

3

DIE KÜNSTLICHE GRUNDWASSERANREICHERUNG DER WASSERVERSORGUNG BASEL

Daniel Rüetschi, Departement Geographie,
Universität Basel
Richard Wülser, Qualitätssicherung Wasser,
Industrielle Werke Basel

Zusammenfassung

Die Industriellen Werke Basel betreiben im Grundwasserwerk 'Lange Erlen' Anlagen zur künstlichen Anreicherung des Grundwassers. Seit mehreren Jahrzehnten führt diese naturnahe und effiziente Art der Wasseraufbereitung zu einem qualitativ einwandfreien Trinkwasser. Um die während der Boden- und Aquiferpassage auftretenden Reinigungsprozesse nachzuweisen, wurde der Konzentrationsverlauf des gelösten bzw. assimilierbaren organischen Kohlenstoffs (DOC, AOC) sowie die UV-Extinktion (SAK254) von Grundwasser während der Fließstrecke von einer Wässerstelle zu einem Brunnen untersucht. Während in der ungesättigten Zone mikrobieller Abbau als wichtigster Reinigungsmechanismus auftritt, ist während der Aquiferpassage vermutlich die Verdünnung mit natürlichem Grundwasser entscheidend.

Réalimentation artificielle de l'aquifère à Bâle - Résumé

Sur le site de la station de traitement des eaux souterraines de Lange Erlen, les Services industriels de Bâle exploitent également des installations destinées à la réalimentation de l'aquifère. Pratiquée depuis plusieurs décennies, cette méthode quasi naturelle permet d'assurer une production d'eau potable de qualité irréprochable. Afin de mettre en évidence les processus d'épuration se déroulant durant le transit à travers le sol et l'aquifère, les courbes de concentration du carbone organique dissous (COD) et du carbone organique assimilable (AOC) ainsi que l'absorbance du rayonnement UV des eaux souterraines ont été analysées le long du transit entre un bassin de réalimentation et un puits de pompage. Tandis que la dégradation microbienne est le principal mécanisme d'épuration dans les couches de terrain non saturées, la dilution par les eaux souterraines naturelles semble jouer un rôle déterminant durant le transit à travers l'aquifère.

Die Wasserversorgung Basel-Stadt

Die Trinkwassergewinnung des Kantons Basel-Stadt basiert auf den drei Systemen: Grundwasser, Rheinwasser und Quellwasser. Die Ressourcen stammen zu 95 % aus den beiden Grundwassergebieten Lange Erlen und Muttenzer Hard, wo das Grundwasser mit Wasser aus dem Rhein angereichert wird. Der Rest ist Quellwasser aus dem nahen Jura.

