



## Nitratauswaschungspotenzial im Freilandgemüsebau – eine Literaturstudie

Autoren

Oliver Zemek, Reto Neuweiler, Ernst Spiess, Martin Stüssi und  
Walter Richner



Schweizerische Eidgenossenschaft  
Confédération suisse  
Confederazione Svizzera  
Confederaziun svizra

Eidgenössisches Departement für  
Wirtschaft, Bildung und Forschung WBF  
**Agroscope**

## Impressum

Herausgeber	Agroscope Reckenholzstrasse 191 8046 Zürich <a href="http://www.agroscope.ch">www.agroscope.ch</a>
Auskünfte	Ernst Spiess, E-Mail: <a href="mailto:ernst.spiess@agroscope.admin.ch">ernst.spiess@agroscope.admin.ch</a>
Gestaltung	Jacqueline Gabriel
Titelbild	Ernst Spiess
Copyright	© Agroscope 2020
ISSN	2296-729X
DOI	<a href="https://doi.org/10.34776/as95g">https://doi.org/10.34776/as95g</a>

Die Kurzfassung dieses Berichts ist auf Deutsch, Französisch und Englisch in der Online-Zeitschrift [www.agrarforschungschweiz.ch](http://www.agrarforschungschweiz.ch) erschienen.

# Inhaltsverzeichnis

<b>Inhaltsverzeichnis</b> .....	<b>3</b>
<b>Kurzfassung</b> .....	<b>5</b>
Ausgangslage und Zielsetzung .....	5
Vorgehen und Methodik .....	5
Resultate.....	5
<b>1 Einleitung</b> .....	<b>8</b>
1.1 Ausgangslage.....	8
1.2 Zielsetzung der Literaturstudie .....	8
1.3 Methodik der Literatursuche und -auswertung.....	9
1.4 Definition gemüsebaulicher Begriffe .....	9
1.4.1 Kulturzeitraum .....	9
1.4.2 Freilandanbau .....	9
1.5 Freilandgemüsebau in der Schweiz und im Kanton Solothurn .....	10
1.5.1 Anbaufläche.....	10
1.5.2 Produktion .....	11
1.5.3 Betriebsstruktur .....	11
<b>2 Nitrat Auswaschungsverluste im Freilandgemüsebau</b> .....	<b>12</b>
2.1 Methoden zur Abschätzung von Nitrat Auswaschungsverlusten .....	12
2.2 Mineralische Bodenstickstoffgehalte nach der Ernte im Freilandgemüsebau .....	12
2.3 Stickstofffrachten unter Freilandgemüse – Saugkerzenmethode .....	14
2.4 Stickstofffrachten unter Freilandgemüse – Lysimeter.....	15
2.5 Nitratakkumulation unter Freilandgemüse – Ionenakkumulatoren.....	17
2.6 N-Verluste unter Freilandgemüse – Modelle.....	18
2.7 Fazit.....	20
<b>3 Ernterückstände im Freilandgemüsebau</b> .....	<b>21</b>
3.1 Kulturspezifische Mengen und N-Mengen von ober- und unterirdischen Ernterückständen.....	21
3.2 N-Freisetzung aus Ernterückständen.....	23
3.3 Management von Ernterückständen .....	24
3.3.1 In-situ-Management der Ernterückstände .....	24
3.3.2 Ex-situ-Management der Ernterückstände.....	25
3.4 Fazit und Anwendbarkeit.....	26
<b>4 Wurzeltiefe der Gemüsearten</b> .....	<b>27</b>
4.1 Einflussfaktoren auf das Wurzelwachstum .....	27
4.2 Einteilung der Gemüsearten nach Wurzeltiefe.....	27
4.3 Anwendungsmöglichkeiten.....	28
4.4 Fazit.....	31
<b>5 Evaluierung der Bewirtschaftungsmassnahmen im Freilandgemüsebau</b> .....	<b>32</b>
5.1 Düngung .....	32
5.1.1 Düngemittel .....	32
5.1.2 Düngemittelausbringung .....	34

5.1.3	Düngebedarf der Gemüsearten und Methoden der Düngebedarfsermittlung .....	35
5.1.4	Fazit.....	39
5.2	Bewässerung.....	40
5.2.1	Wasserbedarf von Freilandgemüseulturen .....	40
5.2.2	Bewässerungssteuerung.....	41
5.2.3	Bewässerung und N-Auswaschung .....	41
5.2.4	Fazit.....	42
5.3	Bodenbearbeitung.....	43
5.3.1	Verfahren der konservierenden Bodenbearbeitung und Anwendungsbeispiele.....	44
5.3.2	Reduktion der N-Auswaschung durch die Bodenbearbeitung - Versuchsergebnisse .....	47
5.3.3	Fazit.....	47
5.4	Anbauplanung: Frucht- und Kulturfolge .....	48
5.4.1	Zwischenfrüchte zur Reduktion der N-Auswaschung .....	48
5.4.2	Fazit.....	51
<b>6</b>	<b>Nitratauswaschungspotenzial der Gemüsearten.....</b>	<b>52</b>
6.1	Herleitung .....	52
6.2	Klassifizierung .....	52
6.3	Fazit.....	53
<b>7</b>	<b>Massnahmen zur Reduzierung der N-Auswaschung im Freilandgemüsebau.....</b>	<b>55</b>
7.1	Massnahmenbewertung .....	55
7.2	Fazit.....	57
<b>8</b>	<b>Schlussfolgerungen.....</b>	<b>58</b>
	<b>Literaturverzeichnis.....</b>	<b>60</b>
	<b>Anhang .....</b>	<b>74</b>
	<b>Abkürzungsverzeichnis .....</b>	<b>114</b>
	<b>Abbildungsverzeichnis .....</b>	<b>115</b>
	<b>Tabellenverzeichnis.....</b>	<b>116</b>
	<b>Anhangverzeichnis.....</b>	<b>117</b>

# Kurzfassung

## Ausgangslage und Zielsetzung

In der Region Gäu-Oltén im Kanton Solothurn wird seit dem Jahr 2003 ein Massnahmenprogramm in der Landwirtschaft nach Art. 62a Gewässerschutzgesetz zur Reduktion der erhöhten Nitratgehalte im Grundwasser umgesetzt. Nach Abschluss von zwei sechsjährigen Projektphasen ohne ausreichende Zielerreichung sollen in einer dritten Projektphase (2015–2020) die Wirksamkeit der Massnahmen, die auf dem sogenannten «Nitratindex» basieren, wissenschaftlich aufgearbeitet, Massnahmen zur Verbesserung der Stickstoffeffizienz und Verringerung der N-Auswaschung geprüft und Vorschläge zur Umsetzung der Ergebnisse gemacht werden. Für die Überprüfung der Massnahmen hat das Solothurner Amt für Umwelt das Projekt «Stickstoffeffizienz im Acker- und Gemüsebau für eine Reduktion des Nitratreintrages ins Grundwasser» unter der Leitung des Forschungsinstituts für biologischen Landbau (FiBL) in Auftrag gegeben. Als Grundlage für die Weiterentwicklung des «Nitratindex» für die Anwendung im Feldgemüsebau wurde von Agroscope eine Literaturstudie erstellt mit der Zielsetzung, (i) die Gemüsearten nach deren Nitratauswaschungspotenzial zu klassifizieren, (ii) Bewirtschaftungsmassnahmen (primär Düngung, Bewässerung, Bodenbearbeitung und Kultur-/Fruchtfolge) zur Reduktion der N-Auswaschung zu evaluieren und (iii) den Forschungsbedarf in verschiedenen Bereichen aufzuzeigen.

## Vorgehen und Methodik

In die Literaturstudie einbezogen wurden alle in der Schweiz im Freiland angebauten Gemüsearten, die im Mittel der Jahre 2012–2016 eine Anbaufläche von mindestens 5 ha aufwiesen. Quantitative Daten von rund 3000 Publikationen (i) zu N-Verlusten durch Auswaschung, (ii) zur N-Düngebedarf, (iii) über N-Mengen in Ernterückständen und (iv) zur Wurzeltiefe der Gemüsearten wurden zusammengestellt. Mit Hilfe der drei letzten Parameter wurde anschliessend das Nitratauswaschungspotenzial der Gemüsearten eingeschätzt. Dazu wurden die Gemüsearten für jeden Parameter in eine von vier Klassen eingeteilt, wobei die Zuordnung aufgrund des Mittelwerts (N-Düngebedarf, N-Menge in Ernterückständen) oder des Medians (Wurzeltiefe) der jeweiligen Angaben in der Literatur erfolgte. Jeder Klasse wurde eine Punktzahl von 1 (geringer) bis 4 (sehr hoher Beitrag zum Nitratauswaschungspotenzial) zugeordnet. Aus der Summe der Punkte der drei Parameter, die minimal 3 und maximal 12 beträgt, ergibt sich das Nitratauswaschungspotenzial für eine Gemüseart.

## Resultate

### *Nitratauswaschungspotenzial*

Die aus der Literaturrecherche gewonnenen Angaben zu N-Verlusten durch Auswaschung zeigen ungeachtet der Methodik (Lysimeter, Saugkerzen, Anion-Austauschverfahren, Bodenproben, Modellierung) ein erhebliches Nitratauswaschungspotenzial unter bzw. nach Gemüsekulturen im Freiland. Beispielweise wurden mit Hilfe von Lysimetern während des Winterhalbjahrs N-Frachten von bis zu 150 kg N ha<sup>-1</sup> gemessen. Ein Vergleich von Bodenproben aus 0–90 cm Tiefe zu Beginn des Winterhalbjahres ergab im Mittel Gehalte an mineralischem Stickstoff (N<sub>min</sub>) von 88 kg ha<sup>-1</sup>. Die publizierten Ergebnisse zu den Nitratfrachten eignen sich jedoch nicht oder nur bedingt für eine Differenzierung der Nitratausträge nach Gemüsearten. Dies ist begründet in der grossen Heterogenität der Versuchsbedingungen, z. B. bezüglich der gewählten Methodik, den Messparametern, der Fragestellung und der angewandten Kulturmassnahmen.

Der **N-Düngebedarf** ergibt sich aus der Differenz zwischen dem gemüseart-spezifischen N<sub>min</sub>-Sollwert und dem gemessenen N<sub>min</sub>-Gehalt im Boden vor Kulturbeginn. Der N<sub>min</sub>-Sollwert repräsentiert das N<sub>min</sub>-Angebot, mit dem im Mittel vieler Düngungsversuche der Höchstertragsbereich gerade erreicht wird. Um Qualitätseinbussen (z. B. unzureichende Grünfärbung der Blätter) zu vermeiden, muss dabei ein N<sub>min</sub>-Mindestvorrat im

durchwurzelten Bodenbereich bis zur Ernte vorhanden sein, denn ein grosser Teil der Feldgemüsearten wird schon zu einem Zeitpunkt geerntet, bei dem der N-Bedarf der Kulturen noch hoch ist. Die Gemüsearten wurden nach dem  $N_{\min}$ -Sollwert in vier Klassen eingeteilt: gering ( $< 150 \text{ kg N ha}^{-1}$ ), mässig ( $150\text{--}200 \text{ kg N ha}^{-1}$ ), hoch ( $200\text{--}250 \text{ kg N ha}^{-1}$ ) und sehr hoch ( $> 250 \text{ kg N ha}^{-1}$ ). Kohlgemüse (z. B. Rosenkohl, Kabis) weisen im Vergleich zu Blattgemüse (z. B. Nüsslisalat und Spinat) einen hohen N-Düngebedarf auf.

Im Zuge der Ernte können im Freilandgemüsebau erhebliche Mengen an **Ernterückständen** mit entsprechend grossen Mengen an N auf dem Feld anfallen. Im Durchschnitt aller Kulturen verbleiben  $118 \text{ kg N ha}^{-1}$  mit den Ernterückständen auf dem Feld, wobei die Spanne von 5 bis  $550 \text{ kg N ha}^{-1}$  reicht. Die Gemüsearten wurden in folgende vier Klassen eingeteilt: gering ( $< 50 \text{ kg N ha}^{-1}$ ), niedrig ( $50\text{--}100 \text{ kg N ha}^{-1}$ ), hoch ( $100\text{--}200 \text{ kg N ha}^{-1}$ ) und sehr hoch ( $> 200 \text{ kg N ha}^{-1}$ ). Sehr hohe N-Mengen verbleiben im Feld mit den Ernterückständen der Kohlgemüse wie beispielsweise Rosenkohl oder Brokkoli, aber auch Zucchetti, während nach der Ernte von Blattgemüse wie Spinat oder Nüsslisalat relativ geringe N-Mengen in Form von Ernterückständen auf dem Feld zurückbleiben.

Die Unterscheidung der Gemüsearten nach ihrer **Wurzeltiefe** ist wichtig in Bezug auf den Grundwasserschutz, weil Nitrat in tieferen Bodenschichten mehr auswaschungsgefährdet ist. Dabei lassen die wenigen verfügbaren Publikationen auf grosse Unterschiede in der Durchwurzelungstiefe zwischen den Gemüsearten schliessen. Die Gemüsearten wurden in folgende vier Klassen eingeteilt: tief- ( $>150 \text{ cm}$ ), mitteltief- bis tief- ( $100\text{--}150 \text{ cm}$ ), flach- bis mitteltief- ( $50\text{--}100 \text{ cm}$ ), flachwurzelnd ( $<50 \text{ cm}$ ). Zu den flachwurzelnden Arten gehören die Lactuca-Salate und der Nüsslisalat. Gemüsearten wie Karotten, Cichorium-Salate und Kabis wurzeln vorwiegend mitteltief bis tief. Grössere Tiefen erreichen die seltener angebauten Gemüsearten wie Schwarzwurzel und die mehrjährigen Kulturen Spargel und Rhabarber.

Ein hohes **Nitratauswaschungspotenzial** (Punktzahl: 10–12) besteht insbesondere bei den Kohlarten (z. B. Blumenkohl, Brokkoli und Rosenkohl), während Blattgemüsearten (z. B. Salate, Spinat und Rucola) ein geringes (3–5) bis mittleres Potenzial (6–9) aufweisen. Das erhöhte Potenzial der Kohlarten beruht auf der hohen N-Düngung und den hohen N-Mengen der Ernterückstände, wobei bei Kabis die in der Literatur hervorgehobene Wurzeltiefe zur Verringerung des Potenzials beiträgt. Im Gegensatz dazu zeigt sich bei den Blattgemüsen, die zwar meist eine geringe Wurzeltiefe aufweisen, ein geringes bis mittleres Potenzial aufgrund der geringeren N-Düngung und der kleineren N-Menge, die mit den Ernterückständen auf dem Feld verbleibt. Die vorgenommene Einordnung der Gemüsearten kann in Modellen wie «Nitratindex 2.0» und MODIFFUS als Grundlage für eine Differenzierung nach dem Auswaschungspotenzial genutzt werden.

### **Evaluation der Bewirtschaftungsmassnahmen zur Reduktion der Nitratauswaschung**

In der Literatur finden sich viele mögliche Massnahmen, die angewendet werden können, um die Nitratauswaschungsverluste im Freilandgemüsebau zu reduzieren. Die Fülle an Massnahmen lässt sich neun Bereichen zuordnen: 1. Bewässerung, 2. N-Düngung, 3. Frucht-/Kulturfolge, 4. Ernterückstände, 5. Bodenbearbeitung, 6. Informationsaustausch, 7. Umstellung des Anbausystems, 8. Precision farming und 9. Sonstiges. Die Bewertung der Massnahmen nach ihrem Reduktionspotenzial, dem Wissensstand und ihrer Praxistauglichkeit ergab vier Massnahmen mit einem grossen Reduktionspotenzial, die breit anwendbar und relativ kostengünstig zu implementieren sind:

- **Steuerung der Bewässerung:** Die sachgerechte Bewässerung kann das N-Auswaschungsrisiko reduzieren und gewährleistet ein für die bestmögliche Nährstoffaufnahme der Pflanzen notwendiges Wasserangebot und somit ein optimales Pflanzenwachstum und eine hohe Produktqualität. Um den Bewässerungsbedarf der Gemüsekultur möglichst effizient und mit an das Wachstum angepassten Wassergaben zu decken, empfiehlt sich eine Steuerung der Bewässerung. Hierzu stehen primär vier verschiedene Methoden als Entscheidungshilfe zur Verfügung: (i) die klimatische Wasserbilanz (z. B. Geisenheimer Steuerung), (ii) mehrschichtige Bodenfeuchte- und Evapotranspirationsmodelle, (iii)

Bodenfeuchtesensoren und (iv) das kontinuierliche Monitoring des Pflanzenbestandes durch Messungen von Pflanzeigenschaften (z. B. Bestandestemperatur).

- **Verbesserte Ermittlung des N-Düngebedarfs:** Bei der Düngung spielt neben der Wahl der Düngemittel und deren Ausbringung die Ermittlung des Düngebedarfs eine entscheidende Rolle. Hierzu gibt es unterschiedliche Herangehensweisen für die Bemessung. Die aussichtsreichsten sind die  $N_{\min}$ -Methode, das Kulturbegleitende- $N_{\min}$ -Sollwert-System (KNS) und das EDV-Programm N-Expert. Beispielsweise um den N-Düngebedarf mit Hilfe der  $N_{\min}$ -Methode abzuschätzen, wird vor Kulturbeginn die  $N_{\min}$ -Menge in der von den Wurzeln nutzbaren Bodenschicht durch die Entnahme von Bodenproben gemessen.
- **Verbesserte Fruchtfolgen dank Anbau von Zwischenfrüchten:** In Bezug auf die Optimierung der Frucht-/Kulturfolge unterscheidet man begrifflich zwischen Mischkultur, Untersaat und Zwischenfrucht. Bei der Mischkultur wird eine Zwischenfrucht als Nebenfrucht gleichzeitig mit der Hauptfrucht, bei der Untersaat einige Wochen nach der Saat und bei der Zwischenfrucht nach der Hauptkultur angesät. Die Auswahl an Kulturen, die im Spätsommer und Herbst als Zwischenfrüchte genutzt werden können, umfasst unter anderem verschiedene Gräser (z. B. Italienisches Raigras), Leguminosen (z. B. Winterwicke), Mischungen aus den letzteren (z. B. das Landsberger Gemenge), aber auch Gemüsearten (z. B. Kohlarten) und der erneute Aufwuchs bei einigen Herbstkulturen (z. B. Spinat), deren Wurzelwerk durch die Ernte nicht beschädigt wurde. Allen Zwischenfrüchten ist gemein, dass sie N aus dem Boden aufnehmen und in ihrer Biomasse speichern sowie die Sickerwassermenge durch die Wasseraufnahme reduzieren.
- **Optimierung des Ernterückstandmanagements:** Während die Ernterückstände bis anhin vorwiegend auf den Feldern zurückbleiben, sollte in Zukunft bei Gemüsearten mit hohen N-Mengen im zurückbleibenden Pflanzenmaterial in der zweiten Jahreshälfte die Abfuhr der Ernterückstände mit nachfolgender Weiterverwertung in Vergärungs- und Kompostieranlagen in Erwägung gezogen werden.

### **Forschungsbedarf in verschiedenen Bereichen**

- Für eine Differenzierung einzelner Gemüsearten anhand von Messdaten sollten neue Studien in Auftrag gegeben werden. Aus praxisrelevanten Gesichtspunkten sollten hierbei jedoch anstatt einzelner Gemüsearten vielmehr gemüsebauliche Kultur- oder Fruchtfolgen, die typisch für die Schweiz sind, untersucht werden.
- Überprüfung der aktuellen Düngungsnormen und der Verwendung von Sicherheitsmargen insbesondere im bewässerten Anbau. Angepasste Düngung in Bezug auf aktuelle Ertrags- und Qualitätserwartungen und Sortenunterschiede. Insbesondere im Serienanbau sind Jahreszeitenunterschiede im Düngebedarf zu berücksichtigen. Existierende Expertensysteme wie z. B. N-Expert sollten unter Schweizer Bedingungen getestet werden.
- Für die Bodenbearbeitung im Freilandgemüsebau stehen neben dem intensiven Pflugverfahren, verschiedene Techniken für eine konservierende Bodenbearbeitung zur Verfügung. Diese Verfahren gelten als effektive Praktiken für nachhaltige Produktionssysteme, insbesondere durch ihren nachgewiesenen Beitrag zum Erosionsschutz. Jedoch bleibt die Frage, in welchem Ausmass diese Verfahren die N-Dynamik im Boden und somit die N-Auswaschung im Gemüsebau beeinflussen, derzeit unbeantwortet. Wie unsere Literaturrecherche zeigt, existieren im Gemüsebau bisher fast keine Versuche, die diese Fragestellung untersuchen.
- Zur Verbesserung des Umgangs mit den Ernterückständen sollte untersucht werden, wie der auswaschungsgefährdete N im zurückbleibenden Pflanzenmaterial besser konserviert werden kann.

# 1 Einleitung

## 1.1 Ausgangslage

In der Region Gäu-Olten im Kanton Solothurn werden in den Grundwasserpumpwerken Neufeld/Neuendorf, Zelgli/Kappel und Gheid/Olten seit den 1980er Jahren hohe Nitrat( $\text{NO}_3^-$ )-Konzentrationen gemessen (Hunkeler *et al.* 2015), die über dem Anforderungswert von  $25 \text{ mg NO}_3^- \text{ L}^{-1}$  der Gewässerschutzverordnung (GSchV 1998) an die Wasserqualität von Grundwasser, das als Trinkwasser genutzt wird oder dafür vorgesehen ist, liegen. Bei einem Pumpwerk liegen sie nur wenig unter der chemischen Anforderung an Trinkwasser von  $40 \text{ NO}_3^- \text{ mg L}^{-1}$  (TBDV 2016), bei deren Überschreitung das Wasser für die menschliche Ernährung als ungeeignet gilt. Zur Reduktion der erhöhten Nitratkonzentrationen wird im Dünnergäu zwischen Oensingen und Olten seit dem Jahr 2003 auf einer Fläche von 1658 ha ein Massnahmenprogramm in der Landwirtschaft nach Art. 62a Gewässerschutzgesetz (GSchG 1991) umgesetzt. Nach Abschluss von zwei sechsjährigen Projektphasen wurde das Ziel einer Reduktion der Nitratkonzentrationen im Grundwasser unter  $25 \text{ mg NO}_3^- \text{ L}^{-1}$  durch die bisher getroffenen Massnahmen jedoch nicht erreicht. Dies hat mehrere Gründe, welche sowohl hydrogeologische Gegebenheiten, die räumliche Begrenzung des Grundwassereinzugsgebiets sowie die Effektivität und den Umfang der bisher getroffenen Massnahmen beinhalten (AfU 2015).

Seit 2015 wird die Arbeit in einer dritten Projektphase (2015–2020) fortgesetzt. Dabei werden die bisher gewonnenen Erkenntnisse genutzt, um die Massnahmen zu überprüfen, zu optimieren und zu erweitern. Für die Überprüfung der Bewirtschaftungsmassnahmen hat das Amt für Umwelt des Kantons Solothurn im April 2016 das Projekt «Stickstoffeffizienz im Acker- und Gemüsebau für eine Reduktion des Nitratreintrages ins Grundwasser» unter der Leitung des Forschungsinstituts für biologischen Landbau (FiBL) in Auftrag gegeben. Ziel des vierjährigen Projekts (2017–2021) ist, die Wirksamkeit der Massnahmen basierend auf dem sogenannten «Nitratindex» (Vetsch 2000) wissenschaftlich aufzuarbeiten, Massnahmen zur Verbesserung der Stickstoff(N)-Effizienz und gleichzeitigen Verringerung der N-Auswaschung zu prüfen und Vorschläge zur Umsetzung der Ergebnisse, z. B. in einem «Nitratindex 2.0», zu machen (Bünemann 2017).

## 1.2 Zielsetzung der Literaturstudie

In dem vom FiBL geleiteten Projekt hat Agroscope die Aufgabe übernommen, den Gemüsebau, der bislang im Projektgebiet von Massnahmen ausgenommen war, bezüglich des Nitratauswaschungspotenzials zu evaluieren. Die Evaluation soll als Grundlage für die Weiterentwicklung des «Nitratindex» für die Anwendung im Gemüsebau und für die kulturspezifische Differenzierung des bisher einheitlichen Wertes für die N-Auswaschung bei Gemüse von  $150 \text{ kg N ha}^{-1}$  im Stoffflussmodell MODIFFUS (Hürdler *et al.* 2015; Prasuhn *et al.* 2016) dienen. Hierzu wird in einem dreijährigen Lysimeterversuch der Einfluss der Ernterückstände auf die Nitratauswaschung unter Gemüse, das in einer intensiven Kulturfolge angebaut wird, untersucht. Des Weiteren soll mit Hilfe einer Literaturstudie die aktuelle Literatur zum Nitratauswaschungspotenzial unter den verschiedenen Gemüsearten aufgearbeitet werden. Der nachfolgende Bericht fasst die Ergebnisse der Literaturstudie zusammen, deren spezifische Zielsetzung folgende Aspekte beinhaltet:

- Bereitstellung von quantitativen Daten
  - zu N-Verlusten durch Auswaschung im Freilandgemüsebau
  - über N-Mengen in Ernterückständen von Gemüsearten
  - zur Wurzeltiefe der Gemüsearten
- Klassifizierung der Gemüsearten nach deren Nitratauswaschungspotenzial
- Evaluierung der Bewirtschaftungsmassnahmen Düngung, Bewässerung, Bodenbearbeitung und Kulturfolge im Freilandgemüsebau in Bezug auf die N-Verlusten durch Auswaschung

- Zusammenfassung und Beurteilung grundwasserschonender Bewirtschaftungsmassnahmen für den Freilandgemüsebau

### 1.3 Methodik der Literatursuche und -auswertung

Um die Anzahl der Gemüsearten für die Literatursuche einzugrenzen, wurde in einem ersten Schritt die Fläche aller in der Schweiz erwerbsmässig im Freiland angebauten Frischgemüsearten auf Grundlage der statistischen Jahresberichte der Schweizerische Zentralstelle für Gemüsebau und Spezialkulturen (SZG) über die Jahre 2012–2016 gemittelt. Für eine möglichst breite Abdeckung wurden alle nach Suisse Garantie (SGA) oder dem biologischen Landbau (Bio) angebauten Gemüsearten mit einem Flächenanteil von mindestens 5 ha in die Literatursuche einbezogen. Nach Anwendung dieses Auswahlkriteriums umfasste die Literatursuche 40 Gemüsearten bzw. -gruppen (Anhang, Tabelle A). Die Bezeichnung Gemüsegruppe bezieht sich dabei auf die Zusammenführung von verschiedenen Varietäten einer Gemüseart, wie z. B. Kabis, welche als Gruppe Kabis rot, weiss und spitz umfasst (Anhang, Tabelle B). Der Einfachheit halber wird fortan im folgenden Text die Bezeichnung Gemüseart verwendet. In Anhang, Tabelle C ist ein mehrsprachiges Namensverzeichnis der Gemüsearten aufgeführt.

Die Literatursuche umfasste diverse nationale und internationale Quellen, die mittels vorab festgelegter Suchkriterien und -begriffen durchsucht wurden. Zu den Quellen zählten allgemeine und gemüsebauspezifische Peer-review-Literaturdatenbanken, Forschungseinrichtungen des Garten- und Gemüsebaus auf universitärer und Landesebene (Deutschland, Österreich, Schweiz), Gemüsebauverbände (Deutschland, Schweiz) und öffentliche Ämter von Bund und Kantonen. Zudem wurden für die Suche Online-Portale und -Suchmaschinen (z. B. [www.Hortigate.de](http://www.Hortigate.de), Google) genutzt (für eine detaillierte Listung der Suchergebnisse und Quellen sei hier auf die Tabellen C-F im Anhang verwiesen). Die Suchergebnisse aller Quellen ergaben insgesamt ca. 3000 relevante Publikationen, welche in einer kategorisierten Literaturdatenbank hinterlegt wurden. Die Kategorisierung der relevanten Publikationen orientierte sich an der für die Auswertung der Literatur parallel zur Literaturdatenbank erstellten Daten-Matrix. In der Daten-Matrix wurden quantitative Daten aus den in der Literaturdatenbank erfassten Publikationen gesammelt, analysiert und aggregiert. Die aggregierten Daten bilden die Grundlage für die in diesem Bericht vorgenommene Einteilung der Gemüsearten in Risikoklassen in Bezug auf die Nitratauswaschung.

### 1.4 Definition gemüsebaulicher Begriffe

#### 1.4.1 Kulturzeitraum

In Bezug auf den Anbauzeitraum können die Gemüsearten eingeteilt werden nach Früh-, Sommer- und Herbstanbau. Die jahreszeitliche Einteilung ist sinnvoll aufgrund der unterschiedlichen Umweltbedingungen während der Kulturzeit, beispielsweise der Niederschlagsverteilung und des damit verbundenen unterschiedlichen Bodenwasserhaushaltes. Des Weiteren ist aber auch die Kulturdauer von Bedeutung, die von wenigen Wochen im Satzanbau bis zu mehreren Jahren bei mehrjährigen Arten, den sogenannten Dauerkulturen, beträgt. Generell gilt, je länger die Kulturzeit, umso mehr Wurzelmasse kann gebildet werden, um N aus dem Boden aufzunehmen, wobei mehrjährige Gemüsearten (z. B. Spargel, Rhabarber) als Speicherorgane starke Wurzelstöcke ausbilden können.

#### 1.4.2 Freilandanbau

Als Freilandanbau bezeichnet man den Anbau auf offenen Flächen und unter Flachabdeckungen (inkl. Vlies, Lochfolie, Mulchfolie und Niedertunnel), im Gegensatz zum geschützten Anbau in geheizten oder ungeheizten Glas- oder Foliengewächshäusern (SZG 2016a). Da sich in diesem Bericht die Fragestellung in Bezug auf die Nitratauswaschung auf den Freilandanbau bezieht, werden die Gemüsearten, die in der Schweiz hauptsächlich im geschützten Anbau (Gewächshaus) kultiviert werden, nicht berücksichtigt. Dazu gehören z. B. Kulturen wie Auberginen, Gurken und Tomaten.

Des Weiteren lassen sich wie in Abbildung (Abb. 1) dargestellt aufgrund der Betriebsausrichtung verschiedene Produktionsrichtungen mit unterschiedlicher Intensität im Freilandanbau unterscheiden (Laber und Lattauschke 2014):

- Gärtnerischer Freilandgemüsebau, d. h. intensiver, vielfach satzweiser Anbau oder Kulturfolgen mit zwei oder mehr Ernten pro Fläche, wobei Kulturfolge die Abfolge der Kulturen innerhalb des Jahres bezeichnet. Im gärtnerischen Freilandgemüsebau werden meist Gemüsearten, die als Frischware vermarktet werden, angebaut (z. B. Salate).
- Feldgemüsebau, d. h. der Anbau von Gemüse im Wechsel mit landwirtschaftlichen Feldfrüchten. Oftmals wird nur eine Gemüsekultur pro Fläche und Jahr angebaut. Fruchtwechsel bezeichnet den Wechsel zwischen Arten aus verschiedenen Pflanzenfamilien und entsprechenden Anbaupausen. Als Fruchtfolge bezeichnet man die Aufeinanderfolge der Kulturen eines Feldes über mehrere Jahre. Werden Arten einer Pflanzenfamilie relativ häufig angebaut, spricht man von einer engen Fruchtfolge. Häufig werden im Feldgemüsebau Gemüsearten für die industrielle Verarbeitung (z. B. Erbsen, Kabis) und die Einlagerung über den Winter (z. B. Zwiebeln, Karotten) angebaut.

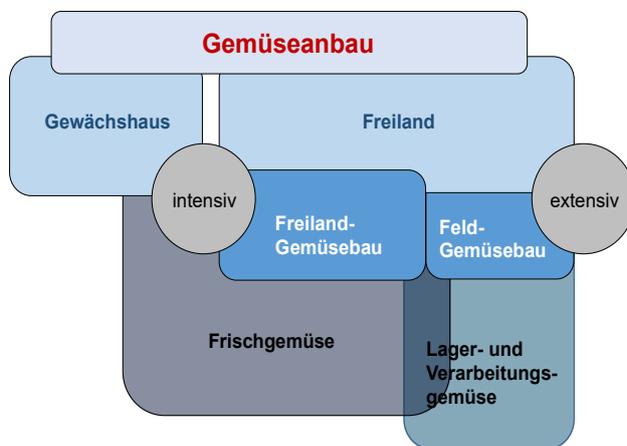


Abb. 1: Schematische Einteilung des Gemüseanbaus nach Ort, Produktionsintensität und Verwendungszweck der Ernteprodukte.

## 1.5 Freilandgemüsebau in der Schweiz und im Kanton Solothurn

### 1.5.1 Anbaufläche

Die kumulierte Anbaufläche von Freilandgemüse in der Schweiz, eingeschlossen sind hier Doppel- bzw. Dreifach-Zählungen einer Parzelle durch den satzweisen Anbau von z. B. Salaten, umfasst im 5-jährigen Mittel (2012–16) ca. 12 500 ha (Abb. 2). Vier Fünftel dieser Fläche (ca. 10 000 ha) entfallen auf die Frisch- und Lagergemüseproduktion. Hinzu kommen ca. 2500 ha Gemüseanbau für die Verarbeitungsindustrie, deren Produkte in der Schweiz zu Tiefkühl- oder Dosengemüse verarbeitet werden. Des Weiteren wird nach groben Schätzungen Gemüse auf 3000 ha im Haus- oder Familiengarten und auf dem Pflanzland angebaut (Keller *et al.* 1996). Unter den Frisch- und Lagergemüsearten nehmen die Salate (*Lactuca sativa*), Karotten und Speisezwiebeln die grössten Flächenanteile ein (Abb. 2). Die flächenmässig grössten Verarbeitungsgemüse sind Bohnen (823 ha), Erbsen (763 ha) und Spinat (843 ha).

Im Kanton Solothurn entspricht die Freilandgemüsefläche von ca. 210 ha 0,6 % der landwirtschaftlichen Fläche. Dabei werden nennenswerte Flächen im Bereich Frisch- und Lagergemüse kultiviert mit Salaten (*Lactuca sativa* und *Cichorium spp.* mit 32 ha und 23 ha), gefolgt von Karotten (11 ha), Brokkoli (6 ha) und weiteren Kohllarten (z. B. Blumenkohl, Kabis oder Chinakohl) mit durchschnittlich 2–3 ha (Abb. 2). Die flächenmässig wichtigsten Verarbeitungsgemüsearten sind Bohnen (13 ha) und Erbsen (32 ha).

### 1.5.2 Produktion

Auf den Gemüsebauflächen der Schweiz werden im 5-jährigen Mittel (2012–16) ca. 305 000 t Gemüse pro Jahr produziert (SZG 2016b). Dabei entfallen rund 200 000 t auf die Frischgemüseproduktion. Hinzu kommen 85 000 t Lagergemüse (Karotten, Zwiebeln, Kabis, Knollensellerie und Randen) und 20 000 t Verarbeitungsgemüse (Karotten «Pariser», Einschneidekabis, Bohnen, Erbsen, Einschneiderüben und Spinat).

### 1.5.3 Betriebsstruktur

Gesamtschweizerisch zeigt sich laut SZG (2016b) eine bedeutende Strukturentwicklung bei der bestellten Fläche je Betrieb (ca. 6300 Betriebe insgesamt). In der Zeitperiode 2007–15 kam es bei den Betrieben mit über 10 ha Gemüseanbaufläche zu einem Anstieg von 19 % und bei Betrieben mit 1–10 ha zu einem solchen von 7 %, während die Anzahl der Betriebe mit 0,01–1 ha konstant blieb. Einer zahlenmässig grossen Gruppe an Betrieben mit einer kleinen Gemüseanbaufläche (0,01–0,5 ha), steht eine anzahlmässig kleine Gruppe von Betrieben mit mehr als 10 ha Gemüseanbaufläche gegenüber, welche knapp 50 % des gesamtschweizerischen Gemüses anbauen. Die ca. 1800 spezialisierten Profibetriebe produzieren 95 % des Gemüseangebots (VSGP 2017).

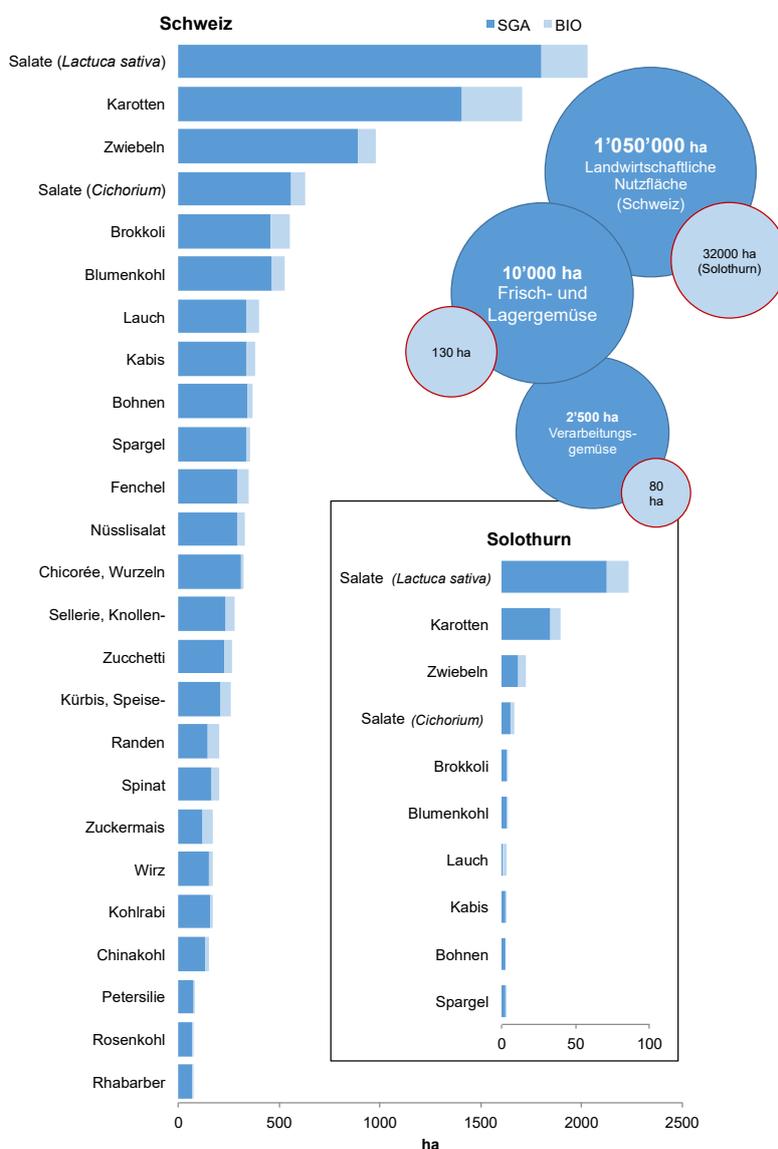


Abb. 2: Gemüsearten mit den grössten Flächenanteilen am Frisch-, Lager- und Verarbeitungsgemüseanbau im Freiland in der Schweiz und im Kanton Solothurn im 5-jährigen Mittel (2012–2016) (SOBV 2013; SZG 2016b; VSGP 2017). SGA = Suisse Garantie und konventionell/traditionell; Bio = alle biologischen Anbaumethoden.

