

Umwelt

Nitrat und Fruchtfolgen 20 Jahre lang beobachtet

Jakob Nievergelt, Eidgenössische Forschungsanstalt für Agrarökologie und Landbau, Reckenholz (FAL), CH-8046 Zürich
Auskünfte: Jakob Nievergelt, e-mail: jakob.nievergelt@fal.admin.ch, Fax +41 (0)1 377 72 01, Tel. +41 (0)1 377 73 39

Zusammenfassung

Die Auswertung des Datenmaterials zur Nitratkonzentration im Sickerwasser der Lysimeteranlage Zürich-Reckenholz von 1981 bis 2000 ergibt, dass die Kulturübergänge im Nachsommer entscheidend sind für die Nitratkonzentration im Sickerwasser unter Fruchtfolgen. Die Menge Bodenstickstoff, die in mineralisierter Form vor der winterlichen Vegetationsruhe im Bodenprofil vorhanden ist, hängt einerseits ab vom Entzug des mineralischen Stickstoffes aus Düngung, Lufteintrag und Mineralisation durch die geerntete Kultur sowie durch die Vor- und Nachkultur. Andererseits ist sie von Mineralisierungsschüben abhängig, die die mechanischen Eingriffe in das Bodengefüge bei der Ernte oder der Saat der nachfolgenden Kultur auslösen können.

Der Zeitpunkt, zu dem diese herbstlichen Nitratspitzen im Sickerwasser auftauchen, ist sowohl von der Gründigkeit und der Porenstruktur des Bodens als auch von den Niederschlagsmengen abhängig. In Böden wie der Schotter-Braunerde mit schnellen Fließwegen sind Nitratspitzen höher und auf kürzere Zeiträume beschränkt als in Böden mit überwiegendem Massenfluss wie der Braunerde aus Moränelehm. In Böden vom Typ «Massenfluss» scheint die Menge Wasser ziemlich konstant zu sein, die es zum Transport des Nitrates durch den Boden braucht. Mineralische N-Düngung zur Saat einer Gründung (Phacelia) kann zu einem kurzfristigen Anstieg der Nitratkonzentration im Herbst führen.

Aus vielen Untersuchungen ist bekannt, dass die Kulturabfolge mitsamt den Bewirtschaftungsmassnahmen die unerwünschte Stickstoffauswaschung in hohem Masse beeinflusst. Zu den wenigen Langzeitversuchen, die zu dieser besonderen Fragestellung angelegt wurden, gehört die Gross-Lysimeteranlage an der

FAL (Baujahr 1979). Über die Abhängigkeit der Stickstoff-Fracht (Stickstoff im Sickerwasser in kg pro ha und Jahr) von Kultur und Standortfaktoren wurde früher berichtet (Nievergelt 1997). Beim vorliegenden Bericht ist die Nitrat-Konzentration im Sickerwasser das Hauptthema.

Abb. 1. Kulturart und Bodenform sind wichtige Faktoren für die Konzentration von Nitrat im Sickerwasser. Die Lysimeteranlage in Zürich-Reckenholz dient unter anderem zur Beobachtung der Nitratkonzentrationen.



Lysimeter: Ein physisches Modell

Die Versuchsanlage ist in den Tabellen 1 und 2 beschrieben. Die Sickerwassermenge wird durch eine automatisch registrierende Wippe von 1 dl Inhalt gemessen. Die Probenahme von Sickerwasser für die Nährstoffanalyse erfolgte bis 1992 als Aliquot aus einer Auffangwanne. Seither fliesst das Sickerwasser aus der Wippe durch einen Schlauch auf den Boden einer Probeflasche mit Überlauf. Vor der Analyse lagern die Sickerwasserproben in einem Kühlkeller bei 4°C. Im Spätsommer und Herbst ist die Sickerwasserbildung oft gering oder fällt ganz aus, so dass keine Proben gezogen werden können.

Die Konzentrationswerte der einzelnen Verfahren sind in den meisten Fällen gewichtete Mittelwerte. Sie wurden aus drei oder seltener zwei Wiederholungswerten durch Gewichtung mit den Sickerwassermengen der entsprechenden Sammelperiode errechnet.

