

5 Nitratauswaschung und Entwicklung der Nitratgehalte im Grundwasser im Kanton Bern

Ernst Spiess

Die Veränderungen des Nitratgehalts im Grundwasser wurden anhand einer Nitratdatenreihe für den Kanton Bern erfasst. Damit wird in den Regionen Jura, Mittelland, Voralpen und Alpen überprüft, ob das Ziel erreicht werden kann, den durchschnittlichen Nitratgehalt (NO_3^-) des Grundwassers von 1990 bis 2005 um $5 \text{ mg NO}_3^-/\text{l}$ zu senken. Bis 2001 nahm der Nitratgehalt bei 214 Wasserfassungen mit vollständiger oder teilweiser landwirtschaftlicher Nutzung im Einzugsgebiet im Mittel um $1,8 \text{ mg NO}_3^-/\text{l}$ auf $18 \text{ mg NO}_3^-/\text{l}$ ab. Im Vergleich dazu ging der Nitratgehalt bei 49 Fassungen mit Wald und vegetationslosen Flächen im Einzugsgebiet um $0,3$ auf $7 \text{ mg NO}_3^-/\text{l}$ zurück. Im Mittelland und in den Voralpen nahm der Nitratgehalt der Fassungen mit landwirtschaftlicher Nutzung im Einzugsgebiet signifikant ab, nicht dagegen im Jura und in den Alpen. Das Reduktionsziel kann bei gleich bleibendem Trend nur in den Voralpen erreicht werden.

Die schweizerische Landwirtschaft war in der zweiten Hälfte des letzten Jahrhunderts von einer starken Intensivierung geprägt. Dadurch konnten die Pflanzenerträge beträchtlich gesteigert werden. Allerdings nahmen auch die Nährstoffverluste und die damit verbundenen Umweltprobleme zu (BUWAL 1993, Braun et al. 1994, Spiess 1999). Die teilweise hohen Nitratgehalte des Grundwassers werden beispielsweise vorwiegend durch die Nitratauswaschung unter landwirtschaftlich genutzten Flächen verursacht (Prasuhn und Mohni 2003). Der Nitratgehalt des Trinkwassers liegt an vielen Orten über der numerischen Anforderung der Gewässerschutzverordnung von $25 \text{ mg NO}_3^-/\text{l}$. Bei einigen Wasserfassungen wird auch der in der Fremd- und Inhaltsstoffverordnung festgelegte Toleranzwert für Trinkwasser von $40 \text{ mg NO}_3^-/\text{l}$ überschritten.

Mit den 1993 eingeführten Direktzahlungen und den damit verbundenen Ökomassnahmen hat sich das Bundesamt für Landwirtschaft zum Ziel gesetzt, den Nitratgehalt des Grundwassers um durchschnittlich $5 \text{ mg NO}_3^-/\text{l}$ zu reduzieren. Dies soll an ausgewählten und insgesamt repräsentativen Fassungen zwischen den Referenzjahren 1990–92 und dem Jahr 2005 beobachtet werden (Forni et al. 1999).

Im Rahmen der Evaluation der Ökomassnahmen, die aufgrund der Nachhaltigkeitsverordnung durchzuführen ist, wird untersucht, ob das oben genannte Ziel erreicht wird. Dazu werden Projekte auf verschiedenen räumlichen Ebenen realisiert (Braun et al. 1998): Im «Nationalen Netz zur Qualitätsbeobachtung des Grundwassers» wird die gesamtschweizerische Entwicklung des Nitratgehaltes verfolgt (Messnetz NAQUA_{SPEZ}, Kap. 4). In den Projekten, die in kleineren Einzugsgebieten von Wasserfassungen in den Kantonen Zürich

Ernst Spiess,
Agroscope
FAL Reckenholz,
Reckenholzstr. 191,
CH-8046 Zürich

und Bern durchgeführt werden, liegt das Schwergewicht auf der Untersuchung des kausalen Zusammenhangs zwischen der landwirtschaftlichen Bewirtschaftung und dem Nitratgehalt des Grundwassers (Kap. 6). Bei der Nitratdatenreihe des Kantons Bern, welche nachfolgend vorgestellt wird, steht die Entwicklung in verschiedenen geographischen Regionen im Vordergrund. Da sich der Kanton Bern vom Jura über das Mittelland und die Voralpen bis in die Alpen erstreckt, eignet er sich gut für die Untersuchung dieser Fragestellung.

