



Schweizerische Eidgenossenschaft  
Confédération suisse  
Confederazione Svizzera  
Confederaziun svizra

Eidgenössisches Departement für  
Wirtschaft, Bildung und Forschung WBF  
Agroscope

Ernst Spiess, Reto Neuweiler und Frank Liebisch | Juli 2022

**Bericht**

---

# **NitroGäu: Zusatzbericht zu Teilprojekt 2.1: Bewertungssystem für das Nitratauswaschungspotenzial unter Feldgemüse**

---

Adressen der Autoren:

Frank Liebisch, Ernst Spiess

Agroscope, Forschungsgruppe Gewässerschutz und Stoffflüsse

Reckenholzstrasse 191

8046 Zürich

Reto Neuweiler

Agroscope, Forschungsgruppe Extension Gemüsebau

Müller-Thurgau-Strasse 29

8820 Wädenswil

## Zusammenfassung

Das von Zemek *et al.* (2020a) entwickelte Bewertungssystem zur Abschätzung des Nitratauswaschungspotenzials im Gemüsebau wurde weiterentwickelt, damit es nicht nur für einzelne Kulturen verwendet werden kann, sondern für sämtliche Gemüse- und Zwischenkulturen eines Jahres auf einem bestimmten Schlag. Zudem wurden die Ausgangswerte für den Düngungsbedarf an Stickstoff (N), die N-Menge in den Ernterückständen sowie die Wurzeltiefe teilweise überarbeitet. Mit dem Abzug für den Anbau einer Zwischenkultur (Gründüngung oder Zwischenfutter) im folgenden Winter wurde ein vierter Parameter eingeführt. Im Weiteren wurde das auf einer Klassenbildung basierende Punktierungssystem durch Berechnungsformeln ersetzt.

Eine Umsetzung dieses Ansatzes in die beiden Modelle "Nitratindex" und "MODIFFUS" erwies sich als nicht praktikabel. In Anbetracht der sehr hohen Anzahl an möglichen Kulturfolgen im Feldgemüsebau und der wenigen vorhandenen Messungen zur Nitratauswaschung ist eine Modellierung unerlässlich. Die vielfältigen N-Umwandlungsprozesse im Boden und insbesondere die Mineralisierung des organischen Stickstoffs über Jahre und Jahrzehnte sind jedoch immer noch zu wenig erforscht. Zu deren Quantifizierung in einem Modell wären zudem auch mehr Daten aus der landwirtschaftlichen Praxis erforderlich, insbesondere für den organischen Stickstoff zur Menge im Boden und zur Zufuhr über Dünger, Ernterückstände und Erdpresstöpfe.

Das neue Bewertungssystem erlaubt mit nur vier Eingangsgrößen eine qualitative und keine quantitativ robuste Abschätzung des Nitratauswaschungspotenzials. Es gibt Hinweise, bei welchen Kulturfolgen eher mit hohen bzw. niedrigen Auswaschungsverlusten zu rechnen ist, lässt aber nicht die Quantifizierung dieser Verluste zu. Deshalb eignet sich das Bewertungssystem für die Beratung von Gemüsebaubetrieben und nicht für den Vollzug von Massnahmen in einem Nitratprojekt.

## 1 Ausgangslage und Zielsetzung

Innerhalb des NitroGäu-Projektes (Bünemann 2017) wurden zwei Teilprojekte zum Gemüsebau durchgeführt:

2.1 Literaturstudie zur Nitratauswaschung unter Gemüsekulturen und zu den Massnahmen zur Reduktion dieser Verluste. Dabei wurde zusätzlich ein einfaches Bewertungssystem zur Abschätzung des Auswaschungspotenzials von einzelnen Gemüsekulturen entwickelt (Zemek *et al.*, 2020a, b).

Messung der Nitratauswaschung auf einer Lysimeteranlage in Zürich-Reckenholz: Bei zwei verschiedenen Bodentypen und bei zwei Verfahren mit unterschiedlichem Ernterückstandsmanagement wurden die Mengen und die Nitratkonzentrationen des Sickerwassers unter einer dreijährigen Gemüsefruchtfolge gemessen (Spiess *et al.*, 2021).

2.2 Messung der Nitratauswaschung unter Praxisbedingungen im Projektgebiet Gäu: In 13 Feldern von Gemüsebaubetrieben wurden die unter Gemüsekulturen, Winterbegrünungen und während Bracheperioden ausgewaschenen Nitratfrachten mit Selbst-Integrierenden Akkumulatoren (SIA) gemessen. Auf einigen Feldern wurden verschiedene Düngungsverfahren miteinander verglichen (Bischoff *et al.*, 2021).

Die im Rahmen dieser Teilprojekte in eigenen Versuchen gemessenen bzw. in der Literatur gefundenen Auswaschungsverluste weisen eine weite Spanne von tief bis sehr hoch auf. Die

mit Hilfe der SIA auf 13 Feldern im Gäu gemessene Nitratauswaschung betrug bei praxisüblicher Düngung im Mittel 260 kg N/ha/Jahr (Spanne: 93 - 578; 2 Versuchsjahre). Bei einigen Feldern deutet der Verlauf der Gehalte an mineralischem Stickstoff ( $N_{\min}$ ) auf ein äusserst hohes Mineralisierungspotenzial des Bodens hin. In der Lysimeteranlage in Zürich-Reckenholz mit zwei unterschiedlichen Bodentypen wurde bei praxisüblicher Einarbeitung der Ernterückstände eine durchschnittliche Auswaschung von 136 kg N/ha/Jahr (58 - 305) während drei Versuchsjahren gemessen. Infolge der grossen Tiefe der Lysimeterböden benötigt die Verlagerung des Nitrats mit dem Sickerwasser viel Zeit; das ausgewaschene Nitrat erreicht somit meistens erst mit vielen Monaten Verzögerung den Auslass am Boden des Lysimeters.

In der Literaturstudie wurde versucht, das Auswaschungspotenzial von 40 Gemüsearten anhand von Literaturwerten zum N-Düngebedarf, zu den N-Mengen in den Ernterückständen und zur Wurzeltiefe mit einem Punktesystem einzuschätzen, indem den einzelnen Gemüsearten für jeden der drei Parameter eine bestimmte Punktzahl zugeteilt wurde. Mit diesem System kann nur eine einzelne Kultur pro Jahr bewertet werden. Da im intensiven Feldgemüsebau jedoch mehrere Kulturen pro Jahr angebaut werden können, ist dieses System für Kulturfolgen nicht anwendbar.

In der vorliegenden Arbeit zum Teilprojekt 2.1 wurde nun versucht, das Bewertungssystem von Zemek *et al.* (2020a, b) weiterzuentwickeln und in die beiden Modelle zur Abschätzung des Nitratauswaschungspotenzials "Nitratindex" und "MODIFFUS" zu integrieren.