Statistisch gesicherte Unterschiede

Um den Einfluss der Kulturen auf die Stickstoffkonzentration im Sickerwasser über die 20 Jahre hinweg statistisch zu untersuchen, stellen wir die Ergebnisse der Nitratbestimmung im Sickerwasser der beiden Fruchtfolgen auf der Schotter-Braunerde einander gegenüber. An insgesamt 55 % der über 400 Probenahmeterminen wichen die Konzentrationen mit einer Irrtumswahrscheinlichkeit von

< 5 % gesichert voneinander ab. In den meisten Jahren ist dies auf den unterschiedlichen Stickstoffhaushalt von Hackfrucht und Getreide zurückzuführen. In den zwei Perioden mit Kunstdünger in beiden Fruchtfolgen (1989, 1999 bis 2000) kam es schnell zu einer Angleichung der zuvor unterschiedlichen Nitratwerte im Sickerwasser.

Nitratspitzen infolge von Kulturübergängen

Um die Umweltbelastung durch die Landwirtschaft abschätzen zu können, sind für die einzelnen Kulturen Angaben zu den Stickstoffauswaschungen nötig (z.B. Schmid und Prasuhn 2000). Mit einem einfachen, empirischen Berechnungsansatz ermittelten wir aus unseren Lysimeterergebnissen Zahlen zu den wichtigsten Ackerkulturen der Schweiz (Nievergelt 1997). Im Folgenden wollen wir zeigen, wie man auf Grund des Konzentrationsverlaufes von Nitrat im Sickerwasser eine plausible Aufteilung der berechneten Fracht innerhalb einer Fruchtfolge vornehmen kann. 1986 wurde das Nitratmaximum im Sickerwasser in der Schotter-Braunerde, als durchlässigerem und weniger tiefgründigem Boden, schon im November erreicht, in der Moränelehm-Braunerde hingegen erst im Februar 1987 (Abb. 3). Der Verlauf der Kurven macht plausibel, dass dieses Maximum auf den Mineralisationsschub in den obersten Bodenschichten vor und nach der Kartoffelernte vom 26. August 1986 zurückzuführen ist. Im Schotterboden genügte danach etwa 150 mm Wasser (ab 1. September 1986) zur Verlagerung des Nitratpeaks ins Sickerwasser. Im Moränelehm Boden waren 275 mm nötig, das heisst 45 mm mehr als die experimentell ermittelte nutzbare Feldkapazität (Nievergelt 1994).

Im Moränelehm Boden bewegt sich das Wasser mit dem darin



Abb. 2. Die Vorrichtung zum Messen von Sickerwassermenge und Gewicht befindet sich im Keller der Lysimeteranlage der FAL.

Tab. 1. Beschreibung der Versuchsanlage

Lysimeter-Anlage der Forschungsanstalt Reckenholz, Zürich

Anlage: 12 wägbare Schwerkraft-Lysimeter von 3,14 m² Oberfläche und 2,5 m Tiefe, im Freien in Rasenfläche eingelassen (Abb.1)

Verfahren: 4 Verfahren in 3 Wiederholungen: 2 zehnjährige Fruchtfolgen auf 2 Bodenformen; im Sommer Vergleich Getreide/Hackfrucht, im Winter Gründüngung/(Teil-)Brache (Tab. 2)

Düngung: mineralisch (nach Forschungsanstalten 1994)

Bodenform Schotter: steinige, mässig tiefgründige Braunerde mit mittlerem Wasserspeichervermögen; Körnung: sandiger Lehm

Bodenform Moränelehm: schwach staunasse, tiefgründige Braunerde mit grossem Wasserspeichervermögen; Körnung: Lehm

Beide Bodenformen wurden schichtweise in Lysimeter-Behälter eingefüllt.

Klima-Normwerte (1961-1990) des Versuchsstandortes: 8,5°C mittlere Lufttemperatur, 1006 mm Niederschlag; April bis September 14,1°C. bzw. 620 mm

Messgrössen: Gewicht (zur Bestimmung der Veränderung des Bodenwassergehaltes), Sickerwassermenge, Nährstoffkonzentrationen im Sickerwasser, u.a

Messhäufigkeit: stündlich, automatisiert. Ausnahme Konzentrationsbestimmungen: 1980-90 monatlich, 1991 dreimal monatlich, ab 1992 14-täglich

Untersuchungsschwerpunkte

Einfluss des Wasserhaushaltes verschiedener Bodenformen auf Wasserverbrauch und Ertrag landwirtschaftlicher Feldkulturen, Bestimmung der Nährstoffverluste durch Sickerwasser in Abhängigkeit von Bodenform, Kulturart, Fruchtfolge, Jahreszeit und Witterung.

