

Einfluss des Umbruchtermins und des Alters einer Ansaatwiese auf die Nitratauswaschung

Ernst Spiess^{1*}, Volker Prasuhn¹ und Clay Humphrys¹

Zusammenfassung

Nach dem Umbruch von Ansaatwiesen wird häufig viel Nitrat ausgewaschen. In einem Lysimeterversuch wurde der Einfluss von zwei Umbruchzeitpunkten und zwei unterschiedlich alten Ansaatwiesen auf die Nitratauswaschung untersucht. Die Ergebnisse zeigen, dass die Auswaschung nach dem Umbruch im Herbst höher war als nach Frühjahrsumbruch und dass nach dreijährigen Ansaatwiesen mehr Nitrat ausgewaschen wurde als nach einjährigen.

Schlagwörter: Lysimeter, Monolith, Sickerwassermenge, Umbruchtermin

Summary

After ploughing up of temporary grassland, large amounts of nitrate are often leached. In a lysimeter experiment, the influence of two ploughing-in times and two temporary grasslands of different age on nitrate leaching was investigated. The results show that leaching losses were higher after autumn ploughing than after spring ploughing and that nitrate losses were larger after ploughing up of three-year-old grasslands than after one-year-old ones.

Keywords: lysimeter, monolith, seepage volume, ploughing-in time

Einleitung

Ansaatwiesen mit ein- oder mehrjähriger Nutzungsdauer sind auf Landwirtschaftsbetrieben mit Ackerbau und Rindviehhaltung eine bedeutsame Kultur für die Futterproduktion. Diese Wiesen weisen nicht nur ein hohes Ertragspotenzial auf, sondern erhöhen den Humusgehalt des Bodens, verbessern die Bodenstruktur und reduzieren viele Ackerunkräuter, Krankheitserreger und Schädlinge. In der Schweiz machen die Ansaatwiesen ein Drittel der Ackerfläche aus und sind damit die mit Abstand wichtigste Kultur, gefolgt von Winterweizen.

Ansaatwiesen sind auch bezüglich der Verringerung der Nitratauswaschung eine interessante Kultur, weil unter gut entwickelten Beständen wenig Nitrat ausgewaschen wird (Hess 1989, Simmelsgaard 1998, Stauffer und Spiess 2001). Dies ist auch darauf zurückzuführen, dass sie im Gegensatz zu anderen Ackerkulturen eine lange Vegetationszeit haben (Korsaeth et al. 2003). Nach der Saat (Stopes et al. 2002) und insbesondere nach dem Umbruch (Stauffer und Enggist 1990), welcher in der Schweiz meistens mit dem Pflug im Herbst oder im Frühling durchgeführt wird, kann es jedoch zu hohen Nitratverlusten kommen. In der vorliegenden Studie wurde deshalb untersucht, nach welchem Umbruchzeitpunkt mehr Nitrat ausgewaschen wird und ob das Alter der Ansaatwiese einen Einfluss auf die Höhe der Auswaschungsverluste hat.

Material und Methoden

Lysimeter

Der Versuch wurde während zwei Jahren auf zwölf monolithischen Lysimetern der neuen Anlage in Zürich-Reckenholz

durchgeführt (Prasuhn et al. 2009). Die Gefäße weisen eine Oberfläche von 1 m² und eine nutzbare Tiefe von 1,35 m auf (sowie eine zusätzliche Quarzsandschicht von 0,15 m über dem Auslass, die als Sickerhilfe dient). Sie befinden sich auf dem Anlagenteil mit den nicht wägbaren Lysimetern. Die Sickerwassermenge wird mit 100 ml-Kippwaagen erfasst, wobei der exakte Zeitpunkt jeder Kippung von einem Datenlogger aufgezeichnet wird. Bei jeder Kippung fließen zudem etwa 1-2 ml Wasser in eine Probenflasche, was eine abflussproportionale Entnahme einer kleinen Probe erlaubt. Die Wasserproben werden 14-täglich entnommen und mittels segmentierter Fließinjektionsanalyse (s-FIA) auf Nitrat (NO₃) und Ammonium analysiert.

Boden, Kulturen und Verfahren

Die Monolithen wurden im Sommer 2008 auf einem Acker in Grafenried bei Bern gefräst. Der Boden ist eine Braunerde mit 16 % Ton, 32 % Schluff und 52 % Sand sowie einem Gehalt an organischem Kohlenstoff von 1,7 % und an Gesamtstickstoff (N) von 0,11 % (0-20 cm Bodentiefe). Bei Versuchsbeginn Mitte 2011 stand auf der einen Hälfte der Lysimeter eine einjährige und auf der anderen eine dreijährige Ansaatwiese mit Klee gras. Von beiden Gruppen wurden je drei Lysimeter am 6. Oktober 2011 umgebrochen und mit Winterweizen angesät. Auf den anderen sechs Lysimetern

Tabelle 1: Verfahren mit den angebauten Kulturen.

Verfahren	Kultur 2011	Kultur 2012	Kultur 2013
1He	1-jährige Ansaatwiese	Winterweizen	Winterroggen
1Fr	1-jährige Ansaatwiese	Silomais	Winterroggen
3He	3-jährige Ansaatwiese	Winterweizen	Winterroggen
3Fr	3-jährige Ansaatwiese	Silomais	Winterroggen

¹ Agroscope, Fachgruppe Gewässerschutz und Stoffflüsse, Reckenholzstraße 191, CH-8046 ZÜRICH

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



wurde das Klee gras im Frühjahr noch einmal geschnitten und nach dem Umbruch am 24. April 2012 wurde Silomais gesät. Mitte Oktober 2012 wurde als nächste Kultur auf allen Lysimetern Winterroggen angebaut.

