

# Infotag 2014



**Wasserversorgung und  
Uferfiltration –  
ein System unter Druck?**

# Inhalt

Janet Hering		
<b>Nachhaltiges Grundwassermanagement für die Wasserversorgung</b>		<b>3</b>
Mario Schirmer		
<b>Das sensible System Wasserversorgung und Uferfiltration</b>		<b>4</b>
Christian Stamm		
<b>Flusswasser als Ressource – Einflussfaktoren für die Wasserqualität</b>		<b>8</b>
Juliane Hollender		
<b>Gewässerufer als Filter für Mikroschadstoffe</b>		<b>12</b>
Samuel Diem		
<b>Uferfiltration im Kontext der Klimaänderung</b>		<b>16</b>
Peter Huggenberger		
<b>Ökologie und der Wasserversorgung in urbanen Gebieten</b>		<b>20</b>
Urs Buchs		
<b>Grundwassergewinnung und Revitalisierung: Konflikt oder nachhaltiger Nutzen?</b>		<b>24</b>
Thomas Meier		
<b>Herausforderungen der Trinkwassergewinnung aus Flussinfiltraten</b>		<b>26</b>
Urs von Gunten		
<b>Trinkwasser aus Uferfiltrat, noch gut genug?</b>		<b>30</b>
Janet Hering		
<b>Die Schweiz als führendes Beispiel für nachhaltiges Wassermanagement</b>		<b>34</b>

Die Eawag ist das Wasserforschungsinstitut des ETH-Bereichs. Rund 400 Mitarbeitende sind an den Standorten Dübendorf bei Zürich und Kastanienbaum bei Luzern tätig. Neben ihrem Engagement in der Forschung wirkt die Eawag auch in Lehre und Beratung und schlägt damit eine Brücke zwischen Wissenschaft und Praxis. [www.eawag.ch](http://www.eawag.ch)



Janet Hering  
Direktorin der Eawag

## Nachhaltiges Grundwassermanagement für die Wasserversorgung

Wohlstand, soziale und ökonomische Entwicklung hängen fundamental von den natürlichen Ressourcen ab. So prägt die regionale Verfügbarkeit von Wasser – bestimmt von Niederschlag, natürlicher Speicherung und Verbreitung – die Kultur und Geschichte der Gesellschaften auf der ganzen Welt. Umgekehrt beeinflussen gesellschaftliche Entscheide zur Verwendung und Bewirtschaftung der Wasserressourcen die Integrität und Funktion der aquatischen Lebensräume. Eine zentrale Aufgabe des Wasserressourcenmanagements ist es, eine sichere und bedürfnisgerechte Trinkwasserversorgung zu garantieren. 2010 hat die Uno den Zugang zu sauberem Wasser zu einem Menschenrecht erklärt. Während der ganzen Menschheitsgeschichte trugen die Obrigkeiten eine spezielle Verantwortung für die Wasserversorgung.

Die Schweiz gewinnt den grössten Teil ihres Trinkwassers aus Quellen und aus dem Grundwasser. Diese liefern in der Regel Wasser bester Qualität, das ohne weitere Aufbereitung auskommt. Denn viele Quellen liegen weit weg von zivilisatorischen Einflüssen; das Grundwasser ist durch den Bodenfilter vor Krankheitserregern und anderen Verunreinigungen geschützt. Diese Barriere ist allerdings nicht unüberwindbar. Deshalb sollten wir den natürlichen Schutz nicht als selbstverständlich erachten – insbesondere vor dem Hintergrund, dass Kontaminationen von Aquiferen nahezu irreversibel sind.

Wie ist das Grundwasser aus Sicht der Wasserversorgung nachhaltig zu bewirtschaften? Diese Frage erörtert der Eawag-Infotag 2014 aus verschiedenen Perspektiven. Die Beiträge stellen die wissenschaftlichen Grundlagen für den natürlichen Grundwasserschutz vor und beleuchten, wie wirksam das System gegenüber neuen Verunreinigungen ist und wie empfindlich es auf den Klimawandel reagiert. Flussaufweitungen im Zug von Revitalisierungen können Grundwasserbrunnen in Uferzonen beeinträchtigen. Um abschätzen zu können, wie es um die Sicherheit der Wasserversorgung unter veränderten Bedingungen steht, ist es wichtig, die ablaufenden biogeochemischen Prozesse zu verstehen. Mit Feldforschung und dem Einsatz neuer Technologien,

modernster Analysemethoden und innovativer Modelle tragen Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler der Eawag einen wesentlichen Teil dazu bei.

Die Zusammenarbeit mit Hochschulen und der Praxis ist entscheidend, um die wissenschaftlichen Erkenntnisse voranzubringen und in Praxisanwendungen einfließen zu lassen. Viele der am Infotag vorgestellten Projekte wurden im Rahmen des Nationalen Forschungsprogramms «Nachhaltige Wassernutzung» (NFP 61) durchgeführt. Der Austausch mit Forschenden anderer Institutionen und Akteuren innerhalb des Programms förderte die interdisziplinäre und praxisorientierte Sichtweise. Die Eawag engagiert sich auch an den Abschlussveranstaltungen des NFP 61 und hofft, bei den weiterführenden Arbeiten mitwirken zu können.

Um die Sicherheit und Qualität der reichlich vorhandenen Wasserressourcen in der Schweiz heute und morgen zu gewährleisten, braucht es ein sorgfältiges Management. Zwar geht eine qualitativ hochstehende Trinkwasserversorgung mit Gewässerschutzmassnahmen einher. Trotzdem ist es immer wieder nötig, zwischen gegensätzlichen Nutzungsansprüchen abzuwägen. Die Eawag liefert Entscheidungsträgern hierzu fundiertes Wissen, so wie sie sich dafür einsetzt, ihre Forschungsergebnisse den Fachleuten in der Praxis zugänglich zu machen. Die Schweiz besitzt die technischen Kompetenzen, finanziellen Mittel und politischen Strukturen, die es braucht, um ihre Wasserressourcen nachhaltig zu bewirtschaften. Mit den beschlossenen Massnahmen zur Flussrevitalisierung und zur Elimination von Mikroverunreinigungen in Kläranlagen übernimmt das Land im Gewässerschutz eine weltweite Führungsrolle. Die Eawag ist stolz, bei diesen Bestrebungen ihre Expertise einzubringen.



Mario Schirmer ist Gruppenleiter an der Abteilung Wasserressourcen und Trinkwasser  
mario.schirmer@eawag.ch

# Das sensible System Wasserversorgung und Uferfiltration

Flussrevitalisierungen gehen mit komplexen Wechselwirkungen einher. Positive Auswirkungen auf der einen Seite können negative Konsequenzen auf der anderen Seite hervorrufen. Ein gutes Prozessverständnis und eine umfassende Bewertung der Auswirkungen sind essenziell. So lässt sich mit einem mathematischen Modell abschätzen, wie viel Zeit infiltriertes Wasser bis zu einem Trinkwasserbrunnen benötigt.

Im Wasserbau hat bei vielen Verantwortlichen in den letzten Jahren ein Umdenken stattgefunden. Der Fokus bewegt sich weg von kanalisiertem und hin zu revitalisierten Flussabschnitten. Man anerkennt, dass der Fluss mehr Raum beansprucht, wenn Hochwasserschutzmassnahmen im weiteren Abstrom greifen sollen. Zudem führen Revitalisierungsmassnahmen, wie die Verbreiterung des Flussbettes, wieder mäandrierende Abschnitte und neu geschaffene Kiesbänke, zu einem erhöhten Austausch zwischen dem Fluss und dem Grundwasser. Dieser ist essenziell für eine gesunde Ökologie des Flusses und des Flusskorridors. Auf der anderen Seite können Flussverbreiterungen zu verkürzten Fließzeiten zwischen dem Fluss und ufernahen Grundwasserfassungen führen. Damit steigt unter Umständen das Risiko von Kontaminationen mit Schadstoffen oder Krankheitserregern. Dieses Umdenken hat sich auch in der schweizerischen und europäischen Gesetzgebung niedergeschlagen. So muss die Wasserwirtschaft laut EU-Wasserrahmenrichtlinie einen «guten ökologischen Zustand» der Wasserkörper anstreben [1]. Die Schweizer Gewässer erfüllen die Anforderungswerte für chemische und physikalische Wasserparameter gemäss Gewässerschutzverordnung überwiegend. Dennoch bleibt der ökologische Wert vieler Flussläufe vermindert, weil natürliche Lebensräume in den kanalisiertem Flüssen verloren gegangen sind. Die Wegleitung «Hochwasserschutz an Fließgewässern» sieht deshalb vor, Hochwasserschutzmassnahmen mit einer Revitalisierung der Flüsse zu verbinden [2]. Mit der Zurücknahme von Verbauungen will man den Flüssen mehr Platz geben, so dass sie sich naturnaher entwickeln können. Der Bund wird gemeinsam mit den Kantonen über die nächsten 80 Jahre ungefähr 60 Millionen Schweizer Franken im Jahr ausgeben, um insgesamt rund 4000 Kilometer Fließgewässer zu revitalisieren [3]. An der Thur wurden in den zurückliegenden Jahren bereits Revitalisierungsmassnahmen in mehreren Abschnitten, zum Beispiel im Gebiet Niederneunforn (TG) und Altikon (ZH), durchgeführt.

## Zwischen verschiedenen Interessen abwägen

Da Flussläufe vielen Zwecken dienen, muss bei Revitalisierungsmassnahmen ein Ausgleich zwischen der ökologischen Aufwertung des Flusses und der Flussauen, dem Hochwasserschutz, der

Grundwasserwirtschaft, der Land- und Forstwirtschaft, der Naherholung und dem Verkehr gefunden werden. Die Mischung verschiedenster Interessen birgt ein gewisses Konfliktpotenzial (Abb. 1). Dabei kann die Gewichtung der Interessen von Standort zu Standort variieren. Eine sachliche Abwägung erfordert daher eine Vorhersage, wie sich die geplanten Massnahmen auswirken. Das ist im Detail schwierig, weil die Funktionsweise des Flusskorridors in Bezug auf Wasserfluss, Wasseraustausch, Sedimenttransport, stoffliche Umsetzungen und die Entwicklung von Lebensräumen und Lebensgemeinschaften auf komplexen Wechselwirkungen beruht. Wegen der Befürchtung, dass Flussaufweitungen die Gewinnung von Trinkwasser aus flussnahen Pumpwerken gefährden könnten, hat der Bund Revitalisierungsmassnahmen in der Grundwasserschutzzone S2 verboten [4]. Inwieweit und unter welchen Bedingungen diese Befürchtungen gerechtfertigt sind, konnte die Wissenschaft bis jetzt jedoch nicht klären. Wie stark Flussrevitalisierungen die Wasserqualität der Fließgewässer verbessern, ist ebenso unsicher. Wie schnell und in welchem Ausmass sich die angestrebte ökologische Aufwertung einstellt, lässt sich mit dem gegenwärtigen Prozessverständnis nur schwer vorhersagen. Praktische Erfahrungen fehlen grösstenteils.



Abb. 1: Bei Revitalisierungsmassnahmen müssen verschiedenste Interessen beachtet werden. Das birgt ein gewisses Konfliktpotenzial. Die aufgeführten Interessen sind als Beispiele ohne Anspruch auf Vollständigkeit anzusehen.

**Hightech-Feldstandort an der Thur**

Bei der Vorhersage von Auswirkungen von Flussrevitalisierungen ist deshalb die Wissenschaft gefragt. Die Eawag hat zusammen mit der ETH Zürich, der ETH Lausanne und der Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft das interdisziplinäre Projekt «Restored Corridor Dynamics» (Record) durchgeführt [5, 6]. Ziel des Vorhabens war es, die Funktionsweise des Systems Fluss – Flusskorridor – Grundwasserleiter mechanistisch zu verstehen, um die Auswirkungen von Revitalisierungsmassnahmen vorhersagen zu können. Das Kompetenzzentrum Umwelt und Nachhaltigkeit (CCES) des ETH-Bereichs hat das Projekt gefördert.

Vorangegangene Studien konzentrierten sich bei den Auswirkungen von Flussrevitalisierungen stark auf den Sedimenttransport, die Morphologie des Gewässerbetts und die damit verbundene Bildung von Lebensräumen. Im Gegensatz dazu fokussierte sich das Record-Projekt auf folgende Schwerpunkte: auf den Austausch zwischen Fließgewässern und Grundwasser, auf die natürlichen stofflichen Umsetzungen in der Gewässersohle, im Grundwasserleiter und in den Auenböden sowie auf die Auswirkungen auf die Biodiversität und die Wasserqualität [7]. Zusätzlich zu den angesprochenen stofflichen Aspekten untersuchten wir die Gewässermorphologie, die Vegetationsentwicklung und wie sich diese gegenseitig beeinflussen. Wir nahmen intensive Feldbeobachtungen vor und führten Labor- und Feldexperimente durch, um Erkenntnisse zu festigen und Hypothesen zu testen. Computermodelle bildeten Strömung, Stofftransport, chemische Umwandlungen und die Entwicklung von Lebensgemeinschaften nach. Damit lassen sich die gewonnenen Erkenntnisse auf andere Standorte übertragen.

Hauptstandort des Record-Projekts war der revitalisierte Abschnitt der Thur unterhalb der Brücke zwischen Niederneunforn und Altikon (Abb. 2). Das Testfeld weist Klimastationen und zwei Beobachtungstürme mit Kameras auf, mit denen sich die Morphologie und die Vegetation beobachten lassen. Mehr als 80 Grundwasserbeobachtungsrohre (Piezometer) mit Loggern zeichnen Wasserstand, Temperatur und elektrische Leitfähigkeit auf (Abb. 3). Daneben sind Bodensensoren, faseroptische Temperaturmessungen in der Gewässersohle, Beprobungseinrichtungen für hydro(geo)logische, morphologische, chemische, biologische und ökologische Untersuchungen sowie geophysikalische Untersuchungseinrichtungen installiert. Sensorbasierte Daten werden drahtlos in eine Datenbank eingespeist. Eine hohe räumliche und zeitliche Auflösung (in der Regel Messungen alle 15 Minuten) ermöglicht Aussagen zur Variabilität und Dynamik der untersuchten Prozesse [8]. Als nicht revitalisierter Vergleichsstandort diente der Zuströmbereich des Pumpwerks Widen in Felben-Wellhausen (TG). Am Hauptstandort führten wir am kanalisierten Abschnitt im Anstrom ebenfalls Untersuchungen durch.

-  Beobachtungstürme mit Kameras
-  Piezometer und Brunnen
-  Grundwassermessungen
-  Messungen der hydrologischen und meteorologischen Parameter
-  Monitoring Wurzelzone
-  Bodenfeuchte und Evapotranspiration

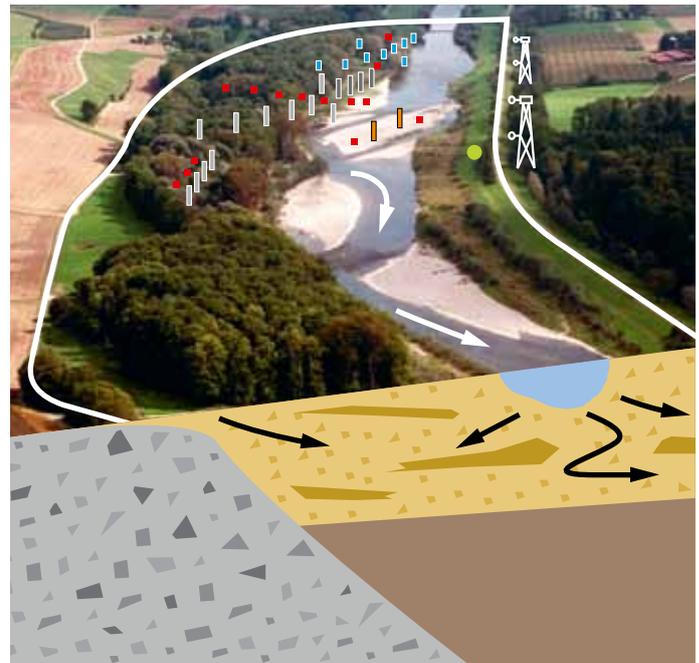


Abb. 2: Instrumentierung am Feldstandort Niederneunforn/Altikon.



Abb. 3: Installation eines Grundwasserbeobachtungsrohrs (Piezometer) am revitalisierten Abschnitt der Thur mit der Geoprobe, einem Rammgerät.

Mario Schirmer

### **Mit der Leitfähigkeit die Aufenthaltsdauer messen**

Das Schweizer Gesetz sieht vor, dass Wasser, das von einem Fluss in einen Grundwasserleiter infiltriert, eine Aufenthaltszeit von mindestens 10 Tagen hat, bevor es für die Trinkwasserproduktion herausgepumpt werden darf [4]. Man geht davon aus, dass in dieser Zeit Krankheitserreger und Schadstoffe zurückgehalten beziehungsweise abgebaut werden. Zum Vergleich: In Deutschland muss das Wasser mindestens 50 Tage im Untergrund verbracht haben.

Bisher war es sehr schwierig, die Aufenthaltszeit des infiltrierten Wassers zu messen. Entweder konnte man nur Abschätzungen machen oder musste aufwändige numerische Computermodelle vom Untergrund entwickeln. Eine weitere Möglichkeit war der Einsatz von Farbstoffen oder anderen Markierungssubstanzen. Aber diese Tests sind zeitraubend und teuer. Ausserdem sind sie bei unbekanntem Fliessrichtungen des Grundwassers oft erfolglos und nur für die hydrologischen Bedingungen gültig, unter denen ein Test durchgeführt worden ist.

Die Eawag hat deshalb nach einer kostengünstigen Alternative gesucht und diese in der elektrischen Leitfähigkeit des Wassers gefunden. Anhand von Messungen hatten wir festgestellt, dass die elektrische Leitfähigkeit in Flusswasser neben den bekannten jahreszeitlichen auch täglichen Schwankungen unterliegt [9]. Abbildung 4 zeigt die Messungen der elektrischen Leitfähigkeit in der Thur und in einem flussnahen Grundwasserbeobachtungsrohr. Die Leitfähigkeitsänderungen im Grundwasser sind gegenüber jenen im Fluss zeitlich verzögert und erscheinen gedämpft. Wir entwickelten eine Methode, um die beiden Zeitreihen aufeinander zu beziehen. Dies ermöglicht es, die Wahrscheinlichkeitsverteilung zu berechnen, wie lange das infiltrierte Wasser bis zum Beobachtungsrohr (oder bis zu einer anderen Stelle in der Infiltrationszone) braucht [10]. Demnach kommt ein Teil des Flussinfiltrats bereits nach etwas mehr als einem Tag am Beobachtungsrohr an. Der überwiegende Anteil des Infiltrats benötigt jedoch mehr als zwei Tage. Die mittlere Fliesszeit beträgt ungefähr drei Tage (Abb. 4b).

### **Revitalisierung bei Fliesszeiten über 20 Tagen**

Am Standort Niederneunforn befindet sich der Trinkwasserbrunnen der Gemeinde im kanalisiertem Bereich der Thur. Das Wasser ist in der Regel mehr als 10 Tage im Untergrund, bevor es als Trinkwasser gewonnen wird. Bei Hochwasserereignissen verkürzt sich die Verweildauer und der Brunnen wird nicht benutzt. An diesem Flussabschnitt ist eine Revitalisierung nicht wünschenswert, da sich der Abstand zum Trinkwasserbrunnen gemäss unseren Modellrechnungen verkürzen würde. Dies hätte zur Folge, dass die Aufenthaltszeit auch im Normalfall vermehrt unter den vorgeschriebenen Minimalwert sinken würde.

Man kann diese Situation allerdings nicht verallgemeinern. Wir sind der Meinung, dass an Standorten mit Fliesszeiten zwischen Fluss und Brunnen von über 20 Tagen eine Revitalisie-

rung erlaubt werden sollte. Trinkwasserproduktion und Flussrevitalisierung dürfen nicht gegeneinander ausgespielt werden. Insbesondere deshalb, weil Flussrevitalisierungen sich auf verschiedene Art positiv auswirken. So fliesst die Thur bei Niederneunforn/Altikon, wo dem Fluss mehr Raum gegeben wurde, beispielsweise deutlich langsamer, was den Hochwasserschutz begünstigt. Allerdings kann die veränderte Dynamik dazu führen, dass der Fluss mehr Land wegschwemmt. Das kann zu schwierigen Entscheidungen darüber führen, ob und wann der Mensch wieder eingreifen soll.

### **Der Flussregenpfeifer ist zurückgekehrt**

Einem Fluss mehr Raum zu geben, führt auch zu einer grösseren Vielfalt der Lebensräume und damit zu einer höheren Biodiversität. So weisen ökologische und bodenbiologische Untersuchungen im Rahmen von Record nach, dass die Artenvielfalt an den revitalisierten Thur-Standorten grösser ist als an den kanalisiertem Abschnitten. Nach mehr als 100 Jahren Abwesenheit ist der Flussregenpfeifer an die Thur zurückgekehrt. Mehrere Paare dieses Vogels, der offene Kiesbänke für die Brut bevorzugt, kommen jedes Jahr ins revitalisierte Gebiet in Niederneunforn/Altikon. Zusätzlich hat sich der Biber wieder angesiedelt.

Bodenkundliche Forschungsarbeiten zum Stickstoffkreislauf zeigen, dass die Graslandschaften und Weiden im revitalisierten Bereich den Stickstoff besser im Boden zurückhalten, was sehr positiv ist, weil damit weniger Stickstoff in die Gewässer ausgewaschen wird. Das Gebiet des Auenwaldes hingegen stellt eine leichte Stickstoffquelle dar, was typisch für diese Art von Landschaft ist. Die Bevölkerung empfindet den revitalisierten Flussabschnitt insgesamt als ästhetischer und schöner. Zusammen mit den Besuchern hat sie ihn gut angenommen. Damit war diese Revitalisierung erfolgreich.