Ausführlichere Beschreibung siehe Nievergelt (1991)

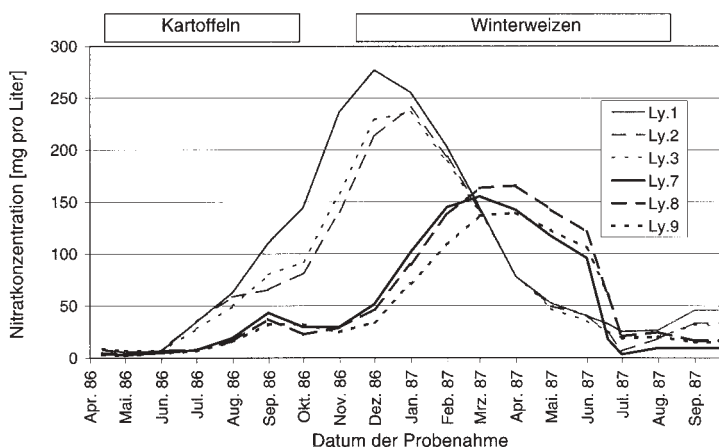


Abb. 3. Die Nitratspitze erreichte das Sickerwasser in der Schotter-Braunerde (Lysimeter 1, 2 und 3) vier Monate früher als in der Moränelehm-Braunerde (Lysimeter 7, 8 und 9). Fruchtfolge B (Kartoffeln-Winterweizen), April 1986 bis September 1987.

Tab. 2. Kulturen 1981 bis 2000¹ und Verteilung der Verfahren auf die 12 Lysimeter²

	Fruchtfolge A	Fruchtfolge B
1981	Körnermais (KM)	Winterweizen
1982	Sommerweizen (SW)	Zuckerrüben
1983	Kartoffeln (Ka)	Sommerweizen
1984	Winterweizen (WW)	Körnermais
1985	Zuckerrüben (ZR)	Sommerweizen
1986	Sommerweizen	Kartoffeln
1987	Wintergerste (WG)	Winterweizen
1988	Kartoffeln	Kunstwiese
1989	Kunstwiese (KW)	Kunstwiese
1990	Kunstwiese	Kartoffeln
1991	Körnermais	Winterweizen
1992	Sommerweizen	Zuckerrüben
1993	Winterraps (Ra)	Sommerweizen
1994	Winterweizen	Körnermais
1995	Zuckerrüben	Sommerweizen
1996	Sommerweizen	Winterraps
1997	Wintergerste	Winterweizen
1998	Körnermais	Kunstwiese
1999	Kunstwiese	Kunstwiese
2000	Kunstwiese	Kunstwiese

¹ Zwischen Getreide und folgender Hackfrucht jeweils Gründüngung (Phacelia oder Rübsen)

² Verteilung der Verfahren auf 12 Lysimeter:

Braunerde aus Schotter, 6 Lysimeter: 1981 bis 2000 je drei Lysimeter mit Fruchtfolge A und B.

Braunerde aus Moränelehm, 6 Lysimeter: 1981 bis 1995 je drei Lysimeter mit Fruchtfolge A und B. 1996 Sommerhafer; ab 1997: Fruchtfolge Kartoffeln/Winterweizen/Wintergerste/Kunstwiese, je drei Lysimeter in zwei Stickstoff-Düngungsstufen.

gelösten Nitrat vermutlich nach dem Modell des so genannten «piston-flow», bei dem Bodenwasser vor allem durch das von oben nachdrängende Wasser abwärts verlagert wird. Die nutzbare Feldkapazität der Schotter-Braunerde wurde mit 180 mm bestimmt. Hier dürften im stark steinhaltigen Boden präferenzielle Flüsse z. B. längs der Steinoberflächen auftreten, so dass die Spitze der Nitratkonzentration früher und ausgeprägter im Sickerwasser erscheint als bei der Moränelehm-Braunerde. Aus Abbildung 4 ist ersichtlich, dass im Sickerwasser solche winterlichen Nitratspitzen in den meisten Jahren auftreten.