## 2 Nitrat- und Nitratauswaschungsverluste im Freilandgemüsebau

Im Gemüsebau ist aufgrund hoher Erträge und zur Erzielung äusserlich ansprechender Marktqualitäten häufig ein hohes N-Angebot notwendig. Dies kann zu erheblichen N-Bilanzüberschüssen und im Freiland durch die Nitrat- und Nitratauswaschung zu einer Belastung des Grundwassers führen. Dementsprechend findet man im Freilandgemüsebau meist Auswaschungsverluste von über 100 kg N ha<sup>-1</sup>. In ihrer Literaturreview über Nitrat- und Nitratauswaschung in Agrarökosystemen der gemässigten Breiten geben Di und Cameron (2002) folgende Reihenfolge an: Wald < geschnittenes Grasland < Weideland < Ackerbau < Umbruch von Weideland < Gemüsebau, wobei generell mit Verlusten von 70–180 kg N ha<sup>-1</sup> im Gemüsebau gerechnet werden kann. Agostini *et al.* (2010) geben an, dass in Freilandgemüsekulturen in Südeuropa je nach Boden, Niederschlag, Bewässerung und Bewirtschaftung ca. 100–300 kg N ha<sup>-1</sup> in das Grundwasser ausgetragen werden können. In einer Studie zur regional differenzierten Abschätzung der Nitrat- und Nitratauswaschung über Betriebszählungsdaten von 14 389 Betrieben im Kanton Bern schätzten Prasuhn und Spiess (2003) die mittlere Nitrat- und Nitratauswaschung unter Gemüse auf 89 kg N ha<sup>-1</sup>, was deutlich höher ist als unter Ackerland mit 53 kg N ha<sup>-1</sup>. Diese Angaben zu N-Verlusten durch Auswaschung weisen jedoch oftmals keine Differenzierung nach einzelnen Gemüsearten auf oder sind Verallgemeinerungen basierend auf einer geringen Anzahl von Gemüsearten. Ausgehend von der Vielfalt der Gemüsearten und von der Zielsetzung, die Gemüsearten entsprechend ihres Nitrat- und Nitratauswaschungspotenzial zu kategorisieren, werden im Folgenden die aus der Literaturrecherche gewonnenen Angaben zu Nitrat- und Nitratauswaschungsverlusten möglichst differenziert und dem methodischen Vorgehen entsprechend dargestellt und diskutiert.

### 2.1 Methoden zur Abschätzung von Nitrat- und Nitratauswaschungsverlusten

Die publizierten Versuchsergebnisse im Gemüsebau basieren auf einer Vielzahl von methodischen Ansätzen zur Bestimmung der Nitrat- und Nitratauswaschung, wobei Auswaschung meist definiert wird als Verlust von in Wasser gelösten Nährstoffen in Bodentiefen unterhalb der durchwurzelteten Bodenschicht (Gysi 1994). Für die direkte Bestimmung der ausgewaschenen Nitratfracht (in kg NO<sub>3</sub>-N ha<sup>-1</sup>) aus der ungesättigten Bodenzone ins Grundwasser ist es notwendig, sowohl die N-Konzentration als auch die Sickerwasserbildung des Bodenwassers zu ermitteln. Zu den am häufigsten angewandten direkten Methoden zählen Lysimeter, Saugkerzen und Anionenaustauschverfahren. Neben den direkten Methoden werden auch indirekte Herangehensweisen angewandt. Hierzu zählt einerseits die Entnahme und Analyse von Bodenproben (Finck 2016), meist am Ende der Vegetationszeit, und andererseits die Verwendung von Simulationsmodellen (Minshew *et al.* 2002; Armbruster *et al.* 2010; Mood 2015). Für eine Übersicht zu diesen und weiteren Methoden sowie deren Vor- und Nachteilen sei hier auf die Publikationen von Litaor (1988), Lanthaler (2004), Peters *et al.* (2005), Weihermüller *et al.* (2007), Cannavo *et al.* (2008), Wang *et al.* (2012) und Singh *et al.* (2017) verwiesen.

### 2.2 Mineralische Bodenstickstoffgehalte nach der Ernte im Freilandgemüsebau

Die Menge an mineralischem N im Boden (N<sub>min</sub>) zum Ende der Vegetationszeit im Herbst kann ein Indikator zur indirekten Abschätzung der Nitrat- und Nitratauswaschung während der Sickerwasserperiode im Winter und Frühjahr sein. Nitrat, neben Ammonium der Hauptbestandteil des N<sub>min</sub>, bewegt sich im Boden mit dem Bodenwasser und ist daher während der Periode der Sickerwasserbildung stark auswaschungsgefährdet (van der Ploeg *et al.* 1995). Als Momentaufnahme eines dynamischen Boden-N-Systems gibt der N<sub>min</sub>-Gehalt des Bodens jedoch nur Hinweise über das Nitrat- und Nitratauswaschungspotenzial.

Insgesamt ergab unsere Literaturrecherche 25 Publikationen mit Angaben zu N<sub>min</sub>-gehalten im Boden nach Freilandgemüseanbau (Anhang, Tabelle H). Die Studien wurden in Belgien, Dänemark, Deutschland, England, Kanada, Neuseeland, Niederlande, Slowenien und Spanien durchgeführt. Untersucht wurden dabei

21 Gemüsearten. Meist wurden die Gemüse auf sandigen Böden angebaut, wie z. B. stark sandiger Lehm, sandiger Lehm oder lehmiger Sand. Die N-Düngung, sofern angegeben, lag im Mittel bei  $146 \pm$  Standardabweichung (SA)  $90 \text{ kg ha}^{-1}$ . Die Entnahmetiefe der Bodenproben variierte von 30 bis 250 cm, wobei 78 % der Proben mindestens bis in eine Tiefe von 90 cm entnommen wurden.

Ein Vergleich der Bodenproben aus einer Bodentiefe von 90 cm, d. h. der häufigsten Entnahmetiefe, ergab im Mittel  $N_{\min}$ -Gehalte von  $88 \text{ kg N ha}^{-1}$  (Median =  $60 \text{ kg N ha}^{-1}$ ) (Abb. 3). Die höchsten  $N_{\min}$ -Gehalte fand man nach Blumenkohl und Spinat und die niedrigsten nach Rosenkohl, Petersilie und Brokkoli. Vergleichbare durchschnittliche  $N_{\min}$ -Gehalte wurden auch in Baden-Württemberg (Deutschland) gemessen, wo der Nitratgehalt des Bodens zu Beginn der Sickerperiode als Kontrollinstrument für die so genannte Schutzgebiets- und Ausgleichsverordnung (SchALVO) dient (Finck 2016). Im Zeitraum von 2004 bis 2011 lag der im Herbst im Boden (0–90 cm) gemessene  $N_{\min}$ -Gehalt nach Gemüse im flächengewogenen Mittel ( $n = 1208$ ) bei ca.  $80 \text{ kg NO}_3\text{-N ha}^{-1}$  (Finck 2012). In den Jahren 2013 bis 2016 ergaben die Messungen im Mittel ( $n = 134$ )  $74$  ( $48\text{--}108$ )  $\text{kg NO}_3\text{-N ha}^{-1}$ , wobei im gleichen Zeitraum unter Grünland  $22$  ( $16\text{--}32$ ), unter Wintergetreide  $39$  ( $33\text{--}47$ ) und nach Mais  $59$  ( $46\text{--}78$ )  $\text{kg NO}_3\text{-N ha}^{-1}$  gemessen wurden (Finck 2016). In einer Studie zur Abschätzung regionaler Nitratreinträge in das Grundwasser unter Verwendung von  $N_{\min}$ -Gehalten im Herbst (0–90 cm) wurden im Einzugsgebiet des oberen Kraichbachs ( $161 \text{ km}^2$ ) im Kraichgau (Deutschland) im Mittel der Jahre 1989 bis 2005  $110 \text{ kg N ha}^{-1}$  unter Gemüse gemessen (Bechtel 2008). In Flandern (Belgien) wurde für Ackerland ein vorläufiger Grenzwert von  $90 \text{ kg NO}_3\text{-N ha}^{-1}$  bis zu einer Bodentiefe von 90 cm zwischen dem 1. Oktober und dem 15. November vorgeschlagen. Im Jahr 2001 wurden hierzu die Böden von 18 000 Feldern untersucht (Geypens *et al.* 2005). Wie zu erwarten war, waren die Unterschiede im Nitratgehalt stark von der Kultur abhängig. Unter den Feldern, die dem Gemüsebau zugeordnet wurden, hatten insgesamt 63 % einen  $N_{\min}$ -Gehalt  $\leq 90 \text{ kg NO}_3\text{-N ha}^{-1}$ , wobei im Mittel aller Felder  $90 \text{ kg NO}_3\text{-N ha}^{-1}$  im Boden verblieben. Die Bodenart spielte ebenfalls eine wichtige Rolle, da nur 42 % der Felder mit tonigen Böden unter  $90 \text{ kg NO}_3\text{-N ha}^{-1}$  lagen, während der Anteil bei sandigen Böden 75 % betrug. Ein sehr wichtiger Faktor war der Kohlenstoff(C)-Gehalt des Bodens. Aufgrund der höheren Mineralisierungsrate in der Zeit nach der Ernte wurden nur 38 % der Felder mit einem hohen C-Gehalt gefunden, die einen Nitratgehalt unter  $90 \text{ kg NO}_3\text{-N ha}^{-1}$  aufwiesen, im Gegensatz zu 78 % der Felder mit einem sehr niedrigen C-Gehalt.

Ogleich die publizierten  $N_{\min}$ -Gehalte des Bodens zum Ende der Vegetationszeit nur eine Momentaufnahme sind und die tatsächliche Nitratauswaschung über Winter zusätzlich sehr stark von der Witterung und den Standorteigenschaften abhängig ist, weisen die Unterschiede zwischen Gemüse und anderen Ackerkulturen auf ein erhöhtes Auswaschungspotenzial nach Gemüse hin. Des Weiteren zeigen sich tendenzielle Unterschiede zwischen den Gemüsearten (Anhang, Tabelle H). Um das Nitratauswaschungspotenzial über den Winter im Freilandgemüsebau zu vermindern, sollte der  $N_{\min}$ -Gehalt des Bodens zu Beginn der Sickerperiode durch den Anbau von Gemüsearten, die möglichst geringe  $N_{\min}$ -Gehalte hinterlassen, reduziert werden. Dies ist besonders relevant für die zuletzt vor dem Winterhalbjahr angebauten Gemüsearten. Zum Beispiel verbleibt nach Kohlarten meist wenig mineralischer N im Boden (Rather und Schmitt-Viebig 2003). Wenn grosse Mengen an Ernterückständen auf dem Feld zurückbleiben und eingearbeitet werden, können jedoch die Auswaschungsverluste im Winter hoch sein, selbst wenn zum Zeitpunkt der Einarbeitung nur wenig mineralischer N im Boden vorhanden ist (De Neve und Hofman 1998).

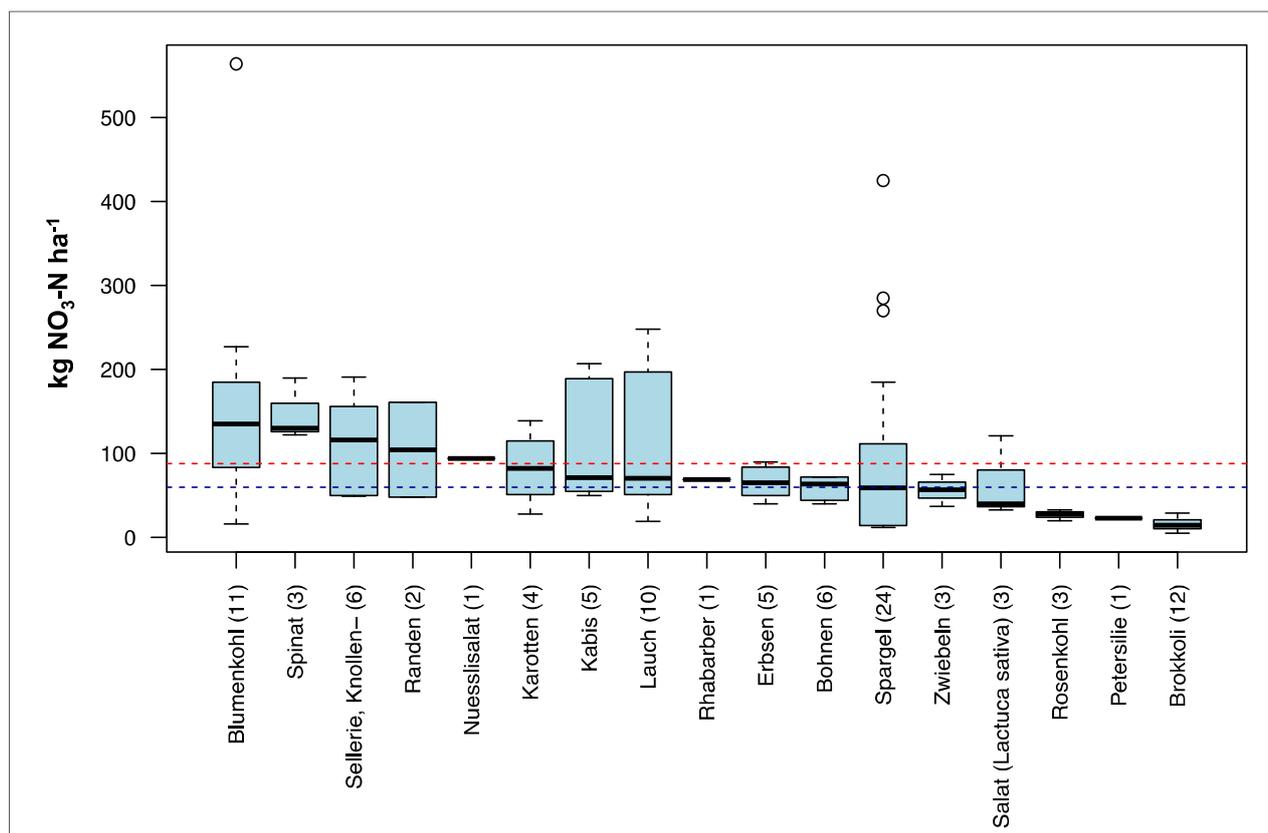


Abb. 3:  $\text{NO}_3\text{-N}$ -Restmenge im Boden (0–90 cm) nach der Gemüseernte oder am Ende der Kulturfolge (Herbst) im Freilandanbau dargestellt in einem Boxplot-Diagramm. Die Box gibt an, in welchem Bereich 50 % der Daten liegen, und der Median ist als durchgehender fetter Strich in der Box eingezeichnet. Die Antennen (senkrecht, gestrichelt) zeigen alle Werte ohne die Ausreisser. Innerhalb der Antennengrenzen liegen 95 % aller beobachteten Werte. Daten die als ausreisserverdächtig behandelt werden sind als offene Kreise abgebildet. Waagerechte gestrichelte Linien zeigen den Median (blau) und den Mittelwert (rot) der Messwerte aller Gemüsearten. Zahlen in Klammern zeigen die Anzahl der Messwerte je Gemüseart. Für detaillierte Angaben zu den einzelnen Messwerten und Referenzen siehe Tabelle H im Anhang.

### 2.3 Stickstofffrachten unter Freilandgemüse – Saugkerzenmethode

Die Installation von Saugkerzen ist ein semi-direktes Verfahren zur Ermittlung von N-Frachten. Das Verfahren liefert direkte Informationen zur Nitratkonzentration im Bodenwasser unterhalb der durchwurzelten Bodenzone (Entnahmetiefe). Zur Quantifizierung der N-Fracht muss jedoch zusätzlich die Sickerwassermenge bestimmt werden, beispielsweise mit Hilfe eines Wasserbilanz-basierten Wasserhaushaltsmodells.

Insgesamt ergab die Literaturrecherche neun relevante Publikationen, die Bezug nehmen auf Studien mit Saugkerzen im Freilandgemüsebau (Anhang, Tabelle I). Die Einbautiefe variierte zwischen 50 und 180 cm, wobei die Entnahme des Bodenwassers bei je vier Studien in einer Tiefe zwischen 55–60 cm bzw. 90–105 cm und bei einer Studie in 180 cm Tiefe erfolgte. Der Zeitraum der Messungen variierte ebenso. Sechs Studien erfassten die N-Frachten während eines Jahres (November bis Oktober, April bis März, Juli bis Juni oder Januar bis Dezember). Drei Studien erfassten die N-Frachten über das Winterhalbjahr (Oktober/November bis Ende März, bzw. Mai bis September in Neuseeland). Insgesamt wurden 43 Frucht- bzw. Kulturfolgen oder Einzelkulturen untersucht, wovon ein Drittel dem extensiven Feldgemüsebau (d. h., Gemüse gefolgt von Zwischenfrucht und/oder Getreide) zugeordnet werden können. Zu den untersuchten Gemüsearten zählen Kabis, Erbsen, Salate (*Lactuca sativa* und *Cichorium spp.*), Stangensellerie, Blumenkohl, Spargel, Lauch, Federkohl und Spinat.

Unter Einbezug aller Ergebnisse wurden im Winterhalbjahr zwischen 33 und 292 kg N ha<sup>-1</sup> ausgewaschen, während die für ein ganzes Jahr ermittelten N-Frachten zwischen 4 und 626 kg N ha<sup>-1</sup> variierten (Anhang, Tabelle I). Die grosse Spanne der publizierten N-Frachten beruht insbesondere auf den Unterschieden in der Versuchsanordnung, den standortabhängigen Einflussfaktoren und den angewandten Kulturmassnahmen (z. B. N-Düngung). Ein statistischer Vergleich der Versuchsergebnisse und deren Verwendung für die Kategorisierung der Gemüsearten nach deren Nitrat- auswaschungspotenzial ist daher wenig sinnvoll.

Dennoch lässt sich eine publikationsübergreifende Tendenz ableiten: Die N-Fracht im intensiven Gemüsebau kann in beiden Messzeiträumen (Winterhalbjahr 182 ± SA 74 bzw. ganzes Jahr 243 ± SA 144 kg N ha<sup>-1</sup>) doppelt so hoch sein wie im extensiven Feldgemüsebau, der mit Zwischenfrüchten bzw. Getreide in der Fruchtfolge steht (Winterhalbjahr 92 ± SA 65 bzw. ganzes Jahr 127 ± SA 127 kg N ha<sup>-1</sup>).

## 2.4 Stickstofffrachten unter Freilandgemüse – Lysimeter

Die Lysimeter-technik gilt als das genaueste Verfahren für eine ganzheitliche Beurteilung eines Landwirtschaftssystems (Liebhard *et al.* 2003). Prinzipiell versteht man unter Lysimeter einen mit Boden gefüllten Behälter, der ebenerdig in den Boden eingebaut ist. Anhand der Menge an Sickerwasser, welches durch verschiedene Verfahren an der Gefässunterseite gesammelt wird, und der Analyse der N-Konzentration des Sickerwassers ist die Höhe der N-Auswaschung flächenbezogen genau bestimmbar und kann mit der Bewirtschaftung in Beziehung gesetzt werden. Es fanden sich verschiedene Literaturhinweise zu unterschiedlichen Lysimeter-Typen, die sich für die Anwendung der Lysimeter-Methode eignen. Hierzu zählen zum Beispiel der monolithische Feld-Lysimeter (Murer 2003), Trichter- bzw. Pfannen-Lysimeter oder Docht-Lysimeter (Brandi-Dohrn *et al.* 1996; Peters *et al.* 2005; Weihermüller *et al.* 2007; Singh *et al.* 2017). In Bezug auf methodische Vor- und Nachteile der verschiedenen Lysimeter-Typen sei hier auf die im Abschnitt 2.1 genannten Publikationen verwiesen.

Unsere Literaturrecherche ergab sechs relevante Publikationen, in denen N-Verluste im Freilandgemüsebau mit Hilfe der Lysimeter-Methode ermittelt wurden (Anhang, Tabelle J).

Folgende Gemüsearten waren Bestandteil der untersuchten Kultur- bzw. Fruchtfolgen: Blumenkohl, Bohnen, Brokkoli, Erbsen, Salat (*Lactuca sativa*), Knollensellerie, Zuckermais und Zwiebeln. Die N-Fracht variierte zwischen 6 bis 500 kg N ha<sup>-1</sup>. Diese grosse Spanne der publizierten Messwerte lässt sich jedoch nur vereinzelt auf Unterschiede zwischen den Gemüsearten zurückführen.

Ein Grund dafür ist die geringe Anzahl an Publikationen mit methodisch verlässlichen und aussagekräftigen Versuchsergebnissen, die sich nach Gemüseart differenzieren lassen. In einer der wenigen Publikationen untersuchten Feaga *et al.* (2010) über fünf Jahre N-Frachten im Winterhalbjahr nach Brokkoli, Zuckermais und Bohnen, die in unterschiedlicher Folge mit oder ohne Zwischenfrucht und auf drei N-Düngungsstufen angebaut wurden. Die Auswertung der Messergebnisse zeigte nicht nur, dass der Anbau einer Zwischenfrucht die N-Fracht kulturübergreifend signifikant reduzieren kann, sondern auch signifikante Unterschiede zwischen den Gemüsearten: Unabhängig von der Düngermenge war die N-Fracht im Winterhalbjahr nach Bohnen im Durchschnitt doppelt so hoch wie nach Zuckermais oder Brokkoli (Abb. 4).

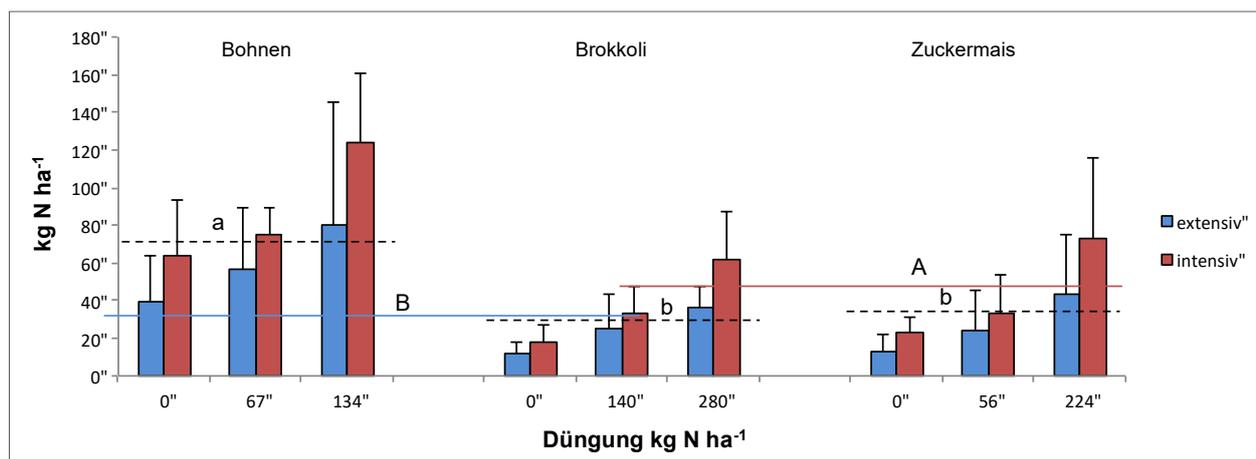


Abb. 4: N-Frachten im Winterhalbjahr nach Bohnen, Brokkoli und Zuckermis mit (extensiv) und ohne Zwischenfrucht (intensiv) in Abhängigkeit der Düngermenge (Datengrundlage: Feaga *et al.* [2010]). Fehlerindikatoren zeigen die Standardabweichung (Bohnen,  $n = 3$ ; Brokkoli, Zuckermis,  $n = 5$ ). Die gestrichelten waagerechten Linien zeigen den Mittelwert der N-Fracht für die jeweilige Gemüseart. Kleinbuchstaben auf gestrichelten waagerechten Linien zeigen signifikante ( $p < 0.05$ ) Unterschiede zwischen den Gemüsearten. Ganze waagerechte Linien zeigen den Mittelwert für die Anbauintensität. Grossbuchstaben auf ganzen waagerechten Linien zeigen signifikante ( $p < 0.05$ ) Unterschiede zwischen intensivem und extensivem Anbau.

Zu der geringen Anzahl an Publikationen kommt die schlechte Vergleichbarkeit der Publikationen untereinander, aufgrund der Heterogenität der Versuchsanordnungen, wie zum Beispiel Unterschiede in der Messtiefe, der N-Düngung und der Frucht- bzw. Kulturfolge. In den sechs Publikationen betrug die Versuchsdauer ein bis zehn Jahre. Untersucht wurde die Auswirkung bzw. die kombinierte Auswirkung von Unterschieden bei den Zwischenfrüchten (Liebhard *et al.* 2003; Feaga *et al.* 2010), der Düngerrate (Liebhard *et al.* 2003; Feaga *et al.* 2010), dem Ernterückständemanagement (Ambus *et al.* 2001; Akkal-Corfini *et al.* 2010), dem Bewässerungsmanagement (Knoblauch 2013) und der Niederschlagsverteilung (Schmidt *et al.* 2017). In zwei der Studien erfolgten die Messungen jeweils nach der Vegetationszeit im Winterhalbjahr und in vier der Studien über ein ganzes Jahr. Die Entnahme des Sickerwassers erfolgte in einer Bodentiefe von 40 bis 230 cm. Einschliesslich der nicht gedüngten Verfahren wurden im Durchschnitt  $117 \pm SA 98 \text{ kg N ha}^{-1}$  ausgebracht.

Des Weiteren sind die publizierten N-Frachten sehr stark von den Witterungsbedingungen und der Versuchsdauer abhängig.

In einer Analyse der Ergebnisse verschiedener landwirtschaftlicher Versuche zur Nitratauswaschung, die seit 2009 auf 72 Lysimetern unter natürlichen Witterungsbedingungen (d. h. ohne Bewässerung) auf der Lysimeteranlage in Zürich-Reckenholz durchgeführt werden, folgern Prasuhn *et al.* (2017), dass wegen der Witterungsvariabilität und des unterschiedlichen Entwicklungsverlaufs verschiedener Kulturen mehrjährige Lysimeterversuche notwendig sind, um bezüglich Wasserverbrauch und Nitratauswaschung Empfehlungen für die Praxis ableiten zu können. Ebenso zeigen die Ergebnisse einer siebenjährigen Fruchtfolge (2002–09) auf der Lysimeteranlage in Bern-Liebefeld nicht nur, dass die Niederschlagsmenge und -verteilung die Sickerwassermenge und die Nitratauswaschung deutlich beeinflussen, sondern auch, dass drei Anbaujahre zur Ableitung kulturspezifischer Auswaschungswerte für die Modellierung nicht ausreichen und dass bedeutend mehr Versuchsjahre unter verschiedensten Witterungsbedingungen notwendig sind (Spiess *et al.* 2013). Bohne *et al.* (1997), die mit Hilfe wägbarer wie auch nicht wägbarer Lysimeter die N-Dynamik bei unterschiedlichen Pflanzenbeständen und Düngergaben über drei Jahre beobachteten und mit Hilfe eines Modells simulierten, stellen fest, dass die Abbildung insbesondere langsam ablaufender Prozesse wie zum Beispiel der Mineralisierung der organischen Bodensubstanz erst auf der Basis dreijähriger Simulationszeiträume zuverlässig möglich ist.

Letztlich «besitzt jeder Boden bezüglich Nitrat durch seine Bewirtschaftung eine Vergangenheit, die sich auch wesentlich auf die zukünftigen Messergebnisse auswirkt» (Murer 2003). Als Beispiel soll hier die Lysimeter-Studie von Knoblauch (2013) dienen, auch wenn dieses Beispiel aufgrund der geringen Niederschläge (544 mm im vieljährigen Mittel) nicht eins zu eins auf die Schweiz übertragbar ist. Die Autorin untersuchte im Zeitraum von 1995 bis 2004 den N-Austrag unter Freilandgemüse nach einer Ackerbau-Fruchtfolge (1983 bis 1994) auf Lössböden im Thüringer Becken und der Ostthüringer Buntsandsteinlandschaft (Deutschland). Um die im Vergleich zur N-Düngung überdurchschnittlich hohen Nitratfrachten zu Beginn der gemüsebaulichen Fruchtfolge zu erklären, wurde die jährliche Verlagerungstiefe des Bodenwassers mit Hilfe der Sickerwasserrate berechnet. In den beiden Anbauzeiträumen ergaben sich mittlere Verlagerungstiefen des Bodenwassers von etwa  $4 \text{ cm a}^{-1}$  unter Ackerkulturen und  $25 \text{ cm a}^{-1}$  unter Gemüse. Bei einer Durchwurzelungstiefe von durchschnittlich 150 cm in der Ackerbau-Fruchtfolge und 120 cm in der Gemüsebau-Fruchtfolge benötigt das Niederschlagswasser nach Infiltration in den Boden mit dem darin gelösten Nitrat theoretisch etwa 39 Jahre bzw. unter Anbau von Feldgemüse etwa 5 Jahre, bevor es den Wurzelraum verlässt. Diese Berechnungen zeigen, dass der tiefgründige Lössboden mineralischen N über mehr als zehn Jahre im Wurzelraum akkumulieren kann. Die Autorin folgert daraus, dass eine über viele Jahre mit Nitrat angereicherte Bodenlösung durch die im Vergleich zum Ackerbau mehrfach höhere Sickerwassermenge unter Feldgemüse aus der Wurzelzone ausgewaschen wurde. Die von 1995 bis 2004 gemessene erhöhte N-Auswaschung unter Gemüse war demnach vor allem das Ergebnis der vor 1995 abgelaufenen Ackerbewirtschaftung.

## 2.5 Nitratakkumulation unter Freilandgemüse – Ionenakkumulatoren

Neben Saugkerzen und Lysimetern werden auch Ionenakkumulatoren als direkte Methode zur Bestimmung der N-Frachten unter Freilandgemüse eingesetzt. Hierzu zählen Anion-Austauschharze (Wyland *et al.* 1996; Jackson 2000; Allaire-Leung *et al.* 2001) wie z. B. das Verfahren mit Selbst-Integrierenden Akkumulatoren (SIA) (Bischoff 2007; Schwarz *et al.* 2010). Das Sammeln der Ionen aus der Bodenlösung kann insbesondere im langfristigen Einsatz (z. B. Monitoring) unter Feldbedingungen von Vorteil sein, da es einen geringen Aufwand erfordert, die Wasserbilanz nicht parallel bestimmt werden muss und man in einer einzigen Messung den gesamten akkumulierten Flächenaustrag über einen längeren Zeitraum erhält (Bischoff 2007). Aufgrund der im Vergleich zu Schweizer Normen meist hohen N-Gaben in Publikationen, in denen Anion-Austauschharze eingesetzt wurden (Anhang, Tabelle K) soll im Folgenden nur auf zwei Publikationen, in denen die SIA-Methode zum Einsatz kam, eingegangen werden.

Bischoff (2007) untersuchte mit Hilfe der SIA-Methode in einem Zeitraum von sieben Jahren Ackerbau-, Wald- und Gemüsebauflächen. Die Gemüsebauflächen umfassten 47 verschiedene Felder (private Landwirtschaftsflächen) und unterschiedliche Kulturmassnahmen (z. B. Bodenbearbeitung), hauptsächlich in Baden-Württemberg (Deutschland). Hierbei wurden die Messungen unterhalb der Hauptwurzelzone der Kulturen in Tiefen von 60, 90 oder 100 cm durchgeführt. In den sechsmonatigen bis zu sechsjährigen Untersuchungen zeigten sich Nitrat-Akkumulationen für die Flächen unter Gemüse von durchschnittlich  $120 \text{ kg N ha}^{-1} \text{ Jahr}^{-1}$ , von denen  $43 \text{ kg N ha}^{-1}$  während des Sommers und  $77 \text{ kg N ha}^{-1}$  im Winter (Oktober–März) anfielen. Da Bischoff (2007) nur den Durchschnittswert ohne Differenzierung nach Gemüseart oder Kulturfolge angibt, kann dieses Messergebnis zwar als Anhaltspunkt, jedoch nicht für die Einschätzung der Gemüsearten nach ihrem Nitrat auswaschungspotenzial genutzt werden. Einzig die hohe Variabilität des Durchschnittswerts deutet auf Unterschiede zwischen Gemüsearten bzw. Kulturfolgen hin. Zum Beispiel lag der Variationskoeffizient für die Nitrat-Akkumulation im Winterhalbjahr bei 118 %, welcher sich laut Bischoff auf unterschiedliche Kulturmassnahmen und die unterschiedlichen N-Düngergaben zurückführen lässt. Schwarz *et al.* (2010) untersuchten in einer vierjährigen gemüsebaulichen Fruchtfolge mit Zwischenfrüchten (Salat-Brokkoli-Roggen // Salat-Lauch-Roggen // Spinat-Amarant-Rettich // Fenchel-Roggen) die Auswirkungen der N-Düngerart (Nitrokalk vs. ENTEC) und des Zeitpunkts des Pflügens (Anfang Dezember, Januar oder Februar) auf die Nitrat-Akkumulation in 60 cm Bodentiefe. Der Einsatz des stabilisierten N-Düngers (ENTEC) hatte keinen signifikanten Effekt, da nach Annahme von Schwarz *et al.* (2010) der Nitrifikationshemmstoff an

Tonminerale gebunden wurde. Jedoch konnte die N-Akkumulation in 60 cm Bodentiefe durch das Pflügen Anfang Februar im Vergleich zu den früheren Zeitpunkten (Dezember und Januar) um 50 % auf 135 kg N ha<sup>-1</sup> a<sup>-1</sup> reduziert werden. Eine Verwendung der Ergebnisse für die Einteilung der Gemüsearten nach ihrem Auswaschungspotenzial ist aber auch bei dieser Studie nicht gegeben, insbesondere, da gleich zu Beginn der Studie die Nitrat-Akkumulation in beiden Behandlungen sehr hoch (300–423 kg N ha<sup>-1</sup>) war. Die Nitrat-Akkumulationen überstiegen die mit der Düngung ausgebrachte N-Menge, so dass die Autoren daraus schlossen, dass die hohen Akkumulationen gleich zu Beginn höchst wahrscheinlich auf die Anbauhistorie zurückzuführen sind, d. h., aus der Mineralisierung des organischen Boden-N, der aus der vorhergehenden dreijährigen Nutzung der Versuchsfläche als Klee-gras-Wiese stammt. Ein Absinken der Nitrat-Akkumulationen auf einen für gemüsebaulich genutzte Flächen üblichen Bereich im weiteren Verlauf der Studie stuften die Autoren als Bestätigung dieser Annahme ein.

## 2.6 N-Verluste unter Freilandgemüse – Modelle

Die Anwendung von Simulationsmodellen zur Abschätzung und Vorhersage der N-Dynamik unterhalb der durchwurzelten Bodenzone hat in den letzten zwei Jahrzehnten weltweit stark zugenommen (Cannavo *et al.* 2008). Obwohl Simulationsmodelle oftmals umfangreiche Eingangsdaten und eine Feldkalibrierung erfordern, sind diese im Gegensatz zu den direkten Quantifizierungsmethoden (z. B. Lysimeter) weniger arbeitsintensiv und daher zeit- und kostensparend. Zudem ist der Modellansatz flexibler, da verschiedene Szenarien durchlaufen und deren Auswirkungen in die Zukunft extrapoliert werden können (Whitmore 1996; Roelsma und Hendriks 2014). Der Einsatz von Simulationsmodellen ist daher zu einem wichtigen Werkzeug für Entscheidungsträger geworden (Burns *et al.* 2010).

Unter der Vielzahl an Modellen, die im landwirtschaftlichen Bereich eingesetzt werden, beispielsweise NLEAP (Shaffer *et al.* 1991), CENTURY (Metherell *et al.* 1993), SOILN (Bergström *et al.* 1991) und LEACHM (Hutson und Wagenet 1995), gibt es wenige Modelle, die die spezifischen Parameter enthalten, die erforderlich sind, um die N-Dynamik in den meisten Gemüsekulturen während einer Fruchtfolge zu simulieren. Hierzu zählen das erweiterte Softwarepaket WELL\_N (Rahn *et al.* 1996) und N-Expert (Fink und Scharpf 1993; Stenger *et al.* 1999). Das aktuellste Modell, EU-Rotate\_N, basiert auf dem N-ABLE-Modell (Greenwood *et al.* 1996; Greenwood 2001) und wurde entwickelt und validiert, um den N-Einsatz bei gartenbaulichen Fruchtfolgen in einer Vielzahl von europäischen Klimazonen zu optimieren (Rahn *et al.* 2010a und b; Carranca und Martinez-Gaitan 2015).

Insgesamt ergab unsere Literaturrecherche sechs relevante Publikationen, in denen mit Hilfe von Modellen bzw. Modellkombinationen die Nitrat- und Nitratauswaschung im Freilandgemüsebau simuliert wurde (Anhang, Tabelle L). Für den Parameter Bodentiefe, unterhalb der Nitrat definitiv ausgewaschen wird, wurden meist 90 cm angenommen. Die durchschnittlich festgelegte Düngermenge, einschliesslich der Kontrollverfahren, lag bei 186 ± SA 120 kg N ha<sup>-1</sup> a<sup>-1</sup>. Die Bodenarten waren meist schluffige, lehmige Sande oder Tone. Die berechneten N-Verluste während eines Winter- bzw. Sommerhalbjahres beliefen sich im Durchschnitt auf 100 ± SA 85 kg N ha<sup>-1</sup> und für ein ganzes Jahr auf 208 ± SA 156 kg N ha<sup>-1</sup>. Die Variabilität der N-Verluste lässt sich nur bedingt auf Unterschiede zwischen den Gemüsearten zurückführen. Zum Beispiel verglich Whitmore (1996) vier Gemüsearten.

Die höchsten N-Verluste im Winterhalbjahr berechnete der Autor für Spinat (~240 kg N ha<sup>-1</sup>) gefolgt von Lauch (~190 kg N ha<sup>-1</sup>), Kabis (~120 kg N ha<sup>-1</sup>) und Rosenkohl (~70 kg N ha<sup>-1</sup>). Meist wurden jedoch nur ganze Kultur- bzw. Fruchtfolgen beurteilt.

Für die Region Baden-Württemberg testete Nendel (2009) mit Hilfe des EU-Rotate\_N-Modells, inwieweit sich die N-Verluste im Freilandgemüsebau durch die Berücksichtigung des  $N_{\min}$ -Gehaltes des Bodens bei der Düngebedarfsermittlung ( $N_{\min}$ -Methode) im Vergleich zur traditionellen N-Düngung (d. h., N-Düngung entsprechend dem jeweiligen Ertragsziel minus 20 %) reduzieren lassen. Die Simulation wurde für acht Modellbetriebe und zwölf verschiedene dreijährige Fruchtfolgen durchgeführt (Abb. 5). Bei einer Anwendung auf die gesamte Gemüsebaufläche in der Region (7382 ha) könnte durch die Anwendung der  $N_{\min}$ -Methode das Auswaschungspotenzial unter 90 cm Bodentiefe von 195 auf 69 kg N ha<sup>-1</sup> a<sup>-1</sup> gesenkt werden, ohne die Erträge und Wirtschaftsleistung negativ zu beeinflussen. Zieht man alle Publikationen mit ganzjährigen Simulationsergebnissen in Betracht, zeigt sich eine signifikante positive Korrelation zwischen der N-Düngung und der N-Auswaschung ( $R^2 = 0.74$ ,  $p < 0.001$ ).

Zwar geben die publizierten modellbasierten Angaben zu N-Verlusten im Freilandgemüsebau einen Anhaltspunkt für die zu erwartenden N-Verluste, jedoch wie bei den vorangegangenen Methoden kann aus mehreren Gründen keine Differenzierung nach Gemüseart erfolgen. Zum einen ist die Anzahl an Publikationen, in denen einzelne Gemüsearten getestet wurden, gering. Hinzu kommen die teilweise grossen Unterschiede zwischen den Kulturmassnahmen (z. B. Unterschiede in der N-Düngung). Ein weiterer Grund ist die Gültigkeit der verschiedenen zu Grunde liegenden Modelle. Nur wenige Publikationen lassen den Vergleich zwischen den Berechnungen aus der Modellsimulation und Ergebnissen aus den Feldmessungen zu, die für eine adäquate Bewertung der Modellergebnisse nötig wären (Cannavo *et al.* 2008). Die meisten Publikationen beschreiben daher reine Simulationen und Szenarien.

