Ionen (z. B.  $\text{Na}^+$ ,  $\text{H}^+$ ,  $\text{OH}^-$ ,  $\text{Cl}^-$ , etc.) bleiben vollständig im aufbereiteten Wasser zurück. Der Vorgang im Ionentauscher beschränkt sich auf die so genannte Austauschzone, in der sich eine Arbeitsfront ausbildet. Die Schichthöhe muss nun grösser als diese Austauschzone sein, um einen sofortigen Durchbruch zu vermeiden. Der Durchsatz wird üblicherweise in Bettvolumina ( $\text{BV} = 1 \text{ m}^3 \text{ Flüssigkeit/m}^3 \text{ Harz}$ ) angegeben. Typische Werte liegen im Bereich von 20 - 40  $\text{BV/h}$  ( $\sim 10 - 30 \text{ m/h}$ ). Ist die Austauschkapazität erschöpft, muss der Ionentauscher regeneriert werden. Dies wird mit verschiedenen Regeneriermitteln durchgeführt. Am häufigsten verwendet werden Natriumchlorid ( $\text{NaCl}$ ), Salz- ( $\text{HCl}$ ) oder Schwefelsäure ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ ) und Natronlauge ( $\text{NaOH}$ ). Der Regeneriermittelaufwand entspricht dem 1.5 - 5 fachen der Ionenaustauschkapazität. Der Ionenaustausch kann zu einer signifikanten Volumenänderung des Filterbettes (bis zu 30%) führen.

### **Probleme**

Die 100%-ige Regenerierung eines Ionenaustauschers ist aus wirtschaftlichen Überlegungen nicht praktikabel. Der Gewinn an Kapazität wird mit zusätzlichem Regeneriermittelaufwand immer geringer. Somit bleiben immer ausgetauschte Ionen im Harz zurück. Der Betrieb regenerierter Ionentauscherharze ist verbunden mit einem Durchtritt auszutauschender Ionen ins Reinwasser, dem so genannten

Ionenschlupf. Dabei findet entweder gar kein Austausch statt oder bereits ausgetauschte Ionen gehen wieder in Lösung. Der Ionenschlupf ist umso grösser, je höher die Konzentration der auszutauschenden Ionen im Rohwasser ist. Sulfat konkurriert die Nitratadsorption und reduziert so die Verminderung der Nitratkonzentration. Im Ionentauscher kann biologisches Wachstum stattfinden, welches zu einer erhöhten Keimzahl oder zu geschmacklichen Beeinträchtigungen führen kann. Ebenso kann unter anaeroben Bedingungen Nitrit gebildet werden. Die bei der Regeneration anfallende Lösung muss gesondert entsorgt werden und sorgt so für einen zusätzlichen Wasserverbrauch. Bei der Wasserenthärtung werden Calcium und Magnesium meist durch Natrium ersetzt (z. B. Entfernung von 1  $\text{mM Ca}^{2+}$  erhöht  $\text{Na}^+$  um 2  $\text{mM}$  ( $\sim 40 \text{ mg/L}$ )). Die Wirkung hoher Natriumkonzentrationen auf den Körper ist umstritten, es werden jedoch Bluthochdruck und Nierenerkrankungen damit in Verbindung gebracht. Konzentrationen ab 200  $\text{mg/L}$  führen zu einer geschmacklichen Beeinträchtigung.

### **Mögliche Vor-/Nachbehandlung**

Das auf den Ionentauscher gelangende Wasser muss frei von suspendierten Stoffen und Fällungsprodukten sein. Je nach Zusammensetzung muss das Rohwasser entsprechend aufbereitet werden (Flockung, Fällung, Filtration). Ionenaustauscher werden meist am Ende der Aufbereitungskette eingebaut. Der Ionentausch hat keine Verbesserung der hygienischen Parameter zur Folge. Durch die Etablierung von biologischer Aktivität kann es jedoch zur Verkeimung des Trinkwassers kommen. Falls der Ionenaustausch in einer zentralen Aufbereitung verwendet wird, sollte demnach immer eine zuverlässige Desinfektion nach dem Ionenaustauscher (inklusive Netzschutz) erfolgen.

### **Grenzwerte/Toleranzwerte**

Der Toleranzwert für Nitrat im Trinkwasser beträgt gemäss FIV 40 mg  $\text{NO}_3^-/\text{L}$ , der für Nitrit 0.1 mg  $\text{NO}_2^-/\text{L}$ . Das SLMB nennt einen Erfahrungswert sowohl für Natrium als auch für Chlorid von < 20 mg/L.

### **Beurteilung/Kontrolle des Verfahrens**

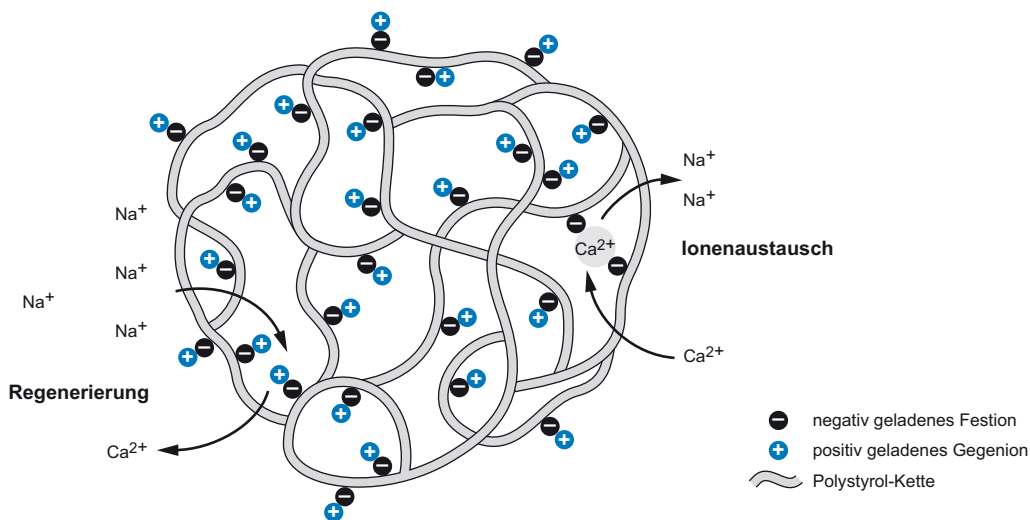
Für ein rechtzeitiges Erkennen der Sättigung von Ionenaustauschern muss die Konzentration der auszutauschenden Stoffe ( $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{NO}_3^-$ , etc.) im Ablauf bestimmt werden. Die Sättigung der Austauschkapazität wird mit der Durchbruchkurve angezeigt. Um die Wasserqualität konstant zu halten, muss die Regeneration vor einem vollständigen Durchbruch erfolgen. Bei der Entfernung von Nitrat ist oftmals auch die Kontrolle des Nitritgehaltes sinnvoll.

### **Produkte und Vorsichtsmassnahmen**

Je nach Ladung der austauschbaren Ionen unterscheidet man zwischen Kationentauscher und Anionentauscher. Zusätzlich gibt es auch solche, die zu beidem befähigt sind, so genannte amphotere Ionentauscher. Zum Einsatz

kommen auf der einen Seite natürliche, anorganische Materialien in Form von Aluminium-Silikaten (Tonmineralien) wie Zeolithe oder Montmorillonit (Kationentauscher). Auf der anderen Seite werden Austauscher auf Kunstharzbasis, so genannte Ionentauscherharze, aus polymeren Kohlenwasserstoffketten (z. B. Polystyrol), eingesetzt. Die Art und Ladung der Festionen bestimmen das Verhalten des Ionenaustauschers.

Aus den verwendeten Materialien dürfen keine schädlichen Stoffe in Lösung gehen. Die Materialien müssen ausdrücklich für die Anwendung in der Trinkwasseraufbereitung zugelassen werden. In der Praxis werden meistens Korngrössen von 0.3 - 1.5 mm eingesetzt. Die am häufigsten eingesetzte Reaktorform ist der Kolonnenbetrieb (Festbett), daneben existieren aber auch vlldurchmischte Reaktoren oder das kontinuierliche Gegenstromverfahren. Der Vorteil des Kolonnenbetriebs liegt in der guten Ausnutzung der Austauschkapazität. Dabei sind auslaufseitig sehr tiefe Konzentrationen möglich. Zur besseren Abtrennung der Harzkörner können diese mit einem dichten Kern versehen sein (z. B. MIEX). Zur



**Abbildung 17: Schematische Darstellung eines einzelnen Harzkornes. Die positiv geladenen Gegenionen können gegen andere Kationen ausgetauscht werden (bei Regeneration des Harzes oder Ionentausch)**

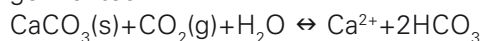
## 5. Verfahren in der Trinkwasseraufbereitung

Entsalzung von Wasser werden Kationentauscher (H<sup>+</sup>-Form) und Anionentauscher (OH<sup>-</sup>-Form) in Serie geschaltet. Eine weitere Möglichkeit besteht in so genannten Mischbettionentauschern, bei denen beide Harze im selben Bett vollständig durchmischt vorliegen.

### Verfahren: Entsäuerung/Enthärtung/Entkarbonisierung

#### **Einsatzbereich: Einstellen des Kalk-Kohlensäuregleichgewichtes**

Die Verfahren der Entsäuerung, Enthärtung und Entkarbonisierung dienen in der Trinkwasseraufbereitung dem Einstellen des Kalk-Kohlensäure-Gleichgewichtes:



Der Kalk löst sich in Gegenwart von im Wasser gelöstem Kohlendioxid zu Calcium und Hydrogencarbonat. Hat das Wasser einen Überschuss an Säure, so wirkt es korrosiv auf Anlagen und Verteilnetze. Dies führt zu kürzeren Lebensdauern der Anlagen und kann bei verzinkten Stahlleitungen oder Kupferleitungen zu erhöhten Schwermetallkonzentrationen im Trinkwasser oder zu Lochfrass führen. Ziel ist eine leichte Kalkübersättigung bei einem neutralen pH-Wert, welche für eine feine Schutzschicht im Leitungssystem sorgt. Die überschüssige Säure im Rohwasser kann auf mehrere Arten entfernt werden:

- Filterung über Calciumkarbonat oder dolomitische Filtermaterialien, dabei wird Kalk gelöst (Säureverbrauch), der pH-Wert ausgeglichen und so das Gleichgewicht eingestellt
- Austreiben des Kohlendioxids durch

die Belüftung des Rohwassers

- Entsäuerung durch die Zugabe von Soda (NaCO<sub>3</sub>) oder Hydroxiden (NaOH, Ca(OH)<sub>2</sub>), welche eine Hebung des pH-Wertes bewirken (Verschiebung des Säure-Basen-Gleichgewichtes vom sauren in den neutralen Bereich)

Ist das Wasser hingegen bezüglich Ca<sup>2+</sup> und CO<sub>3</sub><sup>2-</sup> übersättigt, so besteht die Tendenz, dass Kalk abgeschieden wird und die Leitungssysteme verkrustet oder verstopft. Die Konzentration von härtebildenden Ionen wird meist auf folgende Arten reduziert:

- Ca<sup>2+</sup> und Mg<sup>2+</sup> werden mittels Ionentauscherharzen gegen Na<sup>+</sup> oder H<sup>+</sup> ausgetauscht
- Fällung der Calciumionen durch Überschreiten der Kalksättigung, dabei werden Soda (Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>), gebrannter Kalk (CaO, Ca(OH)<sub>2</sub>) oder Natronlauge (NaOH) zugegeben und so dem Wasser Mineralien entzogen
- Entfernung von Stoffen wie Ca<sup>2+</sup>, HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>, etc. mittels Nanofiltration oder Umkehrosmose (Membranverfahren)

Die Wasserenthärtung spielt heute in der Trinkwasseraufbereitung eher eine untergeordnete Rolle und wird in der Schweiz in keiner zentralen Trinkwasseraufbereitungsanlage eingesetzt. Sie wird heute in Haushaltungen und in der Brauchwasseraufbereitung (Kühlwasser, Warmwassersysteme, etc.) eingesetzt.

### **Probleme**

Bei der Entsäuerung stark saurer Rohwässer mittels Natronlauge oder Soda kann es zu einer starken Erhöhung der Natriumkonzentration kommen. Dies ist aus gesundheitlichen Gründen unerwünscht. Der Einsatz von Kalkmilch ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ) zur Entsäuerung verhindert diese Erhöhung der Natriumkonzentration. Nebeneffekt der Entsäuerung mit Kalkmilch oder Filtration über dolomitische und kalkige Materialien ist eine Aufhärtung des Wassers (Eintrag von  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$  und  $\text{HCO}_3^-$ ). Ein weiteres Problem kann die Mischung von Wässern unterschiedlicher Herkunft und unterschiedlicher Salzgehalte sein. Solche Mischwasserprobleme können durch Angleichen der Konzentrationen gewisser Wasserinhaltsstoffe reduziert werden.

### **Mögliche Vor-/Nachbehandlung**

Entsäuerung und Enthärtung sind meist Bestandteil einer mehrstufigen Aufbereitungsanlage. Sie werden in der Regel nach einer Partikelentfernung eingefügt. Die ist namentlich bei Ionentausch und Membranverfahren notwendig. Der Wasserenthärtung mittels Fällung muss auf jeden Fall eine weitere Filtration (Entfernung der Fällungsprodukte) folgen, dabei sind nur geringe Durchsatzschwankungen zulässig. Üblicherweise wird durch die Zugabe von Flockungsmitteln das Absetzen der Fällungsprodukte beschleunigt und die Abtrennung verbessert. Eine weitere Möglichkeit ist die Zugabe von Quarzsand (Körnung 0.5 - 1 mm) als Kontaktmittel (Kalkablagerung auf der Oberfläche). Entsäuerung, Enthärtung und Entkarbonisierung haben, mit Ausnahme von Nanofiltration und Umkehrosmose, welche Keime effektiv entfernen, keinen Einfluss auf hygienische Parameter. Eine wirkungsvolle Desinfektion ist demnach in

jedem Fall notwendig. Allfällig ist nach der Enthärtung eine pH-Korrektur durch Säuredosierung notwendig.

### **Grenzwerte/Toleranzwerte**

Der pH-Wert im aufbereiteten Trinkwasser soll dem Gleichgewichts-pH-Wert entsprechen. Das SLMB nennt hier einen Erfahrungswertbereich für den pH von 6.8 - 8.2. Für Calcium gibt das SLMB einen Erfahrungswert von maximal 200 mg/L (organoleptische Schwelle) und für Natrium von  $< 20$  mg/L an.

### **Beurteilung/Kontrolle des Verfahrens**

Der Prozess der Entsäuerung wird über den pH-Wert gesteuert. Dieser soll kontinuierlich überwacht werden. Die Enthärtung kann über die Konzentration an  $\text{Ca}^{2+}$  und  $\text{Mg}^{2+}$  überwacht werden.

