

GRUNDWASSERQUALITÄT IN PUMPWERKEN

ENTWICKLUNG NACH UMSETZUNG VON MASSNAHMEN IN DER LANDWIRTSCHAFT – AM BEISPIEL VON NITRAT

Gebiete der Grundwasserneubildung werden oft landwirtschaftlich genutzt. Entsprechend häufig treten dort Nitratkonzentrationen sowie Metaboliten von Pflanzenschutzmitteln auf. Wie rasch sich die Grundwasserqualität nach Umsetzung von Massnahmen in der Landwirtschaft verbessert, und welches Konzentrationsniveau erreicht werden kann, ist abhängig von diversen Faktoren. Die wichtigsten werden in diesem Artikel diskutiert. Auch wird darauf eingegangen, welche Lehren aus Nitratprojekten für andere Stoffe aus diffusen Quellen, insbesondere für Metaboliten von Pflanzenschutzmitteln, gezogen werden können.

Daniel Hunkeler, Zentrum für Hydrogeologie und Geothermie (CHYN), Universität Neuenburg*

RÉSUMÉ

EVOLUTION DE LA QUALITÉ DE L'EAU SOUTERRAINE DANS LES CAPTAGES APRÈS MISE EN ŒUVRE DE MESURES AGRICOLES

Dans les régions agricoles, des teneurs élevées en nitrate et en métabolites provenant de produits phytosanitaires sont souvent détectées. Dans les dernières décennies, de nombreux projets ont été menés afin de diminuer les teneurs de ces composés via des changements de pratiques agricoles. L'effet de ces projets sur la qualité de l'eau a été très variable et de grands écarts entre prédictions et évolution effective ont parfois été observés. Dans cet article, les facteurs clés contrôlant l'évolution de la qualité de l'eau souterraine suite à la mise en place de mesures agricoles sont discutés, avec un accent sur le nitrate.

La gamme de concentrations dans les captages et leur évolution dans le temps sont influencées par différents facteurs du système sol/zone insaturée/nappes phréatiques. Pour pouvoir faire une prévision fiable, il est important de prendre en compte le système entier sans négliger la troisième dimension. Au niveau du sol, selon le type de sol, le taux de perte en azote peut fortement varier. Ainsi pour la même pratique agricole, la teneur en nitrate peut fortement varier dans l'eau souterraine et ainsi dans l'eau pompée au niveau d'un captage. Le stockage intermédiaire de substances dans la zone insaturée peut entraîner un retard considérable de l'effet des mesures, de l'ordre de plusieurs années, surtout dans le cas de zones

EINLEITUNG

In der Schweiz stammen 80% des Trinkwassers aus Grundwasserleitern. Oftmals werden Gebiete, in denen Grundwasser durch Versickerung von Niederschlag gebildet wird, landwirtschaftlich genutzt. Dies ist insbesondere für die sehr ergiebigen Lockergesteinsvorkommen in den Talebenen der Fall. In solchen Gebieten treten häufig erhöhte Nitratkonzentrationen sowie Metaboliten von Pflanzenschutzmitteln auf [1]. Diese Stoffe sind im Grundwasser stabil und können aufgrund ihrer hohen Mobilität über grosse Distanzen verfrachtet werden. Entsprechend reichen Massnahmen zu deren Reduktion in der Schutzzone alleine nicht aus, sondern müssen auf der Ebene des Zuströmbereichs einer Fassung getroffen werden. Mit der Einführung des Art. 62a im Gewässerschutzgesetz in 1998 wurde ein Mechanismus geschaffen, um Programme zur Änderung der Landnutzung in Gebieten mit solchen persistenten Belastungen umsetzen und finanziell abgelden zu können. In der Folge wurden diverse Projekte in die Wege geleitet, vor allem mit dem Ziel, die Nitratbelastungen zu reduzieren. Dabei wurden verschieden starke Massnahmen getroffen: vom Anbau von Zwischenkulturen und Direktsaat bis zu einer kompletten Umstellung von Ackerbau in Graswirtschaft. Bei diesen Projekten wurde eine unter-

* Kontakt: Daniel.Hunkeler@unine.ch

schiedlich starke und unterschiedlich rasche Reduktion der Nitratkonzentrationen beobachtet (Fig. 1). Teilweise gab es grosse Diskrepanzen zwischen der prognostizierten und effektiv beobachteten Entwicklung.

In diesem Artikel werden die wichtigsten Faktoren diskutiert, die bestimmen, wie rasch sich die Grundwasserqualität nach Umsetzung von Massnahmen in der Landwirtschaft verbessert, und welches Konzentrationsniveau erreicht werden kann. Dabei steht Nitrat im Vordergrund. Es wird aber auch diskutiert, welche Lehren aus Nitratprojekten für andere Stoffe aus diffusen Quellen, insbesondere Metaboliten von Pflanzenschutzmitteln, gezogen werden können. Im Artikel stehen pedologische und hydrogeologische Faktoren im Vordergrund, welche die Stoffkonzentration in Pumpwerken beeinflussen. Es geht darum, wie sich eine bestimmte Reduktion des Eintrags auf den Konzentrationsverlauf in einem Pumpwerk auswirkt. Mit welchen agronomischen Massnahmen eine solche Reduktion erreicht werden kann, wird hingegen nicht diskutiert. Der Artikel stützt sich dabei vor allem auf verschiedene MSC (*Master of Science*)-Projekte ab, die in den letzten Jahren am Zentrum für Hydrogeologie und Geothermie der Universität Neuenburg in Zusammenarbeit mit Partner aus der Praxis durchgeführt wurden. Es werden auch einfache Methoden, wie

der Einfluss von verschiedenen Faktoren abgeschätzt werden kann, illustriert.

WICHTIGE EINFLUSSFAKTOREN AUF DIE GRUNDWASSERQUALITÄT

Nachfolgend werden die wesentlichen Faktoren diskutiert, welche die Höhe der Nitratkonzentration in einem Pumpwerk und deren zeitlichen Verlauf nach Umsetzung von Landnutzungsänderungen beeinflussen. Es wird das Gesamtsystem innerhalb des Zuströmbereichs einer Fassung betrachtet, von der Bodenoberfläche bis zu den Pumpwerken. Dabei wird von Gebieten mit ergiebigen Grundwasservorkommen ausgegangen d.h. vom Vorhandensein eines gut durchlässigen Grundwasserleiters mit oxischen Verhältnissen, der durch eine feinkörnigere Deckschicht überlagert ist. Diese Deckschicht kann auf rezente Ablagerungen (z.B. Überschwemmungs- und Verlandungssedimente) und/oder Verwitterungs- oder Bodenbildungsprozesse zurückzuführen sein.