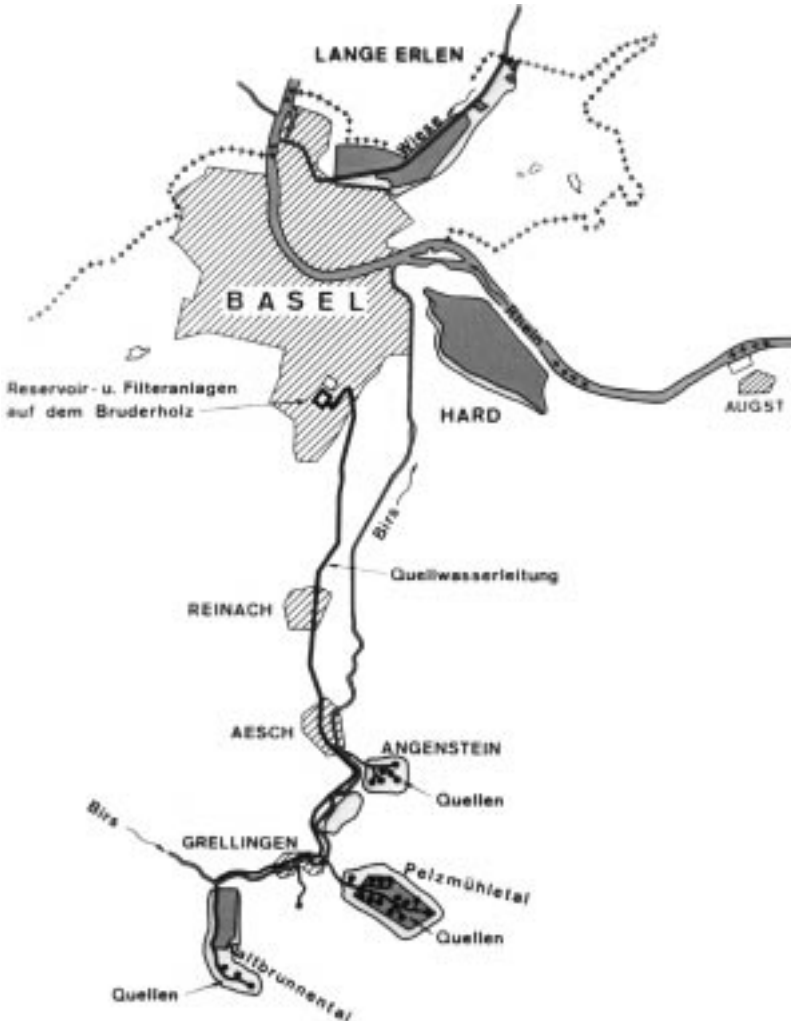


Abbildung 1: Übersicht über die Wasserversorgung der IWB

Künstliche Grundwasseranreicherung

Geschichte

Die Ursache für die Cholera- und Typhusepidemien, die im 19. Jahrhundert immer wieder wüteten, lag in einer ungenügenden Trinkwasserqualität und im Fehlen einer Schwemmkanalisation. Erst mit der Aufbereitung des Quellwassers über eine biologische Filteranlage sowie mit der Ausscheidung und dem Schutz des Grundwassergebietes Lange Erlen trat eine Verbesserung der Situation ein.

Da der Wasserbedarf Basels nach der Jahrhundertwende weiter anstieg, wurden schon bald die Grenzen der möglichen Grundwasserentnahme in den Langen Erlen erreicht. Man ging deshalb systematisch dazu über, in Wässerstellen das natürliche Grundwasser mit Oberflächenwasser anzureichern. Der Name "Wässerstelle" rührt von der ehemaligen, während Jahrhunderten betriebenen, Wässerwiesenwirtschaft her. Dabei wurde eine ungewollte künstliche Grundwasseranreicherung betrieben, indem die landwirtschaftlich genutzten Wiesen zwecks Bewässerung gezielt mit Flusswasser überschwemmt wurden. Ab 1964 verwendete man dafür vorfiltriertes Rheinwasser.

Nach dem zweiten Weltkrieg nahm der Wasserverbrauch überdurchschnittlich zu. Deshalb gründeten im Jahre 1955 die beiden Kantone Basel-Stadt und Basel-Landschaft die Hardwasser AG. Das in der Muttenzer Hard gelegene Grundwasserwerk nutzt ebenfalls den Sickerboden als natürlichen Filter.

Dank der immer wieder weitsichtigen Planung ist Basel in punkto Wasserversorgung in der vorteilhaften Lage, auf Aufbereitungsanlagen zu basieren, die nicht nur natürlich und ökologisch wertvoll, sondern auch wirtschaftlich günstig betrieben werden können und als Naherholungsgebiet stark frequentiert werden.

Betrieb der künstlichen Grundwasseranreicherung

Das Rheinwasser wird im Staugebiet des Kraftwerks Birsfelden gefasst, in die Lange Erlen gefördert und über Sandfilter vorfiltriert, um Schwebstoffe aus dem Wasser zu entfernen.

Das Filtratwasser (ca. 60.000 m³ pro Tag) wird anschliessend in 11 bewaldete Wässerstellen geleitet, welche im unteren, schweizerischen Teil des Wiesetals verteilt sind und gesamthaft eine Fläche von rund 20 ha bedecken. Diese sind hauptsächlich mit Hybridpappeln, Eschen und Erlen bestockt und meist in drei Felder unterteilt. Ein Feld wird dabei in der Regel während 10 Tagen bewässert, worauf sich eine Abtrocknungsperiode von 20 Tagen anschliesst.

Bis zum Grundwasserspiegel sickert das Wasser mit etwa 1 - 2 m/d zuerst durch eine Humus- und eine Auenlehmschicht von im Mittel je ca. 20 - 30 cm Mächtigkeit und

