

Lysimeterversuch 1981 bis 1996: N-Auswaschung in Fruchtfolgen

Jakob NIEVERGELT, Eidgenössische Forschungsanstalt für Agrarökologie und Landbau, Reckenholz (FAL), CH-8046 Zürich

Im Lysimeterversuch der FAL wird eine Ackerfruchtfolge auf zwei Bodenformen im Hinblick auf Auswaschung von Nährstoffen und Wasserhaushalt langfristig untersucht. Im folgenden stellen wir ausgewählte Ergebnisse der Jahre 1981 bis 1996 vor mit Schwergewicht Stickstoffauswaschung. Im Vordergrund stehen dabei der Einfluss der Bodenform, der Kulturarten und der Witterung.

An der FAL wurde 1979 eine Lysimeteranlage erstellt mit den beiden Hauptzielen, den Wasserhaushalt des Bodens und die Auswaschung von Nährstoffen bei ackerbaulicher Nutzung langfristig zu untersuchen. Grossen Wert legte man beim Versuchskonzept darauf, dass die Lysimeter weitmöglichst den Empfehlungen des Deutschen Verbandes für Wasserwirtschaft und Kulturbau (DVWK 1980) entsprechen.

Nach 15 Jahren schälen sich einige Erkenntnisse heraus, die, unabhängig vom Jahresgang der Witterung eines einzelnen Versuchsjahres, allgemein gültige Sachverhalte beschreiben. Wir sind der Meinung, dass sie qualitative Aussagen zu verschiedenen Verfahren auch unter Feldbedingungen (Klimabedingungen des Schweizerischen Mittellandes) zulassen. Von den vielen Untersuchungsergebnissen stellen wir in dieser Publikation die Nährstoffauswaschung, darunter den Stickstoff in den Vordergrund. Besonders beschreiben wir den Einfluss von Bewirtschaftung (Kulturwahl, Fruchtfolge) und Standort (Bodenform, Klima).

Ertrag, N-Düngung, N-Entzug und N-Auswaschung

Die durchschnittlichen Erträge und Stickstoffentzüge der Kulturen waren auf der Schotter-Braunerde um 24 % beziehungsweise 17 % kleiner als auf der Moränelehm-Braunerde (Abb. 1). Die Düngung im Frühjahr entsprach 1981 bis 1986 der Differenz zwischen Sollwert und N_{min} -Wert und war deshalb auf dem Schotterboden höher; ab 1987 düngte man auf beiden Bodenformen gleich viel. Die Stickstoffauswaschung war im Mittel der 14 Jahre (von April 1982 bis März 1996) unter der Braunerde auf Moränelehm mit

50,5 kg N/ha etwa 14 % kleiner als unter der Schotter-Braunerde mit 59,3 kg N/ha. Das höhere Ertragspotential und geringere Auswaschrisiko der Moränelehm-Braunerde ist eine Folge ihres grösseren Nährstoff- und Wasserspeichervermögens. Die Bilanzierung von Düngung, Entzug und Auswaschung ergibt für die Schotter-Braunerde ein Defizit von 43 kg N/ha und Jahr, für die Moränelehm-Braunerde ein solches von 69 kg N/ha. Diese N-Bilanzen wären ungefähr ausgeglichen, wenn Stroh und Zuckerrübenlaub nicht abgeführt, sondern in die Böden eingearbeitet worden wären. Im Lysimeterversuch wird ein Teil des Defizites durch N-Einträge aus der Luft (N-Verbindungen in den Niederschlägen; N-Fixierung durch Klee der Kunstwiesen) gedeckt.

