

Nitratauswaschung unter Gemüse bei unterschiedlichem Ernterückstandsmanagement

Ernst Spiess^{1*}, Clay Humphrys¹, Frank Liebisch¹, Volker Prasuhn¹ und Reto Neuweiler²

Zusammenfassung

In einem dreijährigen Lysimeterversuch wurde untersucht, wie viel Nitrat unter einer Gemüsefruchtfolge ausgewaschen wird und welche die Auswirkungen sind, wenn die Ernterückstände abgeführt und nicht auf dem Feld belassen werden. Im Mittel über alle Lysimeter und Jahre lag die Nitratkonzentration des Sickerwassers mit $110 \text{ mg NO}_3^- \text{ L}^{-1}$ weit über dem Anforderungswert für Gewässer, die der Trinkwassernutzung dienen. Die Abfuhr der Ernterückstände hatte keinen Einfluss auf den marktfähigen Ertrag und die Sickerwassermenge; die Auswaschung konnte jedoch dank der niedrigeren Nitratkonzentrationen um 20-30 $\text{kg N ha}^{-1} \text{ Jahr}^{-1}$ reduziert werden.

Schlagwörter: Düngung, Lysimeter, Sickerwasser

Summary

In a three-year lysimeter trial, the amount of nitrate leached from a vegetable crop rotation and the effects of crop residues being removed or left in the field were investigated. On average of all lysimeters and years, the nitrate concentration of seepage water was $110 \text{ mg NO}_3^- \text{ L}^{-1}$, far above the limit for drinking water. The removal of crop residues had no effect on marketable yields and seepage volumes, but leaching could be reduced by 20-30 $\text{kg N ha}^{-1} \text{ year}^{-1}$ due to lower nitrate concentrations.

Keywords: fertilization, lysimeter, seepage water

Einleitung

Im Einzugsgebiet von Trinkwasserfassungen mit hohen Nitratkonzentrationen wird oftmals auch Feldgemüse angebaut. Im Gemüsebau wird in der Regel mehr Nitrat ausgewaschen als unter Ackerkulturen oder Grasland, weil aufgrund der hohen Erträge und zur Erzielung einer einwandfreien äußeren Qualität häufig ein hohes Angebot an Stickstoff (N) notwendig ist, welches zu erheblichen Reststickstoffmengen nach der Ernte führen kann. Zudem liegt im Gemüsebau der Boden oftmals über Winter brach, was das Risiko der Nitratauswaschung zusätzlich erhöht. Durch den Anbau von mehreren Gemüsekulturen pro Jahr fallen neben der marktfähigen Ware auch beachtliche Mengen an Ernterückständen an. Diese können große N-Mengen enthalten und verbleiben meist auf dem Feld (Zemek et al. 2020). Je nach Witterung, Bewirtschaftung sowie Art des Pflanzenmaterials wird dieser organische Stickstoff unterschiedlich schnell mineralisiert und kann dann von den folgenden Kulturen aufgenommen werden, in gasförmiger Form verloren gehen oder ausgewaschen werden. In einem dreijährigen Lysimeterversuch wurde deshalb untersucht, wie viel Nitrat unter einer Gemüsefruchtfolge ausgewaschen wird und wie sich der Umgang mit den Ernterückständen auf die Auswaschung auswirkt.

¹ Agroscope, Reckenholzstraße 191, CH-8046 Zürich, ² Agroscope, Müller-Thurgau-Straße 29, CH-8820 Wädenswil

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

Material und Methoden

Lysimeter und Boden

Der Versuch wurde während drei Jahren auf zwölf wägbaren Lysimetern in Zürich-Reckenholz (47°25'40"N, 8°31'02"E; 443 m ü.M.) durchgeführt. Die Gefäße weisen eine Oberfläche von 3,14 m² und eine nutzbare Tiefe von 2,0 m auf (sowie eine zusätzliche Schicht von 0,5 m mit Fein- und Grobkies über dem Auslass, die als Sickerhilfe dient). Sechs Lysimeter wurden 1979 schichtweise mit einer sandig-lehmigen Braunerde auf Schotter gefüllt, die anderen sechs mit einer lehmigen Braunerde auf Moränelehm (Tabelle 1). Beide Bodentypen sind typische Ackerböden der Schweiz.