### **Produkte und Vorsichtsmassnahmen**

Bei der Wasserenthärtung unterscheidet man grundsätzlich zwischen der Entnahme von Calcium und Magnesium (Enthärtung) sowie der Entnahme von Hydrogenkarbonat ( $\text{HCO}_3^-$ , Entkarbonisierung). Dabei kommen folgende Verfahren in Frage: Ionentausch mit  $\text{Na}^+$ ,  $\text{H}^+$  oder  $\text{OH}^-$ , Membranenthärtung, physikalische Entkarbonisierung, Langsam-Entkarbonisierung, Schnell-Entkarbonisierung und Säure-Entkarbonisierung. Enthärtung und Entkarbonisierung werden oftmals nur mit einem Teilstrom durchgeführt und anschliessend mit dem unbehandelten Teilstrom gemischt und so das Trinkwasser auf die gewünschte Härte oder den Salzgehalt eingestellt. Eine mögliche Anwendung der Filtration über alkalische Filtermaterialien besteht auch in der Aufhärtung von Permeat aus Membranverfahren. Dabei werden dem Wasser wieder erwünschte Mineralstoffe zugeführt.

## 5. Verfahren in der Trinkwasseraufbereitung

### Weitere Verfahren in der Trinkwasseraufbereitung

Die nachfolgend kurz beschriebenen Verfahren sind weniger häufig angewendete, spezielle Methoden der Trinkwasseraufbereitung. Sie sollen hier nicht allgemein behandelt werden und müssen in jedem Fall sorgfältig auf die gegebenen Bedingungen angepasst und betrieben werden.

#### Verfahren: Weitergehende Oxidation

##### **Einsatzbereich: Oxidation von Spurenstoffen**

Als weitergehende Oxidation (Advanced Oxidation Processes, AOP) wird die Oxidation mit Hilfe sekundär gebildeter OH-Radikale bezeichnet. Sie umfasst Prozesse wie z. B. die Kombination von Ozon/Wasserstoffperoxid, UV/Ozon und UV/Wasserstoffperoxid. Die OH-Radikale reagieren sehr unselektiv. NOM, Hydrogenkarbonat ( $\text{HCO}_3^-$ ) und Karbonat ( $\text{CO}_3^{2-}$ ) im aufzubereitenden Wasser sind starke OH-Fänger und verringern so die Konzentration an aktiven OH-Radikalen. Somit werden Spurenstoffe (Pestizide, Pharmazeutika, etc.) oxidiert, welche nicht oder nur unvollständig mit anderen Oxidationsmitteln reagieren. Die weitergehende Oxidation führt aber auch zur Bildung von Nebenprodukten aus der Reaktion mit Matrixkomponenten. Zusätzliche Aufbereitungsstufen wie Filtration (Aktivkohle, Schnell- oder Langsandsandfiltration) zur AOC-Reduktion, zur Entfernung von Nebenprodukten (z. B.  $\text{NO}_2^-$ ) und zur Elimination von Oxidationsmitteln ( $\text{H}_2\text{O}_2$ ,  $\text{O}_3$ ) sind unerlässlich, um ein stabiles Trinkwasser zu erhalten.

#### Verfahren: Nitrifikation

##### **Einsatzbereich: Verminderung der Ammonium-/Ammoniakkonzentration**

Ammonium und Ammoniak im Rohwasser stammen vorwiegend aus der Landwirtschaft. Beim mikrobiologischen Prozess der Nitrifikation oxidieren Bakterien Ammoniumverbindungen zu Nitraten auf. Die Reaktion läuft dabei über die Zwischenstufe Nitrit ab. Der Prozess der Nitrifikation verlangt ausreichende Sauerstoffkonzentrationen. In der Trinkwasseraufbereitung werden oftmals einfache Belüftungskaskaden eingesetzt. Die festsitzenden Bakterien können dabei optimal mit Sauerstoff versorgt werden. Auch während der chemischen Oxidation wird Ammonium zu Nitrat umgewandelt. Eine besondere Bedeutung hat Ammonium bei der Verwendung von Chlor, dabei werden Chloramine gebildet, welche eine sehr viel geringere Wirksamkeit aufweisen (Knickpunkt-Chlorung). Die Entfernung von Ammoniak kann auch mittels Striping-Verfahren erzielt werden. Dabei wird mit Luft oder Dampf das Ammoniak aus dem Wasser ausgetrieben und in die gasförmige Phase überführt. Aufgrund des Platzbedarfs für eine Nitrifikationsstufe, eignen sich diese Verfahren eher für grosse Wasserversorgungen. In kleinerem Massstab kann die Entfernung von Ammonium auch mit Hilfe einer Nanofiltration, Elektrodialyse oder einem Ionentauscher erfolgen.

## Verfahren: Denitrifikation

### **Einsatzbereich: Verminderung der Nitratkonzentration**

Wie die Nitrifikation ist auch die Reduktion von Nitrat zu elementarem Stickstoff (Denitrifikation) ein mikrobieller Prozess. Die Denitrifikation findet nur unter anaeroben Bedingungen statt. Im Denitrifikationsreaktor wachsen die Mikroorganismen entweder auf einem Trägermaterial, das gleichzeitig als Kohlenstoffquelle dient (Rindenmulch, Stroh, Granulat aus organischen Polymerisaten, etc.) oder auf inerten Trägermaterialien (Sand, Blähton, Bims, Styropor, etc.) mit Zugabe von Substrat (organisches Material,  $H_2$ , etc.). Das Trägermaterial kann sowohl als Festbett wie auch als Wirbelschicht vorliegen. Festbettreaktoren müssen regelmässig gespült und so von der gebildeten Biomasse gereinigt werden. Die weiteren Substrate ( $PO_4^{3-}$ ,  $Fe^{2+}$ , etc.) werden nach Bedarf in flüssiger oder gasförmiger Form dem Rohwasser vor dem Reaktor zugegeben. Im Reaktor findet zuerst ein Sauerstoffabbau statt, erst anschliessend setzt die Denitrifikation ein. Die biologische Nitratreduktion wird gefolgt von einer Belüftung (Luft,  $O_2$ ). Eine Denitrifikation eignet sich aufgrund der aufwändigeren Anlagenstruktur eher für grössere Wasserversorgungen, während in kleineren Anlagen eher Ionentausch oder Membranverfahren (Nanofiltration und Umkehrosmose) für die Nitratentfernung eingesetzt werden sollten.

## Verfahren: Elektrodialyse

### **Einsatzbereich: Entsalzung, Verminderung der Nitrat- und Ammoniumkonzentration**

Die Elektrodialyse ist ein Membranverfahren. Es handelt sich dabei um einen elektrochemischen Trennprozess, bei welchem Ionen unter dem Einfluss eines elektrischen Potentials durch eine semipermeable Membran aus der Rohlösung (Diluat) in eine höher konzentrierte Lösung (Konzentrat) überführt werden. Im Idealfall ist die Membran nur für eine Ionensorte permeabel (z. B.  $NO_3^-$ ). Für die Elektrodialyse ist eine Feststoffabtrennung für Partikel  $> 10 \mu m$  notwendig. Vorbehandlungen umfassen Flockung und Fällung, Filtration oder die Behandlung mit Aktivkohle. Verfahrenstechnisch im grossen Stil eingesetzt wird die Elektrodialyse hauptsächlich in der Meer-/Brackwasseraufbereitung (inkl. Salzgewinnung) sowie in der industriellen Abwasseraufbereitung. Dabei übernimmt die Elektrodialyse oftmals die Funktion der Grobreinigung vor Ionentauschern.

### **Verfahren: Enteisung/Entmanganung:**

#### **Einsatzbereich: Entfernung von Eisen und/oder Mangan**

Eisen und Mangan können als Folge von sauerstofffreien, reduzierenden Bedingungen meist im Grundwasser durch Auflösung von Eisen- und Mangan-

## 5. Verfahren in der Trinkwasseraufbereitung

(hydr)oxiden ins Wasser gelangen. Die Entfernung von Eisen und Mangan aus dem Trinkwasser wird als Enteisung und Entmanganung bezeichnet. Im Allgemeinen müssen Eisen und Mangan, welche üblicherweise in ihrer gut löslichen zweiwertigen Form vorliegen, durch Kombination von Oxidation und Fällung/Filtration aus dem Wasser entfernt werden. Dazu bestehen folgende Möglichkeiten:

- Chemische Oxidation nach der Fassung des Wassers und anschließende Abtrennung der Metalloxide durch Sedimentation/Filtration.
- Biologische Oxidation nach der Fassung des Wassers und anschließende Abtrennung der Metalloxide durch Sedimentation/Filtration.
- In situ Verfahren: Oxidation von Fe(II) und Mn(II) und Abtrennung der Metalloxide im Untergrund, vor der Fassung.

Nach der Fassung eingesetzte Verfahren erfordern die üblichen Installationen für die Aufbereitung. Im Falle einer chemischen Oxidation, müssen chemische Oxidationsmittel zudosiert

werden (für Eisen: Sauerstoff, Chlor, Ozon, Kaliumpermanganat; für Mangan: (Chlor), Ozon, Kaliumpermanganat) und anschliessend die Ausfällungen durch Sedimentation/Filtration abgetrennt werden. Für die biologische Oxidation wird Luftsauerstoff zugemischt, Eisen und Mangan werden typischerweise mit festsitzender Biomasse in zwei separaten Filtern oxidiert. Neben den baulichen Installationen, müssen die ausgefällten Metalloxide entsorgt werden. Bei in situ Verfahren wird mit Luftsauerstoff angereichertes Wasser in den Untergrund gepumpt, wo die Eisen- und Mangan (hydr)oxide abgelagert werden. Da die Metall (hydr)oxide an vorhandenen Sand-/Kiesoberflächen angelagert werden, ist die Verstopfungsgefahr gering. Die unterirdischen Installationen sind im Vergleich zu konventionellen Verfahren relativ bescheiden, zudem muss kein Schlamm entsorgt werden. Ein weiterer Vorteil der in situ Verfahren liegt darin, dass keine Verstopfung der Entnahmehrunden stattfinden kann, da Eisen und Mangan bereits vor dem Brunnen abgetrennt sind.

**Tabelle 8: Verfahrenskontrolle**

	Verfahrensschritt	Kennwert	Höchstkonzentration		Messung	Kontrollhäufigkeit
			Rohwasser	Trinkwasser		
<b>Flockung/ Fällung</b>	Dosierung	Konzentration	-	0.3 mg Fe/L	Konzentrations-Messung,	wöchentlich bis monatlich
	Flockungs(hilfs)-mittel	Flockungs(hilfs)mittel	-	0.2 mg Al/L		
<b>Sedimentation</b>	Partikelabtrennung	Trübung	5 - 200 NTU	< 1 NTU	Trübungsmessung	kontinuierlich
	Partikelabtrennung	Trübung	-	< 1 NTU	Trübungsmessung	kontinuierlich
<b>Langsamsand-Filtration</b>	Partikelabtrennung	Trübung	< 10 NTU	< 1 NTU	Trübungsmessung	kontinuierlich
<b>Schnell-Filtration</b>	Partikelabtrennung	Trübung	< 30 NTU	< 1 NTU	Trübungsmessung	kontinuierlich
<b>Membran-Filtration</b>	Partikelentfernung	Partikelzahl	-	< 1 NTU	Partikelanalyse	kontinuierlich
	Partikelentfernung	Über-/Unterdruck	-	-		
	Abtrennung von Mikroorganismen (UF, NF)	Mikroorganismen (z.B. <i>E.coli</i> , AMK, <i>Enterokokken</i> )	-	AMK: 20KBE/mL <i>E.coli</i> : nn/100 mL EK: nn/100 mL	Integritätstest: Druckhalte-, Diffusionstest Mikrobiologische Untersuchungen	wöchentlich - monatlich
<b>Chlorung</b>	Dosierung Chlor im Reaktor	Cl-Restkonzentration Ablauf des Reaktors Aufenthaltszeit im Reaktor	-	0.1 mg/L	Elektrochemische Konzentrations-Messung	kontinuierlich
<b>Chlordioxid</b>	Dosierung Chlordioxid	ClO <sub>2</sub> & Cl <sup>-</sup> Restkonzentration im Ablauf des Reaktors Aufenthaltszeit im Reaktor	-	0.05 mg/L	Elektrochemische Konzentrations-Messung	kontinuierlich
	Oxidation	Chlorat- & Chlorit-Konzentration im Ablauf	0.4 mg/L	0.05 mg/L	Messung der Kontaktzeit	kontinuierlich
<b>Ozonung</b>	Dosierung Ozon	O <sub>3</sub> -Restkonzentration im Ablauf des Reaktors Aufenthaltszeit im Reaktor	-	0.05 mg/L	Elektrochemische Konzentrations-Messung	kontinuierlich
	Oxidation	Bromid- & Bromatkonzentration	< 50 µg Br/L	10 µg BrO <sub>3</sub> /L	Konzentrations-Messung	wöchentlich - monatlich
<b>UV-Verfahren</b>	UV-Bestrahlung	Trübung im Zulauf	1 NTU	-	Trübungsmessung	kontinuierlich
		Raumbestrahlung (Fluenz im Reaktor)	-	-	Transmissionsmessung Messung der Referenzbestrahlungsstärke mit UV-Sensor Messung des Durchflusses	kontinuierlich
<b>Aktivkohle</b>	Adsorption	Schadstoff-Konzentration im Ablauf	-	stoffabhängig	Konzentrations-Messung	wöchentlich
<b>Ionentausch</b>	Ionenaustausch	Konzentration im Ablauf	-	stoffabhängig	Bestimmung der Problemstoff-Konzentration	wöchentlich
<b>Entsäuerung/ Enthärtung</b>	Einstellung Gleichgewicht	pH-Wert im Ablauf	-	6.8 - 8.2	pH-Wert-Messung	kontinuierlich



## 5. Verfahren in der Trinkwasseraufbereitung

### Verfahrenskombination

Bei qualitativ hochwertigem Grund- und Quellwasser ist häufig keine Aufbereitung oder nur eine Desinfektion und/oder ein Netzschutz ausreichend, um einwandfreies Trinkwasser herzustellen. Handelt es sich um Karstquellen (höhere Trübung, ungleichmässige Qualität, etc.) oder reduziertes Grundwasser (hohe Fe(II)- oder Mn(II)-Konzentrationen) so können weitere Aufbereitungsschritte notwendig werden. Bei der Aufbereitung von Oberflächenwasser schliesslich, ist eine mehrstufige, auf die speziellen Erfordernisse abgestimmte Verfahrenskombination unumgänglich.

Zur Veranschaulichung werden einige Varianten von möglichen Verfahrensketten anhand von bestehenden Wasserversorgungen gezeigt und erklärt. Die Auflistung ist nicht komplett. Aufbereitungsketten müssen immer auf den vorliegenden Fall abgestimmt und dimensioniert werden.