Der unterschiedliche Verlauf der Stickstoffauswaschung in zwei Bodenformen wird am Beispiel der vier Jahre mit Kartoffeln gezeigt (Abb. 2). Die Auswaschung aus der Schotter-Braunerde ist jeweils im ersten Winter nach Kartoffeln deutlich höher als aus der Moränelehm-Braunerde; dieses Verhältnis kehrt sich danach um, teilweise bereits im Sommer (mit Winterweizen/Kunstwiese als Hauptkultur), deutlicher aber im Winter danach. Dass

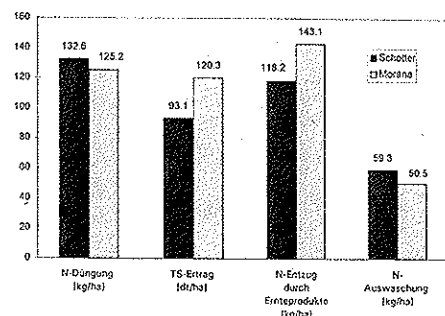


Abb. 1. Durchschnittliche Jahreswerte von Stickstoff-Düngung, Trockensubstanz-Ertrag und Stickstoff-Entzug der Jahre 1981 bis 1995 sowie der Stickstoff-Auswaschung von 1982 bis 1996.

Lysimeter-Anlage der Forschungsanstalt Reckenholz, Zürich

12 wägbare Schwerkraftlysimeter von 3,14 m² Oberfläche und 2,5 m Tiefe, im Freien in Rasenfläche eingelassen. 4 Verfahren in 3 Wiederholungen; 2 zehnjährige Fruchtfolgen auf 2 Bodenformen; im Sommer Vergleich Getreide/Hackfrucht, im Winter Gründüngung/(Teil-) Brache. Zwischen Getreide und Hackfrucht jeweils Gründüngung. Düngung: mineralisch, nach Richtlinien der Eidgenössischen Forschungsanstalten (1987).

Bodenform «Schotter»: steinige, mässig tiefgründige Braunerde; nutzbare Feldkapazität etwa 190 mm; organische Substanz: 2,6 % (0-30 cm Bodentiefe), 10 kg/m³; 15,5 % Ton, 23,3 % Schluff (je Mittelwert 0-80 cm Bodentiefe); schichtweise eingefüllt.

Bodenform «Moränelehm»: schwach staunasse, tiefgründige Braunerde; nutzbare Feldkapazität etwa 260 mm; organische Substanz: 3,2 % (0-30 cm Bodentiefe), 8 kg/m³; 19,2 % Ton, 38,0 % Schluff (je Mittelwert 0-80 cm Bodentiefe); schichtweise eingefüllt.

Klimadaten des Versuchsstandortes: 7,8°C mittlere Lufttemperatur, 1009 mm Niederschlag; April bis September 13,3°C beziehungsweise 623 mm.

Untersuchungsschwerpunkte

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

Messgrössen: Gewicht, Sickerwassermenge, Nährstoffkonzentrationen im Sickerwasser u.a. Messhäufigkeit: stündlich automatisiert, Konzentrationsbestimmungen 14-täglich.

Ausführlichere Beschreibung siehe Nievergelt (1991).

ungenutztes Nitrat im Verfahren «Moränelehm» länger im Boden verbleibt als im Schotterboden, wird vermutlich durch folgende Faktoren bestimmt: Grösseres Feinerdevolumen mit höherem Ton- und Schluffgehalt, grösseres Wasserspeichervermögen, kleinere Durchlässigkeit der Moränelehm-Braunerde.

Fruchtfolge und Stickstoffauswaschung

Die Auswaschung von Stickstoff variierte von Jahr zu Jahr stark (Abb. 3). Dabei war weniger die Jahreswitterung massgebend

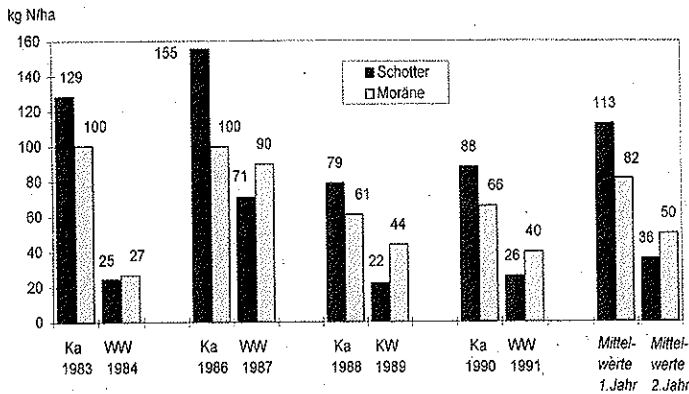


Abb. 2. Stickstoff-Auswaschung zweier einander folgender Jahre, je Kartoffeln im 1. Jahr und Winterweizen beziehungsweise Kunstwiese im 2. Jahr; 4 Versuche auf zwei Bodenformen und deren Mittelwerte.