Auf Grund dieser Überlegungen schlagen wir vor, die N-Frachten

nicht einer einzelnen Kultur zuzuordnen, sondern den Kulturübergängen gemäss dem Konzentrationsverlauf im Sickerwasser. Die Grenze zwischen zwei Kulturübergängen wäre auf den Zeitpunkt der minimalen Konzentration (Abb. 4) zu legen. Bei der Schotter-Braunerde ist diese oft im Zeitraum März bis Juni zu finden. Bei der Moränelehm-Braunerde sind die Minima weniger deutlich ausgeprägt und schwanken stärker. Im Mittel sind sie im September zu finden.

Gründüngung

Eine der ökologischen Massnahmen im Ackerbau ist die Methode «Immergrün». Um deren Folgen auf die Stickstoffauswaschung an einem Beispiel zu un-

tersuchen, wurde 1993-94 die Fruchtfolge Körnerraps-Winterweizen auf zwei von sechs Lysimetergefässen durch Körnerraps-Phacelia-Sommerweizen ersetzt. Der Verlauf der Nitrat- auswaschung unterschied sich bei den beiden Verfahren deutlich (Abb. 5). Im Verfahren mit der Gründüngung kann die spätherbstliche Nitratspitze der Zusatzdüngung von 30 kg N pro ha zu Phacelia am 23. August 1993 zugeschrieben werden. Im weiteren Verlauf überwog zuerst die Auswaschung unter Winterweizen (bis im Mai 1994), danach aber diejenige unter Sommerweizen. Da die N-Düngung im Frühling 1994 gleich war und sich der Entzug durch die beiden Getreidearten wenig unterschied, kann vermutet werden, dass die Mineralisation der organischen Substanz der Gründüngung diesen späten Schub Nitrat ins Sickerwasser mitbewirkte. Diese späte Mineralisation von Gründüngungen ist bei der Nitratfracht-Zuordnung zu berücksichtigen.

Beim Verfahren Körnerraps-Gründüngung-Sommerweizen war die Gesamtauswaschung an Stickstoff (N-Fracht im Sickerwasser) vom 15. Juli 1993 bis 15. Februar 1995 geringer als beim Verfahren Körnerraps-Winterweizen: 50 kg/ha gegenüber 61 kg/ha im Schotterboden und 34 kg/ha gegenüber 76 kg/ha im Moränelehm Boden. Der umweltschonende Effekt der Gründüngung war im Schotterboden deutlich geringer, weil dort der Sommerweizen vier kg/ha weniger Stickstoff entzog als der Winterweizen. Aus dem Moränelehm Boden hingegen entzog der Sommerweizen 19 kg/ha mehr Stickstoff als der Winterweizen.