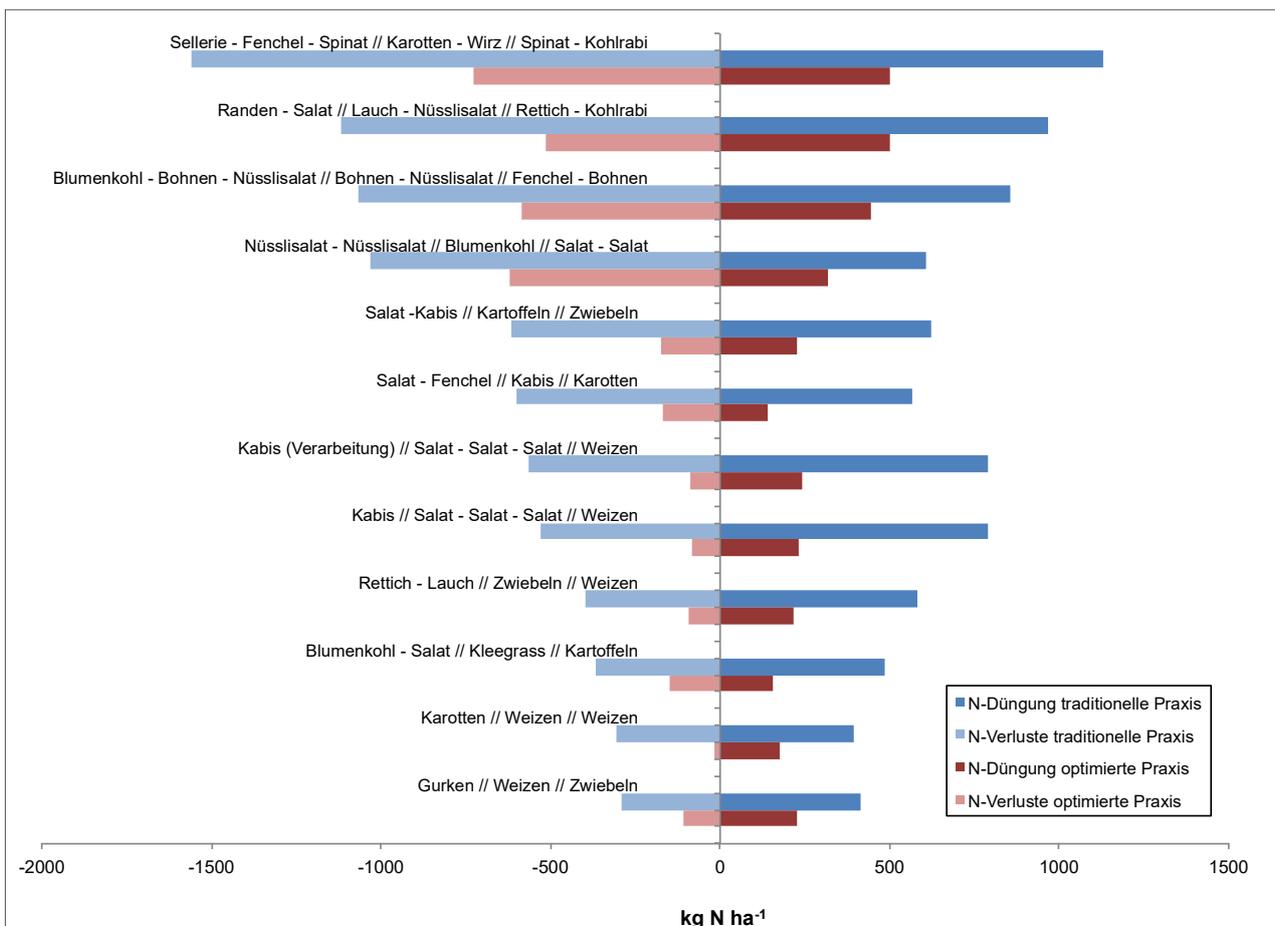


Abb. 5: Kumulierte N-Verluste unterhalb von 90 cm Bodentiefe im Freilandgemüsebau in Abhängigkeit von N-Düngung und Fruchtfolge (dreijährig) simuliert mit dem Modell EU-Rotate\_N (Nendel 2009). Die Fruchtfolgen basieren auf statistischen Produktionsdaten aus Baden-Württemberg aus den Jahren 2004/5. Die kumulierte Düngerate der traditionellen Praxis beruht auf Faustzahlen minus 20 %, während die der optimierten Praxis den mineralischen Boden-N-Gehalt zu Kulturbeginn in Abhängigkeit der kulturspezifischen Wurzeltiefe berücksichtigt ( $N_{\min}$ -Methode).

## 2.7 Fazit

Ausgehend von der Zielsetzung, die Gemüsearten entsprechend ihres Nitrat auswaschungspotenzials zu kategorisieren, wurden in diesem Abschnitt die aus der Literaturrecherche gewonnenen Angaben zu N-Verlusten möglichst differenziert und dem methodischen Vorgehen entsprechend dargestellt und diskutiert. Direkte und indirekte Methoden können verwendet werden, um die Nitrat auswaschung im Freilandgemüsebau abzuschätzen. Allen Herangehensweisen ist gemein, dass sie methodische Stärken und Schwächen haben, die es in Bezug auf die Interpretation der publizierten Ergebnisse zu berücksichtigen gilt. Dennoch bestätigen die durchschnittlichen Messwerte aller Methoden das erhebliche Nitrat auswaschungspotenzial unter bzw. nach Gemüse im Freiland. Die hohe Variabilität der Durchschnittswerte zwischen den einzelnen Gemüsearten lässt Unterschiede vermuten. Jedoch geben die veröffentlichten Ergebnisse kein klares Bild ab. Die Variabilität beruht meist weniger auf Unterschieden zwischen den Gemüsearten als auf einer grossen Heterogenität der Versuchsbedingungen und der gewählten Methodik, der Fragestellungen und den Messparametern wie z. B. der Bodentiefe, dem Messzeitraum und den angewandten Kulturmassnahmen (Management der Ernterückstände, Düngerate, konventionelle Produktion vs. Bio oder integrierte Produktion [IP] etc.). Hinzu kommt, dass es nur wenige repräsentative Publikationen gibt, in denen explizit nach Unterschieden zwischen Gemüsearten geforscht wurde. Meist wurden ganze Kultur- oder Fruchtfolgen, die typisch für ein Land oder eine Region sind, untersucht.

Dabei lag der Fokus auf den Auswirkungen von Massnahmen zur Reduktion der Nitrat auswaschung, wie z. B. dem Anbau von Zwischenfrüchten. Aus den genannten Gründen ist zu schliessen, dass die publizierten Ergebnisse zu Nitratfrachten nicht oder nur bedingt für eine Differenzierung der Nitrat austräge nach Gemüseart verwendet werden können. Lediglich die Messung des im Herbst nach der Ernte im Boden verbleibenden  $N_{\min}$ -Gehaltes könnte aufgrund der umfangreichen Datenlage und relativ hohen Auflösung eine grobe Differenzierung zulassen. Weitere allgemein gültige Tendenzen, die sich aus den Ergebnissen ableiten lassen, sind: (i) dass je höher die N-Düngung ist, desto höher das Auswaschungsrisiko ist und (ii) dass der Anbau von Zwischenfrüchten und eine optimierte Bemessung der Düngergaben z. B. mittels der  $N_{\min}$ -Methode das Auswaschungspotenzial erheblich senken können.

### 3 Ernterückstände im Freilandgemüsebau

Im Vergleich zu Ackerkulturen nehmen die Ernterückstände im Gemüsebau eine besondere Stellung ein, da oft grosse Mengen an N-reichen und schnell abbaubaren Ernterückständen auf dem Feld zurückbleiben. Hierzu zählen insbesondere die Ernterückstände, die beim Rüsten anfallen, aber auch Rückstände von unförmigem Gemüse, das nicht den Marktstandards entspricht, die in einer Grössenordnung von 30 % liegen können (Bischoff 2007). Des Weiteren kann es durch Krankheiten oder Hagelschäden zu vollständigen Ausfällen ohne Ernte kommen. In der Praxis werden die Ernterückstände von Gemüse meistens direkt nach der Ernte in den Boden eingearbeitet. Da sich frische Ernterückstände oft sehr schnell umsetzen und der darin enthaltene N mineralisiert wird, ergeben sich bis zum Beginn der Hauptauswaschungsperiode im Winter im Boden zum Teil erhebliche  $N_{\min}$ -Gehalte. Gleichzeitig sind pflanzliche Ernterückstände ein wichtiges Bindeglied, um den Nährstoffkreislauf der Böden zu schliessen. Ein angemessenes und nachhaltiges Management ist deshalb erforderlich. Im Folgenden werden kulturspezifische Parameter und Management-Optionen zusammengefasst.

#### 3.1 Kulturspezifische Mengen und N-Mengen von ober- und unterirdischen Ernterückständen

Im Gemüsebau ist die Menge an Ernterückständen abhängig von der Gemüseart, dem Ertrag, den abgeführten Pflanzenteilen (Wurzel, Blatt, Frucht oder ganze Pflanze), der eingesetzten Erntetechnik und dem Nachernteverfahren auf den Kulturflächen (ZVG 2003; Röber und Schacht 2008). Vergleicht man die aktuellen Datensammlungen, die für die Berechnung von Düngungsempfehlungen und Nährstoffbilanzen im deutschsprachigen Raum Verwendung finden, verbleiben nach der Ernte der in diesem Bericht untersuchten Gemüsearten im Durchschnitt 270 (20–650) dt ha<sup>-1</sup> oberirdische Frischmasse im Feld zurück (Anhang, Tabelle M). Oberirdischen Ernterückstände von über 400 dt ha<sup>-1</sup> fallen nach der Ernte von Rosenkohl, Brokkoli und Blumenkohl an, während Rückstände von weniger als 100 dt ha<sup>-1</sup> bei Nüsslisalat, Spargel und Radieschen zu verzeichnen sind. Auch wenn die Frischmasse an Ernterückständen im Vergleich zur abgeführten Marktware das Fünffache, wie z. B. bei Rosenkohl, betragen kann, entspricht diese im Durchschnitt in etwa der Frischmasse der vom Feld abgeführten Marktware.

Die in den frischen oberirdischen Ernterückständen enthaltene N-Menge variiert von 5 bis 550 kg N ha<sup>-1</sup>, wobei im Durchschnitt  $118 \pm SA 110$  kg N ha<sup>-1</sup> mit den Ernterückständen auf dem Feld verbleiben (Abb. 6). Als Faustzahl entspricht das in etwa 30–40 kg N, die in 100 dt frischen Ernterückständen enthalten sind. Die Variabilität der N-Mengen ermöglicht eine Einteilung der Gemüsearten in vier Klassen: sehr hoch (> 200 kg N ha<sup>-1</sup>), hoch (100–200 kg N ha<sup>-1</sup>), niedrig (50–100 kg N ha<sup>-1</sup>) und gering (< 50 kg N ha<sup>-1</sup>). Die Intervalle der Klassen bzw. deren Begrenzung wurde so gewählt, dass die gewählte Klasseneinteilung eine agronomisch und für die Praxis sinnvolle Unterscheidung der Gemüsearten erlaubt. Sehr hohe N-Mengen verbleiben im Feld mit den Ernterückständen der Kohlgemüse, wie beispielsweise Rosenkohl oder Brokkoli, aber auch Zucchetti, während nach der Ernte von Blattgemüse wie Spinat oder Nüsslisalat relativ geringe N-Mengen in Form von Ernterückständen auf dem Feld zurückbleiben.

Ernterückstände bleiben nicht nur auf, sondern auch unterhalb der Bodenoberfläche zurück. Auch wenn die oberirdischen Rückstände leichter zu quantifizieren und zu managen sind, sind die unterirdischen Ernterückstände im Hinblick auf den N- und C-Kreislauf ebenfalls bedeutend.

Abgestorbene Wurzeln, Wurzelreste und Wurzelauausscheidungen werden zum Bestandteil der organischen Bodensubstanz, wobei für die Humusanreicherung fein verteilte Wurzelanteile höher bewertet werden als oberirdische Pflanzenteile (Röber und Schacht 2008). Durch den mikrobiellen Abbau kommt es zur Freisetzung pflanzenverfügbarer Nährstoffe. Jedoch gibt es nur wenige Studien, die die unterirdischen Ernterückstände im Gemüsebau betrachten. Hösslin (1954, zitiert in Kutschera *et al.* [2009]) quantifizierte die Trockenmasse (TS) der Wurzelrückstände von Sellerie (1224 kg ha<sup>-1</sup>), Lauch (1169 kg ha<sup>-1</sup>), Speisezwiebeln

(912 kg ha<sup>-1</sup>), Erbsen (603 kg ha<sup>-1</sup>), Winter-Endivie (372 kg ha<sup>-1</sup>), Kohlrabi (206 kg ha<sup>-1</sup>) und Wurzelpetersilie (173 kg ha<sup>-1</sup>). In einer Studie mit <sup>15</sup>N-markierten Ernterückständen von Erbsen, wurde gezeigt, dass Weizen aus unterirdischen Ernterückständen im Durchschnitt doppelt so viel N aufnehmen kann wie von oberirdischen Ernterückständen (Arcand *et al.* 2014). Chaves *et al.* (2004) untersuchten die N-Mineralisierung der Wurzeln von Kohlarten (Kabis, Rosenkohl und Wirz) im Verlauf von 17 Wochen. Im Allgemeinen zeigte sich nach 4 Monaten eine Netto-N-Freisetzung von 15 % aus den unterirdischen Ernterückständen, mit Ausnahme der Wurzeln von Rosenkohl, die eine N-Immobilisierung von 33 % aufwiesen. Aufgrund der geringen Anzahl an publizierten Untersuchungen zu unterirdischen Ernterückständen mit Bezug zum Gemüsebau ist die Datenlage unsicher. Im Nachfolgenden wird deshalb nur auf die oberirdischen Ernterückstände weiter eingegangen.

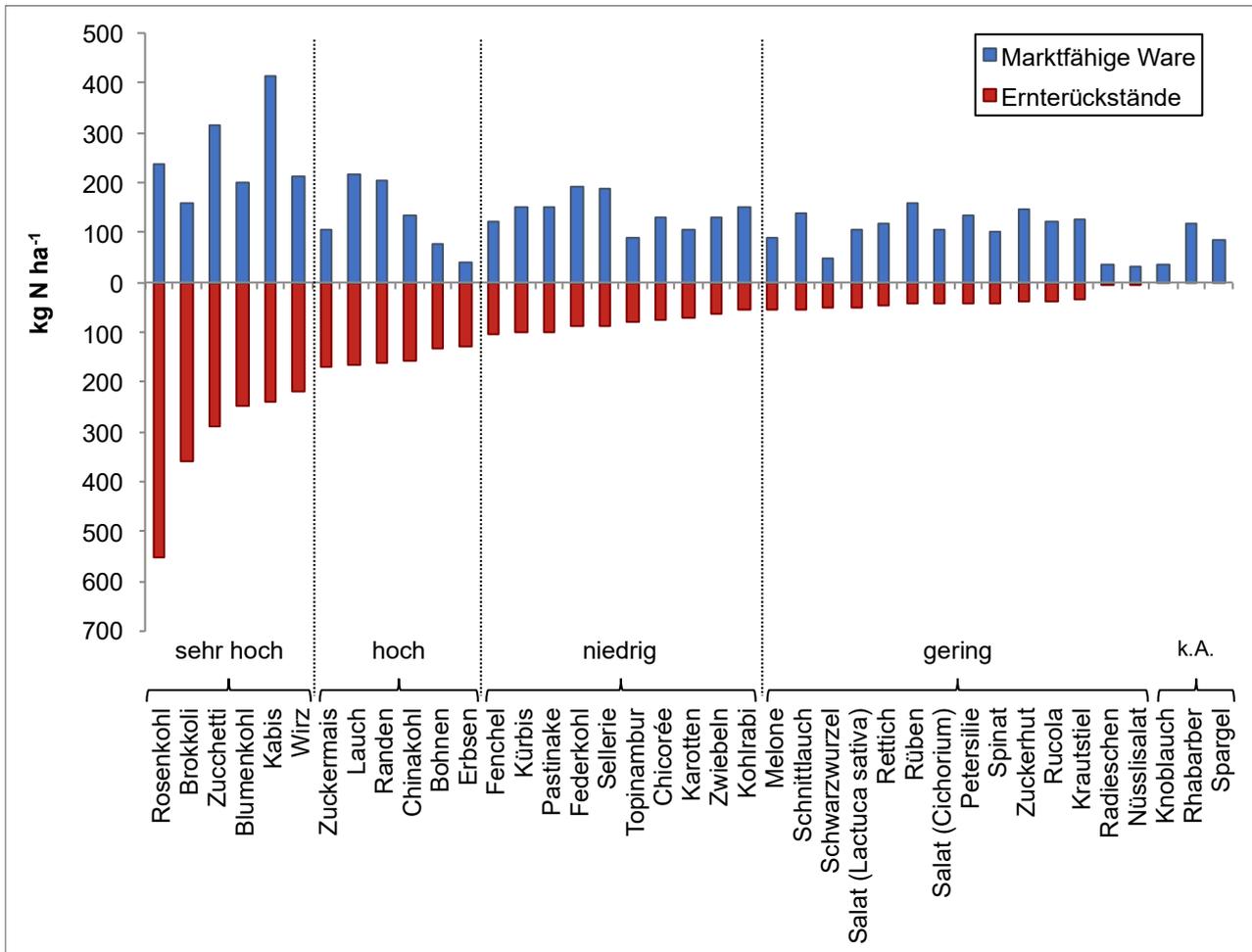


Abb. 6: Durchschnittliche N-Mengen der oberirdischen Ernterückstände und der entsprechenden marktfähigen Ware im Freilandgemüsebau gemittelt nach den Angaben in Wonneberger *et al.* (2004), Röber und Schacht (2008), Feller *et al.* (2015b), Andreas *et al.* (2017), BMEL (2017), AELF (2017) und Neuweiler und Krauss (2017). Für detaillierte Angaben (Minima und Maxima) zu den Messwerten siehe Tabelle M im Anhang. Senkrechte Linien zeigen die Einteilung der Gemüsearten in vier Klassen: sehr hoch (> 200 kg N ha<sup>-1</sup>), hoch (100–200 kg N ha<sup>-1</sup>), niedrig (50–100 kg N ha<sup>-1</sup>) und gering (< 50 kg N ha<sup>-1</sup>); k.A. = keine Angabe.

### 3.2 N-Freisetzung aus Ernterückständen

Neben der Quantität und dem N-Gehalt der Ernterückstände sind Kenntnisse über die Zersetzung und die N-Mineralisierung der Ernterückstände entscheidend für die Abschätzung des Nitratauswaschungspotenzials im Freilandgemüsebau. Wenngleich die N-Mineralisierung von gemüsebaulichen Ernterückständen nur in begrenztem Umfang untersucht ist, kann aus der Literatur geschlossen werden, dass die N-Freisetzung abhängig ist von der Einarbeitung, den klimatischen Bedingungen sowie der biochemischen Zusammensetzung des Pflanzenmaterials.

Im Gegensatz zum Verbleib der Ernterückstände auf der Bodenoberfläche beschleunigt das Einarbeiten in den Boden deren Zersetzung und N-Mineralisierung. Solange die Ernterückstände noch nicht eingearbeitet sind, zersetzen sie sich nur sehr langsam (Weier 1999). Im Frühsommer und Sommer steigt die mikrobielle Aktivität mit der Bodentemperatur an und frische Ernterückstände werden nach dem Einarbeiten schneller umgesetzt als bei geringeren Bodentemperaturen im Winterhalbjahr. Laut ZVG (2003) werden im Durchschnitt 70 % des in den Ernterückständen enthaltenen N im Sommerhalbjahr innerhalb von 8 bis 10 Wochen in Nitrat umgewandelt. Dieser klimabedingte Effekt wirkt sich insbesondere in Dammkulturen aus, da Böden in Dammkulturen durch ihre Exposition besonders empfindlich auf Änderungen der Lufttemperatur reagieren.

Zum Beispiel wurden in einer Dammkultur im Sommer während der ersten 35 Tage bereits 48 % der Ernterückstände von Sellerie mineralisiert (Chaves *et al.* 2008). Auch wenn die höheren Bodentemperaturen im Sommerhalbjahr die N-Freisetzung aus den Ernterückständen begünstigen, können im Spätherbst trotz abnehmender Bodentemperaturen hohe N-Mineralisierungs- und Nitrifikationsraten auftreten (De Neve *et al.* 1996; Magid *et al.* 2001), was im Winter zu erheblichen Auswaschungsverlusten von N aus Ernterückständen führen kann. Thomsen *et al.* (2016) untersuchten die N-Mineralisierung von unterschiedlich gereiften Ernterückständen von Rettich (*Raphanus sativus* L.) bei Herbsttemperaturen in einem lehmigen Sandboden. Die Netto-N-Freisetzung nach 7 Monaten Inkubation bei 2 °C und 10 °C lag bei 40 % bzw. 50 %. Während des grössten Teils der Inkubationszeit dominierte Nitrat den mineralischen N-Pool des Bodens bei beiden Temperaturen. Dies lässt darauf schliessen, dass die N-Mineralisierungsrate und damit das N-Auswaschungspotential auch bei niedrigen Bodentemperaturen hoch sein kann.

Der dritte Faktor, der die N-Mineralisierung der Ernterückstände beeinflusst, ist die biochemische Zusammensetzung der Ernterückstände (Agneessens *et al.* 2014). Generell gilt, dass bei einem C:N-Verhältnis von mehr als 20–40 eine Netto-N-Immobilisierung eintritt und erst bei einem geringeren C:N-Verhältnis eine Netto-N-Mineralisierung stattfindet. Neben dem C:N-Verhältnis beeinflussen aber auch andere biochemische Eigenschaften wie der Gehalt an Hemicellulose, Cellulose, Lignin, Cutin, Suberin und Pektinsubstanzen sowie das Lignin:N-Verhältnis die mikrobielle Aktivität und die N-Mineralisierungsrate (Rahn *et al.* 1999; Agneessens *et al.* 2014). Zum Beispiel zersetzen sich Ernterückstände aus Wurzeln langsamer als Stängel und Blätter, weil sie einen höheren Lignin-Gehalt und ein weiteres C:N-Verhältnis aufweisen (Chaves *et al.* 2004; Abiven *et al.* 2005). Bei Ernterückständen von Rosenkohl wurde sogar eine temporäre N-Immobilisierung festgestellt (Whitmore 1996). Vorhersagen, die ausschliesslich auf dem N-Gehalt basieren, können daher irreführend sein. Die Ernterückstände der meisten Gemüsearten weisen ein enges C:N-Verhältnis auf (Bending und Turner 1999; Rahn und Lillywhite 2001), was im Allgemeinen zur schnellen Umsetzung und hohen N-Mineralisierungsraten führt, sodass man mit 50 % N-Freisetzung innerhalb von vier bis zwölf Wochen nach der Einarbeitung rechnen kann (Laber und Lattauschke 2014).

In aeroben Inkubationsexperimenten mit verschiedenen Ernterückständen von Kohlarten lag die maximale Netto-N-Mineralisierung, berechnet durch ein kinetisches Modell erster Ordnung, durchschnittlich bei 67 % für Blätter und 44 % für Stängelmateriale (De Neve und Hofman 1996). In Belgien untersuchten Araya *et al.* (2010) die N-Mineralisierung von Kabis-Ernterückständen in einem lehmigen Boden. Die in den Boden eingebrachte Menge an Ernterückständen entsprach 36 t ha<sup>-1</sup> Frischmasse, enthielt 120 kg N und hatte ein C:N-Verhältnis von 29:1. Bei einer Durchschnittstemperatur von 25 °C wurde die N-Mineralisierung nach 63 Tagen als abgeschlossen betrachtet. Dabei betrug die Netto-N-Freisetzung 13,7 % des gesamten N der

Ernterückstände. Rahn und Lillywhite (2001) untersuchten den Abbau von Ernterückständen von neun Gemüsearten (Kabis, Rosenkohl, Calabrese, Karotte, Lauch, Salat (*Lactuca sativa*), Zwiebel, Randen und Kohlrübe) mit Hilfe der Litterbag-Methode (Netzbeutel-Methode). Mit Ausnahme der Kohlarten (Kabis, Calabrese und Rosenkohl) wurden die Ernterückstände innerhalb von 5 bis 15 Tagen um 25 % und nach 6 Wochen um 50 % abgebaut. Die Zersetzung der Kohlarten war verzögert und begann erst 10 Tagen nach dem Einarbeiten der Ernterückstände.

Aufgrund der geringen Anzahl an Publikationen und deren hauptsächlich Fokussierung auf die Kohlarten, was sicherlich auf die grossen Mengen an Ernterückständen bei diesen zurückzuführen ist (Abb. 6), können die Ergebnisse unserer Literaturrecherche nicht für eine Kategorisierung des zeitlichen Verlaufs der N-Freisetzung nach Gemüseart herangezogen werden. Anhand der publizierten Ergebnisse ist davon auszugehen, dass die Umsetzung und die N-Freisetzung der frischen Ernterückstände meist schnell, d. h. innerhalb der ersten vier bis zwölf Wochen, erfolgen, wobei die Netto-N-Mineralisierung von der Qualität der Ernterückstände abhängt. Letztlich ist zu berücksichtigen, dass trotz hoher Abbauraten ein grosser Teil des mit den Ernterückständen zugeführten N langfristig im Boden verbleiben kann. Zum Beispiel wurden in einer Studie aus Dänemark <sup>15</sup>N-markierte Ernterückstände von Erbsen über 16,5 Jahre in einem nicht bepflanzten sandigen Lehmboden verfolgt. Acht Jahre nach der Einarbeitung der Rückstände waren noch 24 % und nach 16,5 Jahren noch 16 % des N der Ernterückstände im Boden aufzufinden (Laberge *et al.* 2006).

### 3.3 Management von Ernterückständen

In Anbetracht der teils beachtlichen N-Mengen in den Ernterückständen und der schnellen N-Freisetzung ist ein adäquates Management der Ernterückstände wichtig, um die N-Verluste im Freilandgemüsebau zu minimieren. Die unterschiedlichen Management-Optionen lassen sich nach Agneessens *et al.* (2014) in zwei Strategien einordnen: (i) Management der Ernterückstände auf dem Feld oder (ii) Abführen der Ernterückstände vom Feld, gefolgt von einer anderweitigen Verwertung und/oder erneutes Ausbringen auf dem Feld.

#### 3.3.1 In-situ-Management der Ernterückstände

Verbleiben die Ernterückstände im Feld, gilt es, den N aus den Ernterückständen durch die Folgekultur möglichst effizient zu nutzen, den Boden zu schützen und das Risiko der Nitratauswaschung zu minimieren. Hierbei spielt der Zeitpunkt der Einarbeitung der Ernterückstände eine entscheidende Rolle. In einigen Publikationen wird daher empfohlen, das Einarbeiten in den Boden nach der Ernte nur im Frühjahr und Sommer oder im Falle der Ernte im Herbst erst im darauffolgenden Frühjahr durchzuführen (Guerette *et al.* 2002; ZVG 2003; Röber und Schacht 2008).

Eine weitere Option ist die Zugabe von N-armem Material, durch dessen Abbau der von den Ernterückständen freiwerdende N immobilisiert wird. In der Region Flandern (Belgien) wurden Versuche zur N-Verlustminderung in einer Kulturfolge von Blumenkohl und Kartoffeln angestellt (Schlaghecken 2004). Nach der Ernte des Blumenkohls Mitte November wurden die Erntereste entweder mit der Scheibenegge eingearbeitet (mit oder ohne Zugabe von Stroh, Grünkompost oder flüssiger Vinasse) oder abgeführt (mit oder ohne Zugabe von Stroh).

Durch die Einarbeitung von Stroh bzw. Grünkompost konnte der freiwerdende N immobilisiert und die Nitratverlagerung vermieden werden. Den höchsten Kartoffelertrag erzielte die Variante, in der die Ernterückstände mit Stroh eingearbeitet wurden. In einem weiteren Feldversuch in Flandern wurde die Wirkung von Stroh und Vinasse auf die N-Mineralisierung und Immobilisierung von Ernterückständen von Sellerie untersucht (Chaves *et al.* 2008). Der Versuch wurde auf einem lehmigen Sandboden in Dammkultur angelegt. Ernterückstände von Sellerie (4 t TS ha<sup>-1</sup>) wurden mit Stroh gemischt (12 t TS ha<sup>-1</sup>), um den freigesetzten Sellerie-N zu immobilisieren, gefolgt von einer Einarbeitung von Vinasse (4 t TS ha<sup>-1</sup>) nach 200 Tagen mit dem Ziel, das immobilisierte N wieder zu mineralisieren. In den ersten 62 Tagen nach der Einarbeitung wurde der mit <sup>15</sup>N markierte N der Sellerierückstände in der mikrobiellen Biomasse immobilisiert.

Die gesamten  $^{15}\text{N}$ -Verluste aus der obersten Bodenschicht (0–25 cm) reduzierten sich um 38 %. Nach 62 Tagen war jedoch die N-Immobilisierung aufgrund niedriger Temperaturen ( $< 8\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) in den Hochbeeten beendet und es folgte eine natürliche Re-Mineralisierung des immobilisierten Sellerie- $^{15}\text{N}$  (ohne Zugabe von Vinasse) zu einem Zeitpunkt, als das Risiko der Nitratauswaschung immer noch hoch war. Das Hinzufügen von Vinasse im Frühling löste keinen positiven Mineralisierungs-Effekt aus. Die Autoren folgerten, dass es in Dammkulturen nicht möglich ist, eine Synchronisierung zwischen der N-Freisetzung aus Ernterückständen und der N-Aufnahme der Folgekultur durch die Verwendung von Stroh und Vinasse zu erreichen und damit zur Reduktion der Nitratauswaschung beizutragen. In einer Bodeninkubationsstudie in einem tonigen Lehm untersuchten Congreves *et al.* (2013) die Netto-N- und C-Mineralisierung von Brokkoli-Ernterückständen unter der Zugabe von drei organischen C-Zusätzen: Weizenstroh, Gartenabfälle oder Altspeisefett. Ziel der Studie war es, die N-Verluste nach der Ernte durch die N-Immobilisierung zu reduzieren. Anhand der Ergebnisse konnte gezeigt werden, dass die Anwendung von organischen Zusätzen, insbesondere gebrauchtem Speiseöl, nach der Ernte eine nützliche Massnahme sein kann, um die N-Verluste aus dem Boden zu minimieren.

Auch wenn sich die N-Verluste durch ein angepasstes In-situ-Management der Ernterückstände reduzieren lassen, gilt es zu beachten, dass oberirdische Ernterückstände ohne Einarbeitung zu Fruchtfolgeproblemen führen können. Bei starkem Krankheitsdruck kann ein weiteres Stehenlassen der Ernterückstände eventuell Probleme bereiten. Auch zeigen Gewächshausversuche, dass allelopathische Effekte auftreten können. Zum Beispiel können Sellerierückstände das Auflaufen und das Wachstum von Salat durch die allelopathische Wirkung limitieren (Shilling *et al.* 1992). Aktuelle Studien zeigen, dass durch die Zersetzung von Ernterückständen letztlich erhebliche Lachgas( $\text{N}_2\text{O}$ )- und Ammoniak( $\text{NH}_3$ )-Emissionen entstehen können, sogar in einem grobstrukturierten Boden mit geringer Wasserhaltekapazität (Nett *et al.* 2015), wobei das Einpflügen die  $\text{N}_2\text{O}$ -Emissionen zu erhöhen scheint, wohingegen das Mulchen in grobstrukturierten Böden in erster Linie die  $\text{NH}_3$ -Emissionen erhöhen kann (Nett *et al.* 2016).

### 3.3.2 Ex-situ-Management der Ernterückstände

Werden die Ernterückstände vom Feld abgeführt, gilt es, dies möglichst effizient und bodenschonend zu tun und die abgeführte Biomasse zu verwerten (Agneessens *et al.* 2014). Dabei ist zu beachten, dass möglichst geringe Mengen an Erde zusammen mit den Ernterückständen abgeführt werden. Dies erleichtert die nachfolgende Verarbeitung und hilft, zusätzliche Kosten zu vermeiden. Ausserdem sollte bei widrigen Witterungs- und Bodenbedingungen nach der Ernte im Spätherbst berücksichtigt werden, dass durch zusätzliche maschinelle Arbeit auf dem Feld ernsthafte Bodenverdichtungen entstehen können. Nach Abfuhr können die Ernterückstände verarbeitet und in einer stabilisierten Form gelagert werden, um am Ende des Winters wieder auf das Feld gebracht zu werden, wenn das Auswaschungsrisiko geringer ist.

Beispiele für die externe Verwertung von Ernterückständen sind die Biogasproduktion, die Kompostierung oder die Nutzung als Nahrungs- bzw. Futtermittel.

Die anaerobe Vergärung nutzt den Energiewert von Ernterückständen und stellt eine erneuerbare Energiequelle zur Verfügung, die nicht mit der Nahrungsmittelproduktion um die Landnutzung konkurriert. Jedoch ist zu beachten, dass angesichts des hohen Ammoniumgehalts von Gärresten der Zeitpunkt, die Menge und die Art der Ausbringung aufeinander abgestimmt sein muss, um Nitratauswaschung und  $\text{NH}_3$ -Verflüchtigung zu minimieren. Auch sollte bedacht werden, dass Ernterückstände meist nur saisonal verfügbar sind und die Lagerung von Ernterückständen erforderlich sein kann, um einen kontinuierlichen Betrieb von Biogasanlagen sicherzustellen. Eine Übersicht von Strategien zur stabilen anaeroben Vergärung von Gemüseabfällen in Biogasanlagen haben Jiang *et al.* (2012) zusammengefasst. Ein weiteres Beispiel für die energetische Verwertung von Ernterückständen ist die Herstellung von Pellets als Brennstoffzufuhr für thermische Anwendungen, wie sie z. B. aus der Restbiomasse (hauptsächlich Schalen und Samen) von industriellen Tomatenverarbeitungsbetrieben in Spanien (Celma *et al.* 2012) oder in Süditalien aus der Restbiomasse (Blätter und Stängel) der Artischocke (Raccuia *et al.* 2013) hergestellt werden.

Die Kompostierung von Ernterückständen ermöglicht eine langfristige Steigerung der N-Verfügbarkeit im Boden, da die N-Freisetzung aus kompostierten pflanzlichen Ernterückständen meist über mehrere Jahre erfolgt im Gegensatz zur sehr schnellen Mineralisierung von frischen Ernterückständen. Hierzu ist jedoch ein richtiges Management bei der Kompostherstellung und der Ausbringung notwendig (Kokkora 2008). Um den Kompostierungsprozess zu starten und aufrechtzuerhalten und N-Verluste während der Kompostierung zu minimieren, ist eine Zugabe von strukturgebendem Material wie Rinde oder Holzschnitzel erforderlich. Ein Versuch zur Trennung von Kurz- und Langzeiteffekten, bei dem u.a. das PASTIS-Modell zum Einsatz kam, ergab eine erhöhte N-Verfügbarkeit im Boden nach wiederholten Kompostanwendungen (Chalhoub *et al.* 2013). Die Kompostgabe von 200 kg N ha<sup>-1</sup> alle zwei Jahre konnte die N-Verfügbarkeit für die Nutzpflanzen um 50–70 kg N ha<sup>-1</sup> erhöhen. Jedoch wurde auch festgestellt, dass die Menge an auswaschbarem N sich mit dem Reifegrad von Kompost erhöhen kann. Das bedeutet aber auch, dass N aus Kompost auch freigesetzt wird, wenn ihn die Kulturen nicht aufnehmen können; zudem wird das Mineralisierungspotenzial mit wiederholten Gaben stark erhöht. Die Wirkung des Kompost-N ist im Vergleich zum Mineraldünger-N gering. In der GRUD 2017 (Richner und Sinaj 2017) wird von einer kurz- und mittelfristigen Pflanzenverfügbarkeit von 10 % des Kompost-N ausgegangen. Das zeigt sich auch in den zitierten Ergebnissen (Chalhoub *et al.* 2013). Kompost ist daher in Bezug auf N eher als Langzeitdünger zu betrachten.

Letztlich könnte man Ernterückstände von einzelnen Gemüsearten auch für die Nahrungs- und Futtermittel verwenden. Femenia *et al.* (1998) untersuchten den Gehalt und die Zusammensetzung von Rückständen von Artischocken, Blumenkohl und Chicorée. Die Ergebnisse zeigen, dass Ernterückstände ein wichtiger Rohstoff für die Extraktion von Polysacchariden darstellen, die für industrielle Zwecke oder als Nahrungsergänzungsmittel in verarbeiteten Lebensmitteln genutzt werden können. Im Seeland, einem der wichtigsten Gemüseanbaugebiete der Schweiz, konnten in einem Projekt durch die Aufbereitung von Bioabfällen hochwertige, nachhaltige und ökologische Futtermittel und Dünger hergestellt werden (Entomeal 2015).

### 3.4 Fazit und Anwendbarkeit

Unsere Literaturrecherche zeigt, dass je nach Gemüseart erhebliche Mengen an oberirdischer Biomasse mit entsprechend grossen N-Mengen bei der Ernte anfallen können.

Dabei lassen sich die Gemüsearten in vier Risikoklassen für die Abschätzung des Nitratauswaschungspotenzials einteilen. Des Weiteren zeigt sich aber auch, dass neben der Quantität die Zusammensetzung der Ernterückstände eine wichtige Rolle einnimmt, insbesondere in Bezug auf die Abbauprozesse von Ernterückständen und die Vorhersage der N-Mineralisierung. Aufgrund der unsicheren Datenlage ist es jedoch schwer, konkrete Aussagen über den zeitlichen Verlauf der N-Mineralisierung der Ernterückstände zu machen, geschweige denn diese nach Gemüsearten zu kategorisieren. Im Allgemeinen ist aus der Literatur abzuleiten, dass meist eine schnelle Umsetzung und N-Freisetzung innerhalb der ersten vier bis acht Wochen erfolgt, insbesondere mit ansteigenden Bodentemperaturen im Sommerhalbjahr nach der Einarbeitung in den Boden. Um die N-Freisetzung und die N-Auswaschung besser kontrollieren zu können, finden sich in der Literatur diverse Management-Optionen der Ernterückstände. Diese umfassen das Management auf dem Feld als auch die Abfuhr mit anschliessender Verwertung der Ernterückstände.

## 4 Wurzeltiefe der Gemüsearten

Wurzeln mit ihrer Funktion als Pflanzenorgane zur Aufnahme von Wasser und Nährstoffen aus dem Boden sind entscheidend für die Steigerung der N-Effizienz und den Grundwasserschutz. Nicht von der Kultur aufgenommener mineralischer N, der im Boden verbleibt, wird mit dem Sickerwasser in tiefere Bodenschichten verlagert oder denitrifiziert. Bei einer Verlagerung in Schichten unterhalb der Wurzelzone besteht die Gefahr, dass dieser ins Grundwasser ausgewaschen wird, wobei die Tiefe der Wurzelzone von der angebauten Kultur abhängt. Die Unterscheidung der Gemüsearten nach deren Wurzeltiefe ist daher wichtig in Bezug auf den Grundwasserschutz, weil Nitrat in tieferen Bodenschichten mehr auswaschungsgefährdet ist als Nitrat in den oberen Bodenschichten (Thorup-Kristensen 2001a).

Für die Wasser- und Nährstoffaufnahme ist das Tiefenwachstum der Wurzel bedeutend, denn für die Wasseraufnahme aus dem Boden sind vor allem tiefgehende Wurzeln von ausschlaggebender Bedeutung (Thorup-Kristensen 1998) und für die Aufnahme immobilisierter Nährstoffe (z. B. Phosphor) ist vor allem eine intensive Durchwurzelung des Bodens wichtig. Für die Aufnahme mobiler Nährstoffe wie Nitrat ist hingegen eine deutlich geringere Durchwurzelungsintensität ausreichend (Laber und Lattauschke 2014). Ein Anteil von 15 % der Wurzeln, die an der N-Aufnahme beteiligt sind, reichen aus für ein normales Pflanzenwachstum (Burns 1974, 1980).