Auswahl der Wasserfassungen

Für die Nitratdatenreihe des Kantons Bern wurden Nitratanalysen ausgewertet, die im kantonalen Laboratorium im Rahmen der Trinkwasserkontrolle durchgeführt worden waren. Analysen von Probenahmestellen, welche Mischwasser enthielten und deshalb nicht einer einzelnen Wasserfassung zugeordnet werden konnten, wurden ausser Acht gelassen. Zudem wurden nur Fassungen berücksichtigt, von denen in den Perioden 1990–92, 1993–95, 1996–98 und 1999–2001 jeweils mindestens eine Nitratanalyse vorlag. Fassungen, welche in der Untersuchungsperiode infolge zu hoher Nitratgehalte oder anderer Gründe ausser Betrieb genommen wurden und deren Wasser nicht mehr analysiert wird, konnten nicht einbezogen werden. Dies traf auf mehrere Fassungen in vorwiegend landwirtschaftlichen Gebieten zu.

Der Standort jeder Fassung wurde mit Hilfe einer Datenbank des Wasser- und Energie-wirtschaftsamtes des Kantons Bern (Muchenberger 1999) sowie des Wasserversorgungsatlasses lokalisiert. Die Fassungen wurden in zwei Nutzungskategorien eingeteilt (Tab. 1) und einer der vier Regionen Jura, Mittelland, Voralpen und Alpen zugeordnet (Abb. 1). Die Entscheidung, ob die Wasserqualität einer Fassung durch die landwirtschaftliche Bewirtschaftung beeinflusst wird, wurde aufgrund des mutmasslichen oberirdischen

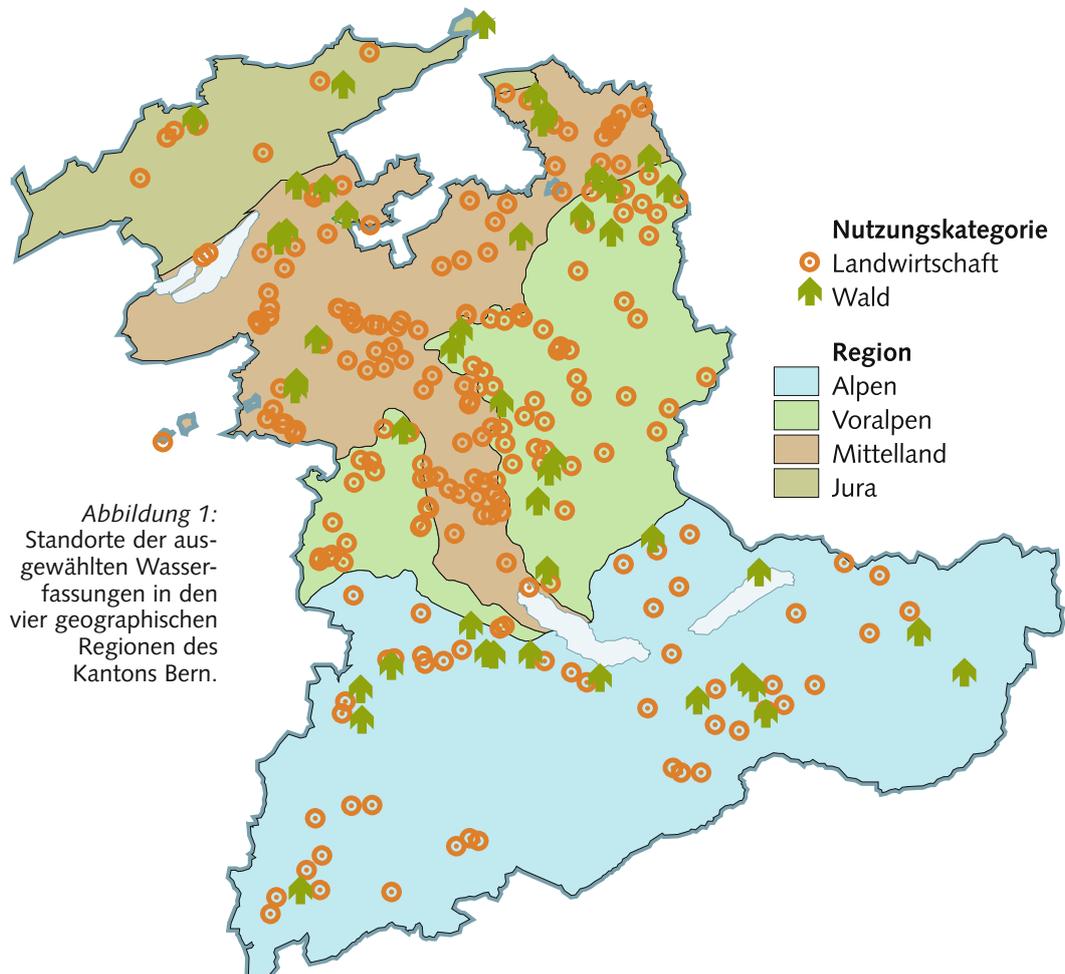


Abbildung 1:
Standorte der aus-
gewählten Wasser-
fassungen in den
vier geographischen
Regionen des
Kantons Bern.