Bodenform beeinflusst Auswaschung

Dank den beiden Bodenformen kann im Lysimeterversuch der

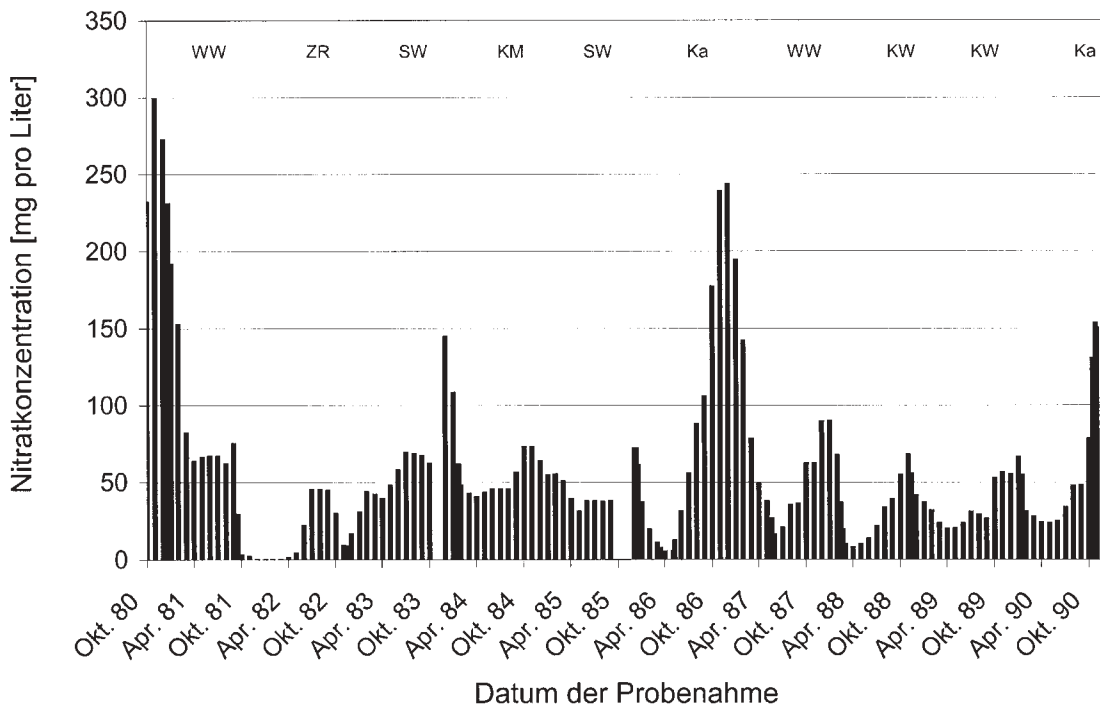


Abb. 4. Nitratkonzentration im Sickerwasser der Schotter-Braunerde 1980-1990: Maximalwerte traten normalerweise zwischen November und Februar auf. Fruchtfolge B.

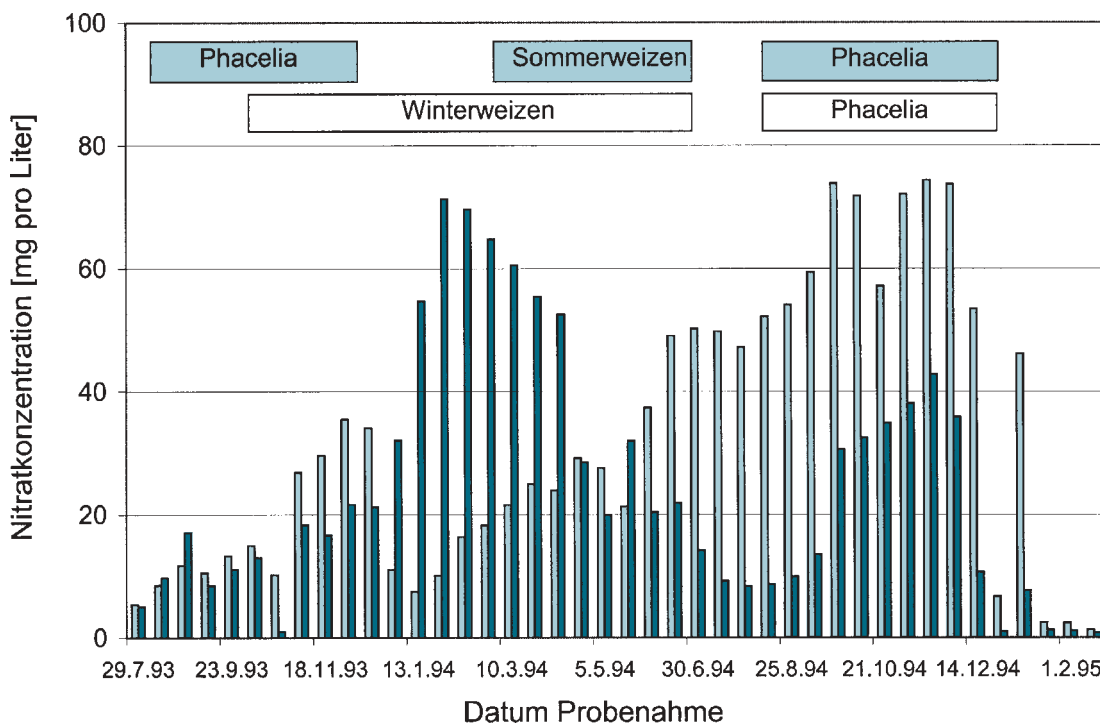


Abb. 5. Wirkung einer Gründüngung auf den Verlauf der Nitratkonzentration im Sickerwasser: Körnerraps-Phacelia-Sommerweizen-Phacelia resp. Körnerraps-Winterweizen-Phacelia. Schotter-Braunerde, 1993-94.

