

Nitrat im Trinkwasser

**Überprüfung der landwirtschaftlichen
Massnahmen in Nitratprojekten des
Kantons Freiburg**



Überprüfung der landwirtschaftlichen Massnahmen in Nitratprojekten des Kantons Freiburg

Adrian v. Niederhäusern¹, Thomas Niggli¹, Raphael Kropf² und Victor Kessler³

¹Landwirtschaftliches Institut des Kantons Freiburg LIG, CH-1725 Posieux

²Amt für Umwelt AfU, CH-1701 Fribourg

³Bundesamt für Landwirtschaft BLW, CH-3003 Bern

Auskünfte: Thomas Niggli, E-Mail: Thomas.Niggli@fr.ch, Tel. +41 26 305 58 83

Zusammenfassung

In Nitratprojekten soll die Nitratauswaschung durch eine angepasste Bewirtschaftung der landwirtschaftlichen Nutzflächen im Einzugsgebiet von Trinkwasserfassungen reduziert werden, um die Qualitätsanforderung an als Trinkwasser genutztes Grundwasser erfüllen zu können. Gemäss Gewässerschutzverordnung (SR814.201) beträgt dies 25mg NO₃/l. Da in zwei Projekten der angestrebte Rückgang der Nitratkonzentration im Grundwasser vorerst ausblieb, wurde eine Massnahmenüberprüfung eingeleitet.

In vier Projekten des Kantons Freiburg führte man im Jahr 2007 auf jeweils 3 – 4 Parzellen N_{min}-Kampagnen durch. Unter Grünland und Winterweizen waren die Werte stets befriedigend (ab 30 cm Tiefe stiegen sie kaum über 20 kg N/ha), Gebiete mit hohem Nitratgehalt im Grundwasser zeigten gegenüber den anderen Gebieten keine signifikant höheren Werte. Bohrungen im Zuströmbereich einer Fassung mit hohem Nitratgehalt zeigten 5 Jahre nach Projektbeginn ein deutliches Stickstoffdepot ab 10 m Tiefe, wobei im feinsandigen Untergrund bis zu 30 kg N/ha gemessen wurden. Die Analysen der Stickstoffisotope des im Wasser gelösten Nitrats zeigten, dass das Verhältnis zwischen Stickstoff organischen und mineralischen Ursprungs teilweise nicht mit der aktuellen Düngungspraxis in den Projektgebieten übereinstimmt. In diesen Fällen stammt das Nitrat noch aus der Zeit vor Einführung der Projekte. Die eingeleiteten landwirtschaftlichen Massnahmen sind daher als wirksam einzustufen, ihre positive Wirkung auf das Grundwasser tritt aber je nach hydrogeologischen Bedingungen des Untergrunds mehr oder weniger verzögert ein.

Die Nitratprojekte

Seit der Einführung des Artikels 62a (1999) im Gewässerschutzgesetz (GSchG) leistet der Bund Abgeltungen an die für die Sanierung eines verschmutzten Grundwasservorkommens notwendigen landwirtschaftlichen Massnahmen. Seither sind im Kanton Freiburg 7 Projekte umgesetzt worden. Die Tatsache, dass in einzelnen Projekten die Nitratwerte noch nicht wie erwartet sanken, führte zu Unsicherheiten und Meinungsverschiedenheiten in den betroffenen Gemeinden. Die vorliegende Untersuchung überprüft die bisher getroffenen Massnahmen.

In mehreren Gebieten des Kantons Freiburg wurden im Trinkwasser regelmässig Nitratwerte von über 40 mg/l gemessen, womit auch der Trinkwassertoleranzwert überschritten ist. Bis heute haben 7 Gemeinden im Einzugsgebiet ihrer betroffenen Trinkwasserfassungen Nitratprojekte nach Art. 62a GSchG gestartet. Mit den Bewirtschaftern der entsprechenden Parzellen wurden dazu 6-jährige Vereinbarungen getroffen, welche die Bewirtschaftung so regeln, dass eine Nitratsanierung möglich wird. Die von Bund, Kanton und den Eigentümern der Wasserfassungen geleistete Entschädigung kompensiert das durch die eingeschränkte Bewirtschaftung tiefere landwirtschaftliche Einkommen. Mögliche Bewirtschaftungen sind das Anlegen von Dauergrünland mit Einschränkungen in der Düngung oder eine "grüne Fruchtfolge", welche mindestens zur Hälfte aus Kunstwiese besteht und höchstens eine Hackfrucht (Mais oder Zuckerrüben) beinhaltet. Dabei muss im Winter der Boden stets bedeckt sein. Zudem bestehen weitere Bestimmungen zur reduzierten Bodenbearbeitung und zur Minimierung unbedeckter Ackerfläche. Düngergaben vor der Saat und ausserhalb der Vegetationszeit sind nicht erlaubt und die jeweils auszubringenden Mengen sind limitiert.