OBERBODEN

Unterschiede im Bodentyp können zu räumlich variablen Nitratkonzentrationen im Grundwasser führen. Dies kann zu unterschiedlichen Nitratkonzentrationen in Pumpwerken führen, selbst bei vergleichbarer Landnutzung. Die Nitratkonzentration im Grundwasser wird sowohl durch hydrologische Faktoren wie

auch Stoffumsetzungsprozesse beeinflusst. In tonreicheren, schweren Böden wird Wasser durch Kapillarkräfte stärker zurückgehalten. Entsprechend bleibt auch Nitrat länger im Wurzelraum und kann von Pflanzen aufgenommen werden, während in sandigen Böden eine rasche Auswaschung erfolgt. Ein stärkerer Wasserrückhalt hindert auch den Luftzutritt in den Porenraum, was zu anoxischen Bedingungen und einer Denitrifikation führen kann. Dabei findet im Zusammenhang mit einer Oxidation von organischem Material des Oberbodens eine Umwandlung von Nitrat zu N_2 statt. Der Einfluss der Bodeneigenschaften auf die Nitratkonzentration ist am Beispiel des nördlichen Berner Seelands gut ersichtlich (Fig. 2a). Obwohl nahezu die gesamte Oberfläche des Grundwasserleiters landwirtschaftlich intensiv genutzt wird, variieren die Nitratkonzentrationen räumlich stark [2]. Während im zentralen Bereich häufig Konzentrationen im Bereich von 25 und 40 mg/l und teils darüber auftreten, nehmen diese in Richtung des nord-westlichen Randes (< 10 mg/l) (Bereich Binnenkanal) ab. Diese Zone zeichnet sich auch durch niedrigere Sauerstoffgehalte im Grundwasser (Fig. 2b), d.h. anoxische Bedingungen, aus. Ein Vergleich der Bodenkarte mit den Nitratwerten (Fig. 2a und b) verdeutlicht ebenfalls den starken Einfluss des Bodentyps. Die nord-östliche Zone mit niedrige-

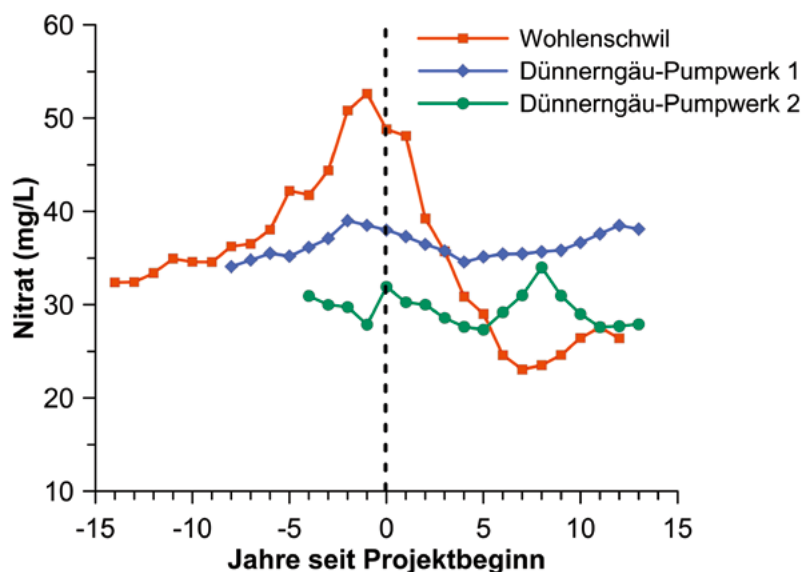


Fig. 1 Zeitliche Entwicklung der Nitratkonzentration nach Umsetzung von Landnutzungsänderungen in Wohlenschwil und Dünnerngäu

Évolution de la concentration de nitrates après que des changements ont été apportés à l'utilisation des sols à Wohlenschwil et à Dünnerngäu