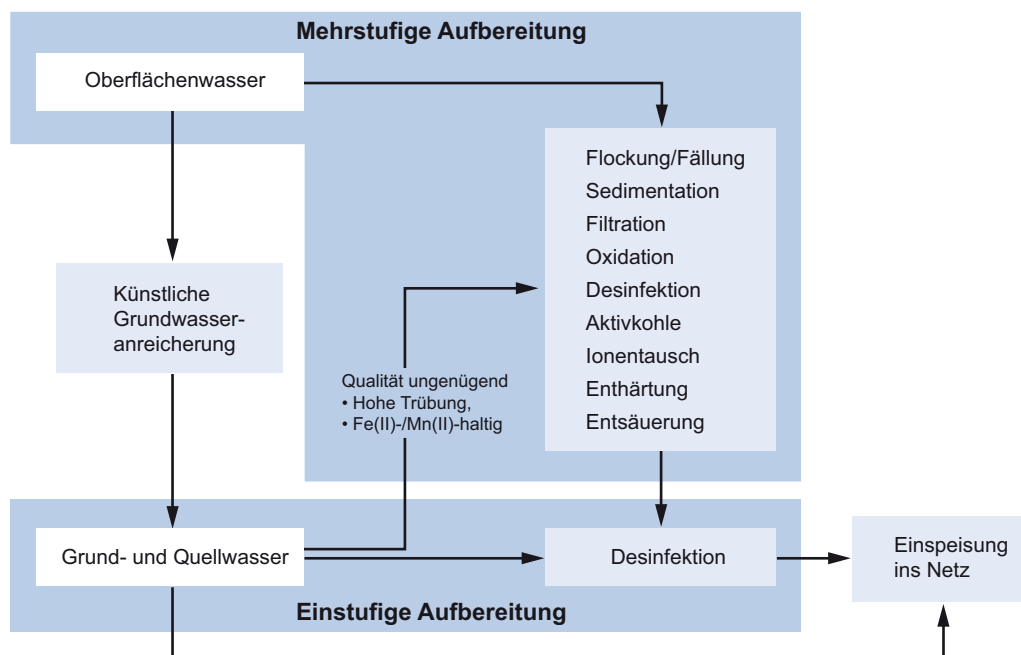


Abbildung 18: Schematische Darstellung der Aufbereitungsmethoden für Grund-, Quell- und Oberflächenwasser

### **Einstufige Aufbereitung**

Die einstufige Aufbereitung besteht lediglich aus einer Desinfektion mit chemischen oder physikalischen Methoden. Sie hat zum Ziel, die hygienischen Anforderungen sicher zu stellen und

kommt in der Regel bei Quell- oder Grundwasser zum Einsatz. Voraussetzung für eine sichere Desinfektion ist die geringe Trübung (UV-Desinfektion) und ein geringer Gehalt an organischem Material (chemische Desinfektion).

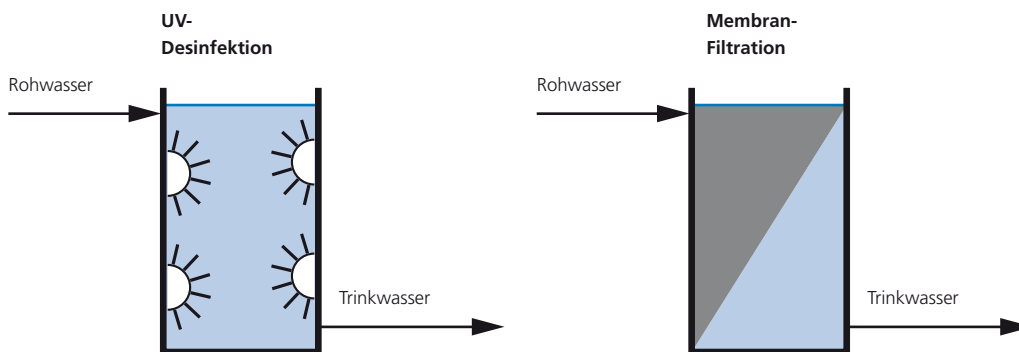


Abbildung 19: Möglichkeiten einer einstufigen Aufbereitung: UV-Desinfektion, Membranfiltration

### **Klassische, mehrstufige Aufbereitung (Seewasser)**

Eine klassische, mehrstufige Aufbereitung dient zur Aufbereitung von belastetem Rohwasser und besteht in der Regel aus einer Filtration zur Partikelentfernung und einer Oxidation/Desinfektion, je nach Rohwasserbeschaffenheit ergänzt mit weiteren Verfahren. Der Aufbau und die Reihenfolge der Verfahrenskette können sehr unterschiedlich sein und sind meist durch die Ergänzung bestehender Anlagen mit weiteren Verfahrensstufen entstanden.

Als Beispiel ist der schematische Aufbau des Seewasserwerks Lengg der Wasserversorgung Zürich abgebildet. Das Seewasser wird in einer Tiefe von rund 30 m gefasst und mit Ozon desinfiziert. Nach einer pH-Korrektur gelangt das Wasser auf Schnellfilter. Anschließend folgen eine Zwischenozonung sowie eine Aktivkohlefiltration. Die abschließenden Langsandsandfilter dienen der zusätzlichen biologischen Stabilisierung des Wassers.

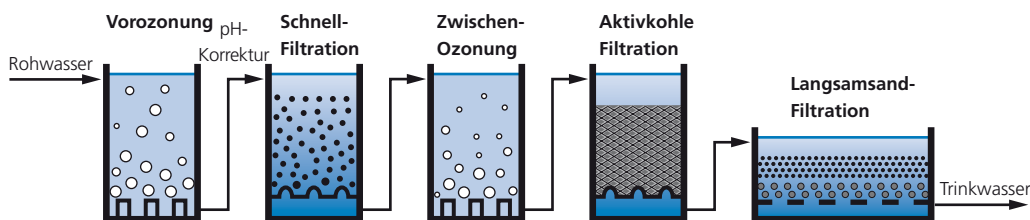


Abbildung 20: Vereinfachtes Verfahrensschema der Aufbereitungskette im Seewasserwerk Lengg der Wasserversorgung Zürich

## 5. Verfahren in der Trinkwasseraufbereitung

### **Klassische, mehrstufige Aufbereitung (Karstwasser)**

Wie bei der Aufbereitung von Oberflächenwasser sind auch bei Karstwasser die Schwankungsbreiten der Wasser-

qualität relativ hoch. Eine Aufbereitungsanlage besteht daher auch aus mehreren Stufen zur Partikel- und Stoffabtrennung, Stofftransformation und Desinfektion.

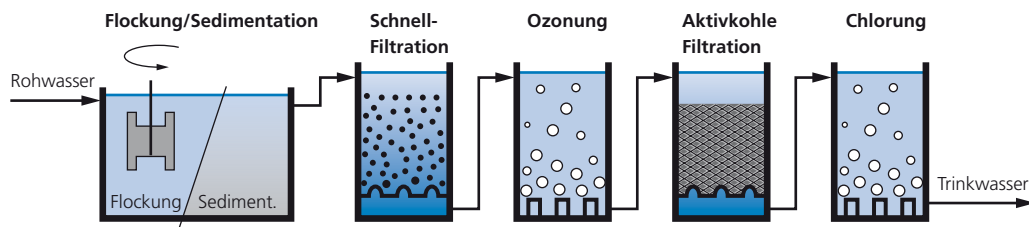


Abbildung 21: Vereinfachtes Verfahrensschema der Aufbereitungsanlage für Karstquellwasser in Röschenz, BL

### **Moderne, mehrstufige Aufbereitung (Seewasser)**

In der modernen, mehrstufigen Aufbereitung ist die Anzahl der Aufbereitungsschritte meist reduziert und die Anlage wurde als Gesamtkonzept aus modernen Verfahrensschritten, meist unter Einbezug von Membranen, entwickelt.

Als Beispiel ist das Seewasserwerk Männedorf (ZH) dargestellt. Die komplett neu erstellte Anlage umfasst eine Ozonung, eine Aktivkohlefiltration und eine abschliessende Membranfiltration (Ultrafiltration).

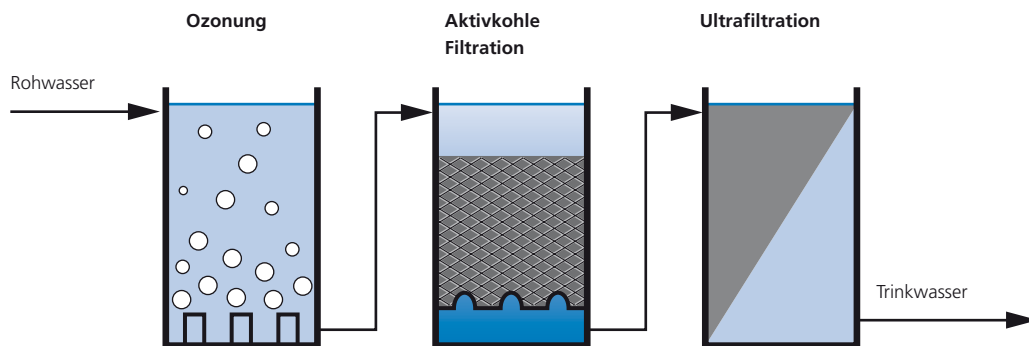


Abbildung 22: Vereinfachtes Verfahrensschema der Seewasseraufbereitungsanlage in Männedorf, ZH

# 6. Überwachungsmethoden

## Überwachungsmethoden

Mess- und Prüfverfahren zur Überwachung des Aufbereitungsprozesses

### Chlor

#### Photometrisch (DPD-Methode)

Die DPD-Methode ist ein kolorimetrisches Verfahren zur Bestimmung von freien Oxidationsmitteln. Diethyl-p-phenylendiamin (DPD) wird in Gegenwart von freiem Chlor oxidiert. Dabei entsteht eine rosa bis kräftig rote Färbung. Diese Färbung wird photometrisch bestimmt (Gesetz von Beer-Lambert) und mittels Eichkurve die effektive Chlorkonzentration ermittelt. Mit dieser Methode können sehr tiefe Oxidationsmittelkonzentrationen nachgewiesen werden. Bei mehrstufigen Aufbereitungsverfahren ist zu beachten, dass DPD auch mit Chlordioxid und Ozon reagiert. Der in der Trinkwasseraufbereitung wichtige Konzentrationsbereich liegt zwischen 0.02 und 1 mg  $\text{Cl}_2/\text{L}$ . Die Bestimmungsgrenze liegt bei etwa 0.05 mg  $\text{Cl}_2/\text{L}$ . Bei Chlorgehalten über 4 mg  $\text{Cl}_2/\text{L}$  muss die Probe verdünnt werden. Die Eichung erfolgt über standardisierte Kaliumpermanganat- oder Chlorisocyanatlösungen.

#### Amperometrisch

Das Prinzip der Amperometrie beruht auf der Messung des Elektrolysestroms an der Arbeitselektrode bei Vorliegen eines zeitlich konstanten elektrochemischen Potentials. Der gemessene Wert ist proportional zur Konzentration des umgesetzten Chlors. Die Messresultate sind sehr stark von den übrigen Wasserparametern wie pH-Wert, Durchfluss oder Temperatur abhängig. Oft sind die Messsonden zusätzlich mit pH- und Temperatursensoren ausgestattet, was eine rechnerische Korrektur

der Abhängigkeit erlaubt. Werden die Elektroden durch eine semipermeable Membran geschützt, so kann eine selektivere Messung erreicht werden. Die gewünschten Stoffe diffundieren durch die Membran und werden an der Kathode reduziert. Die Messung wird dadurch pH-unabhängig. Die Kalibrierung erfolgt mittels photometrischen Methoden (z. B. DPD-Methode). Membran und Elektrolytlösung sind regelmäßig (gemäß Hersteller) auszutauschen.

### Chlordioxid

#### Photometrisch (DPD- & TMB-Methode)

Analog zu Chlor kann Chlordioxid mittels der DPD-Methode bestimmt werden (siehe Chlor). Für sehr geringe Konzentrationsbereiche steht weiter die photometrische Methode mit TMB (Tetramethylbenzidin) zur Verfügung. TMB wird durch Chlordioxid oxidiert und führt zu einer gelben Verfärbung, welche bei 440 nm gemessen wird. Diese Methode ist unselektiv und reagiert auch mit anderen Oxidationsmitteln. Die Proben müssen daher frei von Restkonzentrationen anderer Oxidationsmittel sein.

#### Amperometrisch

Das Verfahrensprinzip ist dasselbe wie bei Chlor. In der Regel werden bei Chlordioxid Goldkathoden und Silberanoden verwendet. Eine Membran trennt normalerweise den elektrolytgefüllten Elektrodenraum von der Umgebung und integrierte Temperaturfühler kompensieren die Temperaturabhängigkeit. Die amperometrische Messung von Chlordioxid weist eine Querempfindlichkeit gegenüber Chlor und Ozon auf. Die Nachweisgrenze liegt bei rund 0.01 - 0.02 mg/L in einem Messbereich von normalerweise 0 - 2 mg/L.

## 6. Überwachungsmethoden

### Leitfähigkeit

Die Leitfähigkeit von Wasser wird durch die sich darin frei bewegenden Ionen bestimmt. Gemessen wird der Stromfluss (Widerstand) zwischen zwei Elektroden (Anode, Kathode), die sich vollständig in der wässrigen Lösung befinden. Die Leitfähigkeit ist definiert als der Reziprokwert des spezifischen Widerstandes zwischen diesen Elektroden. Aufgrund der Temperaturabhängigkeit der Messung ist immer ein Temperaturfühler integriert und die Leitfähigkeit wird üblicherweise auf 25°C umgerechnet (Temperaturkompensationsfunktion). Bei sehr hohen und sehr tiefen Konzentrationen ist die Linearität der Messung nicht immer gewährleistet, was eine saubere Messung erschwert. Mit der richtigen Wahl von Materialien und Geräten für den entsprechenden Leitfähigkeitsbereich kann diesen Problemen begegnet werden. Zur Verringerung von Polarisationsseffekten wird eine Wechselfspannung angelegt. Zur Kalibrierung werden normierte Standardlösungen mit bekannter Leitfähigkeit eingesetzt. Es ist wichtig, in der gleichen Größenordnung wie der zu erwartenden Messung zu kalibrieren.

### Ozon

#### Photometrisch (Indigo-Methode)

Die Indigo-Methode beruht auf der sehr schnellen Entfärbung von Indigotrisulfonat durch Ozon. Die Reaktion findet in saurer wässriger Lösung statt um die Zersetzung von Ozon zu vermeiden und ist stöchiometrisch. Der Grad der Entfärbung wird mittels Photometer bei 600 nm gemessen (Gesetz von Beer-Lambert) und in die Ozonkonzentration umgerechnet. Der Messung wird jeweils eine Nullprobe als Referenz mitgeführt, die Differenz der beiden Messungen ergibt dann die Ozonkonzentration. Die Reagenzien werden der Probe direkt vor den Probenahmen

zugesetzt und die Messung muss innerhalb von 4 Stunden nach Probenahme erfolgen. Der Einfluss von Restchlor kann mit Malonsäure verringert werden. Weitere Stoffe wie Manganoxide oder Brom stören die Messung und müssen berücksichtigt werden.