Einzugsgebietes getroffen. Dieses musste aufgrund der Topographie gemäss der Landeskarte im Massstab 1:25'000 bestimmt werden, weil für die meisten Fassungen keine detaillierten geologischen und hydrologischen Abklärungen vorhanden waren.

Insgesamt wurden 214 Fassungen ausgewählt, deren Einzugsgebiet mindestens zu einem Teil oder sogar ausschliesslich landwirtschaftlich genutzt wird (Abb. 1). Als Referenz wurden zusätzlich 49 Fassungen ausgewählt, deren Einzugsgebiet ausschliesslich im Wald und unter vegetationslosen Flächen liegt.

Tabelle 1. Nutzungskategorien der untersuchten Grundwasserfassungen	
Kategorie	Definition
Landwirtschaft	Fassungen, deren Einzugsgebiet vollständig oder teilweise landwirtschaftlich genutzt wird
Wald	Fassungen, deren Einzugsgebiet sich ausschliesslich aus Wald und vegetationslosen Flächen zusammensetzt

Statistische Auswertung

Mit der statistischen Auswertung sollen drei Fragen beantwortet werden:

- Ist eine allfällige Abnahme des Nitratgehaltes signifikant oder nur zufällig?
- Wird das Ziel einer Reduktion des Nitratgehaltes um 5 mg NO_3^-/l bis 2005 erreicht, wenn der Trend des Nitratgehaltes gleich bleibt wie zwischen 1990 und 2001?
- Kann bei den beiden Kategorien «Landwirtschaft» und «Wald» eine unterschiedliche Entwicklung der Nitratgehalte beobachtet werden?

Für jede Fassung wurde eine lineare Regression vom Jahresmittel des Nitratgehaltes auf das Jahr berechnet. Der Regressionskoeffizient gibt an, wie stark der Nitratgehalt pro Jahr zu- oder abnimmt. Zur Beantwortung der ersten beiden Fragen wurden die Regressionskoeffizienten jeder Nutzungskategorie mit Hilfe eines t-Tests gegen 0 bzw. gegen $-0,36 \text{ mg NO}_3^-/\text{l}$ und Jahr geprüft. Wenn sich der Regressionskoeffizient nicht von $0 \text{ mg NO}_3^-/\text{l}$ und Jahr unterscheidet, bedeutet dies, dass eine allfällige Abnahme des Nitratgehaltes nur zufällig ist. Eine Abnahme um $0,36 \text{ mg NO}_3^-/\text{l}$ und Jahr entspricht dem Ziel einer Reduktion von $5 \text{ mg NO}_3^-/\text{l}$ in 14 Jahren. Zur Beantwortung der dritten Frage wurde eine einfache Varianzanalyse mit den Regressionskoeffizienten der beiden Nutzungskategorien «Landwirtschaft» und «Wald» durchgeführt.

Entwicklung der Nitratgehalte

Bei den 214 Fassungen, deren Einzugsgebiet mindestens zu einem Teil oder ausschliesslich landwirtschaftlich genutzt wird, betrug der Nitratgehalt in der Periode 1999–2001 durchschnittlich $18 \text{ mg NO}_3^-/\text{l}$ (Tab. 2). Im Mittelland lag er mit $27 \text{ mg NO}_3^-/\text{l}$ über dem Durchschnitt des gesamten Kantons, im Jura und insbesondere in den Alpen dagegen mit 8 bzw. $3 \text{ mg NO}_3^-/\text{l}$ deutlich darunter.

Bei den 49 Fassungen mit bewaldeten und vegetationslosen Flächen im Einzugsgebiet betrug der Nitratgehalt im Durchschnitt lediglich $7 \text{ mg NO}_3^-/\text{l}$. Zudem fielen die Unterschiede zwischen den Regionen weit geringer aus.

