

EIN ALLTÄGLICHES GUT

URS VON GUNTEN

Trinkwasser in guter Qualität ist in der Schweiz eine Selbstverständlichkeit. Dass Leitungswasser ohne Bedenken getrunken und sogar genossen werden kann, ist schon in Nachbarländern nicht immer garantiert. Ein Blick auf ein alltägliches Wunder und wie es zustande kommt.

Die Schweiz ist das Wasserschloss Europas. Obwohl sie nur 0,4% der europäischen Fläche ausmacht, lagern hier 6% der europäischen Süßwasserreserven.

Die Schweiz als Wasserschloss Europas verfügt über grössere Mengen an Wasser, die in natürlichen Reservoiren gespeichert sind (ca. 270 km³). Diese natürlichen Reservoire (Seen, Grundwasservorkommen, Gletscher) werden durch etwa ein Drittel der rund 60 km³ Niederschläge/Jahr stetig erneuert und garantieren eine kontinuierliche Versorgung der Schweiz mit gutem Trinkwasser. Der Verbrauch von Trinkwasser durch Haushalte, Industrie, Gewerbe und Landwirtschaft beläuft sich in der Schweiz auf ca. 1 km³/Jahr, was ungefähr einem Drittel des Volumens des Zürichsees entspricht. Dieser grobe Vergleich der umgesetzten Wassermengen zeigt deutlich auf, dass in der Schweiz nur ein kleiner Anteil der verfügbaren Wassermenge (1 von 20 km³) als Trink- und Brauchwasser genutzt wird. In der kleinräumigen Struktur der etwa 3000 Wasserversorgungen in der Schweiz kann es lokal und zeitlich begrenzt vor allem bei kleineren Quellen trotzdem zu einer Verknappung von Trinkwasser kommen, falls über längere Zeit trockene Witterung vorherrscht.

In der Schweiz werden etwa 80% des Trinkwassers aus Grund- und Quellwasser und ca. 20% aus Seewasser gewonnen. Obwohl mengenmässig weniger bedeutend, kann Seewasser in grösseren Agglomerationen eine wichtige Rolle als Wasserressource spielen. So wird in Zürich 70% des Trinkwasserbedarfs mit Seewasser gedeckt.

Gemäss den obigen Zahlen über die Wasserbilanzen spielt die Frage der Verfügbarkeit von Trinkwasser in der Schweiz eine nur untergeordnete Rolle. Hingegen wird die Qualität des Trinkwassers in verschiedenen Bereichen durch natürliche und anthropogene Prozesse beeinflusst. Diese sind in Abbildung 1 schematisch dargestellt.

Natürliche Wasserinhaltsstoffe

Die Konzentrationen der wichtigsten Wasserinhaltsstoffe in Wasserressourcen werden durch biogeochemische Prozesse reguliert. Der mikrobielle Abbau von biogenen Substanzen im Boden und im Wasser führt zum Teil zu löslichem natürlichem organischem Material (NOM), welches auf verschiedenen Ebenen wichtig ist für die Wasserqualität. Einerseits führt ein erhöhter Gehalt an NOM zu biologisch instabilem Wasser, d. h. unerwünschtem Bakterienwachstum in verschiedenen Bereichen der Wasserversorgung. Andererseits erzeugt das NOM bei Aufbereitungsprozessen eine Reihe von Nebeneffekten (Verminderung der Effizienz der Oxidation und Desinfek-

tion, organische Oxidationsnebenprodukte, Fouling von Membranen, usw.). In den Wasserressourcen wird beim mikrobiellen Abbau von natürlichem organischem Material (NOM) mit Sauerstoff Kohlensäure gebildet. Diese löst Mineralien, insbesondere Kalk und Dolomit, auf, was zu einer sogenannten Aufhärtung und Mineralisation des Trinkwassers führt und dessen pH-Wert bestimmt. Die Härte des Wassers ist beim Kochen und Waschen von Bedeutung und trägt wesentlich zur Verkalkung von Hausinstallationen bei, ist aber aus toxikologischer Sicht unbedenklich.