Bodenbearbeitung und Düngung

Der Boden wurde beim Umbruch jeweils 20 cm tief bearbeitet. Die Klee graswiese wurde mit zwei Güllegaben gedüngt (60 kg $\text{NH}_4\text{-N ha}^{-1}$ Jahr⁻¹; bei Frühjahrsumbruch zusätzlich 30 kg $\text{NH}_4\text{-N ha}^{-1}$ zu Vegetationsbeginn). Das Getreide erhielt drei Gaben mit Ammoniumnitrat (140 kg N ha⁻¹ zu Weizen und 90 kg N ha⁻¹ zu Roggen). Die Stickstoffdüngung von Mais erfolgte mit Gülle und Ammoniumnitrat in drei Gaben (110 kg N ha⁻¹).

Erhebungsperiode

Für den Versuch wurde die Periode Juli 2011 bis Juni 2013 ausgewertet. Dieser Zeitabschnitt wurde gewählt, weil das Sickerwasser vorwiegend im Winterhalbjahr gebildet wird, während Mitte Jahr meistens nur wenig oder sogar kein Sickerwasser anfällt. Bei der Auswertung von gesamten Kalenderjahren wären somit Versuchsbeginn und -ende in der Mitte von Sickerwasserperioden gelegen. Bei gleich hoher gesamter Niederschlagsmenge wäre dann je nach zeitlicher Verteilung der Niederschläge im Winter mehr oder weniger Sickerwasser in der betrachteten Periode angefallen.

Versuche zeigen, dass die Vorkultur einen starken Einfluss auf die Auswaschung unter der aktuellen Hauptkultur hat (Beaudoin et al. 2005, Nievergelt 2002, Stauffer und Spiess 2001). Nievergelt (2002) schlug deshalb vor, die ausgewaschene N-Fracht nicht einer einzelnen Kultur, sondern einer Kulturkombination (= Vorkultur - eventuelle Zwischenkultur - Hauptkultur) zuzuordnen.

Die Auswertungsperiode wurde in folgende drei Zeitabschnitte unterteilt: Die Vorperiode umfasste die Monate Juli bis Oktober 2011. In diesem Zeitabschnitt wurden alle vier Verfahren gleich behandelt, weshalb keine Unterschiede auftreten sollten. Die eigentliche Versuchsperiode beinhaltete die Wintermonate 2011/12 zwischen dem ersten und dem zweiten Umbruchtermin. In den vierzehn Monaten nach dem zweiten Umbruchtermin wurde die Nachwirkung der verschiedenen Verfahren geprüft.

Ergebnisse

Ertrag und Stickstoffentzug der Pflanzen

Die Erträge und N-Entzüge fielen nach Umbruch der 3-jährigen Ansaatwiese mit Ausnahme des Maisertrags immer leicht höher aus als nach der 1-jährigen (Tabelle 2). Bei der Nachkultur Winterroggen war kein systematischer Unterschied zwischen den Herbst- und Frühjahrsverfahren zu beobachten. Der N Entzug war bei Winterweizen im Durchschnitt 79 kg N ha⁻¹ geringer als beim Frühjahrsschnitt der Ansaatwiese und bei Silomais zusammen.

Niederschlags- und Sickerwassermenge

Die Niederschlagsmengen (Abbildung 1) stammten von der 20 m entfernten Station von MeteoSchweiz. Im ersten Versuchsjahr lagen die Niederschläge mit 941 mm Jahr⁻¹,

Tabelle 2: Ertrag (dt ha⁻¹; Silomais: dt TS ha⁻¹) und N-Entzug (kg N ha⁻¹) der angebauten Kulturen.

Verfahren	Ertrag			N-Entzug				
	2012 WW	AWF	SM	2013 Ro	2012 WW	AWF	SM	2013 Ro
1He	83			66	158			109
3He	89			69	180			118
1Fr		21	237	65		38	200	114
3Fr		31	230	74		57	200	123

AWF = Nutzung der Ansaatwiese im Frühjahr; Ro = Winterroggen; SM = Silomais; WW = Winterweizen

unter dem langjährigen Mittel von 1054 mm Jahr⁻¹, im zweiten Jahr lagen sie mit 1263 mm Jahr⁻¹ deutlich darüber.