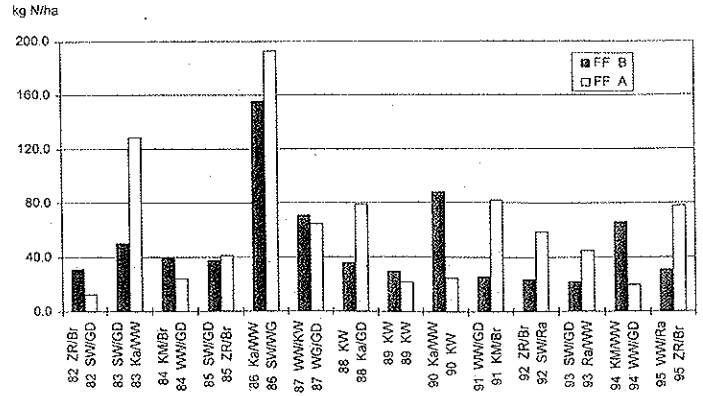


Abb. 3. Jährliche Stickstoffauswaschung zweier Fruchtfolgen auf der Schotter-Braunerde von 1982 bis 1995 (je von April bis März des Folgejahres) Fruchtfolge A (FF A) und B (FF B) mit gleichen Gliedern, jedoch im wesentlichen um drei Jahre gegeneinander verschoben. Beschriftung: Kultur im Sommer/Art der Winterbedeckung.

als die Kulturabfolge und der Stickstoffentzug durch die Ernteprodukte. Neben den oben erwähnten Jahren mit Kartoffeln wurde im Winter 1986/87 nach der Sommerweizenernte überdurchschnittlich viel Stickstoff ausgewaschen. Hauptgrund dafür war das schlechte Auflaufen und die ungenügende Bestandesdichte mit nachfolgender Kleinernte (rund 20 dt/ha). Das hatte zur Folge, dass viel mineralisierter Stickstoff im Boden zurückblieb und im Laufe des folgenden Winterhalbjahres mit normalen Niederschlags- und Sickerwassermengen ausgewaschen wurde. In den meisten übrigen Jahren mit Weizen waren die N-Auswaschungen unterdurchschnittlich, wobei sich hier günstig auswirkte, dass zwischen Getreide und nachfolgender Hackfrucht jeweils eine Gründüngung den Winter überbrückte.

Die beiden Hauptnutzungsjahre mit Kunstwiesen ergaben die kleinsten N-Auswaschungen. Relativ gering war die Auswaschung unter Zuckerrüben. Die N-Auswaschung unter Körnermais lag zwischen denjenigen von Kartoffeln und Rüben. Auf Mais und Rüben folgte jeweils Winterbrache. Im Verlaufe der letzten 15 Versuchsjahre fiel auf, dass im Winter unter Wintergetreide jedesmal viel Stickstoff ausgewaschen wurde (Abb. 4). In drei von fünf Fällen war dabei die Vorkultur Kartoffeln (Abb. 2), nach deren Ernte, unter anderem wegen der damit verbundenen intensiven Bodenlockerung bei noch warmen Böden, der mineralische Stickstoffgehalt im Boden bekanntermaßen hoch ist.

Ein Versuch in den Jahren 1993/94 mit zwei Fruchtfolge-Subverfahren, «Raps gefolgt von Winterweizen» und «Raps gefolgt von Gründüngung/Sommerweizen», ergab eine Minderauswaschung beim zweiten Verfahren von 48 kg N/ha in der Moränelehm-Braunerde und von 13 kg N/

ha in der Schotter-Braunerde (Nievergelt 1995 und 1996). Als zusätzliche Gründe für den markanten Unterschied zwischen den beiden Bodenformen vermuten wir den Minderertrag von 10 % vom Sommerweizen gegenüber dem Winterweizen sowie ein zusätzliches Auswaschungsrisiko durch Mineralisierung der abgestorbenen Gründüngung (Phacelia) auf der Schotter-Braunerde.