Umfang der Untersuchung

Die vorliegende Wirksamkeitsprüfung bezieht sich auf die Projekte der Gemeinden Lurtigen, Courgevaux, Fétigny und Domdidier. Von besonderem Interesse sind die Projekte Fétigny und Lurtigen, bei denen die Projekte Strukturveränderungen auslösten, die Nitratgehalte jedoch noch nicht im erwarteten Ausmass zurück gingen.

Die Wirksamkeit der Massnahmen wurde anhand von drei Faktoren beurteilt:

- N_{\min} -Kampagnen auf ausgewählten Parzellen
- Bohrungen im Zuströmbereich des Projektes Fétigny
- Stickstoffisotopenanalyse des gefassten Trinkwassers



Abb. 1. Entnahme der N_{\min} -Proben in Lurtigen

Die N_{\min} -Kampagnen wurden von Mai bis November 2007 auf insgesamt 14 Parzellen durchgeführt, wobei monatlich pro Parzelle eine Beprobung mit 12 Bohrungen erfolgte. Für die Tiefen von 0–30 cm, 30–60 cm und 60–90 cm stellte man jeweils eine Mischprobe zusammen. Die Probenentnahmen wurden 2008 auf je 2 Parzellen in Fétigny und Lurtigen weitergeführt.

Mit der N_{\min} -Methode wird die bedarfsgerechte Stickstoffdüngermenge ermittelt. Sie wird in der Regel im Frühjahr durch Auswertung von Bodenproben ermittelt. Dabei wird der aktuelle pflanzenverfügbare und mineralisierte Stickstoff im Boden analysiert (Ammonium und Nitrat). In Kombination mit den deklarierten Düngergaben der Landwirte und den Wetterdaten lässt sich die landwirtschaftliche Praxis überprüfen und eine potentielle Nitratauswaschung abschätzen.

In Fétigny weisen die geologischen Untersuchungen auf eine 15–20 m mächtige, vorwiegend sandige Ablagerung oberhalb des Grundwasserspiegels hin. Daher ergänzte man die N_{\min} -Proben der Parzellen durch zwei 20 m tiefe Kernbohrungen, um die gesamte Bodenschichten bis auf das Niveau des Grundwassers erfassen zu

können. Dabei wurde in jedem Bohrmeter eine repräsentative Probe entnommen und diese bis zur Analyse rasch eingefroren.

Die Isotopensignaturen des Stickstoffs im Wasser geben Hinweise auf verschiedene Prozesse im Stickstoffkreislauf, womit insbesondere die Herkunft des Nitrats bestimmt werden kann. Dünger aus tierischer Herkunft weist für das Isotop ^{15}N einen δ -Wert von $\geq 10 \text{ ‰}$ auf, während bei mineralischem Dünger, der aus Luftstickstoff produziert wird, dieser Wert dem Referenzwert $\delta^{15}\text{N} = 0 \text{ ‰}$ entspricht (Kreitler 1975). Da in Nitratprojekten aufgrund des höheren Grünlandanteils normalerweise eine Umstellung von mineralischem auf organischen Dünger erfolgt, kann anhand dieser Signatur abgeschätzt werden, ob die veränderte Bewirtschaftung ihre Spuren bis ins Grundwasser zeigt oder nicht.

