

Einfluss der Winterbegrünung auf Wasserhaushalt und Nitratauswaschung

Ernst Spiess^{1*}, Volker Prasuhn¹ und Werner Stauffer¹

Zusammenfassung

Auf der Lysimeteranlage Bern-Liebefeld wurde zwischen 2002 und 2008 der Einfluss von überwinterten und abfrierenden Zwischenfrüchten auf die Sickerwasserbildung und die Nitratauswaschung ins Grundwasser untersucht. Auf drei verschiedenen Böden wurde der Anbau von als Viehfutter genutzten Zwischenfrüchten mit einer Winterbrache verglichen. Durch den Anbau einer Zwischenfrucht nach Winterweizen wurden die Sickerwassermenge auf allen Böden um rund 170 mm und die ausgewaschene Nitratmenge um etwas über 110 kg N ha⁻¹ und Anbaujahr verringert. Während die Nitratverluste unter den Zwischenfrüchten beträchtlich reduziert wurden, traten in den Nachperioden leicht höhere Auswaschungsverluste auf. Abschätzungen für das schweizerische Talgebiet zeigen, dass die Grundwasserneubildung durch den Zwischenfruchtanbau nur unbedeutend abnimmt.

Schlagwörter: Lysimeter, Sickerwasser, Winterbrache, Zwischenfrüchte

Summary

The influence of over-winter and non-winter hardy cover crops on seepage water volume and nitrate leaching into groundwater was studied at the lysimeter station of Berne-Liebefeld between 2002 and 2008. On three soils the cultivation of cover crops used as forage was compared to winter fallow. Cover cropping after winter wheat resulted in a reduction of 170 mm in seepage water volume and a decrease of 110 kg N ha⁻¹ in the amount of nitrate leached per cropping year. Whereas nitrate leaching could be considerably reduced during the growth period of cover crops, leaching losses proved to be slightly higher in the after period. Estimations for the Swiss lowlands show an insignificant decrease in groundwater recharge by cover cropping.

Keywords: cover crops, lysimeter, seepage water, winter fallow

Einleitung

Die Nitratgehalte des Grundwassers sind in der Schweiz in der zweiten Hälfte des letzten Jahrhunderts gestiegen und erreichten Mitte der 1990er Jahre ihren Höhepunkt (BUWAL 1993, HERZOG et al. 2008). Ursache für diesen Anstieg war hauptsächlich die Intensivierung der Landwirtschaft. Die Erträge der bedeutendsten Kulturen haben sich während dieser Periode mehr als verdoppelt. Die intensivere Bodenbearbeitung und der höhere Düngereinsatz haben neben ertragreicheren Sorten sowie einem gezielteren Pflanzenschutz wesentlich dazu beigetragen. Beim Stickstoff (N) stieg der jährliche Mineraldüngerverbrauch in der Schweiz von rund 8'000 t N im Jahr 1950 auf über 70'000 t N in der zweiten Hälfte der 1980er Jahre und auch der Wirtschaftsdüngeranfall nahm bis 1980 kontinuierlich zu. Ab Mitte der 1990er Jahre gingen die Nitratgehalte des Grundwassers leicht zurück (BUWAL und BWG 2004, HERZOG et al. 2008, BAFU 2009). Dies ist zum Teil auf die Umgestaltung der schweizerischen Agrarpolitik zurückzuführen. 1993 wurden Direktzahlungen für die Integrierte Produktion (IP), den organischen Landbau (Bio) und ökologische Ausgleichsflächen (z.B. extensiv oder wenig intensiv genutzte Wiesen) eingeführt. 1999 wurden die meisten IP-Regelungen in den Ökologischen Leistungsnachweis (ÖLN) integriert, welcher Voraussetzung zum Erhalt von Direktzahlungen wurde. Die verschiedenen

Regelungen enthalten auch Vorschriften zum maximal tolerierbaren Überschuss in der gesamtbetrieblichen N-Bilanz, zur Gestaltung der Fruchtfolge sowie zur Bodenbedeckung während des Winterhalbjahres. Modellrechnungen zeigen, dass der geringere N-Düngereinsatz im Ackerbau sowie der vermehrte Anbau von Zwischenfrüchten wesentlich zu den verminderten Nitratgehalten des Grundwassers beigetragen haben (HERZOG et al. 2008, SPIESS und PRASUHN 2008).