## 2 Modelle "Nitratindex" und "MODIFFUS"

Der Nitratindex (Vetsch *et al.*, 2000) wurde von der HAFL Zollikofen in Zusammenarbeit mit dem Kanton Solothurn, mit dem Ziel, das Nitratauswaschungspotenzial von landwirtschaftlichen Betrieben abzuschätzen, entwickelt. Er bewertet Kulturkombinationen (Hauptkultur des Vorjahres + evtl. Zwischenkultur - Hauptkultur des aktuellen Jahres) mit dimensionslosen Punktzahlen und weist somit Ähnlichkeiten mit den Ansätzen von Magnollay (1991) und Gerber (1995) auf. Die Basispunktzahl setzt sich aus drei Indexzahlen zusammen: 1) Erfahrungswert zum Gehalt an mineralischem Stickstoff ( $N_{\min}$ ) im Boden bei der Ernte; 2) Stickstoff(N)-Mineralisierung nach der Ernte; 3) N-Aufnahme der Kultur im Folgejahr. Zur Abschätzung des Auswaschungspotenzials wird die Basispunktzahl mit der durchgeführten Bodenbearbeitung, dem Saatzeitpunkt und der Art der Winterbedeckung korrigiert. Eine hohe Endpunktzahl weist auf ein hohes Auswaschungspotenzial hin.

Das Stoffflussmodell MODIFFUS (Prasuhn und Spiess 2003; Hürdler *et al.*, 2015) wurde von Agroscope zur Abschätzung der diffusen N- und P-Einträge in Gewässer mit einem Einzugsgebiet von über 50 km<sup>2</sup> entwickelt. Im Modul "Nitratauswaschung" wurden die Basiswerte der Nitratmatrix für die Ackerkulturen hauptsächlich aufgrund der durchschnittlich in Lysimetern ausgewaschenen N-Frachten festgelegt. Bei Kulturkombinationen ohne Messwerte wurde der Basiswert mit Hilfe von Analogieschlüssen abgeleitet, wobei z.B. Saat- und Erntezeitpunkte sowie die Länge von Bracheperioden einflussen. Zur Abschätzung der Nitratauswaschung werden die Basiswerte mit Korrekturfaktoren für Unterschiede in der Sickerwassermenge, der Höhenlage, des Bodens, der Hofdüngermenge, der Denitrifikation und der Drainage verrechnet. Aus der Berechnung resultiert eine N-Menge, die zum Teil mit langjährigen Durchschnittswerten berechnet worden ist. MODIFFUS ist nicht wie der Nitratindex für die Betriebs- und Parzellenebene entwickelt worden, sondern für Einzugsgebiete von Gewässern.

Die beiden Modelle Nitratindex und MODIFFUS entstanden zu einem grossen Teil unabhängig voneinander, trotzdem weisen sie Gemeinsamkeiten auf. Die wichtigste ist, dass das Nitrat auswaschungspotenzial nicht aufgrund von den in einem einzigen Jahr angebauten Kulturen abgeschätzt wird, sondern mit Hilfe von Kulturkombinationen. Da Nitrat vorwiegend im Winterhalbjahr ausgewaschen wird, haben die Prozesse im Boden nach der Ernte der Hauptkultur bis zur Saat der nächsten Hauptkultur einen entscheidenden Einfluss auf die ausgewaschene N-Fracht.

In MODIFFUS muss zurzeit für sämtliche Gemüsekulturen derselbe Basiswert für die Abschätzung des Auswaschungspotenzials verwendet werden; eine Differenzierung nach verschiedenen Gemüsekulturen ist somit nicht möglich. Der Nitratindex ermöglicht dagegen eine Differenzierung nach 30 Gemüsekulturen. Mehrere im selben Jahr angebaute Gemüsekulturen können aber auch im Nitratindex nicht berücksichtigt werden.

### **3 Einige Grundlagen zu den N-Flüssen im Pflanzenbau und zur Nitrat auswaschung**

#### **3.1 N-Flüsse im Pflanzenbau**

Der N-Haushalt des Pflanzenbaus und insbesondere des Bodens ist komplex, weil neben dem mineralischen auch der organische Stickstoff von grosser Bedeutung ist. Diese beiden N-Formen verhalten sich sehr unterschiedlich. Mineralischer Stickstoff (v.a. Ammonium und Nitrat) wird dem Boden über die Mineraldünger und die atmosphärische Deposition zugeführt (Abb. 1). Über die Hofdünger gelangt sowohl mineralischer als auch organischer Stickstoff in den Boden. Nach der Ausscheidung von Harn wird der Harnstoff-N innert Stunden in Ammonium-N umgewandelt; dagegen enthält der Kot den organischen Stickstoff (Abb. 2). Die organische Form wird dem Boden auch mit anderen organischen Düngern (z.B. Kompost), über die biologische N-Fixierung (Umwandlung von Luftstickstoff zu organischem Stickstoff) und in gepflanzten Gemüsekulturen mit den Erdpresstöpfen zugeführt. Im Boden ist Stickstoff normalerweise zu über 95% in organischer Form gebunden (Humus, mikrobielle Biomasse etc.). Bei der Mineralisierung durch die Mikroorganismen wird dieser organisch gebundene Stickstoff in die mineralische Form überführt und kann grösstenteils erst dann von den Pflanzen aufgenommen werden. In der Pflanze werden Nitrat-N und Ammonium-N wiederum in organische Verbindungen (z.B. Proteine) eingebaut. In Gemüsekulturen werden bei der Ernte meistens nur die vermarktbareren Ernteprodukte abgeführt, während die Wurzeln und die oberirdischen Ernterückstände auf dem Feld verbleiben (Abb. 1). In mineralischer Form kann Stickstoff leicht aus dem Boden in die Luft (Verflüchtigung nach Umwandlung in Ammoniak, Lachgas oder Luftstickstoff) entweichen oder ins Grundwasser ausgewaschen werden.