In der Vorperiode fiel infolge der starken Evapotranspiration der Ansaatwiesen nur wenig oder sogar kein Sickerwasser an (Abbildung 2, Tabelle 3). In den sechs Monaten zwischen Herbst- und Frühjahrsumbruch waren die Sickerwassermengen wegen der stark unterdurchschnittlichen Niederschläge gering. Der Umbruch im Herbst 2011 führte bei den betroffenen Verfahren nicht zu einer vermehrten Sickerwasserbildung im Winterhalbjahr. In den 14 Monaten nach dem zweiten Umbruchtermin im April 2012 war die Sickerwassermenge bei Herbstumbruch gesamthaft geringer als bei den Frühjahrsverfahren (Tabelle 3). Zwischen April und Mitte August fiel nach Herbstumbruch praktisch kein Sickerwasser mehr an, weil die Transpiration im Winterweizen bis Mitte Juni hoch war. In den beiden Verfahren mit Frühjahrsumbruch stieg dagegen die Sickerwassermenge mit dem Einsetzen stärkerer Niederschläge im Mai 2012 an, denn die Maispflanzen waren zu dieser Zeit noch klein und nahmen wenig Wasser auf. Die Sickerwasserbildung versiegte jedoch im Juli infolge des verstärkten Längenwachstums der Maispflanzen und setzte erst wieder im Oktober ein. In den folgenden Monaten fielen in allen Verfahren ähnlich hohe Sickerwassermengen an. Über die gesamte Untersuchungsperiode betrachtet war die Sickerwassermenge bei Umbruch im Frühjahr leicht höher als bei Herbstumbruch.

Unter den 1-jährigen Ansaatwiesen fiel mehr Sickerwasser an als unter den 3-jährigen, wobei die Unterschiede im Laufe der Zeit abnahmen (Tabelle 3).

Nitratkonzentration des Sickerwassers

In der Vorperiode wurde nur unter den 1-jährigen Ansaatwiesen Nitrat im Sickerwasser gemessen (Tabelle 3). Während des Winters zwischen den beiden Umbruchterminen waren die Nitratkonzentrationen in allen Verfahren niedrig (Abbildung 3). Im Frühling stiegen die Konzentrationen leicht an und erreichten einen Peak, wobei bei keinem Lysimeter 40 mg $\text{NO}_3\text{ L}^{-1}$ erreicht wurden. Im Herbst 2012 nahmen die Nitratgehalte in den Verfahren mit Herbstumbruch stark zu und erreichten bis zu 130 mg $\text{NO}_3\text{ L}^{-1}$. Bei Umbruch im Frühjahr stiegen die Nitratkonzentrationen erst mit zwei Monaten Verzögerung an und erreichten nur Werte um die 50 mg $\text{NO}_3\text{ L}^{-1}$. In den Verfahren mit Umbruch einer 3-jährigen Ansaatwiese wurden tendenziell höhere Nitratkonzentrationen gemessen als bei den 1-jährigen Ansaatwiesen.

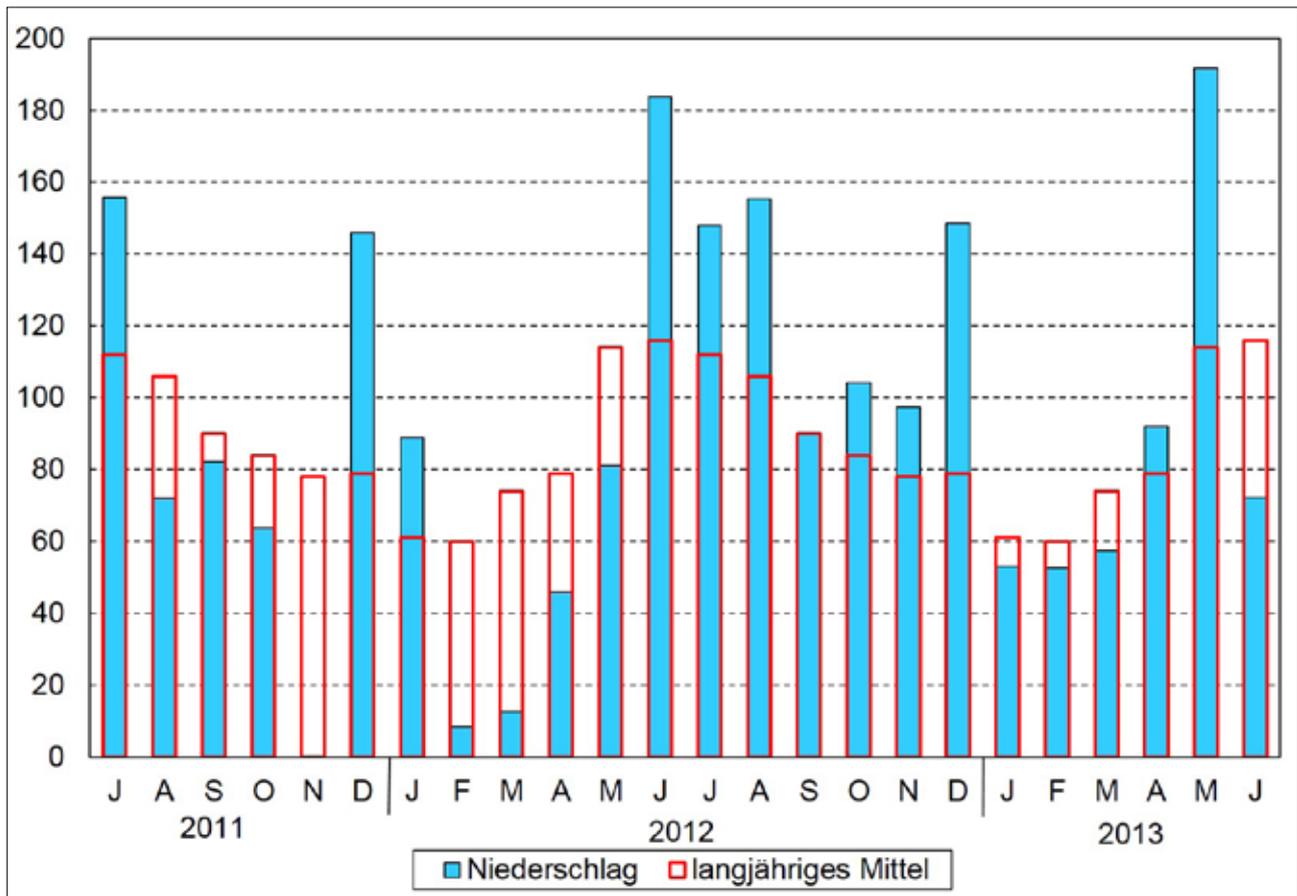


Abbildung 1: Niederschlagsmenge in der Untersuchungsperiode und langjähriges Mittel der Jahre 1981-2010 (in mm).

