



Urs von Gunten von der Abteilung Wasserressourcen und Trinkwasser leitet das Kompetenzzentrum Trinkwasser der Eawag und das Labor für Wasserqualität und Wasserbehandlung der ETH Lausanne.
urs.vongunten@eawag.ch

Trinkwasser aus Uferfiltrat, noch gut genug?

Wasser aus der Uferfiltration wird in der Schweiz in der Regel ohne weitere Aufbereitung als Trinkwasser verwendet. Spurenstoffe, Klimaveränderungen oder Revitalisierungen können dessen Qualität aber beeinträchtigen. Trotzdem scheint sich dieses System auch in Zukunft zu bewähren – nicht zuletzt wegen eines griffigen Gewässerschutzes.

Das Trinkwasser ist Teil des urbanen Wasserkreislaufs (Abb. 1). Die Schweiz gewinnt es aus verschiedenen Ressourcen, zum Beispiel aus Grundwasser, Quellen oder Seen. Anthropogene Aktivitäten, etwa die Landwirtschaft, die Siedlungsentwässerung, der Verkehr oder die Industrie, sowie vom Menschen induzierte natürliche Prozesse wie die Eutrophierung von Seen können die Qualität dieser Ressourcen beeinträchtigen. In der Schweiz ist die Rohwasserqualität dank dem griffigen Gewässerschutz in der Regel so gut, dass etwa ein Drittel des gewonnenen Wassers nicht weiter aufbereitet, sondern direkt als Trinkwasser verwendet werden kann. Verbrauchtes Trinkwasser gelangt aus Haushaltungen als Abwasser in die Kläranlagen und gereinigt von dort zurück in die Flüsse.

Durch die Uferfiltration gelangt dieses Wasser meist beträchtlich verdünnt wieder ins Trinkwasser. Der Anteil des uferfiltrierten Trinkwassers beträgt in der Schweiz zirka 25 Prozent [1, 2]. Die Uferfiltration ist meist die einzige Barriere zwischen Fluss- und Trinkwasser. Sie stellt deshalb eine entscheidende Aufbereitungsstufe dar, die vor allem Mikroorganismen entfernt. Gemäss Gewässerschutzverordnung muss sich das Wasser mindestens zehn Tage im Untergrund aufhalten, um als Trinkwasser eine hygienisch einwandfreie Qualität aufzuweisen [3]. Eine nachgeschaltete Desinfektion, beispielsweise mit UV-Licht, bietet zusätzliche Sicherheit.

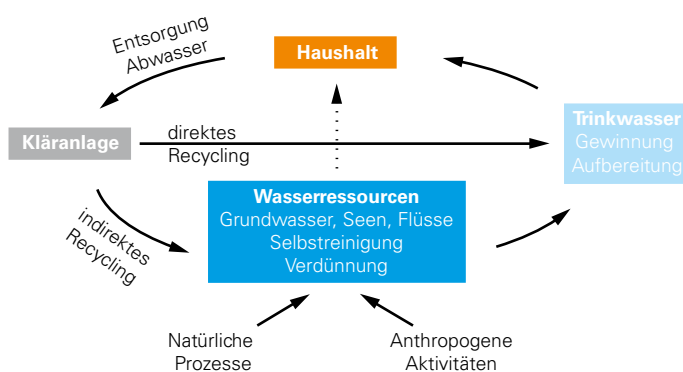


Abb. 1: Die Trinkwassergewinnung im urbanen Wasserkreislauf.

Uferfiltration unter Druck?

In dem 2003 veröffentlichten Buch «Riverbank Filtration – Improving Source-Water Quality» beschreiben die Autoren die Vorzüge der Uferfiltration wie folgt:

«Uferfiltration aus Flüssen ist eine preiswerte und effiziente alternative Wasserbehandlungsmethode für Trinkwasser» [4].