### **Fazit für die Praxis**

Bei der Revitalisierung von Flüssen müssen viele Interessen unter einen Hut gebracht werden. Es besteht das Potenzial von Interessenkonflikten. Besonders bei flussnahen Trinkwasserfassungen, die zum Teil aus Uferfiltrat gespeist werden, gilt es, die in der Schweiz gesetzlich vorgeschriebene Mindestaufenthaltszeit des Wassers im Untergrund von 10 Tagen einzuhalten. Die Messung der elektrischen Leitfähigkeit erlaubt es, unter den richtigen Bedingungen die Aufenthaltszeitverteilung zwischen Fluss und Trinkwasserbrunnen relativ einfach abzuschätzen. Wir hoffen, dass damit nicht von vornherein Flussrevitalisierungen verboten werden, wenn sich Trinkwasserbrunnen in Flussnähe befinden. Trinkwasserproduktion und Revitalisierung von Flüssen sind wichtige gesellschaftliche Aufgaben und dürfen nicht gegeneinander ausgespielt werden.

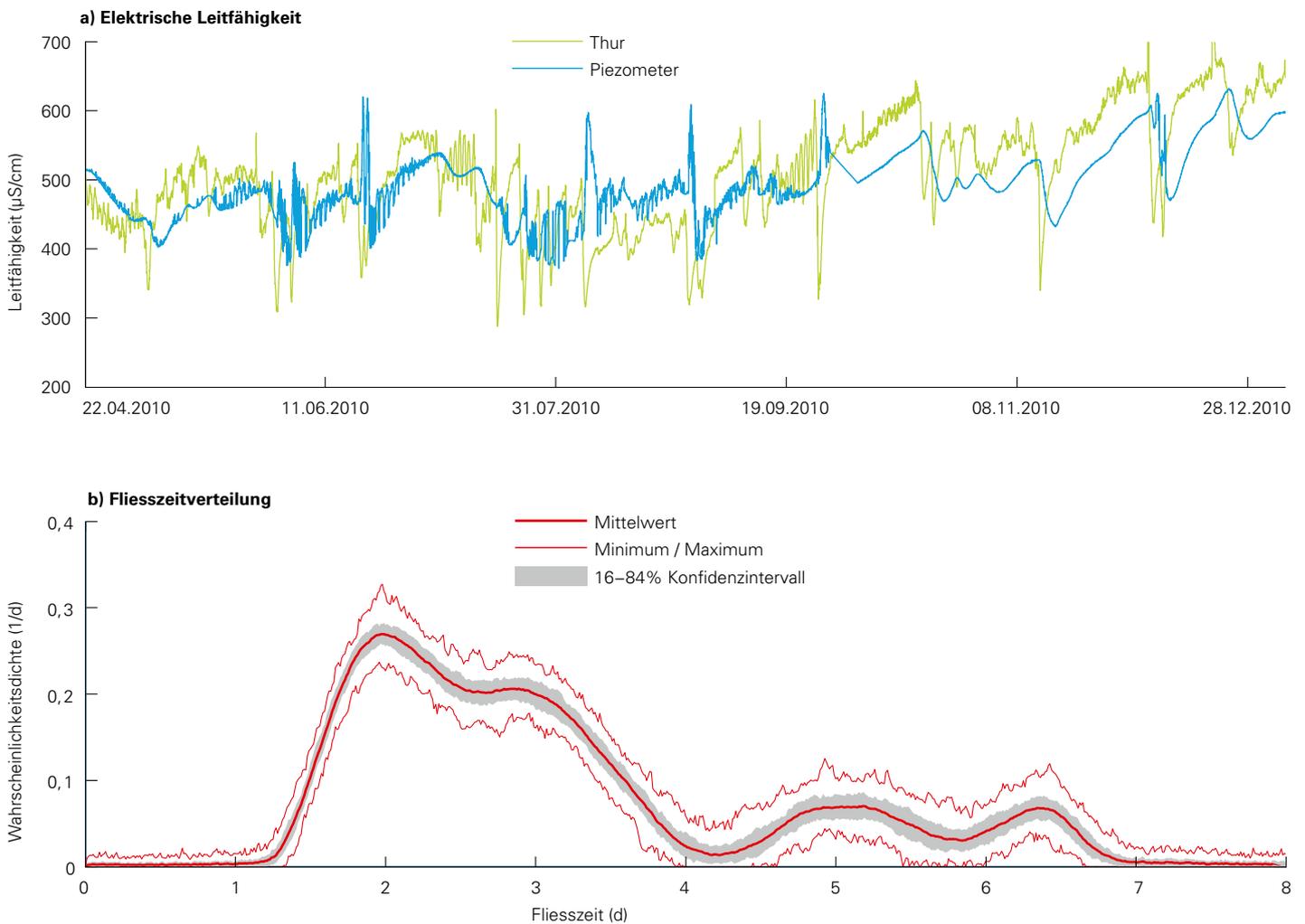


Abb. 4: a) Messreihe der spezifischen elektrischen Leitfähigkeit in der Thur und an einer flussnahen Messstelle (Piezometer). b) Die daraus berechnete Fließzeitverteilung mit den Unsicherheiten zwischen der Thur und dem Piezometer.

- [1] European Commission (2000): Directive 2000/60/EC of the European Parliament and of the Council establishing a framework for Community action in the field of water policy. Official Journal of the European Community L327, 1–72
- [2] Bundesamt für Wasser und Geologie (2001): Hochwasserschutz an Fließgewässern – Wegleitung 2001.
- [3] Müller S. (2010): Flussrevitalisierungen – Synergien zwischen Hochwasserschutz und Ökologie. Vortrag an der Informationstagung vom 25. November 2010 des Projekts Integrales Flussgebietsmanagement in Bern
- [4] Bundesamt für Umwelt (2004): Wegleitung Grundwasserschutz
- [5] [www.cces.ethz.ch/projects/nature/Record](http://www.cces.ethz.ch/projects/nature/Record).
- [6] Schirmer M. (2013): Das Record-Projekt – Flussrevitalisierung, eine ökologische Massnahme in einem komplexen Umfeld. Aqua & Gas 3, 22–28
- [7] Schirmer M., Luster J., Linde N., Perona P., Mitchell E. A. D., Barry D. A., Hollender J., Cirpka O. A., Schneider P., Vogt T., Radny D., Durisch-Kaiser E. (2014): Morphological, hydrological, biogeochemical and ecological changes and challenges in river restoration – The Thur River case study. Hydrology and Earth System Sciences, 18, 1–14
- [8] Schneider P., Vogt T., Schirmer, M., Doetsch J., Linde N., Pasquale N., Perona P. Cirpka O. A. (2011): Towards improved instrumentation for assessing river-groundwater interactions in a restored river corridor. Hydrology and Earth System Sciences 15, 2531–2549
- [9] Hayashi M., Vogt T., Mächler L., Schirmer M. (2012): Diurnal fluctuations of electrical conductivity in a pre-alpine river: Effects of photosynthesis and groundwater exchange. Journal of Hydrology 450–451, 93–104
- [10] Vogt T., Schirmer M., Cirpka O. A. (2012): Investigating riparian groundwater flow close to a losing river using diurnal temperature oscillations at high vertical resolution. Hydrology and Earth System Sciences 16, 473–487



Christian Stamm, Abteilung Umweltchemie  
Koautoren: Nadine Czekalski, Heinz Singer  
christian.stamm@eawag.ch

# Flusswasser als Ressource – Einflussfaktoren für die Wasserqualität

Bevor Flusswasser infiltriert, fliesst es durch ein ganzes Einzugsgebiet und ist Stoffeinträgen aus verschiedensten anthropogenen Quellen ausgesetzt. Neben unzähligen Chemikalien gelangen auch Krankheitserreger oder genetisches Material ins Wasser. Viele der eingetragenen Substanzen werden durch chemische Prozesse zersetzt, andere sind stabil. Deshalb kann es lange dauern, bis Reduktionsmassnahmen greifen.

Welche Qualität das Wasser einer Trinkwasserfassung aufweist, die aus Uferfiltrat gespeist wird, hängt nicht zuletzt von der Qualität des infiltrierenden Flusswassers ab. Welches sind die wichtigsten Stoffe, biogeochemischen Prozesse und Stoffquellen, die die Wasserqualität der Schweizer Flüsse bestimmen? Entscheidend ist, woher das Wasser stammt und welche Stoffe es entlang des Fließwegs aufnimmt.

## Der Einfluss des Menschen

Das meiste Wasser fliesst den Flüssen als Grundwasser zu. Der geologische Untergrund prägt die Wasserchemie eines Fließgewässers deshalb stark. So unterscheidet sich beispielsweise das Verhältnis von Magnesium zu Kalzium in den Einzugsgebieten des Rheins und der Rhone systematisch [1]. Stoffeinträge, die auf die verschiedenen Landnutzungen, den

damit verbundenen Einsatz von Chemikalien und auf Ausscheidungen von Mikroorganismen zurückgehen, überprägen diesen natürlichen chemischen Zustand. Chlorid vermittelt dabei als Summenparameter einen Eindruck vom menschlichen Einfluss auf die Wasserchemie: Je grösser der Siedlungsanteil und je intensiver die Landwirtschaft in einem Einzugsgebiet, desto höher sind die Chlorid-Konzentrationen im Fluss (Abb. 1).

Aus anthropogenen Quellen gelangt eine Vielzahl gelöster oder partikulär vorliegender Substanzen in die Flüsse. Auch Mikroorganismen und genetisches Material gehören dazu. Die ökologischen Wirkungen dieser Stoffe sind vielfältig. Nährstoffe fördern die Primärproduktion und beeinflussen Abbauprozesse [2]. Wirkstoffe aus der Antibabypille können den Hormonhaushalt von Wasserlebewesen, insbesondere von Fischen, stören. Gewisse

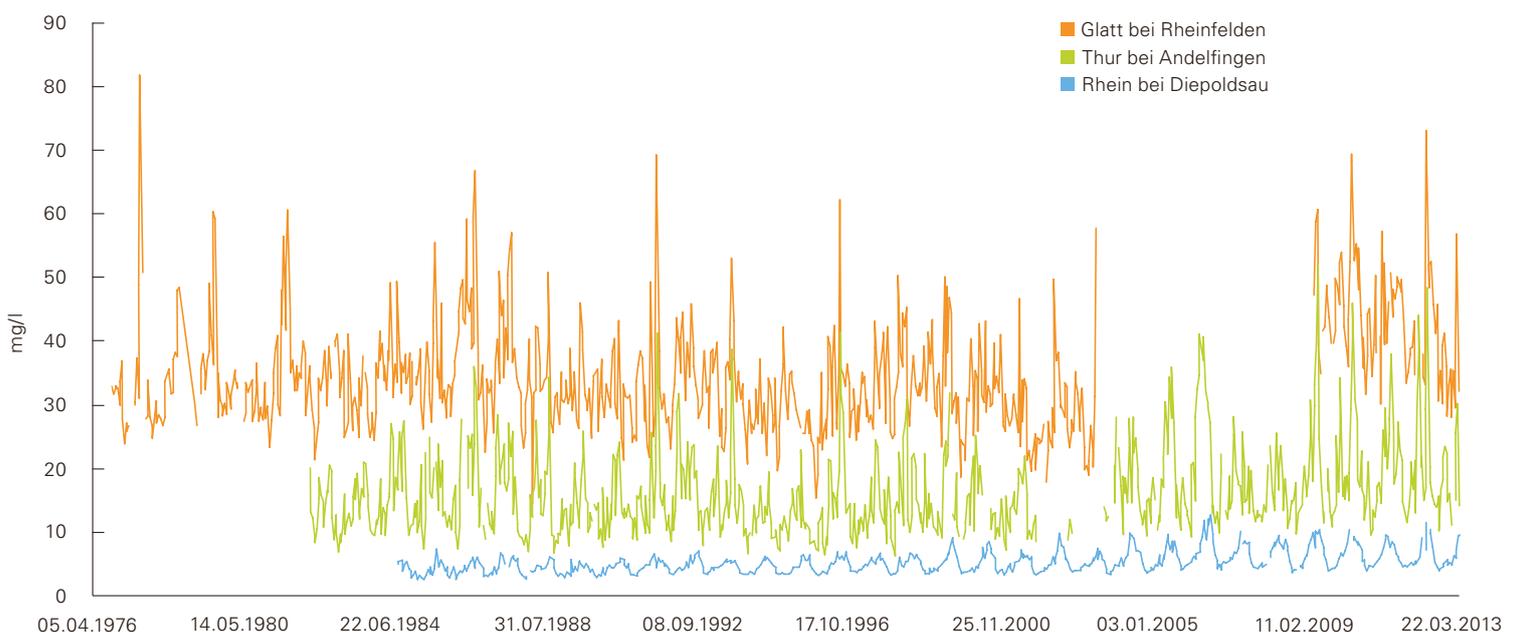


Abb. 1: Chlorid-Konzentrationen als Summenparameter für das Ausmass menschlicher Einflüsse in Einzugsgebieten. Orange: Glatt bei Rheinfelden mit sehr hohem anthropogenem Einfluss, grün: Thur bei Andelfingen mit mittlerem anthropogenem Einfluss, blau: Rhein bei Diepoldsau mit geringem anthropogenem Einfluss (Quelle: Naduf).



Christoph Ort

Christian Leu

Abb. 2: Der Auslauf einer Kläranlage ist ein Beispiel für eine Punktquelle, die Abschwemmung auf einem Maisfeld für diffusen Stofftransport.

Pestizide können abhängig von ihrem Wirkmechanismus unterschiedliche Organismengruppen beeinträchtigen. Gewisse aquatische Bakterien nehmen Antibiotikaresistenz-Gene auf und verbreiten sie weiter. Neben Beeinträchtigungen, die direkt auf den Einsatz der Substanzen zurückgehen, entsteht ein Teil der stofflichen Belastung der Gewässer als indirekter Nebeneffekt [3]. Zu diesen so genannten induzierten Stoffbelastungen zählt zum Beispiel der Eintrag von erodiertem Bodenmaterial aus dem Ackerbau oder von Pathogenen und Resistenzgenen aus dem Abwasser.

**Punktquellen und diffuse Belastungen**

Stoffe gelangen auf unterschiedlichen Wegen in die Flüsse. Einerseits werden sie von Punktquellen in die Gewässer eingetragen. Das sind meist Kläranlagen (Abb. 2), aber auch andere Infrastrukturen wie Flugplätze. Andererseits führen zahlreiche Prozesse zu diffusen Gewässerbelastungen. Dazu gehört die flächige Versickerung von Wasser auf Äckern und Weiden. Auf diesem Weg landen etwa Nitrat oder gewisse Pflanzenschutzmittel beziehungsweise deren Umwandlungsprodukte im Grundwasser. Über den Basisabfluss gelangen die Substanzen ins Flusswasser und stromabwärts ins Uferfiltrat. Andere diffuse Eintragswege sind die Abschwemmung von Landwirtschaftsflächen (Pflanzenschutzmittel, Veterinärpharmaka oder Phosphor) und von Privatgärten, von Gebäudehüllen (Biozide in Fassaden oder in Bitumenbahnen von Flachdächern, Kupfer) oder von Verkehrswegen (Abb. 2).

Auch aus der Atmosphäre werden Stoffe in die Gewässer eingetragen, und sogar abschmelzende Gletscher setzen gewisse Substanzen nach Jahrzehnten wieder frei. Die Stoffquellen und damit die Belastungen verteilen sich ungleich über das Gewässernetz. So spielen diffuse Einträge im Allgemeinen bei kleinen Fließgewässern eine wesentlich grössere Rolle als Kläranlagen [4]. Da kleine Fließgewässer rund 75 Pro-

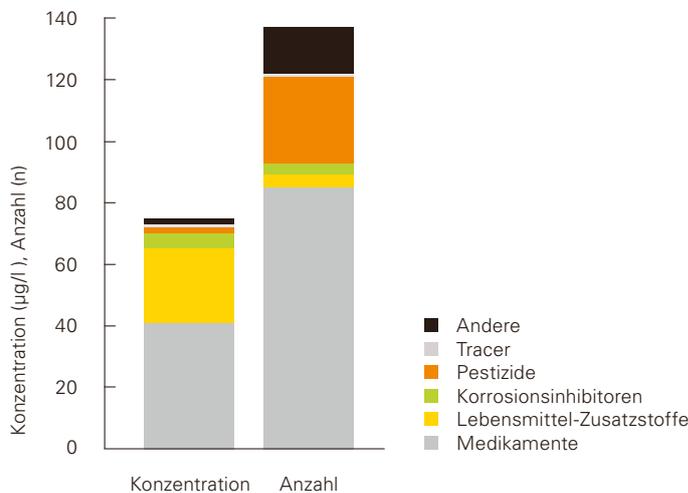


Abb. 3: Durchschnittliche Konzentration und Anzahl Substanzen verschiedener Gruppen von Mikroverunreinigungen im Auslauf von acht Schweizer Kläranlagen (unveröffentlichte Daten aus einer Abwasser-Screening-Studie der Eawag mit finanzieller Unterstützung des Bundesamts für Umwelt).

zent der gesamten Schweizer Fließstrecken ausmachen, beeinflussen sie massgeblich die Qualität der grösseren Flüsse stromabwärts, deren Uferfiltrate viele Trinkwasserfassungen speisen. Auch zeitlich schwanken die Belastungen stark. Die Konzentrationsdynamik hängt von der Stoffquelle, den Eintragspfaden und vom Mischungsverhalten im aquatischen System ab. Häufig verwendete Humanpharmaka weisen oft sehr konstante Frachten auf, die nur aufgrund variabler Abflüsse verdünnt werden. Andere Stoffe wie Pflanzenschutzmittel kommen saisonal zum Einsatz und gelangen vor allem während einzelner Niederschlagsereignisse in die Gewässer. Seen im Einzugsgebiet können die entstehenden Konzentrationsschwankungen ausgleichen.

**Tausende von Stoffen im Wasser**

Eine Vielzahl der vom Menschen eingesetzten Stoffe findet sich auch in den Gewässern wieder. So lassen sich im Auslauf von Kläranlagen (ohne Ozonung oder Pulveraktivkohle) mit heutigen Analysemethoden zwischen 100 und 160 verschiedene organische Mikroverunreinigungen nachweisen. Diese ergeben eine aufaddierte Konzentrationssumme in der Grössenordnung von 70 bis 80 Mikrogramm pro Liter. Die meisten dieser Verbindungen sind Medikamente und Süsstoffe (Abb. 3). Daneben kommen Tausende nicht identifizierter Substanzen in den Oberflächengewässern vor [5].

Kläranlagen halten einen Grossteil der pathogenen Mikroorganismen zurück. Dennoch gelangt mit dem gereinigten Abwasser eine Vielzahl von Krankheitserregern in die Flüsse und Bäche. Verschiedenste Gattungen können Träger von Mehrfachresistenzen gegenüber Antibiotika sein [6]. Auch aus diffusen Quellen stammen vielfältige Mischungen von (biologisch) aktiven Substanzen. So zeigt eine Feldstudie, welche die Eawag zusammen mit den Kantonen und dem Bund 2012 durchgeführt hat, dass in mittelgrossen Einzugsgebieten (38 bis 110 Quadrat-

kilometer) mit intensivem Acker-, Gemüse- und Obstbau über Monate Dutzende von Pflanzenschutzmitteln nachweisbar sind [7]. Ihre Konzentrationssumme lag in 75 Prozent der Proben über einem Mikrogramm pro Liter [8]. Den wohl besten Überblick über die Gewässerchemie in einem Schweizer Fließgewässer geben die Erhebungen der Rheinüberwachungsstation (RÜS) in Basel. Neben den klassischen Wasserinhaltsstoffen wie Nährstoffen oder Schwermetallen misst die RÜS seit Jahren täglich auch organische Spurenstoffe. Die Messungen zeigen, dass neben kommunalen Kläranlagen und der Landwirtschaft auch die Industrie relevante Stoffeinträge verursacht. Diese sind teilweise episodischer Natur und deshalb mit normalen Messprogrammen sehr schwierig zu erfassen (Abb. 4).

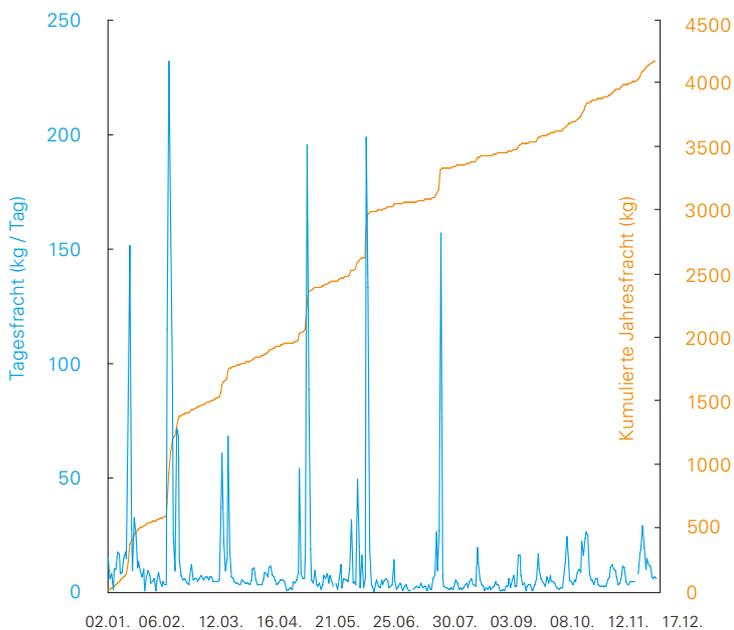


Abb. 4: Fracht des Süsstoffs Saccharin im Rhein bei Basel (2012). Die kurzen Frachtspitzen machen 40 Prozent der Jahresfracht aus und stammen wahrscheinlich aus industriell-gewerblichen Punktquellen. Daten: Rheinüberwachungsstation und Amt für Umwelt und Energie Basel [9].

### Was passiert mit den Stoffen im Gewässer?

Wie sich die eingetragenen Stoffe im Fluss verhalten, hängt stark von ihren Eigenschaften ab. Gewisse gelöste Stoffe wie zum Beispiel der Süsstoff Sucralose oder das Antiepileptikum Carbamazepin sind sehr stabil und werden unverändert weiterverfrachtet. Andere Substanzen werden durch chemische Prozesse wie Hydrolyse oder Fotolyse zersetzt. So wird etwa das häufig verwendete Schmerzmittel Diclofenac fotolytisch abgebaut, was sich am saisonalen Verhältnis der Carbamazepin- und Diclofenac-Konzentrationen in den Gewässern ablesen lässt (Abb. 5). Andere Stoffe werden biologisch abgebaut oder umgewandelt. Je nach Stabilität der Substanzen bleiben die Frachten flussabwärts konstant oder nehmen (stark) ab. Partikel und die daran gebundenen Stoffe können zusätzlich je nach Partikel-

grösse und Fließgeschwindigkeiten im Flussbett sedimentieren und später resuspendiert werden. Die Dynamik solcher Stoffe (Feinsedimente, Gesamtphosphor etc.) hängt damit sehr stark von Abflussereignissen ab. Ganz andere Dynamiken können bei Mikroorganismen und genetischem Material auftreten. Mikroorganismen sind in der Lage, genetisches Material aus der Umwelt aufzunehmen und untereinander auszutauschen, so dass Gene auch ohne ihre ursprüngliche Träger weitertransportiert werden. Im Gegensatz zu Chemikalien können die Konzentrationen von Mikroorganismen und von genetischem Material flussabwärts auch zunehmen, wenn die Bedingungen günstig sind.