### Amperometrisch

Das Verfahrensprinzip ist dasselbe wie bei Chlor. Verwendet wird meist eine Platinkathode. Die Elektrode ist entweder offen oder befindet sich in einem membrangeschützten Elektrolytraum (Clark-Elektrode). Mit ozonfreiem Wasser wird eine Nullpunktkalibrierung vorgenommen.

### Partikel

#### Kontinuierlich

Das Prinzip der kontinuierlichen Partikelmessung beruht auf der Bestimmung der Lichtabschattung durch einzelne Partikel. Der scharf begrenzte Lichtstrahl (z. B. Laser) durchdringt eine von Wasser durchströmte Kapillare. Der Photodetektor gegenüber der Lichtquelle misst die Absorption, welche durch vorbeifliessende Partikel verursacht wird. Das gemessene Signal ist abhängig von Art und Form der Partikel. Die Partikelkonzentrationen lassen sich so in Abhängigkeit von ihrer Grösse, Oberfläche oder Feststoffvolumen ermitteln. Jedem Partikel wird dabei ein Äquivalentdurchmesser einer Kugel zugeordnet, welcher die gleiche Absorption erzeugt. Die untere Grenze der bestimmbaren Partikelgrösse liegt bei 1 - 3 µm, üblich in der Trinkwasseraufbereitung sind Bereiche von 1 - 100 µm. Mögliche Probleme können aufgrund von zu hohen Partikelkonzentrationen, optischen Partikeleigenschaften (Struktur, Transparenz, Form) oder Schwankungen der Fließgeschwindigkeit entstehen.

### **Diskontinuierlich**

Neue Methoden wie die Flowzytometrie funktionieren nach demselben Prinzip wie die kontinuierlichen Methoden, erlauben aber zusätzlich die Identifikation lebender und/oder toter Zellen. Dazu werden die Zellen an unterschiedlichen Stellen (Zellwand, DNA, RNA) mit fluoreszierenden Farbstoffen markiert und können so einzeln bestimmt werden. Die Markierung der Zelle kann aber nicht kontinuierlich erfolgen.

Eine weitere diskontinuierliche Methode ist das konventionelle Mikroskopieren. Dieses Verfahren erlaubt eine qualitative Analyse der einzelnen Partikel sowie von Mikroorganismen.

### **pH-Wert**

Die pH-Messung ist ein potentiometrisches Verfahren mit zwei Elektroden, welche durch eine Glasmembran geschützt sind. Der Austausch von  $H^+$  an der Glasmembran führt zu einer Potentialdifferenz. Das pH-Messgerät soll für niedere Temperaturen und wenig gepufferte Lösungen ausgelegt sein. Für die pH-Messung dürfen die Proben keine Temperaturveränderung und keinen Verlust gelöster Gase ( $CO_2$ ) erfahren. Die Temperatur wird separat erfasst und die Messresultate entsprechend korrigiert. Kalibriert wird das Messgerät mit Pufferlösungen bekannter pH-Werte. Diese Kalibrierung muss entsprechend Herstellerangaben durchgeführt werden, in der Regel in Intervallen von rund 3 Monaten oder häufiger.

### **Sauerstoff**

#### **Amperometrisch**

Das Verfahrensprinzip ist dasselbe wie bei Chlor. Die elektrochemische Bestimmung von Sauerstoff beruht auf der Polarisation einer Platinkathode (Clark-Elektrode). Kritisch für die Messgenauigkeit sind hohe  $CO_2$ - (pH-Verschiebung in der Elektrolytlösung) oder

Schwefelwasserstoff ( $H_2S$ )-Konzentrationen. Der Messbereich umfasst in der Regel Konzentrationen von 0 - 20 mg/L.

#### **Titrimetrisch (Winkler Methode)**

Zunächst wird der Sauerstoff durch eine rasche Reaktion mit Mangan(II)hydroxid als Manganhydroxidverbindungen stabilisiert. Diese werden durch Zugabe von Säure gelöst und setzen aus Iodid eine dem Sauerstoff äquivalente Menge Iod frei. Die Iodkonzentration wird mit einer Thiosulfatlösung titrimetrisch bestimmt. Bei den Probenahmen sind Gasverluste zu vermeiden und eine Belüftung der Proben auszuschließen.

#### **Optische Messverfahren (LDO)**

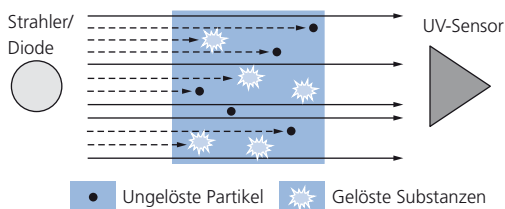
Heute wird zunehmend das LDO (Luminescent Dissolved Oxygen) Messverfahren eingesetzt. Der LDO-Sensor basiert auf einer optisch aktiven Schicht mit eingebauten sauerstoffsensitiven Molekülen. Mittels einer LED wird die lumineszierende Sensoroberfläche durch blaue Lichtimpulse angeregt. Diese antwortet unmittelbar durch Abstrahlung von roten Lichtimpulsen. Einer Photodiode erfasst das zurückgestrahlte rote Licht, zudem wird die Übergangszeit in den Ruhezustand gemessen. Die Dauer und die Intensität der roten Antwortsignale ist umgekehrt proportional zur Sauerstoffkonzentration (mg  $O_2$ /L ).

#### **UV-Absorption/Transmission**

Bei der Absorptionsmessung wird die Reduktion der Strahlungsenergie beim Durchtritt durch eine Fluidschicht bestimmt. Die Absorption und/oder Streuung wird dabei durch Partikel und gelöste organische Wasserinhaltsstoffe hervorgerufen. Die kontinuierliche Messung erfolgt mit Photometern, die mit einer UV-Lichtquelle, Messfenster und UV-empfindlichen Sensoren ausgestattet sind. Lichtquelle und Sensor liegen einander direkt gegenüber. Bestimmt

## 6. Überwachungsmethoden

wird der spektrale Absorptions-/Schwächungskoeffizient, meist bei 254 nm ( $SAK_{254}/SSK_{254}$ ). Während der  $SSK_{254}$  sowohl die Streuung an ungelösten Partikeln als auch die Absorption erfasst, wird der  $SAK_{254}$  nach Filtration der Probe gemessen und erfasst somit nur die Absorption durch gelöste Substanzen. Aufgrund von Korrelationen lassen sich daraus Parameter wie DOC oder CSB ableiten. Namentlich Huminstoffe haben aufgrund des hohen Anteils an aromatischen Gruppen einen grossen Einfluss auf die Absorption. Die Transmission beruht auf demselben Prinzip, misst aber die Strahlungse-



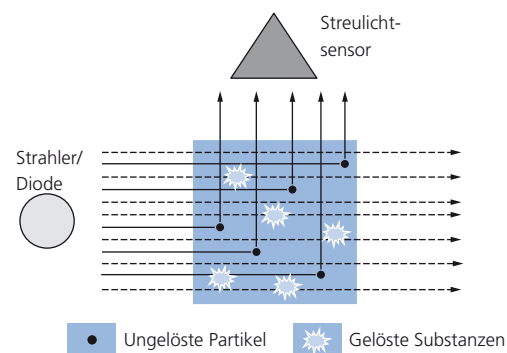
**Abbildung 23: Transmissionsmessung: Erfasst wird die Strahlungsenergie, welche die Wasserprobe ohne Streuung und Absorption durchdringt**

nergie, welche die Fluidschicht ohne Streuung und Absorption durchdringt. Im Gegensatz zu  $SAK_{254}$  und  $SSK_{254}$  ist die UV-Transmission abhängig von der Schichtdicke des durchstrahlten Fluids. Die Transmission hat vor allem bei der Überwachung von UV-Anlagen eine grosse Bedeutung.

### Trübung

Die Trübung eines Mediums gibt an, wie viel von der eingestrahlten Energie an Partikeln gestreut wird. Das Prinzip der Trübungsmessung beruht auf der Bestimmung der Streulichtintensität. Trifft einfallendes Licht auf einen Partikel, so wird ein Teil des Lichtes gestreut. Die Anzahl und die Eigenschaften (Form, Farbe, Grösse) der Partikel bestimmen das Ausmass dieser Streuung. Im Wesentlichen bestimmen Partikel von

0.1 - 1  $\mu\text{m}$  die Trübungswerte. Andere Partikel haben einen eher geringen Einfluss auf das Streulicht. Für die Messung wird nahes Infrarotlicht mit einer Wellenlänge von 860 nm verwendet. Gemessen wird die Streulichtintensität in einem Winkel von  $90^\circ$  zur Strahlungsquelle. Die Resultate werden in FNU angegeben. Dieselben Bedingungen werden auch von der US-EPA genannt, die dort verwendete Einheit ist NTU. Bei Einhaltung der Normen (Wellenlänge, Messwinkel, etc.) sind die Werte untereinander vergleichbar. Somit gilt:  $NTU = FNU = FTU = TE/F 90^\circ = JIU$ . Die Kalibrierung wird mit normierten Formazinstandards durchgeführt, die im Handel erhältlich sind oder bei Bedarf selbst hergestellt werden können. Diese Kalibration erfolgt bei einer definierten Trübung von 400 NTU. Die Messgenauigkeit des Gerätes soll für geringe Trübungen ( $< 1$  NTU) gemäss SLMB 0.02 NTU betragen. Für die Messung von Wasser mit geringer Trübung führt der Einsatz von Licht der Wellenlänge 550 nm zu intensiverer Streuung und dadurch zu einer stabileren Messung. Die obere Grenze einer Trübungsmessung wird meistens vom verwendeten Messgerät bestimmt. Bei sehr grossen Trübungswerten kann eine Verdünnung sinnvoll sein.



**Abbildung 24: Trübungsmessung: Streulichtmessung bei  $90^\circ$**

## 7. Kriterien für die Einführung neuer Verfahren

Das Trinkwasser genießt in der Schweiz einen sehr hohen Stellenwert. Durch die vielfältigen Nutzungen und Aktivitäten (Bevölkerungsdichte, Industrie, Landwirtschaft, Mobilität, Siedlung, etc.) ist die Qualität des Rohwassers aber auch einem starken Druck ausgesetzt. Um die Erwartungen an das Produkt Trinkwasser weiterhin erfüllen zu können, ist die Anpassung an neue Rahmenbedingungen (z. B. das Auftreten neuer Problemstoffe) unerlässlich. Dies bedingt sowohl eine Anpassung der bestehenden Anlagen, als auch die Beurteilung neuer Verfahren und Hilfsstoffe zur Trinkwasseraufbereitung. Die Aufbereitung von Oberflächen-, Quell- und Lockergesteinsgrundwasser soll generell das Wasser in seinen Eigenschaften möglichst wenig verändern und unter minimalem Einsatz von Zusatzstoffen ablaufen.

In der Schweiz untersteht das Trinkwasser der Lebensmittelgesetzgebung. Die Bewilligung für die Einführung neuer Verfahren zur Trinkwasseraufbereitung ist deshalb in der Verordnung des EDI über Trink-, Quell- und Mineralwasser (SR 817.022.102) geregelt. Artikel 6 Absatz 5 besagt wörtlich:

*„Verfahren zur Aufbereitung und Desinfektion von Trinkwasser bedürfen der Bewilligung durch das Bundesamt für Gesundheit (BAG)“*

Dieses Vorgehen soll gewährleisten, dass nur Stoffe und Verfahren zur Anwendung kommen, die effektiv und sicher in der Anwendung sind sowie keine negativen Auswirkungen auf die Gesundheit der Konsumentinnen und Konsumenten haben. Chemische Stoffe unterstehen in einem ersten Bewilligungsverfahren dem Chemika-

lienrecht und können erst aufgrund einer Bewilligung durch das BAG für weitere Anwendungen wie die Trinkwasseraufbereitung zugelassen werden. Das Bewilligungsverfahren verlangt nach umfangreichen Unterlagen für die Evaluation und Beurteilung der Anträge. Der Gesuchsteller muss die Wirksamkeit für den spezifischen Stoff/ Mikroorganismus und die Unbedenklichkeit für die Verwendung des Verfahrens in der Trinkwasseraufbereitung nachweisen und wissenschaftlich belegen können. Wissenschaftlich Beweisen bedeutet in diesem Zusammenhang:

- Die Prüfung muss von einer anerkannten Prüfstelle (Labor, Organisation, etc.) durchgeführt und die Wirkungsweise muss von unabhängiger Stelle bestätigt werden.
- Die Prüfung muss nach anerkannten analytischen Verfahren und Methoden durchgeführt worden sein, dabei sind Informationsquellen offen zu legen und die Experimente so zu beschreiben, dass sie von unabhängiger Stelle reproduziert werden können.
- Die Prüfgrundlagen (Gesetze, Prüfnormen, etc.) müssen in einer den Fachleuten allgemein zugänglichen Form veröffentlicht worden sein. Es muss klar sein, auf welchen Grundlagen die Prüfung basiert.
- Verfahren müssen mit Hilfe der gemachten Angaben von unabhängigen Fachpersonen durchgeführt werden können und dieselbe Effizienz aufweisen
- Die Experimente müssen unter realen Bedingungen in den Trinkwasserversorgungen reproduzierbar sein. Dabei ist sowohl die Rohwasserbeschaffenheit als auch die Dimensionierung (hydraulische Verhältnisse, Aufenthaltszeiten, etc.) der Anlage wichtig.



## 7. Kriterien für die Einführung neuer Verfahren

Ein Entscheidungsbaum soll mit konkreten Fragestellungen (Checklisten) helfen, die Entscheidung über die Eignung

eines neuen Verfahrens zu erleichtern und die Zusammenstellung der notwendigen Unterlagen erleichtern.