Ausgewaschene N-Menge

In der Vorperiode wurde in den vier Verfahren nur wenig oder sogar überhaupt kein Nitrat ausgewaschen (Tabelle 3). Zwischen den beiden Umbruchterminen traten unter der Ansaatwiese praktisch keine und unter dem Winterweizen erstaunlich geringe Auswaschungsverluste auf, was vorwiegend eine Folge der stark unterdurchschnittlichen Niederschläge sein dürfte. Nach dem Herbstumbruch waren die Nitratverluste deshalb nur unbedeutend höher als in den Verfahren mit Frühjahrsumbruch. In den folgenden 14 Monaten fielen die Unterschiede zwischen den beiden Umbruchterminen bedeutend stärker aus mit durchschnittlichen N-Verlusten von 139 kg N ha⁻¹ nach Herbst- bzw. 52 kg N ha⁻¹ nach Frühjahrsumbruch. Zwischen Mai und September 2012 entstanden vorerst nur geringe Verluste. Auch die höheren Sickerwassermengen in den ersten Monaten nach dem Umbruch im Frühjahr erhöhten die Nitratauswaschung kaum. Nach einem nassen Sommer nahmen die Verluste erst im folgenden Herbst zu. In dieser Zeit führten überdurchschnittliche Niederschläge zu teilweise hohen N-Verlusten. Im Winterhalbjahr 2012/13 wurden bei den meisten Lysimetern nach Herbstumbruch über 100 kg N ha⁻¹ ausgewaschen, während die Verluste nach Frühjahrsumbruch nicht einmal halb so viel betragen. Über den gesamten Versuch betrachtet war die Nitratauswaschung nach Herbstumbruch bedeutend höher als nach Frühjahrsumbruch. Der Umbruch von 3-jährigen Ansaatwiesen führte zu etwas größeren Nitratverlusten als das Pflügen von 1-jährigen.

Diskussion

In unseren Versuchen wurden in den 14 bzw. 20 Monaten zwischen dem jeweiligen Umbruchtermin und dem Versuchsende 52 bis 139 kg N ha⁻¹ ausgewaschen (Tabelle 3). In England fanden Stopes et al. (2002) in der Sickerwasserperiode nach Herbstumbruch N-Verluste von 82 kg N ha⁻¹ bei biologischer und von 37 kg N ha⁻¹ bei konventioneller Bewirtschaftung. In einem anderen Versuch in England, bei dem nach dem Umbruch von mehrjährigen Ansaatwiesen Winterweizen angebaut worden war, wurde die Nitratauswaschung in den beiden folgenden Wintern auf ungefähr 100 kg N ha⁻¹ geschätzt (Cameron und Wild 1984).

Dass beim Umbruch von älteren Wiesen mehr Nitrat ausgewaschen wird als bei jüngeren, wurde auch in anderen Versuchen festgestellt (Eriksen und Vinther 2002, Johnston et al. 1994). Letztere Autoren haben die Auswaschungsverluste über die Abnahme des Gehalts des Bodens an mineralischem Stickstoff (N_{\min}) im Winterhalbjahr und die N-Aufnahme der oberirdischen Pflanzenteile der Nachkultur geschätzt. Sie fanden, dass nach dem Pflügen von 3- bis 6-jährigen Ansaatwiesen mehr Stickstoff unter dem nachfolgenden Winterweizen verloren ging als nach 1- oder 2-jährigen Ansaatwiesen. Mit steigendem Alter nehmen der Humus- und damit der N-Gehalt der Ansaatwiesen zu (Johnston et al. 1994), was eine höhere Mineralisierung nach dem Umbruch zur Folge hat (Aarts et al. 2001). Diese führte in den Versuchen von Johnston et al. (1994) zu höheren N_{\min} -