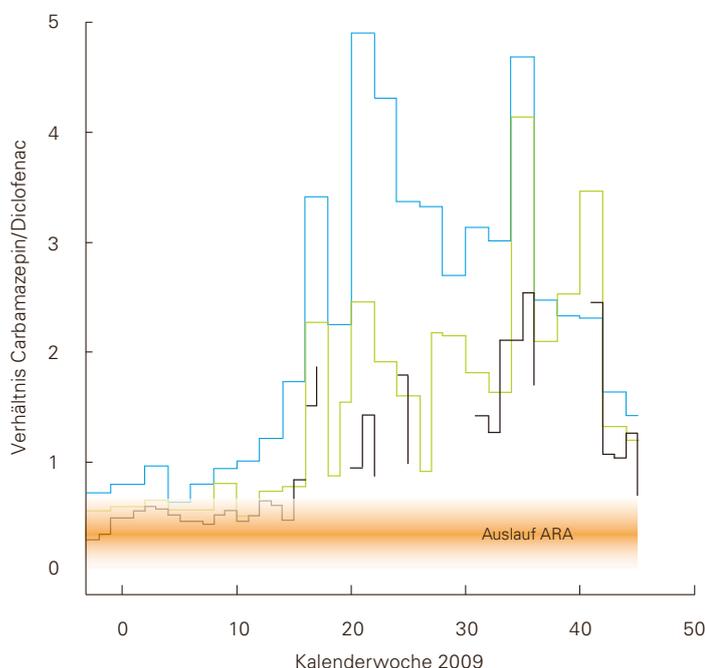
### Der Mensch bestimmt die Wasserqualität auch in Zukunft

Die Bedeutung der Uferfiltration wird für die Trinkwassergewinnung in der Zukunft weiter zunehmen. Dementsprechend ist es wichtig zu wissen, wie sich die Wasserqualität in den Flüssen verändern wird. Dem sind im Rahmen des Nationalen Forschungsprogramms «Nachhaltiges Wassermanagement» (NFP 61) verschiedene Projekte nachgegangen. Dabei stand unter anderem die Frage im Vordergrund, wie sich der Klimawandel auf die Wasserqualität auswirkt. Die Untersuchungen haben ergeben, dass zwar klimatisch bedingte Veränderungen zu erwarten sind, dass aber die direkten menschlichen Eingriffe in den Einzugsgebieten (Art der Landnutzung, Anpassungen der Infrastrukturen etc.) die prognostizierten Effekte dominieren. Dies ergibt sich aus zwei Gründen: Einerseits bestehen bei den Klimaprognosen erhebliche Unsicherheiten, insbesondere was die Niederschlagsverhältnisse betrifft; verglichen mit diesen Unsicherheiten sind die vorhergesagten Effekte relativ schwach. Andererseits ist das Potenzial für Veränderungen aufgrund menschlicher Aktivitäten viel grösser als die klimabedingten Effekte.

Eine Ausnahme betrifft die Entwicklung der Wassertemperaturen: Der über die vergangenen Jahrzehnte schon beobachtete Anstieg wird sich gemäss allen Klimamodellen fortsetzen und in den Fließgewässern des Mittellands bis ins Jahr 2050 zu 2 bis 4 Grad Celsius höheren Temperaturen führen. Dies wird die chemischen und biologischen Prozesse in den Gewässern beeinflussen. Ebenfalls ziemlich konsistent sagen die Klimamodelle voraus, dass die Niederschläge im Winterhalbjahr in Zukunft zunehmen. Bei unveränderter landwirtschaftlicher Bewirtschaftung wird das die Nitratauswaschung erhöhen und im Winterhalbjahr die Erosion auf den Ackerflächen verstärken. Allerdings zeigen Modellsimulationen für typische Einzugsgebiete im Mittelland, dass die Landnutzung die Stoffeinträge in die Flüsse wesentlich stärker beeinflusst. Damit ist klar, dass vor allem die Nutzung der Einzugsgebiete und deren Management den Zustand der Gewässer prägen werden. Das bedeutet umgekehrt, dass die zukünftige Wasserqualität überwiegend durch direkte menschliche Einflussnahme zu steuern ist.

### Die Landwirtschaft hat eine besondere Verantwortung

Einen wesentlichen Schritt hat die Schweiz mit dem Ausbau der Kläranlagen zur Elimination von Mikroverunreinigungen bereits eingeleitet. Sowohl die Aufrüstung der rund 100 grossen



— Rhein (Rekingen)  
 — Thur (Andelfingen)  
 — Murg (Frauenfeld)

Abb. 5: Saisonale Verschiebung des Verhältnisses zwischen den beiden Medikamenten Carbamazepin (stabil) und Diclofenac (Abbau durch Fotolyse) in verschiedenen Gewässern. Von Frühling bis Herbst wird aufgrund der höheren Sonneneinstrahlung mehr Diclofenac abgebaut als im Winter. Daten Fließgewässer: [10], Daten ARAs: Durchschnittswert von 12 Kläranlagen (Probenahme Juni 2013) aus dem aktuellen Eawag-Projekt «Ecoimpact» ([www.ecoimpact.ch](http://www.ecoimpact.ch)).

ARAs als auch die Aufgabe kleiner Anlagen und das Umleiten des Abwassers in grössere ARAs werden die Wasserqualität verbessern. Davon profitieren werden besonders die für die Uferfiltration relevanten grösseren Flüsse. Die Massnahmen bei der Abwasserbehandlung können aber nur einen Teil der stofflichen Gewässerbelastung vermindern. Insbesondere um die Einträge aus diffusen Quellen zu senken, braucht es weitere Anstrengungen. Der Landwirtschaft kommt hier aufgrund ihrer Grösse und ihres Einsatzes vieler biologisch aktiver Substanzen (Pflanzenschutzmittel und Nährstoffe) eine besondere Bedeutung zu. Der Bund könnte mit dem geplanten Aktionsplan zum Einsatz

von Pflanzenschutzmitteln in den nächsten zwei Jahren einen Grundstein für Verbesserungen legen.

Wegen der langen Aufenthaltszeit im Untergrund können Stoffe jedoch vielfach noch Jahre später im Grundwasser vorkommen. Auch Seen mit langen Aufenthaltszeiten des Wassers stellen solch langfristige Speicher dar. Deshalb kann es lange dauern, bis eine veränderte Bewirtschaftung und eine angepasste Verwendung etwa von Nitrat oder gewissen persistenten Pestiziden wirken.

- [1] Zobrist J., Reichert P. (2006): Bayesian estimation of export coefficients from diffuse and point sources in Swiss watersheds. *Journal of Hydrology* 329, 207–223
- [2] Woodward G., Gessner M. O., Giller P. S., Gulis V., Hladyz S., Lecerf A., Malmqvist B., McKie B. G., Tiegs S. D., Cariss H., Dobson M., Elozegi A., Ferreira V., Graça M. A. S., Fleituch T., Lacoursière J. O., Nistorescu M., Pozo J., Risnoveanu G., Schindler M., Vadineanu A., Vought L. B. M., Chauvet E. (2012): Continental-scale effects of nutrient pollution on stream ecosystem functioning. *Science* 336, 1438–1440
- [3] Stamm C. (2005): Agrochemikalien – Wie gefährlich sind sie für unsere Gewässer? *Eawag News* 59, 3–5
- [4] Strahm I., Munz N., Leu C., Wittmer I., Stamm C. (2013): Landnutzung entlang des Gewässernetzes. *Aqua & Gas* 5, 36–44
- [5] Singer H. (2012): Auf der Suche nach den Unbekannten. *Eawag News* 73, 6–11
- [6] Czekalski N., Berthold T., Caucci S., Egli A., Bürgmann H. (2012): Increased levels of multiresistant bacteria and resistance genes after wastewater treatment and their dissemination into Lake Geneva, Switzerland. *Frontiers in Microbiology* 3, Article 106
- [7] Wittmer I., Moschet C., Simovic J., Stamm C., Hollender, J., Junghans M., Leu. C. (2014): Über 100 Pestizide in Fließgewässern. Programm Nawa Spez zeigt die Pestizidbelastung der Schweizer Fließgewässer auf. *Aqua & Gas* 94, 32–43
- [8] Moschet C., Wittmer W., Simovic J., Junghans M., Piazzoli A., Singer H., Stamm C., Leu C., Hollender. J (2014): How a complete pesticide screening changes the assessment of surface water quality. *Environmental Science & Technology* 48, 5423–5432
- [9] Ruff M., Singer H., Ruppe S., Mazacek J., Dolf R., Leu C. (2013): 20 Jahre Rheinüberwachung. Erfolge und analytische Neuausrichtung in Weil am Rhein. *Aqua & Gas* 93, 16–25
- [10] van der Voet J., Stamm C. (2010): Organische Mikroschadstoffe. Machbarkeitsstudie: Konzentrationen und Frachten in Oberflächengewässern untersucht. *Umwelt Perspektiven*, 21–23



Juliane Hollender leitet die Abteilung  
Umweltchemie an der Eawag  
Koautor: Sebastian Huntscha  
juliane.hollender@eawag.ch

# Gewässerufer als Filter für Mikroschadstoffe

Eine Reihe von Mikroverunreinigungen gelangt aus Schweizer Flüssen in die Uferfiltrationszone. Viele dieser Substanzen werden während der Passage durch das Ufer und den Grundwasserleiter abgebaut oder zurückgehalten. Gewisse langlebige Stoffe landen trotzdem im Trinkwasser. Auch wenn sie nicht in gesundheitsgefährdenden Konzentrationen vorliegen, gilt es, ihren Eintrag in die Gewässer zu minimieren.

Seit Jahrzehnten nutzt die Schweizer Wasserversorgung Uferfiltrat von Flusswasser nach wenig Aufbereitung als Trinkwasser. Gleichzeitig wissen wir, dass Chemikalien, die wir in Haushalt, Landwirtschaft und Industrie verwenden, sich in geringen Konzentrationen in unseren Flüssen finden. Da stellt sich die Frage, ob die Uferfiltration einen ausreichenden Filter für solche Belastungen darstellt. Zu berücksichtigen ist dabei, dass sich die Bedingungen in einem Fluss und seinem Ufer sehr stark ändern können. Bei einem Hochwasser finden wir zum Beispiel ganz andere Stoffkonzentrationen im Fluss vor (siehe auch S. 8), und das Wasser durchfließt die Uferzone anders. Die Konzentrationsdynamik im Fluss überträgt sich aufs Grundwasser. Sie wird wegen der Verweilzeit des Wassers auf seinem Weg vom Fluss ins Grundwasser (wenige Tage bis Wochen) abgedämpft. Die Stoffeigenschaften und die Umweltbedingungen bestimmen, wie sich die Substanzen während der Uferpassage verhalten. Abhängig von ihren Eigenschaften können die Stoffe biologisch und seltener chemisch abgebaut werden, an Material des Grundwasserleiters sorbieren und zurückgehalten werden oder aber nur verdünnt vom Grundwasser am Trinkwasserbrunnen ankommen (Abb. 1). Der biologische Abbau von Schadstoffen durch Mikroorganismen im Boden oder Wasser ist aufgrund der Molekülstruktur bislang schwer vorhersagbar. Die Abbauprodukte sind nicht unbedingt weniger relevant als die Ursprungssubstanzen. Grundsätzlich ist der Abbau für mehr Stoffe bei Anwesenheit von Sauerstoff möglich. Einzelne Stoffe, zum Beispiel das Antibiotikum Sulfamethoxazol, zersetzen sich laut Literatur aber unter sauerstofffreien Bedingungen besser. In der Schweiz herrschen sandig-kiesige Infiltrationszonen und Grundwasserleiter vor, die zusammen mit dem geringen Anteil gelösten organischen Materials im Flusswasser meist ein sauerstoffhaltiges Milieu ermöglichen. Die Klimaveränderung kann mit höheren Temperaturen und weniger Niederschlag in Zukunft jedoch vermehrt zu sauerstofffreien Verhältnissen führen, wie sie bereits im Hitzesommer 2003 auftraten (siehe S. 16). Dies könnte dann auch den Abbau von organischen Stoffen beeinträchtigen.

Rein chemische Reaktionen sind beim Abbau von Schadstoffen weniger relevant und wenn, handelt es sich meist um eine Spal-

tung mit Wasser (Hydrolyse). Diese lässt sich abhängig vom pH-Wert gut vorhersagen und ist für viele Stoffe tabelliert. Eine Sorption von organischen Substanzen findet vor allem an organischem Material statt. Sie ist umso stärker, je hydrophober die Verbindung ist. Als Mass für die Hydrophobie dient der Verteilungskoeffizient zwischen Oktanol und Wasser ( $K_{ow}$ ). Neutrale Verbindungen mit einem  $K_{ow}$  von mehr als 1000 werden in einem gewissen Mass zurückgehalten. Auch kationische Stoffe können mit dem teilweise negativ geladenen organischen Material wechselwirken, während polare Anionen gar nicht zurückgehalten werden. Die Verdünnung mit Grundwasser spielt allgemein eine umso wichtigere Rolle, je weiter ein Brunnen von einem Fluss entfernt ist. In vielen Flussauen, wie zum Beispiel in der Thuraue, handelt es sich beim Grundwasser aber meist um ehemaliges Flusswasser, das einfach an anderer Stelle infiltriert ist. Mithilfe von Indikatoren wie der Leitfähigkeit oder der Temperatur können Hydrologen die Fließwege vom Fluss- zum Grundwasser sowie das Alter des Wassers bestimmen (siehe S. 4).

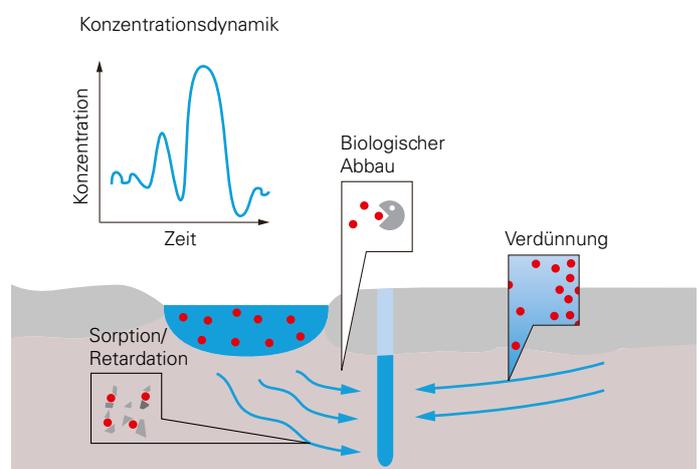


Abb. 1: Schema der Uferfiltration vom Gewässer zum Trinkwasserbrunnen und wichtige Prozesse, die zu einer Veränderung der Schadstoffkonzentration führen können.

### Rund 100 organische Mikroschadstoffe im Uferfiltrat

Innerhalb des Projekts «Restored corridor dynamics» (Record) haben wir das Verhalten von Medikamenten und Pflanzenschutzmitteln während der Passage vom Fluss- zum Grundwasser in der Thurau untersucht. Das Teilprojekt wurde vom Bundesamt für Umwelt finanziert. Als voralpiner Fluss weist die Thur stark schwankende Wasserstände auf. Das Wasser ist zudem bis zum Trinkwasserbrunnen nur einige Tage unterwegs. Um diesem Umstand Rechnung zu tragen, haben wir im Unterschied zu früheren Studien bei verschiedenen Wasserständen Proben mit einer hohen zeitlichen Auflösung genommen. Um zu bestimmen, welche Substanzen vorkommen und wie gut die Filterleistung der Untergrundpassage ist, nahmen wir im Untersuchungsgebiet Niederneunforn (TG) zu verschiedenen Zeiten des Jahres insgesamt drei Flussproben und 32 flussnahe Grundwasserproben (Abb. 2). Proben von je einem Liter konzentrierten wir mittels Festphasenextraktion auf, trennten sie mit der Flüssigkeitschromatografie auf und wiesen die einzelnen Stoffe mit hochauflösender Massenspektrometrie spezifisch nach. Die Methodik erlaubte die gleichzeitige Bestimmung von 250 verschiedenen Substanzen; heute weisen wir sogar 500 Stoffe nach [1]. Der Fokus lag auf Pflanzenschutzmitteln, Medikamenten, Bioziden, Korrosionsschutzmitteln, künstlichen Süßstoffen und einigen ihrer Abbauprodukte. Knapp 100 Stoffe kamen im Konzentrationsbereich von 0,1 bis 400 Nanogramm pro Liter vor. Die Anzahl der Nachweise war im Fluss- und

im Grundwasser ähnlich, die Konzentrationen im Grundwasser waren aber generell geringer (Abb. 3). Rund 60 Prozent der Nachweise im Thurwasser traten in Konzentrationen von weniger als 10 Nanogramm pro Liter auf; im Grundwasser waren es sogar 72 Prozent. Addiert man alle Konzentrationen zusammen, wies das Flusswasser im Durchschnitt  $1,3 (\pm 0,5)$  Mikrogramm pro Liter und das Grundwasser  $0,6 (\pm 0,2)$  Mikrogramm pro Liter auf. Im Grundwasser überschritten nur drei Stoffe 100 Nanogramm pro Liter: das Korrosionsschutzmittel Benzotriazol, der künstliche Süßstoff Sucralose und das Pestizidabbauprodukt Desphenylchloridazon.

### Uferinfiltrationszone eliminiert diverse Medikamente

Bei einer Auswahl von Stoffen untersuchten wir die Passage vom Fluss ins Grundwasser während Trockenwetterbedingungen genauer und beprobten dazu verschiedene Brunnen entlang der Flussrichtung. Eine ganze Reihe von Arzneimitteln (Diclofenac, Atenolol, Metoprolol, Lidocain) fand sich im Fluss, aber nicht im Grundwasser. Dies deutet auf eine Elimination dieser Stoffe hin. Die Stoffkonzentrationen in den ersten flussnahen Brunnen mit sehr geringem Wasseralter von bis zu einem Tag lagen bereits beträchtlich tiefer als jene im Fluss. Daher scheint der überwiegende Abbau bereits in der ersten Infiltrationszone zu geschehen. Dagegen zeigten das als persistent bekannte Antiepileptikum Carbamazepin, zwei seiner Ausscheidungsprodukte und die Arzneimittel Sulfamethoxazol,

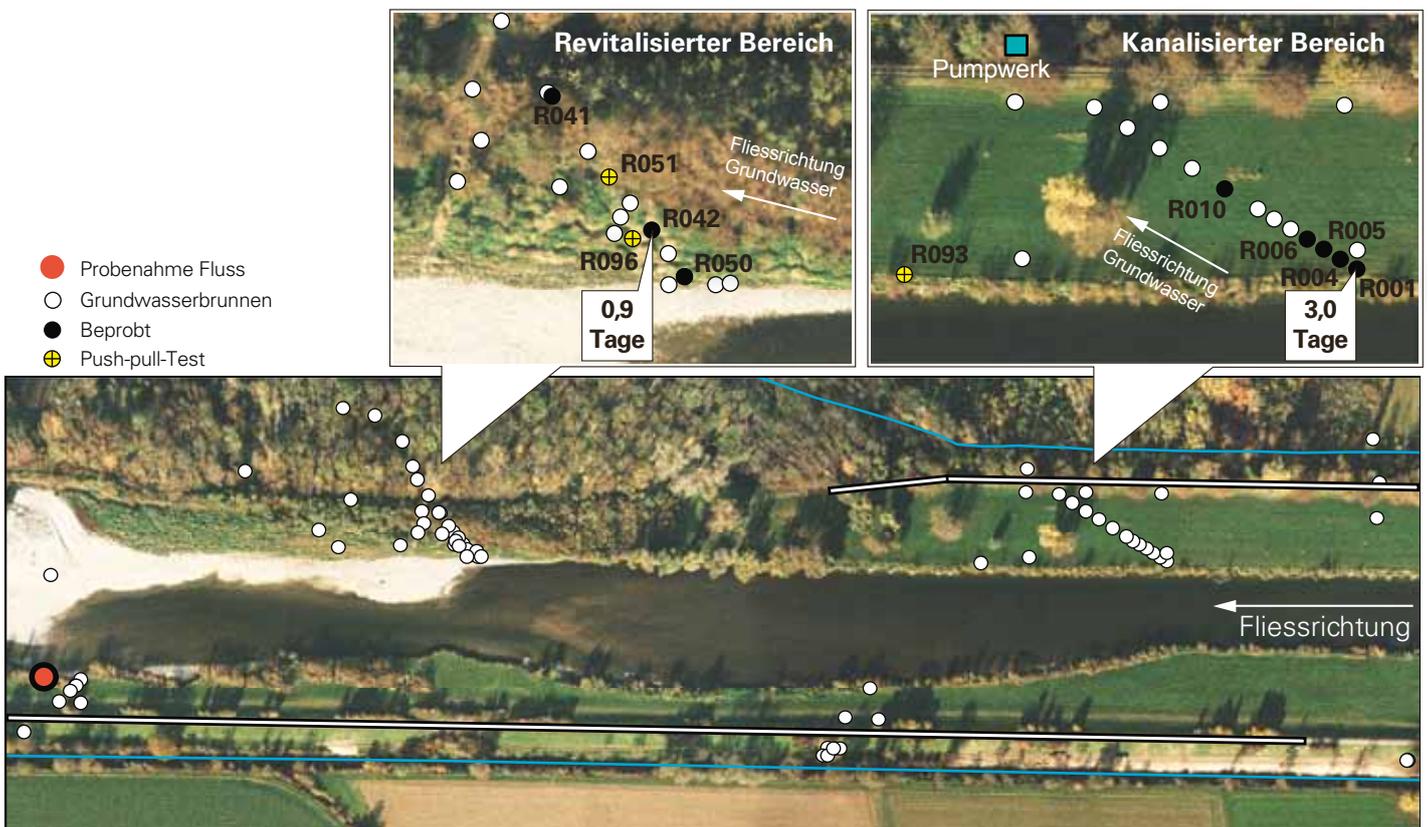


Abb. 2: Untersuchungsgebiet an der Thur mit Vergrößerung der Transekte in einem revitalisierten und einem kanalisiertem Bereich (mittleres Wasseralter für ausgewählte Brunnen angegeben).