### 4.1 Einflussfaktoren auf das Wurzelwachstum

Faktoren, die das Wurzelwachstum beeinflussen, sind unter anderem die Nährstoffverfügbarkeit im Boden, die Wasserverfügbarkeit, die Durchwurzelbarkeit des Bodens (physiologische Gründigkeit des Bodens), die Temperatur und die Kulturdauer (Thorup-Kristensen und van den Boogaard 1998). Unter Nährstoffmangel bilden Pflanzen längere Wurzeln, während ein hohes Angebot die Verzweigung der Wurzeln fördert (Röber und Schacht 2008). Dies kann zum Beispiel bei zu hohen N-Gaben im Frühjahr zu einer Einschränkung des Längenwachstums der Wurzeln führen und somit zu einer schlechteren Erschließung tieferer Bodenschichten (Schilling 2000, zitiert in Kutschera *et al.* [2009]). In einer Studie zur Auswirkung des Bodenwasserhaushalts auf die Wurzelentwicklung zeigte sich, dass die Gesamtwurzellänge von im Freiland kultivierten erntereifen Salatköpfen mit defizitärer Wasserversorgung 75 % geringer war als die von normal bewässerten Salaten, obwohl das Wurzelgesamtwicht ähnlich war (Rowse 1974). Zudem hatten die nicht bewässerten Pflanzen dickere Wurzeln und weniger Wurzeln nahe der Bodenoberfläche als in tieferen Bodenschichten.

Bodenverdichtung kann das Wurzelwachstum stark reduzieren und somit auch die Nährstoff- und Wasseraufnahme aus dem Boden einschränken (Carr und Dodds 1983). In einem Parzellenversuch mit sechs verschiedenen Zwischenfruchtmischungen in Kombination mit je zwei unterschiedlichen Bodenbearbeitungsverfahren (Pflug vs. Grubber) zeigte es sich, dass die Wurzelverteilung in die Tiefe stark von der Bodenbearbeitung abhängig war (Mainer *et al.* 2009). Während in den Pflugverfahren die gesamte Krume durchwurzelt wurde, waren die Wurzeln in den Grubberverfahren vorrangig in den obersten 15 cm zu finden. Als grober Richtwert für das Wurzelwachstum von Gemüsekulturen wird rund ein Zentimeter pro Tag angenommen (Laber und Lattauschke 2014). Somit können Kulturen mit kurzer Kulturzeit von 30 Tagen, wie zum Beispiel Salate, nur den N der obersten Bodenschicht (0-30 cm) nutzen, während solche mit langen Kulturzeiten von mehr als 100 Tagen, wie zum Beispiel Kabis, N bis zu 100 cm Bodentiefe und mehr nutzen können. Dabei ist zu berücksichtigen, dass sich die Geschwindigkeit des Wurzelwachstums mit steigenden Durchschnittstemperaturen während der Vegetationsperiode erhöht (Smit und Groenwold 2005). Des Weiteren kann die tatsächliche Wurzelentwicklung von der Sortenwahl abhängen (Thorup-Kristensen 1998).

### 4.2 Einteilung der Gemüsearten nach Wurzeltiefe

Publikationen, in denen die Wurzelsysteme von Freilandgemüsekulturen untersucht wurden, zeigen, dass sich die untersuchten Gemüsearten durch die Wurzeltiefe unterscheiden und damit in ihrer N-Aufnahme im

Bodenprofil (Abb. 7). Diese 23 Publikationen aus Dänemark, Österreich, Deutschland, Frankreich, den Niederlanden, England und den USA wurden hauptsächlich in zwei Bodenarten durchgeführt: sandiger Lehm und lehmiger Sand. Die Anzahl der Studien je Gemüseart variierte dabei zwischen einer und sieben (Anhang, Tabelle N). Die teilweise geringe Studienzahl je Gemüseart und die unterschiedlichen Umweltbedingungen und Kulturmassnahmen machen eine statistische Auswertung wenig sinnvoll. Für die Klassifizierung der Gemüsearten nach Wurzeltiefe wurde deshalb ein konservativerer Ansatz gewählt. Die Klasseneinteilung erfolgte nach dem Median der gemessenen Werte für die Wurzeltiefe einer Gemüseart. Dennoch bleibt festzuhalten, dass bei vielen der Gemüsearten (z. B. Lauch) eine weitaus tiefere Durchwurzelung des Bodens möglich ist als gemäss der konservativen Klassifizierung. Demzufolge lassen sich die Gemüsearten in vier Klassen einteilen: flach- (<50 cm), flach- bis mitteltief- (50–100 cm), mitteltief- bis tief- (100–150 cm) und tiefwurzelnd (>150 cm). Zu den flachwurzelnden Arten gehören die Lactuca-Salate und der Nüsslisalat. Die Gemüsearten wie Karotten, Cichorium-Salate und Kabis, die derzeit flächenmässig am meisten angebaut werden, wurzeln vorwiegend mitteltief bis tief. Grössere Tiefen erreichen die seltener angebauten Gemüsearten wie Schwarzwurzel und die mehrjährigen Kulturen Spargel und Rhabarber.

### 4.3 Anwendungsmöglichkeiten

Die Kenntnis über Durchwurzelungseigenschaften der Gemüsearten ist notwendig, um die N-Effizienz moderner Anbausysteme zu optimieren und die NitratAuswaschung zu minimieren. Dabei ist das Wissen über die Wurzeltiefen der Kulturen Grundvoraussetzung für die sachgerechte Entnahmetiefe für die Bestimmung des  $N_{\min}$ -Gehaltes im Boden zum Kulturbeginn sowie zur Abschätzung der N-Verfügbarkeit und N-Nachlieferung während der Kulturzeit. N-Düngungsstrategien für Freilandgemüse, die den im Boden bereits vorhandenen mineralischen N berücksichtigen, sind z. B. das kulturbegleitende  $N_{\min}$ -Sollwerte(KNS)-System (Lorenz *et al.* 1989; Feller *et al.* 2011) und N-Expert (Fink und Scharpf 1993). Im Schweizer Gemüsebau wird die  $N_{\min}$ -Methode für die gezielte N-Düngung angewandt (Neuweiler und Krauss 2017). Jedoch zeigt ein Vergleich, dass die maximale empfohlene Entnahmetiefe bei 12 der in unserer Studie untersuchten Gemüsearten geringer angegeben ist als in den Vergleichspublikationen aus dem angrenzenden Ausland (Tabelle 1). Mit Hilfe der artspezifischen Wurzeltiefen aus der vorliegenden Literaturstudie könnten die Angaben zu den Entnahmetiefen überarbeitet werden. Jedoch gilt es zu bedenken, dass die unterschiedlichen Beprobungstiefen nicht nur mit fehlender Kenntnis der Durchwurzelungstiefen zusammenhängen. Im schweizerischen Ackerbau z. B. wurde bei einigen Kulturen die Beprobungstiefe von 90 auf 60 cm reduziert. Gründe dafür waren der grosse Aufwand, die nicht selten steinigten Böden auf 90 cm zu beproben, und die empirische Erfahrung, dass die Verringerung der Beprobungstiefe um 30 cm nur zu einer geringen Verschlechterung der Schätzung des N-Bedarfs der entsprechenden Kulturen führte.

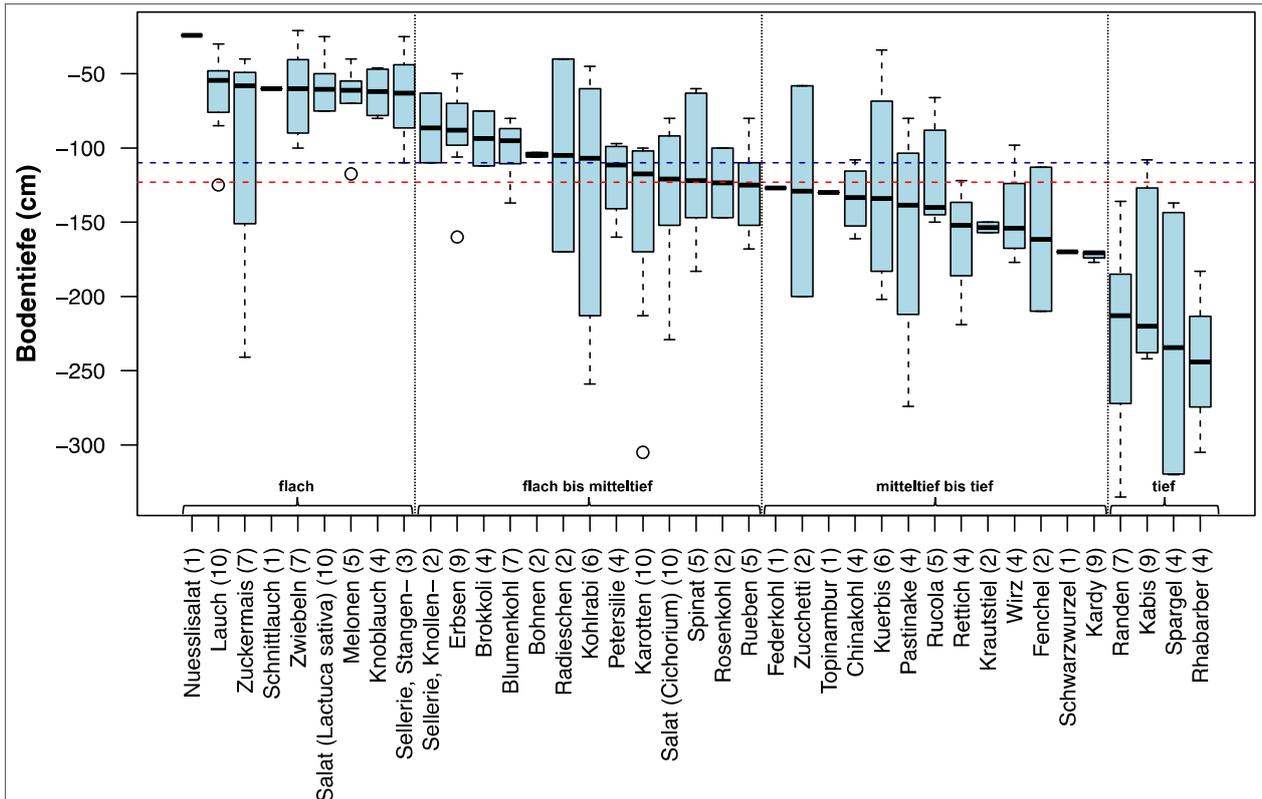


Abb. 7: Wurzeltiefen der Gemüsearten im Freilandanbau gemessen am Ende der Kulturperiode dargestellt in einem Boxplot-Diagramm. Die Box gibt an, in welchem Bereich 50 % der Daten liegen, und der Median ist als durchgehender fetter Strich in der Box eingezeichnet. Innerhalb der Box und den gestrichelten Antennen liegen 95 % aller Werte. Daten die als ausreisserverdächtig behandelt werden, sind als offene Kreise abgebildet. Waagerechte gestrichelte Linien zeigen den Median (blau) und den Mittelwert (rot) aller Messwerte. Senkrechte gepunktete Linien die Einteilung der Gemüsearten in vier Klassen: flach- (< 50 cm), flach- bis mitteltief- (50–100 cm), mitteltief- bis tief- (100–150 cm) und tiefwurzeln (> 150 cm). Die Klasseneinteilung erfolgte nach dem Median der gemessenen Werte für die Wurzeltiefe einer Gemüseart. Zahlen in Klammern zeigen Anzahl der Messwerte je Gemüseart. Für detaillierte Angaben zu den einzelnen Messwerten und Referenzen siehe Tabelle N im Anhang.

Informationen über das Wurzelwachstum können zudem verwendet werden, um Frucht- bzw. Kulturfolgen mit geringen N-Auswaschungsverlusten und einer hohen Gesamt-N-Effizienz zu entwerfen (Thorup-Kristensen 2013). Hierbei können durch die Platzierung tief wurzelnder Gemüsearten oder Zwischenfrüchten an Stellen in der Frucht- bzw. Kulturfolge, an denen N in tieferen Bodenschichten vorhanden ist, und durch die Platzierung flachwurzelnender Gemüsearten in der Frucht- bzw. Kulturfolge, wo wenig N in tieferen Bodenschichten vorhanden ist, die N-Verluste nach diesen Kulturen reduziert werden. Im Kontext der saisonalen Kulturfolge könnten z. B. als letzte Kulturen vor dem Winterhalbjahr tiefwurzelnende Haupt- oder Zwischenkulturen angebaut werden. Ein weiterer Zusatznutzen könnte entstehen, wenn in einer Fruchtfolge tiefwurzelnende Zwischenfrüchte vor flachwurzelnenden Hauptkulturen angebaut werden. Nach der Einarbeitung einer Zwischenfrucht, die N aus tiefen Bodenschichten aufgenommen hat, steht der nachfolgenden Hauptkultur mehr N in den oberen Bodenschichten zur Verfügung, während sich gleichzeitig weniger N in tieferen Bodenschichten befindet, der ausgewaschen werden kann (Thorup-Kristensen und Nielsen 1998; Thorup-Kristensen 2001a).

Tabelle 1: Vergleich der empfohlenen (max.) Probenahmetiefe nach Gemüsearten für die Bestimmung des  $N_{\min}$ -Gehaltes im Boden (Röber und Schacht 2008; Feller et al. 2015a; AELF 2017; Andreas et al. 2017; BMEL 2017; Neuweiler und Krauss 2017). k.A. = keine Angaben

Gemüseart	Empfohlene Bodentiefe für die $N_{\min}$ -Analyse zu Kulturbeginn (cm)					
	Andreas <i>et al.</i> 2017	BMEL 2017	AELF 2017	Feller <i>et al.</i> 2015	Röber und Schacht 2008	Neuweiler und Krauss 2017
Blumenkohl	60	60	60	60	60	60
Bohnen	60	60	60	60	60	30
Brokkoli	60	60	60	60	60	60
Chicorée, Wurzeln	k.A.	90	k.A.	90	90	60
Chinakohl	60	60	60	60	60	60
Erbsen	60	60	k.A.	60	30	60
Federkohl	60	60	60	60	k.A.	k.A.
Fenchel	k.A.	60	30	60	k.A.	60
Kabis	90	90	90	90	90	60
Kardy	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.
Karotten	90	60	90	60	60	60
Knoblauch	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.
Kohlrabi	30	30	30	30	30	30
Krautstiel	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	60
Kürbis, Speise-	60	60	k.A.	60	k.A.	60
Lauch	60	60	60	60	60	60
Nüsslisalat	30	15	15	15	15	30
Pak-Choi <sup>#</sup>	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.
Pastinake	k.A.	60	60	60	k.A.	k.A.
Petersilie	k.A.	60	60	60	k.A.	60
Radieschen	30	30	30	15	15	30
Randen	60	60	60	60	60	60
Rettich	k.A.	60	60	60	60	30
Rhabarber	k.A.	90	90	90	90	60
Rosenkohl	90	90	90	90	90	60
Rüben	k.A.	60	k.A.	60	k.A.	60
Rucola	30	30	k.A.	30	k.A.	30
Salate ( <i>Cichorium</i> )	k.A.	60	60	30	60	60
Salate ( <i>Lactuca sativa</i> )	30	30	30	60	30	30
Schnittlauch	k.A.	60	k.A.	30	k.A.	60
Schwarzwurzel	k.A.	90	k.A.	90	k.A.	60
Sellerie, Knollen-	60	60	60	60	60	60
Sellerie, Stangen-	30	30	k.A.	30	k.A.	60
Spargel	k.A.	90	90	90	90	60
Spinat	30	30	30	30	30	30
Topinambur	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.
Wirz	k.A.	60	60	90	k.A.	60
Zucchetti	60	60	30	60	k.A.	60
Zuckermais	k.A.	90	60	90	90	60
Zwiebeln	60	60	60	60	k.A.	60

<sup>#</sup> keine Angabe in der Literatur, jedoch vergleichbar mit Chinakohl

## 4.4 Fazit

Die Kenntnis über die Wurzelsysteme von Gemüsekulturen ist begrenzt und die Verknüpfung verschiedener Wurzeigenschaften und deren Funktionen ist derzeit immer noch unsicher (Judd *et al.* 2015). Dies liegt mitunter daran, dass es so viele verschiedene Gemüsearten gibt und quantitative Messungen von Wurzeln im Feld zeitaufwendig sind. Dennoch vermag unsere Studie Hinweise zu geben auf grosse Unterschiede in der Durchwurzelungstiefe zwischen den Gemüsearten. So können wichtige Gemüsearten, wie z. B. Kabis, bis deutlich unterhalb 1 m wurzeln (Kristensen und Thorup-Kristensen 2004). Das unterschiedliche Wurzeltiefenwachstum zwischen den Gemüsearten kann für eine Klassierung der Gemüsearten in Bezug auf deren Nitratauswaschungspotenzial genutzt werden. Zudem lassen sich die Unterschiede der durchwurzelten Bodenzone unter den Gemüsearten für eine gezieltere, auf die Verminderung der N-Auswaschung ausgerichtete Frucht- bzw. Kulturfolgeplanung anwenden. Dabei gilt es, die Bedeutung der Durchwurzelungstiefe auch für die Zwischenkulturen, sofern sie genügend lang auf dem Feld stehen, um grössere Durchwurzelungstiefen zu erreichen, zu berücksichtigen. Letztlich zeigen diese Ergebnisse, dass N, der unterhalb von 1 m Tiefe verlagert wird, nicht zwangsläufig ausgewaschen wird. Allerdings ist das Auswaschungsrisiko gross, weil die Zeiträume, in denen Kulturen N aus tieferen Schichten aufnehmen können, häufig kurz sind. Zukünftige Versuchsanordnungen und Modellrechnungen sowie Düngebedarfsschätzungen sollten dies berücksichtigen.

## 5 Evaluierung der Bewirtschaftungsmassnahmen im Freilandgemüsebau

Die Wahl geeigneter Bewirtschaftungsmassnahmen ist nicht nur wichtig für die Ertrags- und Qualitätssicherung der Kultur, sondern beeinflusst auch entscheidend das Nitratauswaschungspotenzial. Im Folgenden werden vier Massnahmen erörtert: Düngung, Bewässerung, Bodenbearbeitung und die Frucht-/Kulturfolge.

### 5.1 Düngung

Im heutigen Freilandgemüsebau ist eine sachgerechte N-Düngung notwendig, um den grossen N-Bedarf der meisten Gemüsearten bis zum Ende der oft kurzen Kulturzeit zu decken und somit hohe Erträge und eine gute Qualität zu gewährleisten (Röber und Schacht 2008). Aus ökonomischer und ökologischer Sicht gilt es dabei, den Dünger möglichst effizient einzusetzen, um einerseits Kosten zu sparen und vermarktungsfähige Waren (z. B. niedrige Nitratgehalte im Blattgemüse) zu produzieren und um andererseits die Umweltbelastung durch Nährstoffverluste (z. B. Nitrataustrag ins Grundwasser) zu minimieren. Im Nachfolgenden werden Düngemittel und Düngungsverfahren sowie Methoden zur Düngbedarfsermittlung beschrieben, die zu einer N-Effizienzsteigerung im Freilandgemüsebau und somit zur Reduktion der Nitratauswaschung beitragen können.

#### 5.1.1 Düngemittel

Eine Vielzahl an Düngemitteln wird im Freilandgemüsebau ausgebracht (Feller *et al.* 2011; Neuweiler 2011; Richner und Sinaj 2017). Zu den klassischen Düngemitteln zählen die mineralischen N-Dünger (z. B. Kalkammonsalpeter) und die Hof- und Recyclingdünger. Mit Hilfe von Zusätzen (z. B. Nitrifikationshemmer) können die meisten dieser Düngemittel zu Langzeitdüngern umgewandelt werden. Für einen Überblick über Nährstoffgehalte und N-Mineralisierung organischer Düngemittel sei hier auf die Zusammenstellung von Sradnick *et al.* (2017) verwiesen. Da die klassischen Düngemittel den meisten Lesern bekannt sein dürften, soll im Weiteren nur auf die Langzeitdünger eingegangen werden.

Unter Langzeitdünger fallen Düngemittel mit langsamer, kontrollierter oder unkontrollierter Freisetzung (Shaviv 2001). Bei Letzteren erfolgt die Nährstofffreisetzung langsamer als bei den üblicherweise verwendeten Mineraldüngern, wobei die Geschwindigkeit und die Dauer der Freisetzung nicht gut kontrolliert sind. Bei einem kontrollierten Freisetzungsdünger sind die Faktoren, die die Rate und die Dauer der N-Freisetzung bestimmen, bekannt und können bei der Herstellung des Düngers beeinflusst werden. Die langsame und/oder kontrollierte N-Freisetzung wird durch chemische Zusätze (Harnstoff-Formaldehyd-Produkte und Isobutylidendiharnstoff), physikalische Beschichtungen (z. B. Schwefel, Wachs, Harz, Polymere) oder durch die lokal erhöhte Konzentration des N (Cultan: Controlled Uptake Long Term Ammonium Nutrition) erzielt (Sommer 2005; Laber und Lattauschke 2014; Kah *et al.* 2018).

Langzeitdünger haben Vor- und Nachteile (Tabelle 2). Einer der in der Literatur meist benannten ökonomischen Vorteile der langsam und kontrolliert freisetzenden N-Dünger ist eine Vereinfachung der N-Düngung und die damit verbundene Kostenersparnis, da nur eine Anwendung nötig ist, um den vollständigen N-Bedarf einer Gemüsekultur zu decken. Jedoch ist davon auszugehen, dass solche Dünger nur angewendet werden, wenn die höheren Düngerkosten und Erlöseinbussen durch möglicherweise etwas geringere Erträge/Qualitäten durch die eingesparten Kosten der Düngerausbringung überkompensiert werden. Zudem besteht Unsicherheit, ob der langsam freigesetzte N den zeitlichen und mengenmässigen N-Bedarf der Kultur während der exponentiellen Wachstumsphase in einer ausreichenden Menge deckt (Neuweiler und Krauss 2017).

Ein Vorteil aus ökologischer Sicht könnte sein, dass die verlangsamte N-Freisetzung die Nitratauswaschung reduziert, da diese im optimalsten Fall synchron zum Pflanzenbedarf verläuft und nur geringe Mengen an Boden-N<sub>min</sub> vorliegen, die beispielsweise durch hohe Niederschläge während der Vegetationszeit ausgewaschen werden können.

Inwieweit Langzeitdünger tatsächlich zur Reduktion der Nitratauswaschung im Freilandgemüsebau beitragen können, ist aufgrund der wenigen Publikationen nur schwer abzuschätzen. In der bereits beschriebenen Studie von Schwarz *et al.* (2010) konnte kein signifikanter Effekt des stabilisierten N-Düngers (ENTEC) im Vergleich zu Kalkammonsalpeter in einer vierjährigen gemüsebaulichen Fruchtfolge festgestellt werden. Beim Einsatz des Cultan-Verfahrens liegt laut Sommer (2005) der Wirkungsgrad des als konzentrierte Ammoniumsulfat-Lösung gedüngten N bei 90–95 %, langfristig bei bis zu 100 %. Im Vergleich zu einer konventionellen Düngung z. B. mit Ammonsalpeter konnte gezeigt werden, dass sich bei reduzierter N-Düngemenge (Kücke 2003), gleich hohe oder um bis zu 30 % höhere Erträge erzielen lassen (Bacher und Lenz 1996; Kücke 2003), wobei sich die Nitratgehalte im Gemüse (Kücke 2003) und im Boden nach der Ernte (Bacher und Lenz 1996) sowie die Nitratauswaschung (um ca. einen Drittel von 144 auf 98 kg NO<sub>3</sub>-N ha<sup>-1</sup>; Köhler *et al.* 2003) reduzieren können. Diese Ergebnisse deuten an, dass nebst N-Düngern, die Nitrifikationshemmer enthalten, das Cultan-Verfahren eine Option ist, um die Nitratauswaschung zu reduzieren. Aufgrund der geringen Anzahl an publizierten Versuchsergebnissen (z. B. Flisch *et al.* 2013) besteht jedoch Unsicherheit, die nur durch weitere Versuche ausgeräumt werden kann.

Tabelle 2: Potenzielle Vor- und Nachteile von Langzeitdüngern nach Alexander und Helm (1990), Guertal (2009), Neuweiler (2011) und Thompson *et al.* (2017)

Vorteile	Nachteile
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Einfaches Düngungsverfahren, da meist nur eine Anwendung eines einzigen N-Düngemittels</li> <li>• Gleiche Erträge bei vermindertem N-Einsatz und reduzierten Ausbringungskosten</li> <li>• Reduzierte Verluste durch N-Verflüchtigung und N-Auswaschung, insbesondere durch die effizientere N-Nutzung durch die Pflanze in Gebieten mit starken Regenfällen während und nach dem Anbau und auf sandigen Böden</li> <li>• Verfügbarkeit von Nährstoffen während der gesamten Kulturperiode</li> <li>• Keine Wurzelverbrennung (relativ grosse Mengen können ausgebracht werden, ohne dass die Gefahr besteht, dass die Wurzeln verbrannt werden)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Teurer als konventioneller mineralischer N-Dünger pro N-Einheit</li> <li>• Unsicherheit, ob der freigesetzte N den zeitlichen und mengenmässigen Bedarf der Kultur in jedem Fall optimal deckt, wenn der N-Bedarf während der exponentiellen Wachstumsphase schnell ansteigt</li> <li>• Potenzielle negative Umweltwirkung der chemischen Zusätze</li> </ul>

Eine neuartige Version der Langzeitdünger sind die mit Hilfe der Nanotechnologie entwickelten Nanodüngemittel, die auch als Premium-Düngemittel bezeichnet werden (Hu *et al.* 2014; Kah *et al.* 2018). Abhängig von der Rolle der Nanomaterialien und der verwendeten Nährstoffe können Nanodüngemittel in drei verschiedene Kategorien unterteilt werden: Nanomaterialien aus Makronährstoffen, Nanomaterialien aus Mikronährstoffen und Nanomaterialien als Trägerstoffe für Makronährstoffe (Tabelle 3). Eine Analyse von 78 veröffentlichten Arbeiten zeigt, dass der am Median gemessene Wirkungszuwachs gegenüber herkömmlichen Düngemitteln etwa 20–30 % betragen kann (Kah *et al.* 2018). Jedoch basiert diese Einschätzung lediglich auf Versuchsergebnissen unter kontrollierten Bedingungen. Laut Kah *et al.* (2018) gibt es derzeit keine umfassende Studie in der Literatur, die die Wirksamkeit und die Umweltauswirkung von Nanoagrochemikalien unter Feldbedingungen bewertet.

Zudem ist zu bedenken, dass durch den Einsatz von Nanomaterialien diese Dünger auch zu einer Umweltbelastung führen können. In vielen Studien fehlen jedoch nanospezifische Qualitätssicherung und

angemessene Kontrollen. Dies ist eine entscheidende Wissenslücke und mehr Arbeit wird daher notwendig sein, um eine fundierte Bewertung der Vorteile und neuen Risiken, die Nanochemikalien im Vergleich zu bestehenden Produkten darstellen, abgeben zu können.

Tabelle 3: Neuartige Düngemittel für den Einsatz im Freilandgemüsebau (Hu et al. 2014)

Typ	Beschreibung
Peptid-N-Dünger	Die biologische Bodenaktivität spielt eine wichtige Rolle bei der Verbesserung der Nährstoffverwertung. Das Schlüsselmaterial von Peptid-N-Düngern sind Peptide, die in Böden eine starke biologische Aktivität entfalten. Peptide werden aus Extrakten von Puppen der Seidenraupen durch spezifische Enzymkatalyse nach Fermentation, Trennung und Reinigung hergestellt. Der Peptid-N-Dünger (N > 42 %, Peptidgehalt > 0,4 %) entsteht durch die Vermischung der Peptide mit Metalloproteinasen aus Harnstoff
Chitosan-beschichteter Harnstoff	Chitosan-beschichteter Harnstoff wird unter Verwendung von Chitosan (ein Biopolymer und natürlich vorkommendes Polyaminosaccharid, welches sich vom Chitin ableitet) als Beschichtungsmaterial und Formaldehyd, sowie Epoxychlorpropan hergestellt (N 45 %, Chitosangehalt > 2–3 %)
Biokohle-beschichteter Harnstoff	Als Beschichtungsmaterial wird Biokohle verwendet. Der Gesamt-N-Gehalt von Pflanzenkohle-beschichtetem Harnstoff hängt von dem Verhältnis von Harnstoff: Biokohle ab und kann 40 % im Düngemittel überschreiten
Langzeitgranulatdünger mit Diammoniumphosphat	Getrocknetes Granulat aus dem Gemisch von humusähnlichen Substanzen (Mischung aus Fulvosäure, Ammoniumthiosulfat und Dicyandiamid) mit Ammoniumphosphat, Ammoniumchlorid, Schwefelsäure und flüssigem NH <sub>3</sub> (39 % N, 4 % P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> )
Wasserabsorbierende, langsam freisetzende N-Dünger	Düngemittel zur Rückhaltung von Wasser und zur Nährstoffversorgung, die insbesondere in Trockengebieten die Nährstoffwirkung erhöhen können. Granulate aus der Mischung von Harnstoff, Monoammoniumphosphat, Kaliumchlorid oder Kaliumsulfat mit Spurenelementen, Füllstoffen (Dolomit-Feinteile) und Wasserrückhaltungsmitteln (Acrylamid und Polyacrylamid mit ultrahohem Molekulargewicht)
Nanolangzeitdünger	Das Trägermaterial wird unter Verwendung von Siliciumhydroxylapatit, Hydrotalcit, Montmorillonit, Titandioxid, Calcit, Kaolinit, Dimethylsulfoxid (DMSO), Methanol und Kaliumacetat hergestellt. Der Nanolangzeitdünger wird dann durch die Kombination des Trägers mit einem Gemisch aus Huminsäure, Holzessig, Melasse, Kleie, Raps, Rapskuchen, Weizenstroh, mikrobiellem Ferment, Mineraldünger oder Schweinegülle hergestellt

### 5.1.2 Düngemittelausbringung

Neben der Wahl der Düngemittel spielt das Ausbringverfahren eine entscheidende Rolle hinsichtlich der Vermeidung von N-Verlusten und der Produktion von qualitativ hochwertigem Gemüse. In Bezug auf die gute fachliche Praxis sind Düngemittel so auszubringen, dass Nährstoffe weitestgehend von den Kulturpflanzen aufgenommen und Nährstoffverluste durch Auswaschung vermieden werden (Laber und Lattauschke 2014). Die Ausbringung ist gekennzeichnet durch die Platzierung des Düngers (z. B. Bandablage), dem Zeitpunkt und einer eventuellen Unterteilung der gesamten Düngermenge in mehrere Gaben. Düngemittel können breit gestreut oder platziert als Reihendüngung/Düngeband im Reihbereich bzw. als Unterfussdüngung unter der Saat-/Pflanztiefe abgelegt werden. Dadurch, dass die Pflanzenwurzeln den ausgebrachten Dünger schneller erreichen, kann mit einer Düngerplatzierung das Auswaschungsrisiko vermindert werden (Laber und Lattauschke 2014).

Ebenso hilft eine Aufteilung der gesamten N-Düngung auf mehrere kleinere N-Einzelgaben (Startdüngung zur Pflanzung/Saat und eine bis drei Kopfdüngungen) gemäss den Vorgaben des schweizerischen Ökologischen Leistungsnachweises (VSGP 2011), um N-Verluste zu vermindern. Zudem können Fehler bei der Düngung reduziert bzw. ausgeglichen werden und niedrige N-Mengen, dafür häufiger ausgebracht, sind für die Pflanzen besser und führen zu kontinuierlicherem Wachstum (Laber und Lattauschke 2014). Ideal wären N-Düngergaben in Abhängigkeit vom Wachstumsverlauf der Kultur. Zum Beispiel benötigen Gemüsearten mit langsamer Jugendentwicklung die erste N-Gabe erst nach Beginn einer deutlichen Massenentwicklung (Röber und Schacht 2008). Um die Nitratgehalte im Erntegut zu reduzieren, sollte ferner die letzte N-Düngung mindestens zwei bis drei Wochen vor dem Erntetermin liegen (Laber und Lattauschke 2014). Um  $\text{NH}_3$ -Verluste und Kulturschäden durch Blattverbrennungen, insbesondere im Frühhanbau unter Vlies und Lochfolie, zu vermeiden, sollten Ammonium- und harnstoffhaltige Dünger nach der Ausbringung in den Boden eingearbeitet oder eingeregnet werden (Neuweiler 2011).

### 5.1.3 Düngebedarf der Gemüsearten und Methoden der Düngebedarfsermittlung

Eine genaue Abschätzung des Düngebedarfs ist entscheidend für die Planung der organischen und mineralischen N-Düngung und um N-Verluste zu vermeiden. Der N-Bedarf einer Gemüsekultur, der durch die Düngung abgedeckt wird, unterscheidet sich vom Gesamt-N-Bedarf, den die Pflanze für ein optimales Wachstum benötigt, um die zu vermarktenden Pflanzenorgane als auch alle anderen pflanzlichen Organe einschliesslich des Wurzelsystems auszubilden. Wie von Eiler (2015) treffend definiert, ist der Düngebedarf gleich der «Nährstoffmenge, die den Nährstoffbedarf einer Kultur nach Abzug sonstiger verfügbarer Nährstoffmengen und unter Berücksichtigung der Nährstoffversorgung des Bodens abdeckt», wobei der Nährstoffbedarf massgeblich von der angestrebten Ertragshöhe beeinflusst wird (Röber und Schacht 2008). Die Höhe der Abzüge hängt von vielen Faktoren ab. Massgebend sind die Bestandsentwicklung, die Jahreszeit (z. B. Witterungsverlauf), die Standorteigenschaften (z. B. Bodenart, Humusgehalt,  $N_{\min}$ -Gehalt), die Kulturmassnahmen (z. B. Bodenbearbeitung, Bewässerung), die Kulturdauer und die Anbauhistorie (z. B. langjährige Zufuhr organischer Dünger, Vorfrucht und Zwischenfruchtanbau, N-Mineralisierung durch Ernterückstände) (Röber und Schacht 2008). Um den Düngebedarf unter Berücksichtigung möglichst vieler Einflussgrössen abschätzen zu können, wurde eine Reihe von Methoden entwickelt, die sich nach Agostini *et al.* (2010) wie folgt unterteilen lassen:

- Methoden basierend auf dem  $N_{\min}$ -Gehalt des Bodens
  - $N_{\min}$ -Methode
  - Kulturbegleitende  $N_{\min}$ -Sollwerte-Methode (KNS)
- Methoden basierend auf der Bewertung des Pflanzenernährungsstatus
  - Pflanzensaft-Test
  - SPAD (Chlorophyll-Messung)
  - Index of Nitrogen Nutrition (INN)
- Nährstoffmodellierung und Systemanalyse
  - Mechanistische Modelle
  - EDV-Programme (z. B. N-Expert)

Im Nachfolgenden werden drei vielversprechende Methoden ( $N_{\min}$ -Methode, das Kulturbegleitende- $N_{\min}$ -Sollwert-System und N-Expert) zur Bestimmung des N-Düngebedarfs im Freilandgemüsebau dargestellt und deren Anwendung in Bezug auf die Reduktion der Nitratauswaschung diskutiert. Diese umfassen die sehr einfache  $N_{\min}$ -Methode, wie in den GRUD 2017 für den schweizerischen Ackerbau beschrieben (Richner und Sinaj 2017) bis hin zu recht komplexen Systemen wie der KNS-Methode.

Die  **$N_{\min}$ -Methode** basiert auf der Erkenntnis, dass im Verlauf der Vegetationszeit unterschiedliche Mengen an mineralischem N im Boden vorhanden sind (Wehrmann und Scharpf 1986). Um den N-Düngebedarf

abzuschätzen, wird vor Kulturbeginn der im Boden vorhandene mineralische N in der von den Wurzeln nutzbaren Bodenschicht ( $N_{\min}$ -Vorrat) durch die Entnahme von Bodenproben ( $N_{\min}$ -Probe) gemessen. Dabei ist zu beachten, dass der Zeitraum zwischen der Beprobung und der anschliessenden Düngung so kurz wie möglich ist (Röber und Schacht 2008) und die Beprobung frühestens vier Wochen nach einer mineralischen Düngung durchgeführt wird (Feller *et al.* 2011). Der N-Düngebedarf ergibt sich aus der Differenz zwischen dem gemüseart-spezifischen  $N_{\min}$ -Sollwert und dem ermittelten  $N_{\min}$ -Vorrat. Abbildung 8 zeigt die Einteilung der Gemüsearten nach  $N_{\min}$ -Sollwerten in vier Klassen. Hierbei zeigt sich, dass Blattgemüse (z. B. Nüsslisalat und Spinat) im Vergleich zu Kohlgemüse (z. B. Rosenkohl, Kabis) einen geringen N-Bedarf aufweisen.

Der  $N_{\min}$ -Sollwert repräsentiert die N-Menge an pflanzenverfügbarem N, mit der im Mittel vieler Düngungsversuche der Höchstertragsbereich gerade erreicht wurde (Fink *et al.* 2010). In diesen Düngungsversuchen zeigte sich, dass im Zeitpunkt der Ernte ein  $N_{\min}$ -Mindestvorrat im durchwurzelten Bodenbereich vorhanden sein muss, um Qualitätseinbussen (z. B. unzureichende Grünfärbung der Blätter) zu vermeiden, da ein Grossteil der Feldgemüsearten geerntet wird, wenn die N-Aufnahme der Pflanze noch sehr hoch ist. Der  $N_{\min}$ -Mindestvorrat variiert im Mittel je nach Kultur zwischen 20–50 kg N ha<sup>-1</sup> (Tabelle 4). Gemüsearten, die bis zur Ernte eine hohe N-Aufnahmerate aufweisen und die hinsichtlich Ertrag und Qualität besonders stark auf N-Mangel reagieren, sind beispielweise Stangensellerie, Bundzwiebeln, Blumenkohl, Brokkoli und Spinat. Dagegen ist beispielsweise bei Rosenkohl, Karotten und Chicorée ein hoher  $N_{\min}$ -Gehalt bei der Ernte nicht ausschlaggebend oder wirkt sich sogar negativ aus (Hortipendium 2013; Laber und Lattauschke 2014) aus. Neben dem qualitativen Aspekt ist der  $N_{\min}$ -Mindestvorrat eine Risikoabsicherung bei Ernteverspätungen oder N-Verlusten durch hohe Niederschläge (Hortipendium 2013).

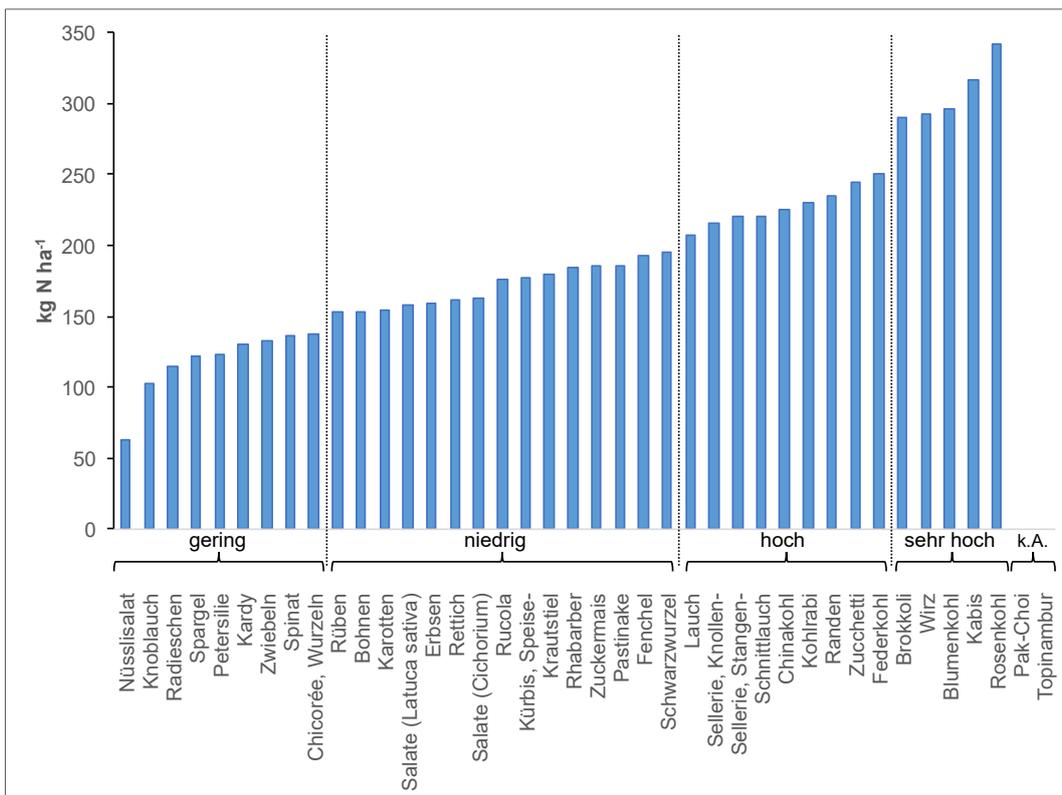


Abb. 8:  $N_{\min}$ -Sollwerte der Gemüsearten zur Bestimmung des N-Düngebedarfs im Freilandgemüsebau nach der  $N_{\min}$ -Methode, gemittelt nach den Angaben in BMLFUW (2008), Röber und Schacht (2008) und Feller *et al.* (2011); senkrechte Linien zeigen die Einteilung der Gemüsearten in vier Klassen: sehr hoch (> 250 kg N ha<sup>-1</sup>), hoch (200–250 kg N ha<sup>-1</sup>), niedrig (150–200 kg N ha<sup>-1</sup>) und gering (< 150 kg N ha<sup>-1</sup>); k.A. = keine Angabe.