### Checkliste 1: Allgemeine Anforderungen

	Anforderung	Inhalt der Anforderung	Erfüllt
<b>Allgemeine Information</b>	Gesuchsteller	Name und vollständige Anschrift des Gesuchstellers	<input type="checkbox"/>
	Kontaktperson	Name und vollständige Anschrift der Kontaktperson	<input type="checkbox"/>
	Anlage	Eindeutige Bezeichnung der betroffenen Anlage: Wasserversorgung, Anschrift, technische Daten	<input type="checkbox"/>
	Zweck	Anwendungszweck, Ausbau bestehender Anlage oder Neubau	<input type="checkbox"/>
<b>Produkte-information</b>	Verkaufsbezeichnung	Eindeutige Bezeichnung zur Identifikation des Produktes: Produktname	<input type="checkbox"/>
	Anwendungszweck	Für welche Behandlungsart wird das Verfahren eingesetzt: Stoffabtrennung, Stofftransformation, Desinfektion	<input type="checkbox"/>
	Entwickler	Name und vollständige Anschrift des Entwicklers	<input type="checkbox"/>
	Hersteller	Name und vollständige Anschrift des Herstellers	<input type="checkbox"/>
	Kontakt	Name und vollständige Anschrift der Kontaktperson	<input type="checkbox"/>
	Zertifizierung/Registrierung	Art der Zertifizierung, Registrierungsnummer, Zulassungsnummer	<input type="checkbox"/>
	Technische Dokumentation	Ausführlicher Beschrieb der Anlage, Verfahrensanleitung	<input type="checkbox"/>

## Spurenstoffe

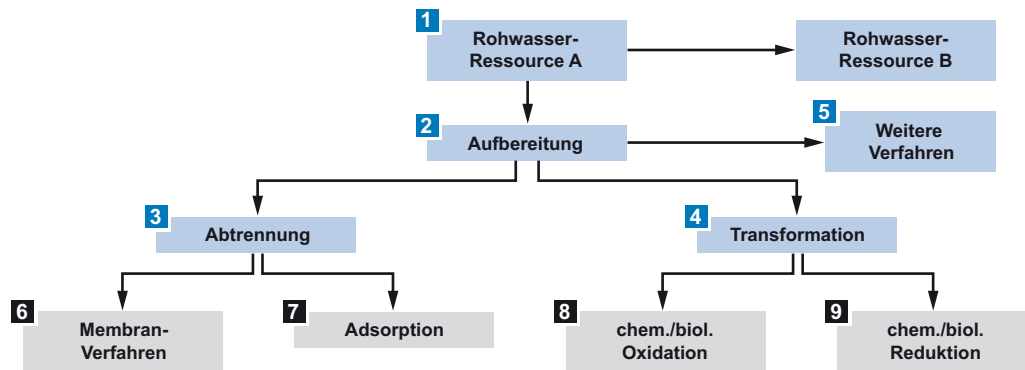


Abbildung 25: Entscheidungsbaum zur Einteilung von neuen Verfahren zur Behandlung von Spurenstoffen. Die dazugehörige Checkliste beschreibt die notwendigen Informationen, welche für ein Bewilligungsverfahren vorgelegt werden müssen.

## 7. Kriterien für die Einführung neuer Verfahren

Checkliste 2: Behandlung von Spurenstoffen

	Anforderung	Inhalt der Unterlagen	Erfüllt
<b>Wasser-ressource</b>	Chemische Rohwasser-Zusammensetzung als Entscheidungsgrundlage	Resultate der chemischen Untersuchungen (Messprogramme)	<input type="checkbox"/>
	Geprüfte Alternativen	Analyse alternativer Wasserressourcen oder Versorgungsmöglichkeiten	<input type="checkbox"/>
<b>Aufbereitung</b>	Beschrieb der Problemstoffe	Welche Stoffe sind unerwünscht, in welchen Konzentration kommen sie vor	<input type="checkbox"/>
	Evaluation Verfahrensart	Grundlagen der Entscheidungsfindung, Beschrieb der Verfahrensart: Abtrennung, Transformation, weitere Verfahren	<input type="checkbox"/>
<b>Abtrennung</b>	Mechanismus	Definition des Abtrenn-Mechanismus: Adsorption, Membrantechnologie, weitere Verfahren	<input type="checkbox"/>
	Eingesetzte Stoffe	Beschrieb, chemische und physikalische Eigenschaften, Beurteilung der Trinkwasserverträglichkeit	<input type="checkbox"/>
	Probleme	Problemstoffe, möglicherweise nachteilige Mechanismen wie Korrosion, Leaching, Fouling, biologische Aktivität	<input type="checkbox"/>
	Einschränkungen	Rohwasseranforderungen, konkurrierende Stoffe, Einsatzkriterien und -Einschränkungen	<input type="checkbox"/>
	Matrix	Auswirkungen von Matrixkomponenten auf Verfahren (konkurrierende Adsorption, Fouling...)	<input type="checkbox"/>

Checkliste 2 (Fortsetzung): Behandlung von Spurenstoffen

Anforderung	Inhalt der Unterlagen	Erfüllt
<b>Transformation</b> Zielparameter	Definition der Zielstoffe und -parameter, Nachweis der Eignung des Verfahrens für Zielparameter	<input type="checkbox"/>
Reaktion	Beschrieb der Transformation (chemisch, physikalisch, biologisch), Reaktionsmechanismen, Konzentration der eingesetzten Stoffe	<input type="checkbox"/>
Eingesetzte Stoffe	Beschrieb der eingesetzten Stoffe inkl. Beurteilung der Trinkwasser- verträglichkeit, Toxizität, allg. gesundheitliche Auswirkungen	<input type="checkbox"/>
Nebenprodukte	Bildung von unerwünschten Reaktionsnebenprodukten	<input type="checkbox"/>
Matrix	Reaktion mit Matrixkomponenten, Auswirkung auf Stabilität von Oxidationsmitteln	<input type="checkbox"/>
Einschränkungen	Rohwasseranforderungen, konkurrierende Stoffe, Einsatzkri- terien und -Einschränkungen	<input type="checkbox"/>
<b>Weitere Verfahren</b> Art des Verfahrens	Detaillierter Beschrieb des gesamten Verfahrens inklusive Anwendungszweck, Wirkmecha- nismen, Neben- und Abfallprodukten	<input type="checkbox"/>

**Für das Bewilligungsverfahren werden spezifische, auf das Verfahren abgestimmte Fragestellungen erarbeitet**

## 7. Kriterien für die Einführung neuer Verfahren

### Mikroorganismen

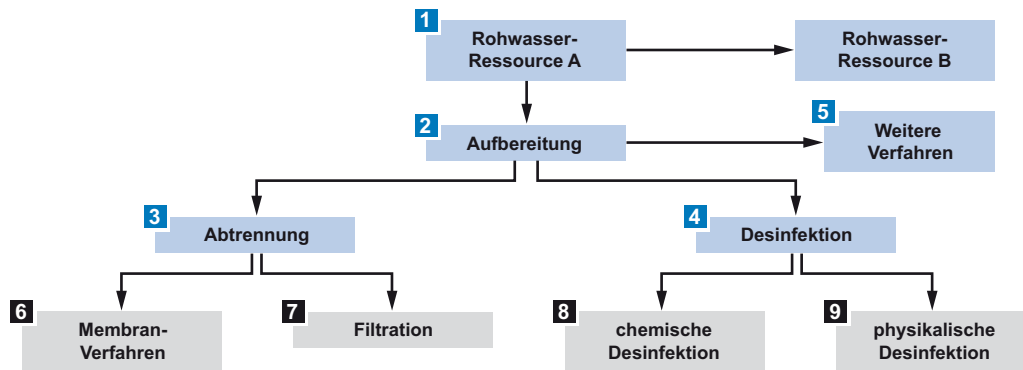


Abbildung 26: Entscheidungsbaum zur Einteilung von neuen Verfahren zur Behandlung von Mikroorganismen. Die dazugehörige Checkliste beschreibt die notwendigen Informationen, welche für ein Bewilligungsverfahren vorgelegt werden müssen.

**Checkliste 3: Behandlung von Mikroorganismen**

	<b>Anforderung</b>	<b>Inhalt der Unterlagen</b>	<b>Erfüllt</b>
<b>Wasser-ressource</b>	Mikrobiologische Rohwasserzusammensetzung als Entscheidungsgrundlage	Resultate und mikrobiologischen Untersuchungen (Messprogramme)	<input type="checkbox"/>
	Geprüfte Alternativen	Analyse alternativer Wasserressourcen oder Versorgungsmöglichkeiten	<input type="checkbox"/>
<b>Aufbereitung</b>	Beschrieb der Problemorganismen	Welche Mikroorganismen sind unerwünscht, in welcher Konzentration kommen sie vor	<input type="checkbox"/>
	Evaluation Verfahrensart	Grundlagen der Entscheidungsfindung, Beschrieb der Verfahrensart: Abtrennung, Desinfektion, weitere Verfahren	<input type="checkbox"/>
<b>Abtrennung</b>	Mechanismus	Definition des Abtrenn-Mechanismus: Membrantechnologie, Filtration	<input type="checkbox"/>
	Eingesetzte Stoffe	Beschrieb, chemische und physikalische Eigenschaften, Beurteilung der Trinkwasserverträglichkeit	<input type="checkbox"/>
	Probleme	Unvollständiger Rückhalt, Auswaschung von Mikroorganismen	<input type="checkbox"/>
	Matrix	Auswirkungen von Matrixkomponenten auf Verfahren (Fouling...)	<input type="checkbox"/>
<b>Desinfektion</b>	Wirkmechanismus	Chemische oder physikalische Desinfektion	<input type="checkbox"/>
	Inaktivierungsweise	Angriffsorte bei Mikroorganismen, Wirkung auf Mikroorganismen	<input type="checkbox"/>
	Eingesetzte Stoffe	Beschrieb der eingesetzten Stoffe inkl. Beurteilung der Trinkwasserverträglichkeit, Toxizität, allg. gesundheitliche Auswirkungen	<input type="checkbox"/>
	Nebenprodukte	Bildung von erwünschten und unerwünschten Nebenprodukten	<input type="checkbox"/>
	Matrix	Reaktion mit Matrixkomponenten, Stabilität des Desinfektionsmittels, Schutz von Mikroorganismen	<input type="checkbox"/>
	Einschränkungen	Rohwasseranforderungen, konkurrierende Stoffe, Einsatzkriterien und -Einschränkungen	<input type="checkbox"/>
<b>Weitere Verfahren</b>	Art des Verfahrens	Detaillierter Beschrieb des gesamten Verfahrens inklusive Anwendungszweck, Wirkmechanismen, Neben- und Abfallprodukten	<input type="checkbox"/>

**Für das Bewilligungsverfahren werden spezifische, auf das Verfahren abgestimmte Fragestellungen erarbeitet**

# 8. Gesetzliche Grundlagen

## 1. Trinkwassergesetzgebung in der Schweiz

Trinkwasser ist das wichtigste Lebensmittel. In diesem Rahmen gelten die all-

gemeinen und spezifischen Vorschriften der Lebensmittelgesetzgebung auch für das Trinkwasser.

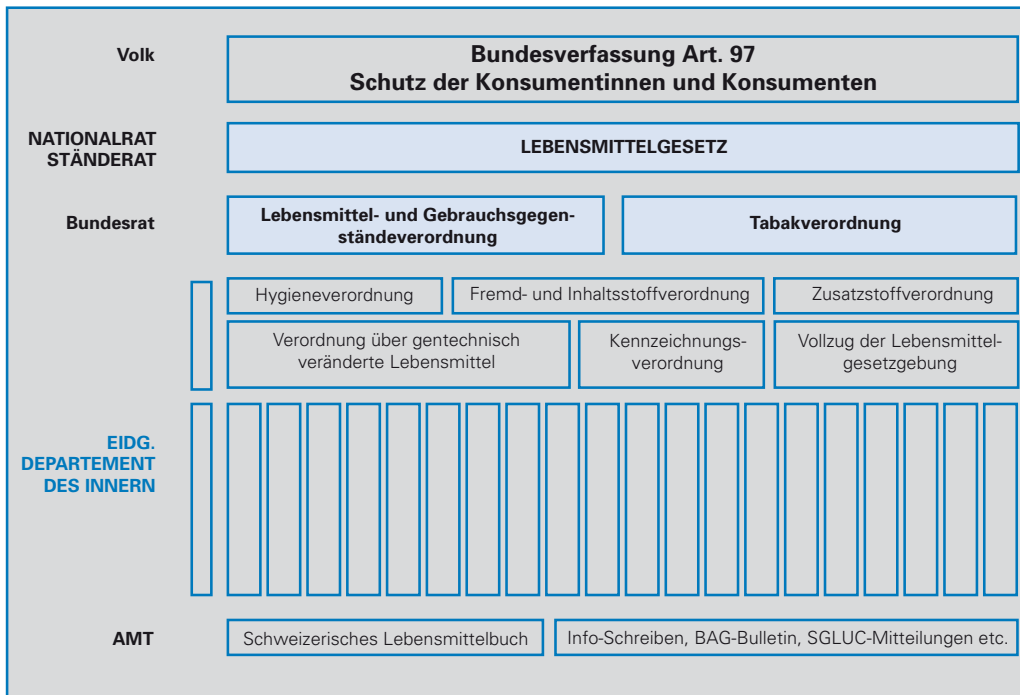


Abb. 27: Struktur der Lebensmittelgesetzgebung seit 2005

### 1.1 Anforderungen an das Trinkwasser

Trinkwasser ist Wasser, das natürlich belassen oder nach Aufbereitung zum Trinken, zum Kochen, zur Zubereitung von Speisen oder zu anderen häuslichen Zwecken bestimmt ist, insbesondere der Körperpflege und -reinigung sowie der Reinigung von Gegenständen, die mit Lebensmitteln in Berührung kommen (Art. 2 der Verordnung über Trink-, Quell- und Mineralwasser). Trinkwasser wird auch in Lebensmittelbetrieben für die Herstellung, Behandlung, Konservierung von für den menschlichen Gebrauch bestimmten Nahrungsmitteln benötigt.

Trinkwasser muss rein und genusstauglich sein. Dieses Erfordernis gilt als erfüllt, wenn es an dem Punkt, an dem es zum Gebrauch zur Verfügung steht in mikrobiologischer, chemischer und physikalischer Hinsicht den gesetzlichen Anforderungen entspricht. Bezüglich Aussehen, Geruch und Geschmack muss das Trinkwasser einwandfrei sein. Mikroorganismen, Parasiten und Stoffe irgendeiner Art dürfen nicht in einer Anzahl oder Konzentration enthalten sein, die eine potentielle Gefährdung der menschlichen Gesundheit darstellt. Die Verantwortung für die Qualität bis zum Hausanschluss (Wasserzähler) liegt bei der Wasserversorgung, danach ist die Verantwortung beim Betreiber der Installation resp. beim Hauseigentümer.

## 1.2 Anforderungen an die Trinkwasserproduktion

Die Trinkwasserproduktion ist ein kontinuierlicher Prozess. Im Gegensatz zu anderen Lebensmitteln können Chargen, bei denen bestimmte Messwerte oder andere vorgegebene Rahmenbedingungen nicht erfüllt wurden, nicht zurückgerufen werden. Trinkwasser ist ein essentielles Lebensmittel, das zwingend täglich in sehr hohen Mengen benötigt wird. Es zeichnet sich gegenüber anderen Lebensmitteln dadurch aus, dass es regional aus natürlichen Ressourcen produziert werden muss, da ein Transport der erforderlichen Mengen über grosse Distanzen schwierig ist und dass die natürlichen Ressourcen durch Umwelteinflüsse, Verschmutzung und Mehrfachnutzung potentiell gefährdet sind.