Heterogene Entwicklung der Nitratgehalte im Wasser

Die Nitrat Auswaschung ins Grundwasser ist stark von der Jahreszeit und den Niederschlägen abhängig. Insbesondere nach ergiebigen Niederschlägen und vor allem ausserhalb der Vegetationszeit kann die Auswaschung nur noch geringfügig durch Kulturmassnahmen beeinflusst werden. Daher sind sprunghafte Entwicklungen, wie sie im Frühjahr 2006 besonders in Lurtigen und Courgevau eintraten, unvermeidbar. Die starken Niederschläge im März und April (158 und 179 mm) spülten viel Nitrat ins Grundwasser aus. Eine präzise Entwicklung der Nitratwerte im Grundwasser ist daher nur sehr schwer prognostizierbar.

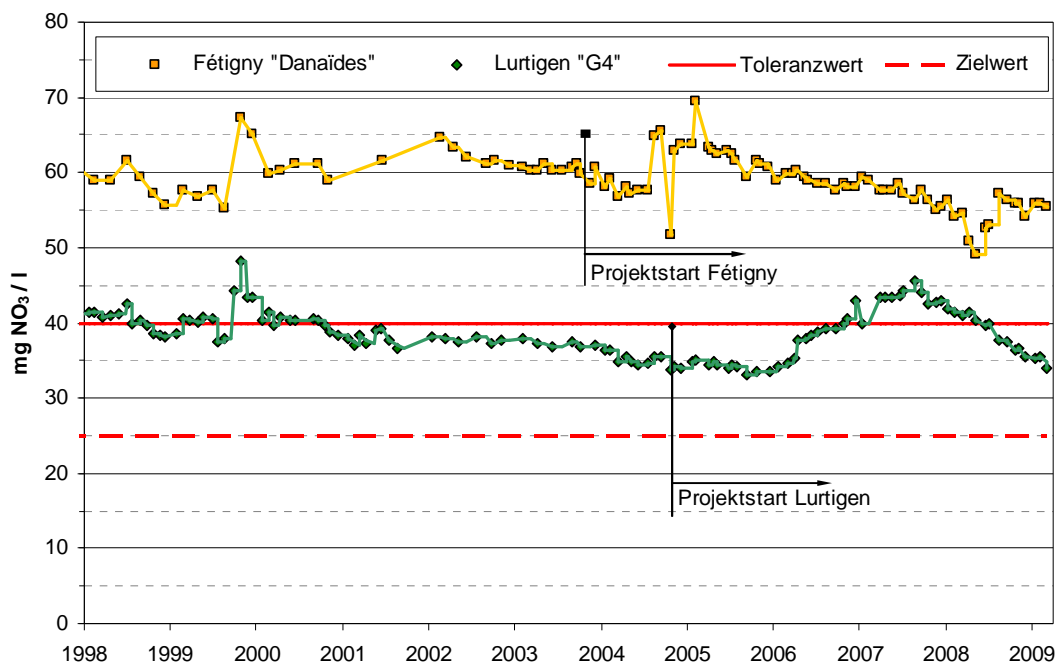


Abb. 2.

Entwicklung der Nitratgehalte im Wasser der Fassungen "Danaïdes" in Fétigny und "G4" in Lurtigen sowie jeweiliger Startzeitpunkt der Projekte. Januar 1998 – März 2009