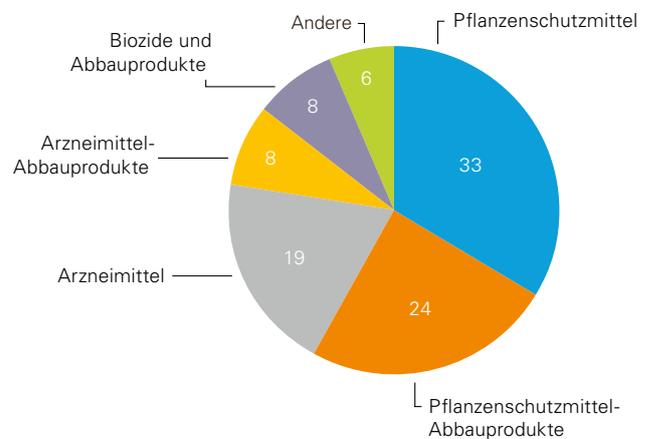
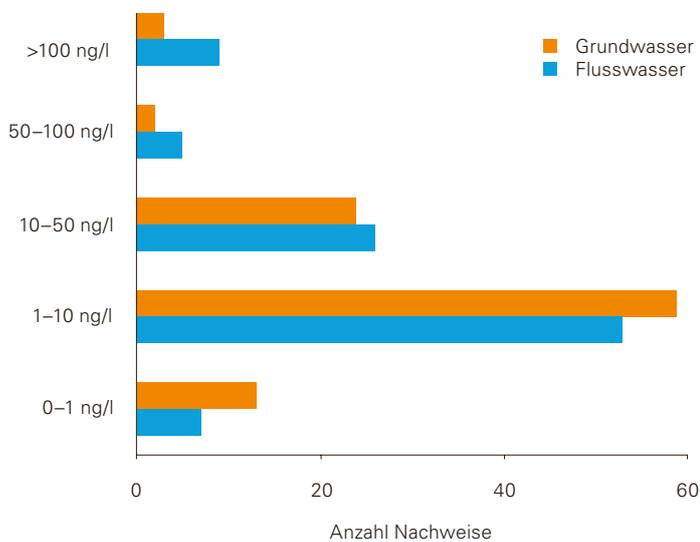


Abb. 3: Anzahl gefundener Stoffe (98 von 250 untersuchten) aus verschiedenen Stoffklassen (rechts) und Vergleich ihrer Konzentrationen im Flusswasser der Thur und im flussnahen Grundwasser (links).

Tramadol und Venlafaxin stabile Konzentrationen. Sie wurden während der Passage im Uferfiltrat nicht abgebaut und auch im Trinkwasserbrunnen gefunden. Diese Resultate stimmen überein mit Untersuchungen des Amtes für Abfall, Wasser, Energie und Luft des Kantons Zürich für weitere Uferfiltrate [2], mit unseren eigenen aktuellen Analysen im Kanton Basel-Landschaft und mit Studien in Deutschland [3]. Die niedrigen Konzentrationen gefährden nach aktuellem Wissensstand die Gesundheit nicht. Langlebige Stoffe sind gemäss Gewässerschutzverordnung aber grundsätzlich unerwünscht. Sie lassen sich mit einer Oxidation oder Aktivkohlebehandlung weitgehend eliminieren (siehe S. 30).

#### Verhalten während eines Hochwassers

Um das Verhalten während eines Hochwassers zu studieren, analysierten wir Flusswasserproben, die während der Applikationsperiode von Pflanzenschutzmitteln im Frühling 2010 bei mehreren Hochwassern automatisch regelmässig über einen bestimmten Zeitraum genommen wurden. Manuell beprobten wir die Grundwasserbrunnen in den beiden Transekten im kanalisiertem und im revitalisierten Bereich regelmässig über 12 Tage (Abb. 4).

Abbildung 5 zeigt die Konzentrationsdynamik verschiedener Substanzen während eines Hochwassers. Vermutlich vom Regen von frisch gespritzten Feldern abgeschwemmt gelangten erhebliche Mengen des Herbizids Methylchlorphenoxyessigsäure (MCPA) in die Thur. Trotzdem trat MCPA nur im Grundwasser mit einem Wasseralter von weniger als einem Tag in Konzentrationen über der Nachweisgrenze (1 Nanogramm pro Liter) auf. Das Flusswasser im Uferbereich wird kaum verdünnt und der sehr polare Stoff (anionisch,  $\log K_{ow} = 2,4$ ) sorbiert nicht. Demzufolge wird MCPA in der Uferfiltrationszone mit einer Halbwertszeit von einigen Stunden biologisch abgebaut. Im Gegensatz dazu wurden die Arzneimittel Carbamazepin und Acetamidoantipyrin im Fluss wegen des Hochwassers stärker verdünnt als normal. Daher gilt es, die Aufenthaltszeit in der Infiltrationszone zu beachten, wenn die Grundwasserkonzentrationen interpretiert werden. Das persistente Carbamazepin zeigte wie bei Niedrigwasser keine Konzentra-

tionsabnahme im Grundwasser. Das polare 4-Acetamidoantipyrin ( $\log K_{ow} = 0,15$ ) nahm dagegen auf unter 20 Prozent der Flusswasserkonzentrationen ab, da es abgebaut wurde. Das stimmt mit Untersuchungen an einem anderen Thur-Abschnitt sowie mit weiteren Studien überein [4].

#### Untersuchung des biologischen Abbaus mit Push-pull-Tests

Um die Elimination der Mikroschadstoffe im Feld genauer zu untersuchen und Abbauraten im Feld zu bestimmen, führten wir mit Erlaubnis des Kantons in einigen Brunnen, die nicht in der Nähe des Trinkwasserbrunnens lagen, so genannte Push-pull-Versuche durch [5]. Dabei versetzten wir 500 Liter Grundwasser mit dem Farbstoff Fluorescein und einigen gut abbaubaren Stoffen (MCPA, 2,4-Dichlorphenoxyessigsäure, Mecoprop, Atenolol, Metoprolol und Diclofenac) in einer Endkonzentration pro Substanz von 100 Nanogramm pro Liter. Die Lösung pumpeten wir in einen Grundwasserbrunnen und nach 0,5 bis 4 Stunden wieder herauf. Der im gepumpten Grundwasser verbliebene Farbstoff zeigt an, wie stark die Lösung im Grundwasserleiter verdünnt wurde. Die darüber hinausgehende prozentuale Abnahme der Stoffe ist auf biologischen Abbau zurückzuführen, da alle Stoffe aufgrund ihrer Stoffeigenschaften nicht im Untergrund sorbieren.

Mit einem einfachen Strömungsmodell konnten wir die Halbwertszeiten für den Abbau direkt im Feld bestimmen. Sie liegen bei 0,5 bis 6,7 Stunden und zeigen damit ein bemerkenswert hohes Selbstreinigungspotenzial der Infiltrationszone für diese abbaubaren Stoffe an. Die fast vollständige Bildung des Abbauprodukts Atenololsäure aus Metoprolol und Atenolol unterstützt dies, zeigt aber gleichzeitig, dass auch Abbauprodukte je nach ihren ökotoxikologischen Eigenschaften problematisch sein können. Bei einem Versuch im Winter, als die Grundwassertemperatur nur 4 Grad Celsius betrug, fand kein nennenswerter Abbau statt. Vermutlich verlangsamte die tiefe Temperatur die mikrobiellen Prozesse zu sehr. Dies bestätigt, dass Randbedingungen wie eine gewisse Temperatur den Abbau stark beeinflussen.

**Belastungen minimieren trotz sicherem Trinkwasser**

Die vorgestellten Untersuchungen zeigen, dass eine ganze Bandbreite von Mikroschadstoffen, die in Schweizer Flüssen zu finden ist, ins Uferfiltrat gelangt. Unter den richtigen Randbedingungen, das heisst bei ausreichender Temperatur und genügend Sauerstoff, bauen Mikroorganismen jedoch viele Stoffe ab. Das konnten wir an der Thur nachweisen. Zurzeit überprüfen wir die Befunde an weiteren Standorten im Kanton Basel-Landschaft. Trotz Abbau und Sorption gelangen gewisse langlebige Stoffe ins Trinkwasser. Die Schadstoffkonzentrationen in den Gewässern möglichst tief zu halten, ist deshalb oberstes Gebot. Besonders wirksam ist es, die Einträge aus der Landwirtschaft zu minimieren und die Elimination von Mikroverunreinigungen in den Kläranlagen zu verbessern. Die Massnahmen wirken sich auch für die Wasserlebewesen positiv aus. Sie könnten in Zukunft an Bedeutung gewinnen, weil die Klimaänderung aufgrund geringer Niederschläge möglicherweise zu geringeren Stoffverdünnungen in den Flüssen führt.

Dass die Untergrundpassage des infiltrierten Flusswassers mindestens zehn Tage dauert, muss auch in revitalisierten Gebieten eingehalten werden. Das gewährleistet, dass Krankheitserreger in genügendem Mass eliminiert und Spurenstoffe ausreichend abgebaut werden. Zudem gewinnt man Zeit, um auf Extremereignisse reagieren zu können. Vitale Uferzonen verbessern die Selbstreinigung. Gleichzeitig haben sie einen grossen Erholungswert für den Menschen und erhöhen die Biodiversität. Die niedrigen Konzentrationen im Bereich von Nanogramm pro Liter, in denen einzelne Stoffe im Trinkwasser vorkommen, erscheinen aus heutiger Sicht für den Menschen nicht als gesundheitsgefährdend. Sie liegen deutlich unter den üblichen Schadstoffkonzentrationen in der Nahrung. Grundsätzlich sind langlebige künstliche Stoffe in unseren Gewässern und im Trinkwasser aber nicht erwünscht. Mit entsprechenden Aufbereitungsmethoden lässt sich die Belastung weiter reduzieren.

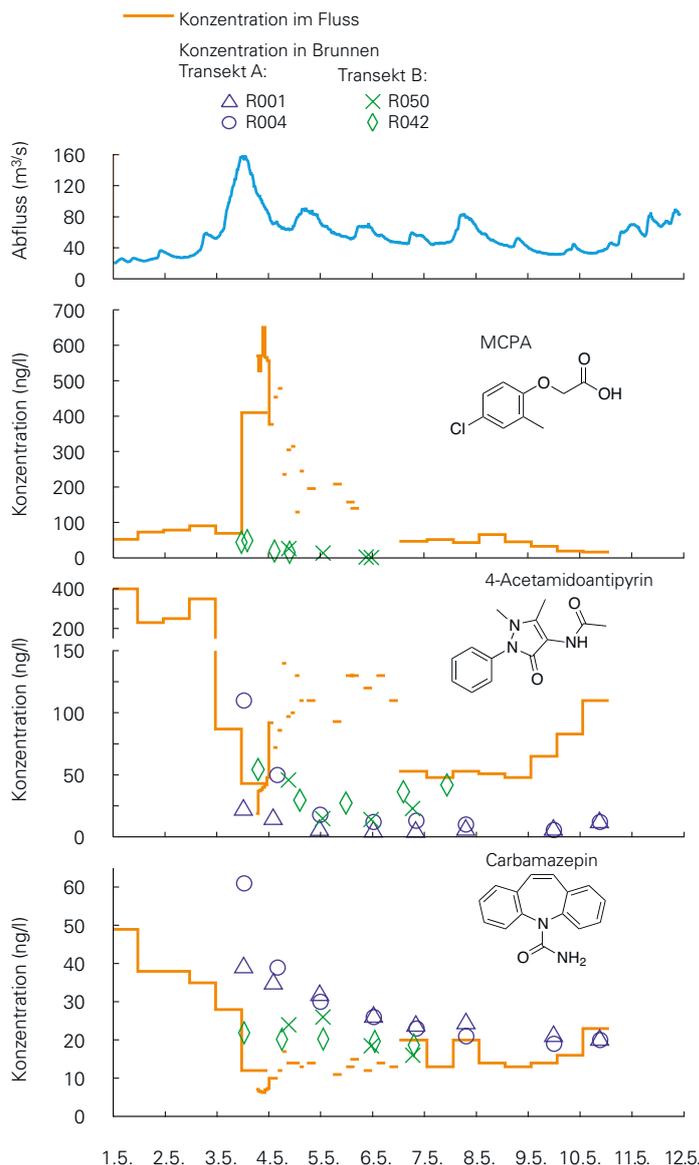


Abb. 5: Zeitlicher Verlauf der Konzentration von ausgewählten sehr gut (MCPA), gut (4-Acetamidoantipyrin) und gar nicht (Carbamazepin) abbaubaren Stoffen im Fluss und bei der Uferpassage während eines Hochwassers.



Abb. 4: Manuelle Probenahmen aus verschiedenen Tiefenhorizonten eines Grundwasserbrunnens.

Sebastian Hunscha

- [1] Singer H., Ruff M., Hollender J. (2012): Auf der Suche nach den Unbekannten. Eawag News 73, 6–11
- [2] Balsiger C., Blüm W., Jägg O., Niederhauser P., Rensch D., Peter A., Schaubhut R. (2013): Mikroverunreinigungen in der Glatt und im Grundwasser des Glatttals. Ergebnisse der Untersuchungskampagne 2012/13, Baudirektion Kanton Zürich
- [3] Storck F. R., Schmidt C. K., Lange F. T., Brauch H.-J. (2013): Ermittlung wichtiger Einflussgrössen auf die Entfernung organischer Spurenstoffe bei der Uferfiltration in den USA und in Deutschland, GWF (Wasser/Abwasser) 154 (2), 208–215
- [4] Hunscha S., Singer H. P., Mc Ardell C. S., Frank C. E., Hollender J. (2012): Multiresidue analysis of 88 polar organic micropollutants in ground, surface and wastewater using online mixed-bed multilayer solid phase extraction coupled to high performance liquid chromatography-tandem mass spectrometry, Journal of Chromatography A 1268, 74–83
- [5] Hunscha S., Rodriguez D., Schroth M., Hollender J. (2013): Degradation of polar organic micropollutants during riverbank filtration – Complementary results from spatiotemporal sampling and push-pull tests, Environmental Science & Technology 47, 11512–11521



Samuel Diem hat an der Eawag doktriert und arbeitet heute bei der AF-Consult Switzerland AG in Baden-Dättwil  
samuel.diem@afconsult.com

# Uferfiltration im Kontext der Klimaänderung

Mit dem Klimawandel steigen die Wassertemperaturen und verändern sich die Abflussregime der Flüsse. Experimente an der Thur und im Labor zeigen, wie derartige Veränderungen die biogeochemischen Prozesse in der Infiltrationszone und die Qualität des Uferfiltrats beeinflussen. Ein mathematisches Modell erlaubt es, Risiken für die Trinkwassergewinnung abzuschätzen.

In der Schweiz geniessen wir eine ausgezeichnete Trinkwasserqualität. Der Hitzesommer 2003 stellte diese Selbstverständlichkeit jedoch in Frage. In mehreren Uferfiltrationssystemen, die insgesamt zirka 30 Prozent unseres Trinkwassers sicherstellen, trat eine vollständige Zehrung des gelösten Sauerstoffs auf. In einzelnen Pumpwerken enthielt das Wasser unerwünschte gelöste Eisen und Mangan. Während die heutigen meist oxischen Verhältnisse in der Infiltrationszone nur minimale Wasseraufbereitungsmassnahmen erfordern, müssten die Wasserversorger bei langanhaltenden anoxischen Bedingungen einen deutlichen Mehraufwand betreiben. Für die Sommermonate im Jahr 2085 prognostizieren Klimamodelle, dass die Lufttemperatur um durchschnittlich 4 bis 5 Grad Celsius zunehmen und der Niederschlag um 25 Prozent abnehmen wird [1]. Das führt bei Flüssen, die nicht von Gletschern gespeist sind, zu einer Abnahme des Abflusses [2]. Zusätzlich werden Hitzewellen wie im Sommer 2003 voraussichtlich häufiger und intensiver auftreten. Für die Uferfiltration bleibt dies nicht ohne Folgen.

## Prozessverständnis benötigt

Während der Uferfiltration finden physikalisch-chemische und biologische Prozesse statt, die wesentlich zur Reinigung des mit Spurenstoffen und pathogenen Keimen belasteten Flusswassers beitragen. Einer der wichtigsten Vorgänge ist der mikrobielle Abbau von organischem Material, das in gelöster und partikulärer Form vorliegt (Abb. 1). Dafür benötigen die Mikroorganismen gelösten Sauerstoff. Je besser das organische Material verfügbar ist und je höher die Temperaturen sind, desto aktiver sind die Mikroorganismen und desto mehr Sauerstoff verbrauchen sie. Bei kompletter Sauerstoffzehrung spricht man von anoxischen Verhältnissen. In diesem Fall verwenden die Mikroorganismen für den Abbau Nitrat (Nitratreduktion). Wenn dieses aufgebraucht ist, wechseln sie auf im Sediment gebundene Eisen- und Manganoxide (Abb. 1). Die Reduktion von Eisen- und Manganoxiden setzt gelöstes Eisen und Mangan frei, die aus technischen, toxikologischen sowie ästhetischen Gründen im Trinkwasser unerwünscht sind und durch zusätzliche Aufbereitungsschritte entfernt werden müssen.

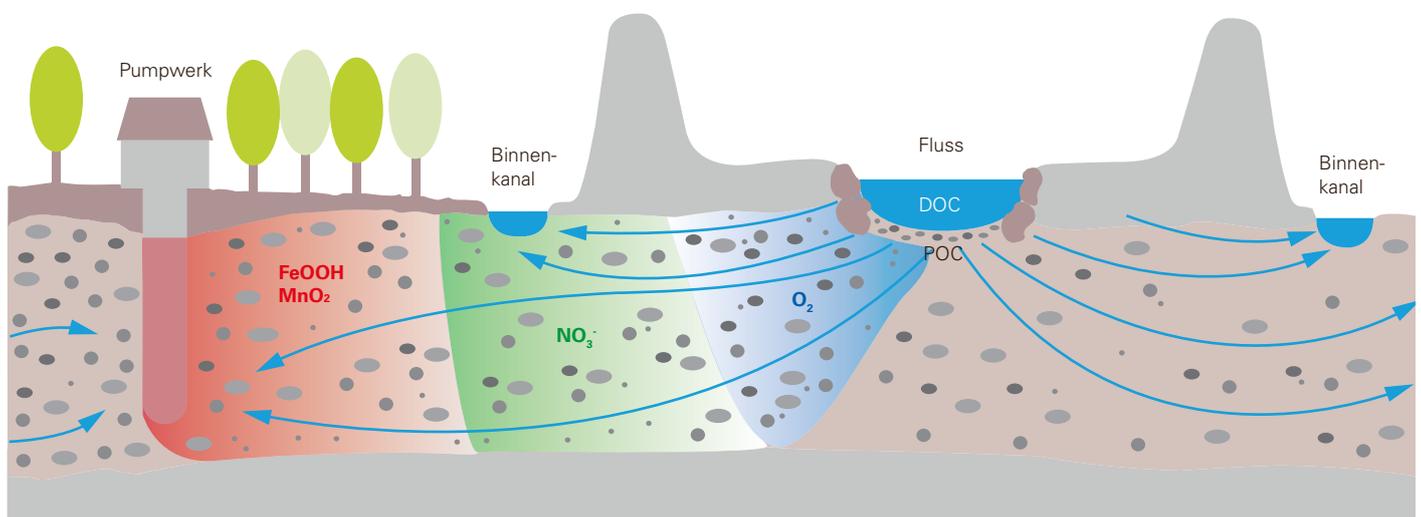


Abb. 1: Schematische Darstellung der Uferfiltration. Zum Abbau von gelöstem (DOC, dissolved organic carbon) und partikulärem organischem Material (POC, particulate organic carbon) benutzen Mikroorganismen zuerst Sauerstoff ( $O_2$ ), dann Nitrat ( $NO_3^-$ ) und schliesslich Eisen- und Manganoxide ( $FeOOH$ ,  $MnO_2$ ).

Nach der gängigen Vorstellung führen geringere Abflüsse wegen der kleineren Verdünnung des geklärten Abwassers zu erhöhten Konzentrationen gelösten organischen Materials. Erwartungsgemäss steigert dies den Abbau des organischen Materials und verstärkt die Sauerstoffzehrung. Aufgrund der prognostizierten erhöhten Intensität und Häufigkeit von Hitzewellen dürfte in Zukunft das Risiko anoxischer oder gar eisen- und manganreduzierender Verhältnisse ansteigen. Um dieses Risiko abschätzen zu können, braucht es ein vertieftes Verständnis, wie die mikrobiellen Abbauprozesse von den Klimavariablen Temperatur und Abfluss abhängen. Dieses Prozessverständnis zu erlangen und in einem Modell zu quantifizieren, war Ziel unseres Forschungsprojekts an der Eawag.

**Temperatureffekt: wie erwartet oder doch nicht ganz?**

Um zu untersuchen, wie die mikrobiellen Abbauprozesse von der Temperatur abhängen, nahmen wir an der Thur in Niederneunforn bei typischen Sommer- und Winterbedingungen Fluss- und Grundwasserproben. In den Proben bestimmten wir die Konzentrationen des gelösten Sauerstoffs, des gelösten organischen Kohlenstoffs (DOC) und des Nitrats. Die vorgefundenen Bedingungen bildeten wir anschliessend in Säulenversuchen nach. Im Sommer war der gelöste Sauerstoff bei einer Messstelle, die nur wenige Meter vom Fluss entfernt liegt, bereits fast vollständig aufgebraucht. Eine Nitratzehrung trat aber nicht auf. Nitrat bildet gewissermassen einen Puffer, bevor sich Verhältnisse einstellen, die zur reduktiven Auflösung von Eisen- und Manganoxiden führen. Wie erwartet war die Sauerstoffzehrung unter Sommerbedingungen deutlich grösser als unter Winterbedingungen. Die DOC-Zehrung blieb jedoch entgegen unseren Erwartungen unter beiden Temperaturregimen im Feld und in den Säulenversuchen gleich (Abb. 2). Mikroorganismen benötigen im Durchschnitt ein Mol Sauerstoff, um ein Mol organischen Kohlenstoff zu oxidieren. Der Vergleich der beiden Grössen zeigt, dass im Sommer die DOC-Zehrung deutlich kleiner ist und die gemessene Sauerstoffzehrung nicht zu erklären vermag. Die zusätzliche Zehrung des Sauerstoffs wird höchstwahrscheinlich durch den Abbau von partikulärem organischem Material (POC) hervorgerufen [3]. Das bedeutet, dass im Sommer nicht das gelöste, sondern das partikuläre organische Material für den grössten Teil der Sauerstoffzehrung verantwortlich ist.