Einfluss der Jahreswitterung

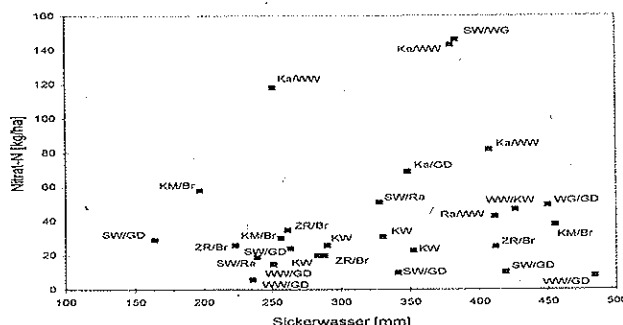
Die Stickstoff-Auswaschung im Winterhalbjahr beträgt im Mittel knapp 75 % der pro Jahr ausgewaschenen Menge, obwohl im Winterhalbjahr nur rund 40 % des Jahresniederschlags fallen. Hingegen erreichen die Sickerwassermengen des Winterhalbjahres, wegen der geringen Verdunstungsleistung der Pflanzen, im Mittel etwa 65 % des Jahrestotals. Es ist naheliegend zu vermuten, dass in einem regenreichen Winter (oder Frühjahr) mit entsprechend starker Sickerwasserbildung besonders viel Nitrat ausgewaschen würde, und die folgende Stickstoffdüngung deshalb nach oben zu korrigieren wäre.

Die Versuchsergebnisse widersprechen dieser Vermutung aber weitgehend (Abb. 4). Die Sickerwassermengen beeinflussen die

Nitratauswaschungen im Winterhalbjahr (Oktober bis März) nur geringfügig. Das Bestimmtheitsmass beträgt bei der Schotter-Braunerde 0,325 und bei der Moränelehm-Braunerde, wegen der verzögerten Verlagerung, sogar nur 0,112. Die Erklärung liegt darin, dass im humiden Klima des schweizerischen Mittellandes im Winterhalbjahr immer genügend Niederschlag - im langjährigen Mittel zwischen 300 mm und 500 mm - fällt, um mittels Sickerwasser die Verlagerungsvorgänge voranzutreiben (vgl. BGS 1989). In einem Lysimeterversuch unter wesentlich trockeneren Bedingungen - durchschnittlich 550 mm Niederschlag pro Jahr - fand Dressel (1992) einen viel engeren Zusammenhang zwischen Sickerwassermenge und N-Auswaschung. Die Magnesium- und Kalziumauswaschung hingegen wird auf beiden Bodenformen grösstenteils durch die Sickerwassermenge bestimmt (Nievergelt und Barbier, 1991).

Einfluss von Bewirtschaftungsmassnahmen

In den ersten sechs Jahren bestimmten wir den mineralischen Stickstoffgehalt der zwei Bodenformen. Der N_{min} -Wert im Frühjahr war auf der Schotter-Braunerde durchschnittlich um 19 kg/ha geringer und



Legende zu den Abbildungen 2, 3 und 4

- Br Brache
- GD Gründüngung
- Ka Kartoffeln
- KM Körnermais
- KW Kunstwiese
- Ra Winterripps
- SW Sommerweizen
- WG Wintergerste
- WW Winterweizen
- ZR Zuckerrüben

Abb. 4. Sickerwassermenge und Auswaschung von Nitrat-Stickstoff. Werte der Winterhalbjahre 1982/83 bis 1995/6, Schotter-Braunerde. Beschriftung: Kultur im Sommer/Art der Winterbedeckung.

die N-Düngung danach um diese Menge höher als auf der Moränelehm-Braunerde. Ab 1987 wurde die Stickstoffdüngung für beide Böden gleich bemessen. Wir teilten die N-Düngung (ausser zu Zuckerrüben) jeweils in zwei bis drei Gaben auf und brachten sie auf beiden Bodenformen zum gleichen Zeitpunkt aus.