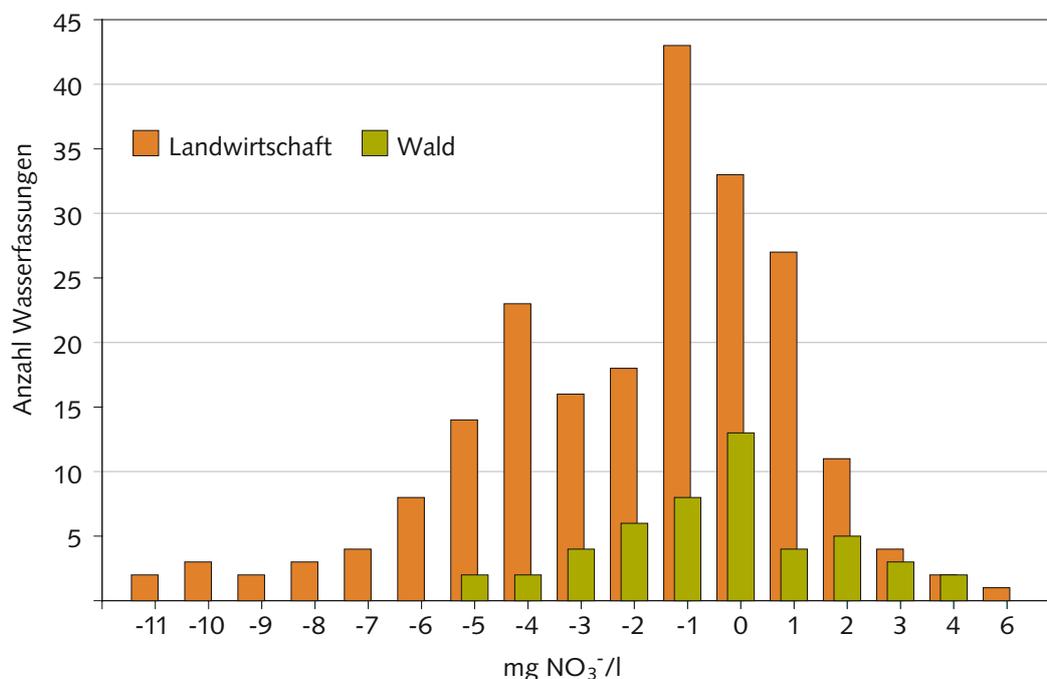
Bei den Fassungen mit landwirtschaftlich genutztem Einzugsgebiet wurde im Mittelland der Toleranzwert von $40 \text{ mg NO}_3^-/\text{l}$ bei rund 10 % der Fassungen und die numerische Anforderung der Gewässerschutzverordnung von $25 \text{ mg NO}_3^-/\text{l}$ bei über der Hälfte der Fassungen überschritten. In den Voralpen traten Überschreitungen der numerischen Anforderung nur noch bei einem Sechstel der Fassungen auf. Im Jura und in den Alpen sowie bei der Nutzungskategorie «Wald» lagen die Mittelwerte der Periode 1999–2001 bei allen Fassungen unter $25 \text{ mg NO}_3^-/\text{l}$.

Tabelle 2. Durchschnittliche Nitratgehalte der Wasserfassungen mit bzw. ohne landwirtschaftlichen Einfluss im Einzugsgebiet

Nutzungskategorie	Anz. Fassungen	Nitratgehalt (mg NO ₃ ⁻ /l)				
Region		1990–1992	1993–1995	1996–1998	1999–2001	Differenz ¹⁾
Landwirtschaft	214	19,6	20,2	18,6	17,9	-1,8
Alpen	47	2,4	2,6	2,8	2,5	0,1
Voralpen	63	21,3	21,4	19,1	18,2	-3,1
Mittelland	93	28,5	29,7	27,3	26,6	-1,9
Jura	11	8,7	9,0	9,3	8,1	-0,6
Wald	49	7,5	7,6	7,5	7,2	-0,3
Alpen	17	2,9	2,8	2,8	2,7	-0,2
Voralpen	13	11,5	11,7	11,6	10,7	-0,9
Mittelland	16	9,9	10,3	9,7	9,5	-0,4
Jura	3	3,3	3,3	5,1	5,0	1,7

¹⁾ Differenz zwischen den Perioden 1999–2001 und 1990–92

Abbildung 2:
Anzahl Wasserfassungen nach Zu- oder Abnahme des Nitratgehaltes zwischen den Perioden 1990–92 und 1999–2001.



Zwischen den Perioden 1990–92 und 1999–2001 hat sich der mittlere Nitratgehalt bei den Wasserfassungen mit landwirtschaftlich genutztem Einzugsgebiet nur leicht verändert. Im Mittel konnte eine Abnahme um 1,8 mg NO₃⁻/l verzeichnet werden (Tab. 2), die sich aus einem leichten Anstieg zwischen 1990–92 und 1993–95 sowie einer etwas stärkeren Abnahme bis zur letzten Periode 1999–2001 zusammensetzt. Der Streubereich bei den einseitig verteilten Zu- und Abnahmen über die gesamte Periode ist gross (Abb. 2). Während der Nitratgehalt bei der Mehrheit der Fassungen um bis zu 11 mg NO₃⁻/l abgenommen hat, ist er bei den restlichen Fassungen konstant geblieben oder sogar um bis zu 6 mg NO₃⁻/l gestiegen. Bei der Nutzungskategorie «Wald» war gesamthaft nur eine geringfügige Abnahme um 0,3 mg NO₃⁻/l zu verzeichnen. Die durchschnittlichen Nitratgehalte waren bei diesen Fassungen allerdings weniger als halb so hoch wie bei den Fassungen mit landwirtschaftlicher Nutzung im Einzugsgebiet (Tab. 2).