Obwohl dem Zwischenfruchtanbau erst in den letzten Jahrzehnten größere Beachtung geschenkt worden ist, ist seine Bedeutung für die Reduktion der Nitratauswaschung seit langem bekannt. DEHÉRAIN schrieb schon 1902, dass die Fläche mit Winterbrache durch den Anbau von Gründüngungen reduziert werden muss, um die N-Verluste zu vermindern (zitiert in BEAUDOIN et al. 2005). Nach MEISINGER et al. (1991) wurde die Rolle der Zwischenfrüchte bei der Reduktion der Nitratverluste zwischen 1930 und 1945 studiert. In der Schweiz wurden in dieser Zeit Lysimeterversuche durchgeführt und GEERING (1943) schlug vor, hohe N-Verluste durch den Anbau von Ackerfutterpflanzen anstelle der sonst üblichen Winterbrache zu verhindern. Spätere Lysimeterversuche in den 1970er und 1980er Jahren zeigten die Wirksamkeit verschiedener Zwischenfrüchte bei der Verringerung der Nitratauswaschung (JÄGGLI 1978, FURRER und STAUFFER 1984, 1986).

¹ Forschungsanstalt Agroscope Reckenholz-Tänikon ART, Reckenholzstraße 191, CH-8046 ZÜRICH

* Ansprechpartner: DI Ernst Spiess, ernst.spiess@art.admin.ch

Zwischenfrüchte beeinflussen die Nitratauswaschung auf zweierlei Weise: Einerseits reduzieren sie die Sickerwassermenge, indem sie Wasser aufnehmen und transpirieren (MEISINGER et al. 1991). Andererseits nehmen sie Nitrat über die Wurzeln auf und vermindern so die oftmals hohen N_{\min} -Gehalte des Bodens im Herbst (GUTSER und VILSMEIER 1988, HANSEN und DJURHUUS 1997) und letztlich damit auch die ausgewaschenen Nitratmengen. Die Wirkung der Zwischenfrüchte auf die Reduktion der Nitratauswaschung hängt von vielen Faktoren ab: z.B. Pflanzenart (BONTEMPS et al. 2004), Wurzeltyp (Flachwurzler vs. Tiefwurzler; THORUP-KRISTENSEN 2001), Fähigkeit zur biologischen N-Fixierung (MEISINGER et al. 1991, RINNOFNER et al. 2008), Saatzeitpunkt (BÖHM und HÖSCH 2001a, b), Umbruchzeitpunkt (GUTSER und VILSMEIER 1988, BÖHM und HÖSCH 2001a, THORUP-KRISTENSEN et al. 2003), Nachkultur (THORUP-KRISTENSEN et al. 2003).

In der vorliegenden Studie wurde untersucht, wie stark überwinterte und abfrierende Zwischenfrüchte die Nitratauswaschung auf drei unterschiedlichen Böden gegenüber einer Winterbrache reduzieren.

Material und Methoden

Lysimeter

Der Versuch wurde in den Jahren 2002 bis 2008 auf 18 Lysimetern der Anlage Bern-Liebefeld durchgeführt (FURRER und STAUFFER 1980). Es handelt sich um nichtmonolithische Lysimeter, welche eine Oberfläche von 1 m² und eine nutzbare Tiefe von 1,40 m aufweisen. Für die Messung des Sickerwassers wurden Kippwaagen nach dem Prinzip von Joss-Tognini verwendet. Die Impulse der einzelnen Kippungen wurden in einer zentralen Zählleinheit registriert. Bei der vorliegenden Lysimetergröße können Sickerwassermengen von über 100 Liter pro Monat auftreten. Es wurde deshalb eine Einrichtung geschaffen, die eine abflussproportionale Entnahme einer kleinen Probe erlaubt (FURRER und STAUFFER 1980). Die Ablesung der Sickerwassermenge und die Probenahme für die chemische Analyse erfolgten monatlich.

Boden

Die Lysimeter wurden 1982 mit Boden von drei Standorten gefüllt (Tabelle 1). Der Boden wurde volumenetreu eingefüllt, indem er gemäß der im Feld gemessenen Lagerungsdichte rückverdichtet wurde. Der Fluvisol zeichnete sich durch einen hohen Sandgehalt aus, während die Kalkbraunerde mit Abstand die höchsten Ton-, C_{org} - und N_{tot} -Gehalte aufwies.

Tabelle 1: Eigenschaften der drei Böden (0-20 cm Tiefe) bei Versuchsbeginn

Bodentyp	Herkunft	Ton (%)	Schluff (%)	Sand (%)	pH _{H2O}	C _{org} (%)	N _{tot} (%)
Fluvisol	Gampelen BE	9	12	79	7.8	1,5	0.19
Parabraunerde	Bern-Liebefeld BE	17	25	58	6.2	1,3	0.17
Kalkbraunerde	Oensingen SO	41	33	26	7.8	2,6	0.31