Faktoren welche die Qualität des Trinkwassers beeinflussen können, sind:

- Schutz der natürlichen Ressourcen gegen Verschmutzung
- Nachhaltige Nutzung von Trinkwasser
- Baulicher und technischer Zustand der Anlagen
- Technische Massnahmen zur Wasseraufbereitung
- Sauberkeit der Anlage (hygienischer Aspekt)
- Ausbildung der Brunnenmeister
- Verantwortungsbewusstsein aller dafür zuständigen Stellen

## 1.3 Anforderungen an das Trinkwasser in einer Notlage

Notwasser, das über provisorische Verteilnetze, Ersatzreservoirs und mobile Transportbehälter im Holprinzip an die Bevölkerung abgegeben wird, entspricht normalerweise den an Trinkwasser gestellten Anforderungen. Im Zweifelsfall, oder auf Anweisung der verantwortlichen Stelle hin, ist das abgegebene Wasser noch durch Zugabe von Desinfektionsmittel, oder durch Abkochen zu entkeimen.

## 2. Auszüge aus den gesetzlichen Grundlagen für die Trinkwasserversorgung

### 2.1 Lebensmittelgesetz (LMG), vom 9. Oktober 1992, SR 817.0 (Stand 1. April 2008)

#### Art. 23 Selbstkontrolle

<sup>1</sup> Wer Lebensmittel, Zusatzstoffe und Gebrauchsgegenstände herstellt, behandelt, abgibt, einführt oder ausführt, muss im Rahmen seiner Tätigkeit dafür sorgen, dass die Waren den gesetzlichen Anforderungen entsprechen. Er muss sie entsprechend der «Guten Herstellungspraxis» untersuchen oder untersuchen lassen.

<sup>2</sup> Die amtliche Kontrolle entbindet ihn nicht von der Pflicht zur Selbstkontrolle.



## 8. Gesetzliche Grundlagen

<sup>2bis</sup> Wer feststellt, dass von ihm eingeführte, hergestellte, verarbeitete, behandelte oder abgegebene Lebensmittel oder Gebrauchsgegenstände die Gesundheit gefährden können, muss sicherstellen, dass die Konsumentinnen und Konsumenten nicht geschädigt werden. Befinden sich die Lebensmittel oder Gebrauchsgegenstände nicht mehr unter der unmittelbaren Kontrolle der betreffenden Person, so muss diese unverzüglich die zuständige Vollzugsbehörde informieren und mit dieser zusammenarbeiten.

<sup>3</sup> Der Bundesrat regelt, unter welchen Voraussetzungen im Einzelfall von einer Untersuchung abgesehen werden kann.

<sup>5</sup> Der Bundesrat kann die Dokumentation der Selbstkontrolle regeln.

### 2.2 Lebensmittel- und Gebrauchsgegenständeverordnung (LGV) vom 23. November 2005, SR 817.02 (Stand 1. April 2008)

#### Art. 3 Verantwortliche Personen

<sup>1</sup> Für jeden Lebensmittelbetrieb ist eine Person zu bezeichnen, welche neben der Unternehmensleitung die oberste Verantwortung für die Produktesicherheit im Betrieb trägt (verantwortliche Person).

<sup>2</sup> ist keine solche bestimmt, so ist die Unternehmensleitung für die Produktesicherheit des Lebensmittelbetriebs verantwortlich.

#### Art. 12 Meldepflicht

<sup>1</sup> Wer Lebensmittel herstellt, verarbeitet, behandelt, lagert, transportiert, abgibt, einführt oder ausführt, hat seine Tätigkeit der zuständigen kantonalen Vollzugsbehörde zu melden.

<sup>2</sup> Ausgenommen ist die gelegentliche Abgabe in kleinem Rahmen an Basaren, Schulfesten und Ähnlichem.

<sup>3</sup> Zu melden sind auch wichtige Veränderungen im Betrieb sowie die Betriebsschliessung.

#### Art. 47 Hygiene

<sup>1</sup> Die verantwortliche Person muss dafür sorgen, dass:

- Lebensmittel und Gebrauchsgegenstände durch Mikroorganismen, Fremdstoffe oder auf andere Weise nicht nachteilig verändert werden;
- ein Lebensmittel unter Berücksichtigung seines Verwendungszwecks für den menschlichen Konsum geeignet ist.

<sup>2</sup> Sie muss alle Massnahmen und Vorkehrungen treffen, die notwendig sind, um eine Gefahr für den Menschen unter Kontrolle zu bringen.

<sup>3</sup> Die im Umgang mit Lebensmitteln verwendeten Gefässe, Apparate, Werkzeuge, Packmaterialien, Transportmittel usw. sowie die zur Lebensmittelherstellung, zur Aufbewahrung und zum Verkauf bestimmten Räume müssen sauber und in gutem Zustand gehalten werden.

## Kapitel 5: Kontrollen

### 1. Abschnitt: Selbstkontrolle

#### Art. 49 Grundsatz

<sup>1</sup> Die verantwortliche Person sorgt im Rahmen ihrer Tätigkeit auf allen Herstellungs-, Verarbeitungs- und Vertriebsstufen dafür, dass die gesetzlichen Anforderungen an Lebensmittel und Gebrauchsgegenstände eingehalten werden, insbesondere in Bezug auf

den Gesundheitsschutz, den Täuschungsschutz sowie den hygienischen Umgang mit Lebensmitteln und Gebrauchsgegenständen.

<sup>2</sup> Um den Anforderungen nach Absatz 1 zu genügen, ist die verantwortliche Person zur Selbstkontrolle verpflichtet.

<sup>3</sup> Wichtige Instrumente der Selbstkontrolle sind insbesondere:

- a. die Sicherstellung guter Verfahrenspraktiken (Gute Hygienepraxis, Gute Herstellungspraxis);
- b. die Anwendung von Verfahren, die auf den Prinzipien des HACCP-Konzepts (Art. 51) beruhen;
- c. die Rückverfolgbarkeit;
- d. die Probenahme und die Analyse von Lebensmitteln und Gebrauchsgegenständen.

#### **Art. 50 Rückverfolgbarkeit**

<sup>1</sup> Lebensmittel, Nutztiere, die der Lebensmittelgewinnung dienen, sowie alle Stoffe, von denen erwartet werden kann, dass sie in einem Lebensmittel verarbeitet werden, müssen über alle Herstellungs-, Verarbeitungs- und Vertriebsstufen rückverfolgbar sein. Vorbehalten bleibt Artikel 5 der Verordnung vom 23. November 2005 über die Primärproduktion.

<sup>2</sup> Wer mit Produkten nach Absatz 1 handelt, muss der zuständigen kantonalen Vollzugsbehörde darüber Auskunft geben können:

- a. von wem die Produkte bezogen worden sind; und
- b. an wen sie geliefert worden sind; ausgenommen ist die direkte Abgabe an Konsumentinnen und Konsumenten.

#### **Art. 51 Hazard Analysis and Critical Control Points (HACCP-Konzept)**

<sup>1</sup> Wer Lebensmittel herstellt, verarbeitet, behandelt, lagert, transportiert oder abgibt, hat ein oder mehrere Verfahren zur ständigen Überwachung der spezifischen biologischen, chemischen und physikalischen Gefahren zu entwickeln und anzuwenden, die auf den Grundsätzen des HACCP-Konzepts beruhen. Artikel 53 bleibt vorbehalten.

<sup>2</sup> Ein solches Verfahren muss folgende Elemente umfassen:

- a. Identifizierung und Bewertung von Gefahren, die vermieden, ausgeschaltet oder auf ein annehmbares Mass reduziert werden müssen («hazard analysis» HA);
- b. Bestimmung der kritischen Kontrollpunkte auf den Prozessstufen, auf denen eine Kontrolle notwendig ist, um eine Gefahr unter Kontrolle zu bringen, das heisst zu vermeiden, auszuschalten oder auf ein annehmbares Mass zu reduzieren («critical control point(s)», kritische Kontrollpunkte, CCP);
- c. Festlegung von Richtwerten in den genannten Prozessstufen zur Unterscheidung der akzeptablen von inakzeptablen Werten zwecks Vermeidung, Ausschaltung oder Reduzierung identifizierter Gefahren;
- d. Festlegung und Durchführung eines effizienten Systems zur Überwachung der kritischen Kontrollpunkte;
- e. Festlegung von Korrekturmassnahmen für den Fall, dass die Überwachung zeigt, dass ein kritischer Kontrollpunkt nicht mehr fehlerfrei funktioniert;
- f. Festlegung eines Verfahrens zur Überprüfung, ob die Vorschriften nach den Buchstaben a–e eingehalten werden; Überprüfungen sind regelmässig durchzuführen, auf jeden Fall jedoch immer dann, wenn eine Änderung des Produktionsprozesses die Sicherheit des hergestellten Lebensmittels beeinträchtigen könnte;

## 8. Gesetzliche Grundlagen

g. Erstellen von Dokumenten und Aufzeichnungen, mit denen nachgewiesen werden kann, dass den Vorschriften nach den Buchstaben a–f entsprochen wird; die Dokumente und Aufzeichnungen müssen der Art und Grösse des Unternehmens angemessen sein; sie sind jederzeit auf dem neusten Stand zu halten und während eines angemessenen Zeitraums aufzubewahren.

<sup>3</sup> Das HACCP-Konzept ist in einer dem Sicherheitsrisiko und dem Produktionsumfang angepassten Form anzuwenden.

<sup>4</sup> Das EDI kann für Einzelhandelsbetriebe die Anforderungen angemessen reduzieren.

### **Art. 52 Leitlinien für eine gute Verfahrenspraxis**

<sup>1</sup> Die Lebensmittelwirtschaft kann Leitlinien für eine gute Verfahrenspraxis erstellen, welche auf den Grundsätzen des HACCP-Konzepts beruhen. Diese sind vom BAG genehmigen zu lassen.

<sup>2</sup> Die Leitlinien sollen:

- a. für die korrekte Umsetzung der Bestimmungen dieses Abschnittes sowie der weiteren lebensmittelhygienischen Bestimmungen geeignet sein;
- b. die einschlägigen Verfahrenskodizes des Codex Alimentarius berücksichtigen; und
- c. mit den betroffenen Kreisen abgeprochen sein.

### **Art. 53 Nachweis der guten Verfahrenspraxis**

Die verantwortliche Person muss gegenüber der zuständigen kantonalen Vollzugsbehörde nachweisen können, dass:

- a. ein Verfahren nach dem HACCP-Konzept angewendet wird; oder
- b. sofern vom BAG genehmigte Leitlinien für eine gute Verfahrenspraxis vorliegen: nach diesen Leitlinien für eine gute Verfahrenspraxis vorgegangen wird.

### **Art. 54 Abgabe gesundheitsgefährdender Lebensmittel oder Gebrauchsgegenstände**

<sup>1</sup> Stellt die verantwortliche Person fest oder hat sie Grund zur Annahme, dass vom Betrieb eingeführte, hergestellte, verarbeitete, behandelte oder abgegebene Lebensmittel oder Gebrauchsgegenstände die Gesundheit gefährdet haben oder gefährden können, und stehen die betreffenden Lebensmittel oder Gebrauchsgegenstände nicht mehr unter der unmittelbaren Kontrolle des Betriebs, so muss sie unverzüglich:

- a. die zuständige kantonale Vollzugsbehörde informieren;
- b. die erforderlichen Massnahmen treffen, um die betreffenden Produkte vom Markt zu nehmen (Rücknahme); und
- c. falls die Produkte die Konsumentinnen und Konsumenten schon erreicht haben könnten: die Produkte zurückrufen (Rückruf) und die Konsumentinnen und Konsumenten effektiv und genau über den Grund des Rückrufs informieren.

<sup>2</sup> Hat sie Kenntnis davon oder Grund zur Annahme, dass lebensmittelbedingte Krankheitsausbrüche in Zusammenhang mit ihrem Lebensmittelbetrieb stehen, so hat sie dafür zu sorgen, dass Proben verdächtiger Lebensmittel oder Stäm-

me isolierter Krankheitserreger erhalten bleiben und bei Bedarf den Vollzugsbehörden zugänglich gemacht werden.

<sup>3</sup> Sie muss mit den Vollzugsbehörden zusammenarbeiten.

### **2.3 Verordnung über Trink-, Quell- und Mineralwasser vom 23. November 2005, SR 817.022.102 (Stand 27. Dezember 2005)**

#### **2. Abschnitt: Trinkwasser**

##### **Art. 2 Definition**

Trinkwasser ist Wasser, das natürlich belassen oder nach Aufbereitung bestimmt ist zum Trinken, zum Kochen, zur Zubereitung von Speisen sowie zur Reinigung von Gegenständen, die mit Lebensmitteln in Berührung kommen.

##### **Art. 3 Anforderungen**

<sup>1</sup> Trinkwasser muss in mikrobiologischer, chemischer und physikalischer Hinsicht genusstauglich sein.

<sup>2</sup> Genusstauglich ist Trinkwasser, wenn es an der Stelle, an der es zum Gebrauch zur Verfügung steht:

- a. die in der Hygienverordnung für Trinkwasser festgelegten hygienischen und mikrobiologischen Anforderungen erfüllt;
- b. die in der Fremd- und Inhaltsstoffverordnung für Trinkwasser festgesetzten Toleranz- und Grenzwerte nicht überschreitet; und
- c. bezüglich Geschmack, Geruch und Aussehen einwandfrei ist.

##### **Art. 4 Kennzeichnung**

Auf Behältnissen von Trinkwasser, welche an Konsumentinnen oder Konsumenten abgegeben werden, dürfen nicht angebracht werden:

- a. Hinweise auf Quellorte oder Quellnamen sowie Bildzeichen, Abbildungen oder Bezeichnungen, die Anlass zu Verwechslungen mit einem natürlichen Mineralwasser oder Quellwasser geben könnten;
- b. gesundheitsbezogene Anpreisungen.

##### **Art. 5 Information**

Wer über eine Wasserversorgungsanlage Trinkwasser an Konsumentinnen und Konsumenten abgibt, hat diese jährlich mindestens einmal umfassend über die Qualität des Trinkwassers zu informieren.

##### **Art. 6 Anlagen, Mittel und Verfahren für Trinkwasser**

<sup>1</sup> Eine Wasserversorgungsanlage ist eine Anlage zur Fassung oder Aufbereitung, zum Transport, zur Speicherung oder Verteilung von Trinkwasser, das an Dritte abgegeben wird.

<sup>2</sup> Wer eine Wasserversorgungsanlage erstellen oder ändern will, muss dies der zuständigen kantonalen Vollzugsbehörde vorgängig melden.

<sup>3</sup> Anlagen, Apparate und Einrichtungen zur Wasserversorgung müssen nach den anerkannten Regeln der Technik eingerichtet, betrieben, erweitert oder abgeändert werden. Die Inhaberin oder der Inhaber ist verpflichtet, sie durch entsprechend ausgebildete Personen regelmässig überwachen und unterhalten zu lassen.

## 8. Gesetzliche Grundlagen

<sup>4</sup> Anlagen, Apparate, Einrichtungen und Verfahren zur Aufbereitung von Trinkwasser dürfen nur benutzt werden, wenn das damit behandelte Trinkwasser jederzeit den Anforderungen von Artikel 3 entspricht.

<sup>5</sup> Verfahren zur Aufbereitung und Desinfektion von Trinkwasser bedürfen der Bewilligung durch das Bundesamt für Gesundheit (BAG).