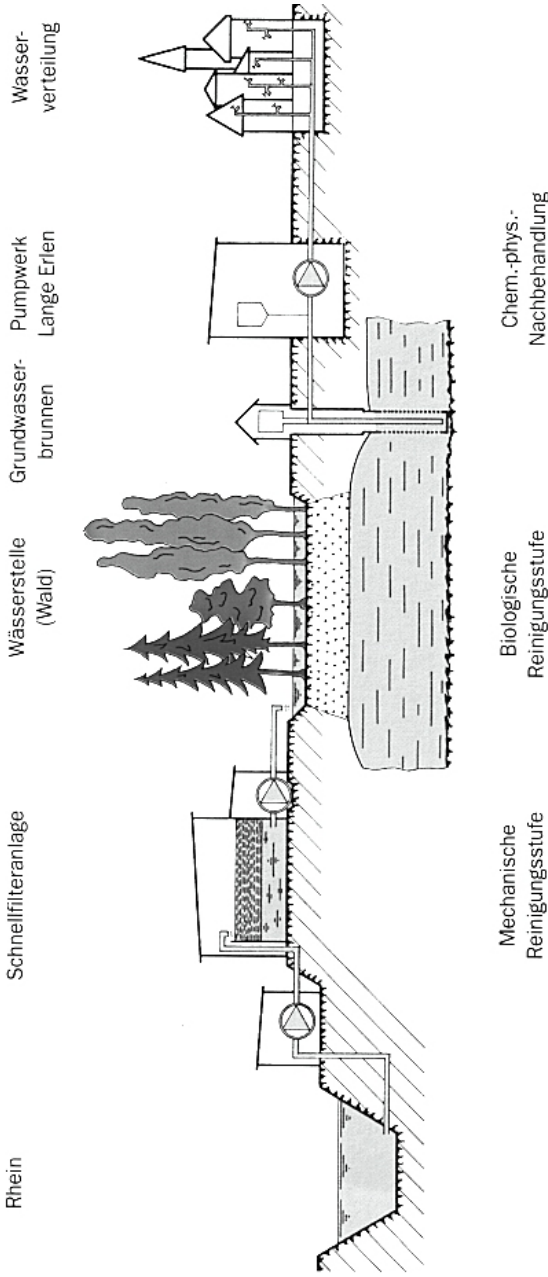


Abbildung 2: Das Grundwasserwerk Lange Erlen basiert seit 1964 auf der künstlichen Grundwasseranreicherung mit Rheinwasser



Abbildung 3: Rohwasserentnahme Rhein Km 163,9 oberhalb des Kraftwerks Birsfelden



Abbildung 4: Das Rheinwasserfiltrat wird in bewaldete Wasserstellen geleitet

anschliessend durch eine 2,5 - 3,5 m mächtige Kies- und Sandschicht. Bei dieser Bodenpassage wird das Wasser durch mechanische, chemische und biologische Prozesse gereinigt. Das Grundwasser wird nach ca. 200 - 800 m Fließstrecke als qualitativ einwandfreies Trinkwasser zur Oberfläche gepumpt.

Ergebnisse langjähriger Untersuchungsprogramme im Bereich der Grundwasserbewirtschaftung zeigen, dass das über die Grundwasseranreicherung bereitgestellte Trinkwasser qualitativ einwandfrei ist. Jedoch liegen über die konkreten Reinigungsprozesse in den Böden der Wasserstellen bisher nur wenige naturwissenschaftlich gesicherte Daten vor. Deshalb wurden am Departement Geographie der Universität Basel (Abteilungen Physiogeographie und Landschaftsökologie sowie NLU-Biogeographie) in Kooperation mit den Industriellen Werken Basel (IWB) mehrere Forschungsarbeiten über die Wasserstellen der Langen Erlen durchgeführt [4], [5], [6], [7]. Bisher wurde vermutet, dass in den Wasserstellen der Langen Erlen - ähnlich wie in künstlichen Langsandsfilteranlagen - organische Substanzen hauptsächlich in den obersten 10 - 30 cm der Bodenpassage aus dem Versickerungswasser entfernt werden. Im Rahmen einer noch laufenden und von den IWB unterstützten Dissertation [7] vorgenommene Untersuchungen von indirekten, bodenbiologischen Parametern (mikrobielle Aktivität und Biomasse) zeigten aber, dass die Reinigung des Versickerungswassers auch in grösseren Tiefen (2 - 3 m) erfolgt [8], [9]. Durch den Einsatz von Grundwasserentnahmerohren wurde nun auch ein direkter Nachweis der Verbesserung der chemischen Wasserqualität während der Boden- und Aquiferpassage ermöglicht.

Reinigungsprozesse während der Boden- und Aquiferpassage

Untersuchungsgebiet und Probennahme

Als Untersuchungsgebiet wurde die Wasserstelle "Verbindungsweg" sowie das Gebiet zwischen dieser Wasserstelle und den unterliegenden Brunnen ("Nebenbrunnen 10 E") ausgewählt (Abbildung 5). Der Grundwasserspiegel liegt im Untersuchungsgebiet im Mittel bei ca. 3 - 4 m und in der Wasserstelle während der Einleitung bei 2,6 m unter Flur. Der Grundwasserkörper ist ca. 7 m mächtig, und das Grundwasser ist mit 70 - 90 % Sauerstoffsättigung durchwegs aerob.