Da primär Hygieneparameter die vorgeschriebene Aufenthaltszeit des Wassers in der Uferinfiltrationszone bestimmen, eignet sich das System jedoch nur bedingt, um Spurenstoffe aus Kläranlagen oder der Landwirtschaft zu eliminieren. So werden gewisse Mikroverunreinigungen in dieser Zone gut abgebaut, andere gelangen bis in die Wasserfassung (siehe S. 12). Der Klimawandel könnte die Effizienz dieser «Wasserbehandlungsmethode» in Zukunft beeinträchtigen. Die im Sommer für die Flüsse vorhergesagten geringeren Abflüsse und höheren Temperaturen können dazu führen, dass in der Uferfiltrationszone der Sauerstoff ausgeht und Mangan und Eisen freigesetzt werden (siehe S. 16). Aufgrund des Klimawandels häufiger auftretende Überschwemmungen können vermehrt Hygieneprobleme verursachen. Auch Revitalisierungen bergen im Zusammenhang mit der Trinkwassergewinnung aus Uferfiltrat viel Konfliktpotenzial (siehe S. 4, 20 und 24). Abbildung 2 fasst die wichtigsten anthropogenen oder anthropogen getriebenen Einflussfaktoren auf die Uferfiltration zusammen. Sie stehen alle unter Verdacht, die Wasserqualität im Fluss oder in der Infiltrationszone direkt oder indirekt zu beeinträchtigen. Dass Uferfiltrationssysteme stark in den natürlichen Wasserkreislauf eingebunden sind, limitiert oftmals die Interventionsmöglichkeiten.

Der Klimawandel und seine Folgen

Samuel Diem (S. 16) geht detailliert auf mögliche Auswirkungen des Klimawandels auf die Wasserqualität bei der Uferfiltration ein. Unter typischen Sommerbedingungen konnte er in einer Infiltrationszone eine vollständige Sauerstoffzehrung beobachten. Dafür verantwortlich ist in erster Linie das partikuläre organische Material (POC) [1, 2, 5]. Fehlt der Sauerstoff, fungiert unter den heutigen Bedingungen Nitrat als Redoxpuffer. Dieses verhindert eine reduktive Auflösung von Mangan- und Eisenoxiden. Verän-

Anthropogene Aktivitäten

- Klimawandel
- Siedlungswasserwirtschaft
- Landwirtschaft
- Verkehr
- Industrie
- Revitalisierung

Uferfiltration



Trinkwasser

Wasserqualität

- Hygiene
- Mikroverunreinigungen

Abb. 2: Verschiedene anthropogene oder anthropogen getriebene Faktoren beeinflussen die Qualität des aus Uferfiltrat gewonnenen Trinkwassers.

derte Klimabedingungen könnten in Zukunft dafür sorgen, dass auch das Nitrat vermehrt aufgebraucht wird und sich Mangan und Eisen im Wasser lösen. Ausfällungen der Metalle würden die Infrastruktur und die Wasserqualität beeinträchtigen und eine zusätzliche Aufbereitung erfordern. Führen die Flüsse wenig Wasser, wird das eingeleitete Abwasser weniger verdünnt. Spurenstoffe und Mikroorganismen treten in höheren Konzentrationen auf. Werden sie bei der Uferfiltration nicht ausreichend entfernt, braucht es ebenfalls eine Aufbereitung. Hochwasser verkürzen die Aufenthaltszeiten in der Infiltrationszone, so dass es zu einer Flutung der Fassungen kommen kann. Das ist oft mit Hygieneproblemen verbunden.