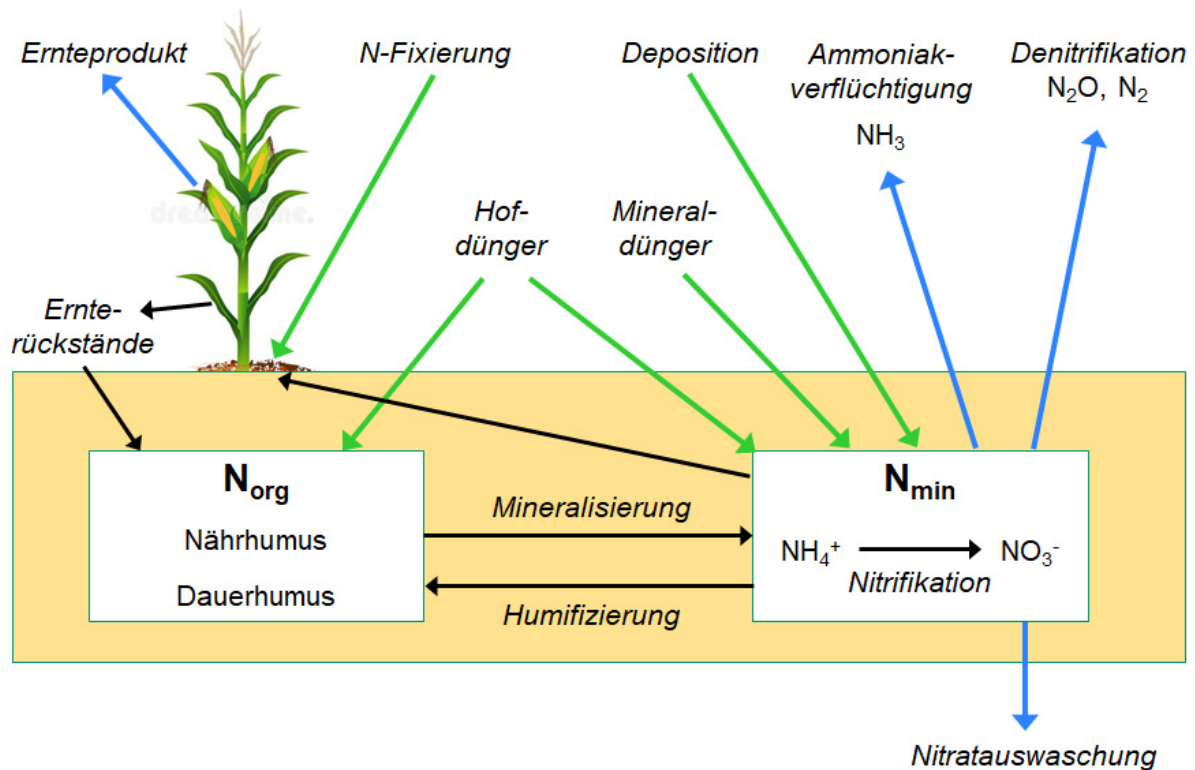


Abb. 1: Die wichtigsten Stickstoffflüsse im System "Boden – Pflanze - Umwelt" (grün: Inputs; blau: Output; schwarz: interne Flüsse).

Der Austausch von Stickstoff zwischen Boden und Luft - einerseits die gasförmigen Verluste, andererseits die Einträge in den Boden über die biologische N-Fixierung und die atmosphärische Deposition - sind eine Eigenart von Stickstoff, durch die er sich von anderen Nährstoffen wie Phosphor, Kalium oder Magnesium unterscheidet. Weitere Besonderheiten sind die grosse Bedeutung der organischen Form und die vielfältigen Prozesse in Boden, Pflanze und Tier, bei denen die eine Form in die andere umgewandelt wird. Da Stickstoff im Boden zum grössten Teil im Humus festgelegt ist, sind die Flüsse von Stickstoff und Kohlenstoff beim Humusaufbau und -abbau eng miteinander verbunden. Der Ablauf beider Prozesse ist von den Lebensbedingungen der mikrobiellen Biomasse abhängig, wobei neben der Temperatur die Bodenfeuchte, welche wiederum von den Niederschlägen abhängt, einen entscheidenden Einfluss hat.

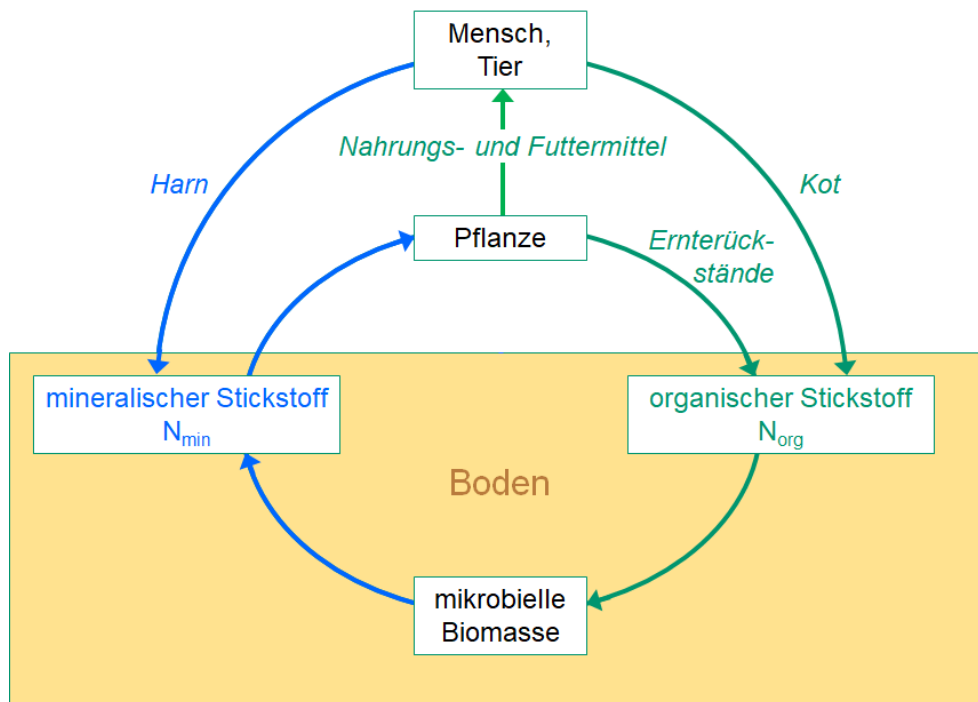


Abb. 2: Die wichtigsten internen Flüsse von mineralischem und organischem Stickstoff im System "Boden - Pflanze - Tier/Mensch" (blau: mineralischer Stickstoff; grün: organischer Stickstoff).

### 3.2 Einflussfaktoren der Nitratauswaschung

Die wichtigsten Einflussfaktoren der Nitratauswaschung sollen nachfolgend kurz dargelegt werden. Die ausgewaschene Nitratmenge wird einerseits durch die Sickerwassermenge und andererseits durch die Stickstoff- bzw. die Nitratkonzentration des Sickerwassers bestimmt. Da Stickstoff fast ausschliesslich als Nitrat ausgewaschen wird, wird vielfach nur Nitrat (plus evtl. Ammonium) gemessen. Deshalb ist üblicherweise von Nitrat- und nicht von Stickstoffauswaschung die Rede.

Der mengenmässige und zeitliche Anfall des Sickerwassers wird hauptsächlich durch die Wasserzufuhr (Menge und zeitliche Verteilung des Niederschlags und der Bewässerung), die Evapotranspiration (abhängig von Temperatur und Bodenbedeckung: Kulturart, Zwischenkultur, Bracheperiode) und das Wasserspeichervermögen des Bodens (abhängig von Bodenart und -struktur, Humusgehalt, Gründigkeit) beeinflusst (Abb. 3).

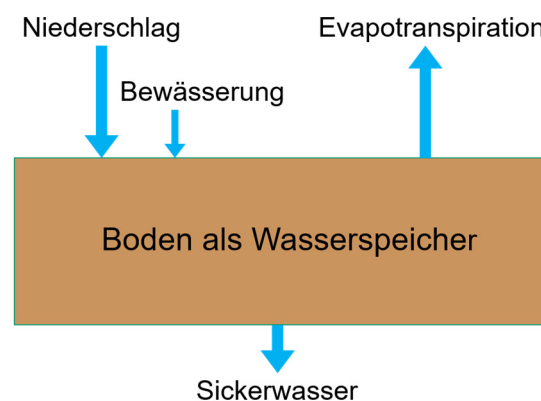


Abb. 3: Die wichtigsten Wasserflüsse im System "Boden - Pflanze".