Neben diesen primären Wasserinhaltsstoffen mit relativ hohen Konzentrationen können durch biogeochemische Prozesse auch eine Reihe von unerwünschten Spurenstoffen freigesetzt werden. Die aus der Sicht der Wasserversorgung wichtigsten Stoffe sind in den Oberflächengewässern bakterienbürtige Geschmacks- und Geruchsstoffe und Cyanotoxine. In reduzierten Grundwässern sind es gelöstes Eisen, Mangan und lokal begrenzt Arsen. Geschmacks- und Geruchsstoffe sind für Wasserversorgungen besonders kritisch, da diese Stoffe von KonsumentInnen wahrgenommen werden können. Einige Substanzen (z. B. Geosmin, Methylisoborneol) sind in sehr tiefen Konzentrationen von nur 10 ng/l wahrnehmbar. Eine relativ kleine Menge von nur 30 kg, verteilt im ganzen Zürichsee, würde also für eine geschmacklich/geruchliche Beeinträchtigung des Trinkwassers bereits ausreichen.

Gesetzgebung Kriterium	Gewässerschutz Ökosystem		Lebensmittelgesetz Humantoxikologie	
Natürliche Prozesse	Mineralisation Gehalt an NOM Geschmack/ Geruch	Adsorption Sedimentation chem., biolog. Transformation		Korrosion Aufkeimung
	Wasserressourcen	Selbstreinigung	Aufbereitung	Speicherung Verteilung Haushalt
Anthropogene Beeinflussung	Industrie/ Gewebe, Land- wirtschaft Siedlungen, Verkehr		Hilfsstoffe Oxidations-/ Desinfektions- nebenprodukte	Oxidations-/ Desinfektions- nebenprodukte

Abb. 1: Die wichtigsten Bereiche der Wasserversorgung und mögliche Beeinträchtigungen durch natürliche und anthropogene Prozesse. Ein System von mehreren Barrieren (Gewässerschutz, Selbstreinigung, Aufbereitung) garantiert eine gute Qualität des Trinkwassers. Die Gesetzgebung umfasst das Gewässerschutzgesetz (Wasserressourcen) und das Lebensmittelgesetz (ab Fassung des Wassers). NOM: natürliches organisches Material.

Probleme in Grundwässern treten meist im Zusammenhang mit einer vollständigen Zehrung des Sauerstoffs durch mikrobielle Prozesse auf. Diese Situation bildet in Grundwässern in der Schweiz eher die Ausnahme, ist aber weltweit von grosser Bedeutung. Grosse Mengen an verfügbarem NOM können dazu führen, dass nicht nur Sauerstoff als Elektronenakzeptor vollständig aufgebraucht wird, sondern dass die Mikroorganismen auch andere Elektronenakzeptoren wie Nitrat und schliesslich feste Mangan- und Eisenoxide nutzen. Dabei werden Eisen und Mangan in ihrer leicht löslichen zweiwertigen Form ins Wasser abgegeben. Wird solches Wasser verteilt, kommt es beim Kontakt mit dem Luftsauerstoff zu Ausfällungen von Eisen- und Manganoxiden (braun-schwarz). Obwohl diese Ausfällungen nicht toxisch sind, müssen sie aus vorwiegend ästhetischen und geschmacklichen Gründen vor der Einspeisung ins Verteilnetz abgetrennt werden. In gewissen Grundwassersystemen wird mit der reduktiven Auflösung von Eisenoxiden auch das kanzerogene Arsen freigesetzt. Arsen im Trinkwasser ist in der Schweiz generell kein Problem, jedoch wird es möglicherweise weltweit zu einem der grössten chemischen Trinkwasserprobleme mit bis jetzt mehr als 100 Mio. Betroffenen. Die grösste Kontamination liegt in Bangladesch vor, wo alleine etwa 50 Mio. Menschen darunter leiden. Um dieses enorme Problem zu lösen, müssen angepasste Technologien für die Wasseraufbereitung in Entwicklungsländern bereitgestellt werden.