Im Dezember 1998 wurden in der Wasserstelle mehrere Bodenwasser- (BR 1, BR 3) und Grundwasserentnahmerohre (GR A, GR B) aus Edelstahl installiert. Drei weitere folgten entlang der vom hydrogeologischen Modell von [10] vorausgesagten Strömungsrichtung des Grundwassers von der Wasserstelle zum Brunnen (GR C - E).

Im Zeitraum von März bis November 1999 wurden während den Bewässerungsphasen mittels einer Tauchpumpe insgesamt 11 mal Proben aus den Rohren entnommen.

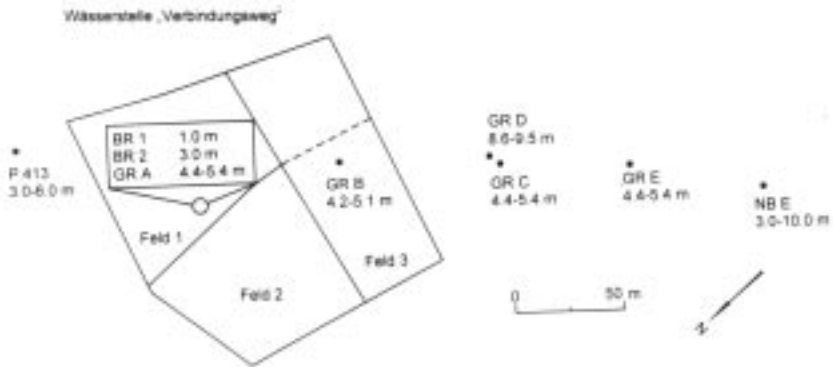


Abbildung 5: Lage der Bodenwasser- (BR) und Grundwasserentnahmerohre (GR) im Untersuchungsgebiet (P 413: von der Wässerung unbeeinflusstes Referenzrohr; NB E: Nebenbrunnen 10 E). Ziffern bezeichnen die Tiefe des Entnahmebereiches in m unter Flur

Ausgewählte Messparameter

Als chemische Messgröße zum direkten Nachweis einer Reinigung diente der gelöste organische Kohlenstoff (DOC, Dissolved Organic Carbon). Dieser Summenparameter ist eine wichtige Qualitätsgröße, da er die Gesamtbelastung eines Wassers mit organischen Substanzen beschreibt.

Nach einer Filtration der Proben bei $0,45 \mu\text{m}$ wurde der DOC-Gehalt mit einem TOC-Analysegerät bestimmt. Zusätzlich wurde mit einem Photometer die UV-Extinktion bei 254 nm Wellenlänge gemessen. Mittels des Verhältnisses der UV-Extinktion zum DOC-Gehalt (= spezifische UV-Extinktion) lässt sich eine Änderung der qualitativen Zusammensetzung organischer Wasserinhaltsstoffe beschreiben und damit eine erste Grobcharakterisierung des DOC vornehmen. Im Weiteren wurde zur Erfassung der biologischen Abbaubarkeit der Kohlenstoffverbindungen der AOC-Gehalt (Assimilable Organic Carbon) gemessen. Hierbei wurden nach vorheriger Sterilfiltration des Probenwassers autochthone Bakterien sowie eine anorganische Nährlösung zugegeben und das Bakterienwachstum über Trübungsmessungen bestimmt [11]. Mit Hilfe des AOC lässt sich auch das Wiederverkeimungspotential des abgegebenen Trinkwassers im Leitungsnetz erfassen.

Resultate

Der Gehalt an gelöstem organischem Kohlenstoff (DOC) nahm mit zunehmender Bodentiefe und Länge der Fließstrecke im Aquifer ab (Abbildung 6). Die anfängliche DOC-Belastung durch das Rohwasser von 1,7 mg/L betrug in 1 m Bodentiefe noch 1,6 mg/L, in 3 m