Im Messnetz NAQUA (Kap. 4) wurde eine ähnliche zeitliche Entwicklung wie im Kanton Bern beobachtet. Der durchschnittliche Nitratgehalt nahm zwischen 1989–90 und 1999–2001 um 1,6 mg/l ab und war ebenfalls Mitte der neunziger Jahre am höchsten.

Der Nitratgehalt der Fassungen mit landwirtschaftlich genutztem Einzugsgebiet, die in der Periode 1990–92 einen Ausgangswert von über 30 mg NO₃⁻/l aufwiesen, nahm im Mittel um 3,5 mg NO₃⁻/l bzw. 7 % ab. Bei den Fassungen mit einem Ausgangswert zwischen 10 und 30 mg NO₃⁻/l fiel die durchschnittliche Abnahme mit 2,5 mg NO₃⁻/l geringer aus, die relative Abnahme war aber mit 11 % höher. Bei einzelnen Fassungen dieser Gruppe wurden starke Abnahmen beobachtet (Abb. 3).

Der t-Test gegen 0 mg NO₃⁻/l und Jahr ergab, dass nur die Abnahme des Nitratgehaltes der Nutzungskategorie «Landwirtschaft» im Mittelland und in den Voralpen signifikant ist (p < 0,001; Abb. 4). Mit dem t-Test gegen -0,36 mg NO₃⁻/l und Jahr konnte festgestellt werden, dass bei gleich bleibendem Trend das Ziel einer Reduktion des Nitratgehaltes um 5 mg NO₃⁻/l in den Voralpen voraussichtlich erreicht werden kann, nicht aber im Mittelland. Die einfache Varianzanalyse ergab, dass sich die beiden Nutzungskategorien «Landwirtschaft» und «Wald» einzig in den Voralpen unterscheiden. Ein solcher Unterschied weist darauf hin, dass die Abnahme des Nitratgehaltes auf Änderungen in der landwirtschaftlichen Bewirtschaftung zurückgeführt werden kann. Neben den Ökomassnahmen kann eine Änderung aber auch durch weitere agrarpolitische Massnahmen bedingt sein. Geringere Deckungsbeiträge infolge veränderter agrarpolitischer und wirtschaftlicher Rahmenbedingungen dürften an den Verschiebungen in den Kulturanteilen mitbeteiligt sein (z.B. Abnahme der Getreideproduktion).

Die veränderten Ernährungsgewohnheiten haben zudem zu einem sinkenden Fleischkonsum geführt, wodurch die Tierzahlen und damit der N-Anfall in den Hofdüngern abgenommen haben. Dank Leistungssteigerungen in der Landwirtschaft wie z.B. der

Abbildung 3: Beziehung zwischen den Nitratgehalten der Perioden 1990–92 und 1999–2001 für die Fassungen mit landwirtschaftlich genutztem Einzugsgebiet. Eine Fassung mit einem Ausgangswert von 72 mg NO₃⁻/l ist nicht eingezeichnet.