Fruchtfolge und Verfahren

Nach Inbetriebnahme der Lysimeteranlage im Jahr 1980 wurden vorwiegend Ackerkulturen angebaut. Im April 2017 startete der Gemüseversuch mit einer dreijährigen Fruchtfolge ohne Winterbegrünung:

1. Jahr: Brokkoli + Kopfsalat 1 + Kopfsalat 2
2. Jahr: Chinakohl + Lauch
3. Jahr: Kopfkohl + Zuckerhut

Die Fruchtfolge wurde auf den beiden Böden um ein Jahr versetzt angebaut (Abbildung 1). Auf dem Schotterboden war Brokkoli die erste Kultur, auf dem Moräneboden Chinakohl. Um den Einfluss des Ernterückstandsmanagements auf die Nitratauswaschung zu untersuchen, wurden die Ernterückstände bei jedem Boden auf drei Lysimetern abgeführt und auf den drei anderen belassen und eingearbeitet. Die Bewirtschaftung erfolgte möglichst praxisüblich, wegen der geringen Bewirtschaftungsfläche mussten jedoch alle Arbeiten von Hand ausgeführt werden. Der Boden wurde vor der Pflanzung der Setzlinge jeweils 20 cm tief bearbeitet. Die N-Düngung erfolgte in Form von Ammoniumnitrat und gemäß den Empfehlungen von Agroscope (GRUD 2017). Bei Bedarf wurden die Lysimeter bewässert.

Tabelle 1: Körnung und Gehalt an organischer Substanz (OS) der beiden Böden.

| | Ton (%) | Schluff (%) | Sand (%) | OS (%) |
|---------------|---------|-------------|----------|--------|
| Schotterboden | | | | |
| 0-30 cm | 16 | 24 | 60 | 2,6 |
| 30-60 cm | 15 | 23 | 62 | 1,7 |
| 60-80 cm | 17 | 22 | 61 | 1,6 |
| Moräneboden | | | | |
| 0-30 cm | 18 | 35 | 47 | 3,2 |
| 30-60 cm | 16 | 42 | 42 | 0,3 |
| 60-80 cm | 26 | 37 | 37 | 0,4 |

Abbildung 1: Anbau von Kopfkohl und Chinakohl im Juni 2018 (links) und Kopfsalat im Oktober 2017 (rechts).



Messung der Wasserflüsse und der Nitratauswaschung

Die Niederschlagsdaten stammten von der 40 m entfernten Station von MeteoSchweiz. Die Sickerwassermenge wurde mit 100 ml-Kippwaagen erfasst. Bei jeder Kippung floßen 1-2 ml Wasser in eine Probenflasche, was eine abflussproportionale Entnahme einer kleinen Probe erlaubte. Die Wasserproben wurden 14-täglich entnommen und mittels segmentierter Fließinjektionsanalyse (s FIA) kolorimetrisch auf Nitrat (NO_3^-) und Ammonium (NH_4^+) untersucht, wobei Ammonium aufgrund der geringen Konzentrationen ($< 0.4 \text{ mg N L}^{-1}$) vernachlässigt werden konnte. Die Nitratkonzentrationen wurden als abflussgewichtete Mittelwerte angegeben. Die Wasserflüsse und die Nitratauswaschung wurden für den Zeitraum von April 2017 bis März 2020 ausgewertet.