Trotz der Mehrdüngung in den Jahren 1981 bis 1986 auf der Schotter-Braunerde fiel der Ertrag und N-Entzug deutlich kleiner aus als auf der Moränelehm-Braunerde (Tab. 1). Dementsprechend war die N-Auswaschung aus der Schotter-Braunerde im Mittel um 11,5 kg/ha oder 20 % grösser als aus der Moränelehm-Braunerde. In den Jahren 1987 bis 1995, mit gleicher N-Düngung auf beiden Bodenformen, vergrösserte sich der prozentuale Unterschied bei TS-Ertrag und N-Entzug, verminderte er sich hingegen bei der N-Auswaschung. Diese Ergebnisse deuten darauf hin, dass man bei Düngung nach N_{min} -Untersuchungen und N-Sollwerten die Erträge auch an ungünstigeren Standorten (Schotter-Braunerde), mit kleinerem Ertragspotential, günstig beeinflussen kann; gegenüber einer Normdüngung scheint sich an solchen Standorten hingegen das Risiko der N-Auswaschung zu erhöhen.

Im Laufe der 15 Jahre geschah es immer wieder, dass auf einer der drei Wiederholungen des gleichen Verfahrens sich der Pflanzenbestand, aus unterschiedlichsten Gründen, nicht wunschgemäss entwickelte. Dies hatte jeweils zur Folge, dass Ertrag und N-Entzug gegenüber den anderen zwei Wiederholungen zurückblieb. Die Auswirkung auf die Auswaschung zeigt Abbildung 5.

Im Mittel von 15 Jahren wurde aus den Lysimetern mit geringerem TS-Ertrag meistens mehr Stickstoff ausgewaschen. In Jahren mit stark unterschiedlichen Erträgen innerhalb der drei Wiederholungen waren die Unterschiede grösser als im langjährigen Mittel. Demgemäss zieht jede Kultur, die das durch Düngung und Standortbedingungen gegebene Ertragspotential nicht ausschöpft, ein erhöhtes Risiko bezüglich Stickstoffauswaschung nach sich. Ebenso erhöht sich das Risiko, wenn bei der Bewirtschaftung von einem unrealistisch hohen Ertragspotential des Standortes ausgegangen wird, zum Beispiel bei Überschätzung des Wasserangebotes.

Aus Abbildung 5 entnimmt man darüber hinaus, dass die vier Verfahren, zwei Bodenformen und zwei Fruchtfolgen, sich auch im langjährigen Mittel voneinander unterscheiden. Der Einfluss der Boden-

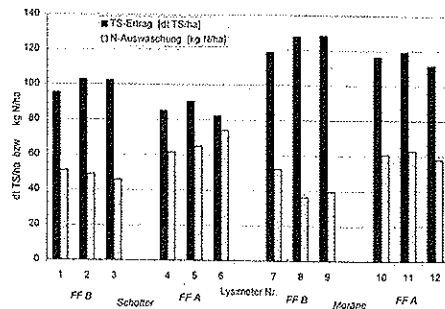


Abb. 5. TS-Ertrag und Stickstoffauswaschung von je drei Lysimetern in vier Verfahren. Mittelwert der Jahre 1981 bis 1996. Fruchtfolge A (FF A) und B (FF B) mit gleichen Gliedern, jedoch im wesentlichen um drei Jahre gegeneinander verschoben.

form ist dabei stärker als derjenige der Fruchtfolge, da sich die beiden zehnjährigen Fruchtfolgen im wesentlichen nur durch eine gegenseitige Verschiebung um drei Jahren unterscheiden. Beide Fruchtfolgen durchliefen in den Jahren 1981 bis 1995 eineinhalb Zyklen.

N-Auswaschungsrisiko verschiedener Ackerkulturen

Um verschiedene Kulturen bezüglich ihres Nitrat-Auswaschungsrisikos zu beurteilen, genügt es nicht, zum Beispiel die N_{min} -Werte nach der Kultur im Spätherbst allein zu betrachten oder die Auswaschung nur während der Zeit von der Saat bis zur Ernte. Was im Winter zuvor und danach ausgewaschen wird, ist teilweise ebenso durch die Eigenheiten der Kultur und Anbautechnik bedingt.