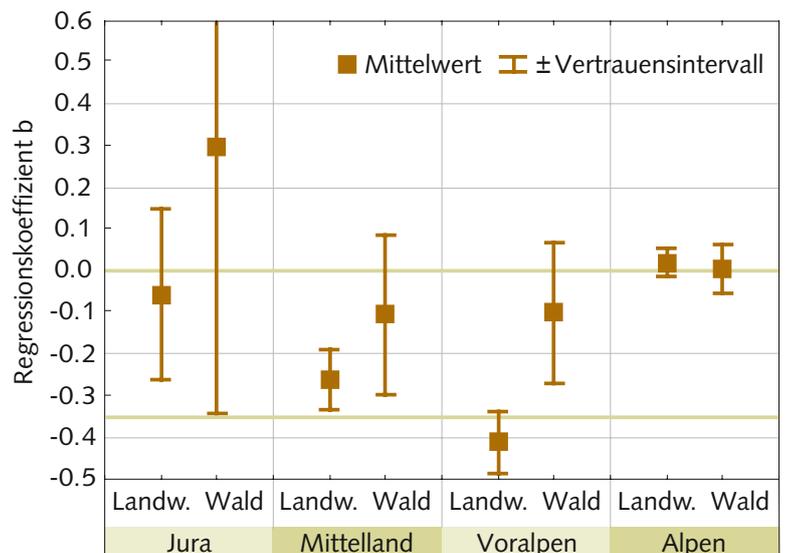
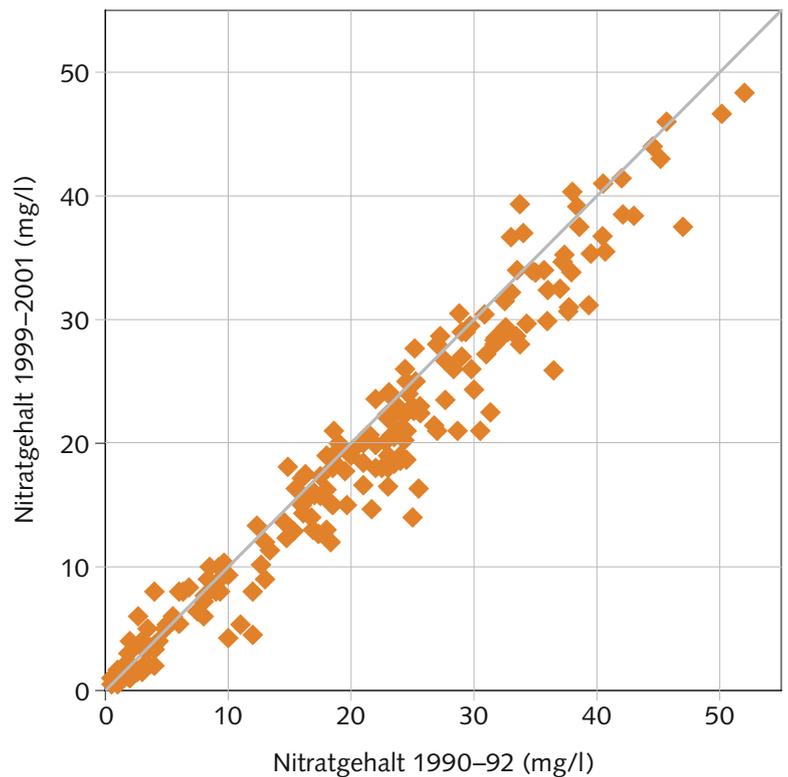


Abbildung 4: Regressionskoeffizienten der einzelnen Gruppen von Grundwasserfassungen. Die durchgezogene Linie bei 0 stellt den Zustand bei konstantem Nitratgehalt während der ganzen Periode dar, diejenige bei -0,36 die Zielgrösse mit der Abnahme um 5 mg NO₃⁻/l in 14 Jahren. Wenn sich die 95 %-Vertrauensintervalle zweier Verfahren nicht überschneiden, besteht ein signifikanter Unterschied.

Tabelle 3. Geschätzte Reduktion der Nitratauswaschung zwischen 1990 und 2000 durch verschiedene Einflussfaktoren (in % der 1990 ausgewaschenen N-Menge unter allen Flächen und unter Ackerland)

Einflussfaktor	Alle Flächen	Ackerland
Veränderung der Kulturanteile im Ackerbau	4 %	7 %
Geringerer N-Düngereinsatz im Ackerbau	4 %	7 %
davon im Extensogetreide und -raps	< 1 %	1-2 %
Mehr Zwischenkulturen	3 %	6 %
Geringere N-Deposition	1 %	< 1 %
Extensivierung im Futterbau	< 1 %	–

höheren Milchleistung pro Kuh werden weniger Kühe zur Produktion der gleichen Milchmenge benötigt. Die einzelne Kuh scheidet zwar etwas mehr Stickstoff aus, durch die geringere Tierzahl sinkt aber gesamthaft der N-Anfall in den Hofdüngern.

Ursachen der abnehmenden Nitratgehalte

Berechnungen der Nitratauswaschung unter der land- und nichtlandwirtschaftlichen Fläche im Kanton Bern mit dem Stoffflussmodell MODIFFUS ergaben eine Abnahme um ca. 12 % zwischen 1990 und 2000 (Spiess und Prasuhn 2005). Mit je etwa 4 % haben die veränderten Kulturanteile im Ackerbau, d.h. der vermehrte Anbau von Kulturen mit geringerer Nitratauswaschung, sowie der geringere Einsatz von N-Düngern im Ackerbau am meisten zu dieser Reduktion beigetragen (Tab. 3). Im Weiteren haben auch der vermehrte Anbau von Zwischenkulturen, die geringere N-Deposition sowie extensiv und wenig intensiv genutztes Grasland zur geringeren Nitratauswaschung beigetragen.

Das Erreichen des Ziels

Bei der Interpretation der vorliegenden Resultate muss berücksichtigt werden, dass das im Boden versickernde Wasser im Durchschnitt mehrere Jahre benötigt, bis es in eine Wasserfassung gelangt. Die Auswirkungen der 1993 eingeführten Ökomassnahmen auf den Nitratgehalt des Trinkwassers können folglich erst mit einer Verzögerung von einigen Jahren festgestellt werden.