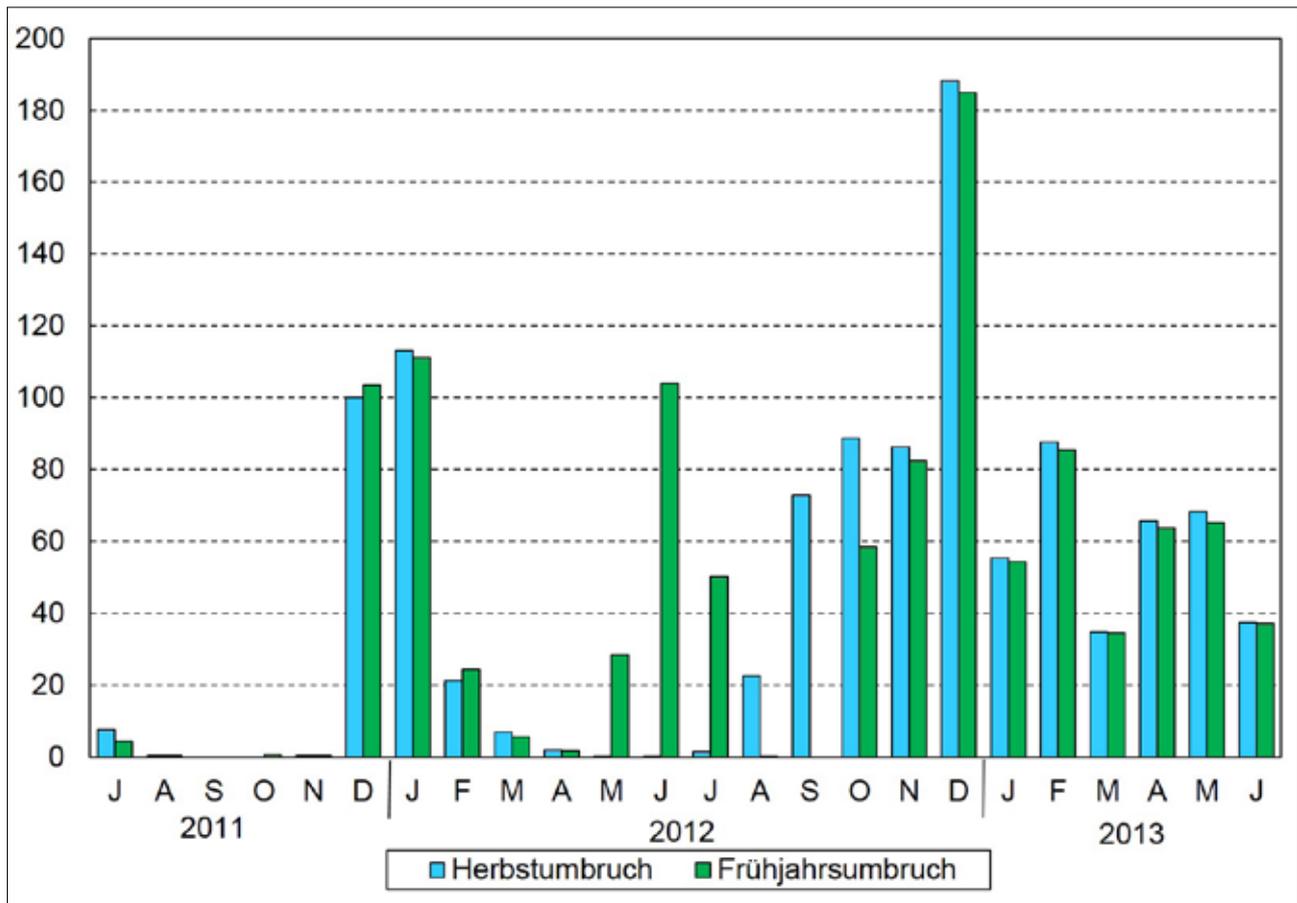


Abbildung 2: Sickerwassermenge bei den Verfahren mit Herbst- bzw. Frühjahrsumbruch (Mittel von 1- und 3-jähriger Ansaatwiese; in mm).

Tabelle 3: Niederschlags- und Sickerwassermenge, Nitratkonzentration des Sickerwassers und ausgewaschene N-Menge in den verschiedenen Verfahren (Mittelwert von 3 Wiederholungen).

	Niederschlag (mm)	Sickerwassermenge (mm)				Nitratkonzentration (mg NO ₃ L ⁻¹)				Ausgewaschene N-Menge (kg N ha ⁻¹)			
		1He	3He	1Fr	3Fr	1He	3He	1Fr	3Fr	1He	3He	1Fr	3Fr
01.07.11 - 31.10.11	374	16	0	10	0	14	---	15	---	0	0	0	0
01.11.11 - 30.04.12	302	269	219	269	225	5	9	1	1	3	4	0	0
01.05.12 - 30.06.13	1528	813	807	870	828	71	82	24	31	129	149	47	58
Mittelwert pro Jahr	1102	549	513	575	527	54	66	19	24	66	77	24	29

Gehalten im Boden nach dem Umbruch, und auch die Erträge der Nachkultur Winterweizen fielen – wie in unserem Versuch – etwas höher aus. Da der mineralisierte Stickstoff aber den Bedarf der Nachkultur noch stärker überstieg, kam es zu noch höheren Auswaschungsverlusten.

Während bereits nach dem Umbruch von Ansaatwiesen hohe Nitratverluste auftreten, entstehen nach dem Umbruch von Dauergrünland noch viel höhere Verluste. Gutser und Hauck (1999) gehen von langfristigen Auswaschungsverlusten von 2000-6000 kg N ha⁻¹ aus. Nach Springob (2004) dauert es nach dem Umbruch einer Dauerwiese ca. 60-80 Jahre, bis der Humusgehalt bei ständiger ackerbaulicher Nutzung ein neues, tieferes Gleichgewicht erreicht.

In unserem Versuch war die Nitratauswaschung bei Herbstumbruch höher als bei Frühjahrsumbruch. Andere Studien (Djurhuus und Olsen 1997, Francis 1995, Hess et al. 1990) kamen zum gleichen Schluss, während Askegaard et al.