Verschiedene Quellen von Mikroverunreinigungen

Die Einleitung von gereinigtem Abwasser in die Fließgewässer trägt wesentlich zur Belastung der aquatischen Umwelt mit Spurenstoffen bei. Die eingeleiteten Substanzen sind häufig polar, sehr mobil (die anderen adsorbieren am Klärschlamm) und zum Teil persistent. Untersuchungen zeigen, dass Uferfiltrationssysteme eine breite Palette von Spurenstoffen abbauen können (Tab. 1). Dabei spielt das jeweilige Redoxmilieu eine wichtige Rolle [6]. Die meisten Stoffe werden aerob besser abgebaut. Allerdings gibt es auch Substanzen, zum Beispiel iodierete Röntgenkontrastmittel, Sulfamethoxazol oder Carbamazepin, die sich unter anaeroben Bedingungen wesentlich besser biologisch eliminieren lassen. Mit dem geplanten Ausbau der Kläranlagen zur weiter gehenden Elimination von Spurenstoffen will die Schweiz die Fracht aus dem Abwasser um zirka 50 Prozent vermindern. Dies wird sich positiv auf die Qualität des Trinkwassers nach der Uferfiltration auswirken. Denn die beiden zurzeit im Vordergrund stehenden Verfahren (Ozonung und Behandlung mit Pulveraktivkohle) entfernen einige kritische persistente Substanzen wie etwa Sulfamethoxazol oder Carb-

amazepin gut bis sehr gut (Tab. 1) [7]. Eine umfangreiche Studie hat kürzlich aufgezeigt, wie stark polare Pflanzenschutzmittel und Biozide fünf mittelgrosse Schweizer Flüsse belasten. Insgesamt wurden 104 verschiedene Pestizide (hauptsächlich Pflanzenschutzmittel) nachgewiesen. Die Konzentrationssumme betrug in 78 Prozent der Proben mehr als 1000 Nanogramm pro Liter [8]. Der grösste Anteil der Pestizide stammt häufig aus der Landwirtschaft. Siedlungen können jedoch signifikant zur Fracht beitragen. Die Bedeutung dieses Befunds für die von Uferfiltration gespeisten Trinkwassersysteme ist im Moment noch unklar, da keine systematischen Untersuchungen dazu vorliegen.

Industrielle Betriebe, die ihr Abwasser direkt in die Fließgewässer abgeben, müssen dieses vor Ort aufbereiten. Die Industrie hat in diesem Bereich in den letzten Jahrzehnten grosse Fortschritte durch entsprechende Aufbereitungsmassnahmen (end of pipe mit Aktivkohle und weiter gehender Oxidation) und geschlossene Wasserkreisläufe erzielt [9]. Während Revitalisierungen kann es zur Entfernung der Feinsedimente kommen, wodurch sich die Durchlässigkeit der Flusssohle erhöht. Das verschlechtert die Filterleistung und kann Hygieneprobleme nach sich ziehen. Diese Phänomene beschränken sich aber auf die Bauphase, da die Feinsedimente danach wieder aufgeschüttet werden.

Nach der Revitalisierung hat das Fließgewässer mehr Raum. Das kann dazu führen, dass die minimale Aufenthaltszeit von zehn Tagen in der Infiltrationszone nicht mehr zu jeder Zeit garantiert ist. Die Verlegung einer Wasserfassung ist sehr aufwändig und entsprechend teuer. Deshalb ist es in vielen Fällen einfacher, eine UV-Desinfektion oder einen anderen Schritt zur Hygienisierung des Wassers anzufügen.

Tab 1; Abgeschätzte Elimination in Prozent von ausgewählten Spurenstoffen für die Uferfiltration und typische Verfahren der Trinkwasseraufbereitung (aus verschiedenen Quellen zusammengetragen).