FAL ein allfälliger Einfluss des Bodens auf die Auswaschung geprüft werden. Abbildung 6 zeigt denn auch, dass die herbstlichen Nitratspitzen den Schotterboden zwischen zwei und vier Monate schneller durchlaufen als den Moräneboden. Die Spitzen sind im Schotterboden zumeist

auch ausgeprägter. Der Einfluss der Bodenform ist jedoch weniger gross als derjenige der Kulturen: An 55 % der Probenahmetermine ist der Konzentrationsunterschied zwischen den beiden Böden nicht gesichert, während zwischen den beiden Fruchtfolgen im Schotterboden an 45 %

der Termine kein gesicherter Unterschied vorhanden ist. Wäre der Unterschied der nutzbaren Feldkapazität der beiden Böden (180 mm «Schotter» gegenüber 230 mm «Moränelehm») grösser, wären die Unterschiede in der Auswaschung von Nitrat vermutlich deutlicher.

Abb. 6. Nitratkonzentration im Sickerwasser: Der Transport von Nitrat durch die Schotter-Braunerde dauert meistens 2 bis 4 Monate weniger lang als durch die Moränelehm-Braunerde. Fruchtfolge A, 1981-1995.

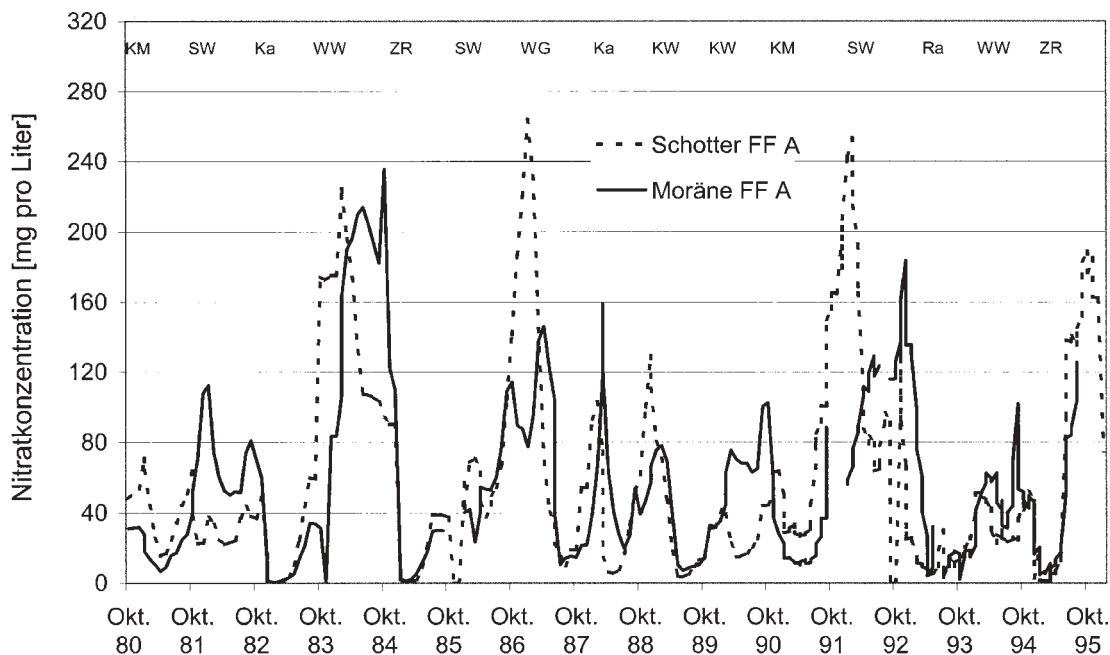
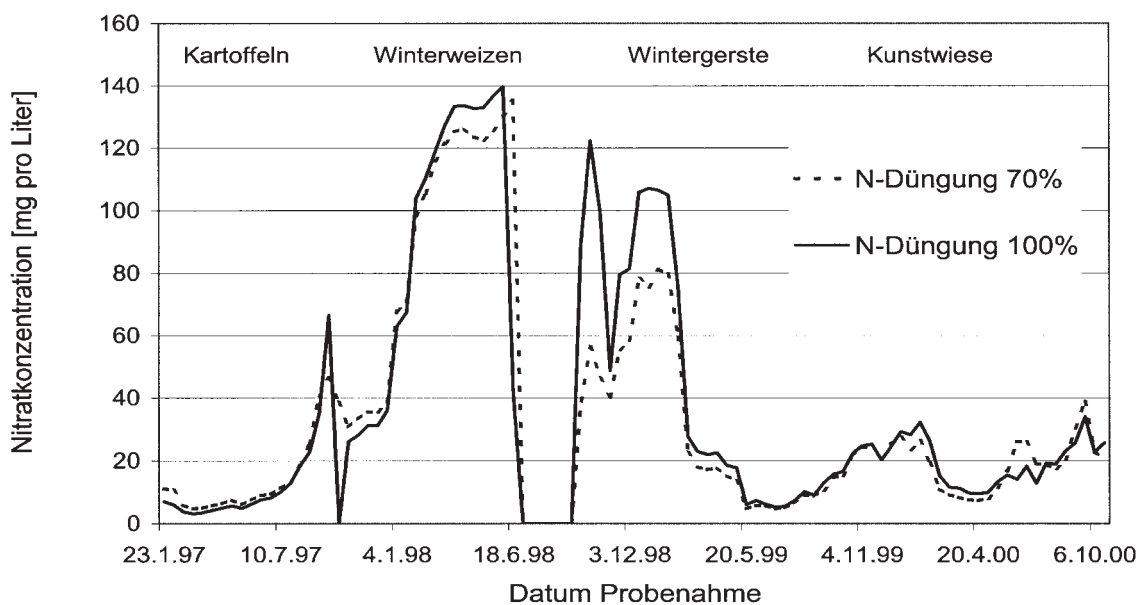