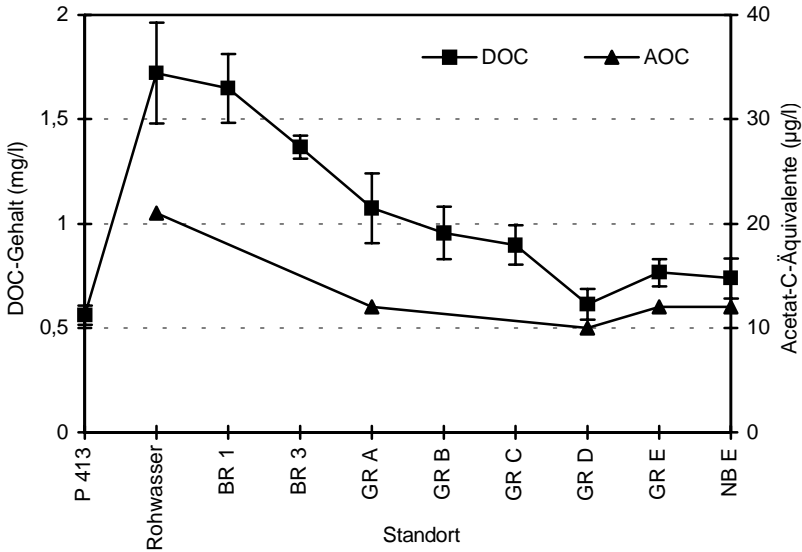


Abbildung 6: DOC- und AOC-Gehalte in den Wasserproben (DOC: $n = 11$; AOC: 18.08.99, aus [11], verändert)

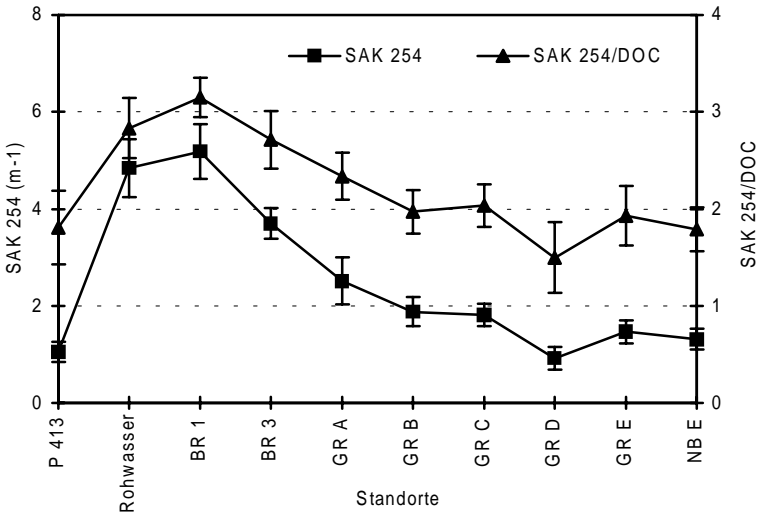


Abbildung 7: UV-Extinktionswerte (= Spektraler Absorptionskoeffizient bei 254 nm, "SAK 254") und Spezifische UV-Extinktion ("SAK 254/DOC") der Wasserproben von März - November 1999 ($n=11$)

1,3 mg/L und in 5 m noch 1,0 mg/L. Dies entsprach 65 % der gesamten DOC-Abnahme. Danach fand auf der ca. 250 m langen Flie遝sstrecke (= rund 10 Tage) von GR A bis zum Brunnen nur noch eine langsame Abnahme der Belastung statt (von 1,0 auf 0,7 mg/L). Der ursprüngliche DOC-Gehalt des von der Wässerung unbeeinflussten Grundwassers von im Mittel 0,56 mg/L (P 413) konnte im Nebenbrunnen 10 E noch nicht erreicht werden.

Die obere Grundwasserzone (5 m unter Flur), welche mit dem Rohr C erfasst wurde, wies mit 0,9 mg/L deutlich höhere DOC-Werte auf als die tiefere Grundwasserzone am selben Standort (GR D: 0,6 mg/L; 9 m unter Flur). Durch die Beprobung weiterer Pegelrohre und Nebenbrunnen in der Umgebung konnte gezeigt werden, dass das in der Wässerstelle versickerte Rheinwasser v. a. im Nebenbrunnen 10 E gefasst wird (Daten nicht dargestellt).

Die AOC-Messungen ergaben generell sehr niedrige Werte. Der Gehalt im Rohwasser wurde bereits während der Bodenpassage in der Wässerstelle (bis GR A) um 43 % reduziert und blieb danach praktisch konstant ([11]; Abbildung 6).

Im Gegensatz zum DOC zeigten die Werte der UV-Extinktion im Verlaufe des ersten Meters der Bodenpassage bei allen Messungen konstant eine leichte Zunahme (im Mittel um 8 % von 4,84 auf 5,18 m⁻¹; Abbildung 7).