Spurenstoffe	Aerobe Uferfiltration	UV-Strahlung kombiniert mit Wasserstoffperoxid	Ozonung (5000 J/m ²)	Pulveraktivkohle (1 mg O ₃ pro mg DOC)	Nanofiltration (10 mg/l/30 min)
Sulfamethoxazol	< 30	> 90	> 90	> 50	> 95
Carbamazepin	< 10	> 90	> 90	> 85	> 90
Diclofenac	> 90	> 90	> 90	> 65	> 90
1H-Benzotriazol	< 20	> 90	> 80	> 85	20 bis 40
Iopromid	< 40	> 70	> 40	> 35	> 98

Uferfiltration als Teil eines Multi-Barrier-Systems

Unter den verschiedenen Möglichkeiten zur Aufbereitung von Flusswasser zu Trinkwasser (Abb. 3) präsentiert sich die Uferfiltration als effizientes Verfahren. Allerdings braucht es je nach Wasserqualität weitere nachgeschaltete Aufbereitungsstufen. Als einzige Aufbereitungsstufe funktioniert die Uferfiltration nur bei einem umfangreichen Gewässerschutz (Einleitungsbestimmungen für gereinigtes Abwasser, ökologische Massnahmen in der Landwirtschaft etc.). Solche Vorschriften stellen dabei wirksame Massnahmen an der Quelle dar. Als weitere Möglichkeit kann Flusswasser wie bei der künstlichen Grundwasseranreicherung (siehe S. 26) nach einer vorgeschalteten Abtrennung von Partikeln (Flockung, Filtration) infiltriert werden. Will man Flusswasser direkt als Wasserressource nutzen, erfolgt die Aufbereitung meist über ein mehrstufiges Verfahren, allenfalls verbunden mit einer nachgeschalteten Grundwasseranreicherung (Abb. 3) [11]. Ohne Bodenpassage lassen sich die Vorteile der Uferfiltration, zum Beispiel das Herausfiltern des gelösten organischen Materials, jedoch nicht nutzen. Das verschlechtert die Effizienz der physikalischen und chemischen Aufbereitungsverfahren.

Gute Elimination von Mikroorganismen

Was vermag die Uferfiltration ohne und mit nachgeschalteten Prozessen zu leisten? Gegen Viren, Bakterien und Sporen stellt die Uferfiltrationszone eine gute Barriere dar (Tab. 2). Die in Tabelle 2 dargestellten Daten für Aufenthaltszeiten von 15 Tagen entsprechen in etwa der Situation in der Schweiz. Die UV-Bestrahlung mit einer Dosis von 400 Joule pro Quadratmeter, wie sie typischerweise in der Schweiz zur Desinfektion eingesetzt wird, erreicht eine ähnlich gute oder bessere Inaktivierung wie die Uferfiltration. Dies gilt allerdings nur, wenn die Trübung nicht zu gross ist (der nephelometrische Trübungswert sollte kleiner 1 sein). Kommt die UV-Desinfektion als Absicherung zur Uferfiltration zum Einsatz (zum Beispiel bei einer Revitalisierung), so muss man berücksich-

tigen, dass die Trübung gerade in kritischen Situationen ansteigen und die Desinfektionsleistung beeinträchtigen könnte. Die chemische Desinfektion reagiert weniger empfindlich auf Trübung, so dass die Ozonung oder Chlorung sich gut für die Inaktivierung von Viren und vegetativen Bakterien eignen. Dagegen lassen sich Bakteriensporen oder Protozoen mit diesen Verfahren schwerer abtöten. Eine absolute Barriere für Viren, Bakterien und Protozoen ist die Ultrafiltration. Allerdings wird in realen Systemen nie eine 100-prozentige Elimination dieser Mikroorganismen erreicht (deshalb sind in Tabelle 2 nur grobe Schätzungen angegeben).