In den Voralpen und im Mittelland hat der Nitratgehalt der Fassungen mit landwirtschaftlicher Nutzung im Einzugsgebiet zwischen den Perioden 1990–92 und 1999–2001 signifikant abgenommen (Abb. 4). Aber nur in den Voralpen war der Rückgang signifikant höher als bei der Nutzungskategorie «Wald», und das angestrebte Ziel kann bei gleich bleibendem Trend bis zum Jahr 2005 erreicht werden. Im Mittelland war die Abnahme zwar signifikant, aber noch zu wenig stark. Hier dürfte das Reduktionsziel wahrscheinlich nicht erreicht werden. Dass in dieser Region kein Unterschied zwischen den beiden Nutzungskategorien «Landwirtschaft» und «Wald» festgestellt wurde, ist eventuell auch darauf zurückzuführen, dass die Fassungen mit bewaldeten und vegetationslosen Einzugsgebieten nicht ganz ohne landwirtschaftlichen Einfluss sind. Ammoniakemissionen aus der Landwirtschaft tragen zur N-Deposition auf Wälder und vegetationslosen Flächen bei. Die N-Deposition wiederum ist ein bedeutender Einflussfaktor der Nitratauswaschung unter diesen Flächen. Im Jura überstieg der Nitratgehalt nur bei wenigen Fassungen 10 mg NO₃⁻/l. Ein Erreichen des Ziels dürfte hier sehr schwierig sein. In den Alpen lag der Ausgangswert in der Periode 1990–92 bei fast allen Fassungen schon unter 5 mg NO₃⁻/l. Somit ist eine Reduktion um 5 mg NO₃⁻/l unmöglich. Damit das Ziel für den gesamten Kanton Bern erreicht werden kann, muss der Nitratgehalt im Mittelland und in den Voralpen um mehr als 5 mg NO₃⁻/l zurückgehen.

Seit einigen Jahren strebt das Bundesamt für Landwirtschaft das Ziel an, dass der Nitratgehalt von 90 % der Grundwasserfassungen unter 40 mg NO₃⁻/l liegen soll (Bundesblatt 2002). Dieses Ziel wurde in den Regionen Jura, Voralpen und Alpen zwischen 1990 und 2001 immer deutlich übertroffen (Tab. 4). Im Mittelland dagegen wurde es nur in der Periode 1999–2001 knapp erreicht. Seit 1990 ist allerdings eine unbekannte Anzahl an Grundwasserfassungen infolge zu hoher Nitratgehalte ausser Betrieb genommen worden. Ein Teil davon wird nicht mehr beprobt und konnte deshalb nicht in unsere Auswertung einbezogen werden. Diese Praxis trägt dazu bei, dass das Ziel rein formal erreicht worden ist.

Tabelle 4. Anteil der Grundwasserfassungen mit landwirtschaftlicher Nutzung im Einzugsgebiet, die in einer Periode einen mittleren Nitratgehalt von über 40 mg NO₃⁻/l aufgewiesen haben

Region	Anzahl Fassungen	Anteil der Fassungen			
		1990–92	1993–95	1996–98	1999–01
Total	214	6 %	10 %	6 %	4 %
Jura	11	0 %	0 %	0 %	0 %
Mittelland	93	13 %	19 %	12 %	10 %
Voralpen	63	2 %	5 %	2 %	0 %
Alpen	47	0 %	0 %	0 %	0 %

Schlussfolgerungen

Da der N-Überschuss der schweizerischen Landwirtschaft schon seit 1980 rückläufig ist und bis 2000 von rund 152'000 t N um ein Viertel auf 113'000 t N abgenommen hat (Kap. 3), kann der beobachtete Rückgang des Nitratgehaltes nicht allein auf die Ökomassnahmen zurückgeführt werden. Als Folge des Rückgangs des N-Überschusses müssen auch die N-Verluste beträchtlich abgenommen haben, denn eine grössere N-Anreicherung im Boden als einzige weitere Senke ist unwahrscheinlich. Stickstoff geht hauptsächlich über die Ammoniakverflüchtigung, die Denitrifikation und die Nitratauswaschung verloren. Die Ammoniak- und Lachgasverluste sind gesamtschweizerisch zwischen 1980 und 2000 in der Grössenordnung von einem Viertel zurückgegangen (Menzi *et al.* 1997 und Kap. 7; Schmid *et al.* 2000 und Kap. 8). Somit müssten die Nitratverluste aus der Landwirtschaft infolge des sinkenden N-Überschusses ebenfalls um ein Viertel zurückgegangen sein.