Witterung

In den drei Versuchsjahren übertraf die Jahrestemperatur mit Werten von 10,2 bis 11,4°C jeweils deutlich das langjährige Mittel (1981-2010) von 9,4°C. Dagegen fielen die Niederschläge mit 826 bis 981 mm Jahr^{-1} bedeutend geringer aus als das langjährige Mittel von 1054 mm Jahr^{-1} . Das Niederschlagsdefizit war in den Monaten April bis Juli, d.h. in der Wachstumszeit der ersten Gemüsekultur, besonders groß. Die Gemüsekulturen wurden mit 135 bis 200 mm Jahr^{-1} bewässert. Somit betrug die gesamte Wasserzufuhr durchschnittlich 1092 mm Jahr^{-1} .

Resultate und Diskussion

Ertrag der Kulturen

Die marktfähigen Erträge lagen im Mittel über alle Gemüsekulturen und beide Böden in der gleichen Größenordnung wie im gewerbsmäßigen Freilandanbau. Detaillierter betrachtet ergaben sich jedoch deutliche Unterschiede. Während bei Zuckerhut sehr hohe Erträge erreicht wurden, schnitt Kopfsalat stark unterdurchschnittlich ab. Das Ernterückstandsmanagement hatte auf beiden Böden keinen Einfluss auf die Ertragshöhe (Tabelle 2).

Nährstoffbilanz

Die Nährstoffbilanz als Gegenüberstellung von Düngung und Entzug durch die weggeführten Pflanzenprodukte zeigt, dass der N-Umsatz im Feldgemüsebau viel höher ist als bei Ackerkulturen. Die Düngung und die Aufnahme durch die Pflanzen (Marktware und Ernterückstände) lagen im Bereich von 300 bis 500 kg N $\text{ha}^{-1} \text{Jahr}^{-1}$ (Tabelle 3). Auf den Lysimetern mit Abfuhr der Ernterückstände wurden durchschnittlich 417 kg N $\text{ha}^{-1} \text{Jahr}^{-1}$ ausgebracht. Bei den Lysimetern mit Einarbeitung der Rückstände wurde der Kulturbedarf jeweils um 20% der in den Ernterückständen der Vorkultur enthaltenen N-Menge

| | Schotter | | | Moräne | | |
|-------------|----------|--------|----------|--------|--------|----------|
| | Jahr | Abfuhr | Belassen | Jahr | Abfuhr | Belassen |
| Brokkoli | 2017 | 143 | 146 | 2019 | 112 | 90 |
| Kopfsalat 1 | 2017 | 445 | 508 | 2019 | 229 | 277 |
| Kopfsalat 2 | 2017 | 267 | 323 | 2019 | 107 | 134 |
| Chinakohl | 2018 | 639 | 611 | 2017 | 338 | 344 |
| Lauch | 2018 | 536 | 537 | 2017 | 464 | 519 |
| Kopfkohl | 2019 | 515 | 407 | 2018 | 872 | 909 |
| Zuckerhut | 2019 | 802 | 867 | 2018 | 712 | 750 |

Tabelle 2: Marktfähige Erträge bei Abfuhr und Belassen der Ernterückstände bei den verschiedenen Kulturen und beiden Böden (in dt ha^{-1} ; durchschnittlicher Variationskoeffizient: 15%).

Tabelle 3: N-Bilanz (= N-Düngung minus N-Entzug durch die weggeführten Produkte) bei Abfuhr und bei Belassen sowie N-Menge in den Ernterückständen bei Belassen (Mittel beider Böden; in kg N ha⁻¹).