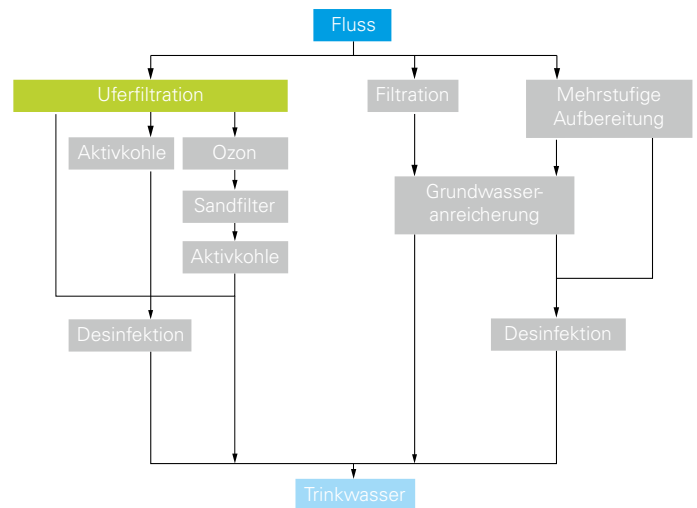


Abb. 3: Vom Flusswasser zum Trinkwasser: Die Uferfiltration und die direkte Aufbereitung von Flusswasser mit und ohne Grundwasseranreicherung (modifiziert nach [10]).

Tab. 2: Leistung der Uferfiltration bei der Entfernung von Mikroorganismen (MO), verglichen mit physikalischen und chemischen Verfahren zur Trinkwasseraufbereitung. Die Eliminationsleistung ist in log-Stufen angegeben (1 = Reduktion auf 10 Prozent, 2 = Reduktion auf 1 Prozent). Die Daten stammen aus verschiedenen Quellen. Bei der Uferfiltration handelt es sich um Messungen, bei den anderen Verfahren um Schätzungen.

Mikroorganismen	Uferfiltration (Aufenthaltszeit 15 Tage)	UV-Strahlung (254 nm, 400 J/m ²)	Ozonung (1 mg/l x min)	Chlorung (50 mg/l x min)**	Ultrafiltration
Enterovirus (MS2-Bakteriophage bei Ultrafiltration)	≥ 2,6	5,7	9,9	> 10	3 bis keine MO nachweisbar***
Coliforme	≥ 5,0	> 10	> 10	> 10	keine MO nachweisbar***
Clostridien (Sporen)	≥ 3,1	3,6			
Bacillus subtilis (Sporen)		3,6	2,0*	< 1	keine MO nachweisbar***

*Ozonexposition so festgelegt, dass Sporen um zwei log-Stufen reduziert werden, **abgeschätzte Exposition für ein Verteilnetz von 0,05 mg/l Cl₂ während 24 Stunden, ***Membran ist eine absolute Barriere gegen Bakterien und Sporen, log-Stufe 7 technisch nicht mehr quantifizierbar.

Abbau von Spurenstoffen hängt vom Milieu ab

Wie oben erwähnt ist die Elimination von Spurenstoffen bei der Uferfiltration abhängig von verschiedenen Parametern wie vom Redoxmilieu oder von den lokalen hydraulischen und geologischen Bedingungen. Die zahlreichen Untersuchungen lassen trotzdem generelle Schlüsse über die Abbaubarkeit ausgewählter Stoffe zu. So kann die Uferfiltration organische Spurenstoffe je nach Infiltrationszeit und Redoxmilieu sehr effektiv eliminieren (Tab. 1).

Die Effizienz physikalischer und chemischer Verfahren hängt vor allem von der Konzentration und dem Typ des natürlichen organischen Materials ab. Die Abschätzungen in Tabelle 1 beziehen sich auf Wässer mit tiefen Konzentrationen von gelöstem organischem Material (weniger als ein Milligramm pro Liter). Alle aufgeführten Verfahren zeigen eine gute Eliminationsleistung. Es gilt zu beachten, dass oxidative Verfahren (Kombination von UV-Strahlung mit Wasserstoffperoxid und Ozonung) die Spurenstoffe nur transformieren und nicht vollständig mineralisieren [12]. Die Adsorption an Pulveraktivkohle und die Nanofiltration entfernen die Stoffe hingegen aus dem Wasser. Deshalb muss bei diesen Methoden die verbrauchte Kohle beziehungsweise das Konzentrat entsorgt werden.