Die Nitratkonzentration des Sickerwassers hängt vor allem vom N-Input in den Boden (z.B. Menge, Form und Ausbringungszeitpunkt des Düngers), von der Mineralisierung des organischen Stickstoffs im Dauerhumus (stabile Humusverbindungen) und Nährhumus (Abbauprodukte von Ernterückständen, Gründüngungen, Gülle, Mist, Kompost etc.) sowie von der N-Aufnahme durch die Pflanzen und den gasförmigen N-Verlusten ab (Abb. 1).

#### **4 Herausforderungen bei der Abschätzung des Nitratauswaschungspotenzials unter Kulturkombinationen**

Die Abschätzung der Auswaschung im Acker- und besonders im Feldgemüsebau ist mit einigen Herausforderungen verbunden:

##### ***a) Grosse Anzahl an Kulturkombinationen***

Schon im klassischen Ackerbau existiert eine relativ grosse Anzahl an Kulturkombinationen. Deren Auswaschungspotenzial kann bei weitem nicht mit vorhandenen Versuchsergebnissen und Literaturwerten abgeschätzt werden. Bei Einbezug des Feldgemüsebaus entsteht ein Vielfaches an Kulturkombinationen. Erstens gibt es eine grosse Anzahl an Gemüsearten, zweitens wird Feldgemüse in der Fruchtfolge oftmals mit klassischen Ackerkulturen kombiniert angebaut und drittens ist im intensiven Feldgemüsebau der Anbau von mehreren Kulturen pro Jahr üblich (Beispiel einer Kulturkombination aus dem Gäu: Kopfsalat + Zucchetti im Vorjahr und Winterweizen im aktuellen Jahr; Kulturkombination auf den Lysimetern in Zürich-Reckenholz: Broccoli + Kopfsalat 1 + Kopfsalat 2 im Vorjahr und Knollenfenchel als erste Kultur im aktuellen Jahr; anstelle des Kopfsalat 2 hätte z.B. auch eine Gründüngung stehen können). Im Weiteren gibt es im Feldgemüsebau durch Satzanbau auch weniger fixe Kulturzeiten als im Ackerbau: Kopfsalat kann im Freiland schon ab Mitte Februar unter Vliesen und Lochfolien ausgepflanzt werden und weitere Sätze werden bis Ende August angelegt. Zudem ist die Kulturzeit im Frühling und besonders im Herbst wegen der tieferen Boden- und Lufttemperaturen bedeutend länger als im Sommer. Aus diesen Gründen drängt sich die Abschätzung des Auswaschungspotenzials mit einem einfachen Modell auf. Die wenigen Versuchsergebnisse dienen dann hauptsächlich zur Erstellung dieses Modells und zur Ableitung von Basiswerten.

##### ***b) Wahl der Referenzperiode***

Der Nitratindex und MODIFFUS bauen auf einem ähnlichen Betrachtungszeitraum auf (Nitratindex: August des Vorjahres bis Juli des aktuellen Jahres; MODIFFUS: Juli des Vorjahres bis Juni des aktuellen Jahres). In den Sommermonaten sind die ausgewaschenen Nitratfrachten häufig am niedrigsten, so dass sich diese Unterteilung anbietet, insbesondere bei der Anwendung für klassische Ackerkulturen mit einer Kulturzeit von wenigen bis vielen Monaten. Im Feldgemüsebau, wo der Anbau von zwei bis drei Kulturen pro Jahr möglich ist, führt dieses System jedoch zu einer willkürlichen Trennung der Kulturen des gleichen Jahres. Der Anbau der ersten Gemüsekultur im Jahr, die oftmals noch vor Mitte Jahr geerntet wird, kann über die im Boden zurückbleibende  $N_{\min}$ -Menge sowie die Mineralisierung der Ernterückstände und der ausgebrachten organischen Dünger auch die Auswaschung im folgenden Winterhalbjahr beeinflussen. Deshalb wird in dieser Arbeit vorgeschlagen, den Beginn der Referenzperiode auf den April und das Ende auf den März des nächsten Jahres zu legen.



### **c) Ungenügende Kenntnisse der Bewirtschaftungspraxis im Feldgemüsebau**

#### **c1. Düngung**

In Lysimeterversuchen zur Messung der Nitratauswaschung wird normalerweise gemäss den offiziellen Düngungsnormen (Richner und Sinaj, 2017) gedüngt. Um die Versuchsbedingungen zu standardisieren, wird zudem häufig ausschliesslich Mineraldünger eingesetzt. Trotz den verfügbaren Daten aus Betriebsnetzen (z.B. Agrarumweltmonitoring von Agroscope) sind die Informationen zur Bewirtschaftungspraxis im schweizerischen Feldgemüsebau mangelhaft, insbesondere zur tatsächlichen Höhe der N-Düngung und zum Einsatz organischer Dünger.

#### **c2. Gemüseanbau ohne Ernte**

Auf einem meist unbekanntem Anteil der Gemüsefläche wird das eigentliche Erntegut infolge ungenügender Qualität, ungünstiger Witterungsbedingungen oder eines Überangebots auf dem Markt nicht oder nur unvollständig geerntet. Dabei verbleiben in solchen Flächen nicht nur die üblichen Mengen an Ernterückständen, sondern die gesamte Produktion auf dem Feld. Der N-Zufuhr über die Dünger steht somit keine oder eine stark reduzierte N-Wegfuhr über Produkte gegenüber, was zu zusätzlichen N-Verlusten in Luft und Wasser führt.

#### **c3. Humusbilanz**

Eine Zu- oder Abnahme von Stickstoff im Humuspool ist wegen der grossen N-Menge im Humus meistens erst nach vielen Jahren mit Messungen nachzuweisen. Nimmt der Humusgehalt ab, wird zusätzlich organischer Stickstoff mineralisiert und damit pflanzenverfügbar gemacht. Wenn das Angebot an mineralischem Stickstoff die Aufnahme durch die Pflanzen übersteigt und wenn Wasser im Boden in grössere Tiefen sickert, wird das leicht wasserlösliche Nitrat mittransportiert und ausgewaschen. Während für die gesamte Landwirtschaft der Schweiz häufig davon ausgegangen wird, dass die Humusbilanz mehr oder weniger ausgeglichen ist, ist dies im Feldgemüsebau schwieriger zu beurteilen. Organische Dünger, Erdpresstöcke, oberirdische Ernterückstände und Wurzeln fördern die Humusbildung. Parallel dazu ist bei intensiven Kulturfolgen von Feldgemüse die Mineralisierung und damit verbunden der Humusabbau stark erhöht. Der Anbau mehrerer Kulturen pro Jahr erfordert eine häufigere Bodenbearbeitung. Bei vielen Gemüsearten ist zudem die Bearbeitungsintensität bei den einzelnen Bodenbearbeitungsmassnahmen höher als bei klassischen Ackerkulturen. Bei jedem Bearbeitungsdurchgang werden Bodenaggregate zerstört, wobei organische Substanz freigelegt wird, die vormals nicht den Mikroorganismen zugänglich war und nun abgebaut werden kann. Die Bewässerung fördert nicht nur das Pflanzenwachstum, sondern erhöht dank den besseren Lebensbedingungen für die Mikroorganismen auch die Mineralisierung. Im Weiteren wird intensiver Feldgemüsebau häufig auf humusreichen Böden betrieben, bei denen die Mineralisierungsraten schon natürlicherweise erhöht sind.