**Abflusseffekt: anders als erwartet**

Anhand periodischer Probenahmen in Niederneunforn während fünf Jahren, die ein breites Temperatur- und Abflussspektrum umfassen, untersuchten wir, welchen Effekt der Abfluss auf die Sauerstoffzehrung und den Abbau des organischen Materials hat. Unsere Daten widersprechen der Vorstellung, dass Niedrigwasser zu höheren DOC-Konzentrationen und somit zu einer erhöhten Zehrung des DOC und des gelösten Sauerstoffs führen soll. Die DOC-Konzentration im Fluss nahm bei niedrigem Abfluss eher ab als zu. Die DOC-Zehrung wies keine signifikante Abhängigkeit vom Abfluss auf. Für die Sauerstoffzehrung ergab sich (nach Kompensation der Temperaturabhängigkeit) sogar eine stark positive Korrelation mit dem Abfluss: Die Sauerstoff-

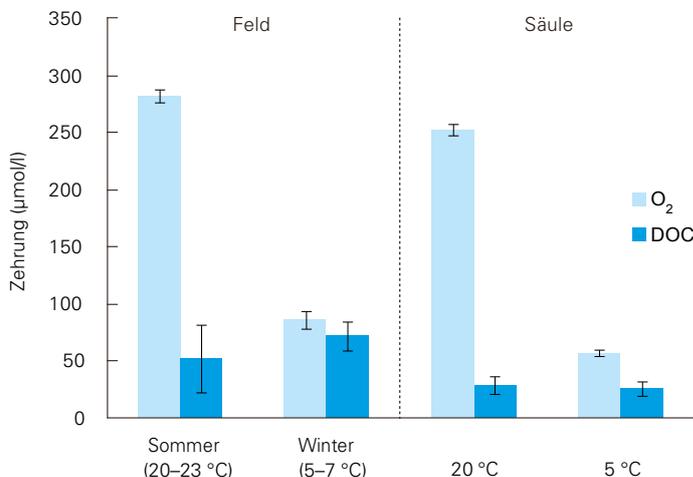


Abb. 2: Zehrung des gelösten Sauerstoffs (O<sub>2</sub>) und des gelösten organischen Materials (gemessen als DOC) unter Sommer- und Winterbedingungen im Feld und in der Säule (modifiziert nach [4]).

zehrung nahm bei höheren und nicht wie erwartet bei niedrigeren Abflüssen zu. Es liegt nahe, dass ein verstärkter Abbau von partikulärem organischem Material (POC) die Sauerstoffzehrung bei steigendem Abfluss ankurbelt. Denn Flüsse weisen bei stärkerem Abfluss erhöhte POC-Konzentrationen auf (Trübung, Abb. 3). Dadurch gelangt auch mehr POC in gut durchlässige Flussbett-sedimente. Die grössere Menge an organischen Partikeln steigert dort folglich den mikrobiellen Abbau und damit die Zehrung des Sauerstoffs.



Abb. 3: Feldstandort Niederneunforn bei Hochwasser. Bei hohen Abflüssen führt die Thur mehr partikuläres organisches Material mit sich.

Andreas Schödt, www.aireyech

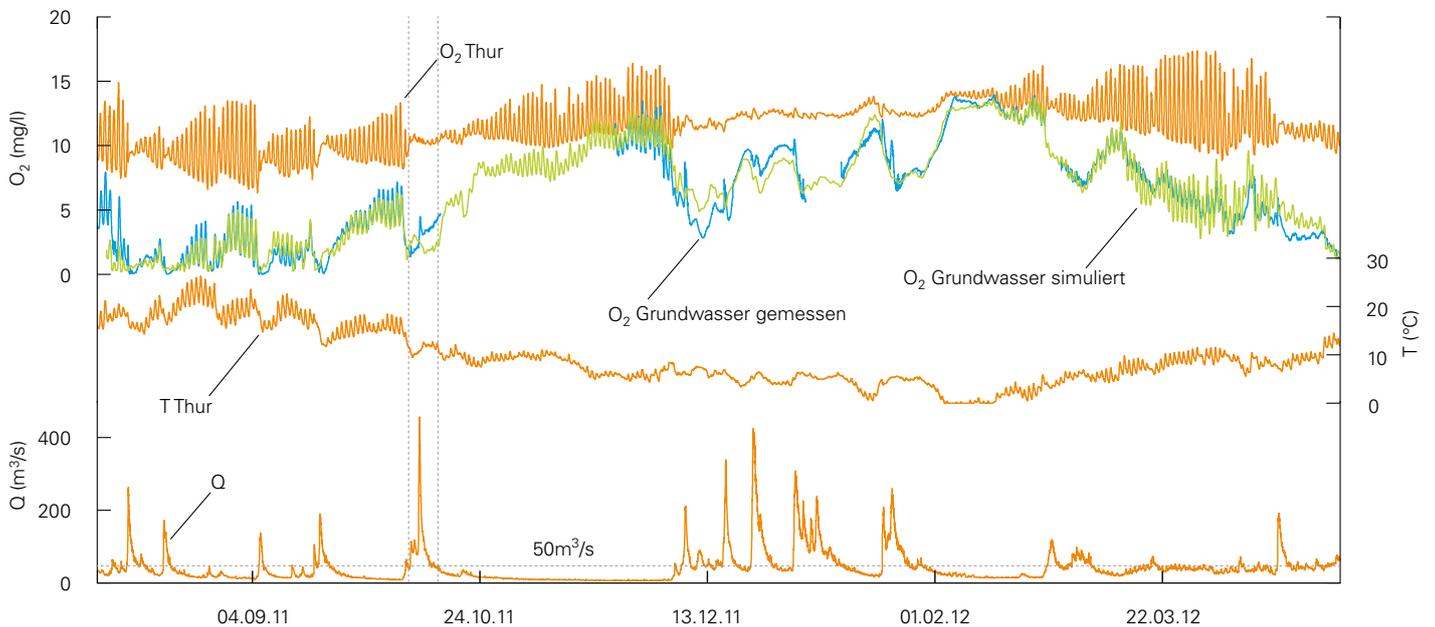


Abb. 4: Gemessene (blau) und simulierte (grün) Sauerstoffkonzentration ( $O_2$ ) im Grundwasser sowie Messungen der Temperatur (T), des Abflusses (Q) und der Sauerstoffkonzentration in der Thur (orange) (modifiziert nach [5]).

### Die Sauerstoffzehrung im mathematischen Modell

Mit einem Modell, das die Abbauprozesse, deren Abhängigkeiten und Dynamik erfasst und quantitativ beschreibt, lässt sich das Risiko von anoxischen Verhältnissen unter künftigen klimatischen und hydrologischen Bedingungen abschätzen. Zu diesem Zweck haben wir die Sauerstoffkonzentrationen im Fluss und im Grundwasser während neun Monaten mit hoher zeitlicher Auflösung gemessen (Abb. 4). Die Periode deckt ein breites Spektrum an Flusstemperaturen (0 bis 22 Grad Celsius) und Abflüssen (5 bis 450 Kubikmeter pro Sekunde) ab.

Aufgrund der Fotosynthese-Aktivität und Respiration von Algen und Bakterien schwankt die Sauerstoffkonzentration im Fluss im Lauf des Tages. Die Schwankungen lassen sich in verzögerter und gedämpfter Form auch im Grundwasser nachweisen. Die Sauerstoffzehrung zwischen Fluss und Grundwasser ist von einer starken Saisonalität geprägt. Diese wird überlagert durch kurzzeitige Einbrüche der Sauerstoffkonzentration im Grundwasser, die deutlich mit erhöhten Abflüssen korrelieren (Abb. 4). Wie bereits erwähnt, ist dieser Abflusseffekt wahrscheinlich dem erhöhten Eintrag von partikulärem organischem Material ins Flussbett zuzuschreiben (Abb. 3), der die mikrobielle Aktivität und somit die Sauerstoffzehrung steigert.

Um die Sauerstoffdynamik im Grundwasser zu simulieren, wählten wir den Ansatz des so genannten stochastisch-konvektiv reaktiven Transports. Dabei wird das System zwischen Fluss und einer Grundwassermessstelle als eine Vielzahl von Fließpfaden dargestellt. Entlang dieser Pfade bewegen sich Wasserpakete mit unterschiedlicher Geschwindigkeit und erreichen die Mess-

stelle nach unterschiedlichen Fließzeiten. In jedem der Wasserpakete wird Sauerstoff mit einer bestimmten Rate gezehrt. Die Abbaurate hängt dabei sowohl von der Temperatur als auch vom Abfluss ab. Der Abfluss dient im Modell als Stellvertreter für die Verfügbarkeit partikulären organischen Materials.

### Präzise Vorhersagen möglich

Die Temperaturabhängigkeit der Abbaurate organischen Materials und somit des Sauerstoffs ist bereits gut bekannt [6, 7]. Die Abhängigkeit vom Abfluss war hingegen bislang noch nicht untersucht worden. Wir leiteten sie durch Kombination mehrerer etablierter physikalischer und kinetischer Beziehungen sowie basierend auf den gemessenen Sauerstoffzeitreihen her [5]. Die Abbaurate lässt sich nun für beliebige Temperaturen und Abflüsse bestimmen (Abb. 5). Die höchsten Abbauraten treten an unserem Standort bei hohen Temperaturen und Abflüssen von mehr als 50 Kubikmeter pro Sekunde auf. Demnach besteht das höchste Risiko für anoxische Verhältnisse während Hitzewellen kombiniert mit entsprechend hohen Abflüssen. Solche Abflüsse sind für die Thur keine Seltenheit (Abb. 4) und werden zum Beispiel nach einem Gewitter im Einzugsgebiet erreicht.

Unter Berücksichtigung der Temperatur- und Abflussabhängigkeit der Abbaurate kann das Modell die gemessene Sauerstoffdynamik im Grundwasser mit hoher Verlässlichkeit nachbilden (Abb. 4). Es erfasst sowohl die langzeitigen Variationen bedingt durch saisonale und wetterbedingte Temperaturänderungen als auch die kurzfristigen Effekte während erhöhter Abflüsse. Das Modell ist somit in der Lage, die Sauerstoffkonzentration im Grundwasser für ein breites Temperatur- und Abflussspektrum

vorherzusagen. Nach geringfügigen Anpassungen lässt sich das Modell auch auf andere Standorte übertragen [5].

### Fazit

Anhand von Probenahmen im Feld und Säulenversuchen konnten wir zeigen, dass bei hohen Temperaturen im Sommer nicht wie erwartet das gelöste, sondern das partikuläre organische Material für den grössten Teil der Sauerstoffzehrung verantwortlich ist. Zusätzlich deuten unsere Daten darauf hin, dass während erhöhter Abflüsse partikuläres organisches Material mobilisiert und ins Flussbett eingetragen wird. Dies erhöht die mikrobielle Aktivität und die Sauerstoffzehrung.

Obwohl im Sommer an unserem Feldstandort der gelöste Sauerstoff nahezu vollständig gezehrt war, konnte die einsetzende Nitratreduktion nicht eindeutig nachgewiesen werden. Während künftiger Hitzewellen kann es aufgrund eines erhöhten Umsatzes von partikulärem organischem Material vermehrt zu anoxischen Verhältnissen in Fluss-Infiltrationszonen kommen. Es scheint jedoch genügend Nitrat vorhanden zu sein, um das System zu puffern, bevor eisen- und manganreduzierende Verhältnisse entstehen. Dabei ist anzumerken, dass die Nitratreduktion Nitrit freisetzt, was die Trinkwasserqualität beeinträchtigen kann.

Unser reaktives Transportmodell quantifiziert die Temperatur- und Abflussabhängigkeit der Sauerstoffzehrung und konnte die beobachtete Dynamik der Sauerstoffkonzentration im Grundwasser mit hoher Genauigkeit nachbilden. Der Modellansatz lässt sich auf andere Uferfiltrationssysteme übertragen und bildet eine gute Grundlage, um das Risiko anhaltender anoxischer Verhältnisse unter veränderten klimatischen Bedingungen abzuschätzen und rechtzeitig die nötigen Massnahmen ergreifen zu können.

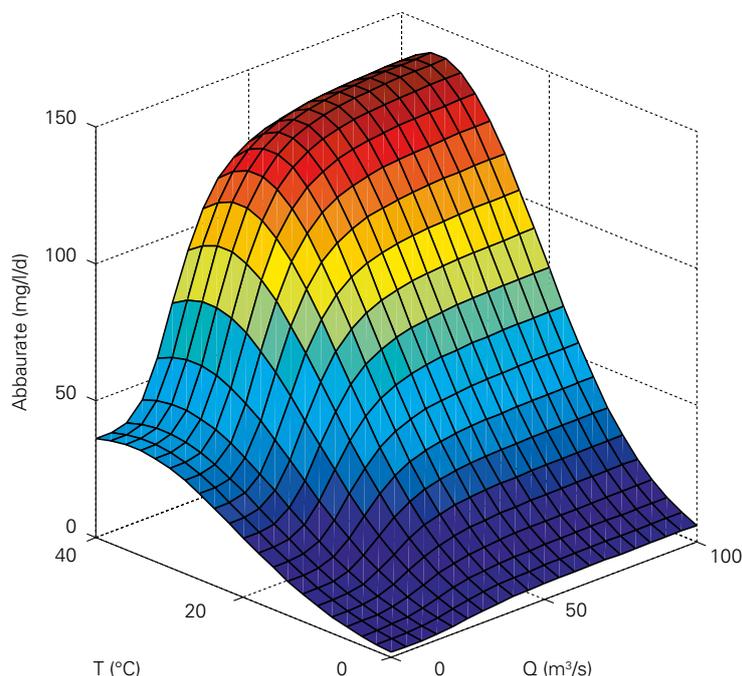


Abb. 5: Abbaureate des Sauerstoffs als Funktion der Flusstemperatur (T) und des Abflusses (Q).

- [1] C2SM, MeteoSwiss, ETH, NCCR Climate and OcCC (2011): Swiss Climate Change Scenarios CH2011
- [2] Bundesamt für Umwelt (2012): Auswirkungen der Klimaänderung auf Wasserressourcen und Gewässer. Synthesebericht zum Projekt «Klimaänderung und Hydrologie in der Schweiz» (CCHydro)
- [3] 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
- [4] 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

- [5] Diem S., Cirpka O. A., Schirmer M. (2013): Modeling the dynamics of oxygen consumption upon riverbank filtration by a stochastic-convective approach. *Journal of Hydrology* 505, 352–363
- [6] O'Connell A. M. (1990): Microbial decomposition (respiration) of litter in eucalypt forests of south-western Australia: an empirical model based on laboratory incubations. *Soil Biology & Biochemistry* 22 (2), 153–160
- [7] Sharma L., Greskowiak J., Ray C., Eckert P., Prommer H. (2012): Elucidating temperature effects on seasonal variations of biogeochemical turnover rates during riverbank filtration. *Journal of Hydrology* 428, 104–115



Peter Huggenberger, Angewandte und Umwelt-Geologie,  
Departement Umweltwissenschaften, Universität Basel  
Koautoren: Jannis Epting, Stefan Scheidler, Annette Affolter  
peter.huggenberger@unibas.ch

# Ökologie und Wasserversorgung in urbanen Gebieten

In urbanen Gebieten werden Flüsse und flussnahes Grundwasser für Trink- und Prozesswasser stark genutzt. Auch Revitalisierungen, der Hochwasserschutz und Wasserhaltungen für Tiefbauten beeinflussen die Gewässersysteme. Mit adaptiven Ansätzen können die Herausforderungen eines nachhaltigen Ressourcenmanagements angegangen werden.

Um in Fliessgewässersystemen ein Minimum an ökologischen Funktionen sicherzustellen, verlangt das 2011 revidierte Schweizer Gewässerschutzgesetz, dass kanalisierte Flüsse und Bäche naturnah gestaltet werden. Die Forderung nach mehr Raum für Fliessgewässer für Revitalisierungen und zum Schutz vor Hochwasser kann zu Nutzungskonflikten mit den Betreibern flussnaher Trinkwasserfassungen führen.

## Instrument für nachhaltige Nutzung von Wasserressourcen

Der vorliegende Beitrag zeigt an Beispielen aus dem Birs- und Wiesetal (Abb. 1) auf, wie mit einem adaptiven Ressourcenmanagement [1] die Basis für eine Beurteilung des Ist-Zustandes von Grundwassersystemen erarbeitet werden kann. Der Ist-Zustand umfasst Kenntnisse der verschiedenen, meist instationären Randbedingungen eines definierten Grundwasserkörpers, der Dynamik des Grundwasserfließregimes und der Vielfalt an Nutzungen. Der Ist-Zustand bildet die Grundlage dafür, Nutzungsänderungen und Variantenstudien zu beurteilen oder Lösungen zu erarbeiten, die den Bereich Grundwasserschutz – Flussrevitalisierung – Hochwasserschutz betreffen. Durch gezielte Fragestellungen und Experimente nähert man sich beim adaptiven Ressourcenmanagement in einem strukturierten Prozess schrittweise an komplexe Systeme an. In urbanen Gebieten muss dabei eine Vielfalt an dynamischen

Prozessen berücksichtigt werden, etwa Anreicherungen und Entnahmen von Grundwasser, Randzuflüsse oder die räumlich und zeitlich variierende Interaktion zwischen Fluss und Grundwasser [2]. Entsprechend aufwändig ist es, Mess- und Modellsysteme aufzubauen, die den Ist-Zustand von Gewässersystemen einschliesslich deren Dynamik und Variabilität beschreiben. Mit einer Kombination verschiedener Methoden lassen sich der Ist-Zustand und die Dynamik regionaler Grundwassersysteme ermitteln: Hydrogeologische Modelle, die für bestimmte hydrologische Randbedingungen kalibriert wurden, tragen zur Erfassung des Ist-Zustandes von Gewässerressourcen bei. Für die Kalibrierung solcher Modelle braucht es Zeitreihen von Messdaten aus Grundwasser und Oberflächengewässern. Die Messsysteme können dabei gezielt auf verschiedene Fragestellungen ausgerichtet werden, etwa zu Veränderungen des regionalen Grundwasserfließregimes oder zur Interaktion zwischen Fluss und Grundwasser.

## Wechsel von Infiltration auf Exfiltration bei Hochwasser

Untersuchungen entlang verschiedener Gewässerabschnitte im unteren Birstal erlauben eine Beschreibung möglicher Prozesse, die zu berücksichtigen sind, wenn die Gefährdung flussnaher Wasserfassungen im urbanen Kontext abgeschätzt werden soll. Es ist dabei zentral, die Wasserbilanzen der Zu- und Abflüsse des

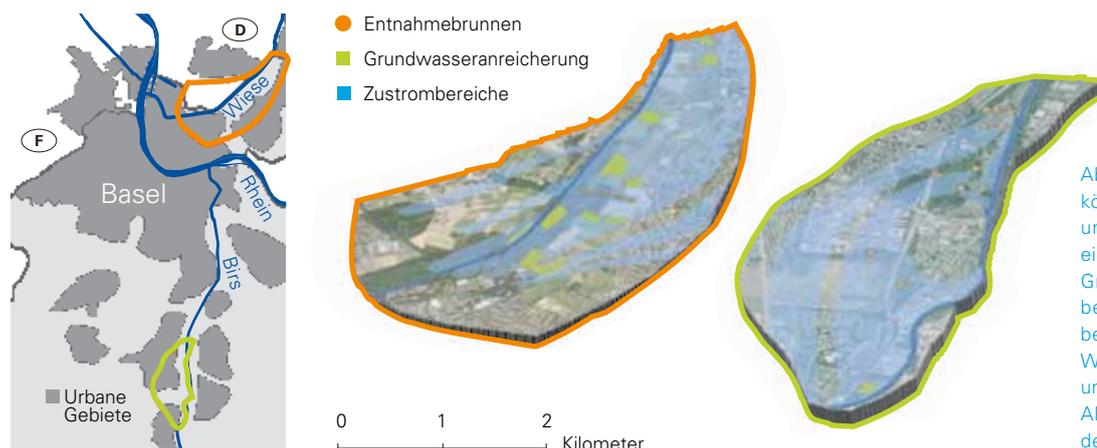


Abb. 1: Überblick der Grundwasserkörper im unteren Birstal (rechts) und in der Wieseebene (links) einschliesslich der Entnahmebrunnen, Grundwasseranreicherungen und berechneten potenziellen Zustrombereiche. Neben den Flüssen Birs und Wiese liegen auch Siedlungsgebiete und Bereiche mit landwirtschaftlichen Aktivitäten in den Zustrombereichen der Trinkwasserversorgung.