(2011) keinen Unterschied fanden. In einem Lysimeterversuch zum Umbruchszeitpunkt von Zwischenkulturen wurde bei Herbstumbruch ebenfalls mehr Nitrat ausgewaschen als bei Frühjahrsumbruch (Spiess et al. 2015). Allgemein wird empfohlen, Grasland bei einem Umbruch im Herbst möglichst spät zu pflügen, weil dann die Nitratverluste geringer sind (Francis 1995, Francis et al. 1992, 1995, Stauffer und Enggist 1990).

Auffallend in unserem Versuch war, dass die Nitratauswaschung im Winter 2012/13 bei den Verfahren mit Herbstumbruch viel höher ausfiel als im Winter 2011/12. Dies ist auf die überdurchschnittlichen Niederschläge in der zweiten Hälfte des Jahres 2012 zurückzuführen, welche hohe Sickerwassermengen zur Folge hatten (Abbildung 1 und 2). Ein weiterer Grund dürfte die gewählte Kulturfolge sein. Obwohl Winterweizen bis Ende Winter nicht viel Stickstoff aufnimmt (Francis et al. 1995) und als Teilbrache bezeichnet

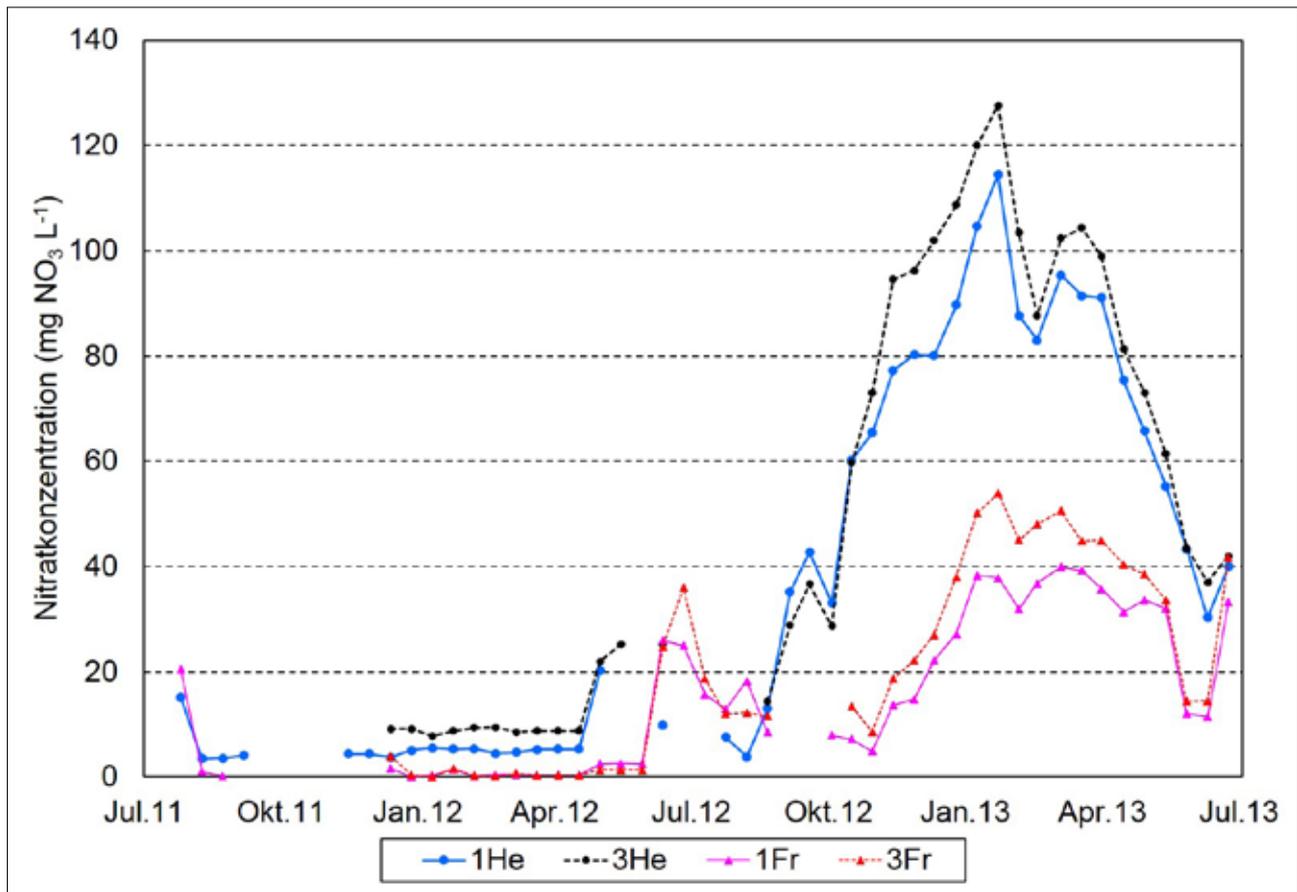


Abbildung 3: Nitratkonzentration des Sickerwassers in den verschiedenen Verfahren.