Was bei der N-Düngung nach dem  $N_{\min}$ -Sollwert zudem berücksichtigt werden sollte, sind die N-Freisetzung aus unmittelbar vor oder nach der  $N_{\min}$ -Probe eingearbeiteten Ernterückständen der Vorkultur oder einer Gründüngung und/oder ausgebrachter Hofdünger sowie die N-Zufuhr durch das Bewässerungswasser

ebenfalls berücksichtigt werden (Fink *et al.* 2010; Laber und Lattauschke 2014). Des Weiteren sollte in einer Kulturfolge mit Leguminosen die zu erwartende N<sub>2</sub>-Fixierung durch die Knöllchenbakterien eingerechnet werden (Laber und Lattauschke 2014). Als Faustzahl kann während der Vegetationszeit mit einer N-Nachlieferung durch die N-Mineralisation aus der organischen Bodensubstanz in den oberen 30 cm eines Bodens mit 2 % Humusgehalt zwischen 100–150 kg N ha<sup>-1</sup> pro Jahr oder 5 kg N ha<sup>-1</sup> je Woche gerechnet werden (Laber und Lattauschke 2014). Die N-Menge in Gründüngungsbeständen kann laut Laber und Lattauschke (2014) anhand der Frischmasse im Aufwuchs geschätzt werden. Demnach kann je kg Frischmasse pro m<sup>2</sup> bei Nicht-Leguminosen mit 30 kg N ha<sup>-1</sup>, bei Leguminosen mit 40–50 kg N ha<sup>-1</sup> gerechnet werden, wovon im Falle von jungem, nicht verholztem Material kurzfristig bis zu 50 % freigesetzt werden.

Tabelle 4:  $N_{\min}$ -Sollwerte und  $N_{\min}$ -Mindestvorrat zur Bestimmung des N-Düngebedarfs im Freilandgemüsebau nach der  $N_{\min}$ -Methode [nach den Angaben in BMLFUW (2008), Röber und Schacht (2008) und Feller *et al.* (2011)] und N-Bruttobedarfswerte nach den Grundlagen für die Düngung landwirtschaftlicher Kulturen in der Schweiz [GRUD, Neuweiler und Krauss (2017)] für Gemüsearten im Freilandgemüsebau

	$N_{\min}$ -Sollwert <sup>#</sup>	$N_{\min}$ -Mindestvorrat	GRUD 2017 <sup>§</sup>
Gemüseart	kg N ha <sup>-1</sup>	kg N ha <sup>-1</sup>	kg N ha <sup>-1</sup>
Blumenkohl	260–332	40–60	300
Bohnen	100–207	0–40	30
Brokkoli	240–340	40	170–250
Chicorée, Wurzeln	80–195	0–40	80
Chinakohl	210–240	20–40	180
Erbsen	110–208	0–40	0–20
Federkohl	250	40	k.A.
Fenchel	175–210	40	160–180
Kabis	233–400	20–60	160–300
Kardy	130	40	k.A.
Karotten	98–210	0–40	60–150
Knoblauch	95–110	20	k.A.
Kohlrabi	190–270	40–60	140–180
Krautstiel	180	40	160
Kürbis, Speise-	120–235	0–50	150
Lauch	134–280	40–60	170–220
Nüsslisalat	41–85	20–40	50
Pastinake	170–200	0–40	k.A.
Petersilie	54–192	20–60	100
Radieschen	110–120	40–50	50
Randen	182–288	20–50	150
Rettich	142–180	40	120
Rhabarber	115–254	0–50	140
Rosenkohl	260–423	0–40	300
Rüben	130–176	0–40	150
Rucola	136–216	40–60	150–210
Salate ( <i>Cichorium</i> )	116–210	30–40	120–180
Salate ( <i>Lactuca sativa</i> )	140–175	40–60	100–120
Schnittlauch	170–270	20–50	180
Schwarzwurzel	195	40	k.A.
Sellerie, Knollen-	180–250	40–50	210
Sellerie, Stangen-	190–250	50	200
Spargel	75–169	20–40	140–150
Spinat	42–230	20–40	140–190
Wirz	265–320	20–40	140–170
Zucchetti	200–289	20–50	150
Zuckermais	160–210	20–40	150
Zwiebeln	56–210	20–50	120–130

<sup>#</sup> $N_{\min}$ -Sollwert inkl.  $N_{\min}$ -Mindestvorrat und ohne Berücksichtigung der Boden-N Mineralisierung oder weiterer Einflussgrössen; k.A. = keine Angaben

<sup>§</sup>Brutto-N-Bedarf entspricht dem Nährstoffentzug der Kulturen bei optimalen Erträgen von Qualitätsgemüse. Bei der Berechnung des Netto-Nährstoffbedarfes an N werden 20 % des gesamthaft in den Ernterückständen enthaltenen pflanzenverfügbaren N berücksichtigt.

Wie die Publikationen zeigen, kann die Anwendung der  $N_{\min}$ -Methode dazu beitragen, die Nitratverluste im Freilandgemüsebau deutlich zu reduzieren. Zum Beispiel konnte in einem dreijährigen Feldversuch mit der Kulturfolge Salat-Salat-Kabis mit Hilfe der  $N_{\min}$ -Methode die Düngung um über 50 % (von 440 kg N auf 193 kg N ha<sup>-1</sup>) und der  $N_{\min}$ -Gehalt (0–90 cm) des Bodens im Januar von über 200 kg auf 60 kg N ha<sup>-1</sup> reduziert werden, ohne dass Ertragseinbussen auftraten (Wehrmann und Scharpf 1986). Im bereits beschriebenen modellbasierten Simulationsversuch von Nendel (2009) konnte für acht Modellbetriebe und zwölf verschiedene dreijährige Fruchtfolgen in der Region Baden-Württemberg durch die Anwendung der  $N_{\min}$ -Methode das N-Auswaschungspotenzial unter 90 cm Bodentiefe von 195 auf 69 kg N ha<sup>-1</sup> a<sup>-1</sup> gesenkt werden, ohne die Erträge und Wirtschaftsleistung negativ zu beeinflussen (Abb. 5).

Um die Abschätzung des N-Düngebedarfs zu verbessern, wurde das auf der  $N_{\min}$ -Methode basierende **Kulturbegleitende- $N_{\min}$ -Sollwerte-System (KNS)** entwickelt (Lorenz *et al.* 1989). Mit dem genaueren KNS-System ist es möglich, N-Sollwerte nicht nur für den Beginn der Kultur, sondern auch für jeden beliebigen Zeitpunkt während des Pflanzenwachstums – kulturbegleitend – zu berechnen (z. B. Kopfdüngung) und so die N-Düngung flexibel an den Bedarf und Wachstumsverlauf der Kultur anzupassen (Hortipendium 2013). Zudem können starke Schwankungen des  $N_{\min}$ -Gehalts des Bodens (z. B. N-Auswaschung durch hohe Niederschläge, hohe N-Nachlieferung aus organischen Quellen) während einer langen Kulturdauer ausgeglichen werden (Lorenz *et al.* 1989). Die  $N_{\min}$ -Sollwerte werden folgendermassen berechnet: notwendiger  $N_{\min}$ -Mindestvorrat beim geplanten nächsten Düngungstermin bzw. beim voraussichtlichen Erntezeitpunkt (Tabellenwert) plus N-Aufnahme bis zu diesem Zeitpunkt (Abschätzung mit Hilfe von Richtwerten) minus Netto-Mineralisierung in der durchwurzelten Bodentiefe (Tabellenwert). Für eine ausführliche Beschreibung der Sollwert-Berechnung sowie kulturspezifische Sollwerte sei an dieser Stelle auf die Publikation von Feller *et al.* (2011) verwiesen.

Um in der täglichen Praxis den Arbeitsaufwand bei der Düngebedarfsermittlung zu verringern und um die Nitratdynamik des Bodens in Wechselwirkung mit der Pflanze besser erfassen zu können, wurde das EDV-Programm **N-Expert**, welches auf den Ansätzen des  $N_{\min}$ -Systems und des KNS-Systems aufbaut, entwickelt (Fink und Scharpf 1993). Das vom Leibniz-Institut für Gemüse- und Zierpflanzenbau (IGZ) in Grossbeeren (Deutschland) kostenlos zur Verfügung gestellte Programm (<http://www.igzev.de/user/N-Expert/index.php>) unterstützt Landwirte und Düngungsberater bei der Ermittlung des Düngebedarfs von Gemüsekulturen und bei der Erstellung von Nährstoffbilanzen gemäss der aktuellen deutschen Düngeverordnung. Die in N-Expert verwendeten Algorithmen und Daten (Bedarf an N, P, K, Mg von allen wichtigen Gemüsearten und von vielen weiteren Kulturen, die in einer Fruchtfolge mit Gemüse angebaut werden können) geben den Stand des Wissens zur Berechnung von schlagspezifischen Düngeempfehlungen für Gemüse wieder. Die Düngeempfehlungen nach N-Expert können mit Hilfe der Daten aus der Tabellensammlung analog mit «Papier und Bleistift» oder direkt im N-Expert-Computerprogramm berechnet werden (Hortipendium 2013).

Untersuchungen des IGZ und Feldversuche anderer Institutionen haben gezeigt, dass mit N-Expert - im Vergleich zur Düngung nach Faustzahlen - die Sicherheitszuschläge und die N-Verluste vermindert werden können, ohne dass es zu Ertragseinbussen kommt. Zum Beispiel untersuchten Rather und Grosse-Lengerich (2013) in Baden-Württemberg (Deutschland) den  $N_{\min}$ -Gehalt im Herbst in der 0–90 cm Bodenschicht in einer dreijährigen Fruchtfolge (Brache - Karotten // Rettich - Bundzwiebeln // Karotten - Roggen). Durch die Anwendung von N-Expert konnte die N-Versorgung der Karotten besser auf den N-Bedarf abgestimmt werden. Die  $N_{\min}$ -Gehalte im Herbst konnten durch N-Expert gegenüber den in der landwirtschaftlichen Praxis üblichen Faustzahlen grösstenteils verringert werden. Die Kombination von N-Expert und Änderung der Fruchtfolge, d. h., Futterroggen statt Bundzwiebel im Herbst, führte zu einer weiteren Reduzierung der  $N_{\min}$ -Restmenge.

#### 5.1.4 Fazit

Die Düngungsplanung ist unerlässlich, um ein Gleichgewicht zwischen wirtschaftlichen und ökologischen Vorteilen zu erzielen. Die negativen Auswirkungen der N-Düngung auf die Umwelt können mit einer

geeigneten Wahl der Düngemittel, der Ausbringungsverfahren und der Methode der Düngedarfsermittlung minimiert werden. Versuchsergebnisse zeigen, dass insbesondere mit einer guten Methode der Düngedarfsermittlung die Nitratauswaschung in das Grundwasser deutlich reduziert werden kann. Gezielte Versuche in Zusammenarbeit mit Gemüsebaubetrieben wären deshalb anzuraten. Einerseits, um die Wirksamkeit der kulturbegleitende Bedarfsermittlungsverfahren zu belegen, und andererseits, um deren Durchführbarkeit auf Betriebsebene zu testen. Dabei sollte insbesondere auch auf die Benutzerfreundlichkeit, die zusätzlichen Arbeitskosten und die Komplexität geachtet werden. Nur so kann sichergestellt werden, dass diese Technologien auch in der Breite Verwendung finden und somit zur Reduktion der Nitrateinträge ins Grundwasser beitragen.

## 5.2 Bewässerung

Nach Angaben der Kantone (Stand 2007) beträgt der Flächenanteil der Gemüsekulturen an der gesamten bewässerten landwirtschaftlichen Fläche in der Schweiz etwa 10 % (4410 ha) plus 2370 ha, die gelegentlich bewässert werden (Weber und Schild 2007). Dies entspricht in etwa einem Anteil der bewässerten Fläche an der gesamten Gemüseanbaufläche von 75 %. Die Bewässerung wird grösstenteils noch mit Überkopfberegnung durchgeführt. Anlagen mit Tropfen- und Mikrobewässerung sind noch sehr wenig verbreitet. Bewässerungstechniken, die im Gemüsebau Verwendung finden, fassen die Publikationen von INFORAMA (2013), Hageneder und Beck (2015) und Banse *et al.* (2018) zusammen.

Die sachgerechte Bewässerung kann das N-Auswaschungsrisiko reduzieren und gewährleistet ein für die bestmögliche Nährstoffaufnahme der Pflanzen notwendiges Wasserangebot und somit ein optimales Pflanzenwachstum und eine hohe Produktqualität (Anter *et al.* 2013; Laber und Lattauschke 2014). Zudem lassen sich durch die gezielte Bewässerung die Erträge steigern, die jährlichen Ertragsschwankungen verringern und die Qualität der Ernteprodukte sowohl morphologisch als auch aus der Sicht der Inhaltsstoffe positiv beeinflussen (Anter *et al.* 2013). In Bezug auf die N-Auswaschung ist anzumerken, dass die Effizienz der Düngung erhöht wird, «weil die Mineralisierung aus der organischen Düngung besser kalkulierbar wird, die Mineraldünger gezielter pflanzenverfügbar werden, was deren pflanzlichen Aufnahme sichert, so dass die  $N_{\min}$ -Restmenge im Boden vermindert werden, wodurch der Nährstoffeintrag in das Grundwasser reduziert wird» (Anter *et al.* 2013). Eine nicht sachgerechte Zusatzbewässerung kann jedoch das Risiko der N-Auswaschung, insbesondere auf sandigen Böden, erhöhen (Nett 2012). Deshalb ist aus ökologischer als auch ökonomischer Sicht eine sachgerechte Bewässerung, d. h. ein an den Wasserbedarf der Pflanzen angepasstes und gesteuertes Wasserangebot unerlässlich.

### 5.2.1 Wasserbedarf von Freilandgemüsekulturen

Der Gesamtwasserbedarf von Gemüsekulturen während einer Kulturperiode kann zwischen 145 und 750 mm variieren und unterscheidet sich nach Gemüseart, der Kulturdauer sowie der Jahreszeit (Anhang, Tabelle O). Gemüsekulturen verbrauchen in der Hauptwachstumsperiode im Durchschnitt 4 mm pro Tag (TLL 2008). Im Sommer kann ein Gemüsebestand zwischen 6 und 8 mm umsetzen (Laber und Lattauschke 2014). Artspezifische Unterschiede im Wasserbedarf beruhen in erster Linie auf dem Wurzelsystem, dem Wasserspeichervermögen, der Evapotranspiration und dem Bodenwasser-Aneignungsvermögen der Pflanzen. Für die Erschliessung der Wasservorräte eines Bodens sind vor allem tiefgehende Wurzeln bedeutsam (Gallardo *et al.* 1996; Laber und Lattauschke 2014).

Arten wie Salat (*Lactuca sativa*) mit geringem Verdunstungsschutz, wenig tiefreichendem Wurzelsystem und geringem Wasserspeichervermögen müssen öfter und regelmässiger beregnet werden als solche mit grösserem Wasserspeichervermögen und tiefer reichender Bewurzelung wie Kabis oder mitteltief wurzelnde Arten wie Karotten (Abb. 7). Unterschiede im Bodenwasser-Aneignungsvermögen zeigen sich zum Beispiel zwischen Zwiebeln und Kabis. Zwiebeln können das Bodenwasser bis aus 90 cm Tiefe aufnehmen, schränken die Evapotranspiration aber schon nach Unterschreiten von 80 % nutzbarer Feldkapazität (nFK) in 40 cm Tiefe ein, während Kabis das Bodenwasser bis in 120 cm Tiefe bis auf 40 % nFK ausschöpft, ohne

die Transpiration und Biomassebildung einzuschränken (TLL 2008). Aus dem Wasserbedarf einer Kultur lässt sich unter Einbezug der Niederschläge und der pflanzenverfügbaren Bodenwassermenge der Bewässerungsbedarf berechnen. Die pflanzenverfügbare Bodenwassermenge ist abhängig von der Bodenart, wobei lehmige Böden eine höhere Menge an pflanzenverfügbarem Wasser aufweisen als tonige oder sandige Böden. Jedoch ist zu beachten, dass eine Anrechnung der Bodenvorräte dazu führen kann, dass diese am Ende der Kulturperiode ausgeschöpft sind (Laber und Lattauschke 2014).

### 5.2.2 Bewässerungssteuerung

Um den Bewässerungsbedarf der Gemüsekultur möglichst effizient und mit an das Wachstum angepassten Wassergaben zu decken, empfiehlt sich eine Steuerung der Bewässerung. Hierzu stehen vier verschiedene Methoden als Entscheidungshilfe zur Verfügung (Anter *et al.* 2013): die klimatische Wasserbilanz, die mehrschichtigen Bodenfeuchte- und Evapotranspirationsmodelle, Bodenfeuchtesensoren und die Diagnose von Pflanzensignalen (Tabelle 5). Alle Methoden haben Vor- und Nachteile, die es im Einzelfall abzuwägen gilt. Die beiden Methoden mit dem grössten Potenzial in Bezug auf den Praxiseinsatz und die Genauigkeit stellen die Bodenfeuchtemessung mit Sensoren und die klimatische Wasserbilanz, auch Geisenheimer Steuerung genannt, dar (Paschold *et al.* 2009). Vor- und Nachteile der beiden Methoden im Vergleich zeigt Tabelle P im Anhang.

Mittels der Steuerung der Bewässerung kann die Nährstoffausnutzungseffizienz gesteigert werden, da die N-Mineralisierung relativ genau abgeschätzt werden kann und die für die Nährstoffbilanz zugrunde gelegten Ertragshöhen mit hoher Wahrscheinlichkeit erzielt werden können. Das hat geringe  $N_{\min}$ -Restmenge nach der Ernte zur Folge, so dass die N-Sollwerte standort- und kulturspezifisch um 10–30 kg N ha<sup>-1</sup> niedriger kalkuliert werden können (Laber und Lattauschke 2014).

### 5.2.3 Bewässerung und N-Auswaschung

Die sachgerechte Anpassung der mit einer Einzelgabe ausgebrachten Wassermenge an die Durchwurzelungstiefe und die Bodenart ist entscheidend, um die N-Auswaschung zu minimieren (Feller 2013). Zu hohe Wassergaben verursachen nicht nur Zusatzkosten, sondern erhöhen auch das N-Auswaschungsrisiko (Anter *et al.* 2013). Bestände zeitweise über das notwendige Mass zu bewässern, um einen Puffer zu schaffen, ist nur zweckmässig, wenn bekannt ist, wie viel Wasser der Boden aktuell in der Durchwurzelungszone halten kann, da es sonst durch die Versickerung unterhalb der Wurzelzone zu einem N-Eintrag ins Grundwasser kommen kann (Anter *et al.* 2013). Ziel sollte sein, den Boden bis etwas unterhalb der Hauptwurzelzone zu durchfeuchten, so dass die Wurzeln dazu veranlasst werden, in tiefere Bodenschichten vorzudringen, um dort Wasser und Nährstoffe erschliessen zu können (Anter *et al.* 2013). Dabei ist zu beachten, die unterste durchwurzelte Bodenschicht nur bis zwischen 60 bis 80 % der nFK aufzufüllen, um eine Speicherreserve für hohe Niederschlagsmengen zu behalten (Laber und Lattauschke 2014).

In achtjährigen (1948 bis 1955) Lysimeter-Versuchen zum Freilandgemüsebau auf Böden der landwirtschaftlichen Versuchsstation Limburgerhof (Deutschland) wurde der Einfluss der Beregnung unter anderem im Hinblick auf die N-Auswaschung geprüft (Pfaff 1958). Der Oberboden (0–40 cm) war ein Krümmboden vom Limburgerhof, der Unterboden (40–90 cm) war ein nährstoffarmer Sand. Mineraldünger wurde jährlich in Höhe von 280 kg N ha<sup>-1</sup> in Form von Kalkammonsalpeter und Stallmist jedes zweite Frühjahr in Höhe von 40 t ha<sup>-1</sup> (ca. 65 kg N ha<sup>-1</sup>) appliziert. Auf die beregneten Parzellen wurden während der Kulturperiode zusätzlich zum normalen Niederschlag 189 mm ausgebracht. Durch die Beregnung konnte eine hohe Ertragssteigerung erzielt werden, wobei sich eine ausreichende N-Düngung zur Ausnutzung der Beregnung als unerlässlich erwies. Die Beregnung führte zu einem erhöhten Sickerwasserabfluss. So gingen von durchschnittlich 140 mm Wasser etwa 35 mm (= 25 %) ungenutzt verloren. Jedoch dadurch, dass die beregneten Pflanzen mehr N aufnahmen, wurde die Ausnutzung des Dünger-N verbessert. Infolgedessen wurde auf den beregneten Parzellen im Gesamtjahresverlauf weniger N ausgewaschen. Dabei ist zu beachten, dass im Sommer unter den beregneten Parzellen etwas mehr N als aus den unberegneten ausgewaschen wurde und es im Winter dann umgekehrt auf den unberegneten Parzellen zur weit stärkeren

N-Auswaschung kam. Dabei handelt es sich um jenen N, den die unberegneten Pflanzen aufgrund des geringen Wachstums während der Vegetationszeit nicht aufgenommen hatten.

In einem Lysimeterversuch in einem tiefgründigen Braunerde-Tschernosem aus Löss wurde im Thüringer Becken (Deutschland) Feldgemüse über 10 Jahre (1995–2004) auf einem tiefgründigen Lössboden angebaut (Knoblauch 2013). Dabei wurden die Kulturen beregnet, reduziert beregnet oder nicht beregnet. Die reduziert beregneten Kulturen erhielten erst Zusatzwasser, wenn die reale Evapotranspiration unter 80 % der potenziellen fiel. Der N-Saldo der reduziert beregneten Variante belief sich im Mittel der Jahre auf +7 kg ha<sup>-1</sup>. Eine um 66 mm höhere Zusatzwassermenge je Jahr führt mit +6 kg ha<sup>-1</sup> zu keinem niedrigeren N-Überschuss. Da die tiefer wurzelnden Feldgemüsearten wie Kopfkohl und Pfefferminze den Bodenwassergehalt deutlich unter 60 % nFK zu senken vermochten, ohne die Evapotranspiration einzuschränken, führte die höhere Zusatzwassermenge der beregneten Variante häufig nicht zu einem Mehrertrag und N-Mehrentzug. Die Verabreichung von Zusatzwasser sichert die Erträge und erhöht den N-Entzug, insbesondere bei flachwurzelnden Arten, wobei im Mittel die Nitratkonzentration des Sickerwassers sowie der N-Austrag vermindert wurden.

In einer Meta-Analyse weltweit veröffentlichter experimenteller Ergebnisse (Nordamerika 44 %, Europa 38 %, Asien 14 % und Südamerika 4 %) wurden vier Hauptstrategien (Wassermanagement, Düngungsmanagement, Einsatz von Deckfrüchten und Düngemitteltechnologie) zur Reduzierung der N-Auswaschung in der Landwirtschaft identifiziert und untersucht (Quemada *et al.* 2013). Insgesamt wurden 16 verschiedene Nutzpflanzen in den für den Datensatz ausgewählten Versuchen untersucht, wobei 63 % der Beobachtungen Getreide und 37 % Gemüse zugeordnet wurden. Die Managementpraktiken, die den Wasserverbrauch an den Bedarf der Pflanzen anpassten, hatten mit durchschnittlich 80 % die grösste reduzierende Wirkung auf die N-Auswaschung, ohne den Ernteertrag zu reduzieren. Dabei war die mittlere Wirkung der Strategien auf die Reduktion der N-Auswaschung für die Getreide mit 48 % grösser als für das Gemüse mit 33 %.

#### **5.2.4 Fazit**

Stimmen die Prognosen zum Klimawandel, wird der Bewässerung in Zukunft eine wachsende Bedeutung zukommen. Eine sachgerechte Bewässerung im Freilandgemüsebau kann die Qualität der Produkte verbessern, die Erträge stabilisieren und eventuell steigern und dadurch zur Minderung der N-Auswaschung beitragen.

Tabelle 5: Methoden zur Steuerung von Bewässerung im Freilandgemüsebau nach Anter et al. (2013)

Entscheidungshilfe	Beschreibung und Vorgehen	Zu beachten
Klimatische Wasserbilanz (z. B. Geisenheimer Steuerung)	Basierend auf einer mit Wetterdaten ermittelten Referenzverdunstung wird mithilfe von kultur- und entwicklungsabhängigen Koeffizienten ( $k_c$ ) der Wasserbedarf der jeweiligen Pflanzenart berechnet. Die Methode beruht auf vier Schritten: <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Ausgangsfeuchte ermitteln</li> <li>2. Bestimmung der Bewässerungsmenge je Termin</li> <li>3. Errechnung der täglichen Wasserbilanz</li> <li>4. Bestimmung des Bewässerungszeitpunkts</li> </ol>	Angepasst an Witterungsverhältnisse in Deutschland. Geeignet insbesondere für den Einsatz bei flächigen Bewässerungsverfahren, z. B. Kreis- und Linearberechnungsmaschinen, Rohrberegnung, Beregnungsmaschinen mit Einzelregnern oder Düsenwagen. Weitere Informationen unter <a href="http://www.hs-geisenheim.de">www.hs-geisenheim.de</a> , Stichwort "Geisenheimer Steuerung".
Mehrschichtige Bodenfeuchte- und Evapotranspirationsmodelle	Die komplexen Modelle berechnen den Verlauf der Bodenfeuchtedynamik auf Grundlage von Wetter-, Pflanzen- und Bodendaten sowie weiterer Informationen zur Beregnung und dem Grundwasserstand.	Der Einsatz dieser Modelle erfordert den Zugang zu den Steuerkurven und ein hohes Mass an Fachwissen, das in der Regel nur von Beratungsbüros zur Verfügung gestellt werden kann.
<b>Bodenfeuchtesensoren (z. B. Tensiometer)</b>	Sensoren, die die Bodenfeuchte messen, dienen als Kontroll- und Steuerungsinstrumente für die Bewässerung. Sensoren können die Bewässerung auslösen oder beenden.	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Bei der Kontrolle flächiger Bewässerung ist zu beachten, dass mit Sensoren ausschliesslich punktförmig gemessen werden kann.</li> <li>2. Bodenunterschiede, ungleichmässige Wasser verteilung und zufällig höherer Wasserbedarf an der Messstelle können zu Fehlinterpretationen der Messwerte führen.</li> <li>3. Bei Sensoren mit volumetrischer Anzeige kann keine direkte Aussage zur Verfügbarkeit des Wassers für die Pflanze gemacht werden.</li> </ol>
<b>Pflanzensignale</b>	Monitoring des Pflanzenbestands. Durch Messung von Signalen der Pflanze wird deren Wasserstatus bestimmt (z. B. Veränderung des Trieb- oder Fruchtdurchmessers, Messung der Bestandestemperatur)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Der Wasserbedarf von Kulturpflanzen unterscheidet sich stark</li> <li>• Der Wasserbedarf ändert sich während des Wachstums</li> <li>• Klimatische Faktoren beeinflussen die Verdunstung</li> <li>• Die Durchwurzelungstiefe der Pflanzen im Boden ändert sich im Laufe der Kulturzeit</li> </ul>

### 5.3 Bodenbearbeitung

Im Freilandgemüsebau stehen je nach Zielsetzung verschiedene Techniken der Bodenbearbeitung zur Verfügung, welche die Boden-N-Dynamik und somit die N-Auswaschung unterschiedlich stark beeinflussen können. Ziele der Bodenbearbeitung sind die Schaffung der gewünschten Bodenstruktur, die Unkrautkontrolle, die Einarbeitung von Düngern und Ernterückständen und die Formung der Bodenoberfläche. Die Techniken reichen von intensiven Methoden (z. B. Pflug, Bodenfräse) über reduzierte Bodenbearbeitungsverfahren bis hin zum Direktsaatverfahren. Für eine umfangreiche Beschreibung von Bodenbearbeitungsverfahren anhand von technischen, ökologischen und ökonomischen Kriterien sei hier beispielsweise auf die Zusammenfassung von Palmetshofer-Gassner (2014) verwiesen.

Generell gilt, dass eine intensive Bodenbearbeitung die Mineralisierung fördert und somit die Freisetzung von löslichem Nitrat erhöht. Dies kann kurzfristig von Vorteil sein, z. B. im Frühjahr bei niedrigen Bodentemperaturen. Jedoch kann es auch dazu führen, dass der N zu schnell mineralisiert und durch Auswaschung

verloren geht, bevor die Pflanzen diesen aufnehmen können. Auf lange Sicht führt der erhöhte Abbau der organischen Bodensubstanz, oftmals in Kombination mit einer erhöhten Bodenerosion, zur Reduktion der Bodenfruchtbarkeit. Aufgrund der Nachteile der klassischen Bodenbearbeitung durch den Pflug werden im Freilandgemüsebau vermehrt reduzierte und pfluglose Bodenbearbeitungsverfahren als eine Möglichkeit angesehen, um die Bodenfruchtbarkeit zu erhalten oder sogar zu verbessern. Gründe für die Verwendung dieser Verfahren sind unter anderem eine Verringerung der Wind- und Wassererosion, Reduzierung des Ausstosses von klimarelevanten Gasen durch einen niedrigeren Verbrauch an fossilen Energieträgern bei Pflugverzicht, eine verbesserte Bodenfeuchtigkeitserhaltung und eine langfristige Verbesserung der bodenphysikalischen und mikrobiologischen Eigenschaften des Bodens (Hoyt *et al.* 1994). Diesen wünschenswerten Auswirkungen stehen jedoch häufig Befürchtungen gegenüber, höherer Unkrautdruck und geringere N-Verfügbarkeit könnten zu Ernteverlusten führen. Des Weiteren können dadurch, dass Ernterückstände nicht mehr untergepflügt werden, auch phytomedizinische Probleme auftreten. Im Folgenden sollen drei der Verfahren kurz vorgestellt werden und die Frage, ob diese Verfahren auch zu einer Reduktion der N-Auswaschung im Freilandgemüsebau beitragen können, anhand von publizierten Versuchs- und Anwendungsbeispielen erörtert werden.

### 5.3.1 Verfahren der konservierenden Bodenbearbeitung und Anwendungsbeispiele

Die konservierende Bodenbearbeitung ist im Gemüsebau noch deutlich weniger verbreitet als im Ackerbau. Die Voraussetzungen für die pfluglose Bestellung sind vermutlich meist ungünstig infolge von verdichteten Böden und grossen, teils sehr ungleichmässig verteilten Mengen an Ernterückständen. Des Weiteren ist der Einsatz des Pflugs vorteilhafter bei Unkraut- und phytomedizinischen Problemen (Reduktion von Krankheiten und Schädlingen, die von den Ernterückständen auf andere Kulturen übergehen). Zudem sind pfluglose Verfahren, insbesondere die Direktsaat riskanter, was einen lückenlosen Aufgang und ein rasches Jugendwachstum von Kulturen, insbesondere bei kleinsamigen Pflanzen, angeht. Dies steht in Widerspruch zur hohen Wertschöpfung pro Flächeneinheit, die mit Gemüsebau angestrebt wird.

Neben der Mulchsaat mit Grubbereinsatz sind die Streifensaart (Streifenfrässaat oder auch Strip-Till), das Dammverfahren (Ridge-Tillage) und die Direktsaat/-pflanzung drei in der Literatur häufig genannte Verfahren der konservierenden Bodenbearbeitung im Freilandgemüsebau.

Bei der Streifensaart wird nur der Boden in der Nähe der Saatreihe bearbeitet und anstelle von Pflug und Egge wird eine spezielle Fräse mit Grubberscharen eingesetzt. Es handelt sich im Grunde um einen Kompromiss zwischen Mulchsaat (Saatverfahren mit einer vorangegangenen konservierenden Bodenbearbeitung) und Direktsaat (Saat erfolgt ohne jede Bodenbearbeitung). Ein erfolgreiches Beispiel aus der Praxis für die Anwendung der Streifensaart in der Schweiz ist Reto Minder aus dem Kanton Freiburg (Galbusera 2015). Er arbeitet seit über 11 Jahren ohne Pflug und verwendet das Strip-Till-Verfahren, um Rosenkohl zu kultivieren. Durch das Strip-Till-Verfahren ist der Rosenkohl weniger anfällig auf Trockenheit und der Boden wird vor Erosion geschützt. Zudem hat der Boden eine bessere Tragfähigkeit und nach fünf Jahren konnten stabile und höhere Erträge erzielt werden als zu Beginn. Bei dem Verfahren bleiben gut zwei Drittel des Ackerbodens unberührt. Einziges Manko ist der bisher noch notwendige Glyphosateinsatz, um vor der Saat das Unkraut zu kontrollieren. Aber auch eine gezielte Fruchtfolgeplanung trägt dazu bei, um den Herbizideinsatz auf ein Minimum zu reduzieren und Krankheitsdruck niedrig zu halten. In einer Studie in Michigan (USA) konnte gezeigt werden, dass mit Strip-Till- und Kompostanwendungen die Rentabilität von Karottenproduktionssystemen verbessert werden konnte (Brainard und Noyes 2012).

Im Dammverfahren wird der Boden zu Dämmen geformt, in welche das Saatgut abgelegt wird. Solche Dämme können für mehrere Anbaujahre an Ort und Stelle verbleiben. Bei der Direktsaat/-pflanzung findet keine Bodenbearbeitung statt und die Ablage des Saatguts erfolgt mit speziellen Säwerkzeugen in den unbearbeiteten Boden. Das Dammverfahren wird vom Bio-Hof Feldinger in Wals nahe Salzburg (Österreich) genutzt, um die Auswirkungen des Klimawandels abzumildern (VSGP 2014). Auf Dämme mit 75 cm Abstand werden zum Beispiel Salat, Karotten oder Mangold gepflanzt. Der Vorteil des Verfahrens ist, dass sich der

Boden im Frühling schneller erwärmt und durch die Kapillarwirkung im Damm die Wasserversorgung gleichmässig gut ist, ohne dass Staunässe entsteht.

Die Direktpflanzung ist in den USA im konventionellen Freilandgemüsebau schon seit längerer Zeit in Anwendung (Hoyt *et al.* 1994; Hoyt 1999; Morse 1999). Aber auch in der Schweiz und in Deutschland sind die Verfahren im Gebrauch. Zum Beispiel beschreibt Storch (2013) Mulch- und Direktpflanzungsverfahren, die im biologischen Gemüsebau unter Verwendung der Reihenmulchschneide-Pflanztechnik auf Betriebsebene in Rheinland-Pfalz (Deutschland) eingesetzt werden. Diese umfassen das Verfahren der Direktpflanzung in In-situ-Mulch, der Mulchpflanzung in Transfer-Mulch und die Reihenmulchschneide-Pflanztechnik, welche in Tabelle 6 genauer beschrieben werden. Auf den Versuchsfeldern des Bildungs- und Beratungszentrums Arenenberg (Gutsbetrieb Brunnegg TG) bei Kreuzlingen werden diese Verfahren ebenso für den Anbau von Kopfsalat, Kopfkohl, Lauch und Knollensellerie im erwerbsmässigen Feldgemüsebau getestet (Krieg 2017). Die bisherigen Versuchsergebnisse deuten an, dass die Mulchdecke durch eine konstantere Bodentemperatur und geringere Verdunstung einen Schutz bietet für das Bodenleben. Zudem schützt die Mulchdecke den Boden vor Erosion und trägt zur Humusbildung bei.

Unter der Fragestellung, ob die konservierende Bodenbearbeitung auch im Gemüsebau einsetzbar ist, untersuchte Katroschan (2013) die Möglichkeiten und Grenzen des Pflugverzichts im Feldgemüsebau im Zeitraum 2011–2013 in Mecklenburg-Vorpommern (Deutschland). In der 3-jährigen Fruchtfolge wurden Weisskohl, Winterroggen und zwei Sätze Eisberg-Salat angebaut. Zu den untersuchten Bodenbearbeitungsverfahren zählten der Pflug, der Grubber, Strip-Till und ein Kombinationsverfahren. Bei der Streifenbearbeitung wurde eine höhere Bodenfeuchte, eine höhere Tragfähigkeit und bessere (frühere) Befahrbarkeit festgestellt. Der Einfluss der Reduzierung der Bodenbearbeitungsintensität (Pflugverzicht) hatte einen positiven Effekt auf Bodenstruktur und Bodenprozesse, aber auch teils negative Effekte auf die Ertragsbildung. Wichtige Schlussfolgerungen waren, dass die Bodenbearbeitungsverfahren eine Auswirkung auf das gesamte Anbausystem haben. Eine erfolgreiche Umstellung der Bodenbearbeitung (z. B. Pflugverzicht) bedingt daher eine entsprechende Anpassung des Anbausystems (z. B. Sortenwahl).