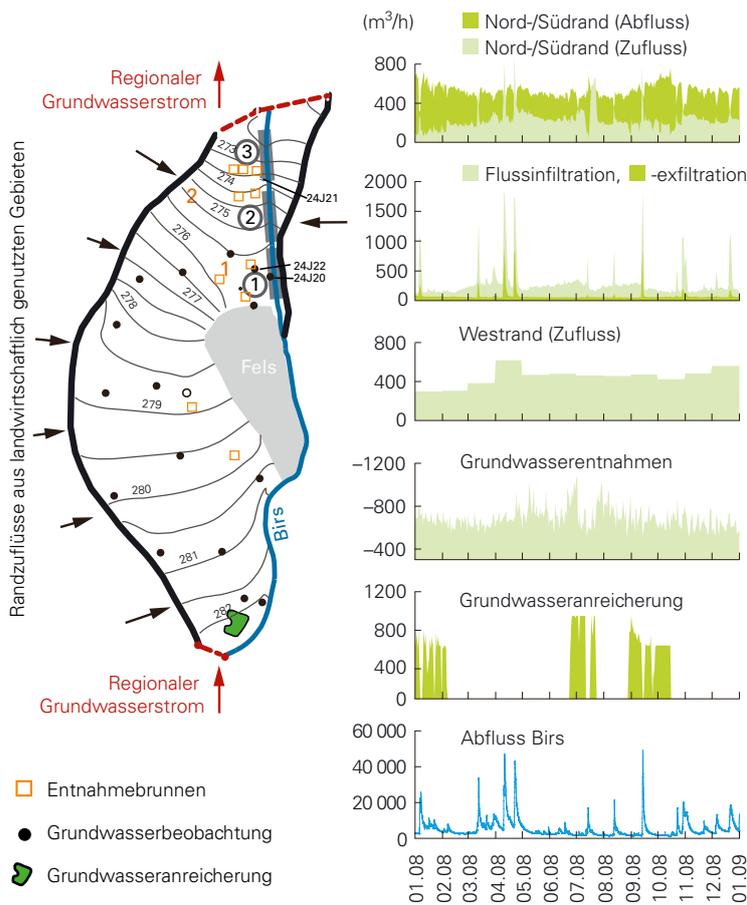


Abb. 2: Links: Grundwasserfließregime und Randzuflüsse zum Grundwasserkörper im unteren Birstal, rechts: zeitliche Dynamik der Randzuflüsse.

betrachteten Grundwasserkörpers zu kennen. Das beinhaltet, die Interaktion zwischen Oberflächen- und Grundwasser sowie die In- und Exfiltration bei unterschiedlichen hydrologischen und betrieblichen Randbedingungen für verschiedene Gewässerabschnitte zu ermitteln [3]. Im unteren Birstal zeigen die Grundwasserdaten im Abschnitt zwischen Aesch und Reinach (Abb. 2), dass das Grundwasser in verschiedenen Abschnitten unterschiedlich stark von der Grundwasseranreicherung, den Grundwasserentnahmen und vom Birs-Abfluss beeinflusst wird. Die schnelle Reaktion des Grundwasserfließregimes erklärt sich durch die hohe Instationarität der Zu- und Abflüsse und die hohe Durchlässigkeit der quartären Schotter (K-Werte von  $10^{-2}$  bis  $10^{-4}$  Meter pro Sekunde). Der Vergleich der Wasserbilanzen bei Niedrig- und Hochwasser illustriert die starke Beeinflussung des Grundwassers bei Hochwasser sowie die relativen Anteile der verschiedenen Zu- und Abflüsse (Abb. 2). Deutlich zu erkennen ist, dass der Anteil der Flussinfiltration über das Modellgebiet Aesch/Reinach gerechnet während Hochwassern um mehr als das Doppelte zunimmt. Ab einem bestimmten Abfluss (größer 30 Kubikmeter pro Sekunde) wird die Flusssohle aufgerissen, die Durchlässigkeit erhöht sich sprunghaft. Unmittelbar nach solchen Ereignissen beginnt sich die Durchlässigkeit der Flusssohle wieder zu verringern. Bis zum Zustand vor dem Hochwasser dauert es in einigen Flussabschnitten teilweise länger als 30 Tage (Abb. 3a).

Ein starker Anstieg des Grundwasserspiegels während Hochwasser kann lokal ebenfalls zu Veränderungen der In- und Exfiltration führen. So löste das fast 300-jährliche Hochwasserereignis an

der Birs vom 9. August 2007 (383 Kubikmeter pro Sekunde) einen ausserordentlich raschen Anstieg des Grundwasserspiegels aus. Dies veränderte das regionale Grundwasserfließregime massiv. Die einzelnen Flussabschnitte reagierten unterschiedlich auf das Hochwasser. Durch die schnelle Druckübertragung im Grundwasserleiter stieg der Grundwasserspiegel im Bereich einzelner Flussabschnitte höher als der Wasserpegel der Birs. Der Wasserfluss kehrte sich lokal um, so dass exfiltrierende und nicht mehr infiltrierende Verhältnisse herrschten (Abb. 3b).

Besonders deutlich wird der starke Einfluss von Hochwasserereignissen, wenn man die In- und Exfiltrationsverhältnisse verschiedener Teilstrecken der Birs vor, während und nach einem Ereignis betrachtet (Abb. 3c). Im südlich gelegenen Gewässerabschnitt liegt der Grundwasserspiegel bei durchschnittlichem Pegelstand unterhalb der Birssohle: Flusswasser infiltriert in den Grundwasserleiter. Nur bei extremen Hochwassern kann potenziell belastetes Flusswasserinfiltrat die flussnahen Trinkwasserbrunnen gefährden. Im mittleren Gewässerabschnitt können infiltrierende und exfiltrierende Verhältnisse vorkommen, im nördlichen Gewässerabschnitt liegt der Grundwasserspiegel immer höher als die Birssohle. In diesem Fall exfiltriert Grundwasser ins Oberflächengewässer. Trotz Flussnähe besteht hier kein Risiko einer mikrobiologischen Verunreinigung durch Flussinfiltrat.

**Der Einfluss von Siedlungen und der Landwirtschaft**

Eine Berechnung der relativen Anteile an Flusswasser und Grundwasser verschiedener Herkunft (Hauptgrundwasserstrom und Hangeinzugsgebiete) macht deutlich, dass flussnahe Trinkwasserbrunnen im Allgemeinen einen variablen Anteil an Flusswasserinfiltrat fördern. Die Zustrombereiche der einzelnen Trinkwasserbrunnen und ihre Variabilität zu ermitteln, stellt deshalb ein wichtiges Element der Analyse des Ist-Zustandes dar. Die mit Grundwassermodellen ermittelten Zustrombereiche hängen vom Betrieb der Grundwasser-Anreicherungsanlage, von den Entnahmemengen der Trinkwasserbrunnen und der Interaktion zwischen dem Fluss und dem Grundwasser ab. Auch intensiv genutzte Wohn-, Gewerbe- oder Industriegebiete beeinflussen die Zustrombereiche.

Landwirtschaftliche Aktivitäten hauptsächlich im westlichen Teil des Untersuchungsgebietes und im angrenzenden Einzugsgebiet können die Grundwasserqualität zusätzlich verändern (Abb. 1). Entsprechend zeigt sich der Einfluss der Landwirtschaft vor allem bei den Trinkwasserbrunnen am westlichen Rand des Grundwasserleiters. Die Nitratkonzentrationen im gefördertem Rohwasser lagen dort oft über 25 Milligramm pro Liter [4]. Eine Ausserbetriebnahme der Grundwasser-Anreicherungsanlage in der Gemeinde Aesch kann den Zustrom in Richtung des landwirtschaftlich genutzten Einzugsgebietes im Westen verlagern und erhöhte Nitratkonzentrationen im Grundwasser zur Folge haben. Die Analyse des Ist-Zustandes zeigt somit, dass im unteren Birstal potenzielle Grundwassergefährdungen nicht ausschliesslich von Flussinfiltrat ausgehen, sondern auch vom Zustrom aus Siedlungsgebieten und landwirtschaftlich genutzten Flächen.

### Mit Szenarien Lösungen evaluieren

Das urbane Gewässersystem in den Langen Erlen (Wieseebene auf deutschem und Schweizer Gebiet) umfasst 13 Brunnen und Brunnengruppen sowie 11 Grundwasseranreicherungsfelder. Gleichzeitig ist es eines der wichtigsten Naherholungsgebiete, Lebensraum für Pflanzen und Tiere und wird von der Land- und Forstwirtschaft genutzt. 2006 haben die Stimmbürger die Volksinitiative «Wiese Vital» angenommen. Diese verlangt eine ökologische Aufwertung der Wieseebene, inklusive der Revitalisierung des Flusses. Die Wiese-Kommission bestehend aus Mitgliedern verschiedener kantonaler Fachstellen, den Industriellen Werken Basel, deutschen Fachstellen und der Angewandten und Umwelt-Geologie der Universität Basel (AUG) erarbeitete ein Revitalisierungskonzept. Die Kommission war mit unterschiedlichsten Interessen und Vorschlägen konfrontiert, so dass deren Tragweite und die Auswirkungen auf das Grundwasserfließsystem kaum noch überschaubar waren. Deshalb schlug die AUG eine Szenarietechnik vor, mit der sich die Auswirkungen verschiedener Vorschläge auf die Grundwasserzirkulation mithilfe eines hochauflösenden Grundwassermodells visualisieren lassen [5]. Die ausgearbeiteten Szenarien (unterschiedliche betriebliche Randbedingungen sowie Massnahmen zur Revitalisierung) wurden im Zusammenhang mit einem Ist-Zustand diskutiert (Datengrundlage des modellierten Zeitraums vom 13.03.2002 bis 10.04.2002) (Abb. 4). Der Einfluss der ver-

schiedenen Szenarien auf das Gewässersystem liess sich damit herausarbeiten und die Aspekte der unterschiedlichen Grundwasserfließregime visualisieren. Die Ergebnisse können in die Evaluation von möglichen Anordnungen von Brunnen und Grundwasseranreicherungsfeldern einfließen. Die Berechnungen liefern auch erste Angaben für eine Kostenabschätzung der verschiedenen Varianten und eine Grundlage für die Information der Entscheidungsträger. Aus diesem Prozess resultierte ein Konzeptentwurf, der die Kommission der Regierung unterbreitet hat.

### Differenzierte Betrachtung erforderlich

Die Hauptziele des nachhaltigen Grundwasserschutzes sind Versorgungssicherheit und ausreichende Wasserqualität. Eine Analyse der Grundwassergefährdungen zeigt, dass ein nachhaltiger Grundwasserschutz bei flussnahen Wasserentnahmen in urbanen Gebieten eine differenzierte Betrachtung der verschiedenen Einflussfaktoren erfordert. So müssen Gefährdungen aus Industrie- und Siedlungsgebieten in die Überlegungen zum langfristigen Schutz der Wasserressourcen vermehrt einbezogen werden.

Untersuchungen an zahlreichen flussnahen Grundwasserfassungen vermitteln ein komplexes Bild der Dynamik der Interaktionen und Austauschprozesse zwischen Oberflächengewässern und dem Grundwasser. Nicht nur der relative Anteil von infiltrierenden

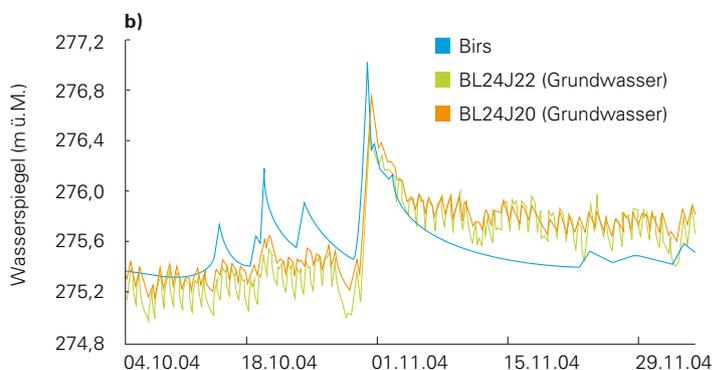
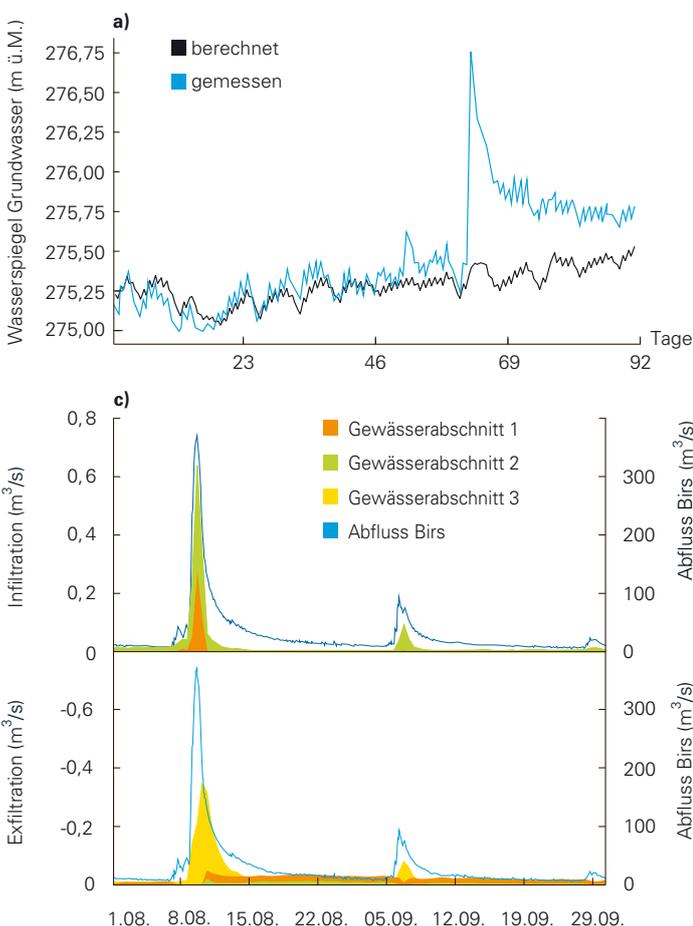


Abb. 3: a) Zeitreihen gemessener und modellierter flussnaher Grundwasserpegel für das Gebiet unteres Birstal: Die Diskrepanz zwischen gemessenen und modellierten Grundwasserpegeln zeigt veränderte Austauschprozesse nach einem Hochwasser. Nach zirka 30 Tagen ist der Ausgangszustand wieder erreicht. b) Veränderung der In- und Exfiltration vor und nach einem grossen Hochwasser: Vor dem Hochwasser besteht ein hydraulischer Gradient vom Fließgewässer in den Grundwasserleiter (Infiltration). Durch Druckübertragung verändert sich das regionale Grundwasserfließregime, so dass sich der hydraulische Gradient während und nach dem Hochwasser vom Grundwasser zum Fließgewässer umkehrt (Exfiltration). c) Variation der Austauschraten zwischen Fluss- und Grundwasser in verschiedenen Flussabschnitten vor, während und nach dem Jahrhunderthochwasser vom 9. August 2007 (aus [3]).

Oberflächenwasser variiert, sondern auch die Lage der Flussabschnitte mit hohen Infiltrationsraten. Experimente zeigen zudem, dass die Filterkapazität der Uferzone unter normalen Abflussverhältnissen für eine gute Wasserqualität meist ausreicht. Die Ursache für den Anstieg der Konzentration an Mikroorganismen in Oberflächengewässern hängt unter anderem mit Hochwasserentlastungen aus dem Siedlungsraum zusammen [6]. Aufgrund der neuen Erkenntnisse zur Ursache der Gefährdungen und der Möglichkeiten zur Elimination von Mikroorganismen durch eine Aufbereitung stellt sich die Frage, ob der Grundwasserschutz in urbanen Gebieten nicht neu gewichtet werden müsste. Mit den heutigen Kenntnissen der Gefährdungssituation würden viele flussnahe Brunnenstandorte nicht mehr bewilligt. Hingegen macht es wenig Sinn, flussnahe Wasserfassungen, deren Qualität gut ist, aufzugeben [7]. Es wäre

allerdings unzweckmässig, wenn nichtgesetzeskonforme Fassungen und Schutzzonen einer Revitalisierung im Wege stehen könnten. Solche Fassungen sollten ohnehin an einen besseren Standort verlegt werden.

Nutzungskonflikte im Spannungsfeld von Grundwasserschutz, Flussrevitalisierung und Hochwasserschutz sowie unterschiedliche Zuständigkeiten erfordern bei der Lösungsfindung Methoden, die Konsequenzen unterschiedlicher Vorschläge auf das Grundwasserfließregime sichtbar machen. Beim Projekt «Wiese vital» gelangte dazu eine Szenarientechnik zur Anwendung. Dieses Vorgehen führte auf der Ebene der Experten und der Vertreter kantonaler Fachstellen zu einem Konsens. Die gleiche Methode könnte solchen Projekten auch auf der politischen Entscheidungsebene zum Durchbruch verhelfen.

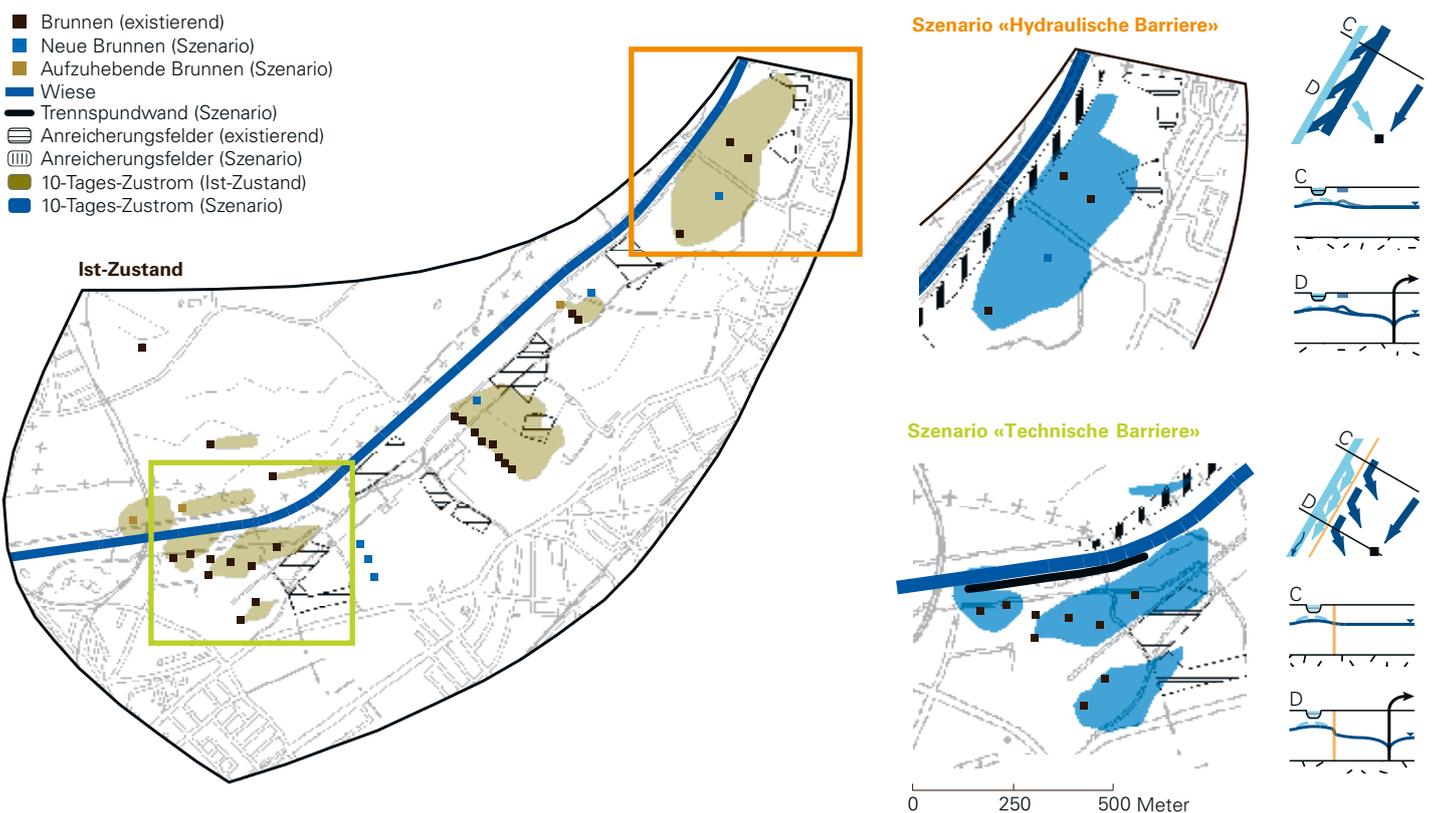


Abb. 4: Anwendungsbeispiel der Szenarientechnik für das Projekt «Wiese Vital». Dargestellt sind 10-Tages-Zustrombereiche. Links: Ist-Zustand (definierte natürliche und betriebliche Randbedingungen). Rechts oben: Szenario mit einem zusätzlichen, parallel zur Wiese verlaufenden Anreicherungsgebiet (hydraulische Barriere) zwischen flussnahen Trinkwasserbrunnen und der Wiese. Rechts unten: Szenario unter der Berücksichtigung einer Trennpundwand (technische Barriere)

- [1] Pahl-Wostl C., Möltgen J., Sendzimir J., Kabat P. (2006): New methods for adaptive water management under uncertainty – the NeWater project. EWRA Conference 2005, Menton, Frankreich
- [2] Huggenberger P., Epting J. (2011): Urban Geology – Process-oriented concepts for adaptive and integrated resource management, Springer-Verlag
- [3] Affolter A., Huggenberger P., Scheidler S., Epting J. (2010): Adaptives Grundwassermanagement in urbanen Gebieten – Einfluss der Oberflächen-Grundwasser-Interaktion am Beispiel künstlicher Grundwasseranreicherung sowie variabler In-/Exfiltration der Birs (Schweiz). Grundwasser 15, 147–161

- [4] INTERREG II A-Projekt MoNit (2006): Modellierung der Grundwasserbelastung durch Nitrat im Oberrheingraben. Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg
- [5] Epting J., Huggenberger P., Rauber M. (2008): Integrated methods and scenario development in urban groundwater management and protection during tunnel road construction: a case study of urban hydrogeology in the city of Basel, Switzerland. Hydrogeology Journal 16, 575–591
- [6] Worreschk S., Schmitt G., Hansen J., Hobus I., Kolisch G. (2013): Simulationsstudie – Bakteriologische Belastung von Fließgewässern durch Mischwassereinträge. Aqua & Gas 10, 52–55

# Grundwassergewinnung und Revitalisierung: Konflikt oder nachhaltiger Nutzen?

Die Gewinnung von Grundwasser und die Revitalisierung von Flüssen schliessen sich nicht grundsätzlich aus. Das zeigt ein Projekt im Winterthurer Linsental. Mit einem einfachen Ansatz wurde beurteilt, wo Flussaufweitungen möglich sind und wo nicht. Urs Buchs von Stadtwerk Winterthur ist überzeugt, dass das Vorgehen auch in anderen Gebieten funktioniert. *Interview: Andres Jordi*

**Die Wasserversorger sind in der Regel zurückhaltend, wenn Umweltverbände in ihrem Gebiet einen Fluss revitalisieren wollen. Wie kommt es, dass Sie sich hingegen für Revitalisierungen starkmachen?**

Die Wasserversorgung ist auf ein intaktes Gewässerökosystem und eine gute Qualität des Flusswassers angewiesen. So gesehen, haben wir die gleichen Interessen wie die Umweltverbände. Diese stellen für unsere Anliegen wichtige Verbündete dar. Zudem habe ich an einer naturnahen Flusslandschaft persönlich mehr Freude als an einem kanalisierten Gewässer. Die Aufwertung zu ökologisch wertvollen Wasserlebensräumen mit intakter Biodiversität erscheint mir als legitimes Ziel. Weil revitalisierte Flüsse mehr Raum einnehmen und die Gewässersohle poröser ist, dürfte die Infiltrationsleistung im Mittel höher ausfallen als bei hart verbauten Fließstrecken. Damit lässt sich die Ergiebigkeit eines Grundwasserfelds steigern. Von einer erfolgreichen Revitalisierung profitiert aber auch das Image eines Wasserversorgers. Unser Projekt im Linsental passt gut zur ökologischen Gesamtausrichtung von Stadtwerk Winterthur.