Das Verhältnis von UV-Extinktion zum DOC-Gehalt (= spezifische UV-Extinktion) nahm im Mittel um 11 % zu. Bis in 5 m Bodentiefe hingegen fiel die UV-Extinktion auf 2,5 m⁻¹, was 68 % der Abnahme während der gesamten Boden- und Aquiferpassage entsprach. Die spezifische UV-Extinktion ebenso wie die UV-Extinktion selbst nahmen auch während der Aquiferpassage leicht ab (von 2,34 auf 1,79, bzw. von 2,51 auf 1,31). Gleich wie beim DOC-Gehalt liess sich in 5 m Tiefe eine deutlich höhere Belastung feststellen als am selben Standort in 9 m Tiefe (Vergleich von GR C und GR D).

Diskussion

Prozesse während der Bodenpassage / Infiltration

In Grundwasseranreicherungsanlagen mit grossen Langsamsandfilterbecken, wie sie z. B. entlang der Ruhr vorkommen, geschieht die Reinigung vorwiegend im Biofilm an der Filteroberfläche [12], [13], [14]. In den Wässerstellen der Langen Erlen kann sich aber wegen der langen Trockenphasen kein dichter Biofilm entwickeln.

Biologische Langsamsandfilter zeichnen sich auch durch eine homogene Filterstruktur und Korngrossenzusammensetzung aus, welche zu einer gleichmässigen und langsamen Infiltration führen. In den Waldböden der 'Langen Erlen' hingegen gelangt das Wasser konzentriert über biogene Makroporen wie Mäuse- und Regenwurm gänge relativ schnell in grössere Tiefen (1 - 2 m; [6]). Der Biofilm auf Langsamsandfiltern muss wegen Hemmung der Infiltra-

tion periodisch entfernt werden. In den 'Langen Erlen' aber sind die für Waldökosysteme typischen Bodentiere mitverantwortlich für die über Jahrzehnte konstante Sickerleistung. Sie sind somit ein zentraler Bestandteil des vorgestellten Systems.

■ Mikrobieller Abbau

Untersuchungen der mikrobiellen Aktivität (gemessen als Bodenrespiration) sowie der mikrobiellen Biomasse deuten klar daraufhin, dass die Abnahme des DOC-Gehaltes und der UV-Extinktion innerhalb der ungesättigten Zone auf mikrobiellen Abbau zurückzuführen ist. Die Aktivität war zwar deutlich an der Oberfläche konzentriert, nahm aber mit der Tiefe nur langsam ab [8]. Somit lag auch in grösserer Bodentiefe (2 - 3 m) noch genügend organisches Material zur Mineralisierung vor. Dies kann einerseits mit dem fehlenden Biofilm an der Bodenoberfläche erklärt werden, andererseits mit der raschen Infiltration über die biogenen Makroporen.

Auch die AOC-Gehalte lassen auf einen mikrobiellen Abbau organischer Verbindungen innerhalb der ungesättigten Zone bzw. der obersten Grundwasserschicht (bis GR A) schliessen. Entlang der restlichen Fließstrecke von 250 m (GR A bis NB E) war keine weitere Abnahme der AOC-Konzentration erkennbar. Der verbleibende DOC scheint somit unter den gegebenen Bedingungen kaum weiter abbaubar zu sein. Deshalb und aufgrund der allgemein niedrigen AOC-Werte ist das Wiederverkeimungspotential des geförderten Grundwassers als gering zu betrachten.

■ Generierung von neuem DOC

Zusätzlich zum Eintrag mit dem Rheinwasser werden durch den Abbau von organischem Pflanzenmaterial wie z. B. Laubstreu im Oberboden auch weitere organische Stoffe freigesetzt, was sich in den zunehmenden UV-Extinktionswerten widerspiegelt. Dies kann neben dem fehlenden Biofilm und dem Makroporenfluss ein weiterer Grund für die im Vergleich mit konventionellen Anlagen etwas langsamere Abnahme der DOC-Konzentration in der obersten Bodenschicht sein. Genauere Angaben über die in der Humusschicht abgebauten bzw. neu generierten Mengen an DOC wären nur durch weitere, z. T. komplexe Untersuchungen erhältlich (Streuabbau-Versuche, Analysen mit ¹³C-Isotopen oder DOC-Charakterisierungen).

■ Verdünnung und Sorption

Durch die künstliche Grundwasseranreicherung wird der natürliche Grundwasserspiegel, der im Untersuchungsgebiet bei ca. 5 - 6 m unter Flur liegt, allgemein auf ca. 3 - 4 m unter Flur angehoben. In der Wasserstelle selbst wird während der Wässerung gegenüber der Umgebung zusätzlich ein kleiner Grundwasserberg erzeugt (Spiegel in ca. 2,6 m Tiefe). Eine Verdünnung mit natürlichem Grundwasser kann deshalb bei den Rohren BR 1 und BR 3 (Fassungstiefen 1 bzw. 3 m) völlig ausgeschlossenen werden. Beim Rohr GR A (4,4 - 5,4 m unter Flur) ist zwar ein Verdünnungseffekt möglich, angesichts der versicker-

ten Rohwassermenge ($1 - 2 \text{ m}^3/\text{m}^2/\text{d}$) aber wahrscheinlich gering.