Abb. 7. Auswirkung einer reduzierten mineralischen Düngung auf die Nitratkonzentration des Sickerwassers. Moränelehm-Braunerde, 1997-2000.



Einfluss der Stickstoffdüngung

Seit 1997 werden alle sechs Lysimeter der Braunerde aus Moränelehm mit der gleichen vierjährigen Fruchtfolge bewirtschaftet. Prüfglieder sind zwei Stickstoffdüngungsstufen in drei Wiederholungen: D2 mit mineralischer, optimaler N-Düngung (Forschungsanstalten 1994) und D1 mit 70 % der N-Düngung von D2. Abbildung 7 zeigt den bisherigen Verlauf der Nitratkonzentration in diesem Versuch. Das Verfahren D2 weist bei den Nitratspitzen höhere Werte auf als

D1. In den ersten vier Jahren beträgt die mittlere Nitratkonzentration 43,9 mg/l für D2 und 38,1 mg/l für D1. Der Unterschied ist an einzelnen Probenahme-Terminen gesichert, nicht jedoch über die ganze Auswertungsperiode hinweg (bei 5 % Irrtumswahrscheinlichkeit). Die mittlere Differenz zwischen den D1- und D2-Werten entspräche ungefähr der Absenkung des Nitratgehaltes um fünf ppm, die der Bund als Wirkungsziel seiner ökologischen Massnahmen genannt hat (Forni et al.1999). Im Verfahren D2 betrug die mittlere

jährliche Nitrat-Auswaschung 47,6 kg/ha gegenüber 39,5 kg/ha beim Verfahren D1.

Die Ertragserhebungen ergaben bisher nur bei Kartoffeln einen statistisch gesicherten Minderertrag (mit 95 % Wahrscheinlichkeit) von rund 12 % durch die um 30 % reduzierte N-Düngung.

Enge Zusammenarbeit während vieler Jahre

Dieser Versuch war nur dank der verständnisvollen Zusammenarbeit von rund zwei Dutzend Leuten über Jahre hinweg möglich.

Als gewichtigste Arbeiten zu erwähnen sind die ständig nötige gärtnerische Betreuung der Kulturen in diesen Kleinstparzellen, die Erntearbeiten und -auswertungen, die rund 5'000 Sickerwasserproben und nicht zuletzt die rund 50'000 Einzelbestimmungen von Ionen-Konzentrationen im Wasser bzw. im Erntegut. Mein herzlicher Dank geht deshalb an alle Kollegen und Kolleginnen der Feldequipe und des Analytik-Labors, an die Fachkollegen von FAL und RAC für die kritische Teilnahme an der wissenschaftlichen Auswertung und schliesslich an alle,

die mitgeholfen haben, die Lysimeteranlage funktionstüchtig zu halten.