Fruchtfolge

Zwischen 1982 und 2000 wurden die Lysimeter in unterschiedlichen Versuchen verwendet. Zum Ausgleich wurden deshalb im Frühling 2001 Kartoffeln gepflanzt und nach deren Ernte eine Kleeegrasmischung angesät. Im März 2002 startete der Winterbegrünungsversuch mit einer siebenjährigen Fruchtfolge (Silomais - Winterweizen 1 - Zuckerrüben - Winterweizen 2 - Eiweißerbsen - Wintergerste - Klee gras). Als Zwischenfrucht wurde in einzelnen Verfahren abfrierender Bastard-Ölrettich (*Raphanus sativus* x *Brassica oleracea*; Sorte Colano) nach Winterweizen 1 und winterharte Chinakohlrüben (*Brassica chinensis* x *Brassica rapa*; Sorte Buko) nach Winterweizen 2 angesät. Die Zwischenfrüchte wurden als Zwischenfutter verwendet, d.h. die oberirdische Biomasse wurde im Oktober vom Lysimeter abgeführt und dem Vieh verfüttert.

Bodenbearbeitung und Düngung

Der Boden wurde in der Regel vor Hauptkulturen 20 cm tief und vor Zwischenfrüchten 10 cm tief bearbeitet. Wo keine Zwischenfrucht auf die Hauptkultur folgte, blieb die Parzelle bis zur Bodenbearbeitung für die nächste Hauptkultur unbearbeitet (Stoppelfeld oder Nachverunkrautung).

Die Düngung der Kulturen richtete sich nach den damals geltenden Düngungsempfehlungen der Eidgenössischen Forschungsanstalten (FLISCH et al. 2001). Die N-Düngung erfolgte bei Silomais und Klee gras mit Mist, Gülle und Ammoniumnitrat, bei Zuckerrüben mit Mist und Ammoniumnitrat sowie beim Getreide und bei den Zwischenfrüchten (28 kg N ha⁻¹) ausschließlich mit Ammoniumnitrat. Die Eiweißerbsen erhielten keinen N-Dünger. Die N-Düngung zu den einzelnen Hauptkulturen wurde in Teilgaben verabreicht.

Niederschläge

Die Niederschlagsmengen wurden bis Juni 2006 der 300 m entfernten Station von MeteoSchweiz entnommen und nach deren Verlegung der 7,5 km entfernten Station Bern-Zollikofen. Die Berechnung der Jahressummen erfolgte jeweils von April des laufenden Jahres bis März des Folgejahres. Der Jahresniederschlag betrug im Mittel der sechs Jahre 1058 mm und schwankte zwischen 867 mm (2003/04) und 1274 mm (2006/07).

Statistische Auswertung

Der Versuch musste infolge Rationalisierungsmaßnahmen nach sechs Jahren abgebrochen werden. Für die Auswertung wurde er in fünf Perioden unterteilt (Tabelle 2). Die beiden Nachperioden dienten zur Überprüfung der Nachwirkung der Zwischenfrüchte. Die erste dauerte 16 Monate, die zweite 24 Monate.

Tabelle 2: Versuchsperioden

Vorperiode	Versuchsbeginn bis Saat Zwischenfrucht 1	Apr. 2002 - Juli 2003
Zwischenfrucht 1	Saat Zwischenfrucht 1 bis Saat Zuckerrüben	Aug. 2003 - März 2004
Nachperiode 1	Saat Zuckerrüben bis Saat Zwischenfrucht 2	Apr. 2004 - Juli 2005
Zwischenfrucht 2	Saat Zwischenfrucht 2 bis Saat Eiweißersens	Aug. 2005 - März 2006
Nachperiode 2	Saat Eiweißersens bis Versuchsabbruch	Apr. 2006 - März 2008

Tabelle 3: Sickerwassermengen der verschiedenen Verfahren in den einzelnen Perioden der Fruchtfolge (in mm)

	Vorperiode	Zwischenfrucht 1	Nachperiode 1	Zwischenfrucht 2	Nachperiode 2	Summe 2002-08
Fl-ZF	703	261	400	251	1'524	3'140
Fl-Br	668	428	395	358	1'520	3'369
Pa-ZF	749	206	344	208	1'548	3'055
Pa-Br	746	392	366	350	1'605	3'459
Ka-ZF	728	238	377	248	1'564	3'155
Ka-Br	780	423	421	371	1'584	3'579
Mittel ZF	726	235	374	236	1'545	3'117
Mittel Br	731	415	394	360	1'570	3'469
Mittel Fl	685	345	398	304	1'522	3'254
Mittel Pa	747	299	355	279	1'577	3'257
Mittel Ka	754	331	399	310	1'574	3'367

Fl = Fluvisol, Pa = Parabraunerde, Ka = Kalkbraunerde, ZF = Zwischenfrucht, Br = Winterbrache