### **d) Zeitliche verzögerte Auswirkungen von Bewirtschaftungsmassnahmen auf den N-Haushalt des Bodens**

Menschliche Eingriffe in den Pool des organischen Stickstoffs im Boden wirken sich nicht nur im aktuellen Jahr, sondern auch in den Folgejahren aus, oftmals in geringem Masse sogar noch nach vielen Jahrzehnten. Durch das Ausbringen organischer Dünger oder den Anfall von Ernterückständen wird dieser Pool erhöht, durch die Bodenbearbeitung erniedrigt. Organische Substanz besteht aus leicht und schwer abbaubaren Substanzen. Während der in leicht abbaubaren Substanzen enthaltene Stickstoff schon im Laufe von wenigen Jahren vollständig mineralisiert und damit pflanzenverfügbar wird, kann dies bei schwer abbaubaren Verbindungen viele Jahrzehnte dauern. Ein grosser Teil dieser Verbindungen wird

vorübergehend oder sogar langfristig zu Dauerhumus. Da die landwirtschaftliche Bewirtschaftung in den letzten Jahrzehnten immer wieder bedeutende Änderungen erfahren hat (z.B. in der Düngungsintensität oder durch die Umstellung von konventioneller Landwirtschaft zu Biolandbau, von Naturwiesen zu Ackerbau oder von den klassischen Ackerkulturen zu Feldgemüse), befinden sich sehr viele Parzellen nicht in einem stabilen Fließgleichgewicht, sondern durchlaufen immer noch eine mehr oder weniger starke Entwicklung. In Lysimeter- oder Feldversuchen von wenigen Jahren Dauer, in denen verschiedenen Verfahren miteinander verglichen werden, befindet sich oftmals nicht einmal das praxisübliche Standardverfahren in einem Gleichgewichtszustand. Im Lysimeterversuch mit Gemüse in Zürich-Reckenholz fiel beispielsweise die Bilanz zwischen N-Zufuhr über die Dünger und N-Wegfuhr mit den Ernteprodukten um 146 kg N/ha/Jahr höher aus, wenn nur die Marktware, nicht aber die Ernterückstände abgeführt wurden (Spiess *et al.*, 2021). Der Verbleib dieses Stickstoffs ist grösstenteils noch unklar, denn nach drei Jahren konnten erst 18% davon mit einer zusätzlichen Nitratauswaschung bei Einarbeitung der Ernterückstände erklärt werden. Ein weiterer Teil dieses Stickstoffs dürfte in gasförmiger Form verloren gegangen sein. Der grösste Teil jedoch dürfte sich immer noch in der organischen Substanz des Bodens befinden.

Die Basiswerte des Nitratindex und von MODIFFUS können diese mittel- bis sehr langfristigen Nachwirkungen nicht direkt abbilden und in den GRUD (Richner und Sinaj, 2017) wird nur die Nachwirkung im Folgejahr berücksichtigt. Insbesondere beim Umbruch einer Wiese und nach dem Ausbringen von Kompost - bei letzterem beträgt der Anteil des pflanzenverfügbaren Stickstoffs nach GRUD nur 5-10% - hat dies grosse Auswirkungen, weil ein grosser Teil des organischen Stickstoffs erst in späteren Jahren oder Jahrzehnten mineralisiert wird.

#### **e) Korrektur der Basiswerte aufgrund der standortbedingten Verhältnisse**

Basiswerte - zumindest diejenigen von MODIFFUS - gelten nur für Standardbedingungen in Bezug auf Boden, Klima und die landwirtschaftliche Bewirtschaftung. Versuchsergebnisse zur Nitratauswaschung von Standorten, die stark von diesen Verhältnissen abweichen, müssen mit Vorsicht betrachtet werden. Und wenn die Basiswerte in einer Region für die Berechnung des Nitratauswaschungspotenzials verwendet werden, wo die Umwelt- und Produktionsbedingungen stark vom Durchschnitt abweichen, sollten sie mit Hilfe von Korrekturfaktoren an die standortspezifischen Verhältnisse angepasst werden. Feldgemüse beispielsweise wird oftmals auf Böden mit höherem Humusgehalt angebaut. Im Gäu wurden die Versuche im NitroGäu-Projekt teilweise auf Feldern mit einer hohen Menge an Gesamtstickstoff im Boden durchgeführt (Bischoff *et al.*, 2021). Die Zunahme der  $N_{\min}$ -Gehalte zwischen zwei Beprobungszeitpunkten war teilweise so hoch, dass sie nicht ausschliesslich mit den N-Düngergaben, der N-Aufnahme durch die Pflanzen und eine mit Hilfe von Normwerten abgeschätzten N-Mineralisierung erklärt werden konnte. Es ist davon auszugehen, dass diese Böden von Natur aus und/oder infolge hoher Gaben an organischen Düngern (z.B. Kompost) in der Vergangenheit ein stark erhöhtes Mineralisierungspotenzial aufweisen.

#### **f) Sind relevante Unterschiede zwischen zwei Kulturkombinationen auch signifikant?**

Die unter einer bestimmten Kulturkombination mit Lysimetern gemessenen Nitratauswaschungsfrachten können je nach Boden (Körnung, Humus- und Skelettgehalt) Lysimetertyp (Oberfläche, Tiefe, eingefüllter Boden oder Monolith), Problemen bei der Bewirtschaftung (z.B. Pflanzenkrankheiten, Schädlinge) und insbesondere je nach Jahr (Lufttemperatur, Niederschlagshöhe und -verteilung, aber auch Hagel und Gewitterstürme) sehr stark variieren. Dies zeigt auch der Lysimeterversuch mit Gemüse in Zürich-Reckenholz

(z.B. beim Vergleich der Ergebnisse von zwei Böden in zwei verschiedenen Jahren; Spiess *et al.*, 2021). Die Unterschiede zwischen zwei Kulturkombinationen im Basiswert von MODIFFUS scheinen daher oftmals plausibel und relevant zu sein, wären aber bei einer statistischen Auswertung kaum signifikant.

## **5 Zwei Ansätze zur Abschätzung des Auswaschungspotenzials von Kulturkombinationen**

Zur Ableitung von Basiswerten für Kulturkombinationen können zwei unterschiedliche Ansätze gewählt werden:

- 1) Abschätzung der N-Menge, die während der Referenzperiode von einem Jahr (z.B. von April bis März des Folgejahres) unter eine bestimmte Bodentiefe ausgewaschen wird und damit nicht länger für die Pflanzen verfügbar ist.

Der Vorteil dieser Methode besteht darin, dass die modellierten Daten mit den ausgewaschenen N-Frachten validiert werden können. Von Nachteil ist, dass die Sickerwasserbildung zwar durch die aktuell angebaute Kultur beeinflusst wird, das mit dem Sickerwasser in eine grössere Bodentiefe verlagerte Nitrat jedoch zu einem grossen Teil durch die Bewirtschaftung in den Vorjahren freigesetzt worden ist und damit nur teilweise der aktuellen Kulturkombination anzurechnen ist.

- 2) Abschätzung der N-Menge, die infolge der aktuellen Kulturkombination in einem Zeitraum von Jahrzehnten ausgewaschen wird.