Daher wird für den Vergleich (Tab. 2) auch die Stickstoffauswaschung vor und nach der Kultur und damit die Möglichkeit zu einer günstigen Einordnung der Kultur in eine Fruchtfolge - zum Beispiel das Einschalten einer Zwischenkultur als Gründüngung - berücksichtigt. In der von uns gewählten Berechnungsart hat für Winterweizen die Auswaschung im Sommer vor und im Winter nach der Kultur halb so viel Gewicht wie die Auswaschung im Winter und Sommer mit stehendem Winterweizen. Bei den übrigen aufgeführten Kulturen erhält man die zu-

geordnete Jahresauswaschung, indem man den Mittelwert der Winterauswaschung vor und nach der Kultur zur Sommerauswaschung addiert.

In Tabelle 2 fällt auf, dass bei Getreide und Mais der Bodeneinfluss klein ist und dass die Mehrauswaschung aus dem Schotterboden vor allem von den Kartoffeln und Zuckerrüben herrührt. Bei Kartoffeln wirkt nach unseren Beobachtungen auf dem Schotterboden folgende Kausalkette: zeitweiliger Wasserstress - geringere N-Aufnahme und Wassereffizienz - Minderertrag - höhere N_{min} -Werte im Herbst - grösseres Auswaschrisiko. Zwei Jahre mit generell schlechter Entwicklung der Rübenpflanzen auf der Schotter-Braunerde führten zu kleinen Erträgen und N-Entzügen und nachfolgend vermehrter Auswaschung. Aufgrund ihrer Bodenart mit hohem Skelett- und Sandanteil, sowie der mässig entwickelten Gründüngung ist die Schotter-Braunerde kein optimaler Rübenstandort.

Selbstverständlich sind für praxisrelevante Vergleiche nicht nur einzelne Kulturen heranzuziehen, sondern es müssten ganze Zyklen unterschiedlicher Fruchtfolgen auf verschiedenen Böden hinsichtlich des Auswaschungsrisikos beurteilt werden.

Wichtigste Resultate in Kürze

Nachfolgend sind einige Sachverhalte aufgelistet, die sich nach Auswertung der Daten von 15 Versuchsjahren am klarsten feststellen lassen:

- Am deutlichsten beeinflussen die Kulturarten und ihre zeitliche Abfolge die N-Auswaschung.
- Unter Bedingungen dieses Lysimeterversuches - Klima des Schweizer Mittellandes, mineralische Düngung, Gründüngung vor Kartoffeln, Mais und Zuckerrüben - bilden Wintergetreidearten bezüglich Stickstoff-Auswaschung eher das grössere Risiko als Körnermais und Zuckerrüben. Eine besonders ungünstige Kulturfolge ist Kartoffeln gefolgt von Wintergetreide.

Tab. 1. N-Düngung aufgrund von N_{min} -Werten im Frühjahr; Einfluss auf TS-Ertrag, Stickstoff-Entzug und -Auswaschung von zwei Bodenformen; Mittelwerte der Jahre 1981 bis 1986. Zum Vergleich: Mittelwerte der Jahre 1987 bis 1995 mit gleicher N-Düngung auf beiden Bodenformen

	N-Düngung [kg/ha] [%]	TS-Ertrag [kg/ha] [%]	N-Entzug [kg/ha] [%]	N-Auswaschung [kg/ha] [%]
Schotter-Braunerde	81-86 147,3 115	108,6 82	140,7 88	68,4 120
Moränelehm-Braunerde	81-86 128,1 100	132,5 100	159,3 100	56,9 100
Schotter-Braunerde	87-95 122,8 100	82,8 74	103,2 78	50,7 105
Moränelehm-Braunerde	87-95 123,3 100	112,2 100	132,3 100	48,1 100

Im humiden Klima des Schweizer Mittellandes bildet sich, vor allem in der vegetationsfreien Zeit, jedes Jahr genügend Sickerwasser, um Stickstoff in Nitratform aus dem Wurzelraum zu transportieren. Die besonderen Niederschlagsverhältnisse eines bestimmten Jahres beeinflussen daher die Stickstoffauswaschung nicht stark. Es hängt demnach vor allem von der frei in der Bodenlösung vorhandenen Menge an Nitrat ab, wieviel Stickstoff ausgewaschen wird.