In der Schweiz verbrauchen wir 160–180 Liter Wasser pro Kopf und Tag, also die 3- bis 4-fache Menge des Grundbedarfs an Wasser.

Anthropogene Einflüsse

Die Quellen von anthropogenen Kontaminationen sind vielfältig und in Abbildung 1 zusammengefasst. Im Wesentlichen können drei Arten von Kontaminationen unterschieden werden:

- Nährstoffe (Phosphor, Stickstoff): Beeinflussung der biogeochemischen Prozesse in den Wasserressourcen
- Spurenverunreinigungen (Pestizide, Löse-mittel, Benzin(additive), Pharmazeutika, endokrine Substanzen usw.): chronische Toxizität
- Pathogene Keime: akute Toxizität

Nährstoffe

Der Eintrag von grösseren Mengen an Phosphat in die Gewässer führte zu einem übermässigen Algenwachstum in Schweizer Seen (Eutrophierung). Für die Gewinnung von Trinkwasser hatte das zur Folge, dass das Wasser mit einem hohen Gehalt an gelöstem und partikulärem NOM und mit grossen Geschmacks- und Geruchsproblemen belastet war. Dank den grossen Anstrengungen im Gewässerschutz (Phosphatelimination in Kläranlagen, Phosphatverbot in Textilwaschmitteln) konnte dieses Problem in der Schweiz grösstenteils behoben werden.

Der übermässige Eintrag von Stickstoff aus der Landwirtschaft führt im Grundwasser häufig zu einem erhöhten Nitratgehalt und ist aus ökologischer Sicht unerwünscht. Humantoxikologische Bedenken (Methämoglobinämie bei Säuglingen, endogene Bil-

dung von Nitrosaminen) spielen aufgrund von neueren Studien eher eine untergeordnete Rolle. Aufgrund des Vorsorgeprinzips wurde die Höchstkonzentration für Nitrat so festgelegt, dass die Konsumation über das Trinkwasser in der Regel wesentlich kleiner ist als die Nitrataufnahme über die anderen Nahrungsmittel.

Persistente organische Chemikalien

Beim Eintrag von (persistenten) organischen Chemikalien in die Gewässer wird zwischen diffusem Eintrag (z. B. Verkehr, Landwirtschaft) und Punktquellen (z. B. Ablauf von Kläranlagen, Leckagen von unterirdischen Tanks, Altlasten) unterschieden. Die wichtigsten gefundenen Verbindungsklassen sind bereits oben erwähnt. Während bei «klassischen» Chemikalien, wie etwa chlorierten Kohlenwasserstoffen, die kanzerogene Wirkung im Vordergrund stand, geht es bei neueren Chemikalien (endokrine Substanzen, Pharmazeutika) um die Fertilität und Resistenzbildungen.

Mikrobielle Verunreinigungen

Die Bereitstellung von hygienisch einwandfreiem Wasser ist weltweit das grösste Trinkwasserproblem. Jährlich sterben etwa 2,5 Mio. Menschen, zumeist Kinder, an mikrobiologisch verunreinigtem Trinkwasser. Mikrobiologische Kontaminationen gelangen vor allem über ungereinigte Abwässer und durch die Landwirtschaft (Jauche, Weiden) ins Grundwasser. Zur Beurteilung einer möglichen mikrobiellen Kontamination werden die Rohwässer auf Fäkalkeime

(aerobe mesophile Keime, *E. coli*, Enterokokken) untersucht. Diese dienen als Indikatoren für eine mögliche Anwesenheit von pathogenen Keimen.

Selbstreinigungsprozesse

Wasserinhaltsstoffe wie gelöste Stoffe und Partikel werden natürlicherweise aus Oberflächengewässern und im Grundwasser entfernt. Die Selbstreinigung kann in folgende Prozesse unterteilt werden:

Mikrobiell: Umwandlung von organischen und anorganischen Stoffen.