Tabelle 6: Beschreibung von Verfahren und Herausforderungen der Mulch- und Direktpflanzungsverfahren im ökologischen Gemüsebau unter Verwendung der Reihenmulchschneide-Pflanztechnik auf Grundlage von Storch (2013)

Verfahren	Beschreibung	Herausforderungen
Direktpflanzung in In-situ-Mulch	<ul style="list-style-type: none"> <li>Jungpflanzen werden ohne Bodenbearbeitung in eine abgefrorene oder abgetötete, gemulchte Zwischenfrucht gepflanzt.</li> <li>Weitere Informationen zum Verfahren aus Wissenschaft und Praxis: Rodale Institut (<a href="http://rodaleinstitute.org/">http://rodaleinstitute.org/</a>), S. Funke (<a href="http://www.gaertnerei-funke.de/">http://www.gaertnerei-funke.de/</a>) und der Betrieb SAG-Gesundkost (<a href="http://www.sagggesundkost.de/das-mulch-system.html">http://www.sagggesundkost.de/das-mulch-system.html</a>)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Im Frühjahr erfolgt im unbearbeiteten Boden eine langsamere Bodenerwärmung und N-Mineralisierung</li> <li>Wenn die Notwendigkeit besteht, mit bestimmten Kulturen besonders früh auf den Markt zu kommen, um höhere Preise zu erzielen, ist die Direktpflanzung nicht geeignet</li> <li>Aufgrund der geringeren Mineralisierung kann es notwendig sein, in den ersten Jahren nach der Umstellung mehr N zu düngen (+20–30 kg N/ha)</li> <li>Generell sind sehr feuchte Standorte mit viel Niederschlag und undurchlässige Böden für Direktpflanzung und Direktsaat nicht zu empfehlen</li> <li>Flächen mit einem hohen Anteil an ausdauernden und Wurzelunkräutern machen eine Direktpflanzung auf biologisch wirtschaftenden Betrieben unmöglich, da sie durch mechanisches Abtöten der Zwischenfrucht nicht reguliert werden können</li> <li>Je kleiner das Saatgut der Kultur ist, desto empfindlicher reagiert es auf allelopathische Stoffe der Mulchschicht. Deshalb wird das beschriebene System z. B. für Karotten schwer anwendbar sein</li> </ul>
<b>Mulchpflanzung in Transfer-Mulch</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Im Gegensatz zum In-situ-Mulch-Verfahren wird der Mulch nicht an Ort und Stelle gewonnen. Stattdessen findet ein Transfer von einer Geberfläche auf eine Nehmerfläche statt.</li> <li>Bei diesem Verfahren werden in erster Linie frische Materialien wie Grünlandschnitt oder gehäckselte Zwischenfrüchte wie z. B. Grünroggen verwendet.</li> <li>Weitere Informationen zum Verfahren: In Skandinavien wird das System von dem Forschungsinstitut Bioforsk (<a href="http://www.bioforsk.no/ikbViewer/en/home">http://www.bioforsk.no/ikbViewer/en/home</a>) für den Erwerbsgartenbau erforscht</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Dieses System ist im Allgemeinen leichter anzuwenden als die Direktpflanzung in In-situ-Mulch</li> <li>Es besteht ein relativ hoher Flächenbedarf</li> <li>Nicht alle Kulturen vertragen eine Mulchabdeckung. Besonders Feinsämereien wie Karotten werden stark durch allelopathische Wirkungen beeinflusst</li> <li>Wurzelunkräuter sind auch im System Transfer-Mulch je nach Auflagedicke schwierig zu unterdrücken</li> <li>Wird bereits im zeitigen Frühjahr gemulcht, besteht die Gefahr, dass die Bodenerwärmung verlangsamt wird, was den frühzeitigen Verkauf von Ware verzögern würde. Es ist daher auf dunkle Materialien (z. B. Silage) zurückzugreifen</li> <li>Schnecken und Mäuse können Probleme darstellen</li> </ul>
Reihenmulchschneide-Pflanztechnik	<ul style="list-style-type: none"> <li>Die Technik erlaubt, die Mulchschicht der Zwischenfrüchte mit einem Scheibensech zu schneiden mit nachfolgender Lockerungs- und Pflanzschar</li> <li>Eine durch Mezyk (2012) patentierte Erfindung. Weiterentwicklung und Produktion mit Firma Baertschi PermaAgrartecnic AG (<a href="http://www.baertschi.com/">http://www.baertschi.com/</a>)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Der wichtigste Anspruch an diese Technik ist das Aufschneiden von verschiedenen Mulcharten (auch Grasmulch) als Vorbereitung für eine störungsfreie Pflanzung</li> <li>Auflagedicken von bis zu 10 cm sollen problemlos zu schneiden sein. Bei diesem Vorgang darf kein Erdboden freigelegt werden; gleichzeitig sollte der Schlitz im Mulch bis zum nachfolgenden Pflanzschar offen gehalten werden</li> </ul>

### 5.3.2 Reduktion der N-Auswaschung durch die Bodenbearbeitung - Versuchsergebnisse

Da die konservierende Bodenbearbeitung im Freilandgemüsebau im Gegensatz zum Ackerbau nur wenig verbreitet ist, sind kaum publizierte Studien zur N-Auswaschung vorhanden. Den Ackerbau betreffend werden meist Verfahren mit und ohne Pflugeinsatz verglichen. Die Ergebnisse dieser Studien weisen eine hohe Variabilität auf, die von einer Reduktion bis zu einer Erhöhung der N-Auswaschung aufgrund der pfluglosen Bodenbearbeitung reicht. Sie lassen noch keine endgültige Schlussfolgerung zum Einfluss der Bodenbearbeitung auf die Nitratauswaschung zu (Soane *et al.* 2012). Gründe, die für eine Reduktion der N-Auswaschung durch pfluglose Verfahren im Ackerbau sprechen, sind die reduzierte N-Mineralisierung und der höhere präferenzielle Wasserfluss. Bei Letzterem wird Regenwasser bei hoher Niederschlagsintensität durch Makroporen geleitet, wobei es nicht mit dem Nitrat in der Bodenmatrix in Berührung kommt. Höhere N-Auswaschungsverluste durch die pfluglose Bodenbearbeitung können entstehen, wenn kurze Zeit nach dem Ausbringen von N-Düngern starke Niederschläge auftreten und dabei Dünger auf der Bodenoberfläche mit dem Regenwasser in die Makroporen gelangt und unterhalb die durchwurzelte Bodenschicht verlagert wird.

Publizierte Ergebnisse von Versuchen, in denen die Auswirkung der reduzierten und pfluglosen Bodenbearbeitung auf die N-Auswaschung im Freilandgemüsebau untersucht wurde, deuten zwar teilweise an, dass durch reduzierte Bodenbearbeitung die N-Auswaschung reduziert werden kann. Jedoch ist die Anzahl der Publikation zu gering und die Ergebnisse zeigen keine klare Tendenz an, um eine konkrete Aussage darüber treffen zu können, ob mit der reduzierten und pfluglosen Bodenbearbeitung im Freilandgemüsebau die N-Auswaschung reduziert wird. In einem gemeinsamen Forschungsprojekt mit einem kommerziellen Gemüsebauer im Salinas Valley (Kalifornien, USA) wurden auf einem 8.3 ha grossen Feld vier Bewirtschaftungssysteme (minimale Bodenbearbeitung mit und ohne Mulch vs. konventionelle Bodenbearbeitung mit und ohne Mulch) für den Anbau von Salat (*Lactuca sativa*) und Brokkoli (*Brassica oleracea*) getestet (Jackson *et al.* 2004).

Die Bodenbearbeitungsmethoden hatten im Allgemeinen ähnliche Auswirkungen, mit der Ausnahme, dass die Bodenfeuchte im Oberboden und der Nitratgehalt im Unterboden bei minimaler Bodenbearbeitung konsistent niedriger waren. In Südwestdeutschland wurde ein zweijähriges Feldexperiment durchgeführt, um den Einfluss von zwei N-Düngeranbringungsverfahren (Breitstreuung vs. Platzierung) und unterschiedlicher zeitlicher Anwendung des Strip-Till-Verfahrens (Herbst und Frühjahr) auf die N-Verfügbarkeit und den Ertrag von Kabis zu untersuchen (Ubelhor *et al.* 2014). Die Bodenbearbeitungsverfahren waren Strip-Tillage im Herbst, intensives Strip-Tillage-Verfahren mit Pflügen im Herbst und Frühjahr (alle mit breitgestreuter N-Düngung) und intensives Strip-Tillage-Verfahren mit N-Platzierung im Band. Die konventionelle Bodenbearbeitung mit Pflug wurde als Kontrolle verwendet. Es wurden keine signifikanten Unterschiede im Boden-N<sub>min</sub> (0-90 cm Bodentiefe) im Frühjahr und zur Erntezeit zwischen der Pflug- und allen Strip-Tillage-Verfahren festgestellt.

### 5.3.3 Fazit

Für die Bodenbearbeitung im Freilandgemüsebau stehen neben dem konventionellen Pflugverfahren, verschiedene Techniken für eine konservierende Bodenbearbeitung zur Verfügung. Diese Verfahren gelten als effektive Praktiken für nachhaltige Produktionssysteme, insbesondere durch deren nachgewiesenen Beitrag zum Erosionsschutz. Jedoch bleibt die Frage, in welcher Art diese Verfahren die Boden-N-Dynamik und somit die N-Auswaschung beeinflussen, derzeit unbeantwortet. Wie unsere Literaturrecherche zeigt, existieren im Gemüsebau bisher fast keine Versuche, die diese Fragestellung untersuchen. Versuche, die diese Fragestellung aufgreifen, sind deshalb im Gemüsebau anzuregen.

## 5.4 Anbauplanung: Frucht- und Kulturfolge

Die Planung der Frucht- und Kulturfolge, d. h. über mehrere Jahre bzw. innerhalb einer Vegetationsperiode, ist in vielerlei Hinsicht wichtig. Hierzu zählen einerseits vor allem phytosanitäre Gesichtspunkte, die z. B. in kulturspezifischen Fruchtfolgerichtlinien des Ökologischen Leistungsnachweises geregelt sind (VSGP 2012). Andererseits zählen dazu zwei massgebliche Aspekte, die die N-Auswaschung beeinflussen können (Tonitto *et al.* 2006): Erstens eine bedarfsgerechte N-Düngung unter Berücksichtigung der meist hohen N-Mengen, die als Biomasse auf dem Feld (Abb. 6) und als mineralischer N im Boden (Abb. 3) durch vorangehende Gemüsekulturen verbleiben. Zweitens die Integration von Zwischenfrüchten, die den verfügbaren Boden-N nach einer Gemüsekultur binden und so vor Auswaschung schützen können. In Bezug auf den Aspekt der Anpassung der N-Düngung, z. B. mithilfe der  $N_{min}$ -Methode, sei an dieser Stelle auf den Abschnitt 5.1.3 «Düngebedarf der Gemüsearten und Methoden der Düngebedarfsermittlung» verwiesen. Im Folgenden soll die Option der Integration von Zwischenfrüchten in die Fruchtfolge näher betrachtet werden und anhand von Versuchsergebnissen soll deren Potenzial zur Reduzierung der N-Auswaschung im Freilandgemüsebau aufgezeigt werden.

### 5.4.1 Zwischenfrüchte zur Reduktion der N-Auswaschung

Je nach Zielsetzung hinsichtlich zeitlicher Abfolge und räumlicher Anordnung existiert eine Vielzahl an Kulturen, die als Zwischenfrucht angebaut werden können (Canali und Coopman 2015; LLH 2016; Iivonen *et al.* 2017; LfL 2017; Rebholz 2017). Die Auswahl an Kulturen umfasst unter anderem verschiedene Gräser (z. B. Italienisches Raigras), Leguminosen (z. B. Winterwicke), Mischungen aus den letzteren (z. B. das Landsberger Gemenge), aber auch Gemüsearten (z. B. Kohlarten) und der erneute Aufwuchs bei einigen Herbstkulturen (z. B. Spinat), deren Wurzelwerk durch die Ernte nicht beschädigt wurde (Anhang, Tabelle Q). Die Zielsetzung des Zwischenfruchtanbaus umfasst neben der Reduktion des N-Auswaschungsrisikos die Bodenbedeckung als Erosionsschutz, die Verbesserung der Bodenfruchtbarkeit und die Einsparung von N-Dünger durch die biologische N-Fixierung und durch die Bereitstellung des aus der Biomasse der Gründüngung freigesetzten N für die nachfolgende Hauptkultur (Sorensen und Thorup-Kristensen 1993; Feil und Liedgens 2001; Mueller und Thorup-Kristensen 2001; Thorup-Kristensen *et al.* 2003; LfL 2017). Wichtig in Bezug auf die zeitliche und räumliche Integration ist die Minimierung der Konkurrenz zwischen der Zwischenfrucht und der Hauptfrucht, um eine möglichst hohe Ressourcenausnutzung zu erzielen sowie Ertragseinbussen zu vermeiden. Dabei unterscheidet man begrifflich zwischen drei Formen der Integration: Mischkultur, Untersaat und Zwischenfrucht. Bei der Mischkultur wird die Zwischenfrucht als Nebenfrucht gleichzeitig mit der Hauptfrucht, bei der Untersaat einige Wochen nach deren Saat und bei der Zwischenfrucht nach der Hauptkultur angesät.

Allen Zwischenfrüchten ist gemein, dass sie mineralischen Boden-N aufnehmen und in ihrer Biomasse speichern. Durch die N-Bindung in der Biomasse kann der  $N_{min}$ -Gehalt des Bodens niedrig gehalten werden und die potenziell auswaschbare Nitratmenge wird verringert (Abb. 9). Zudem reduziert eine Zwischenfrucht durch die Wasseraufnahme die Sickerwassermenge und dadurch die N-Menge, die ausgewaschen wird (Thorup-Kristensen *et al.* 2003).

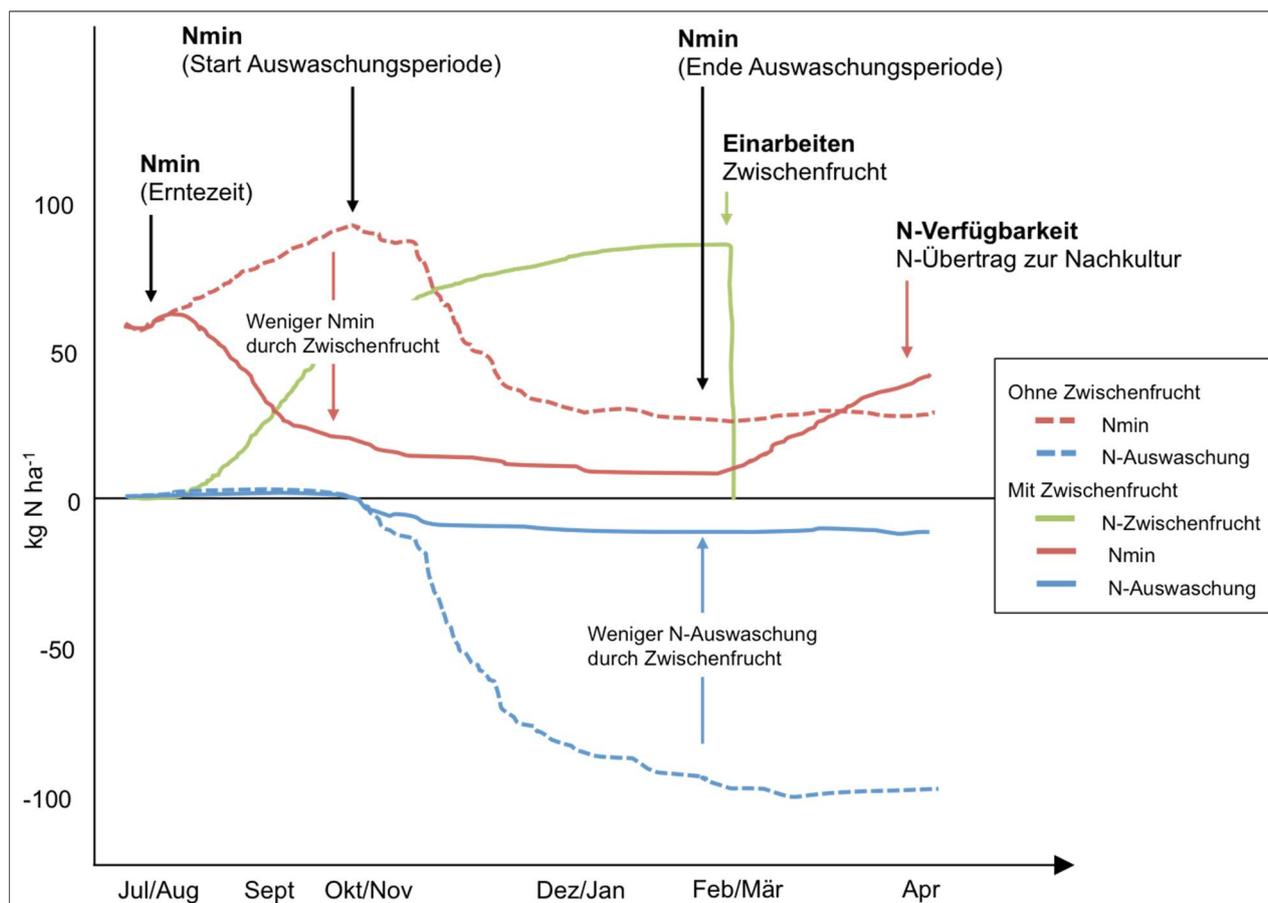


Abb. 9: N-Dynamiken im System Pflanze-Boden mit und ohne Zwischenfrucht (in Anlehnung an Justes *et al.* 2012). Die Mengenangabe in  $kg\ N\ ha^{-1}$  ist hypothetisch.  $N_{min}$  = mineralischer Boden-N-Gehalt.

Wieviel N in der Biomasse von Zwischenfrüchten gebunden wird, hängt von einer Reihe von Faktoren ab (Spiess *et al.* 2011), insbesondere vom Wurzelwachstum und dem Zeitpunkt bzw. -raum des Anbaus der Zwischenfrucht (Thorup-Kristensen 2002, 2006b). Generell lässt sich sagen: je schneller und tiefer das Wurzelwachstum der Zwischenfrucht, desto mehr N kann aufgenommen werden, insbesondere dort, wo viel N im Unterboden verfügbar ist (Thorup-Kristensen und Rasmussen 2015). In einer Untersuchung der Wurzelentwicklung von sieben Zwischenfruchtarten und einer Brokkoli-Kultur zeigte sich, dass Ölrettich innerhalb von 49 Tagen nach der Aussaat bereits eine Durchwurzelungstiefe von 112 cm erreichen kann, im Gegensatz zu 175 Tagen für Italienisches Raigras; dabei verringerten die Zwischenfrüchte, die eine schnelle Bewurzelung aufwiesen, auch den  $N_{min}$ -Gehalt im Untergrund am stärksten (Thorup-Kristensen 1993). In Bezug auf den Anbauzeitpunkt lässt sich sagen: Je früher der Saatzeitpunkt, desto länger ist die Anbauperiode und desto höher ist die N-Aufnahme. Bei einer späten Ernte der Hauptkultur besteht das Risiko, dass eine Zwischenfrucht während der kurzen Wachstumszeit vor dem Winter nur noch wenig N aufnimmt oder dass keine Zwischenfrucht oder Nachkultur mehr angebaut werden kann. Hier wäre eine frühere Anlage der Zwischenfrucht als Untersaat nützlich, obwohl dies in der Praxis schwer umzusetzen ist. Ein weiterer Vorteil einer Untersaat ist, dass im Herbst keine zusätzliche Bodenbearbeitung erfolgen muss, wodurch eine zusätzliche N-Mineralisierung vermieden wird. In Anlehnung an Agneessens *et al.* (2014) sollten Zwischenfrüchte für eine möglichst effiziente Aufnahme und Speicherung von N aus dem Boden folgende Merkmale aufweisen:

- Schnell wachsendes Wurzelsystem: Das gemässigte Klima in der Schweiz ist häufig durch hohe Niederschläge und Nitrat auswaschung gekennzeichnet. Ein schnelles Wurzelwachstum kann die Abwärtsbewegung von N in tiefere Bodenschichten (z. B. Kreuzblütler, Hafer) abschwächen.

- Tiefes Wurzelsystem: Die Nutzung von tief wurzelnden Pflanzen, wie z. B. Kreuzblütler, als Zwischenfrüchte kann das Rezyklieren von Nitrat aus tiefen Bodenschichten verbessern.
- Winterhärte: Unter der Zielsetzung, dass die Zwischenkulturen erst im Frühjahr umgebrochen werden, sollten diese den Frost überleben können, um N-Verluste durch Zwischenfruchtbiomasse während des Winters zu vermeiden (z. B. Winterroggen, Italienisches Raigras, Triticale).

Studien zeigen, dass Zwischenfrüchte die N-Auswaschung über den Winter und den  $N_{\min}$ -Gehalt des Bodens zum Ende der Vegetationszeit reduzieren können (Tabelle 7). Je nach Versuchsanordnung konnte der  $N_{\min}$ -Gehalt des Bodens um 40–210 kg N ha<sup>-1</sup> oder 30–50 % vor dem Winterhalbjahr reduziert werden. Die N-Auswaschung konnte um 20–49 kg N ha<sup>-1</sup> gesenkt werden. Trotz der relativ geringen Anzahl an untersuchten Gemüsearten (meist Blumenkohl und Lauch) sind die Ergebnisse vielversprechend und lassen sich durchaus mit Ergebnissen aus dem Ackerbau vergleichen. Zum Beispiel untersuchten Stauffer und Spiess (2001) auf der Lysimeter-Anlage Bern-Liebefeld während sieben Jahren (April 1993 bis März 2000) sechs unterschiedliche ackerbauliche Fruchtfolgen auf einer Parabraunerde. Fruchtfolgen mit Zwischenfutter wiesen rund 50 % weniger Nitratverluste auf als solche ohne Zwischenfutter. In einem weiteren Versuch zwischen 2002 und 2008 wurde auf drei verschiedenen Böden der Anbau von Zwischenfutter mit einer Winterbrache verglichen. Durch den Anbau einer Zwischenfrucht nach Winterweizen wurde die N-Auswaschung um etwas über 110 kg N ha<sup>-1</sup> und Anbaujahr verringert (Spiess *et al.* 2011).

Obwohl die Ergebnisse zeigen, dass das N-Auswaschungspotenzial durch die Integration von Zwischenfrüchten in eine Kulturfolge reduziert werden kann, ist unklar, inwieweit der Umbruchtermin der Zwischenfrüchte entscheidend ist für die N-Auswaschung. Möller *et al.* (2008) stellen fest, dass eine Verzögerung der Zwischenfrucht-Einarbeitung bis zum Winter ein sehr geringes Risiko der Nitratauswaschung ergibt, selbst wenn Leguminosen als Zwischenfrüchte verwendet werden, während ein Einarbeiten der Zwischenfrucht bereits im Herbst die Nitratauswaschungsgefahr im Winter stark erhöht. Sorensen und Thorup-Kristensen (1993) folgern, dass in Gebieten mit niedrigen Wintertemperaturen und gefrorenen Boden es nicht erforderlich ist, dass Zwischenfrüchte überwintern und im Spätherbst eingearbeitet werden können, ohne das Risiko der Nitratauswaschung zu erhöhen. Basierend auf den Ergebnissen eines ackerbaulichen Versuchs zur Problematik des Umbruchstermins empfehlen Spiess *et al.* (2015), Zwischenfrüchte erst kurz vor dem Anbau der Nachkultur im Frühjahr umzubereiten. Auch wenn in der Literatur kein eindeutiger Konsens über den Zeitpunkt des Umbruchs besteht, wird deutlich, dass sich der Umbruch entscheidend auf die N-Auswaschung auswirken kann. Ein Argument für den Umbruch im Frühjahr ist, dass im Herbst keine zusätzliche Bodenbearbeitung erfolgen muss, wodurch eine zusätzliche N-Mineralisierung vermieden wird.

Tabelle 7: Auswirkungen des Zwischenfruchtanbaus auf die N-Auswaschung und den  $N_{\min}$ -Gehalt im Boden im Herbst/Winter im Freilandgemüsebau

Gemüse-kultur	Zwischenfrucht	Reduktion $N_{\min}^{\ddagger}$ , N-Auswaschung	Bodentiefe (in cm)	N-Aufnahme Zwischenfrucht kg N ha <sup>-1</sup>	Land	Referenz
Blumenkohl, Kabis, Spinat	Wiederaufwuchs der Gemüsekultur	$N_{\min}$ : 100–210 kg N ha <sup>-1</sup>	0–30	80–280	Deutschland	Weier (1999)
Blumenkohl	Klee gras	$N_{\min}$ : 40 kg N ha <sup>-1</sup>	0–150	26–38	Dänemark	Xie und Kristensen (2016)
Blumenkohl	Roggen, Ölrrettich, Lauchzwiebel und Sudangras	N-Bilanz im Durchschnitt: 13 kg N ha <sup>-1</sup>	0–90	75–190	Deutschland	Nett <i>et al.</i> (2011)
Brokkoli	Senf, Phacelia, Raigras	N-Auswaschung: 40– 49 kg N ha <sup>-1</sup>	0–50	10–57	Finnland	livonen <i>et al.</i> (2017)
Lauch	Chicorée ( <i>Cichorium intybus</i> )	$N_{\min}$ : 33–50 %	0–100	k.A.	Dänemark	Nielsen und Thorup-Kristensen (2001)
<b>Lauch</b>	Raigras	N-Auswaschung: 20 kg N ha <sup>-1</sup>	0–60	50	Schweiz	Müller-Schärer (1996)
Lauch, Randen	Raigras, Ölrrettich	$N_{\min}$ : 40–80 kg N ha <sup>-1</sup>	100–250	124, 162	Dänemark	Thorup-Kristensen (2006b)
Salat ( <i>Lactuca sativa</i> )	Weissklee, Rotklee, Steinklee, Gelbklee, Vogelklee, Luzerne und schwarze Lupine, Raigras	$N_{\min}$ : 30 %	0–100	100–160	Dänemark	Sorensen und Thorup-Kristensen (2003)

<sup>‡</sup> $N_{\min}$  =  $N_{\min}$ -Menge im Boden

#### 5.4.2 Fazit

Die Integration von Zwischenfrüchten in die Kulturfolge ist ein nützliches Instrument zur Verringerung der Auswaschungsverluste im Freilandgemüsebau. Grundsätzlich kann gesagt werden, dass der Effekt von Zwischenfrüchten darin besteht, durch die Aufnahme von Wasser die Sickerwassermenge und durch die Aufnahme von N die auswaschbare N-Menge im Boden zu reduzieren. Nicht vollständig geklärt ist jedoch die Auswirkung des Umbruchstermins der Zwischenfrucht auf die N-Auswaschung. Ein wirksamer nächster Schritt zur Verringerung von N-Verlusten wäre eine Anbauplanung über die Kulturfolge mit Zwischenfrüchten hinaus, sprich über eine gesamte Fruchtfolge in Kombination mit einer abgestimmten N-Düngung.

## 6 Nitrat auswaschungspotenzial der Gemüsearten

### 6.1 Herleitung

Die ursprünglich angedachte Abschätzung des Nitrat auswaschungspotenzials der Gemüsearten anhand von gemessenen Nitrat auswaschungswerten ist aufgrund einer Vielzahl von Gründen nicht realisierbar. Die beiden wichtigsten Gründe sind die geringe Anzahl an verfügbaren Studien mit gemessenen N-Auswaschungsverlusten für einzelne Gemüsearten und die Heterogenität im Versuchsaufbau, die eine Vergleichbarkeit der Ergebnisse erschwert. Die geringe Anzahl an Studien erklärt sich dadurch, dass in den meisten Untersuchungen ganze Kultur- bzw. Fruchtfolgen untersucht wurden, weil eine Differenzierung zwischen einzelnen Gemüsekulturen äusserst schwierig ist. Deshalb soll im Folgenden der Versuch unternommen werden, die Gemüsearten nicht nach gemessenen Nitrat auswaschungswerten zu klassifizieren, sondern anhand der folgenden Parameter: Wurzeltiefe, N-Düngung und die N-Menge in den Ernterückständen. Dabei gibt die Wurzeltiefe einen Hinweis auf die Fähigkeit der Kultur, den in tiefere Bodenschichten verlagerten verfügbaren N im Boden aufzunehmen. Dabei gilt, je tiefer eine Kultur wurzelt, desto geringer ist der potenzielle N-Verlust durch Auswaschung, da die Grenze, ab der von einem definitiven Auswaschungsverlust gesprochen werden kann, sich entsprechend in die Tiefe verlagert. Der N-Sollwert der einzelnen Gemüsearten liefert Hinweise zur N-Menge, die als Dünger zugeführt wird und somit potenziell ausgewaschen werden kann, unter der Voraussetzung, dass der Boden-N<sub>min</sub> oder der während der Kulturzeit durch die Mineralisierung aus dem organischen Boden-N bzw. aus Ernterückständen freigesetzte N bei der N-Bedarfsermittlung nicht berücksichtigt wird. Die N-Menge in den Ernterückständen gibt einen Hinweis auf den N, der ausgewaschen werden kann.

Das methodische Vorgehen zur Bestimmung des Nitrat auswaschungspotenzials der Gemüsearten basiert auf einem Punktesystem. Jeder Parameter wurde in vier Klassen unterteilt (Abb. 6, 7 und 8). Die Grenzen der Klassen sind nicht absolut, jedoch erlaubt die gewählte Klasseneinteilung eine agronomisch und für die Praxis sinnvolle Unterscheidung der Gemüsearten. Für die Zuordnung der Gemüsearten in die entsprechenden Klassen eines Parameters diente der Mittelwert (N-Sollwert, N-Menge in Ernterückständen) oder der Median (Wurzeltiefe), ermittelt aus den jeweiligen Angaben in der Literatur. Für die Berechnung des Nitrat auswaschungspotenzials wurde zunächst jeder Klasse eine Punktzahl von 1 (gering) bis 4 (sehr hoch) zugeordnet. Aus der Summe der Punkte pro Parameter, die minimal 3 und maximal 12 Punkte beträgt, ergibt sich das Nitrat auswaschungspotenzial für die entsprechende Gemüseart.

### 6.2 Klassifizierung

Die Ergebnisse der Klassifizierung zeigen drei Gruppen von Gemüsearten, die ein hohes (10–12), mittleres (6–9) oder geringes (3–5) Nitrat auswaschungspotenzial aufweisen (Tabelle 8). Bei sieben der Gemüsearten (Knoblauch, Chicorée, Rhabarber, Topinambur, Kardy, Spargel, Pak-Choi) konnte aufgrund fehlender Angaben in der Literatur zu einem oder mehreren Parametern keine Beurteilung des Potenzials vorgenommen werden. Ein hohes Potenzial besteht insbesondere bei den Kohlarten (z. B. Blumenkohl, Brokkoli und Rosenkohl), während Blattgemüsearten (z. B. Salate, Spinat und Rucola) ein mittleres bis geringes Potenzial aufweisen. Das erhöhte Potenzial der Kohlarten beruht einerseits auf dem hohen N-Bedarf und den hohen N-Gehalten der Ernterückstände, wobei die in der Literatur hervorgehobene Wurzeltiefe bei Kabis zu einer Verringerung des Potenzials beiträgt.

Im Gegensatz dazu zeigt sich bei den Blattgemüsen ein mittleres bis geringes Potenzial aufgrund des verhältnismässig geringen N-Bedarfs und der geringeren N-Menge, die mit den Ernterückständen auf dem Feld verbleibt, trotz der geringen Wurzeltiefe der meisten Blattgemüse.

Um die hier vorgenommene Einteilung der Gemüsearten nach deren Nitratauswaschungspotenzial angemessen einschätzen zu können, gilt es mehrere Sachverhalte zu berücksichtigen, die dem hier verwendeten Ansatz zu Grunde liegen. Einerseits vermeidet der verwendete Ansatz bestehende Unsicherheiten, die Versuchsergebnissen zur N-Auswaschung im Freilandgemüsebau anhaften. Andererseits stützt sich der Ansatz nur auf den Anbau einer Gemüsekultur und berücksichtigt dabei nicht wichtige Einflussgrössen wie Standortfaktoren (Boden, Klima), die Kultur-/Fruchtfolge und die N-Freisetzung aus den Ernterückständen der Vorkultur. Zum Beispiel ist bei guten Standortbedingungen davon auszugehen, dass die N-Aufnahme den N-Bedarf deckt und somit das N-Auswaschungspotenzial von ausgebrachten N-Dünger entsprechend reduziert. Ebenso ist eine Reduktion des Potenzials zu erwarten, wenn eine Kultur-/Fruchtfolge vorliegt, bei der die Folgekultur einen Teil der  $N_{\min}$ -Restmenge der Vorkultur aufnehmen kann. Inwieweit die Berücksichtigung dieser Einflussgrössen die vorgenommene Einteilung der Gemüsearten nach deren Nitratauswaschungspotenzial verändern würde, bleibt an dieser Stelle unbeantwortet.

### **6.3 Fazit**

Die Verwendung dreier Parameter (Wurzeltiefe, N-Sollwert und die N-Menge in den Ernterückständen) zur Beurteilung des Nitratauswaschungspotenzials von im Freiland angebauten Gemüsearten resultierte in drei Gruppen von Gemüsearten, die ein hohes, mittleres oder geringes Potenzial aufweisen. Trotz der vereinfachten Betrachtung kann die hier vorgenommene Einordnung der Gemüsearten für eine Differenzierung zwischen den Gemüsearten in Modellen genutzt werden.

Tabelle 8: Nitratauswaschungspotenzial der Gemüsearten im Freilandanbau in Abhängigkeit der Wurzeltiefe, der N-Menge in den Ernterückständen und des  $N_{\min}$ -Sollwerts. †Punkteschlüssel: 1 = gering; 2 = mittel; 3 = hoch; 4 = sehr hoch

Gemüseart	Wurzeltiefe†	N-Menge in Ernterückständen†	N-Sollwert†	Gesamtpunktzahl	Potenzial	
Blumenkohl	3	4	4	11	hoch	
Brokkoli	3	4	4	11		
Rosenkohl	3	4	4	11		
Lauch	4	3	3	10		
Wirz	2	4	4	10		
Zucchetti	2	4	3	9	mittel	
Zuckermais	4	3	2	9		
Kabis	1	4	4	9		
Sellerie, Stangen-	4	2	3	9		
Bohnen	3	3	2	8		
Chinakohl	2	3	3	8		
Erbsen	3	3	2	8		
Federkohl	2	2	4	8		
Kohlrabi	3	2	3	8		
Schnittlauch	4	1	3	8		
Sellerie, Knollen-	3	2	3	8		
Randen	1	3	3	7		
Zwiebeln	4	2	1	7		
Karotten	3	2	2	7		
Salate ( <i>Lactuca sativa</i> )	4	1	2	7		
Fenchel	2	2	2	6	gering	
Kürbis, Speise-	2	2	2	6		
Pastinake	2	2	2	6		
Nüsslisalat	4	1	1	6		
Rüben	3	1	2	6		
Salate ( <i>Cichorium</i> )	3	1	2	6		
Schwarzwurzel	2	1	2	5		
Spinat	3	1	1	5		
Krautstiel	2	1	2	5		
Petersilie	3	1	1	5		
Radieschen	3	1	1	5		
Rettich	2	1	2	5		
Rucola	2	1	2	5		
Knoblauch	4	k.A.	1	-		n.a.
Chicorée, Wurzeln	k.A.	2	2	-		
Rhabarber	1	k.A.	3	-		
Topinambur	2	2	k.A.	-		
Kardy	2	k.A.	1	-		
Spargel	1	k.A.	1	-		
Pak-Choi	k.A.	k.A.	k.A.	-		

k.A. = keine Angabe; n. a. = nicht anwendbar aufgrund fehlender Angaben in der Literatur

## 7 Massnahmen zur Reduzierung der N-Auswaschung im Freilandgemüsebau

Es gibt viele mögliche Massnahmen, um die Nitratauswaschungsverluste im Freilandgemüsebau zu reduzieren (Goulding 2000; Di und Cameron 2002; Rahn 2002; LfL 2009; Agostini *et al.* 2010; Quemada *et al.* 2013; Agneessens *et al.* 2014; Cameira und Mota 2017), wobei die N-Auswaschung durch verschiedene Einflussfaktoren, insbesondere die Wirtschaftsweise, Bestands- und Standorteigenschaften, beeinflusst wird (Tabelle 9). Massnahmen können beispielsweise die Berechnung des Düngerbedarfs, der Umgang mit Ernterückständen oder der Einsatz von Winterbegrünungen sein. Wie aus Tabelle R (Anhang) hervorgeht, lässt sich die Fülle an Massnahmen neun Bereichen zuordnen: 1. Bewässerung, 2. N-Düngung, 3. Frucht-/Kulturfolge, 4. Ernterückstände, 5. Bodenbearbeitung, 6. Informationsaustausch, 7. Umstellung des Anbausystems, 8. Precision farming und 9. Sonstiges. Allen Massnahmen ist gemein, die  $N_{\min}$ -Gehalte der Böden zu Beginn von Auswaschungsperioden möglichst niedrig zu halten (BZL 2014). Welche Massnahmen auch immer gewählt werden, diese müssen gut geplant und an die lokalen Bedingungen, Böden und das Klima angepasst sein (Cameira und Mota 2017).

Tabelle 9: Die wichtigsten Einflussfaktoren der Nitratauswaschung basierend auf den Angaben von BZL (2014)

Einflussfaktor	Gefahr der Nitratauswaschung ist	
	gering, wenn	hoch, wenn
N-Düngung der Gemüsekultur	hoch	gering
Unterteilung der N-Düngung auf mehrere Gaben	ja	nein
genauere Ermittlung des Düngerbedarfs (z. B. $N_{\min}$ oder Pflanzenanalyse)	ja	nein
N-Bilanz (Düngung – Abfuhr)	ausgeglichen oder negativ	stark positiv
organische Düngung	keine	hoch, langjährig
$N_{\min}$ -Gehalt nach der Ernte	gering	hoch
Kulturdauer	lang	kurz
Wurzeltiefe	gross	klein
N-Menge der Ernterückstände	gering	hoch
Einarbeitungstermin der Ernterückstände	Winter/Frühjahr	Herbst
Zwischenfrüchte	kräftiger Bestand	schwacher Bestand oder keine Zwischenfrucht
Bracheperiode	keine oder kurz	lang
Niederschläge/Beregnung	ausgeglichen	übermässig
Feldkapazität der Wurzelzone	hoch	gering
Bodenart	Lehm	Sand

### 7.1 Massnahmenbewertung

Alle in Tabelle R (Anhang) aufgeführten Massnahmen wurden nach ihrem Reduktionspotenzial bewertet. Zudem wurde der Wissensstand über die Praxistauglichkeit abgeschätzt. Die vier Massnahmen mit dem grössten Reduktionspotenzial, die breit anwendbar und relativ kostengünstig zu implementieren sind, sind demnach:

- Optimierung der Zusatzbewässerung: z. B. bedarfsgerechte Bewässerung mit Hilfe einer Bewässerungssteuerung (z. B. Geisenheimer-Methode)
- Optimierung der Kultur-/Fruchtfolgen: Anbau von Zwischenfrüchten so häufig als möglich; Wechsel zwischen Flach- und Tiefwurzlern, Kulturen mit kurzer und langer Vegetationszeit, Kulturen mit hohen und niedrigen N-Mengen in den Ernterückständen; Integration von landwirtschaftlichen Kulturen in gemüsebauliche Fruchtfolgen
- Optimierung der Düngerbedarfsermittlung: genauere Ermittlung des Düngerbedarfs mit Verfahren wie  $N_{min}$ -Methode, KNS oder N-Expert
- Optimierung des Ernterückstandmanagements: z. B. Einarbeiten der Biomasse im Frühjahr, Abfuhr der Ernterückstände

Diese vier Massnahmen sind grösstenteils deckungsgleich mit denjenigen, die in vielen Publikationen erwähnt werden (Di und Cameron 2002; Thorup-Kristensen 2002; Nendel 2009; Agostini *et al.* 2010; Quemada *et al.* 2013; Agneessens *et al.* 2014; Cameira und Mota 2017). Beispielsweise untersuchten Quemada *et al.* (2013) in einer Meta-Analyse Strategien zur Verminderung der Nitratauswaschung in Anbausystemen mit Bewässerung und deren Auswirkungen auf den Ernteertrag. Das grösste Potenzial für die Reduzierung der N-Auswaschung in das Grundwasser hatte die Verbesserung der Wasserbewirtschaftungspraktiken (80 %), d. h. die Anpassung der Bewässerungsmenge an den Bedarf der Pflanzen.

Die Verwendung von Nicht-Leguminosen als Zwischenfrüchte ergab ein Reduktionspotenzial der N-Auswaschung von 50 % im Vergleich zu einer Winterbrache. Ein verbessertes Düngungsmanagement reduzierte die N-Auswaschung um durchschnittlich 40 % gegenüber einem nicht optimierten Düngereinsatz. Simulationen für Baden-Württemberg (Deutschland) zeigen, dass die flächendeckende Anwendung der Düngerbedarfsermittlung mit der  $N_{min}$ -Methode das N-Auswaschungspotenzial der Feldgemüseproduktion um 66 % senken würde (Nendel 2009). In Bezug auf die Kultur-/Fruchtfolgegestaltung zeigen mehrere Versuche aus Dänemark, dass insbesondere der gezielte Wechsel von flach- und tiefwurzelnden Kulturen die potenzielle N-Auswaschung entscheidend reduzieren können (Thorup-Kristensen 1998, 2001b, 2002, 2006a und b; Pedersen *et al.* 2009; Thorup-Kristensen und Rasmussen 2015).