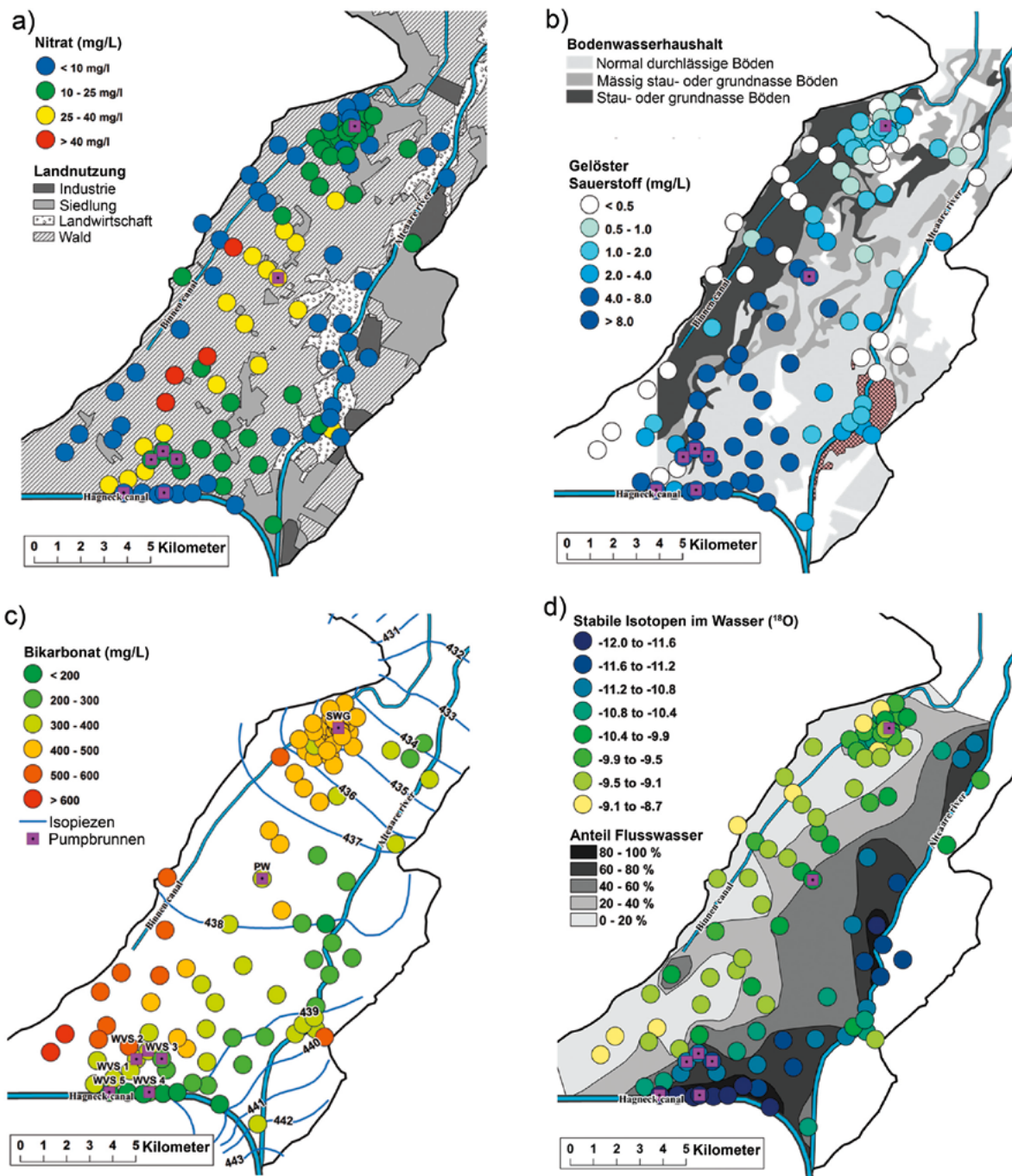


Fig. 2 Hydrochemie und stabile Isotopen (^{18}O) des Grundwassers im nördlichen Seeland (modifiziert nach [2])

Hydrochimie et isotopes stables (^{18}O) des nappes phréatiques au nord du Seeland (adopté de [2])

ren Nitratwerten ist deckungsgleich mit der Zone der schweren, schlecht drainierenden Böden, wodurch Nitratrückhalt und Denitrifikation gefördert wird. Liegen solche grossräumig klar definierten Zonen mit unterschiedlichen Bodentypen innerhalb eines Zuströmbereichs vor, können bei Nitratprojekten räumlich

unterschiedliche Massnahmen getroffen werden. So wurde es beispielsweise im Nitratprojekt *Montrichier* gehandhabt, wo zwischen kiesigen und Moränenböden unterschieden wurde.

Die Nitratauswaschung hängt auch von klimatischen Bedingungen bzw. der Bewässerung ab. Dies wurde beispielsweise

vom *Agroscope* in einer Lysimeterstudie aufgezeigt [3]. Tritt ein Wasserdefizit im Boden auf, wird das Pflanzenwachstum und auch die Nährstoffaufnahme gebremst und zusätzlich die Bodenlösung aufkonzentriert. Dies führt zu einer erhöhten Nitratauswaschung in den nachfolgenden feuchten Perioden, wie nach

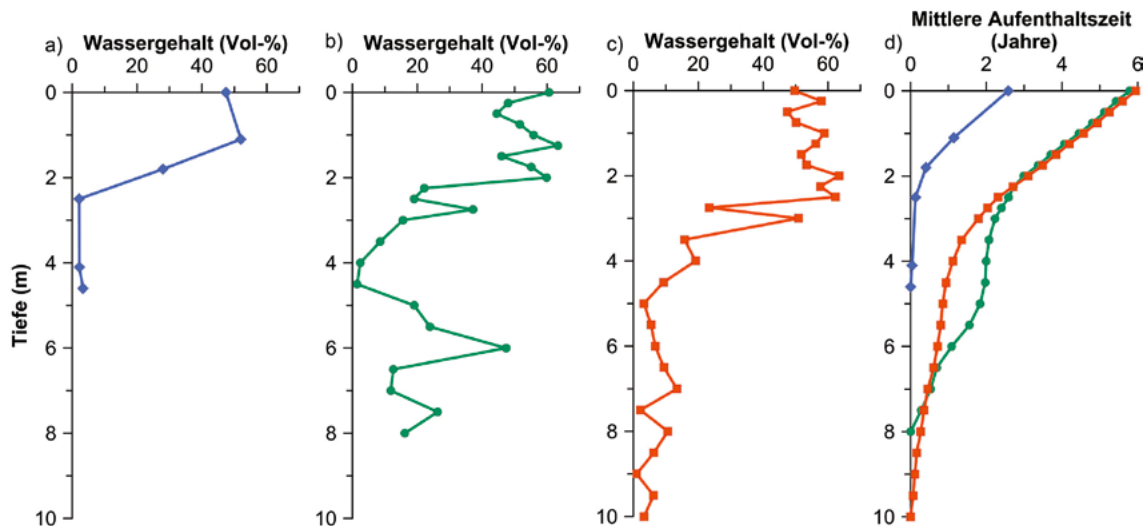


Fig. 3 Porenwassergehalt in der ungesättigten Zone im Berner Seeland (a) und Dünnerngäu (b, c). Abgeschätzte mittlere Aufenthaltszeit (d) des Porenwassers als Funktion der Tiefe bei einer Grundwasserneubildung von 380 mm/Jahr

Teneur en eau interstitielle dans la zone insaturée du Seeland bernois (a) et du Dünnerngäu (b, c) Estimation de la durée de séjour moyenne de l'eau interstitielle (d) fonction de profondeur dans le renouvellement des nappes phréatiques de 380 mm/an

dem Hitzesommer 2003 weit verbreitet beobachtet wurde (s. Beispiel *Wohlen-schwil*, Fig. 1). Umgekehrt kann eine übermässige Bewässerung zu einer stärkeren Auswaschung von Nitrat führen. Der geringste Stickstoffverlust tritt bei einer bedarfsgerechten Bewässerung auf.

UNGESÄTTIGTE ZONE

In der ungesättigten Zone zwischen Boden und Grundwasserspiegel kann Nitrat zwischengespeichert werden, wodurch sich Landnutzungsänderungen nur verzögert im Grundwasser bemerkbar machen. Nitrat lagert sich kaum an Kornoberflächen an und bewegt sich mit der Geschwindigkeit des Wassers durch den Untergrund. Die Speicherung von Nitrat in dieser Zone hängt deshalb direkt von der Aufenthaltszeit des Wassers in der ungesättigten Zone ab. Die mittlere Aufenthaltszeit kann aufgrund der Wassermenge in der ungesättigten Zone und der Grundwasserneubildungsrate abgeschätzt werden. Wie die Beispiele *Gäu* [4] und *Seeland* [5] aufzeigen, kann die feinkörnige Deckschicht aufgrund der stärkeren Kapillarkräfte eine viel grössere Menge an Wasser zurückhalten als der darunterliegende Kies (Fig. 3). Im Diagramm ist auch die Aufenthaltszeit des Wassers bis zum Erreichen des unteren Profilrandes dargestellt. Bei einer typischen Grundwasserneubildung von 380 mm/Jahr beträgt die mittlere Aufenthaltszeit in der ungesättigten Zone

2,6 und 6 Jahre für die beiden Beispiele. Die Aufenthaltszeit hängt nicht nur von der Gesamtmächtigkeit der ungesättigten Zone ab, sondern auch vom Anteil der Zonen mit einem höheren Wasserrückhalt. Feinkörnigere Schichten tragen dabei stärker zur verzögerten Reaktion bei. Solche Zonen mit hohem Wassergehalt können mehrere Meter unter die Bodenoberfläche reichen oder auch in grösserer Tiefe auftreten, wie das Beispiel *Gäu* zeigt (Fig. 3). Allerdings kann teilweise in solchen Zonen Denitrifikation erfolgen, insbesondere wenn diese einen hohen Gehalt an organischem Material aufweisen.