Chemisch: Auflösungs- und Fällungsprozesse, Sorption und Desorption, Umwandlung von organischen und anorganischen Stoffen.

Physikalisch: Verdünnung, Sedimentation, Filtration und Ausgasung.

Dank dem Schutz von Wasserressourcen kombiniert mit Selbstreinigungsprozessen kann etwa ein Drittel des Trinkwassers in der Schweiz aus Grund- und Quellwasser ohne Aufbereitung gewonnen werden.

Komplexe Wasseraufbereitung

Für rund ein Drittel des Trinkwassers in der Schweiz ist trotz Schutz der Wasserressourcen und Selbstreinigungsprozessen eine Desinfektion nötig. Diese erfolgt in der Regel chemisch (Zugabe von Chlor) oder physikalisch (Bestrahlung mit UV-Licht). Das verbleibende Drittel des Trinkwassers wird



Abb. 2: Desinfektion und Oxidation sind die wichtigsten Ziele der Anwendung von Ozon. Beide Prozesse werden von der Bildung unerwünschter Nebenprodukte begleitet.

über eine mehrstufige Aufbereitung gewonnen. Dazu stehen je nach Qualität der Wasserressourcen eine Reihe von Einheitsverfahren zur Verfügung: Flockung, Sedimentation, Filtration (Sand-Membranen), Desinfektion (chemisch [Ozon, Chlor, Chlordioxid], physikalisch [UV]), Oxidation (Ozon, Hydroxylradikale [OH-Radikale], Permanganat). Je nach Rohwasserqualität müssen diese Verfahren zu einer Verfahrenskette kombiniert werden. Seewasser in Zürich wird z. B. nach folgendem Verfahren aufbereitet: Vorozonung – Schnellfiltration – Zwischenozonung – Aktivkohlefiltration – Langsandsfiltration. Dieses Verfahren erzeugt ein chemisch (nicht korrosiv, keine Ausfällungen von Mineralien) und biologisch (keine Aufkeimung) sehr stabiles Wasser, das ohne weiteren Zusatz von Chlor im Leitungsnetz verteilt werden kann. In vielen Wasserversorgungen wird das Wasser nach Verlassen des Wasserwerks mit et-

was Chlor oder Chlordioxid versetzt, um eine mögliche Aufkeimung bis zu den Haushaltungen zu verhindern.

Wasseraufbereitung mit Ozon

Ozon (O_3) wird als Oxidations- und Desinfektionsmittel zur Aufbereitung von Seewasser in der Schweiz seit den Siebzigerjahren eingesetzt. Ozon ist im Wasser nicht stabil und wird relativ rasch in OH-Radikale umgewandelt, welche die stärksten Oxidationsmittel im Wasser sind. Die erwünschten und unerwünschten Effekte der bei der Ozonung auftretenden Oxidationsmittel sind in Abbildung 2 zusammengefasst. Durch den Prozess der Umwandlung von Ozon in OH-Radikale geht ein grosser Teil der Oxidationskraft des eingetragenen Ozons verloren, da OH-Radikale mit fast allen Komponenten der Wassermatrix weg-