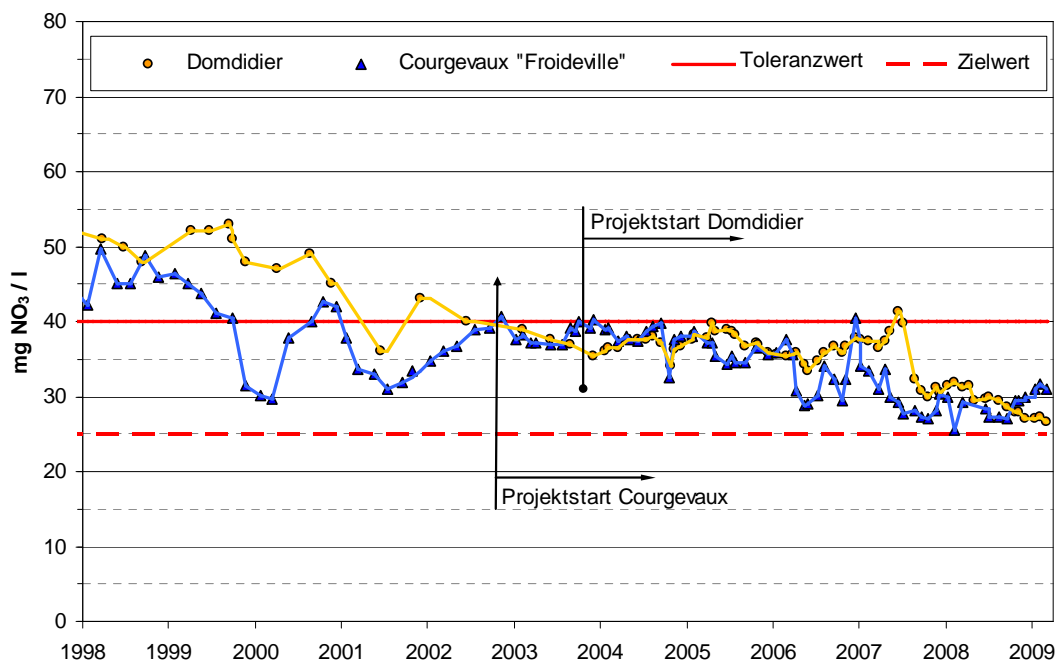


Abb. 3. Entwicklung der Nitratgehalte im Wasser der Fassungen in Domdidier und Courgevaux sowie jeweiliger Startzeitpunkt der Projekte. Januar 1998 – März 2009

Durch die Auswirkungen von Wetter und Bodenbeschaffenheit ist nach Einführung der Projekte keine einheitliche Nitratentwicklung in den verschiedenen Gebieten erkennbar (Abb. 2 und 3). Während sich in Courgevaux und Domdidier die Werte unter

dem Trinwassertoleranzwert von 40 mg/l stabilisieren oder weiter abnehmen, zeigte sich besonders in der Fassung G4 in Lurtigen vorerst ein Anstieg der Nitratkonzentration, welche inzwischen aber wieder unter das Niveau vor Projektbeginn gesunken ist. In Fétigny scheint dagegen nach erheblichen Schwankungen Ende 2004 und Mitte 2008 ein schwacher, aber stabiler Abwärtstrend eingesetzt zu haben. Der nur minimale Rückgang von 60 auf etwa 55 mg NO₃/l ist jedoch nicht zufriedenstellend, wird doch der Zuströmbereich der Fassung seit Projektbeginn im Herbst 2003 zu 95 % als Naturwiese bewirtschaftet.

Hohe N_{min}-Werte bei Mais

Insgesamt waren die gemessenen N_{min}-Werte relativ tief, was weitgehend den Erwartungen entspricht, da es sich bei den beprobten Parzellen, abgesehen von Courgevau, ausschliesslich um Wiesland handelt (Abb. 4).