Bei dieser Methode könnte das Auswaschungspotenzial mit Hilfe von Norm- und Schätzwerten für die N-Flüsse in den und aus dem Boden sowie innerhalb des Bodens berechnet werden. Ein Nachteil ist, dass die erhaltenen Werte nicht mit Versuchsergebnissen validiert werden können. Vorteilhaft ist dagegen, dass nicht diejenige N-Menge abgeschätzt wird, die innerhalb eines Jahres unter einer bestimmten Kulturkombination ausgewaschen wird, sondern das gesamte Auswaschungspotenzial, das dieser Kulturkombination über Jahre und Jahrzehnte letztlich anzulasten ist.

## **6 Entwicklung eines Systems zur Differenzierung der Gemüsekulturen nach dem Nitratauswaschungspotenzial**

Die Basiswerte der Modelle Nitratindex und MODIFFUS basieren auf dem ersten oben dargestellten Ansatz, wobei sie - wo vorhanden - aufgrund von durchschnittlichen Messwerten festgelegt worden sind. Die unter einer bestimmten Kulturkombination ausgewaschene N-Menge kann je nach Boden, Bewirtschaftung und klimatischen Verhältnissen sehr stark variieren. Die beiden Modelle können jedoch diese Einflussfaktoren nur ungenügend bzw. gar nicht erfassen. Die Erstellung eines einfachen Modells zur Abschätzung des durchschnittlichen Auswaschungspotenzials gemäss MODIFFUS erwies sich trotz umfangreichen Versuchen als nicht möglich, weil verschiedene relevante Stickstoff- bzw. Wasserflüsse mit ihrer zeitlichen Auflösung und vertikalen Verlagerung nicht bekannt sind.

Aus diesem Grund wurde als Alternative versucht, das Klassifikationssystem von Zemek *et al.* (2020a, b) weiterzuentwickeln. Dabei wurden folgende Änderungen vorgenommen:

- Es werden nicht mehr einzelne Feldgemüsearten beurteilt, sondern sämtliche Kulturen eines Jahres auf einem bestimmten Schlag.
- Die von Zemek *et al.* (2020a) aufgrund von Literaturwerten ermittelten Ausgangswerte für den N-Düngungsbedarf, die N-Menge in den Ernterückständen sowie die Wurzeltiefe wurden teilweise überarbeitet. Ausserdem wurde ein vierter Parameter, nämlich ein

Abzug für eine Zwischenkultur (Gründüngung oder Zwischenfutter) im folgenden Winter einführt.

- Anstelle der von Zemek *et al.* (2020a) verwendeten vier Klassen und der auf ihnen beruhenden Punkten wurde ein System mit Dezimalzahlen, das für die ersten drei Parameter auf einer Berechnungsformel beruht, eingeführt.

Für den N-Düngungsbedarf wurden die Werte für den Netto-Nährstoffbedarf der Kulturen gemäss GRUD (Richner und Sinaj, 2017) verwendet, weil diese Werte für die landwirtschaftliche Praxis in der Schweiz massgebend sind (Tab. 1). Die N-Menge in den Ernterückständen wurde ebenfalls aus den GRUD übernommen. Für die Wurzeltiefe wurde nicht die maximale Tiefe, d.h. der höchste Wert, der im Boden gemessen werden kann, verwendet, sondern die effektive Wurzeltiefe. Letztere umfasst die Bodenschicht, aus der eine Kulturart den grössten Teil des von ihr benötigten Wassers aufnimmt. Hierfür wurde vorwiegend auf die Standardwerte von Allen *et al.* (1998) und USDA-NRCS (2005) abgestellt. Weitere kulturspezifische Werte wurden über Analogieschlüsse aus den Werten für die maximale Wurzeltiefe von Zemek *et al.* (2020a) abgeleitet.

Für die Berechnung des Gesamtwertes eines Schrages werden nun beim N-Düngungsbedarf und bei der N-Menge in den Ernterückständen die Werte sämtlicher in einem Jahr angebauten Kulturen addiert (Tab. 2). Bei der Wurzeltiefe wird die durchschnittliche Tiefe für die gesamte Vegetationsperiode (229 Tage von April bis Mitte November) ermittelt, indem der Wert für jede Kultur halbiert (Annahme eines linearen Wurzelwachstums während der Kulturdauer), mit einem Standardwert für die Kulturdauer (nach Feller *et al.*, 2011) multipliziert und durch die Dauer der Vegetationsperiode dividiert wird (Formel (1); Tab. 1). Anschliessend können die Werte der einzelnen Kulturen zur Berechnung des Gesamtwerts addiert werden (Tab. 2).

Korrigierte Wurzeltiefe einer Kultur (Bsp.: Chinakohl):

$$\left( \frac{\text{effektive Wurzeltiefe}}{2} \right) \left( \frac{\text{Kulturdauer}}{\text{Vegetationsperiode}} \right) = \left( \frac{60 \text{ cm}}{2} \right) \left( \frac{56 \text{ Tage}}{229 \text{ Tage}} \right) = 7.3 \text{ cm} \quad (1)$$

In einem weiteren Schritt wird die Punktzahl für jeden Parameter des Bewertungssystems ermittelt. Beim N-Düngungsbedarf erfolgt eine Division des Gesamtwerts eines Schrages durch 500 kg N/ha, d.h. den vermutlich höchstmöglichen Wert für zwei bis drei Gemüsekulturen pro Jahr. Bei der N-Menge in den Ernterückständen beträgt der vermutlich höchstmögliche Wert und damit der Divisor 300 kg N/ha und bei der Wurzeltiefe 70 cm. Da bei letzterer ein möglichst hoher Wert erwünscht ist und das Auswaschungspotenzial nicht mit sinkender Wurzeltiefe linear zunimmt, wird der erhaltene Verhältniswert zuerst von 1 abgezogen und dann quadriert (Formel (2)). Für den vierten Parameter wird beim Anbau einer Zwischenkultur ein Wert von -0,5 eingesetzt. Die Summe der Punktzahlen aller vier Parameter ergibt das Gesamttotal in einer Skala, bei der maximal ein Wert von 3 erreicht werden kann, was dem höchsten Auswaschungspotenzial entspricht.

Punktzahl für die Wurzeltiefe (Bsp: Chinakohl + Lauch):

$$\left( 1 - \frac{\text{korrigierte Wurzeltiefe}}{70 \text{ cm}} \right)^2 = \left( 1 - \frac{7.3 \text{ cm} + 8.8 \text{ cm}}{70 \text{ cm}} \right)^2 = \left( 1 - \frac{16.1 \text{ cm}}{70 \text{ cm}} \right)^2 = 0.59 \quad (2)$$

In den Beispielen in Tabelle 2 werden je nach Kulturfolge Punktzahlen von 1,0 bis 2,5 erreicht. Die tiefsten Punktzahlen werden von Kulturkombinationen erreicht, die eine Gründüngung enthalten, grössere Wurzeltiefen erreichen und einen eher niedrigen N-Düngungsbedarf aufweisen. Die Kulturkombinationen mit den höchsten Punktzahlen enthalten keine Zwischenkultur, zeichnen sich hingegen durch einen hohen N-Düngungsbedarf und hohe N-Mengen in den Ernterückständen aus.