reagieren. Um Ozonungsprozesse zu charakterisieren, müssen einerseits die Kinetik der Reaktion von unerwünschten Verbindungen mit diesen beiden Oxidantien und andererseits quantitative Informationen über die Konzentration von Ozon und OH-Radikalen verfügbar sein. Während die Kinetik der Oxidation von Stoffen mit Ozon und OH-Radikalen eine spezifische Stoffkonstante ist, muss der Konzentrationsverlauf des Abbaus von Ozon und OH-Radikalen für jedes Wasser bestimmt werden. Dies erfordert in der Regel eine etwa einstündige Messung im Labor, bei der die Ozonabnahme und die Abnahme von OH-Radikalen gleichzeitig gemessen werden. Die Konzentration der OH-Radikale ist in diesen Systemen sehr klein ($< 10 \text{ pg/l}$), weshalb sie nur indirekt, über ihre Reaktion mit einem ozonresistenten Tracer, gemessen werden können. Die so gewonnene Information kann dann auf Grossanlagen übertragen werden, indem die oxidativen chemischen Prozesse mit einem hydraulischen Modell des entsprechenden realen Reaktors gekoppelt werden (siehe Abb. 3). In Zusammenarbeit mit der Wasserversorgung Zürich simulierte die EAWAG den Abbau von organischen Spurenstoffen für die Vorozonung des Seewasserwerks Lengg. Das Modell wurde anhand der im Reaktor gemessenen Abnahme von Atrazin, einem Pflanzenschutzmittel, geeicht. Atrazin kommt im Zürichseewasser nur in sehr geringen Konzentrationen von 5 ng/l vor, etwa ein Faktor 20 unterhalb des schweizerischen Toleranzwertes von 100 ng/l . Abbildung 3 zeigt die

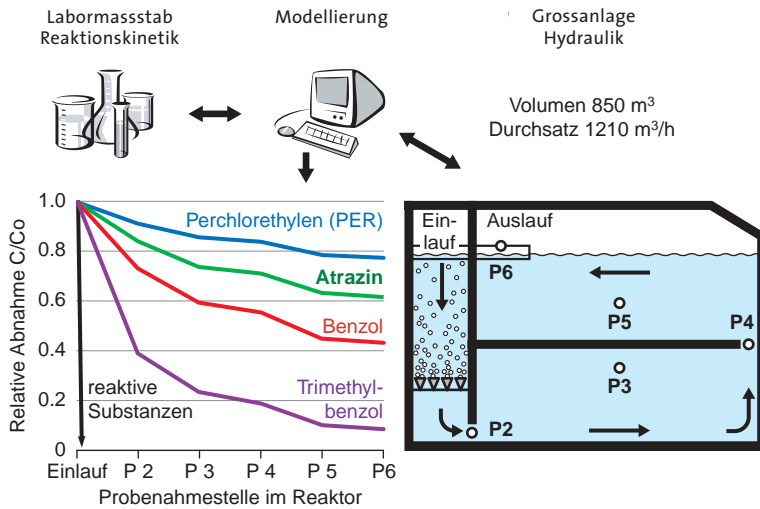


Abb. 3: Beurteilung der Abbauleistung für potenzielle organische Spurenstoffe in der Vorozonung des Seewasserwerks Lengg, Zürich 1. Messung von kinetischen Parametern im Labor, 2. Approximation der Hydraulik des Reaktors im Wasserwerk und 3. Kombination von Hydraulik mit Chemie durch Modellierung. Die Modellrechnungen zeigen, dass einige potenzielle Gefahrenstoffe bereits nach einem kurzen Kontakt mit Ozon praktisch vollständig abgebaut sind, während andere nur zum Teil oxidiert werden können. Reaktive Substanzen: Nitrit, Phenol, Microcystin, 17 α -Ethinylestradiol, Sulfamethoxazol.

relative Abnahme von verschiedenen unerwünschten Spurenstoffen für die Vorozonungsstufe des Seewasserwerks Lengg. Diese Berechnungen werden von der Wasserversorgung Zürich genutzt, um die Elimination von potenziellen Gefahrenstoffen während der Trinkwasseraufbereitung abzuschätzen. Abbildung 3 zeigt deutlich, dass gewisse Substanzen durch die Ozonung sehr effizient umgewandelt werden, während andere nur teilweise oxidiert werden können. Für diese Spurenstoffe sind andere Eliminationsverfahren, wie z. B. Adsorption an Aktivkohle, besser geeignet. Um die Effizienz der Desinfektion abzuschätzen, können für die Inaktivierung von Mikroorganismen analoge Überlegungen angestellt werden. Hier zeigt es sich, dass Bakterien und Viren besonders gut abgetötet werden, während Protozoen und Sporen von Bakterien wesentlich resistenter sind. Insbesondere für Protozoen hat sich gezeigt, dass eine kurzzeitige Bestrahlung mit ultraviolettem Licht zu ausgezeichneten Resultaten führt.