GRUNDWASSERLEITER

Bei Massnahmen im Hinblick auf persistente Stoffe wie Nitrat ist der Zuströmbereich die relevante Grösse. Die hydrogeologisch korrekte Ausscheidung des Zuströmbereichs ist hierbei eine Grundbedingung für ein erfolgreiches Projekt. Dabei ist es auch wichtig, die Herkunft des Grundwassers zu kennen – insbesondere den Anteil, der durch landwirtschaftliche Böden versickert ist. Diese stärker belastete Komponente kann je nach hydrogeologischen Bedingungen mit weniger belasteten Zuflüssen gemischt werden, was im Folgenden als Verdünnungseffekt bezeichnet wird. Je stärker dieser Verdünnungseffekt ist, desto weniger intensive Massnahmen sind nötig, um einen bestimmten Zielwert zu erreichen. Zusätzlich beeinflussen hydrogeologische

Faktoren, mit welcher zeitlichen Verzögerung Massnahmen sich in einem Pumpwerk auswirken. Im Folgenden werden diese beiden Aspekte separat diskutiert.

Verdünnungseffekt

Ein «Verdünnungseffekt» tritt vor allem durch Zufluss aus randlichen, bewaldeten Zonen sowie durch Infiltration aus (vor) alpinen Fliessgewässern auf. Inwiefern solche Zuflüsse eine Rolle spielen, kann meist aufgrund der Hydrochemie und teils mittels stabilen Isotopen im Grundwasser abgeschätzt werden. Aufgrund von neuen Messmethoden können Wasserisotope nun kostengünstig analysiert werden. Bezüglich Hydrochemie gibt die Konzentration an Kalzium und Bikarbonat ein Mass für den Anteil an Wasser, der aus intensiv landwirtschaftlich genutzten Flächen stammt. Dies ist auf die Wechselwirkung des Wassers mit Karbonat-Mineralien zurückzuführen, die auch im Lockergestein meist weit verbreitet vorliegen. In intensiv landwirtschaftlich genutzten Zonen weist die ungesättigte Zone einen hohen CO_2 -Gehalt auf. Die Menge an biologischem CO_2 wird durch die Bodenbearbeitung, den Einsatz von Düngern und der grosse Menge an gebildeter Biomasse begünstigt. Während in der Atmosphäre der Gehalt an CO_2 lediglich 0,038 Vol.-% beträgt, kann dieser unter landwirtschaftlich genutzten Böden bis zu 10 Vol.-% erreichen – d.h. bis zu 250mal höher sein. Ein Teil des

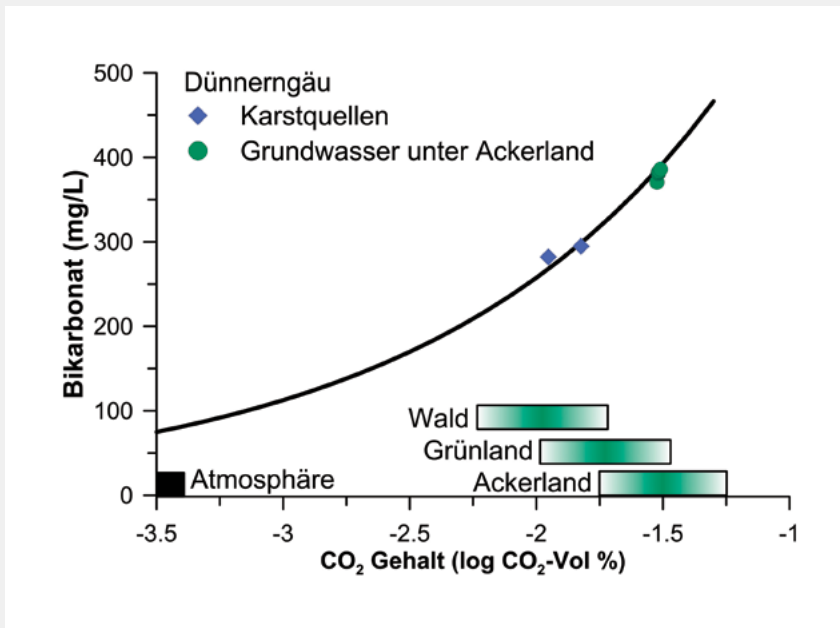


Fig. 4 Bikarbonat als Funktion des CO₂-Gehalts in der ungesättigten Zone, durch die die Grundwasserneubildung stattfindet. Typischer CO₂-Gehalt bei unterschiedlicher Landnutzung. Bicarbonate en fonction de la teneur en CO₂ dans la zone insaturée traversée par l'eau de recharge. Teneur en CO₂ pour différentes utilisations du sol.