Eine mögliche zwischenzeitliche Adsorption von organischen Molekülen an Bodenpartikeln während der Wässerung mit nachfolgendem mikrobiellen Abbau während der Trockenphase wird noch untersucht.

Prozesse während der Aquiferpassage

Die Reinigungsprozesse im Aquifer sind aufgrund der jetzigen Datenlage schwierig zu quantifizieren:

■ Mikrobieller Abbau

Untersuchungen der mikrobiellen Biomasse [8] ebenso wie die leicht abnehmende spezifische UV-Extinktion deuten auf möglichen mikrobiellen Abbau von organischer Substanz auch im Aquifer hin. Der allfällige mikrobielle Abbau scheint aber so gering zu sein, dass er mit der AOC-Bestimmung nicht messbar war. Eine selektive Adsorption von Huminstoffen am Aquifermaterial als Grund für die sich ändernde spezifische UV-Extinktion wäre möglich, aber unter den gegebenen Umständen nicht in nennenswerten Mengen zu erwarten (s. u.).

■ Verdünnung

Die Abnahme der DOC-Konzentration könnte neben dem mikrobiellen Abbau auch durch eine Verdünnung des Versickerungswassers mit zuströmendem, weniger belastetem Grundwasser verursacht werden. Anhand der theoretischen Mischungslinie war die Verdünnung alleine nicht ganz ausreichend, um die DOC-Abnahme erklären zu können. Um den Einfluss der Verdünnung aber genauer zu quantifizieren, werden noch Messungen des Gehaltes an Radon und weiterer, nicht-reaktiver Tracer (Chlorid, Bromid) im Grundwasser vorgenommen und ein weiterentwickeltes Grundwasserströmungsmodell des Institutes für Angewandte Geologie, Universität Basel, eingesetzt.

■ Sorption

Andere Effekte wie Adsorption/Desorption von DOC am heterogenen Aquifermaterial, sind kaum genau zu quantifizieren, da sich der Summenparameter aus Tausenden von verschiedenen Substanzen zusammensetzt, welche jeweils ein unterschiedliches Ad- bzw. Desorptionsverhalten aufweisen. Primäre Adsorptionsoberfläche für DOC sind die organische Substanz und Tonminerale. Bohrkern-Analysen zeigten nur geringe Gehalte an organischem Kohlenstoff und Ton im Aquifer ($0,1 - 0,2 \%$, bzw. $1 - 5 \%$), weshalb nur eine schwache Adsorption zu erwarten ist. Zudem ist die untersuchte Wasserstelle seit über 35 Jahren in Betrieb (mit ca. $800.000 \text{ m}^3/\text{a}$), so dass Sorptionsprozesse vernachlässigt werden können. Dies gilt auch bei der Abnahme der spezifischen UV-Extinktion.

Fazit

In den Wässerstellen der Langen Erlen wird mit einem naturnahen und effektiven System der künstlichen Grundwasseranreicherung auf bewaldeten Alluvialböden über viele Jahrzehnte Trinkwasser von hoher Qualität gewonnen.

Über die Reinigungsprozesse bei der Boden- und Aquiferpassage bestehen momentan folgende Erkenntnisse:

- Entgegen bisherigen Annahmen nimmt der Gehalt an gelösten, organischen Substanzen im Versickerungswasser im Verlaufe der gesamten Boden- und Aquiferpassage ab.
- Während der Bodenpassage ist die Reinigung des Rohwassers vor allem durch mikrobiellen Abbau verursacht. Dabei erfolgt die DOC-Abnahme hauptsächlich in 1 - 5 m Bodentiefe und nicht an der Bodenoberfläche wie in konventionellen biologischen Langsandsfilteranlagen. Der Grund dafür liegt im fehlenden Biofilm an der Bodenoberfläche.
- Beim Infiltrationsprozess wird durch den Abbau von Pflanzenmaterial noch zusätzlich DOC ins Wasser eingetragen.
- Bei der Aquiferpassage ist die Abnahme der DOC-Konzentration vermutlich durch Verdünnung mit zuströmendem, natürlichem Grundwasser bedingt. Der Anteil von mikrobiellem Abbau und Sorptionseffekten ist schwierig einzuschätzen, vermutlich aber eher als gering zu betrachten. Das geförderte Grundwasser ist biologisch stabil und weist nur ein geringes Wiederverkeimungspotential auf.
- Aufgrund der bestehenden Unsicherheiten über den genauen Anteil einzelner Teilprozesse an der gesamten Reinigung sind weitere Detailuntersuchungen erforderlich (z. B. Einrichtung zusätzlicher Grundwassermessstellen, Lysimeter-, Säulen- und Testfilterversuche, Tracerversuche, DOC-Charakterisierungen, usw.).