| | N-Bilanz | | | Belassen | | | N-Menge der Ernte- rückstände |
|-----------------------|-------------------|------------|------------|------------|------------|------------|-------------------------------------|
| | Abfuhr Düngung | Entzug | Bilanz | Düngung | Entzug | Bilanz | |
| Brokkoli | 250 | 230 | 20 | 245 | 71 | 174 | 156 |
| Kopfsalat 1 | 120 | 96 | 24 | 90 | 74 | 16 | 28 |
| Kopfsalat 2 | 120 | 65 | 55 | 110 | 48 | 62 | 19 |
| <i>Total 1. Jahr</i> | <i>490</i> | <i>390</i> | <i>100</i> | <i>445</i> | <i>193</i> | <i>252</i> | <i>203</i> |
| Chinakohl | 180 | 268 | -88 | 175 | 125 | 50 | 135 |
| Lauch | 220 | 226 | -6 | 200 | 178 | 22 | 73 |
| <i>Total 2. Jahr</i> | <i>400</i> | <i>495</i> | <i>-95</i> | <i>375</i> | <i>302</i> | <i>73</i> | <i>208</i> |
| Kopfkohl | 220 | 217 | 3 | 200 | 130 | 70 | 80 |
| Zuckerhut | 140 | 226 | -86 | 110 | 145 | -35 | 95 |
| <i>Total 3. Jahr</i> | <i>360</i> | <i>443</i> | <i>-83</i> | <i>310</i> | <i>275</i> | <i>35</i> | <i>175</i> |
| 3-Jahresmittel | 417 | 443 | -26 | 377 | 257 | 120 | 195 |

reduziert (minus 40 kg N ha⁻¹ Jahr⁻¹), so dass bei diesem Verfahren im Mittel noch 377 kg N ha⁻¹ Jahr⁻¹ ausgebracht wurden. Vom Stickstoff in den Ernterückständen kann nur ein kleiner Teil von den Folgekulturen aufgenommen werden, weil insbesondere während der Vegetationsruhe größere N-Verluste eintreten (Grud 2017)

Der N-Entzug betrug bei Belassen der Ernterückstände und im Mittel beider Böden 257 kg N ha⁻¹ Jahr⁻¹ und bei Abfuhr sogar 443 kg N ha⁻¹ Jahr⁻¹ (Tabelle 3). Die Bilanz über die drei Jahre zeigt, dass der Entzug bei Abfuhr der Ernterückstände 26 kg N ha⁻¹ Jahr⁻¹ höher ausfiel als die Düngung, was einem Defizit entspricht. Chinakohl und Zuckerhut haben am meisten zu diesem Defizit beigetragen, aber auch Brokkoli mit hoher N-Düngung wies nur einen geringen Überschuss auf. Bei Belassen der Ernterückstände auf den Lysimetern wies die Bilanz im Durchschnitt einen Überschuss von 120 kg N ha⁻¹ Jahr⁻¹ auf. Dies sind 146 kg N ha⁻¹ Jahr⁻¹ mehr als beim Verfahren mit Abfuhr. Zwar war die Düngung infolge der 20%igen Anrechnung des Stickstoffs in den Ernterückständen der Vorkultur 40 kg N ha⁻¹ Jahr⁻¹ niedriger als bei Abfuhr, aber der Entzug fiel um 186 kg N ha⁻¹ Jahr⁻¹ geringer aus, weil er nur die marktfähige Ware umfasste, nicht aber die auf den Lysimetern belassenen Ernterückstände. Bei beiden Verfahren fällt auf, dass der zweite Satz Kopfsalat einen erstaunlich hohen Überschuss aufwies. Dies ist auf den späten Anbau im Jahr zurückzuführen, der mit geringeren Erträgen verbunden war. Die verschiedenen Gemüsekulturen variierten stark in der N-Menge der Ernterückstände (Tabelle 3). Während diese bei Kopfsalat gering ausfiel, war sie bei Brokkoli und Chinakohl hoch und trug damit im Verfahren „Belassen“ viel zur Erhöhung des Bilanzsaldos bei.