Neben den oben erwähnten Massnahmen existieren auch weniger konventionelle Massnahmen. Deren Potenzial in Bezug auf eine Reduktion der N-Auswaschung müsste in der Praxis geprüft werden. Hierzu zählt das Einarbeiten von nitratadsorbierenden Materialien in den Boden (Torres-Dorante *et al.* 2009; Bargmann *et al.* 2014), die sensorgestützte teilflächenspezifische N-Düngung (Stohl 2013), pfluglose Bodenbearbeitungsverfahren (Storch 2013; Galbusera 2015; Krieg 2017), aber auch die Abfuhr der Ernterückstände (Agneessens *et al.* 2014). Letztlich könnte eine Neugestaltung von Anbausystemen helfen (de Haan *et al.* 2015): z. B. ein technischer Weg, der sich auf den bodenlosen Anbau im Freiland konzentriert (Breukers *et al.* 2014; de Haan *et al.* 2014).

Darüber hinaus zeigt es sich, dass die grösstmögliche Reduktion der N-Verluste im Freilandgemüsebau eine Kombination von Massnahmen bedingt. Zum Beispiel verglichen Armbruster *et al.* (2008) die jährlichen N-Frachten auf zwei Standorten in der Vorderpfalz (Deutschland) in Abhängigkeit von der Fruchtfolge (intensiv vs. extensiv mit Zwischenfrucht und Getreide), der Düngerbedarfsermittlung (Düngung nach Faustzahlen, nach N-Expert von Fink und Scharpf [1993], nach Pflanzendiagnose) und des Managements der Ernterückstände (sofortige Einarbeitung, verzögerte Einarbeitung, Abfuhr).

Die höchsten N-Verluste von 358 und 421 kg N ha<sup>-1</sup> a<sup>-1</sup> ergaben sich für die intensive dreijährige Fruchtfolge (Salat - Salat / Sellerie - Sellerie / Blumenkohl - Blumenkohl), in der die N-Düngung nach Faustzahlen erfolgte. Diese N-Frachten konnten durch die gezielte Ermittlung des N-Bedarfs (N-Expert, SPAD) um ca. 40 % reduziert werden. Unabhängig von der N-Bedarfsermittlung reduzierte die Abfuhr der Ernterückstände den N-Austrag um ca. 30 %. Die grösste Reduktion auf gut einen Sechstel der N-Fracht konnte mit der Kombination aus Zwischenfruchtanbau (z. B. Winterbegrünung) und N-Expert erzielt werden.

Wichtige Voraussetzung für die Akzeptanz und die Umsetzung von Massnahmen ist der Informationsaustausch zwischen den Landwirten, der landwirtschaftlichen Beratung und Forschung (Rather 2011), insbesondere da die Verringerung der N-Verluste meist kein spezifisches Ziel für Gemüseproduzenten ist und oft mit einem Zeit- und Kostenaufwand einhergeht. Weitere Optionen zum Informationsaustausch können Internetplattformen sein (Rather 2011) oder der Zusammenschluss von Produzenten, Forschern und Beratern, um auf effektive Weise das Wissen zu maximieren und Lösungsansätze für Gemüsebauern, die sofort in die Praxis umgesetzt werden können, beschleunigt zu erlangen (Mullholland *et al.* 2015).

## 7.2 Fazit

In der Freilandgemüseproduktion sind wesentliche Reduktionen der N-Auswaschung durch gezielte Massnahmen möglich. Um eine grösstmögliche Wirksamkeit zu erzielen, sollten mehrere Massnahmen kombiniert werden. Damit die Massnahmen von den Gemüseproduzenten angewandt werden, ist es wichtig, einen gezielten Informationsaustausch, z. B. durch Beratung, zu pflegen, aber auch an das Bewusstsein der Gemüseproduzenten für ihre gesellschaftliche Verantwortung in Bezug auf den Umweltschutz zu appellieren.

## 8 Schlussfolgerungen

Diese Literaturstudie liefert eine Zusammenfassung des Wissensstandes zur N-Auswaschung im Freilandgemüsebau und zu Massnahmen zur Verringerung der Auswaschungsverluste. Als Grundlage für die Weiterentwicklung des «Nitratindex» für die Anwendung im Gemüsebau ist der zusammenfassende Überblick in erster Linie darauf ausgerichtet, (i) die Gemüsearten nach ihrem Nitratauswaschungspotenzial zu klassifizieren, (ii) Bewirtschaftungsmassnahmen (primär Bewässerung, Düngung, Frucht-/Kulturfolge und Ernterückstandsmanagement) zur Reduktion der N-Auswaschung im Schweizer Freilandgemüsebau zu bewerten und (iii) den Forschungsbedarf in verschiedenen Bereichen aufzuzeigen.

Die gewonnenen Daten zu den N-Verlusten bestätigen das erhebliche Nitratauswaschungspotenzial unter bzw. nach Gemüsekulturen im Freiland. Jedoch lassen diese Daten aufgrund der grossen Heterogenität der Versuchsbedingungen hinsichtlich der Methodik zur Ermittlung der N-Auswaschung, der Fragestellung und den Messparametern keine klare Differenzierung zwischen den Gemüsearten zu. Zudem existieren zu wenige repräsentative Publikationen von Versuchen, in denen explizit nach Unterschieden zwischen Gemüsearten geforscht wurde. Lediglich die Messung des im Herbst nach der Ernte im Boden verbleibenden  $N_{\min}$ -Gehaltes liess aufgrund der umfangreichen Datenlage eine Differenzierung nach Gemüsearten zu. Für eine Klassierung der Gemüsearten für die Schweiz aufgrund von Messdaten müssten neue Studien in Auftrag gegeben werden.

Zudem zeigen die analysierten Literaturquellen, dass bei gewissen Gemüsearten erhebliche Mengen an Ernterückständen mit entsprechend grossen N-Mengen auf dem Feld anfallen können. Dabei gilt es zu beachten, dass neben der N-Menge auch die Qualität der Ernterückstände eine wichtige Rolle einnimmt, insbesondere in Bezug auf den zeitlichen Verlauf des Abbaus der Ernterückstände und der N-Mineralisierung. Letztere sollte bei der Auswahl der Managementoptionen der Ernterückstände berücksichtigt werden, um die N-Freisetzung und -Auswaschung besser kontrollieren zu können.

Die Kenntnis über die Wurzelsysteme der Gemüsearten ist begrenzt und die Verknüpfung verschiedener Wurzeleigenschaften und deren Funktionen ist derzeit immer noch unsicher. Dennoch vermag unsere Literaturstudie Hinweise zu geben auf bedeutsame Unterschiede in der Durchwurzelungstiefe zwischen den Gemüsearten. Diese Unterschiede sollten bei der Frucht- bzw. Kulturfolgeplanung (z. B. Wechsel von flach- und tiefwurzelnden Arten) zur Verminderung der N-Auswaschung genutzt werden. Letztlich stellen unsere Ergebnisse die häufig vertretene Meinung in Frage, dass aller N, der in Bodentiefen von mehr als einem Meter verlagert wird, definitiv ins Grundwasser ausgewaschen wird. Zukünftige Versuchsarrangements und Modellrechnungen sowie Düngbedarfsschätzungen sollten dies berücksichtigen.

Die Evaluierung von Bewirtschaftungsmassnahmen zeigt, dass diese das Nitratauswaschungspotenzial im Freilandgemüsebau beeinflussen können.

- In Zukunft erhält die Bewässerung infolge des Klimawandels eine wachsende Bedeutung. Eine sachgerechte Bewässerung im Freilandgemüsebau kann die Qualität der Produkte verbessern, die Erträge steigern und stabilisieren sowie dadurch zur Minderung der N-Auswaschung beitragen.
- Die Düngungsplanung ist unerlässlich, um ein Gleichgewicht zwischen wirtschaftlichen und ökologischen Vorteilen zu erzielen. Zusätzlich hilft eine gute Wahl des Düngertyps und der Ausbringungstechnik, die N-Verluste zu minimieren. Versuchsergebnisse zeigen, dass insbesondere mit Hilfe einer gezielten Düngbedarfsermittlung auf der Basis von  $N_{\min}$ -Analysen die Nitratauswaschung in das Grundwasser deutlich reduziert werden kann. Bei einzelnen Reduktionsmassnahmen besteht noch eine Unsicherheit, da die Anzahl der publizierten Versuchsergebnisse gering ist. Zudem sind noch nicht alle Reduktionsmassnahmen in der Praxis und/oder im schweizerischen Kontext getestet worden. Gezielte Versuche in Zusammenarbeit mit Gemüsebaubetrieben wären deshalb notwendig, einerseits um die Wirksamkeit der

Reduktionsmassnahme zu belegen und andererseits um ihre Durchführbarkeit auf Betriebsebene zu testen.

- Für die Bodenbearbeitung stehen neben dem konventionellen Pflugverfahren, verschiedene Techniken für eine konservierende Bodenbearbeitung zur Verfügung. Im Freilandgemüsebau existieren jedoch bisher fast keine Versuche zu den Auswirkungen dieser Verfahren auf die N-Dynamik des Bodens und somit auf die N-Auswaschung. Solche Versuche sind deshalb anzuregen.
- Die Integration von Zwischenfrüchten in die Fruchtfolge ist ein nützliches Instrument zur Verringerung der N-Auswaschung im Freilandgemüsebau. Rasch wachsende Gründüngungen können einen wesentlichen Beitrag zur Konservierung des im Herbst im Boden vorhandenen, erhöht auswaschunggefährdeten N leisten. Dabei stellt sich die Frage, wie die N-Verfügbarkeit nach dem Umbruch der Gründüngung für Folgekulturen erhöht werden kann. Zum Beispiel ist die Auswirkung des Umbruchstermins der Zwischenfrucht auf die N-Auswaschung noch nicht vollständig geklärt.
- Die meisten Gemüsearten hinterlassen beachtliche N-Mengen in den Ernterückständen. Im Hinblick auf die Reduktion der Nitratauswaschung aus diesem bis anhin vorwiegend auf den Feldern zurückbleibenden Pflanzenmaterial sollte in der zweiten Jahreshälfte bei gewissen Gemüsearten die Abfuhr der Ernterückstände und deren Weiterverwertung in Vergärungs- und Kompostieranlagen in Erwägung gezogen werden. Im Weiteren erscheinen Untersuchungen zu gezielten Behandlungsmassnahmen von auf dem Feld verbleibenden Ernterückständen zur besseren Konservierung des auswaschunggefährdeten N sinnvoll.

Die Klassifizierung der Gemüsearten aufgrund von gemessenen Werten zur Nitratauswaschung erwies sich aus den weiter oben genannten Gründen als nicht sinnvoll. Deshalb wurden für die Differenzierung der Gemüsearten aufgrund des Nitratauswaschungspotenzials drei Parameter verwendet: die Wurzeltiefe, die N-Düngung und die N-Menge in den Ernterückständen. Dies resultierte in drei Gruppen von Gemüsearten, die ein hohes, mittleres oder geringes Auswaschungspotenzial aufweisen. Die vorgenommene Einordnung kann als Grundlage für eine Differenzierung zwischen den Gemüsearten in Modellen wie «Nitratindex 2.0» und MODIFFUS genutzt werden. Zusätzlich stehen diesbezüglich die Rohdaten der Literaturrecherche in einer Datenmatrix und in tabellarischer Form (siehe Tabellen im Anhang) zur Verfügung.

Letztlich zeigt unsere Studie, dass für den Freilandgemüsebau Massnahmen zu weiteren Reduktionen der N-Auswaschung verfügbar sind. Ob die Anwendung solcher Massnahmen in einem Grundwasser-einzugsgebiet mit intensivem Freilandgemüseanbau Nitratkonzentrationen von unter 25 mg L<sup>-1</sup> im Grundwasser erreichbar macht, ist fraglich. Um eine grösstmögliche Wirksamkeit zu erzielen, sollten aus der grossen Bandbreite an Massnahmen mehrere kombiniert werden. Die gewählten Massnahmen müssen gut geplant und an die lokalen Bedingungen, Böden und das Klima angepasst sein. Damit die Massnahmen von den Gemüseproduzenten angewandt werden, ist es wichtig, umsetzungsreife Handlungsempfehlungen bereitzustellen, einen gezielten Informationsaustausch zu pflegen, aber auch an das Bewusstsein der Gemüseproduzenten für ihre gesellschaftliche Verantwortung in Bezug auf den Umweltschutz zu appellieren.

## Literaturverzeichnis

- Abiven S., Recous S., Reyes V. & Oliver R., 2005. Mineralisation of C and N from root, stem and leaf residues in soil and role of their biochemical quality. *Biology and Fertility of Soils* **42** (2), 119.
- AELF, 2017. Gelbes Heft 2018. Gemüsebau Niederbayern. Versuchsergebnisse 2017. Anbauempfehlungen, Pflanzenschutzhinweise. Amt für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten (AELF) Deggendorf, AELF Landshut, Erzeugerring für Obst und Gemüse Straubing e.V.
- AfU, 2015. Nitratprojekt Gäu-Olten. Sauberes Trinkwasser für die Region. Amt für Umwelt des Kantons Solothurn, Solothurn.
- Agneessens L., De Waele J. & De Neve S., 2014. Review of alternative management options of vegetable crop residues to reduce nitrate leaching in intensive vegetable rotations. *Agronomy* **4**, 529-555.
- Agostini F., Tei F., Silgram M., Farneselli M., Benincasa P. & Aller M. F., 2010. Decreasing Nitrate Leaching in Vegetable Crops with Better N Management. In: Genetic Engineering, Biofertilisation, Soil Quality and Organic Farming. (Ed. Lichtfouse E.), Springer Netherlands, Dordrecht, 147-200.
- Akkal-Corfini N., Morvan T., Menasseri-Aubry S., Bissuel-Belaygue C., Poulain D., Orsini F. & Leterme P., 2010. Nitrogen mineralization, plant uptake and nitrate leaching following the incorporation of (<sup>15</sup>N)-labeled cauliflower crop residues (*Brassica oleracea*) into the soil: a 3-year lysimeter study. *Plant and Soil* **328** (1-2), 17-26.
- Alexander A. & Helm H.-U., 1990. Ureaform as a Slow Release Fertilizer: A Review. *Z. Pflanzenernähr. Bodenk.* **153**, 249-255.
- Allaire-Leung S. E., Wu L., Mitchell J. P. & Sanden B. L., 2001. Nitrate leaching and soil nitrate content as affected by irrigation uniformity in a carrot field. *Agricultural Water Management* **48** (1), 37-50.
- Alscher G., Clauswitz K., Dücker R., Ebbeler G., Gerbaulet P., Janssen A., Kalthoff U., Karl K., Kassu R., Kauka A., Lörcks H., Schulte-Übbing S. & Schmitz W., 2015. Jahresbericht 2015 - Umsetzung des Beratungskonzepts Wasserrahmenrichtlinie. Bezugszeitraum 01.01.15–31.12.2015. Landwirtschaftskammer Nordrhein-Westfalen, Bonn.
- Ambus P., Jensen E. S. & Robertson G. P., 2001. Nitrous oxide and N-leaching losses from agricultural soil: Influence of crop residue particle size, quality and placement. *Phyton-Annales Rei Botanicae* **41** (3), 7-15.
- Andreas C., Belau T., Berwanger P., Bimek W., Bode R., Eckhard F., Fröba N., Grube J., Hecker U., Hirthe G., Katroschan K. U., Klug E., Köhler J., Lattauschke G., Mausolf B., Nauheimer S., Puffert M., Sauer H., Sauer N., Sauerwein G., Schmitt A., Schroers J. O., Uhte R. & Ziegler J., 2017. Gemüsebau. Freiland und Gewächshaus. *KTBL-Datensammlung*, Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft e.V. (KTBL), Darmstadt, 652 S.
- Anken T., Irla E., Heusser J., Ammann H., Richner W., Walther U., Weisskopf P., Nievergelt J., Stamp P., Schmid O. & Mäder P., 2003. Einfluss der Bodenbearbeitung auf die Nitratenauswaschung: Unterschiede sind kleiner als erwartet. *Eidgenössische Forschungsanstalt für Agrarwirtschaft und Landtechnik (FAT) - Berichte* **598**, 1-8.
- Anter J., Belau T., Butz A., Fricke E., Fröba N., Hageneder F., Kleber J., Kruse S., Müller M., Scheyer R., Teichert A., Thörmann H. & Weinheimer S., 2013. Freilandbewässerung. Betriebs- und arbeitswirtschaftliche Kalkulationen. *KTBL-Datensammlung*, Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft e.V. (KTBL), Darmstadt, 140 S.
- Araya Y. N., De Neve S. & Hofman G., 2010. Nitrogen mineralization from cabbage crop residue and its uptake efficiency by rye grass. *Acta Agriculturae Scandinavica Section B-Soil and Plant Science* **60** (1), 33-39.
- Arcand M. M., Knight J. D. & Farrell R. E., 2014. Differentiating between the supply of N to wheat from above and belowground residues of preceding crops of pea and canola. *Biology and Fertility of Soils* **50** (4), 563-570.
- Armbruster M., Laun N. & Wiesler F., 2008. Stickstoffbilanzen und Nitratenauswaschung bei unterschiedlichem N-Management im Gemüsebau. *VDLUFA-Schriftenreihe* 63: 103-114.

- Armbruster M., Laun N. & Wiesler F., 2010. Modellrechnungen zur Extrapolation des Einflusses von Massnahmen zur Verringerung der Nitratauswaschung in das Grundwasser im Gemüsebau der Vorderpfalz. VDLUFA-Schriftenreihe 66: 276-286.
- Bach M., Klement L. & Häussermann U., 2016. Bewertung von Maßnahmen zur Verminderung von Nitrateinträgen in die Gewässer auf Basis regionalisierter Stickstoff-Überschüsse, Teil I: Beitrag zur Entwicklung einer Ressortübergreifenden Stickstoffstrategie. Dessau-Roßlau.
- Bacher W. & Lenz F., 1996. Ammonium deposit fertilization to reduce nitrate leaching. *Acta Hort.* **428**, 123-130.
- Banse B., Belau T., Block R., Hack G., Kleber J., Koch T., Lüttmann R. & Mittendorf D., 2018. Bewässerungs- und Düngungssysteme im Gartenbau. Wasserwirtschaftliche Anforderungen. *KTBL-Heft 121*, Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft e.V. (KTBL), Darmstadt.
- Bargmann I., Rillig M. C., Kruse A., Greef J. M. & Kücke M., 2014. Effects of hydrochar application on the dynamics of soluble nitrogen in soils and on plant availability. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science* **177**, 48-58.
- Bechtel A., 2008. Abschätzung regionaler Nitrateinträge in das Grundwasser unter Verwendung von Nmin-Daten. Universität Fridericiana, Karlsruhe, 197 S.
- Bending G. D. & Turner M. K., 1999. Interaction of biochemical quality and particle size of crop residues and its effect on the microbial biomass and nitrogen dynamics following incorporation into soil. *Biology and Fertility of Soils* **29** (3), 319-327.
- Bergström L., Johnsson H. & Torstensson G., 1991. Simulation of soil nitrogen dynamics using the SOILN model. *Fertilizer research* **27** (2), 181-188.
- Biedermann R., Boller M., Burkhardt U., Dierauer H., Erzinger F., Graf H., Gruber C., Lang F., Matthews K., Neukomm H., Seiler K. & Zehnder A., 2007. Pilotprojekt Nitratreduktion im Klettgau. Kanton Schaffhausen: Amt für Lebensmittelkontrolle und Umweltschutz, Landwirtschaftsamt Gemeinden Neunkirch und Gächlingen, Schaffhausen.
- Bischoff W. A., 2007. Entwicklung und Anwendung der Selbst-Integrierenden Akkumulatoren: Eine Methode zur Erfassung der Sickerfrachten umweltrelevanter Stoffe. Technischen Universität Berlin, Berlin, 184 S.
- BMEL, 2017. Verordnung zur Neuordnung der guten fachlichen Praxis beim Düngen vom 26. Mai 2017. Bundesgesetzblatt Jahrgang 2017 Teil I Nr. 32. Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft (BMEL), Bonn.
- BMLFUW, 2008. Richtlinien für die sachgerechte Düngung im Garten- und Feldgemüsebau. Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft (BMLFUW), Wien.
- Bohne K., Gall H. & Zachow B., 1997. Simulation von Stickstoff-Austrägen aus Lysimetern. *Z. Pflanzenernähr. Bodenk.* **160**, 5-13.
- Brainard D. C. & Noyes D. C., 2012. Strip Tillage and Compost Influence Carrot Quality, Yield, and Net Returns. *Hortscience* **47** (8), 1073-1079.
- Brandi-Dohrn F. M., Hess M., Selker J. S. & Dick R. P., 1996. Field Evaluation of Passive Capillary Samplers. *Soil Science Society of America Journal* **60** (6), 1705-1713.
- Breukers M. L. H., Stokkers R., Spruijt J., Roelofs P. F. M. M. & de Haan J. J., 2014. Impact of deep flow cultivation systems on sustainability of field vegetable production. International Society for Horticultural Science (ISHS), Leuven, Belgium, 169-176.
- Bruckler L., de Cockborne A. M., Renault P. & Claudot B., 1997. Spatial and temporal variability of nitrate in irrigated salad crops. *Irrigation Science* **17** (2), 53-61.
- Bünemann E. K., 2017. Stickstoffeffizienz im Acker- und Gemüsebau für eine Reduktion des Nitrateintrags ins Grundwasser. Das Forschungsinstitut für biologischen Landbau (FiBL) Frick, Schweiz.
- Burns I. G., 1974. A model for predicting the distribution of salts applied to fallow soils after excess rainfall or evaporation. *Journal of Soil Science* **25** (2), 165-178.
- Burns I. G., 1980. Influence of the spatial distribution of nitrate on the uptake of N by plants: a review and a model for rooting depth. *Journal of Soil Science* **31** (2), 155-173.
- Burns I. G., Rahn C. R., Parkinson R. & Fuller M. P., 2010. Nitrate Pollution from Horticultural Production Systems – Tools for Policy and Advice from Field to Catchment Scales. *Acta Hort.* **852**, 27-38.

- BZL, 2014. Nitratauswaschung. Ursachen und Massnahmen zur Minimierung. Bundesinformationszentrum Landwirtschaft (BLZ), aid infodienst, Bonn.
- Cameira M. R. & Mota M., 2017. Nitrogen Related Diffuse Pollution from Horticulture Production-Mitigation Practices and Assessment Strategies. *Horticulturae* **3** (25), 1-23.
- Canali S. & Coopman F., 2015. 3. Mini-paper – Agro-ecological Service Crops to mitigate the risk of nitrate leaching from vegetable cropping systems. The Focus Group on 'Fertiliser efficiency - focus on horticulture in open field' of the European Commission's Innovation partnership for Agricultural Productivity and Sustainability (EIP-AGRI), Brussels.
- Cannavo P., Recous S., Parnaudeau V. & Reau R., 2008. Modeling N Dynamics to Assess Environmental Impacts of Cropped Soils. *Advances in Agronomy* **97**, 131-174.
- Carr M. K. V. & Dodds S. M., 1983. Some Effects of Soil Compaction on Root-Growth and Water-Use of Lettuce. *Experimental Agriculture* **19** (2), 117-130.
- Carranca C. & Martinez-Gaitan C. C., 2015. 7. Mini-paper - Nitrogen and water need based on a model. The Focus Group on 'Fertiliser efficiency - focus on horticulture in open field' of the European Commission's Innovation partnership for Agricultural Productivity and Sustainability (EIP-AGRI), Brussels.
- Celma A. R., Cuadros F. & Lopez-Rodriguez F., 2012. Characterization of pellets from industrial tomato residues. *Food and Bioproducts Processing* **90** (C4), 700-706.
- Chalhoub M., Garnier P., Coquet Y., Mary B., Lafolie F. & Houot S., 2013. Increased nitrogen availability in soil after repeated compost applications: Use of the PASTIS model to separate short and long-term effects. *Soil Biology & Biochemistry* **65**, 144-157.
- Chaves B., De Neve S., Hofman G., Boeckx P. & Van Cleemput O., 2004. Nitrogen mineralization of vegetable root residues and green manures as related to their (bio)chemical composition. *Europ. J. Agronomy* **21**, 161-170.
- Chaves B., De Neve S., Boeckx P., Dupont R., Van Cleemput O. & Hofman G., 2008. Manipulating the N release from N-15-labelled celery residues by using straw and vinasses in Flanders (Belgium). *Agriculture Ecosystems & Environment* **123** (1-3), 151-160.
- Congreves K. A., Voroney R. P., O'Halloran I. P. & Van Eerd L. L., 2013. Broccoli residue-derived nitrogen immobilization following amendments of organic carbon: An incubation study. *Canadian Journal of Soil Science* **93** (1), 23-31.
- de Haan J., De Neve S., Malusa E., Toresano-Sanchez F. A. & Hadju Z., 2015. 8. Mini-paper - Need for system approach to increase nutrient use efficiency in horticulture. The Focus Group on 'Fertiliser efficiency - focus on horticulture in open field' of the European Commission's Innovation partnership for Agricultural Productivity and Sustainability (EIP-AGRI), Brussels.
- de Haan J. J., Spruijt J. & Vermeulen T., 2014. Farm management and economic drivers for implementation of soilless cultivation of field vegetables in the Netherlands. *International Society for Horticultural Science (ISHS)*, Leuven, Belgium, 177-183.
- De Neve S. & Hofman G., 1996. Modelling N mineralization of vegetable crop residues during laboratory incubations. *Soil Biology and Biochemistry* **28** (10), 1451-1457.
- De Neve S., Pannier J. & Hofman G., 1996. Temperature effects on C- and N-mineralization from vegetable crop residues. *Plant and Soil* **181** (1), 25-30.
- De Neve S. & Hofman G., 1998. N mineralization and nitrate leaching from vegetable crop residues under field conditions: A model evaluation. *Soil Biology & Biochemistry* **30** (14), 2067-2075.
- De Neve S., Dieltjens I., Moreels E. & Hofman G., 2003. Measured and simulated nitrate leaching on an organic and a conventional mixed farm. *Biological Agriculture & Horticulture* **21** (3), 217-229.
- de Paz J. & Ramos C., 2001. The Use of a GIS - N Model System to Assess Nitrate Leaching in Agricultural Areas. *Acta Hort.* **563**, 225-231.
- Di H. J. & Cameron K. C., 2002. Nitrate leaching in temperate agroecosystems: sources, factors and mitigating strategies. *Nutrient Cycling in Agroecosystems* **64** (3), 237-256.
- Doltra J. & Munoz P., 2010. Simulation of nitrogen leaching from a fertigated crop rotation in a Mediterranean climate using the EU-Rotate\_N and Hydrus-2D models. *Agricultural Water Management* **97** (2), 277-285.

- Eiler T., 2015. Düngeplanung und N-Düngeempfehlungen gem. der Sollwertmethode in praktischen Beispielen. Landwirtschaftskammer (LWK) Niedersachsen.
- Entomeal, 2015. Lösen von zwei globalen Problemen – Nahrungsverschwendung und Nahrungsmangel – durch die Aufbereitung von weggeworfenen Lebensmitteln, um nachhaltige Tierfutterbestandteile und natürlichen Dünger zu herzustellen. Entomeal S.A., Genf.
- Feaga J. B., Selker J. S., Dick R. P. & Hemphill D. D., 2010. Long-Term Nitrate Leaching Under Vegetable Production with Cover Crops in the Pacific Northwest. *Soil Science Society of America Journal* **74** (1), 186-195.
- Feil B. & Liedgens M., 2001. Pflanzenproduktion in lebenden Mulchen – eine Übersicht. Crop Production in Living Mulches – a Review. *Pflanzenbauwissenschaften* **5** (1), 15-23.
- Feller C. & Fink M., 2001. Root development of celery measured with minirhizotrons and core sampling. *Proceedings of the International Conference on Environmental Problems Associated with Nitrogen Fertilisation of Field Grown Vegetable Crops* (563), 247-252.
- Feller C., Fink M., Laber H., Maync A., Paschold P., Scharpf H. C., Schlaghecken J., Strohmeyer K., Weier U. & Ziegler J., 2011. Düngung im Freilandgemüsebau. Schriftenreihe des Leibniz-Instituts für Gemüse- und Zierpflanzenbau (IGZ), 3. Auflage, Heft 4, Grossbeeren.
- Feller C., 2013. Bewässerung im Freilandgemüsebau. Leibniz-Institut für Gemüse- und Zierpflanzenbau Großbeeren, Erfurt, Görlitz.
- Feller C., Fink M., Rather K., Laber H., Strohmeyer K. & Ziegler J., 2015a. Stickstoffdüngung nach dem Nmin-System. Nmin-Sollwerte für Freilandgemüse. Schriftenreihe des Leibniz-Instituts für Gemüse- und Zierpflanzenbau (IGZ), Zugang: [http://www.igzev.de/publikationen/IGZ\\_N-Sollwerte\\_Gemuese.pdf](http://www.igzev.de/publikationen/IGZ_N-Sollwerte_Gemuese.pdf) [26.09.2017].
- Feller C., Fink M., Rather K., Laber H., Strohmeyer K. & Ziegler J., 2015b. Nährstoffgehalte in den Ernteprodukten und in den Ernteresten von Gemüse. Schriftenreihe des Leibniz-Instituts für Gemüse- und Zierpflanzenbau (IGZ), Zugang: [http://www.igzev.de/publikationen/IGZ\\_N.P.K.Mg.Feldabfuhr\\_Gemuese.pdf](http://www.igzev.de/publikationen/IGZ_N.P.K.Mg.Feldabfuhr_Gemuese.pdf) [26.09.2017].
- Femenia A., Robertson J. A., Waldron K. W. & Selvendran R. R., 1998. Cauliflower (*Brassica oleracea* L.), globe artichoke (*Cynara scolymus*) and chicory witloof (*Cichorium intybus*) processing by-products as sources of dietary fibre. *Journal of the Science of Food and Agriculture* **77** (4), 511-518.
- Finck M., 2012. Nitratverlagerung – Bedeutung, Mechanismen und Lösungswege. Merkblätter für die Umweltgerechte Landbewirtschaftung. Sachgebiet Wasserschutz Referat Agrarökologie. Landwirtschaftliches Technologiezentrum Augustenberg (LTZ), Tagung des Verbandes der Landwirtschaftskammern e.V. und des Bundesarbeitskreises Düngung (BAD), Würzburg.
- Finck M., 2016. SchALVO-Nitratbericht. Ergebnisse der Beprobung 2016. Ergebnisse der Nitratuntersuchungen von Böden aus Wasserschutzgebieten (WSG) gemäß der Schutzgebiets- und Ausgleichsverordnung Baden-Württembergs (SchALVO). Landwirtschaftliches Technologiezentrum Augustenberg (LTZ), Karlsruhe.
- Fink M. & Scharpf H. C., 1993. N-expert – A decision support system for vegetable fertilization in the field. *Acta Hort.* **339**, 67-74.
- Fink M., Feller C., Laun N. & Ziegler J., 2010. Zur Berechnung von N-Sollwerten. *Gemüse* **9**, 14-15.
- Flisch R., Zihlmann U., Briner P. & Richner W., 2013. Das CULTAN-Verfahren im Eignungstest für den schweizerischen Ackerbau. *Agrarforschung Schweiz* **4** (1), 40-47.
- Francis G. S., Haynes R. J. & Williams P. H., 1994. Nitrogen Mineralization, Nitrate Leaching and Crop Growth after Plowing-in Leguminous and Non-Leguminous Grain Crop Residues. *Journal of Agricultural Science* **123**, 81-87.
- Francis G. S., Trimmer L. A., Tregurtha C. S., Williams P. H. & Butler R. C., 2003. Winter nitrate leaching losses from three land uses in the Pukekohe area of New Zealand. *New Zealand Journal of Agricultural Research* **46**, 215-224.
- Galbusera U., 2015. Pfluglos geht auch im Gemüse. *BauernZeitung Online*.

- Gallardo M., Jackson L. E. & Thompson R. B., 1996. Shoot and root physiological responses to localized zones of soil moisture in cultivated and wild lettuce (*Lactuca* spp). *Plant Cell and Environment* **19** (10), 1169-1178.
- Garming H., 2015. 1. Mini-paper – Costs and benefits of technologies for increasing N efficiency in vegetable production. The Focus Group on 'Fertiliser efficiency - focus on horticulture in open field' of the European Commission's Innovation partnership for Agricultural Productivity and Sustainability (EIP-AGRI), Brussels.
- Geypens M., Mertens J., Elst P. V. & Bries J., 2005. Evaluation of fall residual nitrogen influenced by soil chemical characteristics and crop history in Flanders (Belgium). *Communications in Soil Science and Plant Analysis* **36** (1-3), 363-372.
- Goulding K., 2000. Nitrate leaching from arable and horticultural land. *Soil Use and Management* **16**, 145-151.
- Greenwood D. J., Gerwitz A., Stone D. A. & Barnes A., 1982. Root development of vegetable crops. *Plant and Soil* **68** (1), 75-96.
- Greenwood D. J., Rahn C., Draycott A., Vaidyanathan L. V. & Paterson C., 1996. Modelling and measurement of the effect of fertilizer-N and crop residue incorporation on N-dynamics in vegetable cropping. *Soil Use and Management* **12**, 13-24.
- Greenwood D. J., 2001. Modeling N-response of field vegetable crops grown under diverse conditions with N-ABLE: A review. *Journal of Plant Nutrition* **24** (11), 1799-1815.
- GSchG, 1991. Bundesgesetz über den Schutz der Gewässer vom 24. Januar 1991 (Stand am 1. Juni 2014). Systematische Sammlung des Bundesrechts der Schweiz, SR 814.20, Bern.
- GSchV, 1998. Gewässerschutzverordnung vom 28. Oktober 1998 (Stand am 1. Januar 2018). Systematische Sammlung des Bundesrechts der Schweiz, SR 814.201, Bern.
- Guerette V., Desjardins Y., Belec C., Tremblay N., Weier U. & Scharpf H. C., 2002. Nitrogen contribution from mineralization of vegetable crop residues. *Proceedings of the ISHS Workshop Towards an Ecologically Sound Fertilisation in Field Vegetable Production* (571), 95-102.
- Guertel E. A., 2009. Slow-release Nitrogen Fertilizers in Vegetable Production: A Review. *Horttechnology* **19**(1), 16-19.
- Gysi C., 1990. Modelling and measurement of the nitrogen cycle in a vegetable field in Switzerland. II. Validation of the nitrogen model with field data. *Z. Pflanzenernähr. Bodenk.* **153**, 189-196.
- Gysi C., 1994. Wasser- und Stickstoffverlagerung im Jahresverlauf. *Agrarforschung* **1** (4), 173-178.
- Hageneder F. M. & Beck M., 2015. Abschlussbericht Projekt „Optimierung der Bewässerung für den Freilandgemüseanbau“. Bayerische Landesanstalt für Weinbau und Gartenbau (LWG). Hochschule Weihenstephan-Triesdorf (HSWT), Veitshöchheim und Freising.
- Hartz T. K., 2006. Vegetable Production Best Management Practices to Minimize Nutrient Loss. *Horttechnology* **16** (3), 398-403.
- Hembry J. K. & Davies J. S., 1994. Using mulches for weed control and preventing leaching of nitrogen fertilizer. *Symposium on Timing Field Production of Vegetables* (371), 311-316.
- Hortipendium, 2013. Stickstoffdüngung nach den N-Sollwert-Systemen – Nmin, KNS und N-Expert. Zugang: [http://www.hortipendium.de/Stickstoffdu%CC%84ngung\\_nach\\_den\\_N-Sollwert-Systemen\\_-\\_Nmin,\\_KNS\\_und\\_N-Expert](http://www.hortipendium.de/Stickstoffdu%CC%84ngung_nach_den_N-Sollwert-Systemen_-_Nmin,_KNS_und_N-Expert) [25.10.2019].
- Hösslin R., 1954. Festschrift aus Anlass des 150jähr. Bestehens der staatl. Lehr- und Forschungsanstalt f. Gartenbau in Weihenstephan. Dillingen, Mainz, 212 S.
- Hoyt G. D., Monks D. W. & Monaco T. J., 1994. Conservation Tillage for Vegetable Production. *Horttechnology* **4** (2), 129-135.
- Hoyt G. D., 1999. Tillage and Cover Residue Affects on Vegetable Yields. *Horttechnology* **9** (3), 351-358.
- Hu Z.-Y., Wang Y., Haneklaus S. & Schnug E., 2014. Agronomic assessment of premium fertilizers. In: 16<sup>th</sup> World Fertilizer Congress of CIEC. Technological Innovation for a sustainable tropical agriculture (Ed. de Melo Benites V.), Rio de Janeiro, Brazil, 79-80.
- Hunkeler D., Sonney R., Paratte D., Tallon L., Gerber C. & Purtschert R., 2015. Nitratprojekt Gäu-Olten: Hydrochemische Erkundung des Grundwasserleiters und Bestimmung der Altersstruktur. Zentrum für

- Hydrogeologie und Geothermie (CHYN) - Universität Neuenburg, Klima- und Umweltphysik - Universität Bern, Neuchâtel/Bern.
- Hürdler J., Prasuhn V. & 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, Zürich
- Hutson J. L. & Wagenet R. J., 1995. An overview of LEACHM: A process based model of water and solute movement, transformations, plant uptake and chemical reactions in the unsaturated zone. In: Chemical equilibrium and reaction models. Special Publication 42. 19, Soil Science Society of America, American Society of Agronomy, Madison, Wisconsin, USA, 409-422.
- Huus-Bruun T., 1993. Potential nitrate leaching from vegetable farms in Denmark. *Acta Hort.* **339**, 219-227.
- Iivonen S., Kivijärvi P. & Suojala-Ahlfors T., 2017. Reports 165. Characteristics of various catch crops in the organic vegetable production in northern climate conditions – results from an on-farm study. University of Helsinki, Ruralia Institute.
- INFORAMA, 2013. Bewässerungssysteme im Gemüsebau. Merkblatt. Bildungs-, Beratungs- und Tagungszentrum INFORAMA Seeland, Ressort Gemüsebau, Ins.
- Jackson L. E. & Stivers L. J., 1993. Root Distribution of Lettuce under Commercial Production - Implications for Crop Uptake of Nitrogen. *Biological Agriculture & Horticulture* **9** (3), 273-293.
- Jackson L. E., Stivers L. J., Warden B. T. & Tanji K. K., 1994. Crop nitrogen utilization and soil nitrate loss in a lettuce field. *Fertilizer Research* **37**, 93-105.
- Jackson L. E., 2000. Fates and losses of nitrogen from a nitrogen-15-labeled cover crop in an intensively managed vegetable system. *Soil Science Society of America Journal* **64** (4), 1404-1412.
- Jackson L. E., Ramirez I., Yokota R., Fennimore S. A., Koike S. T., Henderson D. M., Chaney W. E., Calderon F. J. & Klonsky K., 2004. On-farm assessment of organic matter and tillage management on vegetable yield, soil, weeds, pests, and economics in California. *Agriculture Ecosystems & Environment* **103** (3), 443-463.
- Jiang Y., Heaven S. & Banks C. J., 2012. Strategies for stable anaerobic digestion of vegetable waste. *Renewable Energy* **44** (Supplement C), 206-214.
- Judd L. A., Jackson B. E. & Fonteno W. C., 2015. Review: Advancements in Root Growth Measurement Technologies and Observation Capabilities for Container-Grown Plants. *Plants* **4**, 369-392.
- Justes E., Beaudoin N., Bertuzzi P., Charles R., Constantin J., Dürr C., Hermon C., Joannon A., Le Bas C., Mary B., Mignolet C., Montfort F., Ruiz L., Sarthou J. P., Souchère V., Tournebize J., Savini I. & Réchauchère O., 2012. The use of cover crops in the reduction of nitrate leaching: Effect on the water and nitrogen balance and other ecosystem services. Short memo. French National Institute for Agricultural Research (INRA), France.
- Kah M., Kookana R. S., Gogos A. & Bucheli T. D., 2018. A critical evaluation of nanopesticides and nanofertilizers against their conventional analogues. *Nature Nanotechnology* **13**, 677-684.
- Katroschan K. U., 2013. Konservierende Bodenbearbeitung (auch) im Gemüsebau? Möglichkeiten und Grenzen des Pflugverzichts im Feldgemüsebau. Versuchsergebnisse 2011-2013. Profi-Tag Gemüsebau. Hannover-Ahlem.
- Keller F., Lüthi J. & Röthlisberger K., 1996. Gemüsearten. **2**, Landwirtschaftliche Lehrmittelzentrale, Zollikofen, 316 S.
- Kliebsch K., Müller U. & van der Ploeg R. R., 1998. Nitrataustrag aus einer landlichen Siedlungsfläche in Nordwestdeutschland. *Z. Pflanzenernähr. Bodenk.* **161**, 571-576.
- Knoblauch S., 2013. N-Auswaschung unter Ackernutzung auf Böden im Thüringer Becken und der Ostthüringer Buntsandsteinlandschaft. In: Kooperation Lysimeter. Wirkung landwirtschaftlicher Nutzung auf die N-Auswaschung anhand langjähriger Lysimetermessungen in Mittel- und Nordostdeutschland und Schlussfolgerungen für die Minimierung der N-Befrachtung der Gewässer. Thüringer Landesanstalt für Landwirtschaft, Jena, 69-86.
- Knott C. M., 1996. The effect of cover crops on the establishment and yield of vining peas and on nitrate leaching. *Journal of Agricultural Science* **126**, 471-479.