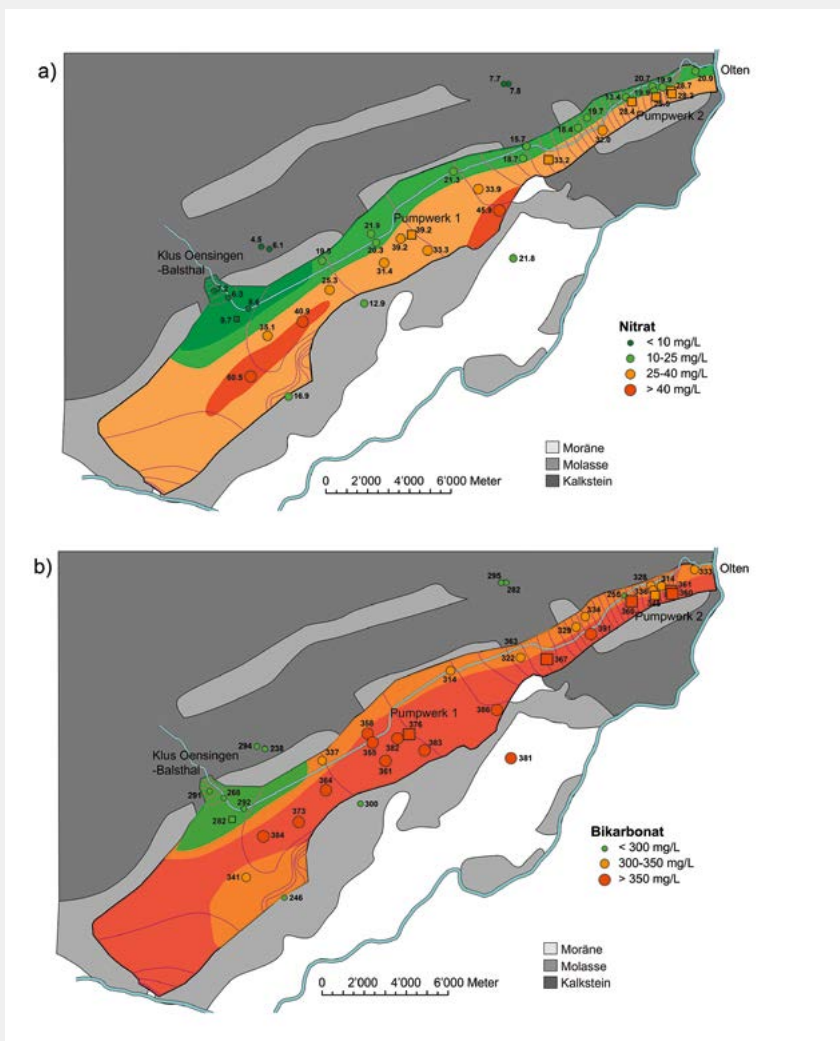


Fig. 5 Räumliche Verteilung von Nitrat (a) und Bikarbonat (b) im Dünnerngäu Grundwasserleiter Répartition spatiale des nitrates (a) et du bicarbonate (b) dans l'aquifère de Dünnerngäu

CO₂ geht unter der Bildung von Kohlensäure ins Porenwasser über. Dies führt zu einem «korrosiven» Wasser, das mehr Karbonat-Mineralien auflösen kann. Der Zusammenhang zwischen der Menge an CO₂ und der Hydrochemie ist in *Figur 4* dargestellt. Unter Wäldern und Wiesen hingegen ist der CO₂-Gehalt geringer. Oberflächengewässer steht nur das atmosphärische CO₂ zur Verfügung. Entsprechend weist Wasser, das in Wäldern und Wiesen infiltriert, einen «mittleren» Gehalt an Kalzium und Bikarbonat auf und Wasser aus Fließgewässern einen sehr geringen Gehalt.

Der Zusammenhang zwischen Mischungsanteilen an verschiedenen Wässern und Nitratkonzentration ist am Beispiel *Dünnerngäu* ersichtlich [4]. Grundwasser im Bereich der Klus von Oensingen-Balsthal und entlang des Juras im östlichen Teil des Grundwasserleiters weist eine geringere Nitratkonzentration auf als im südlicheren Teil des Grundwasserleiters (*Fig. 5*). Die Bikarbonat-Konzentration korreliert mit der Nitratkonzentration (*Fig. 6*). Eine «Verdünnung» der landwirtschaftlich geprägten Wasserkomponente erfolgt vor allem durch den Zufluss von nitratarmem Wasser aus dem Jura, via die Klus und via Malm-Kalke, die im östlichen Teil direkt mit dem Lockergesteinsgrundwasserleiter in Kontakt stehen. In Böden des Juras ist die CO₂-Konzentration oft geringer, aufgrund der geringeren Bodenmächtigkeit und den tieferen Temperaturen, welche die biologische Aktivität verlangsamt. Dies führt zu geringeren Kalzium- und Bikarbonat-Konzentrationen und zum «Paradox», dass Wasser aus dem Jura weicher ist als in Lockergestein versickernder Niederschlag.

Der Anteil des Grundwassers, das aus Fließgewässern stammt, kann häufig auch mit Wasserisotopen quantifiziert werden, sofern es sich um (vor)alpine Fließgewässer handelt. Diese Methode kann vor allem dann von Interesse sein, wenn sowohl Randzuflüsse wie Fließgewässer die Nitratkonzentration beeinflussen, und die Hydrochemie alleine keine schlüssigen Informationen liefert. Das Prinzip der Methode beruht auf systematischen räumlichen Unterschieden in der Isotopenzusammensetzung (¹⁸O, ²H) des Niederschlags. Da Wassermoleküle mit schweren Isotopen zuerst kondensieren, weist der Niederschlag im Mittelland mehr von diesen auf als Niederschlag in den (Vor)alpen. Entsprechend enthalten

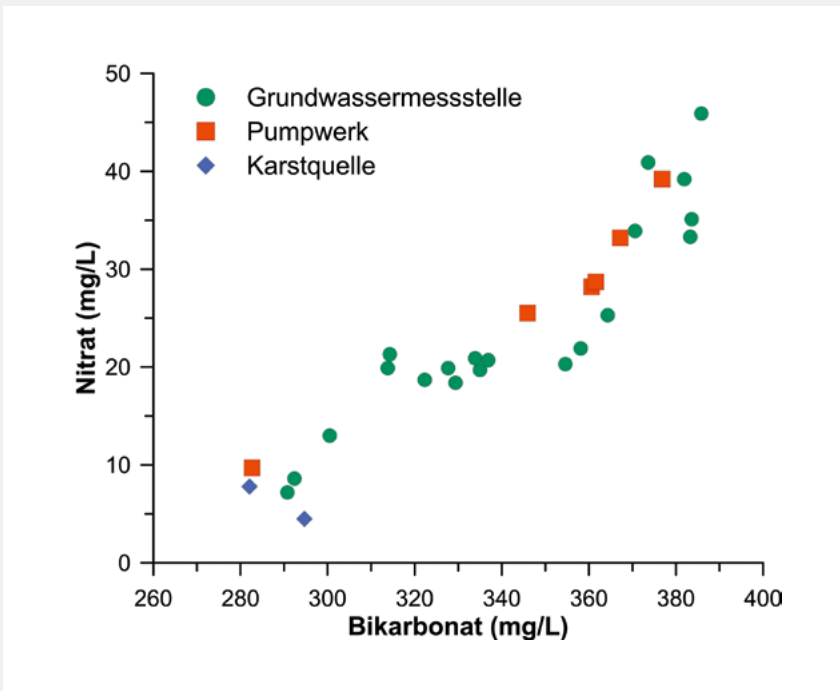


Fig. 6 Korrelation zwischen Bikarbonat und Nitratkonzentration für Grundwassermessstellen, Pumpwerke und Karstquellen des Dünnergäus
 Corrélation entre les concentrations en nitrates et en bicarbonate pour piézomètres, puits de pompage et sources karstiques du Dünnergäu