Sickerwassermenge

Die Sickerwassermenge betrug im Mittel der drei Jahre und beider Böden rund 500 mm (Tabelle 4) und war damit fast halb so hoch wie die Wasserzufuhr über den Niederschlag und die Bewässerung. Das unterschiedliche Ernterückstandsmanagement beeinflusste die Sickerwassermenge auf beiden Böden nur minimal. Im dritten Versuchsjahr (2019/20) wurde mehr Sickerwasser gebildet als in den beiden Vorjahren. Die Sickerwassermenge war in den Wintermonaten Dezember bis Februar wegen den gesättigten Böden praktisch gleich hoch wie der Niederschlag (Abbildung 2). Im Sommerhalbjahr fiel dagegen trotz hoher Wasserzufuhr über Niederschlag und Bewässerung nur wenig Sickerwasser an. Die Evapotranspiration war in dieser Periode infolge der höheren Temperaturen und des Pflanzenwachstums hoch.

| | Schotterboden | | Moräneboden | |
|---|---------------|----------|-------------|----------|
| | Abfuhr | Belassen | Abfuhr | Belassen |
| Sickerwassermenge (mm): | | | | |
| 2017/18 | 489 | 491 | 450 | 443 |
| 2018/19 | 469 | 479 | 478 | 462 |
| 2019/20 | 582 | 593 | 605 | 571 |
| Mittel | 513 | 521 | 511 | 492 |
| Nitratkonzentration (mg NO ₃ ⁻ L ⁻¹): | | | | |
| 2017/18 | 99 | 132 | 116 | 85 |
| 2018/19 | 56 | 71 | 43 | 56 |
| 2019/20 | 77 | 108 | 200 | 236 |
| Mittel | 78 | 104 | 126 | 134 |
| Ausgewaschene N-Fracht (kg N ha ⁻¹): | | | | |
| 2017/18 | 109 | 146 | 118 | 85 |
| 2018/19 | 60 | 77 | 46 | 58 |
| 2019/20 | 101 | 144 | 273 | 305 |
| Mittel | 90 | 123 | 145 | 149 |

Tabelle 4: Sickerwassermenge, Nitratkonzentration des Sickerwassers und ausgewaschene N-Fracht in den verschiedenen Verfahren, Böden und Versuchsjahren.