### **2.4 Fremd- und Inhaltsstoffverordnung (FIV), vom 26. Juni 1995, SR 17.021.23 (Stand 1. April 2008)**

#### **Art. 1 Grundsatz**

Fremd- und Inhaltsstoffe (Stoffe) dürfen in oder auf Lebensmitteln nur in gesundheitlich unbedenklichen und technisch unvermeidbaren Mengen vorhanden sein.

#### **Art. 2 Höchstkonzentrationen, Toleranz- und Grenzwerte**

<sup>1</sup> Als Höchstkonzentrationen gilt die Konzentration eines Stoffes und seiner toxikologisch bedeutsamen Folgeprodukte, die in oder auf einem bestimmten Lebensmittel im Zeitpunkt der Abgabe an die Konsumentinnen oder Konsumenten vorhanden sein darf.

<sup>2</sup> Die Höchstkonzentration eines Stoffes wird als Toleranzwert oder als Grenzwert angegeben.

<sup>3</sup> Der Toleranzwert ist die Höchstkonzentration, bei dessen Überschreitung das Lebensmittel als verunreinigt oder sonst im Wert vermindert gilt.

<sup>4</sup> Der Grenzwert ist die Höchstkonzentration, bei dessen Überschreitung das Lebensmittel für die menschliche Ernährung als ungeeignet gilt.

<sup>5</sup> In begründeten Fällen wird für einen Stoff ein Toleranzwert und ein Grenzwert festgelegt.

<sup>6</sup> Die Toleranz- und Grenzwerte werden in Listen im Anhang zu dieser Verordnung festgelegt.

### **2.5 Hygieneverordnung, vom 23. November 2005, SR 817.024.1 (Stand 1. April 2008)**

#### **Art. 5 Mikrobiologische Kriterien, Grenzwerte und Toleranzwerte für Mikroorganismen**

<sup>1</sup> Ein mikrobiologisches Kriterium ist ein Kriterium, das die Akzeptabilität eines Produkts, einer Partie Lebensmittel, eines Prozesses oder eines Gebrauchsgegenstands anhand des Nichtvorhandenseins, des Vorhandenseins oder der Anzahl von Mikroorganismen oder anhand der Menge ihrer Toxine pro definierte Einheit festlegt.

Es wird unterschieden zwischen:

- a. Lebensmittelsicherheitskriterium;
- b. Prozesshygienekriterium.

<sup>2</sup> Mit einem Lebensmittelsicherheitskriterium wird die Akzeptabilität eines sich im Handel befindlichen Produkts festgelegt.

<sup>3</sup> Ein Prozesshygienekriterium gibt die akzeptable Funktionsweise des Herstellungsprozesses an. Bei dessen Überschreitung sind die erforderlichen Korrekturmaßnahmen zur Sicherstellung der Prozesshygiene zu treffen. Es gilt nicht für sich im Handel befindliche Produkte.

<sup>4</sup> Die mikrobiologischen Kriterien werden durch Grenzwerte und Toleranzwerte ausgedrückt.

<sup>5</sup> Ein Grenzwert bezeichnet die Anzahl Mikroorganismen, bei deren Überschreitung ein Produkt als gesundheitsgefährdend gilt.

<sup>6</sup> Ein Toleranzwert bezeichnet die Anzahl Mikroorganismen, die erfahrungsgemäss nicht überschritten werden darf, wenn die Rohstoffe sorgfältig ausgewählt werden, die Gute Herstellungspraxis eingehalten und das Produkt sachgerecht aufbewahrt wird. Wird der Toleranzwert überschritten, so gilt die Ware als im Werte vermindert.

#### **Art. 6 Untersuchungsmethoden**

<sup>1</sup> Proben sind gemäss den mikrobiologischen Referenzmethoden des Schweizerischen Lebensmittelbuches mikrobiologisch zu untersuchen.

<sup>2</sup> Andere Untersuchungsmethoden sind zulässig, wenn sie anhand der Referenzmethode nach international anerkannten Protokollen validiert sind und zu gleichen Beurteilungen führen wie die Referenzmethoden.

#### **Art. 17 Wasserversorgung**

<sup>1</sup> In Lebensmittelbetrieben muss in ausreichender Menge Trinkwasser gemäss der Verordnung des EDI vom 23. November 2005 über Trink-, Quell- und Mineralwasser zur Verfügung stehen.

<sup>2</sup> Trinkwasser ist immer dann zu verwenden, wenn gewährleistet werden muss, dass Lebensmittel nicht kontaminiert werden.

<sup>3</sup> Wasser, das zur Verarbeitung oder zur Verwendung als Zutat aufbereitet wird, darf für das betreffende Lebensmittel keine mikrobiologische, chemische oder physikalische Gefahrenquelle darstellen und muss den Anforderungen an Trinkwasser entsprechen.

<sup>4</sup> Eis, das mit Lebensmitteln in Berührung kommt oder das eine Kontaminationsquelle für Lebensmittel darstellen kann, muss aus Trinkwasser hergestellt werden. Das Eis muss so hergestellt, behandelt und gelagert werden, dass jegliche Kontamination ausgeschlossen ist.

<sup>5</sup> Dampf, der direkt mit Lebensmitteln in Berührung kommt, darf weder gesundheitsgefährdende Stoffe enthalten noch die Lebensmittel kontaminieren.

<sup>6</sup> Brauchwasser, das zur Brandbekämpfung, Dampferzeugung, Kühlung oder zu ähnlichen Zwecken verwendet wird, ist separat zu leiten und als solches zu kennzeichnen. Es darf weder eine Verbindung zur Trinkwasserleitung bestehen noch darf das Brauchwasser in diese Leitung zurückfliessen können.

Die Listen im Anhang dieser Verordnung enthalten spezifische Höchstwerte für Trinkwasser.

## 8. Gesetzliche Grundlagen

### 2.6 Weitere Gesetze und Verordnungen welche die Qualität von Trinkwasser betreffen (Auswahl)

#### **Bereich Lebensmittel:**

Verordnung über Bedarfsgegenstände vom 23. November 2005, SR 817.023.21

#### **Bereich Gewässerschutz:**

Gewässerschutzgesetz (GSchG) vom 24. Januar 1991, SR 814.20  
Gewässerschutzverordnung (GSchV) vom 28. Oktober 1998, SR 814.201

#### **Bereich Krankheiten:**

Epidemiengesetz vom 18. Dezember 1970, SR 818.101

#### **Bereich Notlagen:**

Verordnung über die Sicherstellung der Trinkwasserversorgung in Notlagen (VTN) vom 20. November 1991, SR 531.32

### 2.7 Schweizerisches Lebensmittelbuch

#### **Kapitel 27A „Trinkwasser“, Ausgabe 1985 (Version 2000)**

Das Schweizerische Lebensmittelbuch empfiehlt und beschreibt geeignete Analysemethoden zur Trinkwasseruntersuchung, gibt Richtlinien zur Beurteilung von Analyseresultaten und Erfahrungswerte für chemische und physikalische Parameter in anthropogen und natürlich nicht oder wenig verunreinigtem Trinkwasser an.

# 9. Glossar

**AMK:** Aerobe Mesophile Keime

**AOC (Assimilable Organic Carbon):** Assimilierbarer organischer Kohlenstoff

**AOP (Advanced Oxidation Processes):** Weitergehende Oxidation, Oxidation mittels sekundär gebildeten OH-Radikalen

**Aufbereitung:** Behandlung eines Rohwassers, so dass es den gesetzlichen Anforderungen für die Trinkwassernutzung entspricht

**BAFU:** Bundesamt für Umwelt

**BAG:** Bundesamt für Gesundheit

**BDOC (Biodegradable Dissolved Organic Carbon):** Biologisch abbaubarer organischer Kohlenstoff

**Biodosimetrie, biosimetrische Prüfung:** Experimentelles Verfahren zur Ermittlung der Wirksamkeit von UV-Desinfektionsgeräten unter Verwendung von Mikroorganismen (*B. subtilis*) mit bekannter UV-Empfindlichkeit

**Biofouling:** Verblockung durch Ablagerungen auf der Membranoberfläche, die durch mikrobiellen Bewuchs verursacht werden (siehe auch Fouling)

**Biologische Stabilisierung:** Massnahmen, wie z.B. die Reduktion von Nährstoffen und der Abbau von AOC während der Trinkwasseraufbereitung, um das Wiederaufwachsen von Bakterien während der Trinkwasserverteilung zu minimieren. Die biologische Stabilität von Trinkwasser hängt insbesondere ab von der Konzentration an Nährstoffen, der Konzentration an Desinfektionsmitteln und der Wassertemperatur

**BTEX:** Summenparameter für die vier monozyklischen aromatischen Kohlenwasserstoffe **B**enzol, **T**oluol, **E**thylbenzol und **X**ylol

**Capsids:** Komplexe Proteinstruktur der Viren, welche das Virusgenom umhüllt

**CKW:** Chlorierte Kohlenwasserstoffe

**C\*t-Wert:** Parameter für die Desinfektionsleistung von chemischen Desinfektionsmitteln (Produkt aus der wirksamen Desinfektionsmittelkonzentration  $c$  und der Kontaktzeit  $t$ )

**Dalton (Da):** Grösse für die atomare Masseneinheit, exakt gleich 1/12 der Masse des Kohlenstoff-Isotops  $^{12}\text{C}$ ,  $1 \text{ Da} = 1,6605655 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$

**Denitrifikation:** Reduktionsreaktion von Nitrat ( $\text{NO}_3^-$ ) zu elementarem Stickstoff ( $\text{N}_2$ )

**Diarrhoe:** Durchfall



## 9. Glossar

**Diskontinuität (diskontinuierlich):** Unstetigkeit, mit Unterbrüchen

**Disproportionierung:** Bei der chemischen Reaktion der Disproportionierung tritt im Rahmen einer Redoxreaktion ein Element gleichzeitig als Oxidationsmittel und als Reduktionsmittel auf, so dass es vorher in einer mittleren Oxidationsstufe, nachher teils in einer positiveren und teils in einer negativeren Oxidationsstufe vorliegt

**DNAPL (Dense Non Aqueous Phase Liquids):** Schwerphase von wasserunlöslichen organischen Stoffen mit einer Dichte > 1 kg/L

**DOC (Dissolved Organic Carbon):** Summe des gelösten organischen Kohlenstoffes natürlicher oder anthropogener Herkunft

**DPD:** Diethyl-p-phenylendiamin

**EAWAG:** Eidg. Anstalt für Wasserversorgung, Abwasserreinigung und Gewässerschutz

**EDI:** Eidgenössisches Departement des Innern

**EHEC:** Enterohämorrhagische *Escherichia Coli*

**Endogen:** Die Medizin spricht von endogenen Stoffen, Krankheiten oder Krankheitserregern, wenn diese im Innern des menschlichen Körpers entstehen

**Enteritis:** Dünndarmentzündung

**fäkal-oral:** Übertragungsweg von mit Fäkalien ausgeschiedenen Mikroorganismen, die auf oralem Weg (Lebensmittel, Trinkwasser) wieder in den menschlichen Körper gelangen

**Festbett:** Schüttung von Feststoffpartikeln, welche während des Prozesses (z. B. Filtration) nicht bewegt werden

**FIV:** Verordnung des EDI über Fremd- und Inhaltsstoffe in Lebensmitteln (SR 817.021.23)

**FNU:** Formazine Nephelometric Unit, in der Wasseraufbereitung verwendete Einheit für die Streulichtmessung bei 90° und 880 nm gemäss DIN EN ISO 7027 (Umrechnung siehe NTU)

**Fouling:** Verminderung der Durchlässigkeit von Membranen für Wasser aufgrund von Ablagerungen auf der Membranoberfläche und/oder in den Membranporen

**Freies Chlor:** Unter freiem Chlor werden die Chlor-Verbindungen  $Cl_2$ , unterchlorige Säure (HOCl) und das Anion der unterchlorigen Säure (Hypochlorit-Anion,  $OCl^-$ ) zusammengefasst. Als gebundenes Chlor bezeichnet man Chlor-Stickstoffverbindungen, die Chloramine, die eine geringere desinfizierende Wirkung aufweisen als freies Chlor. Die Summe aus freiem und gebundenem Chlor ist das Gesamtchlor

**Gastroenteritis:** Magen-Darm-Entzündung

**Grenzwert:** Höchstkonzentration, bei deren Überschreiten das Lebensmittel für die menschliche Ernährung als ungeeignet gilt (gem. FIV Art. 2 Abs. 4)

**Grundwasser:** Wasser, das die natürlichen Hohlräume im Untergrund zusammenhängend ausfüllt. Es bewegt sich ausschliesslich unter Einfluss der Schwerkraft

**GSchG:** Bundesgesetz über den Schutz der Gewässer (SR 814.20)

**GSchV:** Gewässerschutzverordnung (SR 814.201)

**HyV:** Hygieneverordnung des EDI (SR 817.024.1)

**Ion:** Positiv oder negativ elektrisch geladenes Atom oder Molekül

**Jar-Test:** Labormethode zur Bestimmung von Flockungsleistung in einem Becherglas mit Rührwerk

**Leaching:** Prozess des Herauslösen von Substanzen aus einem Feststoff in eine Flüssigkeit

**LGV:** Lebensmittel- und Gebrauchsgegenständeverordnung (SR 817.02)

**LMG:** Bundesgesetz über Lebensmittel und Gebrauchsgegenstände (SR 817.0)

**Lysis:** Zerfall einer Zelle durch Schädigung oder Auflösung der äusseren Zellmembran (Zelltod) und damit verbunden der Freisetzung des Zellinhaltes

**MAK (Maximale Arbeitsplatz-Konzentration):** Grenzwert für gesundheitsschädliche Stoffe in der Luft am Arbeitsplatz

**Mikrosieb:** Stahl- oder Textilgeflecht mit Poren von 0.016 - 0.05 mm. Eine kontinuierliche Rückspülung sorgt für verstopfungsfreien Betrieb

**MWCO (Molecular Weight Cut-Off):** Definition der Trennschärfe bei Membranverfahren anhand des Molekulargewichts einer Substanz, die Werte werden in Dalton (Da) angegeben

**NAQUA:** Nationales Netz zur Beobachtung der Grundwasserqualität

**Nitrifikation:** Biologische Oxidationsreaktion von Ammonium ( $\text{NH}_4^+$ ) zu Nitrat ( $\text{NO}_3^-$ )

**NOM (Natural Organic Matter):** Natürliches organisches Material wie z. B. Huminsäuren, etc.

**NTU:** Nephelometric Turbidity Unit, in der Wasseraufbereitung verwendete Einheit für die Messung bei  $90^\circ$  gemäss den Vorschriften der US-EPA, die Einheiten sind bei Messungen nach obiger Methode vergleichbar:  $\text{NTU} = \text{FNU} = \text{FTU} = \text{TE/F } 90^\circ = \text{JTU}$