Eine Folge der höheren Durchlässigkeit in der Schotter-Braunerde ist, dass sich die Nitrat-Auswaschung auf den Folgewinter konzentriert, in der Moränelehmbraunerde hingegen ein Teil sich erst ein Jahr danach im Sickerwasser findet.

Aus der Schotter-Braunerde (höhere Durchlässigkeit, geringeres Nährstoff- und Wasserspeichervermögen) wurde - bei 6 %, oder 110 kg in 15 Jahren, höherer mineralischer N-Düngung - durchschnittlich rund 17 % mehr Stickstoff ausgewaschen als aus der Moränelehm-Braunerde. Der TS-Ertrag auf der Schotter-Braunerde war im Mittel um 24 % kleiner und der Entzug an Stickstoff aus dem Boden um rund 17 % geringer als auf der Moränelehm-Braunerde.

Wenn auf einem Lysimeter der Ertrag deutlich kleiner war als auf den zwei andern Lysimetern desselben Verfahrens, so erhöhte sich in der Folge die N-Auswaschung im Vergleich zu den zwei ertragsstärkeren Wiederholungen. Aufgrund unserer Erfahrungen an der FAL, unter anderem mit der Lysimeteranlage, erwähnen wir folgende, zumeist bekannte, **Massnahmen** zur Verminderung des Nitrat-Auswaschungsrisikos im Ackerbau unter den Klimabedingungen des Schweizer Mittellandes: Neben **ordnungsgemässer Düngung** ist der Wahl der **Kulturfolge** und der **Pflege** der aufwachsenden Kulturen (zur Ausschöpfung des Ertragspotentials) grösste Beachtung zu schenken. Ein besonderes Augenmerk ist auf die **Übergänge** zwischen der Hauptkultur und der Folgekultur **im Nachsommer und Herbst** zu richten. Günstig sind dabei eine **Zwischenkultur**, die möglichst viel Stickstoff aufnimmt, sowie eine möglichst **wenig intensive Bodenbearbeitung**, um die Mineralisierung in den noch warmen Böden nicht unnötig zu fördern. Auf flachgründigen Standorten ist dem Ertragspotential Beachtung zu schenken und die **N-Düngung** zeitlich und mengenmässig dem oft limitierenden **Wasserangebot anzupassen**.

Tab. 2. Abschätzung des Risikos verschiedener Kulturen bezüglich der Stickstoffauswaschung bei mineralischer Düngung auf zwei Bodenformen. Berechnung aufgrund der Lysimeterergebnisse 1982 bis 1996

Kultur	Anzahl Versuchsjahre	Relatives Risiko in % Schotter-Braunerde	Relatives Risiko in % Moränelehm-Braunerde
Winterweizen	5	105	100
Sommerweizen	6	79	83
Kartoffeln	4	102	82
Körnermais	3	70	72
Zuckerrüben	4	47	31
Kunstwiese	4	50	48

100 % = Mittelwert der Stickstoffauswaschung von Winterweizen auf Moränelehm mit $73 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{a}^{-1}$
 Berechnungsformel für die Jahresauswaschung im Jahr J (Erntejahr): für SW, Ka, KM, ZR und KW: $0,5 \cdot \text{NW}(J-1) + \text{NS}(J) + 0,5 \cdot \text{NW}(J)$; für Winterweizen: $0,33 \cdot \text{NS}(J-1) + 0,67 \cdot \text{NW}(J-1) + 0,67 \cdot \text{NS}(J) + 0,33 \cdot \text{NW}(J)$; wobei NW: Stickstoffauswaschung im Winterhalbjahr (Oktober-März) und NS: Stickstoffauswaschung im Sommerhalbjahr (April-September)

LITERATUR

BGS Bodenkundliche Gesellschaft der Schweiz, 1989. Lysimeterdaten von schweizerischen Messstationen, Dokument 4, 123 S. Dokumentationsstelle BGS, WSL Birmensdorf.

Dressel J., 1992. Ergebnisse langjähriger Lysimeterversuche zur Stickstoffversickerung bei verschiedenen Anbausystemen und unterschiedlicher Düngung. Bericht über die 2. Lysimetertagung, 1-12. Bundesanstalt für alpenländische Landwirtschaft, Gumpenstein A.