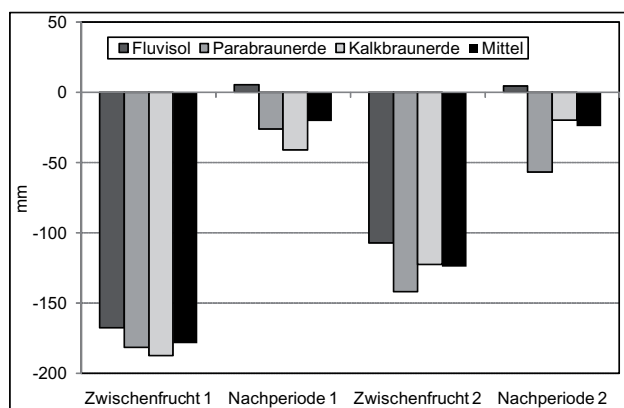


Abbildung 1: Differenz der Sickerwassermengen unter der Zwischenfrucht gegenüber Winterbrache

Alle Verfahren wurden in dreifacher Wiederholung angelegt und die Ergebnisse wurden mit STATISTICA mittels einer 2-Weg-Varianzanalyse ausgewertet. Falls der F-Test gesicherte Verfahrensunterschiede ergab, wurde der multiple Vergleichstest nach Tukey angewendet.

Ergebnisse

Sickerwasser

Signifikante Unterschiede zwischen Zwischenfrucht und Winterbrache traten bei der Sickerwassermenge in den beiden Perioden mit Zwischenfrüchten sowie in der Summe über die sechs Jahre auf. Die drei Böden unterschieden sich nur bei der zweiten Zwischenfrucht signifikant, wobei die Parabraunerde den geringsten Wert aufwies (Tabelle 3). Durch den Anbau einer Zwischenfrucht reduzierte sich die Sickerwasserbildung im Mittel um rund 170 mm. Bastard-Ölrettich verringerte die Sickerwassermenge um 199 mm gegenüber Winterbrache (Zwischenfrucht + Nachperiode; Abbildung 1). Bei den winterharten Chinakohlrüben dage-

gen betrug die Reduktion trotz der längeren Vegetationszeit nur 148 mm. Bastard-Ölrettich wies einen bedeutend höheren Trockensubstanz-Ertrag auf als die Chinakohlrüben und entzog deshalb dem Boden auch mehr Wasser.

Nitratauswaschung

Die Zwischenfrucht- und die Winterbracheverfahren sowie die drei Böden unterschieden sich fast immer signifikant in der ausgewaschenen Nitratmenge. Nur in der Vorperiode, als alle Verfahren noch identisch bewirtschaftet wurden, und in der zweiten Nachperiode traten keine signifikanten Unterschiede zwischen Zwischenfrucht und Winterbrache auf. Unter der Parabraunerde und besonders unter dem Fluvisol wurde weniger Nitrat ausgewaschen als unter der Kalkbraunerde (Tabelle 4). Der Anbau von Zwischenfrüchten führte zu einer bedeutenden Verringerung der ausgewaschenen Nitratmenge. Unter der ersten Zwischenfrucht, Bastard-Ölrettich, reduzierte sich die Auswaschung im Mittel der drei Böden um 200 kg N ha^{-1} gegenüber Winterbrache (Abbildung 2). Der Anbau der Chinakohlrüben führte zu einer durchschnittlichen Verringerung um 93 kg N ha^{-1} . Auffällig ist, dass in beiden Nachperioden mehr Nitrat unter den Verfahren mit Zwischenfrüchten ausgewaschen wurde. In der ersten Nachperiode betrug die Mehrmenge nur 15 kg N ha^{-1} , in der zweiten war sie dagegen mit 46 kg N ha^{-1} beträchtlich. Von der Saat der Zwischenfrucht bis zum Ende der Nachperiode wurden somit im Durchschnitt beider Zwischenfrüchte über 110 kg N ha^{-1} weniger ausgewaschen als unter Winterbrache. Über die ganze sechsjährige Untersuchungsperiode bedeutete dies eine Senkung des mittleren Nitratgehalts des Sickerwassers um 27% (von 90 auf $66 \text{ mg NO}_3^-/\text{L}$).