## 9. Glossar

**Oozysten:** Umweltresistente Dauerstadien gewisser Protozoen

**Organoleptisch:** Erregend auf Sinnesorgane (z. B. Geruchs- und Geschmackssinn)

**PAC (Powdered Activated Carbon):** Pulverisierte Aktivkohle, Pulveraktivkohle

**Pathogen:** Krankheitserregend

**Permeat:** In der Membrantechnik verwendeter Ausdruck für die die Membran durchdringende, von gewissen Inhaltsstoffen befreite Flüssigkeit

**Persistent:** Nur schwer physikalisch, chemisch oder biologisch entfernbar

**Prädation:** Vorgang, bei dem der Prädator (Jäger) einen anderen Organismus oder Teile davon konsumiert

**Rohwasser:** Eingesetztes Grund- oder Oberflächenwasser vor jeglicher Aufbereitung zu Trinkwasser

**Scaling:** Membranverblockung infolge Kristallisation/Fällung von Wasserinhaltsstoffen

**SLMB (Schweizerisches Lebensmittelbuch):** Amtliche Sammlung von teilweise verbindlichen Empfehlungen, wie Lebensmittel, Zusatzstoffe und Gebrauchsgegenstände zu untersuchen und zu beurteilen sind

**Speziierung:** Die, in Abhängigkeit der Umgebungsbedingungen stattfindende, Aufteilung einer Substanz in ihre chemischen Ausprägungsformen

**Sporen:** Sehr umweltresistente Dauerformen einiger Bakterienarten

**STEC:** Shigatoxin bildende *Escherichia coli*

**SUVA:** Schweizerische Unfallversicherungsanstalt

**SVGW:** Schweizerischer Verein des Gas- und Wasserfaches (DVGW: Deutsche Vereinigung des Gas- und Wasserfaches, ÖVGW: Österreichischer Vereinigung des Gas- und Wasserfaches)

**THM:** Trihalomethane, dreifach halogenierte, potentiell kanzerogene Methane

**TMB: Tetramethylbenzidin**

**Toleranzwert:** Höchstkonzentration, bei dessen Überschreiten das Lebensmittel als verunreinigt oder sonst im Wert vermindert gilt (gem. FIV Art. 2 Abs. 3)

**Transmembraner Druck:** Der über der Membran wirkende Differenzdruck (Differenz aus mittlerem Druck vor (feedseitig) und mittlerem Druck nach (permeatseitig) der Membran

**Transmission:** Prozentsatz der gesamten Strahlung einer spezifizierten Wellenlänge, die durch ein Fluid hindurchdringt. Je niedriger die Transmission ist desto geringer ist die Durchlässigkeit des Fluids. Die Transmission ist abhängig von der Schichtdicke des Fluids, mit zunehmender Schichtdicke sinkt die Transmission. Häufig wird die UV-Transmission angegeben, womit im Allgemeinen die Transmission bei einer Wellenlänge von 254 nm gemeint ist

**Trinkwasser:** Wasser, das natürlich belassen oder nach Aufbereitung bestimmt ist zum Trinken, zum Kochen, zur Zubereitung von Speisen sowie zur Reinigung von Gegenständen, die mit Lebensmitteln in Berührung kommen (gemäss Verordnung des EDI über Trink-, Quell- und Mineralwasser, SR 817.022.102)

**TSS (Total Suspended Solids):** Summe aller suspendierten Wasserinhaltsstoffe

**Unförmigkeitsgrad:** Quotient aus den Siebweiten, die dem Siebdurchgang von 60% und dem Siebdurchgang von 10% entsprechen (aus Sieblinie ermittelt):  $U = d_{60}/d_{10}$

**US-EPA (United States Environmental Protection Agency):** Umweltschutzbehörde der Vereinigten Staaten von Amerika

**UV-Dosis:** Die UV-Dosis (angegeben in  $J/m^2$ ) ist das Produkt aus Bestrahlungsstärke (angegeben in  $W/m^2$ ) und der Bestrahlungszeit. Die zur Beschreibung der Desinfektionsleistung von UV-Geräten massgebliche Grösse ist die UV-Dosis

**VTEC: Verotoxin bildende *Escherichia Coli***

**WHO (World Health Organization):** Weltgesundheitsorganisation, Sonderorganisation der Vereinten Nationen (UN)

**Wiederverkeimung:** Wachstum von Mikroorganismen im aufbereiteten Trinkwasser (Reservoirs, Leitungssystem, etc.)

**Wirbelschicht (Fließbett):** Durch eine Strömung (Gas oder Flüssigkeit) aufgelockerte, fließfähige Masse aus feinkörnigen Feststoffteilchen

**Zoonosen (zoonotisch):** von Tier zu Mensch und von Mensch zu Tier übertragbare Infektionen und Krankheiten

**Zysten:** Umweltresistente Dauerform bei einigen Protozoen

# 10. Literaturverzeichnis

## Einleitung

**BUWAL (2004):** Wegleitung Grundwasserschutz, Vollzug Umwelt, Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft, Bern

**BWG (2005):** Hydrologie: Grundwasser unter der Lupe, Aquaterra 2

**Gujer W.** (2002): Siedlungswasserwirtschaft, 2.Auflage, Springer Verlag Berlin Heidelberg New York

**WHO** (2004): Guidelines for drinking-water quality, Vol. 1, Recommendations. – 3rd ed.

## Mikroorganismen

**Auckenthaler A., Huggenberger P.** (2003): Pathogene Mikroorganismen im Grund- und Trinkwasser, Birkhäuser Verlag, Basel Boston Berlin

**Botzenhard K.** (1994): Die Beherrschung mikrobiologischer Belastungen bei der Oberflächenwasseraufbereitung nach der SWTR (USA), GWF Wasser/Abwasser 135: 201 - 206

**Cook K.L., Bolster C.H.** (2006): Survival of *Campylobacter jejuni* and *Escherichia coli* in groundwater during prolonged starvation at low temperatures, Journal of Applied Microbiology 103: 573 - 583

**LeChevallier M.W., Au K.-K.** (2004): Water treatment and Pathogen Control: Process Efficiency in Achieving Safe Drinking Water, World Health Organization

**Mamane H., Shemer H., Linden K.G.** (2007): Inactivation of *E. coli*, *B. subtilis* spores, and MS2, T4 and T7 phage using UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> advanced oxidation, Journal of Hazardous Materials 146: 479 - 486

**Moreno Y., Piqueres P., Alonso J.L., Jiménez A., González A., Ferrús M.A.** (2007): Survival and viability of *Helicobacter pylori* after inoculation into chlorinated drinking water, Water Research 41: 3490 - 3496

**Schoenen D.** (1996): Die hygienisch-mikrobiologische Beurteilung von Trinkwasser, GWF Wasser/Abwasser 137: 72 - 82

**Snozzi M.** (1999): Prüfung und Zertifizierung von UV-Anlagen, Gas Wasser Abwasser, 5/99

**Suslov T.V.** (2001): Water disinfection: A practical approach to calculating dose values for preharvest and postharvest applications, Agriculture and natural resources, Publication 7256

**Thurston-Enriquez J.A., Haas C.N., Jacangelo J., Gerba C.P.** (2003): Chlorine Inactivation of Adenovirus Type 40 and Feline Calicivirus, Applied and Environmental Microbiology, Vol. 69, No. 7: 3979 - 3985

**WHO** (2004): Guidelines for drinking-water quality, Vol. 1, Recommendations. – 3rd ed.

### **Wasserinhaltsstoffe**

**BUWAL** (2004): Wegleitung Grundwasserschutz, Vollzug Umwelt, Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft, Bern

**BUWAL, BWG** (2004): NAQUA - Grundwasserqualität in der Schweiz 2002/2003, Bern

**Chaabane H.** (2005): Influence of soil properties on the adsorption-desorption of sulcotrine and its hydrolysis metabolites on various soils, Journal of agricultural and food chemistry 53: 4091 - 4095

**Berné F., Richard Y.** (1991): Water Treatment Handbook, Vol. 1 & 2, 6th Edition, Lavoisier Publishing, Paris

**Schmidt C. K.** (2005): Datenbank zum Verhalten organischer Spurenstoffe bei der Uferfiltration; DVGW-Technologiezentrum Wasser (TZW), Karlsruhe

**von Gunten U.** (2000): Bromat im Trinkwasser: Ein Problem in der Schweiz?; Gas Wasser Abwasser 10: 705 - 710

**WHO** (2004): Guidelines for drinking-water quality, Vol. 1, Recommendations. – 3rd ed.

### **Verfahren der Trinkwasseraufbereitung**

**Berné F., Richard Y.** (1991): Water Treatment Handbook, Vol. 1 & 2, 6th Edition, Lavoisier Publishing, Paris

**Bolto B. Gregory J.** (2007): Organic Polyelectrolytes in water treatment, Water Research 41: 2301 - 2324

**Botzenhard K.** (1994): Die Beherrschung mikrobiologischer Belastungen bei der Oberflächenwasseraufbereitung nach der SWTR (USA), GWF Wasser/Abwasser 135: 201 - 206

**Conradin F.** (1999): Wasserversorgungs- und Abwassertechnik, 6. Ausgabe, Band 2, Vulkan-Verlag, Essen

**Damakouka I.** (2007): Application of HACCP principles in drinking water treatment, Desalination 210: 138 - 145

## 10. Literaturverzeichnis

- Gujer W.** (2002): Siedlungswasserwirtschaft, 2. Auflage, Springer Verlag Berlin Heidelberg New York
- Jerman D.** (2006): Interplay of different NOM fouling mechanisms during ultrafiltration for drinking water production, *Water Research* 41: 1713 - 1722
- Masschelein W. J.** (1979): Chlorine Dioxide: Chemistry and Environmental Impact of Oxychlorine Compounds, Ann Arbor Science Publishers Inc, Ann Arbor, Michigan
- Pianta R., Boller M., Janex M.-L., Chappaz A., Birou B., Ponce R., Walther J.-L.** (1998): Micro- and ultrafiltration of karstic spring water, *Desalination* 117: 61 - 71
- Rosenfeldt, E.J., Linden K.G., Canonica S., von Gunten U.** (2006): Comparison of the efficiency of OH radical formation during ozonation and the advanced oxidation processes  $O_3/H_2O_2$  and  $UV/H_2O_2$ , *Water Research* 40: 3695 - 3704
- Schmidt C. K.** (2005): Datenbank zum Verhalten organischer Spurenstoffe bei der Uferfiltration; DVGW-Technologiezentrum Wasser (TZW), Karlsruhe
- Spellman F. R.** (2000): The Drinking Water Handbook, Technomic Publishing Company, Inc., Lancaster
- SUVA** (2009): Grenzwerte am Arbeitsplatz 2009; auf WHO-Internetseite erhältlich
- Uhl W.** (2000): Simultane biotische und abiotische Prozesse in Aktivkohlefiltern der Trinkwasseraufbereitung; TU-Berlin Universitätsbibliothek, Berlin
- von Gunten U.** (2003): Ozonation of drinking water: Part I. Oxidation kinetics and product formation, *Water Research* 37: 1443 - 1467
- Wang G.-S. et al.** (2007): Cancer risk assessment from trihalomethanes in drinking water, *Science of the Total Environment* 387: 86 - 95
- WHO** (2004): Guidelines for drinking-water quality, Vol. 1, Recommendations. 3rd ed.

### Überwachungsmethoden

- Damikouka I., Katsiri A., Tzia C.** (2007): Application of HACCP principles in drinking water treatment, *Desalination* 210: 138 - 145
- Lumpp R.** (1993): Entwicklung eines optisch-chemischen Sensors zur kontinuierlichen Nitratbestimmung in Trink- und Grundwasser, Dissertation, Kernforschungszentrum Karlsruhe GmbH, Karlsruhe
- Meissner H.** (1955): Über die Chlorbestimmung im Wasserwerksbetrieb und die Eichmethode zur Bestimmung kleiner Chlormengen auf elektrometrischem Wege, Dissertation, TH Karlsruhe, Karlsruhe

**Roeske W.** (1999): Betriebsmessgeräte zur Kontrolle der Wassergüte, Teil 1, bbr Wasser und Rohrbau 12/1999

**Roeske W.** (2000): Betriebsmessgeräte zur Kontrolle der Wassergüte, Teil 2, bbr Wasser und Rohrbau 1/2000

**Schoenen D.** (1996): Die hygienisch-mikrobiologische Beurteilung von Trinkwasser, GWF Wasser/Abwasser 137: 72 - 82

**Snozzi M.** (1999): Prüfung und Zertifizierung von UV-Anlagen, Gas Wasser Abwasser, 5/99

**SVGW** (2005): W1 Richtlinie für die Qualitätsüberwachung in der Trinkwasserversorgung, Schweizerischer Verein des Gas- und Wasserfaches, Zürich

### **Kriterien für die Einführung neuer Stoffe und Verfahren**

**DVGW** (2007): Geschäftsordnung zur DVGW-Zertifizierung von Produkten

**Snozzi M.** (1999): Prüfung und Zertifizierung von UV-Anlagen, Gas Wasser Abwasser, 5/99

**SVGW** (2005): W1 Richtlinie für die Qualitätsüberwachung in der Trinkwasserversorgung, Schweizerischer Verein des Gas- und Wasserfaches, Zürich



# 11. Hinweis

## **Rechtlicher Stellenwert dieser Publikation**

Diese Publikation ist eine Vollzugshilfe des BAG als Aufsichtsbehörde für das Trinkwasser. Sie richtet sich in erster Linie an Wasserversorgungen, beratende Ingenieur Büros und die Kantone und konkretisiert insbesondere den Art. 6 der Trinkwasserordnung. Die Anwendung der Vollzugshilfe trägt zu einem hohen Mass an Rechtsgleichheit und Rechtssicherheit bei. Benutzen die Vollzugsbehörden diese Vollzugshilfe, können sie davon ausgehen, dass sie das Bundesrecht rechtskonform vollziehen.



## Impressum

© Bundesamt für Gesundheit (BAG)  
Herausgeber: Bundesamt für Gesundheit  
Publikationszeitpunkt: August 2010

Weitere Informationen:  
BAG, Verbraucherschutz, Abteilung Lebensmittelsicherheit, 3003 Bern  
Telefon +41 (0)31 323 31 05, Telefax +41 (0)31 322 95 74  
E-Mail: pierre.studer@bag.admin.ch, www.bag.admin.ch

Diese Publikation erscheint in deutscher, französischer und italienischer Sprache

Projektleitung: Adrian Auckenthaler, BAG; Urs von Gunten, EAWAG  
Projektbearbeitung: Matthias Sturzenegger, EAWAG unter Einbeziehung von Markus Boller,  
Thomas Egli, Wouter Pronk, Pierre Studer

Layout: Silversign, visuelle Kommunikation, Bern  
Illustration: Silversign, visuelle Kommunikation, Bern  
Fotos: Fotolia

BAG-Publikationsnummer: VS 08.10 1200 d 400 f 100i 40EXT1011

Vertrieb:  
BBL, Vertrieb Bundespublikationen, CH-3003 Bern  
www.bundespublikationen.admin.ch  
Bestellnummer: 311.150.d

Gedruckt auf chlorfrei gebleichtem Papier