werden kann (Nievergelt 1993), blieb er im Winter 2011/12 infolge der geringen Niederschläge vor hohen Auswaschungsverlusten verschont. In den Verfahren mit Frühjahrs- umbruch folgte Silomais auf die Ansaatwiese. Mais wächst in den ersten zwei Monaten langsam und ist in dieser Zeit auswaschungsgefährdet, falls hohe Niederschläge auftreten (Gutser und Hauck 1994, Riess et al. 1995, Sticksel et al. 1996, Walther et al. 1995). Winterweizen dagegen befindet sich in diesen Monaten in der Hauptwachstumszeit, was mit einer hohen Transpirationsrate und N-Aufnahme aus dem Boden und folglich einer geringeren Auswaschungsgefahr verbunden ist (Duynisveld und Strebel 1985). Bei Mais findet dieses intensive Wachstum erst in den Monaten Juli und August statt. In dieser Zeit wurde der Winterweizen schon geerntet. Da bei allen Verfahren Winterroggen als einheitliche Nachkultur gewählt wurde, lag eine mehrmonatige Bracheperiode zwischen der Weizenernte und der Roggensaat. In dieser Zeit wurden im warmen Boden weiterhin große N-Mengen mineralisiert, aber es gab außer Unkräutern und Auflaufgetreide keine Pflanzen, die Wasser und Stickstoff aus dem Boden aufnehmen konnten. Dies hatte zur Folge, dass Sickerwasser bereits zwei Monate früher als in den Verfahren mit Silomais gebildet wurde und dass Nitrat aus tieferen Bodenschichten, das vermutlich nach dem Umbruch der Ansaatwiese mineralisiert und in diese Schichten verlagert worden war, ausgewaschen wurde. Macdonald et al. (1989) wiesen nach, dass die N_{\min} -Gehalte nach der Weizenernte erhöht sein können, wenn ein Jahr zuvor eine Ansaatwiese umgebrochen worden ist, und Thomsen und Christensen (1998) zeigten, dass der Umbruch einer

Ansaatwiese im Herbst die Nitrat auswaschung nicht nur im folgenden, sondern auch im zweiten Winter erhöhen kann.

Schlussfolgerungen

Der Lysimeterversuch zeigte, dass die Nitrat auswaschung nach dem Umbruch von Ansaatwiesen im Herbst höher war als nach Frühjahrs- umbruch. Zu beachten ist allerdings, dass die Kulturfolge mit einer längeren Bracheperiode zwischen der Weizenernte und der Roggensaat nicht optimal war. Nach Umbruch von dreijährigen Ansaatwiesen wurde mehr Nitrat ausgewaschen als nach einjährigen. Infolge der hohen N-Mineralisierung nach dem Wiesen- umbruch sollte geprüft werden, ob die N-Düngung der Nachkultur nicht reduziert werden könnte.

Welche Kulturen nach einem Wiesen- umbruch in Bezug auf die Nitrat auswaschung am geeignetsten sind, sollte in weiteren Versuchen getestet werden. Hansen und Eriksen (2016) fanden beispielsweise, dass bei Sommergerste mit einer Untersaat weniger Nitrat ausgewaschen wurde als unter Silomais.

Die einseitige Niederschlagsverteilung im Versuch führte im ersten Winter zu erstaunlich niedrigen und im zweiten Winter zu hohen N-Verlusten. Dies zeigt die Wichtigkeit auf, solche Versuche in verschiedenen Jahren anzulegen. Der zeitliche Aufwand und die Kosten werden dadurch zwar vervielfacht, aber die unterschiedlichen klimatischen Einflüsse können besser berücksichtigt werden, so dass die Ergebnisse aussagekräftiger sind und besser verallgemeinert werden können.