Tab. 1: N-Düngungsbedarf, N-Menge in den Ernterückständen, effektive Wurzeltiefe, durchschnittliche Kulturdauer sowie korrigierte effektive Wurzeltiefe für die wichtigsten Freilandgemüsekulturen (Bezeichnung der Kulturen nach GRUD).

Kultur (nach GRUD)	N-Düngungs- bedarf kg N/ha	N-Menge in Rückständen kg N/ha	effektive Wurzeltiefe cm	Kultur- dauer Tage	korr. eff. Wurzeltiefe cm
Blumenkohl	260	200	60	63	8
Broccoli	220	150	50	64	7
Chinakohl, gepflanzt	160	80	60	56	7
Weisskohl, Lager-	190	150	70	90	14
Kohlrabi	130	40	60	42	6
Kohlrabi, Verarbeitung	170	50	60	49	6
Radies, 10 Bund/m <sup>2</sup>	50	0	30	28	2
Rettich, 8-9 Stück/m <sup>2</sup>	110	40	80	40	7
Rosenkohl	260	200	60	150	20
Speiserüben, Herbst-, Mai-	140	60	60	49	6
Wirz, schwer	140	150	60	120	16
Rucola, ein Schnitt	150	0	60	35	5
Cicorino rosso, gepflanzt	110	40	60	65	9
Frisée, gepflanzt	130	60	60	45	6
Endivien, gepflanzt	160	100	60	60	8
Salate, diverse	110	50	30	35	2
Schnittsalat	60	20	30	30	2
Zuckerhut, gepflanzt	130	60	60	66	9
Zuckerhut Convenience	160	60	60	66	9
Fenchel, Knollen-, gepflanzt	160	100	80	60	10
Karotten, Bund-, Früh-	100	20	60	90	12
Karotten, Lager-, Verarbeitung	130	100	60	198	26
Petersilie, gepflanzt	100	20	60	80	10
Sellerie, Knollen-	190	100	40	130	11
Sellerie, Stangen-	180	80	40	85	7
Randen	140	60	60	140	18
Spinat, nicht überwinternd <sup>1)</sup>	130	40	40	42	4
Bohnen, Busch-, Handpflück-	0	150	50	77	8
Bohnen, Verarbeitung-	0	140	50	70	8
Erbsen, Verarbeitung-	0	120	70	70	11
Zucchetti, Kürbis, Patisson	130	100	70	119	18
Lauch, gepflanzt	200	100	40	100	9
Schnittlauch, gepflanzt	170	60	15	84	3
Zwiebeln, gesteckt	130	0	40	140	12
Nüsslisalat	50	0	15	50	2
Zuckermais	150	120	80	105	18

<sup>1)</sup> Aussaat nach Mitte April, ein Schnitt

Tab. 2: Herleitung der Punktzahlen für die vier Parameter "N-Düngungsbedarf" (1), "N-Menge in den Ernterückständen" (2), "korrigierte effektive Wurzeltiefe" (3) und "Zwischenkultur" (4) sowie Gesamttotal anhand von Beispielen aus Praxisbetrieben im Gäu und aus dem Lysimeterversuch in Zürich-Reckenholz. Die Punktzahlen der ersten drei Parameter wurden zur besseren Visualisierung eingefärbt (grün = tiefer Wert; rot = hoher Wert).

Kulturfolge im Jahr			1) N-Düngungsbedarf (kg N/ha)				2) N-Menge in Ernterückständen (kg N/ha)				3) korrigierte effektive Wurzeltiefe (cm)				Punktzahlen				
Kultur 1	Kultur 2	Kultur 3	Ku.1	Ku.2	Ku.3	Total	Ku.1	Ku.2	Ku.3	Total	Ku.1	Ku.2	Ku.3	Total	1)	2)	3)	4)	Total
															N-Dü.	N-Me.	Tiefe	ZK	Total
Cicorino rosso	Frisée	Gründüngung	110	130	30	270	40	60	85	185	9	6	12	26	0.5	0.6	0.4	-0.5	1.0
Frisée	Cicorino rosso	Gründüngung	130	110	30	270	60	40	85	185	6	9	12	26	0.5	0.6	0.4	-0.5	1.0
Weisskohl, Lager-	Gründüngung		190	30		220	150	85		235	14	12		26	0.4	0.8	0.4	-0.5	1.1
Salate, div.	Frisée	Gründüngung	110	130	30	270	50	60	85	195	2	6	12	20	0.5	0.7	0.5	-0.5	1.2
Endivien	Salate, div.	Gründüngung	160	110	30	300	100	50	85	235	8	2	12	22	0.6	0.8	0.5	-0.5	1.4
Salate, div.	Endivien	Gründüngung	110	160	30	300	50	100	85	235	2	8	12	22	0.6	0.8	0.5	-0.5	1.4
Salate, div.	Zucchetti		110	130		240	50	100		150	2	18		20	0.5	0.5	0.5	0	1.5
Weisskohl, Lager-			190			190	150			150	14			14	0.4	0.5	0.6	0	1.5
Fenchel, Knollen-	Chinakohl		160	160		320	100	80		180	10	7		18	0.6	0.6	0.6	0	1.8
Weisskohl, Lager-	Zuckerhut		190	130		320	150	60		210	14	9		22	0.6	0.7	0.5	0	1.8
Chinakohl	Lauch		160	200		360	80	100		180	7	9		16	0.7	0.6	0.6	0	1.9
Endivien	Broccoli		160	220		380	100	150		250	8	7		15	0.8	0.8	0.6	0	2.2
Salate, div.	Blumenkohl		110	260		370	50	200		250	2	8		11	0.7	0.8	0.7	0	2.3
Blumenkohl	Salate, div.	Nüsslisalat	260	110	50	420	200	50	0	250	8	2	2	12	0.8	0.8	0.7	0	2.4
Broccoli	Salate, div.	Salate, div.	220	110	110	440	150	50	50	250	7	2	2	12	0.9	0.8	0.7	0	2.4
Broccoli	Broccoli		220	220		440	150	150		300	7	7		14	0.9	1.0	0.6	0	2.5

Ku. = Kultur; N-Dü. = N-Düngungsbedarf; N-Me. = N-Menge in den Ernterückständen; Tiefe = "korrigierte effektive Wurzeltiefe"; ZK = Zwischenkultur

Mit diesem Bewertungssystem werden bedeutende kulturspezifische Treiber der Nitratauswaschung erfasst. Beim N-Düngungsbedarf wird allerdings bei organischen Düngern nur der kurz- und mittelfristig verfügbare Stickstoff berücksichtigt, nicht aber derjenige Teil des organischen Stickstoffs, der erst langfristig, d.h. nach vielen Jahren oder Jahrzehnten mineralisiert wird. Um diesen Stickstoff berücksichtigen zu können, müssten verlässliche Daten von Praxisbetrieben zum Einsatz von organischen Düngern im Feldgemüsebau verfügbar sein.