Ob dies auch auf den Nitratgehalt im Grundwasser des Kantons Bern zutrifft, ist schwer zu beurteilen. Einerseits ist infolge des Fehlens von regionalen Nährstoffbilanzen nicht bekannt, ob der N-Überschuss im Kanton Bern ebenfalls um ein Viertel zurückgegangen ist. Andererseits gibt es im Kanton Bern keine bis 1980 zurückreichende und repräsentative Nitratdatenreihe. Es ist daher nicht bekannt, in welchem Jahr der durchschnittliche Nitratgehalt am höchsten war. Aufgrund der vorliegenden Ergebnisse dieser und anderer Studien (Kap. 4) ist anzunehmen, dass der Höhepunkt Mitte der neunziger Jahre aufgetreten ist. Geht man davon aus, dass der landwirtschaftliche N-Überschuss und die dadurch verursachten Nitratverluste im Kanton Bern zwischen 1980 und 2000 um ein Viertel zurückgegangen sind, dass der Anteil der Landwirtschaft an der gesamten Nitratauswaschung etwa 70 % ausmacht (Prasuhn und Mohni 2003) und die nicht landwirtschaftsbedingten Nitratreinträge ins Grundwasser konstant geblieben sind, müsste der durchschnittliche Nitratgehalt gesamthaft um 3 bis 4 mg NO₃⁻/l zurückgehen. Aufgrund dieser Annahmen wird wahrscheinlich das Ziel einer durchschnittlichen Reduktion um 5 mg NO₃⁻/l bis 2005 nicht ganz erreicht werden. Die Ergebnisse des Messnetzes NAQUA_{SPEZ} (Kap. 4), die zwischen 1999–2001 und 2002–03 eine bedeutende mittlere Abnahme um rund 2 mg NO₃⁻/l zeigen, lassen aber vermuten, dass die Nitratgehalte auch im Kanton Bern in den letzten Jahren weiter abgenommen haben.

Dank

U. Lienhard (Kantonales Laboratorium, Bern) und F. Muchenberger (Wasser- und Energiewirtschaftsamt, Bern) danke ich für die Lieferung von Daten und wertvolle Diskussionen. H.-R. Roth (ETHZ) und H.-R. Oberholzer (FAL) haben mich bei der statistischen Auswertung beraten, wofür ich mich bei ihnen bedanken möchte. Ein besonderer Dank geht an meine ehemaligen ArbeitskollegInnen M. Braun und C. Wüthrich, die dieses Projekt mit viel Einsatz lanciert haben.

Literatur

- Braun M., Hurni P. und Spiess E., 1994. Phosphor- und Stickstoffüberschüsse in der Landwirtschaft und Para-Landwirtschaft. Schriftenreihe der FAC Liebefeld 18. 70 S.
- Braun M., Wüthrich-Steiner C., Spiess E., Stauffer W. und Prasuhn V., 1998. Wirkungskontrolle der Öko-Massnahmen im Gewässerschutz. *Agrarforschung* 5, 129–132.
- Bundesblatt, 2002. Botschaft zur Weiterentwicklung der Agrarpolitik (Agrarpolitik 2006). Bundeskanzlei, BBL V (02.046), 4721–5010.
- BUWAL (Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft), 1993. Situation der Trinkwasserversorgung. Schriftenreihe Umwelt Nr. 212. Bern. 128 S.
- Forni D., Gujer H.-U., Nyffenegger L., Vogel S. und Gantner U., 1999. Evaluation der Ökomassnahmen und Tierhaltungsprogramme. *Agrarforschung* 6, 107–110.
- Menzi H., Frick R. und Kaufmann R., 1997. Ammoniak-Emissionen in der Schweiz: Ausmass und technische Beurteilung des Reduktionspotentials. Schriftenreihe der FAL 26. 107 S.
- Muchenberger F., 1999. Grundwasserfassungen des Kantons Bern. Datenbank auf elektronischem Datenträger.
- Prasuhn V. und Mohni R., 2003. GIS-gestützte Abschätzung der Phosphor- und Stickstoffeinträge aus diffusen Quellen in die Gewässer des Kantons Bern. Interner Bericht. Eidg. Forschungsanstalt für Agrarökologie und Landbau, Zürich-Reckenholz. 223 S. <http://www.reckenholz.ch/doc/de/forsch/umwelt/wasser/wasser.html>.
- Schmid M., Neftel A. und Fuhrer J., 2000. Lachgasemissionen aus der Schweizer Landwirtschaft. Schriftenreihe der FAL 33. 131 S.
- Spiess E., 1999. Nährstoffbilanz der schweizerischen Landwirtschaft für die Jahre 1975 bis 1995. Schriftenreihe der FAL 28. 46 S.
- Spiess E. und Prasuhn V., 2005. Weniger Nitrat im Grundwasser dank Ökomassnahmen. *Agrarforschung* (in Vorbereitung).