Literatur

- Aarts H.F.M., Conijn J.G., Corré W.J. (2001) Nitrogen fluxes in the plant component of the 'De Marke' farming system, related to groundwater nitrate content. *Neth. J. agric. Sci.* 49, 153-162.
- Askegaard M., Olesen J.E., Rasmussen I.A., Kristensen K. (2011) Nitrate leaching from organic arable crop rotations is mostly determined by autumn field management. *Agric. Ecosyst. Environ.* 142, 149-160.
- Beaudoin N., Saad J.K., Van Laethem C., Machet J.M., Maucorps J., Mary B. (2005) Nitrate leaching in intensive agriculture in Northern France: Effect of farming practices, soils and crop rotations. *Agric. Ecosyst. Environ.* 111, 292-310.
- Cameron K.C., Wild A. (1984) Potential aquifer pollution from nitrate leaching following the ploughing of temporary grassland. *J. Environ. Qual.* 13, 274-278.
- Djurhuus J., Olsen P. (1997) Nitrate leaching after cut grass/clover leys as affected by time of ploughing. *Soil Use Manage.* 13, 61-67.
- Duynisveld W.H.M., Strebel O. (1985) Tiefenverlagerung und Auswaschungsfahr von Nitrat bei wasserungesättigten Böden in Abhängigkeit von Boden, Klima und Grundwasserflurabstand. *Landwirtsch. Forsch.* 37 (Kongressband 1984), 416-424.
- Eriksen J., Vinther F.P. (2000) Nitrate leaching in grazed grasslands of different composition age. *Grassland Science in Europe* 7, 682-683.
- Francis G.S. (1995) Management practices for minimising nitrate leaching after ploughing temporary leguminous pastures in Canterbury, New Zealand. *J. Contam. Hydrol.* 20, 313-327.
- Francis G.S., Haynes R.J., Sparling G.P., Ross D.J., Williams P.H. (1992) Nitrogen mineralization, nitrate leaching and crop growth following cultivation of a temporary leguminous pasture in autumn and winter. *Fert. Res.* 33, 59-70.
- Francis G.S., Haynes R.J., Williams P.H. (1995) Effects of the timing of ploughing in temporary leguminous pastures and two winter cover crops on nitrogen mineralization, nitrate leaching and spring wheat growth. *J. agric. Sci., Camb.* 124, 1-9.
- Gutser R., HAUCK S. (1994) Pflanzenbauliche Maßnahmen zur Verringerung des Stickstoffaustrages von landwirtschaftlich genutzten Flächen. In: Verminderung des Stickstoffaustrags aus landwirtschaftlich genutzten Flächen in das Grundwasser - Grundlagen und Fallbeispiele. Schriftenreihe des DVWK, Heft 106, 345-362.
- Hansen E.M., Eriksen J. (2016) Nitrate leaching in maize after cultivation of differently managed grass-clover leys on coarse sand in Denmark. *Agric. Ecosyst. Environ.* 216, 309-313
- Hess J. (1989) Klee grasumbruch im Organischen Landbau: Stickstoffdynamik im Fruchtfolglied Klee gras - Klee gras - Weizen - Roggen. Diss. Universität Giessen, 127 pp.
- Hess J., Pauly J., Franken H. (1990) Standorterhebungen zur Stickstoffdynamik nach Klee grasumbruch. *Mitt. Ges. Pflanzenbauwiss.* 3, 269-272.
- Hess J., Piorr A., Schmidtke K. (1992) Grundwasserschonende Landwirtschaft durch Ökologischen Landbau? Veröffentlichungen des Instituts für Wasserforschung GmbH Dortmund und der Dortmunder Stadtwerke AG, Dortmund.
- Johnston A.E., McEwen J., Lane P.W., Hewitt M.V., Poulton P.R., Yeoman D.P. (1994) Effects of one to six year old ryegrass clover leys on soil nitrogen and on the subsequent yields and fertilizer nitrogen requirements of the arable sequence winter wheat, potatoes, winter wheat, winter beans (*Vicia faba*) grown on a sandy loam soil. *J. agric. Sci., Camb.* 122, 73-89.
- Korsaeth A., Bakken L.R., Riley H. (2003) Nitrogen dynamics of grass as affected by N input regimes, soil textures and climate: lysimeter measurements and simulations. *Nutr. Cycl. Agroecosyst.* 66, 181-199.
- Macdonald A.J., Powlson D.S., Poulton P.R., Jenkinson D.S. (1989) Unused fertilizer nitrogen in arable soils - its contribution to nitrate leaching. *J. Sci. Fd. Agric.* 46, 407-419.
- Nievergelt J. (1993) Wasserverbrauch, Ertrag, Sickerwasser und Nährstoffauswaschung vom 1. April 1990 bis 31. März 1991. *Landw. Schweiz* 6, 121-122.
- Nievergelt J. (2002) Nitrat und Fruchtfolgen 20 Jahre lang beobachtet. *Agrarforschung* 9, 28-33.
- Prasuhn V., Spiess E., Seyfarth M. 2009 Die neue Lysimeteranlage Zürich-Reckenholz. Bericht über die 13. Gumpensteiner Lysimetertagung, Irdning, 11-16.
- Riess F., Rieder J.B., AMBERGER A. (1995) Nitratauswaschung unter Acker und Grünland - Ergebnisse der Saugkerzenanlage „Gülleprüffeld Puch“. Bericht über die 5. Gumpensteiner Lysimetertagung, Irdning, 69-73.
- Simmelsgaard S.E. (1998) The effect of crop, N-level, soil type and drainage on nitrate leaching from Danish soil. *Soil Use Manage.* 14, 30-36.
- Spiess E., Prasuhn V., Humphrys C. (2015) Einfluss des Umbruchtermins einer Zwischenfrucht auf die Nitratauswaschung. Bericht über die 16. Gumpensteiner Lysimetertagung, Irdning, 171-174.
- Springob G. (2004) C and N losses in sandy soils of NW Germany after conversion of grassland. *Grassland Science in Europe* 9, 529-531.
- Stauffer W., Enggist A. (1990) Einfluss von Gülleausbringtermin, Kultur und Wiesenumbuch auf die Nitratauswaschung in einem Lysimeterversuch. *Landw. Schweiz* 3, 373-379.
- Stauffer W., Spiess E. (2001) Einfluss unterschiedlicher Fruchtfolgen und nachwachsender Rohstoffe auf die Nitratauswaschung. Bericht über die 9. Gumpensteiner Lysimetertagung, Irdning, 47-50.
- Sticksel E., Maidl F.X., Fischbeck G. (1996) Boden- und nutzungsbedingter Nitrataustrag in einem Trinkwasserschutzgebiet mit hoher N-Austragsgefährdung. *Agribiol. Res.* 49, 10-22.
- Stopes C., Lord E.I., Philipps L., Woodward L. (2002) Nitrate leaching from organic farms and conventional farms following best practice. *Soil Use Manage.* 18, 256-263.
- Thomsen I.K., Christensen B.T. (1998) Cropping system and residue management effects on nitrate leaching and crop yields. *Agric. Ecosyst. Environ.* 68, 73-84.
- Walther U., Jäggli F., Waldburger M. (1995) Vier Maisanbauverfahren 1990 bis 1993: N_{min}-Gehalte des Bodens. *Agrarforschung* 2, 365-368.