Weitere Abklärungen zur künstlichen Grundwasseranreicherung im Gebiet der Langen Erlen sind vorgesehen. Im Vordergrund steht dabei, dieses naturnahe System zu erhalten und optimiert weiter zu betreiben. Mit den gewonnenen Kenntnissen soll es auch an anderen Orten eingesetzt werden können.

Dank

Die Autoren danken dem TZW, Karlsruhe, für die AOC-Bestimmungen sowie der Firma Glanzmann AG, Basel, für die Installation der Grundwasserrohre.

Literatur

- [1] *Hegi, R.:*
Die Entwicklung der Wasserversorgung von Basel, Dissertation, Universität Basel (1928).
- [2] Die Wasserversorgung von Basel-Stadt, Industrielle Werke Basel (IWB).
- [3] *Wülser, R.; Schnyder, D.:*
Untersuchungsbericht zur Qualitätssicherung am Basler Trinkwasser, Industrielle Werke Basel (IWB) (1995).
- [4] *Schmid, M.:*
Eignung einer Riedwieseninfiltration für die künstliche Grundwasseranreicherung in den Langen Erlen. Diplomarbeit am Departement Geographie, Universität Basel. 1 - 88 (1997).
- [5] *Geissbühler, U.:*
Veränderung der biologischen Filterung in den Wasserstellen der Langen Erlen im Winterhalbjahr. Diplomarbeit am Departement Geographie, Universität Basel. 1 - 90 (1998).
- [6] *Dill, A.:*
Die Böden der hinteren Langen Erlen und ihr Infiltrationsvermögen. Diplomarbeit am Departement Geographie, Universität Basel. 1 - 148 (2000).
- [7] *Rüetschi, D.:*
Der Bewässerungszyklus der künstlichen Grundwasseranreicherung in den Langen Erlen bei Basel: Auswirkungen auf die Grundwasserqualität, die mikrobielle Bodenaktivität und die Filtrationsleistung (Arbeitstitel). Doktorarbeit am Departement Geographie, Universität Basel (in Bearbeitung).
- [8] *Rüetschi, D.; Schmid, M.; Geissbühler, U.; Wüthrich, C.:*
Trinkwassergewinnung in bewaldeten und offenen Wasserstellen der Langen Erlen: Mikrobielle Aktivität und Biomasse im Boden. In: *Regio Basiliensis* 40/2, 151 - 153 (1999).
- [9] *Rüetschi, D.; Schmid, M.; Geissbühler, U.; Wüthrich, C.:*
Biological purification of recharge water by forested soils. In: Peters, J.H. et al. *Artificial Recharge of Groundwater*. A.A. Balkema. Rotterdam, 457 - 459 (1998).

- [10] *Zechner, E.:*
Hydrogeologische Untersuchungen und Tracertransport-Simulationen zur Validierung eines Grundwasserströmungsmodells der Langen Erlen (Basel-Stadt).
Dissertationen aus dem Geologisch-Paläontologischen Institut der Universität Basel, Nr. 8. 1 - 156 (1996).
- [11] *Hamsch, B.:*
Bericht zur Untersuchung von Wasserproben der Grundwasseranreicherung "Langen Erlen" der Industriellen Werke Basel auf assimilierbaren organischen Kohlenstoff im Juni und August 1999. Unpubl. Bericht des Technologiezentrums Wasser, Karlsruhe. 1 - 13 (1999).
- [12] *Frank, W. H.:*
Historical development and present state of artificial groundwater recharge in the Federal Republic of Germany. In: Artificial Groundwater Recharge. DVWK-Bulletin 11. Parey. Hamburg, 13 - 41 (1982).
- [13] *Eighmy, T. T.; Collins, R. M.; Spanos, S. K.; Fenstermacher, J.:*
Microbial Populations, Activities and Carbon Metabolism in Slow Sand Filters. Wat. Res. 26 (10): 1319 - 1328 (1992).
- [14] *Hozalski, R. M.; Goel, S.; Bouwer, E. J.:*
TOC removal in biological filters. Jour. AWWA. 87 (12): 40 - 63 (1995).