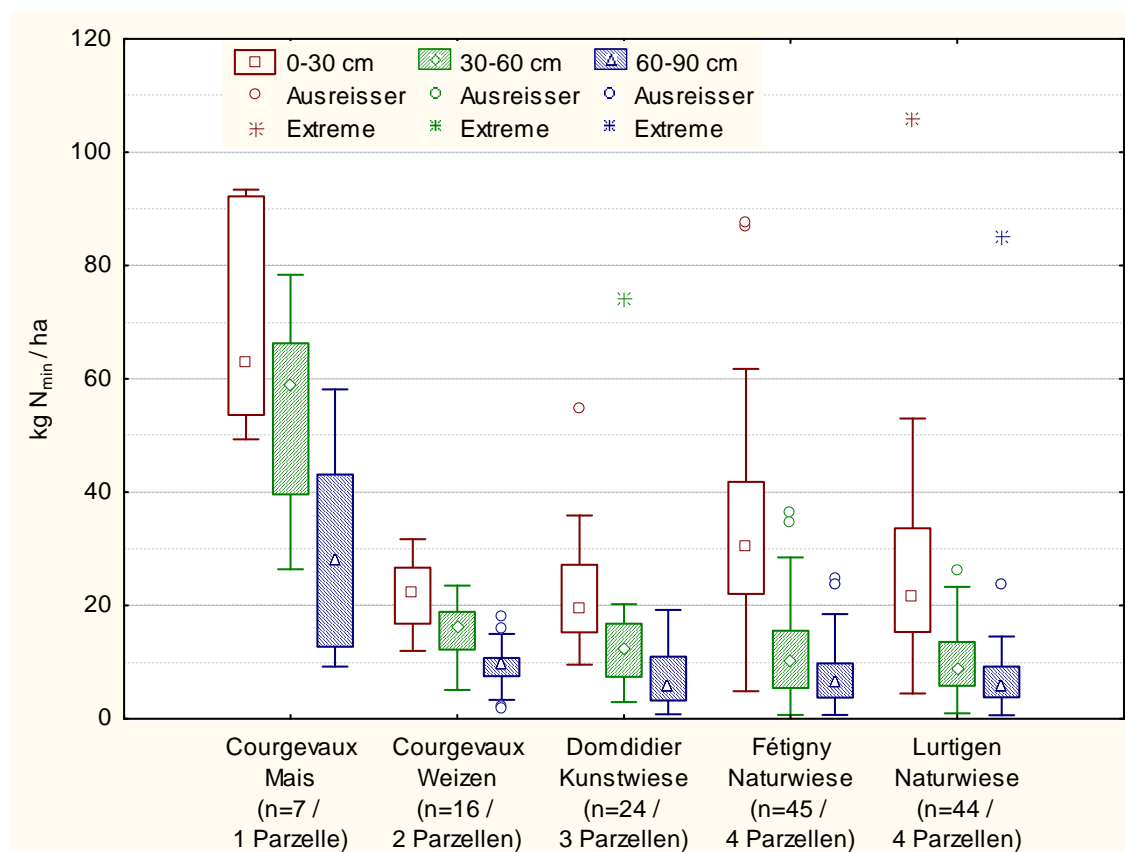


Abb.

4. Gemessene N_{min}-Werte aufgeteilt nach Projekten, Kulturen und Bodenhorizonten

In Courgevau zeigte jedoch eine beprobte Parzelle mit Mais im Pflügenbau und nachfolgender Winterweizen-Ansaat enorm hohe Werte. Einerseits waren die Düngergaben im Frühjahr zu hoch und andererseits liegt die Parzelle zum Teil auf humo-

sem Moorboden. Schwarzerde mit hohen Humusgehalten weist eine schwer einschätzbare Stickstoffdynamik auf. So konnte auch im Winter nach Direktsaat von Weizen und ohne erneute Düngergaben eine Steigerung der N_{\min} -Gehalte festgestellt werden. Um das erhöhte Auswaschungsrisiko bei Maiskultur zumindest teilweise zu mindern, wird bei Hackfrüchten fortan in allen Projektgebieten Direkt- oder Streifenfrässaat gefordert. Die zufriedenstellenden Nitratgehalte im Wasser von Courgevaux zeigen jedoch, dass eine allfällig erhöhte Stickstoffkonzentration auf einer Maisparzelle nicht sehr problematisch ist, da der Mais höchstens $\frac{1}{6}$ der Fruchtfolge im Einzugsgebiet ausmacht. Die beiden beprobten Weizenparzellen zeigten erfreulich tiefe Werte, welche mit jenen des Grünlandes vergleichbar sind.

Im Dauergrünland ist das Risiko für eine Nährstoffauswaschung aufgrund der guten Bodenbedeckung und Durchwurzelung sowie durch die kontinuierliche Nährstoffaufnahme in der Regel am geringsten. Dennoch zeigen die im Grünland erhobenen N_{\min} -Werte (siehe Abb. 4) eine gewisse Streuung. Dabei sind die teilweise hohen Messwerte aus Fétigny und Lurtigen im Horizont 0–30 cm kaum von Bedeutung, da bei einigen hohen Werten, wie bei den 106 kg N/ha auf permanenter Weide in Lurtigen, einzelne der 12 Bohrungen mit grosser Wahrscheinlichkeit eine Stelle trafen, an denen kurz zuvor eine Kuh uriniert hatte. Solche Stellen können Werte von 350–1'000 kg N/ha erreichen (Anger *et al.* 2002). Die kurz vor den Probeentnahmen erfolgten Güllegaben führten ebenfalls zu hohen N_{\min} -gehalten in den obersten Schichten (50–80 kg N/ha in Fétigny 6 Tage nach Güllegabe).