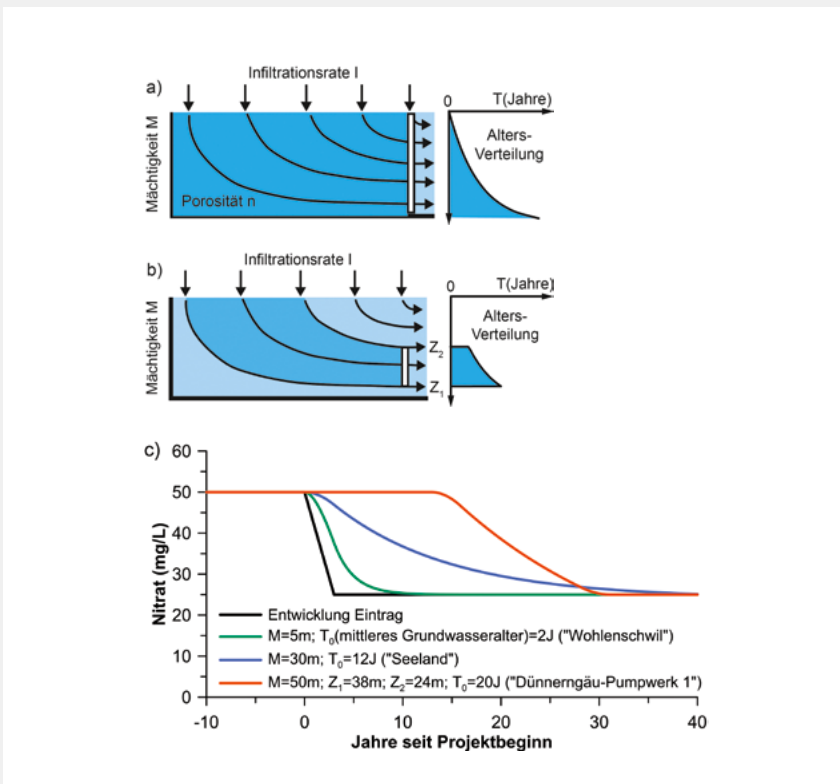


Fig. 7 Schematische Darstellung des Einflusses der Grundwasserleitermächtigkeit und der Entnahmetiefe auf die Altersverteilung des gepumpten Grundwasser (a, b) und die Konzentrationsentwicklung in einem Pumpwerk nach Halbierung des Eintrags (c). Die zusätzliche Verzögerung durch die ungesättigte Zone ist nicht berücksichtigt.
 Représentation schématique de l'influence de l'épaisseur de l'aquifère et de la zone de prélèvement la distribution de l'âge de l'eau pompée (a) et sur l'évolution de la concentration dans un captage suite à une réduction des apports de nitrate de moitié (c). L'effet de retard du la zone insaturée n'est pas pris en compte.

Flüsse aus dem (vor)alpinen Raum einen geringeren Anteil an schweren Isotopen im Vergleich zu Grundwasser, das sich aus lokalen Niederschlägen oder Randzuflüssen bildet.

Am Beispiel *Seeland* kann gut aufgezeigt werden, wie sich alpines Wasser, das via Fließgewässer in einen mittelländischen Grundwasserleiter gelangt ist, aufgrund von Isotopen detailliert kartieren lässt (Fig. 2d). Entlang des Hagneckkanals und der Alten Aare ist die Isotopensignatur des Grundwassers ähnlich wie in der Aare, und der Anteil des Aarewassers kann mit einer einfachen Mischungsrechnung abgeschätzt werden [2]. Zonen mit hohem Anteil an Aarewasser weisen eine niedrige Nitratkonzentration auf. Das Beispiel zeigt auch, wie im gleichen Grundwasservorkommen sowohl Verdünnungseffekte als auch Unterschiede im Bodentyp die Nitratkonzentration beeinflussen.

Zeitliche Verzögerung

Zusätzlich zu ungesättigten Zone führt auch der Transport des Nitrats durch die gesättigte Zone zu einer verzögerten Wirkung von Landnutzungsänderungen [6]. Die Entwicklung der Nitratkonzentration hängt nicht nur vom mittleren Alter des gepumpten Wassers, sondern auch von dessen Altersverteilung ab. Die Altersstruktur des gepumpten Wassers hängt wiederum von der Altersverteilung des Wassers im Grundwasserleiter sowie vom Bereich, aus dem Grundwasser entnommen wird, ab. In einem ungespannten Grundwasserleiter mit Grundwasserneubildung über die gesamte Fläche nimmt das Grundwasseralter nicht in Richtung der Grundwasserströmung, sondern mit der Grundwassertiefe zu (Fig. 7a). Der Verzögerungseffekt hängt deshalb stark davon ab, wie mächtig der Grundwasserleiter ist, und über welchen Tiefenbereich Grundwasser entnommen wird. Wie rasch sich eine Halbierung des Eintrags auf die Wasserqualität in Pumpwerken auswirken ist in *Figur 7* schematisch für drei Fälle dargestellt. Die drei Fälle entsprechen dabei stark vereinfacht den Beispielen die in diesem Artikel diskutiert werden. Wird über die gesamte Mächtigkeit Wasser entnommen (Fig. 7a) machen sich Änderungen im Eintrag ins Grundwasser sofort bemerkbar (Fig. 7c). Für einen geringmächtigen Grundwasserleiter (*Wohlenschwil*) verläuft der Rückgang rascher als für einen mächtigeren (*See-*

land). Wird Wasser aus einer grösseren Tiefe gepumpt, fehlt die junge Alterklasse (Fig. 7b). Ein Rückgang der Konzentration ist nur mit einer Verzögerung zu beobachten (Fig. 7c, *Dünnergäu-Pumpwerk 1*). Während eine solche Konfiguration einen guten Schutz vor abbaubaren Substanzen ergibt, führt diese zu einem langanhaltenden Auftreten von persistenten Verbindungen.

ZUSAMMENSPIEL DER VERSCHIEDENEN FAKTOREN ILLUSTRIERT AN FALLBEISPIELEN

Anhand dieser Einflussfaktoren lässt sich die stark zeitliche Entwicklung und Konzentrationsniveau in Pumpwerken an den erwähnten Standorten erklären: Der Standort *Wohlenschwil* weist zwar eine relativ mächtige ungesättigte Zone auf (10–12 m). Diese hat aber eine relativ geringes Wasserrückhaltevermögen. Zusätzlich weist die gesättigte Zone nur eine geringe Mächtigkeit und das Grundwasser entsprechend eine kurze Aufenthaltszeit auf. Entsprechend reagiert das System rasch auf Landnutzungsänderungen (Fig. 1).