Diskussion

Sickerwasser

Der Anbau einer Zwischenfrucht verminderte die Sickerwasserbildung mit durchschnittlich 170 mm stärker als in

Tabelle 4: Ausgewaschene Nitratmengen der verschiedenen Verfahren in den einzelnen Perioden der Fruchtfolge (in kg N ha⁻¹)

	Vorperiode	Zwischenfrucht 1	Nachperiode 1	Zwischenfrucht 2	Nachperiode 2	Summe 2002-08
Fl-ZF	40	15	59	12	223	349
Fl-Br	36	203	26	93	202	560
Pa-ZF	63	7	47	5	342	464
Pa-Br	69	144	34	73	287	606
Ka-ZF	135	19	65	4	361	583
Ka-Br	164	296	65	134	296	955
Mittel ZF	79	14	57	7	308	466
Mittel Br	90	214	42	100	262	707
Mittel Fl	38	108	43	53	212	455
Mittel Pa	66	74	42	39	314	535
Mittel Ka	149	155	68	69	328	769

Fl = Fluvisol, Pa = Parabraunerde, Ka = Kalkbraunerde, ZF = Zwischenfrucht, Br = Winterbrache

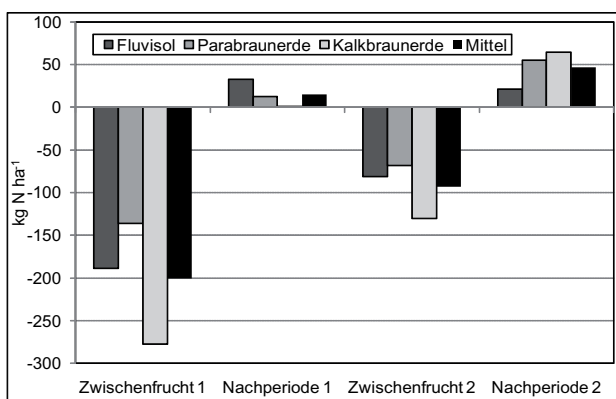


Abbildung 2: Differenz der ausgewaschenen Nitratmengen unter der Zwischenfrucht gegenüber der Winterbrache

anderen Versuchen. DERSCH und HÖSCH (2001) fanden eine Reduktion um 45 mm bei ähnlich hohen Niederschlägen, RYSER und PITTET (1993) eine solche von durchschnittlich 37 mm, während sie bei JUSTES et al. (1999) sogar nur 14 mm betrug, allerdings bei tieferen mittleren Jahresniederschlägen (618 mm).

Die geringere Sickerwasserbildung unter den Zwischenfrüchten führt zu einer Verminderung der Grundwasserneubildung, wie von DAVIES et al. (1996) befürchtet worden ist. Diese dürfte allerdings in der Schweiz nicht von Bedeutung sein, wie eine Abschätzung für das landwirtschaftlich intensiv genutzte Talgebiet zeigt. Unter Annahme einer mittleren jährlichen Sickerwassermenge von 500 mm unter der Landwirtschaftlichen Nutzfläche (LN), eines Ackerlandanteils an der LN von 57%, einem maximal möglichen Anteil der Zwischenfrüchte am Ackerland von 15% (der größte Teil des Ackerlands ist mit überwinternden Hauptkulturen wie Winterweizen oder Klee gras bedeckt) sowie einer Reduktion der Sickerwassermenge durch den Zwischenfruchtanbau um 170 mm resultiert eine Verringerung der Grundwasserneubildung unter der LN der Schweiz von 3%.

Nitratauswaschung

Die Reduktion der Nitratauswaschung durch eine Zwischenfrucht fiel in diesem Versuch höher als in anderen Studien aus, wo Werte zwischen 30 und 60 kg N ha⁻¹ gefunden

wurden (RYSER und PITTET 1999, HÖSCH und DERSCH 2003, VOS und VAN DEN PUTTEN 2004, STAUFFER und SPIESS 2005). Die mit gesamthaft 185 kg N ha⁻¹ sehr hohe Verminderung der Nitratauswaschung durch die erste Zwischenfrucht kann kaum auf die besonderen Witterungsbedingungen im Sommer 2003 mit hohen Temperaturen und geringen Niederschlägen zurückgeführt werden, denn der mittlere N Entzug der Vorkultur Weizen war 2003 nur 17 kg N ha⁻¹ geringer als 2005. Nicht aufgenommener Dünger-N infolge unerwartet geringer Pflanzenerträge erhöhte deshalb nicht die N_{min}-Gehalte nach der Ernte und damit die Auswaschungsgefahr. Die starke Reduktion der Auswaschung dürfte hauptsächlich durch den hohen Ertrag des Bastard-Ölrettichs bedingt sein, welcher mit einem N Entzug der oberirdischen Biomasse von 141 kg N ha⁻¹ verbunden war. Mit der N-Menge in den Stoppeln und Wurzeln zusammen, welche bei Zwischenfrüchten nicht zu vernachlässigen ist (LEHMANN et al. 1991, RINNOFNER et al. 2008), war die gesamte N-Aufnahme durch die Pflanzen noch höher. Sowohl Bastard-Ölrettich als Chinakohlrüben sind zudem Tiefwurzler und nehmen N aus Bodenschichten bis 1,50 Tiefe auf (ROHMANN und SONTHEIMER 1985). Sie reduzieren somit die Auswaschung stärker als Zwischenfrüchte, die die gleiche N-Menge nur aus der oberen Bodenschicht entziehen (THORUP-KRISTENSEN 2001).