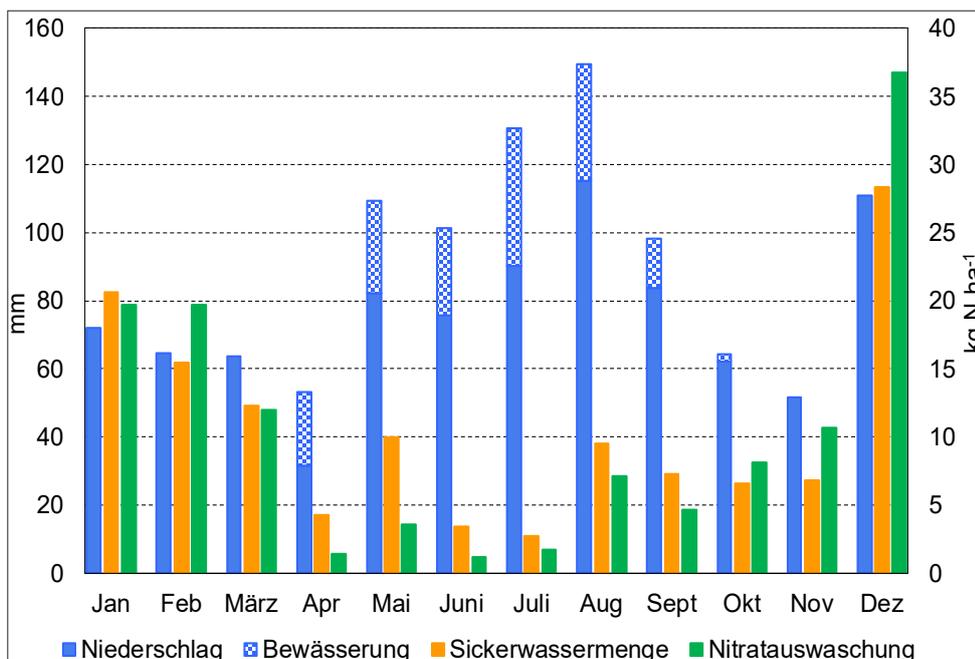
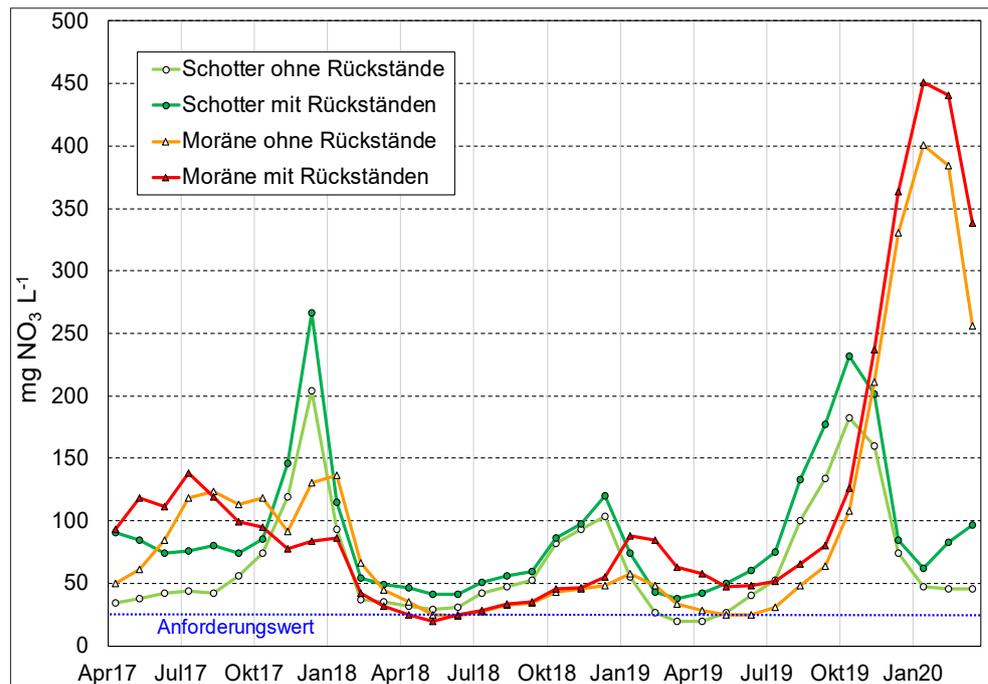


Abbildung 2: Monatswerte für Niederschlag und Bewässerung, Sickerwassermenge (mm) sowie die ausgewaschene N-Fracht (kg N ha⁻¹) im Mittel der drei Jahre und der zwölf Lysimeter.

Nitratkonzentration des Sickerwassers

Die Verlaufskurven der Nitratkonzentration des Sickerwassers lagen in beiden Verfahren und Böden größtenteils über dem schweizerischen Anforderungswert von 25 mg NO₃⁻ L⁻¹ für Gewässer, die der Trinkwassernutzung dienen (Abbildung 3). Im Januar 2020 erreichte die Nitratkonzentration beim Moräneboden Werte von über 400 mg NO₃⁻ L⁻¹. Auf dem Schotterboden trat die maximale Nitratkonzentration im Winterhalbjahr jeweils etwas früher auf als auf dem Moräneboden. Mit Ausnahme des Moränebodens zwischen August 2017 und Mai 2018 waren die Nitratkonzentrationen bei Belassen der Ernterückstände jeweils höher als bei Abfuhr. Im Mittel über alle Lysimeter und die drei Jahre betrug die Nitratkonzentration 110 mg NO₃⁻ L⁻¹.

Abbildung 3: Zeitliche Entwicklung der abflussgewichteten Nitratkonzentrationen im Sickerwasser in beiden Verfahren und beiden Böden.



Ausgewaschene N-Menge

Im Durchschnitt aller Lysimeter und Versuchsjahre wurden 127 kg N ha^{-1} ausgewaschen. Die jährlichen Schwankungen waren insbesondere auf dem Moräneboden sehr groß, wo die maximale N-Fracht 305 kg N ha^{-1} betrug (Tabelle 4). Da sowohl die Sickerwassermengen als auch die Nitratkonzentrationen des Sickerwassers im Winterhalbjahr mehr als doppelt so hoch waren als im Sommer, erfolgte die Nitratauswaschung vorwiegend im Winter (Abbildung 2).