Das *Dünnergäu* weist im zentralen Bereich eine sehr mächtige ungesättigte Zone auf (bis 35 m) teils mit feinkörnigen Ablagerungen auch in grösserer Tiefe (Fig. 3). Zusätzlich ist auch die gesättigte Zone mächtig (bis zu 50 m). Die Pumpwerke profitieren unterschiedlich stark von einem Verdünnungseffekt und weisen aufgrund der Entnahmetiefe eine unterschiedliche lange Verzögerung in der gesättigten Zone auf.

Der Extremfall ist das *Pumpwerk 1 im Dünnergäu* (Fig. 1, Fig. 5), das aufgrund der geringen Verdünnung eine relativ hohe Nitratkonzentration aufweist. Die mächtige ungesättigte Zone und die grosse Entnahmetiefe führen zudem zu einer langen Verzögerung, ca. 25 Jahre, bis die Massnahmen wirken.

Aufgrund des Zuflusses aus dem Jura weisen das *Pumpwerk 2 im Dünnergäu* (Fig. 1, Fig. 5) hingegen tiefere Nitratkonzentrationen auf. Durch ihre geringere Entnahmetiefe zeigen die Massnahmen früher Wirkung.

Die Pumpwerke im *Seeland* weisen trotz der intensiven landwirtschaftlichen Nutzung vergleichsweise geringe Nitratgehalte auf. Die Pumpwerke in der Nähe des *Hagneckkanals* profitieren von einem Verdünnungseffekt durch infiltrierendes Oberflächenwasser. Das nördliche Pumpwerk *SWG* weist angesichts der in-

tensiven landwirtschaftlichen Nutzung eine vergleichsweise geringe Nitratkonzentration auf, da der Zuströmbereich die Zone mit Nitratelimination durch Denitrifikation erfasst.

ÜBERTRAGBARKEIT DER ERKENNTNISSE

Neben erhöhten Nitratkonzentrationen treten in intensiv landwirtschaftlich genutzten Gebieten häufig Metaboliten von Pflanzenschutzmitteln und teils auch die Pflanzenschutzmittel an sich auf. In verschiedenen Regionen der Schweiz laufen Pilotprojekte, bei denen freiwillig auf bestimmte Pflanzenschutzmittel verzichtet wird, insbesondere um das häufig festgestellte Auftreten von Chloridazon-Metaboliten zu reduzieren. Dazu werden im Einzugsgebiet der betroffenen Fassungen Ersatzstoffe verwendet, von denen keine Grundwassergefährdung erwartet wird. An verschiedenen Standorten konnte bislang aber kein Rückgang der Konzentrationen beobachtet werden. Es stellt sich die Frage, welche Faktoren die Persistenz dieser Substanzen im Untergrund erklären und inwiefern Resultate und Erkenntnisse aus den Nitratprojekten auf diese Substanzgruppe übertragbar sind.

Pflanzenschutzmittel weisen, im Hinblick auf Abbau und Transport im Untergrund, ein komplexeres, hydrochemisches Verhalten als Nitrat auf. Pflanzenschutzmittel werden häufig unter oxidischen Bedingungen umgesetzt, Nitrat dagegen wird bei anoxischen Bedingungen abgebaut. Beim Abbau von Pflanzenschutzmitteln können relativ stabile und gut wasserlösliche Metaboliten entstehen. Über deren weiteren Abbau ist aber meist recht wenig bekannt, insbesondere für die tieferen Zonen, mit einer generell geringen mikrobiellen Aktivität. Pflanzenschutzmittel und teils auch Metaboliten interagieren auch stärker mit der Festphase als Nitrat, insbesondere mit organischem Material sowie auch mit Mineraloberflächen. Über diese Interaktionsprozesse liegen für Metaboliten wiederum wenig Informationen vor.

Zudem ist auch das Verhältnis zwischen ausgebrachter Stoffmenge und Grundwasser-Qualitätsziel bei Pflanzenschutzmitteln anders als bei Nitrat. Die Ausgabemenge für Pflanzenschutzmittel (typischerweise 1–3 kg/ha) ist drei Grössenordnungen geringer als für Nitrat (typischerweise 150–300 kg N/ha oder 650–1300 kg NO₃/ha). Das Qualitätsziel

für Pflanzenschutzmittel (0,1 µg/l) ist aber um mehr als fünf Grössenordnungen geringer als für Nitrat (25 mg/l). Für Metaboliten von Pflanzenschutzmitteln besteht zwar momentan kein Qualitätsziel, gemäss Gewässerschutzverordnung sind aber generell persistente Stoffe im Grundwasser unerwünscht. Im Gegensatz zu Nitrat führt bei Pflanzenschutzmittel bereits ein 100mal kleinerer Anteil an Auswaschung zu einer Konzentration im Bereich des Qualitätsziels. Selbst wenn berücksichtigt wird, dass ein bestimmtes Pflanzenschutzmittel auf einer kleineren Fläche ausgebracht wird als Nitrat, bleibt dieser Unterschied bestehen.

Aus diesen Überlegungen lässt sich ableiten wie die zeitliche Entwicklung von Pflanzenschutzmitteln/Metaboliten nach einer Reduktion des Eintrags aussehen könnte, im Vergleich zu Nitrat. Eine Wechselwirkung der Substanzen mit Gestein führte zu einer Verlangsamung des Transportes durch den Untergrund (Retardation). Die Retardation ist für Metaboliten wahrscheinlich geringer als für Pflanzenschutzmittel, aufgrund deren höheren Polarität und Wasserlöslichkeit. Bei Pumpwerken mit einem hohen Wasseralter kann auch eine geringe Retardation zu einer zusätzlichen Verzögerung um mehrere Jahre führen. Umgekehrt kann bei langen Aufenthaltszeiten auch ein nur sehr langsamer Abbau zu einer Reduktion oder vollständigen Elimination der Substanzen führen. Allerdings gibt es bislang nur wenige Kenntnisse, ob Stoffe, die im niedrigeren µg/l im Grundwasser vorliegen, abgebaut werden, oder ob der Energiegewinn für Mikroorganismen zu gering ist.