Während die Nitratverluste unter den Zwischenfrüchten beträchtlich reduziert wurden, traten in den Nachperioden leicht höhere Auswaschungsverluste auf. Diese fielen nach den überwinternden Chinakohlrüben höher aus als nach dem abfrierenden Bastard-Ölrettich. Bei Letzterem wurden die Stoppeln und Wurzeln wahrscheinlich infolge der fehlenden Winterhärte schneller abgebaut, so dass der Nachkultur mehr N zur Verfügung stand.

Dass die Reduktion der Nitratauswaschung unter dem Bastard-Ölrettich viel höher ausfiel als unter den Chinakohlrüben bedeutet nicht, dass abfrierende Zwischenfrüchte den überwinternden generell überlegen sind, denn die klimatischen Bedingungen in den beiden Anbaujahren waren unterschiedlich. Die Ergebnisse zeigen aber, dass die Nitratverluste stärker vermindert werden können, wenn Ertrag und besonders N-Entzug der Zwischenfrucht höher ausfallen. Deshalb ist beim Zwischenfruchtanbau der Kulturart und dem Saatzeitpunkt besondere Beachtung zu schenken.

Zwischenfrüchte, die als Futter genutzt werden, haben den Vorteil, dass die oberirdische Biomasse abgeführt wird und der darin enthaltene N nicht mehr ausgewaschen werden kann. Dagegen wird bei einer als Gründüngung angebauten Zwischenfrucht die gesamte Biomasse nach der Einarbeitung abgebaut. Der in den Gründüngungspflanzen konservierte N wird dann wieder mineralisiert und kann von den Nachkulturen aufgenommen werden. Er kann aber auch aus dem Boden ausgewaschen werden oder in die Luft entweichen.

Während sich die drei Böden nur wenig in der Sickerwassermenge unterschieden, traten bei der ausgewaschenen N-Menge große Unterschiede auf. Obwohl die Erträge und N-Entzüge auf der Kalkbraunerde, dem schwersten der drei Böden, am höchsten waren, wurde hier am meisten Nitrat ausgewaschen (Tabelle 4). Dies ist vermutlich auf den im Vergleich zu den anderen Böden viel höheren Humusgehalt zurückzuführen (Tabelle 1).

Wirkung auf Nachkultur

Die Erträge und N-Entzüge der nach den beiden Zwischenfrüchten angebauten Kulturen fielen etwa gleich hoch aus wie bei den Verfahren mit Winterbrache. Die Wasseraufnahme durch die Zwischenfrüchte führte nicht zu Wassermangel bei der Nachkultur, wie RANELLS und WAGGER (1997) und MITCHELL et al. (1999) befürchten, weil die Niederschläge am Versuchsstandort ausreichend waren. In Zukunft könnte aber die Winterbegrünung in einigen trockeneren Regionen der Westschweiz und des Tessins angesichts des prognostizierten Klimawandels in Frage gestellt werden.

Auch die N-Aufnahme durch die Zwischenfrüchte und die Abfuhr der als Futter verwendeten oberirdischen Biomasse beeinflussten die N-Versorgung und die Erträge der Nachkultur nicht negativ. Da nach dem Umbruch der Zwischenfrüchte nur die Stoppeln und Wurzeln im Boden verblieben und abgebaut werden mussten, konnte eine mögliche verzögerte N-Mineralisierung keine Rolle spielen. Zudem werden Brassica-Arten schnell abgebaut und der gebundene N wird wieder freigesetzt (MEISINGER et al. 1991).

Was geschieht mit dem Stickstoff, der weniger ausgewaschen wird?

Die beiden angebauten Zwischenfrüchte waren sehr wirksam und reduzierten die Nitratauswaschung über die gesamte Versuchsperiode und im Mittel der drei Böden um 242 kg N ha⁻¹ gegenüber den Verfahren mit Winterbrache. Praktisch die gleiche Menge, nämlich 243 kg N ha⁻¹, wurde zusätzlich von den Kulturen entzogen; allein 206 kg N ha⁻¹ wurden mit dem Erntegut der beiden Zwischenfrüchte weggeführt. Die Zwischenfrüchte wurden allerdings auch gedüngt und erhielten gesamthaft 55 kg N ha⁻¹. Die Bilanz ergibt, dass in den Verfahren mit Zwischenfrüchten 54 kg N ha⁻¹ mehr vorhanden sein müssen als bei Winterbrache. Was geschieht mit diesem N? Trägt er zur Erhöhung des Humusgehaltes bei? Wird er in späteren Jahren von den Pflanzen noch aufgenommen oder doch ausgewaschen? Oder verflüchtigt er sich als Ammoniak oder Lachgas? Diesen Fragen muss zukünftig vermehrt Beachtung geschenkt

werden. Andernfalls riskieren wir, dass Zwischenfrüchte die Nitratauswaschungsverluste nur kurzfristig vermindern oder sogar zur Erhöhung anderer N-Verlustpfade beitragen (pollution swapping; vgl. z.B. STEVENS und QUINTON 2009).