**Weshalb sind viele Ihrer Kollegen zurückhaltender?**

Den meisten fehlt die Erfahrung. Ich denke, dass sich zudem viele fragen, warum sie etwas verändern sollten, wenn die bestehende Trinkwassergewinnung zuverlässig funktioniert. Die Eingriffe in das Flusssystem könnten sich negativ auswirken.

**Diese Gefahr besteht.**

Die Trinkwassersicherheit hat oberste Priorität, das ist klar. So wollten wir im Linsental auch nach den Revitalisierungsmassnahmen eine einwandfreie Wasserqualität gewährleisten können – ohne zusätzliche Aufbereitung. Deshalb gilt es, in jedem Fall eine Güterabwägung vorzunehmen: Wie gross ist das Risiko? Wie viel Risiko kann man in Kauf nehmen? Was gewinnt man auf der anderen Seite? In den meisten Situationen besteht ein gewisser Ge-

staltungsspielraum. Das Resultat wird in der Regel aber keine völlig wilde Flusslandschaft sein können.

**Wie sieht diese Güterabwägung im Fall des Linsentals aus?**

Das Linsental hat ein hohes ökologisches Potenzial, das sich mit Aufwertungsmassnahmen besser ausschöpfen lässt. Gleichzeitig bestehen kaum Nutzungskonflikte. Die Töss fliesst durch bewaldetes Gebiet, das die Forstwirtschaft nicht intensiv nutzt. Das Areal befindet sich weitgehend in öffentlicher Hand, was ein Revitalisierungsprojekt vereinfacht. Es gibt abgesehen von den Trinkwasserfassungen keine schützenswerte Infrastruktur. Die Wasserversorgung stellt denn auch das grösste Hindernis dar. Die sechs Fassungen des Linsentals decken im Durchschnitt rund ein Viertel des Wasserverbrauchs der Stadt Winterthur ab. Deshalb war von Anfang an klar, dass eine Revitalisierung nur in Koexistenz mit der Trinkwassergewinnung möglich ist. Wir mussten

**Die Trinkwassersicherheit hat oberste Priorität, das ist klar.**



Andres Jordi

festlegen, wo sich die Töss ausbreiten darf und wo die Uferverbauungen zum Schutz des Trinkwassers nicht tangiert werden durften.

#### **Wie gingen Sie dabei vor?**

Mit Färbeversuchen ermittelten wir die relevanten Strömungsverhältnisse in den Grundwasserfeldern. So konnten wir abschätzen, wie lange infiltriertes Flusswasser im Untergrund unterwegs ist, bis es in einen Trinkwasserbrunnen gelangt, und welche Fassungen von allfälligen Revitalisierungsmassnahmen überhaupt betroffen sind. Resultat dieser hydrogeologischen Abklärungen ist eine einfache Karte des Gebiets, auf der rot, gelb und grün eingezeichnet ist, wo der Töss wie viel Auslauf gewährt werden kann. Die Untersuchungen ergaben wenig überraschend, dass sich vor allem flussabwärts von Wasserfassungen grüne Abschnitte befinden, die sich für Aufweitungen eignen. Rot und damit tabu für Revitalisierungsmassnahmen sind Uferzonen, die im Zuströmbereich einer Fassung liegen. Dieser pragmatische und praxisnahe Ansatz hat sich für uns sehr bewährt. Ich bin überzeugt, dass sich ein solches Vorgehen in den meisten Fällen wesentlich besser eignet als irgendwelche hochkomplexen dreidimensionalen Grundwassermodellierungen.

#### **Eine Methode, welche die Eawag erforscht und anwendet.**

Für das Prozessverständnis haben solche Modelle in der Wissenschaft natürlich ihre Berechtigung. Für die Praxis scheinen sie mir ungeeignet. Sie sind aufwändig und nur von Spezialisten zu verstehen und zu interpretieren. Viele Schweizer Wasserversorgungen werden im Nebenamt betrieben und man muss froh sein, wenn ein ausgebildeter Brunnenmeister die Grundwasserpumpwerke betreut. Die Akzeptanz einfacher, nachvollziehbarer Methoden wie der unseren ist in solchen Fällen wahrscheinlich grösser. Die Resultate lassen sich auch in der Öffentlichkeit klarer kommunizieren.

#### **Lässt sich Ihr Ansatz ohne**

#### **Einschränkungen auf andere Gebiete übertragen?**

Uns kam sicher entgegen, dass die Töss ein sehr sauberer Fluss ist. Das geklärte Abwasser von Winterthur und der meisten Tössstal-Gemeinden gelangt erst unterhalb des Linsentals in den Fluss und es gibt im Einzugsgebiet wenig Industrie. Das reduziert die Anforderungen an die Filtrationsleistung des Untergrunds und erhöht den Handlungsspielraum bei Revitalisierungen. Gleichzeitig sind jedoch die Aufenthaltszeiten des infiltrierten Wassers im Linsental von Natur aus eher kurz und stellenweise unter den gesetzlich geforderten zehn Tagen. Da die Schweizer Fliessgewässer generell eine gute Wasserqualität und höhere Anströmzeiten aufweisen, müsste unser Vorgehen grundsätzlich auch andernorts funktionieren.

#### **Wie präsentiert sich die Situation im Linsental heute, nachdem 2011 die vorerst letzte Revitalisierungsetappe abgeschlossen wurde?**

Neben den regelmässigen mikrobiologischen Kontrollen führten wir während zwei Jahren ein spezielles Monitoring durch. Wir

untersuchten das Trinkwasser etwa auf Zooplankton, um sicherzugehen, dass nicht plötzlich problematische Organismen in unzulässigen Mengen auftraten. Fazit: Die Trinkwasserqualität hat sich nach der Revitalisierung nicht verändert. Inwieweit sich die Infiltrationsleistung und damit die Trinkwasserproduktion gesteigert hat, untersuchten wir nicht. Dass die gewinnbare Menge abgenommen hat, betrachte ich als sehr unwahrscheinlich. Für die Bevölkerung ist die revitalisierte Töss im Linsental zu einem beliebten Naherholungsgebiet geworden, in dem auch der Eisvogel wieder brütet.

#### **Was waren die entscheidenden**

#### **Faktoren, dass Ihr Projekt erfolgreich war?**

Für mich ist die wichtigste Erkenntnis, dass unser zwar pragmatischer, aber seriöser Ansatz funktioniert hat. Entscheidend war zudem, dass alle Anspruchsgruppen (Forstwirtschaft, Wasserversorgung, Umweltverbände etc.) von Anfang an ins Projekt eingebunden wurden. Die einzelnen Akteure hatten Verständnis für die Anliegen der anderen und waren zu Kompromissen bereit. Wir setzten die Revitalisierung in mehreren Etappen um. Das erlaubte es, bei jedem Schritt Erfahrungen zu sammeln. Überdies liess sich so das Risiko minimieren. Wäre im Linsental ein Teilprojekt ins Auge gegangen, hätte das höchstens eine Trinkwasserfassung betroffen. Wichtig war sicher auch ein abschliessendes Monitoring, damit der Wasserversorger die Sicherheit hat, dass alles in Ordnung ist. Und nicht zu vergessen: Eine gute Wasserqualität kommt nicht von ungefähr. Die

Schweiz hat einen wirksamen Gewässerschutz. Es ist elementar, dass dieser nicht verwässert wird.

**Unser zwar pragmatischer, aber seriöser Ansatz hat funktioniert.**



Thomas Meier leitet seit 2010 die Trinkwasserproduktion bei IWB und ist seit 2011 zusätzlich Geschäftsführer der Hardwasser AG in Pratteln. Die Doppelfunktion erlaubt es, Synergien zwischen den beiden grossen Trinkwasserwerken in der Region Basel besser zu nutzen.  
thomas.meier@iwb.ch

# Herausforderung der Trinkwassergewinnung aus Flussinfiltraten

Basel gewinnt sein Trinkwasser aus angereichertem Grundwasser. Der Rhein ist dabei eine unerschöpfliche Quelle, die jedoch auch Gefahren in sich birgt. So können Chemikalien, die in den Rhein gelangen, das Trinkwasser langfristig belasten. Ein umfangreiches Rohwasser-Monitoring und die Einbindung in eine überkantonale Alarmorganisation sollen das verhindern.

Die Aquifere in den Langen Erlen (Stadtwerk von Basel, IWB) und im Hardwald (Hardwasser AG) liefern das Trinkwasser für rund 220 000 Konsumenten von Basel-Stadt, Riehen, Bettingen, Binningen und Allschwil. Die Prozesse der Trinkwasseraufbereitung im Wasserwerk in den Langen Erlen und bei der Hardwasser AG sind sehr ähnlich. Am Anfang steht die Entnahme von Wasser aus dem Rhein (Abb. 1). Bei der Hardwasser AG geschieht die Vorbehandlung des Rheinwassers noch zusätzlich über Absetzbecken, so dass die Infiltration auch bei einer höheren Trübung des Rheinwassers betrieben werden kann. Zusammen produzieren die beiden Wasserwerke jährlich rund 27 500 000 Kubikmeter Trinkwasser in diesem dicht besiedelten Gebiet an der Nordwestecke der Schweiz (Abb. 2).

Obwohl beide Wasserwerke ihren Aquifer mit filtriertem Rheinwasser anreichern, sind die Ziele sehr unterschiedlich. In den Langen Erlen ist die Grundwasseranreicherung notwendig, da der natürliche Zufluss von Grundwasser aus dem süddeutschen Wiesental zu gering ist. Bereits vor über 100 Jahren erkannte man dies und unternahm erste Versuche, Wasser aus verschiedenen Gewässern der Wiesebene zu infiltrieren. Weder der offe-

ne Sandfilter noch das Bewässern von Grasflächen brachten den gewünschten Erfolg, so dass die Grundwasseranreicherung über Jahrzehnte nur sporadisch betrieben wurde.

## Künstliche Grundwasseranreicherung als Schutz

Die Hardwasser AG nutzt die Infiltration von Rohwasser neben der Gewinnung des benötigten Grundwassers zusätzlich, um verschiedene Randeinflüsse abzuwehren. Denn der Güterbahnhof, die Autobahn, das Industriegebiet Schweizerhalle, der Auhafen (Umschlag von petrochemischen Produkten vom Schiff auf die Bahn) und drei Deponien in Muttenz umschliessen das Grundwassergebiet der Hard (Abb. 2). Das Wasserwerk reichert doppelt so viel Grundwasser an, wie entnommen wird. Bei einer jährlichen Entnahme von rund 14 000 000 Kubikmetern Grundwasser werden rund 32 700 000 Kubikmeter Rheinwasser infiltriert. Dadurch entsteht ein eigentlicher Grundwasserberg, der den natürlichen Zufluss von möglicherweise belastetem Grundwasser aus den umliegenden Gebieten verhindert. Damit dies funktioniert, ist die Rohwasserbehandlung so konzipiert, dass auch bei höherer Trübung Rheinwasser entnommen werden kann. Dieses wird vor der Versickerung dann mit Flockungsmittel versetzt und über

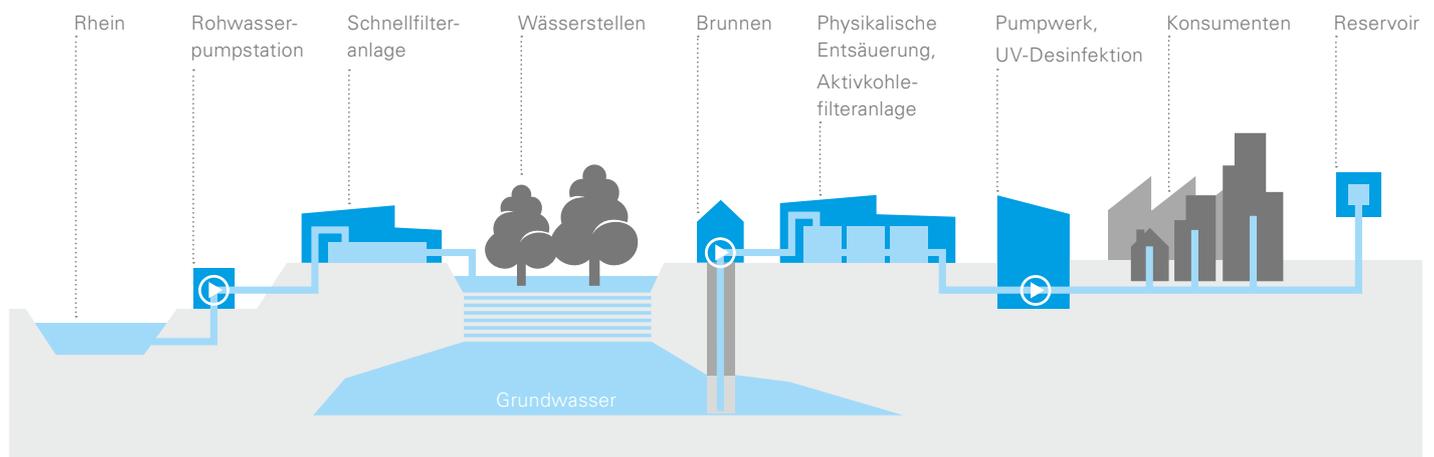


Abb. 1: Die naturnahen Aufbereitungskette vom Rheinwasser bis zum Trinkwasser im Wasserwerk Lange Erlen.

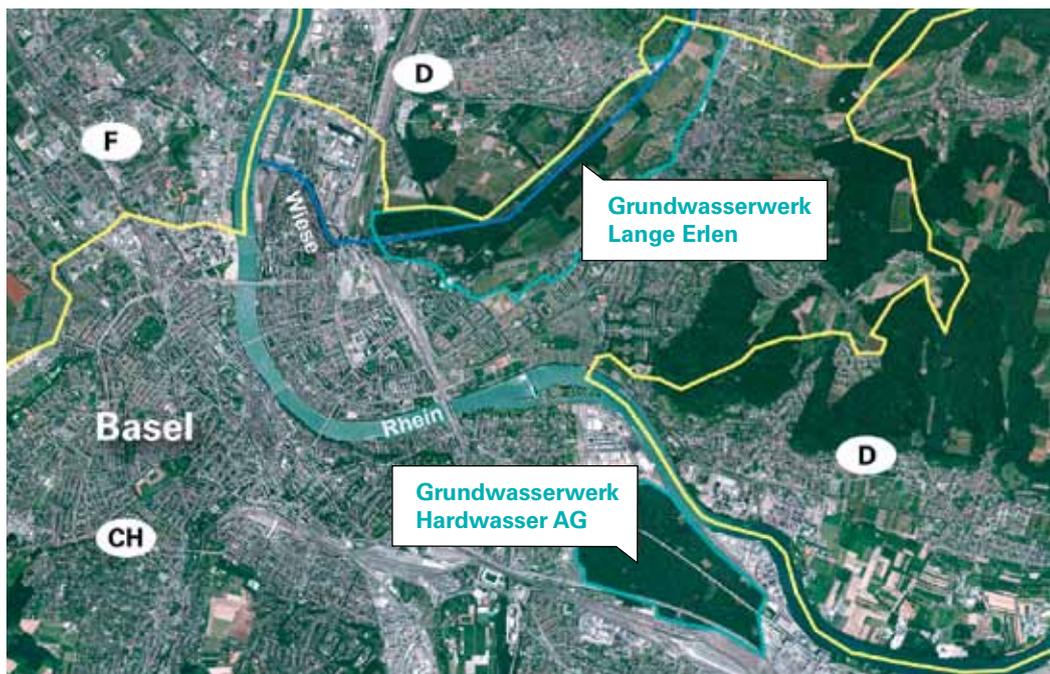


Abb. 2: Die Region Basel mit dem Grundwasserwerk Lange Erlen der IWB und dem Grundwasserwerk der Hardwasser AG.

einen Reaktivator beziehungsweise Lamellenabscheider mit Absetzbecken und einer nachgeschalteten Sandfilteranlage von den Trübstoffen befreit. Die Infiltration wird nur bei einer chemischen Verunreinigung des Rheins für einige wenige Tage unterbrochen. Die Isohypsenkarte (Abb. 3) zeigt die typischen Grundwasser- verhältnisse im Hardwald. Auf der Nordseite fassen Brunnen das Grundwasser, auf der Südseite drängt das Infiltrat den natürlichen Grundwasserzufluss ab.

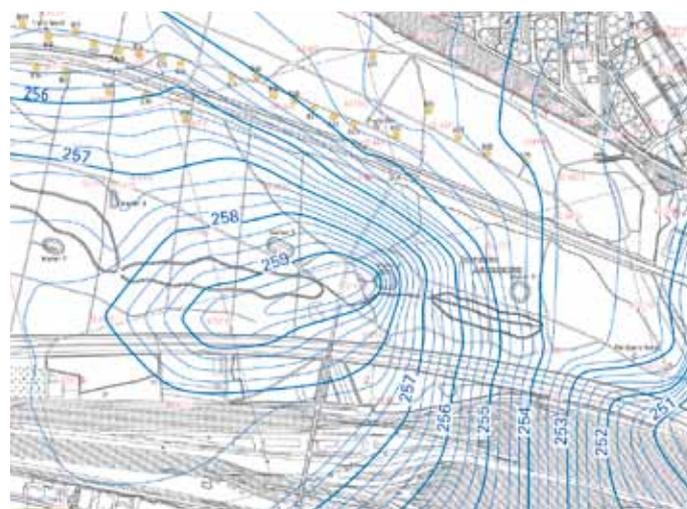


Abb. 3: Die Tiefenlinien (Isohypsen) zeigen die Grundwasserverteilung im Hardwald (orange Punkte: Brunnen).

Sickergräben (7000 Quadratmeter) und -weiher (4000 Quadratmeter) erreichen mit verhältnismässig kleiner Fläche eine enorme Versickerungsleistung von jährlich 2 970 000 Litern pro Quadratmeter. Verglichen mit der durchschnittlichen jährlichen Niederschlagsmenge von rund 870 Litern pro Quadratmeter (1977 bis 2013) in Basel beträgt die künstliche Versickerung das 3400-Fache. Die Sickerflächen (Abb. 4) bestehen aus einer Sand- und Kies- schicht und müssen an der Oberfläche zweimal pro Jahr gereinigt werden. Nach 10 bis 12 Jahren muss man die Filterschicht kom-



Hardwasser AG



IWB

Abb. 4: Sickergraben im Hardwald (links) und Wasserstelle in den Längen Erlen (rechts).

plett ersetzen, da sie mit der Zeit kolmatiert und die Verschmutzung den natürlich anstehenden Kiesboden erreicht.

### **10 Tage Betrieb, 20 Tage Regeneration**

Demgegenüber geschieht die Grundwasseranreicherung in den Langen Erlen über bewaldete Wässerstellen (Abb. 4). Die jährliche Infiltrationsleistung beträgt rund 100 000 Liter pro Quadratmeter. Damit der Boden nicht kolmatiert, wird jeweils nach 10 Tagen Betrieb ein Wässerfeld ausser Betrieb genommen und für 20 Tage der Regeneration überlassen. Das Grundwasserwerk Lange Erlen verfügt über acht Wässerstellen, die jeweils in zwei oder drei Felder unterteilt sind. Dazu kommen noch drei einzelne Wässerfelder, die in Kombination mit den anderen betrieben werden. In der 20-tägigen Austrocknungsphase arbeiten Mikro- und Makroorganismen den Boden wieder auf. Dadurch wird dieser wieder belüftet und seine Schluckfähigkeit bleibt über Jahre erhalten. Der betriebliche Unterhalt dieser Wässerstellen beschränkt sich auf die forstwirtschaftliche Waldpflege. Bei der Auswahl der Bäume muss darauf geachtet werden, dass diese die wechselnden hydrologischen Verhältnisse ertragen. Im Sommer spenden die Bäume Schatten, so dass sich das Infiltrat nicht zusätzlich erwärmt. Das unterdrückt die Algenbildung. Zudem bildet der Laubfall eine gute Substratgrundlage für die Mikro- und Makrofauna im und auf dem Waldboden. Ursprünglich wurde in den Langen Erlen Wasser zur Grundwasseranreicherung aus der Wiese (Fluss aus dem Wiesental, vom Feldberg herkommend) und ihren Nebengewässern entnommen. Nachdem die Wiese in den 1940er-Jahren jedoch mehrmals trockenfiel, entschied man sich 1962 zum Bau einer Rheinwasserentnahme und Vorfiltration über Schnellsandfilter. Damit ging die Anlage vier Jahre nach jener der Hardwasser AG in Betrieb.