Um die Auswaschung von Nitrat ins Grundwasser abschätzen zu können, sind die Werte in den tieferen Horizonten entscheidend. Während in den oberen Schichten grosse Mengen an Nährstoffen von den Pflanzen aufgenommen werden, sind die Wurzeldichte und deren Aktivität im Horizont 60–90 cm bei den meisten Kulturen nur noch gering (Kristensen und Thorup-Kristensen 2004). Folglich wird ein grosser Teil des dort vorhandenen Stickstoffes allmählich ins Grundwasser ausgewaschen. Vergleicht man die N_{\min} -Werte der verschiedenen Gebiete untereinander, erkennt man, dass die Unterschiede in den tieferen Horizonten sehr gering sind. Die gegenüber den anderen Projekten wesentlich höheren Nitratgehalte im Grundwasser von Lurtigen und insbesondere Fétigny, lassen sich demnach nicht auf die aktuelle Be-

wirtschaftung zurückführen. Es muss berücksichtigt werden, dass das im Boden versickernde Wasser im Durchschnitt mehrere Jahre benötigt, bis es in eine Wasserfassung gelangt und daher je nach Einzugsgebiet eine entsprechende Verzögerung eintritt (Girardin 2009). Im Falle von Fétigny beträgt die mittlere Verweildauer des Wassers im Untergrund rund 10 Jahre.

Bohrung zeigt N-Reservoir in der Tiefe

Die beiden Bohrungen in Fétigny sollten einen weiteren Hinweis geben, warum trotz Umstellung auf 95 % Naturwiese im Einzugsgebiet die hohen Nitratwerte im Grundwasser fortbestehen.

Die Bohrungen zeigen ein einheitliches Resultat: Bis auf eine Tiefe von ca. 10 m ist der Stickstoff grösstenteils aus der feinsandigen Sedimentschicht ausgewaschen. Nur in einzelnen schluff- oder tonhaltigen Schichten mit einer höheren Rückhaltekapazität finden sich noch Gehalte von über 5 kg N/ha. In der Gegend des Grundwasserspiegels nehmen die Stickstoffgehalte deutlich zu und erreichen Werte von 20-30 kg N/ha. Unter der Grundmoräne, welche den Grundwasserstauer bildet und bei der einen Bohrung erreicht wurde, sind die N_{\min} -Gehalte wiederum deutlich tiefer. Die hohe Stickstoff-Konzentration in Fétigny findet sich aktuell vorwiegend im Bereich des Grundwassers sowie unmittelbar darüber. Die Mächtigkeit der darüberliegenden feinkörnigen Sedimente und die langsame Infiltrationsgeschwindigkeit des neugebildeten Grundwassers haben zur Folge, dass mehr Zeit notwendig ist, um die Auswirkungen des Nitratprojekts im Grundwasser festzustellen.



Abb. 5. Beurteilung eines Bohrkerns in Fétigny

N-Isotope im Wasser von alter Düngepraxis geprägt

In Courgevaux ist die Interpretation des Resultats relativ schwierig, da sich das $\delta^{15}\text{N}$ mit 5.36 ‰ zwischen den Werten von organischem und mineralischem Dünger befindet und in diesem Gebiet weiterhin viel Ackerbau betrieben wird, weshalb beide Düngerformen gleichsam verwendet werden (Tab. 1).

Tab. 1. Resultate der Isotopenanalyse

Fassung	$\delta^{15}\text{N}$
Courgevaux Froideville	5.36 ‰
Fétigny Danaïdes	2.65 ‰
Lurtigen G4	5.96 ‰

In Fétigny ist hingegen klar ersichtlich, dass die mit Projektbeginn 2003 initiierte Umstellung noch keine Spuren im Stickstoffgehalt des Grundwassers hinterlassen hat. Heute wird im Einzugsgebiet mehrheitlich organischer Dünger ausgebracht, womit der Wert weitaus näher bei 10 ‰ liegen sollte. Das $\delta^{15}\text{N}$ von 2.65 ‰ zeigt jedoch eine klare Dominanz des Kunstdüngers und weist darauf hin, dass das Nitrat im Wasser noch aus der Zeit des intensiven Ackerbaus vor 2004 stammt.