Literatur

- BAFU (Bundesamt für Umwelt), 2009: Ergebnisse der Grundwasserbeobachtung Schweiz (NAQUA). Umwelt Zustand Nr. 0903, Bern, 144 pp.
- BEAUDOIN, N., J.K. SAAD, C. VAN LAETHEM, J.M. MACHET, J. MAUCORPS and B. MARY, 2005: Nitrate leaching in intensive agriculture in Northern France: Effect of farming practices, soils and crop rotations. *Agric. Ecosyst. Environ.* 111, 292-310.
- BÖHM, K. und J. HÖSCH, 2001a: Der Zwischenfruchtanbau als Instrument der Stoffkonservierung. In: Gebietsbilanzen bei unterschiedlicher Landnutzung. Bericht über die 9. Gumpensteiner Lysimetertagung, Irdning, 24.-25.4.01. Bundesanstalt für alpenländische Landwirtschaft Gumpenstein (BAL), Irdning, 51-56.
- BÖHM, K.E. und J. HÖSCH, 2001b: Potentiale des Zwischenfruchtanbaues am Beispiel der Stickstoffdynamik im Lysimeterversuch. *Mitteilgn. Dtsch. Bodenkundl. Gesellsch.* 96, 397-398.
- BONTEMPS, P.Y., R. LAMBERT, C. DEVILLERS and A. PETERS, 2004: Comparison of the efficiency of different catch crops on potentially leachable nitrate. In: HATCH D.J., D.R. CHADWICK, S.C. JARVIS and J.A. ROKER (Eds.): Controlling nitrogen flows and losses. Proc. of the 12th Nitrogen Workshop, Exeter, 21-24 September 2003. Wageningen Academic Publishers, Wageningen, 415-416.
- BUWAL (Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft), 1993: Situation der Trinkwasserversorgung. Schriftenreihe Umweltschutz Nr. 212, Bern, 128 pp.
- BUWAL und BWG (Bundesamt für Wasser und Geologie), 2004: NAQUA - Grundwasserqualität in der Schweiz 2002/2003. Bern, 204 pp.
- DAVIES, D.B., T.W.D. GARWOOD and A.D.H. ROCHFORD, 1996: Factors affecting nitrate leaching from a calcareous loam in East Anglia. *J. agric. Sci., Camb.* 126, 75-86.
- DERSCH, G. und J. HÖSCH, 2001: Wirkung unterschiedlicher Begrünungen (mit Leguminosen, abfrostand, winterhart) in Kombination mit Gülle auf den N-Austrag und die Düngewirkung im N.Ö. Alpenvorland. In: Gebietsbilanzen bei unterschiedlicher Landnutzung. Bericht über die 9. Gumpensteiner Lysimetertagung, Irdning, 24.-25.4.01. Bundesanstalt für alpenländische Landwirtschaft Gumpenstein (BAL), Irdning, 149-152.
- FLISCH, R., S. SINAJ, R. CHARLES und W. RICHNER, 2009: Grundlagen für die Düngung im Acker- und Futterbau (GRUDAF). *Agrarforschung.* 16 (2), 1-100.
- FURRER, O.J. und W. STAUFFER, 1980: Die neue Lysimeteranlage der Forschungsanstalt Liebefeld-Bern. *Jb. Schweiz. Naturforsch. Ges. Wiss. Teil Nr. 1*, 53-57.
- FURRER, O.J. und W. STAUFFER, 1984: Einfluss von Bodennutzung und Düngung auf die Nitratauswaschung im Schweizerischen Mittelland. *Landwirtsch. Forsch.* 37 (Sonderheft 41), 398-409.
- FURRER, O.J. und W. STAUFFER, 1986: Stickstoff in der Landwirtschaft. *Gas-Wasser-Abwasser* 66, 460-472.
- GEERING, J., 1943: Lysimeter-Versuche. *Landw. Jb. Schweiz* 57, 107-182.
- GUTSER, R. und K. VILSMEIER, 1988: Mineralisation verschiedener Zwischenfrüchte und N Verwertung durch Pflanzen. *Kali-Briefe (Büntehof)* 19, 199-211.
- HANSEN, E.M. and J. DJURHUUS, 1997: Nitrate leaching as influenced by soil tillage and catch crop. *Soil Till. Res.* 41, 203-219.