Die Klassenbildung im Bewertungssystem von Zemek *et al.* (2020a, b) führt zu Sprüngen an den Klassenübergängen, so dass zwei Kulturen, die fast den gleichen Wert bei einem Parameter aufweisen, eine unterschiedliche Punktzahl erhalten können. Durch die Einführung von Dezimalzahlen kommt es zu einer gleichmässigeren und etwas genaueren Bewertung. Mit den Dezimalzahlen wird jedoch auch eine Genauigkeit vorgetäuscht, die in Wirklichkeit nicht vorhanden ist. Ein Unterschied zwischen den Gesamtwerten zweier Kulturen von 0,3 dürfte in vielen Fällen nicht signifikant sein, weil das gesamte Bewertungssystem und insbesondere die Eingangsgrössen mit Mängeln behaftet sind.

Die Daten, die den GRUD entnommen worden sind (N-Düngungsbedarf und N-Menge in den Ernterückständen), bedürfen einer Überarbeitung und bei der effektiven Wurzeltiefe ist die Datenbasis bei den meisten Gemüsekulturen ungenügend. Die Reduktion der Nitratauswaschung durch Zwischenkulturen ist zwar häufig mit Versuchen belegt worden, trotzdem ist der Einfluss von Kulturtyp, Nutzungsform (Gründüngung oder Zwischenfutter) und Saat- und Umbruchzeitpunkt sowie die Wechselwirkungen zwischen diesen Faktoren noch zu wenig untersucht. Grosser Forschungsbedarf besteht im Weiteren für die Anrechnung bzw. Freisetzung von Stickstoff aus organischen Quellen wie organischen Düngern, Ernterückständen und dem Humus. Dabei stellen sich folgende Fragen: Wann wird wie viel mineralisiert bzw. humifiziert? Ist die Humusbilanz und damit auch die Bilanz des organischen Stickstoffs ausgeglichen? Wie hat die landwirtschaftliche Bewirtschaftung zu erfolgen, so dass möglichst viel organischer Stickstoff nach dessen Mineralisierung von den Gemüsekulturen aufgenommen werden kann?

Das hier vorgestellte Bewertungssystem wurde gegenüber demjenigen von Zemek *et al.* (2020a) durch die Überarbeitung der Eingangsparameter und der Berechnungsmethode verbessert. Zudem kann nun erstmals eine Folge mit sämtlichen Gemüse- und Zwischenkulturen, die im Laufe eines Jahres auf einem Schlag angebaut werden, beurteilt werden und nicht nur eine einzelne Gemüsekultur wie bisher. Das neue System erlaubt jedoch nur eine qualitative und keine quantitative Abschätzung des Nitratauswaschungspotenzials. Es gibt Hinweise, bei welchen Kulturfolgen eher mit hohen bzw. niedrigen Auswaschungsverlusten zu rechnen ist, lässt aber nicht die Quantifizierung dieser Verluste zu. Deshalb eignet sich das Bewertungssystem für die Planung und Beratung von Gemüsebaubetrieben und nicht für den Vollzug von Massnahmen in einem Nitratprojekt.

## **7 Verdankung**

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

## 8 Literatur

- Allen R.G., Pereira L.S., Raes D. and Smith M. (1998): Crop evapotranspiration - guidelines for computing crop water requirements. FAO Irrigation and drainage paper 56. Food and Agriculture Organization, Rome.
- Bischoff W.-A., Schwarz A., Kühfuss S. und Williams D. (2021): Stickstoffeffizienz im Acker- und Gemüsebau für eine Reduktion des Nitratreintrages ins Grundwasser (NitroGäu). Abschlussbericht zu TP 2.2: N-Verluste und N-Bilanzen im praktischen Gemüsebau der Region Niederbipp-Gäu-Olten. Gutachterbüro TerrAquat, Nürtingen, 83 S.
- Bünemann (2017): Stickstoffeffizienz im Acker- und Gemüsebau für eine Reduktion des Nitratreintrages ins Grundwasser - Projektantrag. FiBL Schweiz, Frick, 27 S.
- Feller C., Fink M., Laber H., Maync A., Paschold P., Scharpf H. C., Schlaghecken J., Strohmeyer K., Weier U. und Ziegler J. (2011): Düngung im Freilandgemüsebau. Schriftenreihe des Leibniz-Instituts für Gemüse- und Zierpflanzenbau (IGZ), 3. Auflage, Heft 4, Grossbeeren.
- Gerber S. (1995): Nitrat-Risiko-Index. Landwirtschaftliche Schule Oberland, Wetzikon. 25 S. (unveröffentlicht).
- Hürdler J., Prasuhn V. und Spiess E. (2015): Abschätzung diffuser Stickstoff- und Phosphoreinträge in die Gewässer der Schweiz MODIFFUS 3.0. Bericht im Auftrag des Bundesamtes für Umwelt (BAFU). Agroscope INH, Zürich-Reckenholz, 117 S.
- Magnollay F. (1991): Eine Schätzmethode zur Beurteilung der Nitratauswaschung. UFA-Revue Nr. 9, 22-23.
- Prasuhn V. und Spiess E. (2003): Regional differenzierte Abschätzung der Nitratauswaschung über Betriebszählungsdaten. In: Bericht über die 10. Lysimetertagung. Bundesanstalt für alpenländische Landwirtschaft Gumpenstein, Irdning, 55-57.
- Richner W. und Sinaj S. (2017): Grundlagen für die Düngung landwirtschaftlicher Kulturen in der Schweiz (GRUD 2017). Agrarforschung Schweiz 8 (6), Spezialpublikation, 276 S.
- Spiess E., Humphrys C., Liebisch F., Prasuhn V. und Neuweiler R. (2021): Nitratauswaschung unter Gemüse bei unterschiedlichem Ernterückstandsmanagement. In: 19. Gumpensteiner Lysimetertagung. HBLFA Raumberg-Gumpenstein, Irdning-Donnersbachtal, 87-94. <https://ira.agroscope.ch/de-CH/Page/Publikation?einzelpublikationId=48761&parentUrl=%2ffr-CH%2fPage%2fPublikationsliste%2fIndexMitarbeiter%3fagroscopeId%3d21166> [06.12.2021].
- USDA-NRCS (2005): New Jersey irrigation guide. United States Department of Agriculture (USDA), Natural Resources Conservation Service (NRCS), Somerset, New Jersey. [https://www.nrcs.usda.gov/wps/portal/nrcs/detail/nj/technical/engineering/?cid=nrcs141p2\\_018736](https://www.nrcs.usda.gov/wps/portal/nrcs/detail/nj/technical/engineering/?cid=nrcs141p2_018736) [06.12.2021].
- Vetsch A., Keiser A. und Strässle B. (2000): Dokumentation zum 'Einschätzungssystem der landwirtschaftlichen Bewirtschaftung bezüglich der Gefährdung von Nitratauswaschung ins Grundwasser'. Projektarbeit der Schweizerischen Hochschule für Landwirtschaft (SHL) in Zollikofen, 17 S.
- Zemek O., Neuweiler R., Spiess E., Stüssi M. und Richner W. (2020a) Nitratauswaschungspotenzial im Freilandgemüsebau – eine Literaturstudie. Agroscope Science Nr. 95, 117 S.
- Zemek O., Neuweiler R., Richner W., Liebisch F. und Spiess E. (2020b): Abschätzung und Reduktion der Nitratauswaschung im Gemüsebau. Agrarforschung Schweiz 11, 76-81.