Im Projektgebiet Lurtigen sind 6 Fassungen vorhanden, bei der Fassung G4 sind mehrere Interpretationen möglich. Das theoretische Einzugsgebiet der beprobten Fassung G4 umfasst gemäss Zahner (1994) annähernd 90 % Wald und lediglich eine landwirtschaftlich genutzte Parzelle. Da sich diese Parzelle in der Schutzzone S2 befindet, wird sie ausschliesslich mit mineralischem Dünger versorgt, überhöhte Düngergaben durch die aktuelle Praxis sind aber auszuschliessen. Da Nitratauswaschungen bei ungedüngten Wäldern in der Regel tiefe $\delta^{15}\text{N}$ -Werte um 0 ‰ aufweisen (Durka *et al.* 1994), müsste gemäss Isotopenanalyse ein bedeutender Teil des Stickstoffs aus der Zeit vor Projektbeginn stammen, um ein $\delta^{15}\text{N}$ von 5.96 ‰ zu erklären. Allerdings hat die hydrogeologische Untersuchung gezeigt, dass die Fassung G4 teilweise durch den Lurtigenbach gespiesen wird (Zahner 1994). Im gesamten Projektgebiet wird eine bedeutende Menge organischen Düngers eingesetzt, wodurch zumindest teilweise eine Verschiebung der Isotopenkonzentration erklärbar ist. Wahrscheinlicher ist jedoch das Vorkommen anaerober Verhältnisse im Zuströmbereich der Fassung. Bei einer allfälligen Denitrifizierung erhöht sich das $\delta^{15}\text{N}$ des verbleibenden Nitrats deutlich (Kendall 1998).

Auch wenn mit der Isotopenanalyse eindeutig unterscheidbar ist, ob Nitrat aus synthetischen oder tierischen Düngemitteln stammt, bleiben dennoch viele Unsicherheiten, da das Nitrat zwischen Ausbringung und Probenentnahme in der Trinkwasserfassung vielen weiteren Umwandlungsprozessen ausgesetzt sein kann, welche ihrerseits das Isotopenverhältnis weiter modifizieren. So kann beispielsweise allein durch Messung des natürlichen $\delta^{15}\text{N}$ -Wertes kein Unterschied zwischen Stickstoff aus atmosphärischer Deposition oder aus mineralischem Dünger festgestellt werden. Des Weiteren handelt es sich hier um erste Erfahrungen mit dieser Methode und zudem sind keine Vergleichsdaten aus der Region vorhanden, welche eine exaktere Interpretation ermöglichen würden.

Schlussfolgerungen

Die Untersuchung hat gezeigt, dass die ergriffenen Massnahmen zur Reduktion der Nitratauswaschung wirksam sind und durch eingeschränkten Ackerbau und das An-

legen von Dauergrünland der Nitratreintrag von Landwirtschaftsflächen in das Grundwasser auf das erforderliche Niveau gesenkt werden kann.

Allerdings stellt sich die Auswirkung auf das Grundwasser nicht sofort ein. Sobald eine Wasserfassung regelmässig zu hohe Nitratwerte aufweist, sind im Einzugsgebiet sämtliche Bodenschichten mit Nitrat angereichert. Das Ausschwemmen dieses Nitrats dauert je nach hydrogeologischen Eigenschaften des Bodens unterschiedlich lange. Nach unseren Erfahrungen mit den Nitratprojekten im Kanton Freiburg ist in vielen Fällen mit 4–10 Jahren zu rechnen, bis erste deutliche Verbesserungen im gefassten Grundwasser feststellbar sind.