- HERZOG, F., V. PRASUHN, E. SPIESS and W. RICHNER, 2008: Environmental cross compliance mitigates nitrogen and phosphorus pollution from Swiss agriculture. *Environ. Sci. Pol.* 11, 655-668.
- HÖSCH, J. und G. DERSCH, 2003: Einfluss von Bewirtschaftungsmaßnahmen auf den zeitlichen Verlauf von N-Verlusten. In: Bericht über die 10. Lysimetertagung, Irdning, 29.-30.4.03. Bundesanstalt für alpenländische Landwirtschaft Gumpenstein (BAL), Irdning, 67-70.
- JÄGGGLI, F., 1978: Sickerverluste an Mineralstoffen. *Mitt. Schweiz. Landw.* 26, 130-136.
- JUSTES, E., B. MARY and B. NICOLARDOT, 1999: Comparing the effectiveness of radish cover crop, oilseed rape volunteers and oilseed rape residues incorporation for reducing nitrate leaching. *Nutr. Cycl. Agroecosyst.* 55, 207-220.
- LEHMANN, J., H.U. BRINER und E. ROSENBERG, 1991: Zwischenkulturen - was können sie und was können sie nicht? *Landw. Schweiz* 4, 151-158.
- MEISINGER, J.J., W.L. HARGROVE, R.L. MIKKELSEN, J.R. WILLIAMS and V.W. BENSON, 1991: Effects of cover crops on groundwater quality. In: HARGROVE W.L. (Ed.): *Cover crops for clean water*. Soil and Water Conservation Society (SWCS), Ankeny, IA, 57-68.
- MITCHELL, J.P., D.W. PETERS and C. SHENNAN, 1999: Changes in soil water storage in winter fallowed and cover cropped soils. *J. Sust. Agric.* 15, 19-31.
- RANELLS, N.N. and M.G. WAGGER, 1997: Winter annual grass-legume bicultures for efficient nitrogen management in no-till corn. *Agric. Ecosyst. Environ.* 65, 23-32.
- RINNOFNER, T., J.K. FRIEDEL, R. DE KRUIJFF, G. PIETSCH and B. FREYER, 2008: Effect of catch crops on N dynamics and following crops in organic farming. *Agron. Sustain. Dev.* 28, 551-558.
- ROHMANN, U. und H. SONTHEIMER, 1985: Nitrat im Grundwasser. DVGW-Forschungsstelle am Engler-Bunte-Institut der Universität Karlsruhe, 468 pp.
- RYSER, J.-P. et J.-P. PITTET, 1993: Rétention de l'azote du sol par un engrais vert. *Revue suisse Agric.* 25, 297-301.
- RYSER, J.-P. et J.-P. PITTET, 1999: Effets des fumures organiques sur les cultures et les pertes par drainage. *Revue suisse Agric.* 31, 271-276.
- SPIESS, E. und V. PRASUHN, 2008: Ausmaß und Ursachen der sinkenden Nitratgehalte im Grundwasser des Kantons Bern. In: FANK J. und C. LANTHALER (Eds.): *Diffuse Einträge in das Grundwasser: Monitoring - Modellierung - Management*. Graz, 29.-31.1.07. Beiträge zur Hydrogeologie 56, 189-194.
- STAUFFER, W. und E. SPIESS, 2005: Einfluss unterschiedlicher Nutzung und Düngung auf Sickerwassermenge und Nitratauswaschung. In: Gebietsbilanzen bei unterschiedlicher Landnutzung. Bericht über die 11. Gumpensteiner Lysimetertagung, Irdning, 5.-6.4.05. Höhere Bundeslehr- und Forschungsanstalt für Landwirtschaft Raumberg-Gumpenstein, Irdning, 213-215.
- STEVENS, C.J. and J.N. QUINTON, 2009: Pollution swapping in arable agricultural systems. *Crit. Rev. Environ. Sci. Technol.* 39, 478-520.
- THORUP-KRISTENSEN, K., 2001: Are differences in root growth of nitrogen catch crops important for their ability to reduce soil nitrate N content, and how can this be measured? *Plant Soil* 230, 185-195.
- THORUP-KRISTENSEN, K., J. MAGID and L.S. JENSEN, 2003: Catch crop and green manures as biological tools in nitrogen management in temperate zones. *Adv. Agron.* 79, 227-302.
- VOS, J. and P.E.L. VAN DER PUTTEN, 2004: Nutrient cycling in a cropping system with potato, spring wheat, sugar beet, oats and nitrogen catch crops. II. Effect of catch crops on nitrate leaching in autumn and winter. *Nutr. Cycl. Agroecosyst.* 70, 23-31.