Literatur

- Forni D., Gujer H.U., Nyffenegger L., Vogel S. und Gantner U., 1999. Evaluation der Ökomassnahmen und Tierhaltungsprogramme. *Agrarforschung* 6 (3), 107-110.
- Forschungsanstalten, 1994. Grundlagen für die Düngung im Acker- und Futterbau, *Agrarforschung* 1 (7, Beilage), 40 S.
- Nievergelt J., 1991. Die wägbaren Lysimeter der Eidg. Forschungsanstalt für landw. Pflanzen-

bau Zürich-Reckenholz, *Landw. Schweiz* 4 (10), 535-538.

- Nievergelt J., 1994. Lysimeterergebnisse 1. April 1991 bis 31. März 1992. *Agrarforschung* 1 (3), 147-148.
- Nievergelt J., 1997. Lysimeterversuch 1981 bis 1996: N-Auswaschung in Fruchtfolgen. *Agrarforschung* 4 (5), 209-212.
- Schmid C. und Prasuhn V., 2000. GIS-gestützte Abschätzung der Phosphor- und Stickstoffeinträge aus diffusen Quellen in die Gewässer des Kantons Zürich. Schriftenreihe der FAL Nr.35, Zürich-Reckenholz, 114 S.

RÉSUMÉ

Vingt ans d'observation des dosages de nitrates dans les eaux de drainage

Un essai en lysimètres comportant deux types de sols et deux mêmes rotations culturales de 10 ans, décalées de 3 ans, a été suivi durant 20 ans. Les cultures mises en place sont le blé d'automne, le blé de printemps, le colza, le maïs, la pomme de terre, la betterave et la prairie temporaire. Un engrais vert a systématiquement été mis en place avant les cultures de maïs, de pomme de terre et de betterave. Les résultats de plus de 400 prélèvements d'eau permettent d'approfondir les connaissances sur la dynamique de l'azote dans le sol.

La plupart des années on constate un pic net de nitrates dans les eaux de drainage pendant les mois de novembre à mai en relation avec le type de sol, les cultures et les précipitations. Ce pic tire vraisemblablement son origine d'une forte minéralisation de l'azote présent dans le sol encore chaud entre la récolte de la culture et l'installation de la culture suivante. On en conclut que la contribution à la lixiviation des différentes cultures d'une rotation est mieux définie par l'effet de paires de cultures consécutives que par la seule présence d'une culture.

Un sol brun sur gravier et un sol brun sur limon morainique ont été également comparés. Le sol sur gravier, avec ses voies de transport du type «bypass», présente des pics de nitrates plus précoces, plus aigus et de moindre durée que son homologue morainique. La plus grande profondeur et la texture plus fine de ce dernier expliquent ces résultats, les transports ayant lieu surtout dans la terre fine de la matrice du sol.

Depuis 1997, un essai est suivi séparément dans le sol morainique. On y compare la fertilisation azotée dite «optimale» (selon les «Données de base pour la fumure des Grandes Cultures et Herbages», Stations fédérales de recherche agronomique, 1994) avec une fertilisation azotée diminuée de 30 %. Le moyenne de concentration en nitrate de la variante «azote réduit» est de 5 ppm inférieure à la variante «optimale» au cours des premières années d'essai.

SUMMARY

Nitrate leaching in a crop rotation from 1981 to 2000

Using 12 lysimeters nitrate leaching was determined for the following crop rotation: Potato - winter wheat - sugar beet - spring wheat - corn - spring wheat - rape - winter wheat - grass-clover mixture (green manure before potato, corn and sugar beet). Under the climatic conditions of Zurich-Reckenholz (1000 mm annual precipitation, 400 mm from October to March) the crop sequence was the most important factor for nitrate concentration in the leaching water at 2.5 m depth.

Nitrate peaks, which probably originated from the mineralisation period between the two crops (July to September), were recorded regularly between the months of November and May depending on soil type and precipitation.

Differences between two soil types, a well-drained stony cambisol (FAO) developed from a stony alluvium („Schotter“) and a poorly drained fine textured cambisol from moraine deposits („Moräne“), are as follows: On „Schotter“ the peaks of nitrate occurred two to four months earlier, were generally higher and lasted for less time than on „Moräne“. We suppose that on „Schotter“ preferential flow paths on the surfaces of big stones (estimated 25 % of volume) cause higher flow velocity than on „Moräne“ where matrix flow should be predominant.

When fertilization was reduced by 30% a reduction of 5 ppm in nitrate concentration resulted (mean of 1997 to 2000) while only potato showed a significant yield reduction.

Key words: lysimeter, leaching, nitrate, crop rotation, soil type, transport velocity