Die erwünschten Effekte der Ozonung werden immer begleitet durch die Bildung von Nebenprodukten, welche aus der Reaktion von Ozon und OH-Radikalen mit Komponenten der Wassermatrix entstehen. Mit Ausnahme von einem Produkt handelt es sich dabei um niedermolekulare organische Verbindungen, die in einer nachgeschalteten biologischen Filtration grösstenteils mineralisiert werden. Das einzige anorganische Nebenprodukt, das Bromat, wurde als potenziell kanzerogen eingestuft, weshalb für Bromat seit 1998 in der Fremd- und Inhaltsstoffverordnung ein Toleranzwert von

10 mg/l festgelegt ist. Bromat wird ausgehend von Bromid über einen mehrstufigen komplizierten Oxidationsprozess mit Ozon und OH-Radikalen gebildet. In der Schweiz ist die Bromatbildung kein grosses Problem, da die Bromidgehalte in unseren Wasserressourcen mit 10–20 mg/l sehr tief sind. In Wasserressourcen mit Bromidkonzentrationen von > 50 mg/l ist bei Ozonungsprozessen mit erhöhten Bromatwerten zu rechnen. Ist Bromat einmal gebildet, kann es kaum mehr aus dem Wasser entfernt werden. Detaillierte mechanistische Kenntnisse über die Bildung von Bromat erlaubten es uns, Methoden zu dessen Verminderung während der Ozonung zu entwickeln. Durch Absenken des pH-Wertes oder Zugabe von Ammonium lässt sich die Bromatbildung je etwa halbieren. Eine kurze Vorchlorung, gefolgt von Zugabe von Ammonium, lässt die Bromatbildung sogar auf etwa 25% der ursprünglich gebildeten Menge reduzieren.

Leitungsnetz – Kapitalanlage der Wasserversorgungen

Die Wasserqualität kann auf dem Weg von der Wasserversorgung zu den KonsumentInnen nochmals durch eine Reihe von chemischen und mikrobiellen Prozessen beeinträchtigt werden. Verkeimung des Leitungsnetzes, Korrosion, Bildung von Desinfektionsnebenprodukten und Veränderung des Geschmacks und Geruchs sind nur einige der Möglichkeiten. Um diese Effekte zu vermeiden, ist es unumgänglich, dass das Wasser vor der Verteilung sowohl biologisch als

auch chemisch stabil ist. Somit kann die Dosierung von Chlor oder Chlordioxid als Netzschutz auf ein Minimum reduziert oder sogar ganz darauf verzichtet werden. Neben der Wasserqualität ab Wasserwerk spielt auch der Zustand der Rohrleitungen eine wichtige Rolle. Bei Leckagen und ungenügendem Druck in den Leitungen kann es zur Infiltration von verschmutztem Grundwasser kommen. Deshalb ist der Unterhalt von Trinkwasserleitungen sehr wichtig, aber äusserst kapitalintensiv. In der Stadt Zürich besteht ein Leitungsnetz von ca. 1100 km Hauptleitungen und über 400 km Hauszuleitungen. Im Jahr 2001 waren 626 Rohrschäden zu verzeichnen, die Kosten von rund 8 Mio. Fr. verursachten. Die Kosten für die Verteilung (Pumpwerke, Reservoirs, Transportleitungen, Verteilernetz inkl. der Hauszuleitungen) belaufen sich auf etwa 70% der gesamten Kosten der Wasserproduktion.

Weitere Informationen

www.eawag.ch/research/w+t/TW/index.html
www.eawag.ch/news/trinkwasser/
www.trinkwasser.ch
www.wvz.ch

Dr. Urs von Gunten

Leiter der Abteilung Wasserressourcen und Trinkwasser an der Eawag und Dozent an der ETH Zürich