### **Risiko für unerwünschte Stoffeinträge**

Seit der Nutzung von Rheinwasser ab 1960 steht den beiden Wasserwerken eine nahezu unbegrenzte Menge von Rohwasser zur Grundwasseranreicherung zur Verfügung. Derzeit entnehmen Hardwasser AG und IWB zusammen rund 0,14 Prozent des Rheinwassers (bei einem mittleren Abfluss von 1050 Kubikmetern pro Sekunde für die Periode 1891 bis 2012). Auch bei minimaler Wasserführung des Rheins, zirka 300 Kubikmeter pro Sekunde im Winter 1963, ist immer noch genügend Rohwasser vorhanden. Im Sommer, wenn die Wassertemperatur des Rheins auf 24 Grad Celsius ansteigen kann, kühlt sich das Infiltrat während der Bodenpassage auf die Grundwassertemperatur von 12 bis 17 Grad ab. Die Bodenpassage wirkt sich zudem positiv auf die Wasserqualität aus. Rund die Hälfte des gesamten organischen Kohlenstoffs (TOC) und Keime werden abgebaut. Letztere kommen im Rheinwasser in erhöhtem Mass vor (aerobe mesophile Keime: durchschnittlich 7500 koloniebildende Einheiten pro Milliliter, *E.-coli*-Bakterien: durchschnittlich 240 koloniebildende Einheiten pro 100 Milliliter) [1]. Mit dem Rheinwasser können aber auch unerwünschte Stoffe ins Grundwasserschutzgebiet gelangen. Vor allem die Rohwasserfassung der IWB, die im Staubereich des Kraftwerks Birsfelden liegt, ist dem Einfluss des Auhafens so-

wie den Industriekläranlagen von Schweizerhalle und Grenzach (Deutschland) ausgesetzt. Je nach eingetragenen Spurenstoffen könnte dies zu einer jahrelangen Verschmutzung des Aquifers führen. In der Vergangenheit ist dies zum Beispiel durch Chlorbutadiene geschehen, die in den 1970er-Jahren im Rhein in erhöhter Konzentration gemessen wurden [2]. Diese Stoffe kommen heute im Rhein in der Regel nicht mehr vor. Trotzdem lassen sie sich im Grundwasser des Hardwalds und der Langen Erlen in Konzentrationen zwischen 10 und 200 Nanogramm pro Liter weiterhin nachweisen. Da die Toxizität der Verbindungen unklar ist, aber ein gentoxisches Potenzial vermutet wird, verfügte das Kantonale Labor Basellandschaft 2007, dass das Grundwasser zusätzlich mit Aktivkohle aufzubereiten sei. Entsprechende Anlagen wurden in beiden Wasserwerken 1988 beziehungsweise 2013 gebaut und sind in Betrieb.

### **Intensives Rohwasser-Monitoring**

Um die Qualität des infiltrierten Grundwassers möglichst genau zu kennen, wurde in Basel in den letzten Jahren ein umfangreiches Rohwasser-Monitoring aufgebaut. Dieses besteht aus einer Online-Analytik (Abb. 5) und aus einem Screening von Rheinwasserproben im Labor durch Gaschromatografie gekoppelt mit Massenspektrometrie (GC-MS). Tabelle 1 gibt einen Überblick über die eingesetzten Online-Messverfahren und ihre Überwachungsaufgabe. Eine Datenbank speichert die gemessenen Werte, was die Darstellung von Trends beziehungsweise die Alarmierung bei Überschreitung gewisser Werte erlaubt. Dies kann bis zur automatischen Abschaltung der Rheinwasserentnahme gehen. Mit der immer sensibleren Analytik lassen sich laufend neue Stoffe finden. Die grosse Herausforderung liegt nun darin, die Analyse-daten zu bewerten und allfällige Massnahmen zu definieren. Ein Ausbau der Online-Analytik ist sehr wichtig, da Veränderungen des Rohwassers nur so unmittelbar registriert werden können.

Tägliche Laboranalysen ergänzen die Online-Analyse. Im Labor werden zum einen die allgemeinen Parameter (Anionen, Kationen usw.), mit der Einzelstoffanalyse (Target-Analytik) und mit dem Screening (Non-Target-Analytik) zum anderen Substanzen in sehr geringen Konzentrationen erfasst. Das Screening erlaubt zwar keine Aussagen über Einzelstoffkonzentrationen, eignet sich jedoch gut, um die Qualität des Rheinwassers zu beurteilen. Quantitative Ergebnisse liefert die Einzelstoffanalyse. Diese kann wegen der aufwändigen Methodik die Wasserqualität aber nur retrospektiv beurteilen. Sie ist für die Rohwasserüberwachung dennoch wichtig, da sich damit eine allfällige Verschmutzung der ganzen Trinkwasserproduktion und insbesondere des Aquifers besser einschätzen lässt.

Zusätzlich informiert die Rheinüberwachungsstation in Weil am Rhein die IWB und die Hardwasser AG über ihre Messresultate. Die vom Amt für Umwelt und Energie Basel-Stadt betriebene Station misst eine Vielzahl von Parametern. So besteht eine genaue Kenntnis darüber, in welchem Zustand der Rhein die Schweiz Richtung Norden verlässt. Im Weiteren sind die

Messverfahren	Einsatzzweck
Radioaktivitätsmessung	Veränderungen der radioaktiven Belastung (Gammastrahlung) des Rheinwassers können gemessen, Radionuklide qualitativ erfasst werden.
Biomonitoring	Zeigt die toxische Wirkung auf Wasserorganismen (unspezifisch bezüglich Inhaltsstoffen). Die IWB setzt dazu Daphnien ein.
UV-VIS-Absorption (220 bis 720 nm) / SAK 254 nm	Summenparameter für die Gewässerbelastung durch gelöste organische Stoffe. Es wird der spektrale Absorptionskoeffizient (SAK 254) gemessen. Die absorbierte Menge des Lichts steht dabei in direktem Zusammenhang zur Konzentration einer Reihe organischer Wasserinhaltsstoffe.
pH-Wert, Temperatur	Allgemeine Parameter der Wasseranalytik, die online gemessen werden und auf Veränderungen hinweisen können.
Sauerstoff	Parameter, der sich bei einer Gewässerverschmutzung mit leicht abbaubaren organischen Substanzen verändert. Wegen des Abbaus durch Mikroorganismen nimmt der Sauerstoffverbrauch im Wasser zu.
Leitfähigkeit	Summenparameter für gelöste ionische Stoffe.
Trübung	Primär zum Schutz der nachgelagerten eigenen Anlagen (Pumpen, Schnellfilteranlagen, Versickerungsflächen in der Grundwasserschutzzone).
Probensammler für GC-MS-Screening	Erstellen von täglichen Mischproben für die nachträgliche, ereignisbasierte Spurenstoffanalytik im Labor.

Tab. 1: Messverfahren zur Überwachung des Rohwassers aus dem Rhein.

beiden Wasserwerke in die Alarmorganisationen am Rhein eingebunden. Tritt stromaufwärts eine Havarie auf, können die Wasserwerke ihre Rohwasserentnahme rechtzeitig ausser Betrieb nehmen, bevor die Schadstoffwelle die Anlagen erreicht. Ergänzend stehen die Messprogramme der Internationalen Kommission zum Schutz des Rheins und der Arbeitsgemeinschaft Wasserwerke Bodensee-Rhein zur Verfügung. Die Messreihen dokumentieren die Qualitätsentwicklung des Rheinwassers über Jahrzehnte und decken das Auftreten neuer Stoffe auf. Da beide Wasserwerke vom Rhein abhängen, werden derzeit Möglichkeiten geprüft, bei einer länger andauernden Verschmutzung Wasser aus anderen Gewässern, zum Beispiel aus der Wiese, für die künstliche Grundwasseranreicherung zu nutzen.

### Schlussfolgerung

Die Nutzung von Wasser aus dem Rhein ist für die Trinkwasserversorgung von Basel und Umgebung lebenswichtig. Natürliche Grundwasservorkommen stehen nicht in genügender Menge zu Verfügung oder sind einer Verschmutzungsgefahr ausgesetzt. Wasser aus dem Rhein steht in beinahe unbegrenzter Menge zur Verfügung. Die Wasserqualität des versickerten Wassers ist jedoch entscheidend für die langfristige Beschaffenheit des Grundwassers und damit auch für die Qualität des Trinkwassers. Ein Eintrag von Schadstoffen gilt es in jedem Fall zu vermeiden. Ein eigenes umfangreiches Rohwasser-Monitoring mittels Online- und Laboranalytik sowie die Einbindung in eine überkantonale Alarmorganisation sind zwingend. Die Wasserqualität des Rheins hat sich in den letzten Jahren stetig verbessert und entspricht abgesehen von den hygienischen Parametern sogar den Anforderungen an das Trinkwasser. Dies ist im Bezug auf den Ressourcenschutz auch für die beiden Wasserwerke ein Schritt in die richtige Richtung.



Abb. 5: Messraum mit der Online-Rohwasseranalytik.

- [1] Rüetschi D. (2004): Basler Trinkwassergewinnung in den Langen Erlen – biologische Reinigungsleistungen in den bewaldeten Wasserstellen. Dissertation Universität Basel
- [2] Husmann W. (1976): Vom Wasser. Ein Jahrbuch für Wasserchemie und Wasserreinigungstechnik Band 47. Fachgruppe Wasserchemie in der Gesellschaft Deutscher Chemiker



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.

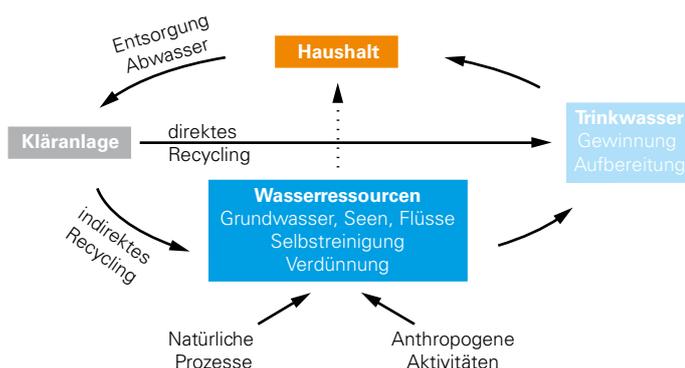


Abb. 1: Die Trinkwassergewinnung im urbanen Wasserkreislauf.

## 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 iodierter 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 <sup>2</sup> )	Pulveraktivkohle (1 mg O <sub>3</sub> 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).

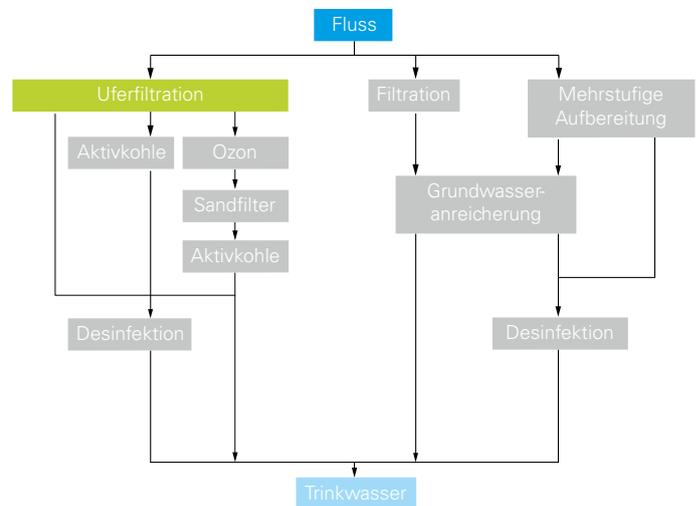


Abb. 3: Vom Flusswasser zum Trinkwasser: Die Uferfiltration und die direkte Aufbereitung von Flusswasser mit und ohne Grundwasseranreicherung (modifiziert nach [10]).

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 <sup>2</sup> )	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 Cl<sub>2</sub> 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

# Die Schweiz ist führend im nachhaltigen Wassermanagement

Das Schweizer Trinkwasser ist sicher und von bester Qualität. Das ist das Resultat eines erfolgreichen Gewässerschutzes. Das Land habe die nötigen Voraussetzungen, das Wassermanagement in eine nachhaltige Zukunft zu führen, sagt Eawag-Direktorin Janet Hering. Dabei gelte es, zwischen verschiedenen Nutzungsansprüchen abzuwägen und die richtigen Prioritäten zu setzen. *Interview: Andres Jordi*

**Unzählige Spurenstoffe in den Flüssen und Bächen, Veränderungen des Klimas, extreme Hochwasser, Revitalisierungen: Die Qualität des Schweizer Trinkwassers, das aus flussgespeistem Grundwasser stammt, scheint von vielen Seiten her beeinträchtigt zu sein. Darauf deuten verschiedene Beiträge am diesjährigen Infotag hin. Trotzdem plädiert du für Augenmass. Was stimmt dich optimistisch?**

Optimisten sehen das Glas halb voll, für Pessimisten ist es dagegen halb leer. Die Aufgabe der Wissenschaft ist es, relevante Fragen über das Glas und seinen Inhalt zu stellen. In unserem Fall ist das die Wasserversorgung durch Uferfiltration. Hier gilt es zu verstehen, welche biogeochemischen Prozesse ablaufen, welche Faktoren heute und in Zukunft auf das System einwirken und wie sie dieses beeinflussen. Ein solches Verständnis sagt noch nicht unbedingt viel darüber aus, wie dringend gewisse Unzulänglichkeiten zu beheben sind. Quellen und Grundwasser liefern in der Schweiz in der Regel Trinkwasser bester Qualität, das nicht weiter aufbereitet werden muss. Diesbezüglich steht die hiesige Wasserversorgung im Vergleich mit vielen anderen Industrieländern hervorragend da ...

**... und kann die Hände in den Schoss legen?**

Nein, natürlich nicht. Obwohl sich die Situation hierzulande sehr gut darstellt, gibt es Bereiche, in denen es Handlungsbedarf gibt. Das zeigen verschiedene am Infotag vorgestellte Forschungsarbeiten der Eawag. Doch ich finde, wir sollten deswegen nicht vergessen, wo die Schweizer Wasserversorgung in Bezug auf Qualität, Sicherheit und Verfügbarkeit steht: weltweit an der Spitze. Die Schweiz hat in der Vergangenheit immer wieder bewiesen, dass sie den Gewässerschutz ernst nimmt. Denken wir nur an den Kampf gegen die Überdüngung der Seen, zum Beispiel des Zürichsees. Mit dem kürzlich begonnenen Ausbau von Kläranlagen zur Reduktion von Mikroverunreinigungen im Abwasser setzt das Land einen weiteren Meilenstein im Gewässerschutz. Umso wichtiger scheint mir, dass das die Schweiz solche Erfolge nicht leichtfertig preisgibt. So sollte der Bund der Forderung, wieder

**Verglichen mit anderen Ländern ist die Schweizer Wasserversorgung hervorragend.**

mehr Phosphor in die Seen zu leiten, um die Fischerträge zu steigern, aus Sicht der Wasserforschung nicht nachgeben.

**Wo liegen die Herausforderungen für die Wasserversorgung in der Schweiz?**

Auch wenn die Schweiz als Wasserschloss Europas im wahren Sinn des Wortes an der Quelle sitzt, ist das reichlich vorhandene Wasser selbst hierzulande nicht unerschöpflich. Es sollte deshalb oberstes Gebot sein, die Ressource möglichst nachhaltig zu bewirtschaften. Neben den natürlichen Voraussetzungen, wie zum Beispiel der Verfügbarkeit von Wasser (Niederschlagsmenge, Speicherkapazität und geografische Verbreitung), entscheiden technische und gesellschaftliche Faktoren über ein nachhaltiges Wassermanagement. Nicht selten bestehen verschiedene, sich teilweise konkurrierende Nutzungsansprüche. Solche können zum Beispiel auftreten, wenn ein Flussabschnitt revitalisiert werden



Peter Penicka

soll, der im Bereich einer Trinkwasserfassung liegt. In solchen Fällen sind Win-win-Situationen nicht immer möglich. Es gilt, im Sinn der ökologischen, sozialen und wirtschaftlichen Nachhaltigkeit die richtigen Prioritäten zu setzen. Verantwortungsträger benötigen dazu wissenschaftlich fundierte Entscheidungsgrundlagen.

**Auf welche Stärken kann die Schweiz zählen, um ihr Wassermanagement nachhaltiger zu gestalten?**

Die Schweiz befindet sich in einer vergleichsweise komfortablen Lage. Das Land weist eines der höchsten Bruttoinlandprodukte pro Kopf auf, rangiert beim Index für menschliche Entwicklung der Uno auf einem Spitzenplatz, verfügt über grosse Wasserressourcen und hat einen passablen ökologischen Leistungsausweis. Die Industrie ist sehr leistungsfähig und innovativ. Als wichtiger Pluspunkt erscheint mir ausserdem die auf Konkordanz ausgerichtete politische Kultur. Damit besitzt die Schweiz die technischen, finanziellen und gesellschaftlichen Voraussetzungen, um ein nachhaltiges Wassermanagement in die Tat umzusetzen.

**Die Schweiz, ein Vorbild in Sachen Nachhaltigkeit?**

Andere Industrieländer können sich an der Schweiz mit ihren Bemühungen hin zu mehr Nachhaltigkeit durchaus ein Beispiel nehmen. Setzt man den Index für menschliche Entwicklung und den ökologischen Fussabdruck ins Verhältnis, steht die Schweiz gegenüber vergleichbaren Ländern um einiges besser da (siehe Grafik). Mit anderen Worten: Auch bei einem sehr hohen Wohlfahrtsniveau lässt sich haushälterisch mit den natürlichen Ressourcen umgehen. Wobei auch

die Schweiz das Ziel, den Bereich nachhaltiger Entwicklung, noch nicht erreicht hat. Die hohe Innovationskraft des Landes könnte für andere Staaten zudem ein Ansporn sein, umwelt- und ressourcenschonende Technologien zu entwickeln und anzuwenden. Umgekehrt bietet sich der Schweiz die Möglichkeit, entsprechende Technologien und Knowhow zu exportieren.

**Beschränkt sich das auf die Industrieländer?**

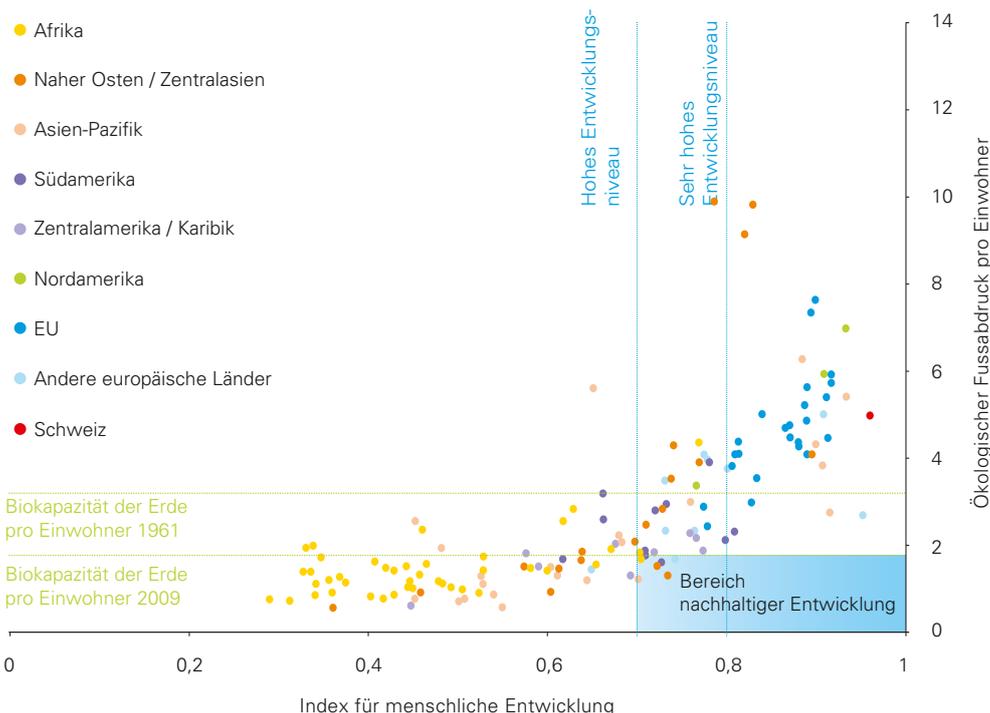
Entwicklungs- und Schwellenländer können ebenso von einem Technologie- und Wissenstransfer profitieren. Gleichzeitig gilt es, in diesen Ländern die Handlungsmöglichkeiten der Gesellschaften aufzubauen und zu stärken, damit diese die nachhaltige Entwicklung eigenständig gestalten können (Capacity Development). Auch hier hat die Schweiz Einiges zu bieten.

**Wie trägt die Wissenschaft zu einem nachhaltigen Wassermanagement bei?**

Bereits erwähnt habe ich das Erforschen der Prozesse und Systeme. Diese zu verstehen, ist wesentlich für eine zielführende Bewirtschaftungsstrategie. Daneben entwickeln Ingenieure neue technische Verfahren, die in den Praxisbetrieb einfließen. Sozialwissenschaftliche

Methoden helfen, Entscheidungsfindungsprozesse transparent zu machen und Handlungsoptionen zu bewerten, um für die betroffenen Akteure tragfähige Lösungen zu finden.

**Auch bei einer hohen Wohlfahrt lässt sich sparsam mit den Ressourcen haushalten.**



Der Index für menschliche Entwicklung (engl. Human Development Index, HDI) der Uno verglichen mit dem ökologischen Fussabdruck für verschiedene Länder. Der HDI beschreibt den Wohlfahrtszustand verschiedener Weltregionen. Der ökologische Fussabdruck gibt die Land- und Wasserfläche an, die ein Land pro Einwohner benötigt, um den Lebensstandard unter den gegenwärtigen Bedingungen zu gewährleisten. Die Biokapazität ist umgekehrt ein Mass für die Leistungsfähigkeit eines Ökosystems, die für den Menschen essenziellen Leistungen zu produzieren. (Quelle: Global Footprint Network)

## **Wasserversorgung und Uferfiltration – ein System unter Druck?**

Das Trinkwasser in der Schweiz stammt zu rund 80 Prozent aus Grundwasser. Dieses wiederum wird zu zirka 30 Prozent aus Flusswasser gespeist, das durch das Gewässerufer infiltriert. Das Ufer ist damit oft die einzige Barriere, die das Grundwasser vom mit Verunreinigungen belasteten Fluss trennt. Die Prozesse in den Infiltrationszonen sind deshalb entscheidend für die Qualität eines bedeutenden Teils des Rohwassers in unseren Wasserversorgungen.

Durch Spurenstoffe in den Flüssen, Klimaveränderungen, Extremhochwasser, aber auch Revitalisierungen, gerät dieses System jedoch immer mehr unter Druck. Wie sehen die Auswirkungen aus und wie können wir sie messen? Haben wir die Möglichkeit, eine wirksame Uferfiltration zu erhalten und gleichzeitig eine ausreichende Wasserqualität und -menge zu garantieren? Oder braucht es in Zukunft zusätzliche Massnahmen? Forschende und Vertreter aus der Praxis gehen am Eawag-Infotag 2014 diesen Fragen anhand von Beispielen aus dem Wassersektor nach und zeigen auf, wie die Prozesse der Uferfiltration beeinflusst werden und wie man in der Praxis damit umgehen kann. Die Eawag und der Schweizerische Verein des Gas- und Wasserfaches (SVGW) führen diesen Anlass in enger Zusammenarbeit durch.