Neben diesen Stoffeigenschaften kann auch die Heterogenität des Untergrundes, zusammen mit dem grösseren Verhältnis zwischen Aufgabemenge und Qualitätsziel für Pflanzenschutzmittel, zu unterschiedlichen Trends führen. Sowohl Nitrat wie auch Pflanzenschutzmittel/Metaboliten können in schlechter durchlässige Zonen des Untergrundes gelangen. Während die gut durchlässigen Zonen nach Umsetzung von Landnutzungsänderung rascher «gespült» werden, bleiben die Stoffe in schlechter durchlässigen Zonen länger zurück. Aufgrund des kleineren Verhältnisses zwischen Ausgabemenge und Qualitätsziel bei Nitrat ist es unwahrscheinlich, dass solche schlechter durchlässige Zonen die Erreichung des Qualitätsziel verhindern. Nitrat aus diesen Zonen wird mit Wasser

aus besser durchlässigen Zonen, in denen die Massnahmen früher eine Wirkung zeigen, genügend verdünnt.

Wie rasch der Nitrat-Zielwert erreicht wird, hängt entsprechend vor allem von der Aufenthaltszeit des Grundwassers in den besser durchlässigen Zonen ab. Dieser Trend kann durch eine Denitrifikation in den schlechter durchlässigen Zonen weiter verstärkt werden. Im Unterschied dazu ist es bei Pflanzenschutzmitteln/Metaboliten denkbar, dass langsames «Ausbluten» aus schlechter durchlässigen Zonen zu Konzentrationen $> 0,1 \mu\text{g/l}$ führen kann. Die Dauer, bis das Qualitätsziel erreicht wird, würde entsprechend von der Aufenthaltszeit in diesen Zonen abhängen und daher beträchtlich länger sein als für Nitrat. Zusätzlich können anoxische Bedingungen in solchen Zonen die Stabilität der Pflanzenschutzmittel/Metaboliten erhöhen.

SCHLUSSFOLGERUNGEN

Die Diskussion verdeutlicht, dass die Entwicklung der Grundwasserqualität nach Umsetzung von Massnahmen in der Landwirtschaft durch verschiedene Komponenten des Systems Boden/ ungesättigte Zone/Grundwasser beeinflusst wird. Für eine zuverlässige Prognose muss entsprechend das Gesamtsystem betrachtet werden. Dabei ist es insbesondere wichtig, die vertikale Dimension des Gesamtsystems nicht zu vernachlässigen. Die zwischenzeitliche Speicherung von Stoffen in der ungesättigten Zone kann zu einer beträchtlichen Verzögerung der Wirkung von Massnahmen führen. Diese ist insbesondere bei mächtigen ungesättigten Zonen und/oder beim Vorhandensein von feinkörnigen Schichten mit einem hohen Wasserrückhalt der Fall. Ebenso führt die Entnahme von Grundwasser aus grösserer Tiefe zu einer zusätzlichen Verzögerung. Weiterhin sollten bei Prognosen

«Verdünnungseffekte» berücksichtigt werden, die es teilweise erlauben, Qualitätsziele mit weniger starken Massnahmen zu erreichen. Im Rahmen von Flussrevitalisierungsprojekten könnten solche Prozesse auch aktiv beeinflusst werden. Fließgewässer aus dem (vor) alpinen Raum oder bewaldeten Randbereichen weisen oft eine hohe chemische Qualität auf und eine weitere Verbesserung kann durch die Aufrüstung der Kläranlagen erwartet werden. Eine verstärkte Infiltration an gut ausgewählten Stellen kann zu einer Verbesserung der Grundwasserqualität in intensiv genutzten Talebenen führen. Während für Nitrat die wesentlichen Einflussfaktoren auf die Konzentrationsentwicklung gut bekannt sind, gibt es bei Pflanzenschutzmitteln/Metaboliten noch beträchtliche Lücken. Konzeptuelle Überlegungen zeigen, dass diese Stoffe, im Vergleich zu Nitrat, länger in erhöhten Konzentrationen auftreten könnten. Eine mögliche längere Persistenz sollte auch bei der Festlegung von Qualitätszielen für Metaboliten berücksichtigt werden. Dafür ist aber ein besseres Verständnis der kontrollierenden Prozesse nötig. Deshalb wird dieser Problematik momentan im Rahmen eines Forschungsprojektes nachgegangen, das vom SVGW im Rahmen des Forschungsfonds Wasser FOWA sowie BAFU unterstützt wird.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] BAFU (2009): *Ergebnisse der Grundwasserbeobachtung Schweiz (NAQUA). Zustand 2004-2006. Umwelt-Zustand Nr. 0903. p. 144*
- [2] Baillieux, A. et al. (2014): *Regional water quality patterns in an alluvial aquifer: Direct and indirect influences of rivers. Journal of Contaminant Hydrology. 169: p. 123-131*
- [3] Vögeli Albisser, C.; Prasuhn, V. (2013): *Auswirkungen des Klimawandels auf die Schadstoffverfrachtung ins Grundwasser, Forschungsanstalt ART. p. 106*
- [4] Hunkeler, D. et al. (2015): *Nitratprojekt Gäu-Olten: Hydrochemische Erkundung des Grundwasserlei-*

ters und Bestimmung der Altersstruktur, Universität Neuenburg und Universität Bern. p. 80

- [5] Bucher, S. (2012): *Effect of unsaturated zone denitrification on nitrate distribution in groundwater, Universität Neuenburg, MSc Arbeit. p. 75*
- [6] Baillieux, A. et al. (2015): *Assessing groundwater quality trends in pumping wells using spatially varying transfer functions. Hydrogeology Journal. 23(7): p. 1449-1463*

> SUITE DU RÉSUMÉ

insaturées de grande épaisseur et/ou dans le cas de la présence de couches à grains fins avec une rétention d'eau substantielle. Un effet de retard supplémentaire intervient dans l'aquifère. Celui-ci est particulièrement important dans le cas d'un aquifère de grande épaisseur et si l'eau souterraine est pompée en profondeur sous le toit de la nappe. La gamme de concentrations observée dépend également du taux de «dilution» de l'eau souterraine provenant des zones agricoles par d'autres apports moins chargés en nitrate, comme l'infiltration de l'eau à partir de cours d'eaux (pré)alpins ou des apports latéraux de zones forestières. Alors que le comportement du nitrate dans le milieu souterrain est bien connu, ce n'est pas encore le cas pour les pesticides et leurs métabolites, ce qui rend une prévision plus difficile. Ces composés peuvent potentiellement être retenus par les grains de l'aquifère, ce qui ralentit leur migration, ou s'accumuler dans des zones moins perméables. Ainsi, ils pourront potentiellement arriver dans les captages à des teneurs élevées plus longtemps que le nitrate. La dynamique des pesticides et de leurs métabolites dans le milieu souterrain fait actuellement l'objet d'études dans le cadre d'un projet de recherche soutenu par la SSIGE et l'OFEV.