DVWK Deutscher Verband für Wasserwirtschaft und Kulturbau, 1980. Empfehlungen zum Bau und Betrieb von Lysimetern. Merkblätter-Empfehlungen-Richtlinien, Heft 114, 52 S. Verlag Paul Parey, Hamburg und Berlin.

Eidg. landw. Forschungsanstalten, 1987. Düngungsrichtlinien für den Acker- und Futterbau, 36 S. Ab 1994 ersetzt durch: Grundlagen für die Düngung im Acker- und Futterbau, 40 S.

Nievergelt J., 1991. Die wägbaren Lysimeter der Eidg. Forschungsanstalt für landw. Pflanzenbau Zürich-Reckenholz, *Landw. Schweiz* 4 (10): 535-538.

Nievergelt J. und Barbier J.I., 1991. Calcium- und Magnesiumauswaschung aus zwei Bodenformen unter Ackerkulturen. Bulletin Bodenkundliche Gesellschaft der Schweiz 15: 57-60.

Nievergelt J., 1995. Nitrat-Auswaschung unter Ackerkulturen, *Die Grüne* 4: 22-24.

Nievergelt J., 1996. Lysimeter-Ergebnisse 1. April 94 bis 31. März 95, *Agrarforschung* 3 (7): 343-344.

RÉSUMÉ

Lixiviation de l'azote sous grandes cultures - quinze années d'expériences dans douze lysimètres

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 15 ans. Les cultures mises en place étaient le blé d'automne, le blé de printemps, le maïs, la pomme de terre, la betterave et la prairie temporaire. Un engrais vert était systématiquement mis en place avant les cultures de maïs, de pomme de terre et de betterave.

Sous les conditions climatiques du plateau suisse, la pomme de terre et le blé d'automne suivant cette culture ont montré les plus fortes pertes par lixiviation. A l'opposé, les pertes ont été moindres sous la prairie temporaire et la betterave, et intermédiaires sous maïs et blé de printemps.

Les précipitations ont été chaque année suffisantes pour transporter l'azote au-dessous de la zone prospectée par les racines. Ce transport s'effectue surtout en dehors de la période de végétation, et n'est influencé que faiblement par les quantités de précipitations.

Un sol brun sur gravier et un sol brun sur limon morainique ont été également comparés. Le sol sur gravier a donné un rendement moyen inférieur de 24 %, et a subi des pertes par lixiviation supérieures de 17 % par rapport à son homologue sur limon morainique. La profondeur utile supérieure et la texture plus fine de ce dernier expliquent les meilleurs résultats.

Sur la base de nos résultats en lysimètres, nous proposons de mettre en place des rotations avec cultures intermédiaires et travail du sol réduit dans les régions à risques élevés, comme par exemple les zones de captage d'eau potable. De plus, il est indispensable d'adapter la fumure azotée au potentiel de rendement réduit des sols possédant une réserve limitée en eau utile.

SUMMARY

Nitrogen leaching under crop rotation - lysimeter results from 1981 to 1996

Under the conditions of the lysimeter experiment at Zurich-Reckenholz - 1000 mm annual precipitation (400 mm from October to March), mineral fertilisation, green manure before potato, corn and sugar beet - crop type and position of the crop in the rotation were the most crucial factors for nitrate leaching. Maximum risk was evaluated for potato followed by winter wheat; medium risk for spring wheat and corn; and the smallest risk for temporary meadow and sugar beet.

In any year, there was enough leaching water in order that nitrate could leach below the root zone, especially outside the main growing season (April to September). Therefore, the influence of the amount of precipitation in a given year was small.

Differences in yield and nitrogen leaching between two soil types, one well-drained stony cambisol (FAO) developed from a stony alluvium (Schotter), the other a poorly-drained fine-textured cambisol developed from moraine deposits (Moräne) can be summarized as follows: On Schotter yield was 24 % lower and nitrogen leaching 17 % higher than on Moräne.

KEY WORDS: lysimeter, leaching, nitrate, crop rotation, soil type