Auf dem Schotterboden wurde in allen Jahren mehr Nitrat nach Belassen der Ernterückstände auf den Lysimetern ausgewaschen als bei Abfuhr. Beim Moräneboden war dies in zwei Versuchsjahren der Fall; im ersten Jahr wurde die umgekehrte Tendenz beobachtet. Tracerversuche mit Bromid im vorhergehenden Versuch zeigen, dass auf dem Moräneboden um die 500 mm Sickerwasser nötig sind zur Auswaschung von 80% der insgesamt im Wasser wiedergefundenen Tracermenge. Nitrat dürfte im Boden eine ähnliche Verlagerungsgeschwindigkeit aufweisen wie Bromid. Da der mittlere Sickerwasseranfall in unserem Versuch 500 mm Jahr^{-1} beträgt, dauert es etwa ein Jahr, bis der größte Teil des Nitrats aus dem Oberboden durch den Lysimeter gesickert ist. Dies bedeutet, dass im ersten Versuchsjahr vorwiegend Nitrat aus dem Moräneboden ausgewaschen worden ist, das sich zu Versuchsbeginn unterhalb des bearbeiteten Oberbodens befand und daher aus dem vorhergehenden Versuch stammte. Beim Schotterboden wurde der Tracer etwas schneller verlagert. Deshalb dürfte die Verweilzeit in diesem Boden einige Monate kürzer sein. Aufgrund dieser Erkenntnisse kann das erste Versuchsjahr bei der Nitratauswaschung nicht für den Vergleich der beiden Verfahren herangezogen werden. Auch ist es nicht möglich, eine bestimmte Nitratfracht einer einzelnen Gemüsekultur zuzuordnen. Im zweiten und im dritten Jahr wurden bei Abfuhr der Ernterückstände und im Mittel beider Böden 26 kg N ha^{-1} weniger ausgewaschen als bei Belassen auf den Lysimetern.

Schlussfolgerungen

Der Lysimeterversuch zeigte, dass unter Feldgemüse große N-Mengen als Folge der hohen Nitratkonzentrationen im Sickerwasser ausgewaschen werden können. Bei der heute gängigen Bewirtschaftungspraxis, dem Belassen der Ernterückstände auf dem

Feld, betrug der Überschuss $120 \text{ kg N ha}^{-1} \text{ Jahr}^{-1}$ und der Saldo der Nährstoffbilanz fiel $146 \text{ kg N ha}^{-1} \text{ Jahr}^{-1}$ höher aus als bei der Abfuhr. Die zusätzliche Nitratauswaschung von $26 \text{ kg N ha}^{-1} \text{ Jahr}^{-1}$ bei Belassen erklärt jedoch nur einen kleinen Teil der Differenz im Bilanzsaldo. Offen bleibt, welche N Menge im Humus angereichert wurde, in gasförmiger Form verloren ging oder in den nächsten Jahren noch ausgewaschen wird. Wegen der großen Verweilzeit des Nitrats im Boden wird der Versuch um zwei Jahre verlängert.

Dank

Das Forschungsprojekt NitroGäu wurde finanziell und inhaltlich durch das Bundesamt für Landwirtschaft und den Kanton Solothurn unterstützt.

Literatur

GRUD (2017) Grundlagen für die Düngung landwirtschaftlicher Kulturen in der Schweiz. Agrarforschung Schweiz 8(6), Spezialpublikation.

Zemek O., Neuweiler R., Spiess E., Stüssi M., Richner W. (2020) Nitratauswaschungspotenzial im Freilandgemüsebau – eine Literaturstudie. Agroscope Science Nr. 95, 117 pp. <https://doi.org/10.34776/as95g> [30.11.2020].