Die Frage im Titel, ob das Schweizer Trinkwasser aus Flusswasserinfiltrat längerfristig seine gute Qualität behalten wird, kann mit Ja beantwortet werden. Einerseits bildet die Uferfiltrationszone eine gute Barriere für mikrobielle und chemische Kontaminationen. Andererseits profitiert das System von einer guten Gewässerschutzstrategie, die eine möglichst geringe Verschmutzung der Wasserressourcen zum Ziel hat. Der begonnene Ausbau der Kläranlagen zur Verringerung der Spurenstofffracht aus häuslichen Abwässern ist ein aktuelles Beispiel für dieses Bestreben.

Für stark belastete Systeme existiert eine Reihe physikalischer und chemischer Aufbereitungsmethoden, mit denen sich die Uferfiltration kombinieren lässt. Veränderungen des Klimas könnten längerfristig zu Phasen mit anaerobem Milieu in der Infiltrationszone und zur Freisetzung von Mangan und Eisen führen. Dies würde eine zusätzliche Aufbereitung erfordern. Auch bei Revitalisierungen sollte man eine nachgeschaltete Aufbereitung in Betracht ziehen, falls mit einer verkürzten Aufenthaltszeit in der Infiltrationszone zu rechnen ist.

- [1] Diem S., Rudolf von Rohr M., Hering J. G., Kohler H. P. E., Schirmer M., von Gunten U. (2013): NOM degradation during river infiltration: Effects of the climate variables temperature and discharge. *Water Research* 47 (17), 6585–6595
- [2] Rudolf von Rohr M. et al. (2014): Column studies to assess the effects of climate variables on redox processes during riverbank filtration. *Water Research*, im Druck
- [3] <http://www.admin.ch/opc/de/classified-compilation/19983281/index.html>
- [4] Ray C., Melin G., Linsky R. B. (2003): *Riverbank filtration – Improving Source-Water Quality*. Kluwer Academic Publishers, New York
- [5] Diem S., Rudolf von Rohr M., Schirmer M., Kohler H. P. E., Hering J. G., von Gunten U. (2013): Qualität des Uferfiltrats – Einfluss der klimabestimmten Variablen Temperatur und Abfluss. *Aqua & Gas* 11, 14–21
- [6] Storck F. R., Schmidt C. K., Lange F. T., Henson J. W., Hahn K. (2012): Factors controlling micropollutant removal during riverbank filtration. *Journal American Water Works Association* 104 (12), 35–36
- [7] Kovalova L., Siegrist H., von Gunten U., Eugster J., Hagenbuch M., Wittmer A., Moser R., Mc Ardell C. S. (2013): Elimination of micropollutants during post-treatment of hospital wastewater with powdered activated carbon, ozone, and UV. *Environmental Science & Technology* 47 (14), 7899–7908
- [8] Wittmer I., Moschet C., Simovic J., Singer H., Stamm C., Hollender J., Jung-hans M., Leu C. (2014): Über 100 Pestizide in Fließgewässern. *Aqua & Gas* 3, 32–43
- [9] Schwarzenbach R. P., Egli T., Hofstetter T. B., von Gunten U., Wehrli B. (2010): Global water pollution and human health. *Annual Review of Environment and Resources* 35, 109–136
- [10] Schmidt, C., Lange F. T., Brauch H.-J., Kühn W. (2003): Experiences with riverbank filtration and infiltration in Germany. *Proceedings International Symposium on Artificial Recharge of Groundwater*, Daejeon, Korea
- [11] Gallard H., von Gunten U., Kaiser H. P. (2003): Prediction of the disinfection and oxidation efficiency of full-scale ozone reactors. *Journal of Water Supply Research and Technology – Aqua* 52 (4), 277–290
- [12] von Sonntag C., von Gunten U. (2012): *Chemistry of ozone in water and wastewater treatment – From basic principles to applications*, IWA Publishing, London