Literatur

- Anger M., Hüging H., Huth C. & Kühbauch W., 2002. Nitrat-Austräge auf intensiv und extensiv beweidetem Grünland, erfasst mittels Saugkerzen- und N_{\min} -Beprobung. *Journal of plant nutrition and soil science* **165** (5), 640-647.
- Durka W., Schulze E.-D., Gebauer G. und Vorkelius S., 1994. Effects of forest decline on uptake and leaching of deposited nitrate determined from ^{15}N and ^{18}O measurements. *Nature* **372**, 765-767.
- Girardin E., 2009. Impact du lessivage et transports de nitrates sur la qualité de l'eau souterraine – détermination de l'aire d'alimentation Z_U . Université de Neuchâtel. 108 S.
- Kendall C., 1998. Tracing Nitrogen Sources and Cycling in Catchments. In: Isotope Tracers in Catchment Hydrology (Eds. C. Kendall and J.J. McDonnell). Elsevier, Amsterdam, 519-576.
- Kreitler C.W., 1975. Determining the source of nitrate in groundwater by nitrogen isotope studies: Report of Investigations No. 83. University of Texas, Austin. 62 S.
- Kristensen H.L. & Thorup-Kristnesen K., 2004. Root Growth and Nitrate Uptake of Three Different Catch Crops in Deep Soil Layers. *Soil Science Society of America Journal* **68**, 529-537.
- Zahner P., 1994. Schutzzonenbestimmung für öffentliche Quellen auf dem Gemeindegebiet von Lurtigen. Büro Zahner, Freiburg (unveröffentlicht). 67 S.

RESUME

Contrôle des mesures relatives aux projets "nitrates" du canton de Fribourg

Dans les projets "nitrates", on envisage de minimiser le lessivage des nitrates à travers une agriculture adaptée dans les bassins d'alimentation de captages publics, afin de respecter les exigences de qualité des eaux souterraines utilisées comme eau potable. Les faibles diminutions des teneurs en nitrates enregistrées dans la phase initiale de deux projets ont déclenché un programme de contrôle des mesures. Des campagnes N_{\min} ont été effectuées pour l'année 2007 dans quatre projets du canton de Fribourg sur 3 à 4 parcelles. Les valeurs concernant les prairies et le blé d'automne étaient toujours satisfaisantes; dans les horizons de 30 – 90 cm, elles n'ont guère dépassé les 20 kg N/ha. Les aires d'alimentation présentant des teneurs en nitrates élevées dans l'eau souterraine n'ont pas montré de valeurs N_{\min} significativement plus élevées que les autres aires d'alimentation. Des carottages dans le bassin d'alimentation d'un captage présentant des teneurs en nitrates toujours élevées après 5 ans de projet, ont montré un dépôt d'azote distinct à partir de 10 m de profondeur. Des teneurs jusqu'à 30 kg N/ha ont été mesurées dans le sous-sol de sable fin. Les résultats d'analyse des isotopes d'azote des nitrates dissous dans l'eau ne correspondent pas toujours à la pratique de fumure actuelle dans les zones de projet. Dans ces cas, nous concluons que les concentrations élevées en nitrates datent encore d'une période antérieure aux projets. Selon nos études, on peut considérer comme efficaces les mesures initiées, mais leur effet se manifeste plus ou moins rapidement selon les conditions hydrogéologiques du sous-sol.

SUMMARY

Control of applied measures pertaining to nitrate projects in the canton of Fribourg

In order to meet the Swiss quality requirements of groundwater used as drinking water, seven nitrate projects have been implemented in the canton of Fribourg so far. These projects aim to reduce nitrate leaching in the water catchment areas by means of adapted land management systems. However, initial failures in reducing nitrate concentrations in two projects evoked doubts on the benefits of such projects. Hence, a monitoring of applied measures was initiated in four project areas, in order to assess these doubts. 3 - 4 representative plots were selected in each area and N_{\min} values measured during a one-year period. The results concerning grassland and winter grain turned out to be satisfying: the values rarely exceeded 20 kg N/ha at a depth of 30 – 90 cm. The areas affected by high nitrate concentrations in groundwater did not show significantly higher values than the other areas. Two 20 m deep boreholes in one of the project areas affected by continuously high nitrate concentrations in groundwater showed, 5 years after the start of the project, a distinct nitrogen deposit at soil depths greater than 10 m. Up to 30 kg N/ha were measured in the fine-grained sandy sediments.

The analysis of nitrogen isotopes in the dissolved nitrate present in the groundwater showed that, in some cases, the ratio between nitrogen of organic and mineral origin does not match the current fertilizing practices in the project areas. It is assumed that, in these cases, nitrate concentrations still reflect pre-project times. Thus, we conclude that the applied measures effectively reduce nitrate leaching but that their beneficial effect on groundwater quality also depends on local hydrogeology and may be more or less delayed.

Key words: nitrate, groundwater, nitrogen, watershed, potable water, leaching, agriculture, NRM