- Köhler S., Bischoff W. A. & Liebig H. P., 2003. Cultandüngung – ein Beitrag zum Grundwasserschutz durch Verringerung des Nitrataustrages. In: Anbauverfahren mit N-Injektion (CULTAN) Ergebnisse, Perspektiven, Erfahrungen. Beiträge des Workshops am 29. November 2001 in Braunschweig. Landbauforschung Völkenrode Sonderheft 245, 117-127.
- Kokkora M. I., 2008. Biowaste and vegetable waste compost application to agriculture. Cranfield University, UK.
- Krieg T., 2017. Gemüse im Mulchbeet. St. Galler Tagblatt. Zugang: [http://www.tagblatt.ch/ostschweiz/thurgau/kanton/gemueseim-mulchbeet;art123841\\_5004838](http://www.tagblatt.ch/ostschweiz/thurgau/kanton/gemueseim-mulchbeet;art123841_5004838) [07.08.2018].
- Kristensen H. L. & Thorup-Kristensen K., 2002. Root depth and nitrogen uptake from deep soil layers in organic vegetable production - A preliminary study. *Proceedings of the ISHS Workshop Towards an Ecologically Sound Fertilisation in Field Vegetable Production (571)*, 203-208.
- Kristensen H. L. & Thorup-Kristensen K., 2004. Uptake of N-15 labeled nitrate by root systems of sweet corn, carrot and white cabbage from 0.2-2.5 meters depth. *Plant and Soil* **265** (1-2), 93-100.
- Kristensen H. L. & Thorup-Kristensen K., 2007. Effects of vertical distribution of soil inorganic nitrogen on root growth and subsequent nitrogen uptake by field vegetable crops. *Soil Use and Management* **23**, 338-347.
- Kristensen H. L. & Stavridou E., 2017. Deep root growth and nitrogen uptake by rocket (*Diplotaxis tenuifolia* L.) as affected by nitrogen fertilizer, plant density and leaf harvesting on a coarse sandy soil. *Soil Use and Management* **33** (1), 62-71.
- Kücke M., 2003. Anbauverfahren mit N-Injektion (CULTAN) Ergebnisse, Perspektiven, Erfahrungen. Beiträge des Workshops am 29. November 2001 in Braunschweig. Bundesforschungsanstalt für Landwirtschaft (FAL), Landbauforschung Völkenrode Sonderheft 245, Braunschweig.
- Kutschera L., Lichtenegger E. & Sobotik M., 2009. Wurzelatlas der Kulturpflanzen gemäßigter Gebiete mit Arten des Feldgemüsebaues. (7), DLG-Verlag, 527 S.
- Laber H. & Lattauschke G., 2014. Gemüsebau. Eugen Ulmer KG, Stuttgart, 555 S.
- Laberge G., Ambus P., Hauggaard-Nielsen H. & Jensen E. S., 2006. Stabilization and plant uptake of N from N-15-labelled pea residue 16.5 years after incorporation in soil. *Soil Biology & Biochemistry* **38** (7), 1998-2000.
- Lanthaler C., 2004. Lysimeter Stations and Soil Hydrology Measuring Sites in Europe - Purpose, Equipment, Research Results, Future Developments. School of Natural Sciences at the Karl-Franzens-University, Graz, 147 S.
- Larson D. M., Helfand G. E. & House B. W., 1996. Second-best tax policies to reduce nonpoint source pollution. *American Journal of Agricultural Economics* **78** (4), 1108-1117.
- Leclerc B., Georges P., Cauwel B. & Lairon D., 1995. A 5-Year Study on Nitrate Leaching under Crops Fertilized with Mineral and Organic Fertilizers in Lysimeters. *Biological Agriculture & Horticulture* **11** (1-4), 301-308.
- LfL, 2009. Landwirtschaft und Gewässerschutz – Möglichkeiten – Grenzen - Kosten. 7. Kulturlandschaftstag. Tagungsband. Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft (LfL) 23, Freising-Weihenstephan.
- LfL, 2017. Zwischenfruchtanbau zum Erosions- und Gewässerschutz. Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft (LfL), LfL-Information 4, Freising-Weihenstephan.
- LfL/LfU, 2005. Umsetzungsbeispiele für Maßnahmen zur gewässerschonenden Landbewirtschaftung. Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft (LfL), Freising-Weihenstephan, und Bayerische Landesamt für Umwelt (LfU), Augsburg.
- Liebhart P., Dietrich R. & Eschelböck K., 2003. Einfluss von Sanierungsmaßnahmen auf Ertrag und Qualität bei Gemüse sowie auf Nitratverlagerung und Sickerwasseranfall. Bericht über die 10. Lysimetertagung. Bundesanstalt für alpenländische Landwirtschaft Gumpenstein, Irdning, 77-84.
- Litaor M. I., 1988. Review of soil solution samplers. *Water Resources Research* **24** (5), 727-733.
- LLH, 2016. Zwischenfrucht-Leitfaden. Landesbetrieb Landwirtschaft Hessen (LLH), Kassel.

- Lorenz H.-P., Schlaghecken J. & Engl G., 1989. Ordnungsgemäße Stickstoffversorgung im Freiland-Gemüsebau nach dem «Kulturbegleitendes Nmin Sollwerte (KNS)-System». Ministerium für Landwirtschaft, Weinbau und Forsten Rheinland-Pfalz.
- Magid J., Henriksen O., Thorup-Kristensen K. & Mueller T., 2001. Disproportionately high N-mineralisation rates from green manures at low temperatures - implications for modeling and management in cool temperate agro-ecosystems. *Plant and Soil* **228** (1), 73-82.
- Mainer V., Schmid H., Vogt-Kaute W., Steber H. & Ebertseder T., 2009. Einfluss der Bodenbearbeitung und des Säverfahrens auf die Spross- und Wurzelleistung unterschiedlicher Zwischenfrucht-Mischungen.
- Mellgren R., 2008. Effect of irrigation and nitrogen treatments on yield, quality, plant nitrogen uptake and soil nitrogen status and the evaluation of sap test, SPAD chlorophyll meter and Dualex to monitor nitrogen status in broccoli. Swedish University of Agricultural Sciences (SLU), Alnarp, 77 S.
- Menner J. C., Ledgard S. F. & Gillingham A. G., 2004. Land Use Impacts on Nitrogen and Phosphorus Loss and Management Options for Intervention. Client Report - Prepared for Environment Bay of Plenty. New Zealand.
- Metherell A. K., Harding L. A., Cole C. V. & Parton W. J., 1993. CENTURY Soil organic matter model environment. Technical documentation. Agroecosystem version 4.0. Great Plains System Research Unit Technical Report No.4. USDA-ARS, Fort Collins, Colorado, USA.
- Mezyk M., 2012. Vorrichtung zum Schneiden einer auf der Erdoberfläche aufliegenden Decke organischen Materials. Deutsches Patent- und Markenamt, Dickendorf.
- Minshew H., Selker J., Hemphill D. & Dick R. P., 2002. NLEAP Computer Model and Linear Regression Prediction of Nitrate Leaching in Vegetable Systems. *Horttechnology* **12** (2), 250-256.
- Mitchell R., Webb J. & Harrison R., 2001. Crop residues can affect N leaching over at least two winters. *European Journal of Agronomy* **15** (1), 17-29.
- Möller K., Stinner W. & Leithold G., 2008. Growth, composition, biological N<sub>2</sub> fixation and nutrient uptake of a leguminous cover crop mixture and the effect of their removal on field nitrogen balances and nitrate leaching risk. *Nutrient Cycling in Agroecosystems* **82** (3), 233-249.
- Mood N. S., 2015. Quantifying and modelling nitrate leaching from a lettuce field in Annapolis Valley Nova Scotia. Dalhousie University, Halifax, Nova Scotia, 127 S.
- Morris N. L., Miller P. C. H., J.H.Orson & Froud-Williams R. J., 2010. The adoption of non-inversion tillage systems in the United Kingdom and the agronomic impact on soil, crops and the environment – A review. *Soil and Tillage Research* **108** (1), 1-15.
- Morse R. D., 1999. No-till Vegetable Production – Its Time is Now. *Horttechnology* **9** (3), 373-379.
- Müller-Schärer H., 1996. Interplanting ryegrass in winter leek: Effect on weed control, crop yield and allocation of N-fertiliser. *Crop Protection* **15** (7), 641-648.
- Mueller T. & Thorup-Kristensen K., 2001. N-fixation of selected green manure plants in an organic crop rotation. *Biological Agriculture & Horticulture* **18** (4), 345-363.
- Mullholland B., Rahn C., van Oost I., Voogt W., Svensson I., Verhaeghe M., Garming H. & Shaban N., 2015. 2. Mini-paper - Knowledge exchange to support sustainable intensification of vegetable production in the open field. Participatory learning for knowledge exchange in field based vegetable production. The Focus Group on 'Fertiliser efficiency - focus on horticulture in open field' of the European Commission's Innovation partnership for Agricultural Productivity and Sustainability (EIP-AGRI), Brussels.
- Murer E., 2003. Workshop „Monolithische Feldlysimeter“ 25. Sept. 2002 in Petzenkirchen. Bericht über die 10. Lysimetertagung. Bundesanstalt für alpenländische Landwirtschaft Gumpenstein, Irnding, 11-12.
- Neeteson J. J., 1995. Nitrogen management for intensively grown arable crops and field vegetables. In: Nitrogen fertilization and the environment. (Ed. Bacon P.), Marcel Dekker, New York, 295-325.
- Nendel C., 2009. Evaluation of Best Management Practices for N fertilisation in regional field vegetable production with a small-scale simulation model. *European Journal of Agronomy* **30** (2), 110-118.
- Nett L., Feller C., Eckhard G. & Fink M., 2011. Effect of winter catch crops on nitrogen surplus in intensive vegetable crop rotations. *Nutrient Cycling in Agroecosystems* **91**, 327-337.
- Nett L., 2012. N use efficiency in field vegetable production systems – Catch crop strategies and fertilization history effects on organic fertilizer turnover. Humboldt-Universität zu Berlin, 105 S.

- Nett L., Fuss R., Flessa H. & Fink M., 2015. Emissions of nitrous oxide and ammonia from a sandy soil following surface application and incorporation of cauliflower leaf residues. *Journal of Agricultural Science* **153** (8), 1341-1352.
- Nett L., Sradnick A., Fuss R., Flessa H. & Fink M., 2016. Emissions of nitrous oxide and ammonia after cauliflower harvest are influenced by soil type and crop residue management. *Nutrient Cycling in Agroecosystems* **106** (2), 217-231.
- Neuweiler R., 2011. Düngungsrichtlinien für den Gemüsebau. Neuweiler R. & Brigitte B. [Hrsg.]. Forschungsanstalt Agroscope, Changins-Wädenswil ACW.
- Neuweiler R. & Krauss J., 2017. Düngung im Gemüsebau. In: Grundlagen für die Düngung landwirtschaftlicher Kulturen in der Schweiz (GRUD). 8 (6), Agrarforschung Schweiz, Bern.
- Nielsen K. L. & Thorup-Kristensen K., 2001. Root Growth and Nitrogen Utilization of a Leek Crop and an Undersown Catch Crop. In: Plant Nutrition. Developments in Plant and Soil Sciences. 92 (Eds. Horst W. J. Schenk M. K. Bürkert A. Claasen N. Flessa H. Frommer W. B. Goldbach H. Olf H.-W. Römheld V. Sattelmacher B. Schmidhalter U. Schubert S. von Wiren N. & Wittenmayer L.), Springer, Dordrecht.
- Obenauf U. & Kock C., 2013. N-Sensor im praktischen Einsatz. Was bringt die teilflächenspezifische N-Düngung wirklich? *Bauernblatt*, 22-27.
- Osterburg B., Rühling I., Runge T., Schmidt T., Seidel K., Antony F., Gödecke B. & Witt-Altfelder P., 2007. Kosteneffiziente Maßnahmenkombinationen nach Wasserrahmenrichtlinie zur Nitratreduktion in der Landwirtschaft. In: Maßnahmen zur Reduzierung von Stickstoffeinträgen in Gewässer – eine wasserschutzorientierte Landwirtschaft zur Umsetzung der Wasserrahmenrichtlinie. (Eds. Osterburg B. & Runge T.), Landbauforschung Völkenrode, Braunschweig, 3-155.
- Palmetshofer-Gassner K., 2014. Beschreibung von Bodenbearbeitungsverfahren anhand von technischen, ökologischen und ökonomischen Kriterien. Universität für Bodenkultur, Wien, 304 S.
- Paschold P., Kleber J. & Mayer N., 2009. Bewässerungssteuerung bei Gemüse im Freiland. *Landbau-forschung* **328** (Sonderheft), 43-48.
- Paschold P. J., Artelt B. & Hermann G., 1999. Influence of catch crops on leaching, yield and quality of white asparagus (*Asparagus officinalis* L.). *9<sup>th</sup> International Asparagus Symposium* (479), 439-445.
- Pedersen A., Thorup-Kristensen K. & Jensen L. S., 2009. Simulating nitrate retention in soils and the effect of catch crop use and rooting pattern under the climatic conditions of Northern Europe. *Soil Use and Management* **25** (3), 243-254.
- Peters A., Germer K. & Durner W., 2005. Sickerwassererfassung - Ein Vergleich von Geräten unterschiedlicher Bauart. In: Bericht über die 11. Gumpensteiner Lysimetertagung. Höhere Bundeslehr- und Forschungsanstalt für Landwirtschaft Raumberg-Gumpenstein, Irdning, 61-66.
- Peterson G. A. & Frye W. W., 1989. Chapter 7 – Fertilizer Nitrogen Management. In: Developments in Agricultural and Managed Forest Ecology. Volume 21 (Ed. Follett R. F.), Elsevier, 183-219.
- Pfaff C., 1958. Einfluss der Beregnung auf die Nährstoffauswaschung bei mehrjährigem Gemüseanbau. *Z. Pflanzenernähr. Düng. Bodenk.* **80**, 93-108.
- Prasuhn V. & Spiess E., 2003. Regional differenzierte Abschätzung der Nitratauswaschung über Betriebszählungsdaten. In: Bericht über die 10. Lysimetertagung. Bundesanstalt für alpenländische Landwirtschaft Gumpenstein, Irdning, 55-58.
- Prasuhn V., Kupferschmied P., Spiess E. & Hürdler J., 2016. Szenario-Berechnungen für das Projekt zur Verminderung diffuser Nährstoffeinträge in die Gewässer der Schweiz mit MODIFFUS. Bundesamt für Umwelt (BAFU), Bern.
- Prasuhn V., Humphrys C. & Spiess E., 2017. Einfluss von Witterung und Kultur der Jahre 2009-2015 auf den Wasserhaushalt der Lysimeter Zürich-Reckenholz. In: 17. Gumpensteiner Lysimetertagung. Höhere Bundeslehr- und Forschungsanstalt für Landwirtschaft, Raumberg-Gumpenstein, 205-208.
- Quemada M., Baranski M., Nobel-de Lange M. N. J., Vallejo A. & Cooper J. M., 2013. Meta-analysis of strategies to control nitrate leaching in irrigated agricultural systems and their effects on crop yield. *Agriculture, Ecosystems & Environment* **174** (Supplement C), 1-10.

- Raccuia S. A., Melilli M. G., Calderaro P. & Scandurra S., 2013. Globe Artichoke Genetic Variability for Residual Biomass Production as Renewable Resources of Energy in South Italy. *Viii International Symposium on Artichoke, Cardoon and Their Wild Relatives* **983**, 129-132.
- Rahn C. R., Greenwood D. J. & Draycott A., 1996. Prediction of nitrogen fertilizer requirement with the HRI WELL-N computer model. In: *Progress in Nitrogen Cycling Studies: Proceedings of the 8<sup>th</sup> Nitrogen Workshop held at the University of Ghent, 5–8 September, 1994.* (Eds. Van Cleemput O. Hofman G. & Vermoesen A.), Springer Netherlands, Dordrecht, 255-258.
- Rahn C. R., Bending G. D., Lillywhite R. D. & Turner M. K., 1999. Chemical characterisation of vegetable and arable crop residue materials: a comparison of methods. *Journal of Science of Food and Agriculture* **79**, 1715-1721.
- Rahn C. R. & Lillywhite R. D., 2001. A study of the quality factors affecting the short-term decomposition of field vegetable residues. *Journal of the Science of Food and Agriculture* **82**, 19-26.
- Rahn C. R., 2002. Management Strategies to Reduce Nutrient Losses from Vegetable Crops. In: *Proc. Workshop Eco. Fertilization Veg.* (Eds. Booij R. & Neeteson J. J.) Acta Hort. 571, ISHS, 19-29.
- Rahn C. R., Zhang K., Lillywhite R., Ramos C., Doltra J., de Paz J. M., Riley H., Fink M., Nendel C., Thorup-Kristensen K., Pedersen A., Piro F., Venezia A., Firth C., Schmutz U., Rayns F. & Strohmeyer K., 2010a. EU-Rotate\_N – a European Decision Support System – to Predict Environmental and Economic Consequences of the Management of Nitrogen Fertiliser in Crop Rotations. *European Journal of Horticultural Science* **75**, 20-32.
- Rahn C. R., Zhang K., Lillywhite R., Ramos C., Doltra J., de Paz J. M., Riley H., Fink M., Nendel C., Thorup-Kristensen K., Pedersen A., Piro F., Venezia A., Firth C., Schmutz U., Rayns F. & Strohmeyer K., 2010b. The Development of the EU-Rotate\_N Model and Its Use to Test Strategies for Nitrogen Use across Europe. *IV International Symposium on Ecologically Sound Fertilization Strategies for Field Vegetable Production* **852**, 73-76.
- Rather K. & Schmitt-Viebig B., 2003. Frühes Pflügen von Strünken später Kohlarten. Späte Kohlarten Bodenbearbeitung Termine. Versuche im deutschen Gartenbau. Staatliche Lehr- und Versuchsanstalt für Gartenbau (LVG), Heidelberg.
- Rather K., 2011. Ziel: Nachhaltig die Stickstoff-Ausnutzung verbessern. *Gemüse mit Gemüsebau* (7), 19-21.
- Rather K. & Grosse-Lengerich T., 2013. Improvement of N efficiency in vegetable crops to fulfil the demands of water framework directive.
- Rebholz L., 2017. Greeningkonforme Zwischenfruchtmischungen für den Gemüse- und Kartoffelanbau. Dienstleistungszentrum Ländlicher Raum (DLR) Rheinland-Pfalz, Wasserschutzberatung, Neustadt an der Weinstrasse.
- Richner W. & Sinaj S., 2017. Grundlagen für die Düngung landwirtschaftlicher Kulturen in der Schweiz (GRUD 2017). *Agrarforschung Schweiz* 8 (6), Spezialpublikation, 276 S.
- Röber R. & Schacht H., 2008. Pflanzenernährung im Gartenbau. Eugen Ulmer KG, Stuttgart, 444 S.
- Roelsma J. & Hendriks R. F. A., 2014. Comparative study of nitrate leaching models on a regional scale. *Science of the Total Environment* **499**, 481-496.
- Rowse H. R., 1974. Effect of Irrigation on Length, Weight, and Diameter of Lettuce Roots. *Plant and Soil* **40** (2), 381-391.
- Sauer S., Haussmann W. & Harrach T., 2002. Effektive Durchwurzelungstiefe, Sickerwasserbildung und Nitratverlagerung in tiefgründigen Lössböden eines Trockengebietes. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science* **165**, 269-273.
- Schenk M., Heins B. & Steingrobe B., 1991. The significance of root development of spinach and kohlrabi for N fertilization. *Plant and Soil* **135** (2), 197-203.
- Schilling G., 2000. Pflanzenernährung und Düngung. E. Ulmer, Stuttgart, 464 S.
- Schipper L. & Vojvodic-Vukovic M., 1998. Nitrate removal from groundwater using a denitrification wall amended with sawdust: Field trial. *Journal of Environmental Quality* **27** (3), 664-668.
- Schlaghecken J., 2004. Stickstoff aus den Ernteresten besser nutzen! Dienstleistungszentrum Ländlicher Raum (DLR) Rheinland-Pfalz, Neustadt an der Weinstrasse.

- Schmidt N., Mayer N., Berthold G., Schlering C. & Zinkernagel J., 2017. Temporal course of percolation water and nitrate leaching of onion grown in lysimeter under simulated future precipitation conditions. Institut für Gemüsebau, Hochschule Geisenheim.
- Schwarz A., Pfenning J., Bischoff W. A. & Liebig H. P., 2010. Effects of N Fertilization Strategy and Fixed Ploughing Date on Nitrate Leaching on Field Vegetable Cultivation. *IV International Symposium on Ecologically Sound Fertilization Strategies for Field Vegetable Production* **852**, 115-122.
- Shaffer M. J., Halvorson A. D. & Pierce F. J., 1991. Nitrate Leaching and Economic Analysis Package (NLEAP): Model Description and Application. In: *Managing Nitrogen for Groundwater Quality and Farm Profitability*. 13, Soil Science Society of America, Madison, Wisconsin, USA, 285-322.
- Sharma S. P., Leskovar D. I., Crosby K. M. & Volder A., 2017. Root growth dynamics and fruit yield of melon (*Cucumis melo* L) genotypes at two locations with sandy loam and clay soils. *Soil & Tillage Research* **168**, 50-62.
- Shaviv A., 2001. Advances in Controlled-Release Fertilizers. *Advances in Agronomy* **71**, 1-49.
- Shilling D. G., Dusky J. A., Mossler M. A. & Bewick T. A., 1992. Allelopathic Potential of Celery Residues on Lettuce. *Journal of the American Society for Horticultural Science* **117** (2), 308-312.
- Simon W., Huwe B. & van der Ploeg R. R., 1988. Die Abschätzung von Nitratausträgen aus landwirtschaftlichen Nutzflächen mit Hilfe von Nmin-Daten. *Z. Pflanzenernähr. Bodenk.* **151**, 289-294.
- Singh G., Kaur G., Williard K., Schoonover J. & Kang J., 2017. Monitoring of Water and Solute Transport in the Vadose Zone: A Review. *Vadose Zone Journal* **17**.
- Smit A. L., Booij R., Enserink C. T. & Vanderwerf A., 1995. Rooting Characteristics and Nitrogen-Utilization of Brussels-Sprouts and Leeks. *Biological Agriculture & Horticulture* **11** (1-4), 247-256.
- Smit A. L. & Groenwold J., 2005. Root characteristics of selected field crops: Data from the Wageningen Rhizolab (1990-2002). *Plant and Soil* **272** (1-2), 365-384.
- Soane B. D., Ball B. C., Arvidsson J., Basch G., Moreno F. & Roger-Estrade J., 2012. No-till in northern, western and south-western Europe: A review of problems and opportunities for crop production and the environment. *Soil & Tillage Research* **118**, 66-87.
- SOBV, 2013. Solothurner Landwirtschaft – natürlich vielfältig. Stand: 25. September 2013. Solothurner Bauernverband (SOBV), Solothurn.
- Sommer K., 2005. CULTAN-Düngung. Physiologisch, ökologisch, ökonomisch optimiertes Düngeverfahren für Ackerkulturen, Grünland, Gemüse, Zierpflanzen und Obstgehölze. AgroConcept GmbH, Gelsenkirchen-Buer, Germany.
- Sorensen J. N. & Thorup-Kristensen K., 1993. Nitrogen Effects of Non-Legume Catch Crops. *Zeitschrift für Pflanzenernährung und Bodenkunde* **156** (1), 55-59.
- Sorensen J. N. & Thorup-Kristensen K., 2003. Undersowing legume crops for green manuring of lettuce. *Biological Agriculture & Horticulture* **21** (4), 399-414.
- Spiess E., Prasuhn V. & Stauffer W., 2011. Einfluss der Winterbegrünung auf Wasserhaushalt und Nitratauswaschung. In: Bericht über die 14. Gumpensteiner Lysimetertagung. LFZ Raumberg-Gumpenstein, Irdning, 149-154.
- Spiess E., Stauffer W., Humphrys C. & Prasuhn V., 2013. Einfluss der Witterung auf die Auswaschung unter einer Fruchtfolge. In: 15. Gumpensteiner Lysimetertagung. LFZ Raumberg-Gumpenstein, Irdning, 11-15.
- Spiess E., Prasuhn V. & Humphrys C., 2015. Einfluss des Umbruchtermins einer Zwischenfrucht auf die Nitratauswaschung. In: 16. Gumpensteiner Lysimetertagung. HBLFA Raumberg-Gumpenstein, Irdning, 171-174.
- Sradnick A., Feller C. & Fink M., 2017. Nährstoffgehalte und N-Mineralisierung organischer Düngemittel. Leibniz-Instituts für Gemüse- und Zierpflanzenbau (IGZ), Grossbeeren.
- Stauffer W. & Spiess E., 2001. Einfluss unterschiedlicher Fruchtfolgen und nachwachsender Rohstoffe auf die Nitratauswaschung. In: Bericht über die 9. Gumpensteiner Lysimetertagung. Bundesanstalt für alpenländische Landwirtschaft Gumpenstein (BAL), Irdning, 47-50.
- Stenger R., Priesack E., Barkle G. & Sperr C., 1999. Expert-N A Tool for simulating nitrogen and carbon dynamics in the soil-plant-atmosphere system. In: NZ Land Treatment Collective Proceedings Technical

- Session 20: Modelling of Land Treatment Systems. (Eds. Tomer M. Robinson M. & Gielen G.), New Plymouth, New Zealand, 19-28.
- Stohl U., 2013. Nutzen und Durchführung einer teilflächenspezifischen Grunddüngung im Acker- und Gemüsebau. DEULA Bad Kreuznach.
- Storch J., 2013. Mulch- und Direktpflanzung im Ökologischen Gemüsebau unter Verwendung der Reihenmulchschneide-Pflanztechnik sowie Aspekte der Betriebswirtschaft. Universität Kassel, 86 S.
- Sunkel R., 1979. Nitratauswaschung im landwirtschaftlich genutzten Wasserschutzgebiet Mussum. *Z. Pflanzenernähr. Bodenk.* **142**, 207-218.
- SZG, 2016a. Definition gemüsebauliche Begriffe. Schweizerische Zentralstelle für Gemüsebau und Spezialkulturen (SZG), Koppigen.
- SZG, 2016b. Statistischer Jahresbericht Gemüse 2016. Schweizerische Zentralstelle für Gemüsebau und Spezialkulturen (SZG), Koppigen.
- TBDV, 2016. Verordnung über Trinkwasser sowie Wasser in öffentlich zugänglichen Bädern und Duschanlagen vom 16. Dezember 2016 (Stand am 1. Mai 2018). Systematische Sammlung des Bundesrechts der Schweiz, SR 817.022.11, Bern.
- ten Berge H. F. M., 2002. A review of potential indicators for nitrate loss from cropping and farming systems in the Netherlands. Report 31. Plant Research International B.V., Wageningen, The Netherlands.
- Thompson R. B., Tremblay N., Fink M., Gallardo M. & Padilla F. M., 2017. Tools and Strategies for Sustainable Nitrogen Fertilisation of Vegetable Crops. In: *Advances in Research on Fertilization Management of Vegetable Crops.* (Eds. Tei F. Silvana N. & Benincasa P.), Springer International Publishing AG, Cham, Switzerland, 1-63.
- Thomsen I. K., Elsgaard L., Olesen J. E. & Christensen B. T., 2016. Nitrogen release from differently aged *Raphanus sativus* L. nitrate catch crops during mineralization at autumn temperatures. *Soil Use and Management* **32** (2), 183-191.
- Thorup-Kristensen K., 1993. Root Development of Nitrogen Catch Crops and of a Succeeding Crop of Broccoli. *Acta Agriculturae Scandinavica, Section B – Soil & Plant Science* **43** (1), 58-64.
- Thorup-Kristensen K., 1998. Root growth of green pea (*Pisum sativum* L.) genotypes. *Crop Science* **38** (6), 1445-1451.
- Thorup-Kristensen K. & Nielsen N. E., 1998. Modelling and measuring the effect of nitrogen catch crops on the nitrogen supply for succeeding crops. *Plant and Soil* **203** (1), 79-89.
- Thorup-Kristensen K. & van den Boogaard R., 1998. Temporal and spatial root development of cauliflower (*Brassica oleracea* L. var. botrytis L.). *Plant and Soil* **201**, 37-47.
- Thorup-Kristensen K. & Sorensen J. N., 1999. Soil Nitrogen Depletion by Vegetable Crops with Variable Root Growth. *Acta Agriculturae Scandinavica, Section B – Soil and Plant Science* **49** (2), 92-97.
- Thorup-Kristensen K. & van den Boogaard R., 1999. Vertical and horizontal development of the root system of carrots following green manure. *Plant and Soil* **212** (2), 143-151.
- Thorup-Kristensen K., 2001a. 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 and Soil* **230**, 185-195.
- Thorup-Kristensen K., 2001b. Root growth and soil nitrogen depletion by onion, lettuce, early cabbage and carrot. *Proceedings of the International Conference on Environmental Problems Associated with Nitrogen Fertilisation of Field Grown Vegetable Crops* (563), 201-206.
- Thorup-Kristensen K., 2002. Utilising differences in rooting depth to design vegetable crop rotations with high nitrogen use efficiency (NUE). *Proceedings of the ISHS Workshop Towards an Ecologically Sound Fertilisation in Field Vegetable Production* (571), 249-254.
- Thorup-Kristensen K., Magid J. & Jensen L. S., 2003. Catch crops and green manures as biological tools in nitrogen management in temperate zones. *Advances in Agronomy* **79**, 227-302.
- Thorup-Kristensen K., 2006a. Root growth and nitrogen uptake of carrot, early cabbage, onion and lettuce following a range of green manures. *Soil Use and Management* **22**, 29-38.
- Thorup-Kristensen K., 2006b. Effect of deep and shallow root systems on the dynamics of soil inorganic N during 3-year crop rotations. *Plant and Soil* **288**, 233-248.

- Thorup-Kristensen K., 2013. Strict Danish regulations on nitrogen use and how understanding vegetable crop root growth may help us improve nitrogen use efficiency. In: IV Jornadas Fertilización SECH. Actas de Horticultura 61.
- Thorup-Kristensen K. & Rasmussen C. R., 2015. Identifying new deep-rooted plant species suitable as undersown nitrogen catch crops. *Journal of Soil and Water Conservation* **70** (6), 399-409.
- TLL, 2008. Lysimeterstation Buttstedt. Wasserhaushaltsmessstation und Modellanlage für standortabhängige Schwellenwerte für N-Salden. Thüringer Landesanstalt für Landwirtschaft (TLL), Jena.
- Tonitto C., David M. B. & Drinkwater L. E., 2006. Replacing bare fallows with cover crops in fertilizer-intensive cropping systems: A meta-analysis of crop yield and N dynamics. *Agriculture Ecosystems & Environment* **112** (1), 58-72.
- Torres-Dorante L. O., Lammel J. & Kuhlmann H., 2009. Use of a layered double hydroxide (LDH) to buffer nitrate in soil: long-term nitrate exchange properties under cropping and fallow conditions. *Plant and Soil* **315** (1-2), 257-272.
- Tribouillois H., Fort F., Cruz P., Charles R., Flores O., Garnier E. & Justes E., 2015. A Functional Characterisation of a Wide Range of Cover Crops Species: Growth and Nitrogen Acquisition Rates, Leaf Traits and Ecological Strategies. *Plos One* **10** (3).
- Übelhor A., Gruber S. & Claupein W., 2014. Influence of tillage intensity and nitrogen placement on nitrogen uptake and yield in strip-tilled white cabbage (*Brassica oleracea* convar. capitata var. alba). *Soil & Tillage Research* **144**, 156-163.
- van der Ploeg R. R., Machulla G. & Ringe H., 1995. Ein Mischzellenmodell zur Abschätzung der Nitratauswaschung aus landwirtschaftlich genutzten Boden im Winterhalbjahr. *Z. Pflanzenernähr. Bodenk.* **158**, 365-373.
- van Dijk W. & Smit A. L., 2006. How to Meet the EC-Nitrate Directive in Dutch Vegetable Growing? *Acta Hort.* **700**, 191-198.
- VDLUFA, 2006. Kongressband 2005, Bonn. VDLUFA-Schriftenreihe **61**.
- Vetsch A., 2000. Nitratindex. Dokumentation zum Einschätzungssystem der landwirtschaftlichen Bewirtschaftung bezüglich der Gefährdung von Nitratauswaschung ins Grundwasser.
- Vinten A. J. A., Davies R., Castle K. & Baggs E. M., 1998. Control of nitrate leaching from a Nitrate Vulnerable Zone using paper mill waste. *Soil Use and Management* **14** (1), 44-51.
- Vocanson A., Jeuffroy M. H. & Roger-Estrade J., 2006. Effect of sowing date and cultivar on root system development in pea (*Pisum sativum* L.). *Plant and Soil* **283** (1-2), 339-352.
- VSGP, 2011. Mindestanforderungen im Bereich Düngung für die Produktion gemäss ÖLN, SUISSE GARANTIE-, Bio- und SwissGAP-Richtlinien. Bern.
- VSGP, 2012. ÖLN – Anforderungen im Gemüsebau – Fruchtfolge. Bern.
- VSGP, 2014. *Der Gemüsebau* (1).
- VSGP, 2017. Schweizer Gemüse. Statistik. Der Konsum von Gemüse ist steigend. Verband Schweizer Gemüseproduzenten (VSGP), Zugang: [www.gemuese.ch/Statistik](http://www.gemuese.ch/Statistik) [31.10.2017].
- Wang Q., Cameron K., Buchan G., Zhao L., Zhang E. H., Smith N. & Carrick S., 2012. Comparison of lysimeters and porous ceramic cups for measuring nitrate leaching in different soil types. *New Zealand Journal of Agricultural Research* **55** (4), 333-345.
- Weaver J. E. & Bruner W. E., 1927. In: Root development of vegetable crops. McGraw-Hill Book Company, Inc., London, New York.
- Weber M. & Schild A., 2007. Stand der Bewässerung in der Schweiz – Bericht zur Umfrage 2006. Bundesamt für Landwirtschaft (BLW), Bern, 17.
- Wehrmann J. & Scharpf H. C., 1986. The Nmin-method – an aid to integrating various objectives of nitrogen fertilization. *Z. Pflanzenernähr. Bodenk.* **149**, 428-440.
- Wehrmann J. & Scharpf H. C., 1989. Reduction of nitrate leaching in a vegetable farm: Fertilization, crop rotation, plant residues. In: Management Systems to Reduce Impact of Nitrates. Elsevier Applied Sciences, London, UK, 147–156.
- Weier U., 1999. Späte Einarbeitung von Ernterückständen verringert die Gefahr der Nitratauswaschung über Winter. Versuche im deutschen Gartenbau. LVG Hannover-Ahlem.

- Weihermüller L., Siemens J., Deurer M., Knoblauch S., Rupp H., Göttlein A. & Pütz T., 2007. In Situ Soil Water Extraction: A Review. *Journal of Environmental Quality* **36** (6), 1735-1748.
- Whitmore A. P., 1996. Modelling the release and loss of nitrogen after vegetable crops. *Netherlands Journal of Agricultural Science* **44** (1), 73-86.
- Wiesler F., Laun N. & Armbruster M., 2008. Integriertes Stickstoffmanagement – eine Strategie zur Verminderung der Nitratauswaschung im Gemüsebau der Pfalz. Dienstleistungszentrum ländlicher Raum Rheinpfalz (DLR), Schifferstadt.
- Williams P. H., Tregurtha R. J. & Francis G. S., 2003. Fate of urea applied to winter spinach in New Zealand. *Nutrient Cycling in Agroecosystems* **67** (3), 245-254.
- Wonneberger C., Keller F., Bahnmüller H., Böttcher H., Geyer B. & Meyer J., 2004. Gemüsebau. Verlag Eugen Ulmer, 384 S.
- Wyland L. J., Jackson L. E., Chaney W. E., Klonsky K., Koike S. T. & Kimple B., 1996. Winter cover crops in a vegetable cropping system: Impacts on nitrate leaching, soil water, crop yield, pests and management costs. *Agriculture Ecosystems & Environment* **59** (1-2), 1-17.
- Xie Y. & Kristensen H. L., 2016. Overwintering grass-clover as intercrop and moderately reduced nitrogen fertilization maintain yield and reduce the risk of nitrate leaching in an organic cauliflower (*Brassica oleracea* L. var. botrytis) agroecosystem. *Scientia Horticulturae* **206**, 71-79.
- Xie Y., Tittarelli F., von Fragstein M., Bavec M., Canali S. & Kristensen H. L., 2016. Can living mulches in intercropping systems reduce the potential nitrate leaching? Studies of organic cauliflower (*Brassica oleracea* L. var. botrytis) and leek (*Allium porrum* L.) production across European conditions. *Renewable Agriculture and Food Systems* **32** (3), 224-239.
- Xie Y. & Kristensen H. L., 2017. Intercropping leek (*Allium porrum* L.) with dyer's woad (*Isatis tinctoria* L.) increases rooted zone and agro-ecosystem retention of nitrogen. *European Journal of Agronomy* **82** (Part A), 21-32.
- Zessner M., Gabriel O., Kovacs A., Kuderna M., Schilling C., Hochedlinger G. & Windhofer G., 2012. Analyse der Wirkung von Maßnahmen zur Reduktion von Nährstoffeinträgen in oberösterreichischen Einzugsgebieten nach unterschiedlichen Eintragspfaden für strategische Planungen. Endbericht. Technische Universität Wien, wpa Beratende Ingenieure, Umweltbundesamt, Wien.
- Zinkernagel J., Weinheimer S. & Mayer N., 2017. Wasserbedarf von Freilandgemüsekulturen. Hochschule Geisenheim, Institut für Gemüsebau, Geisenheim.
- Zupanc V., Sturm M., Lojen S., Marsic-Kacjan N., Adu-Gyamfi J., Bracic-Zeleznik B., Urbanc J. & Pintar M., 2011. Nitrate leaching under vegetable field above a shallow aquifer in Slovenia. *Agriculture Ecosystems & Environment* **144** (1), 167-174.
- ZVG, 2003. Umweltbetriebsführung im Gartenbau bei Kulturen im offenen Boden (Freiland). Gemüsebau – Zierpflanzenbau – Baumschule. Unternehmensleitfaden zur umweltgerechten Betriebsführung im Sinne nachhaltiger Entwicklung. Zentralverband Gartenbau e.V., Berlin.

## Anhang

Tabelle A: Fläche (ha) der als Frischgemüse im Freiland angebauten Gemüsearten im 5-jährigen Mittel (2012-2016) für den Kanton Solothurn und die restliche Schweiz (SZG 2016b)

Gemüseart	Kanton Solothurn		restliche Schweiz		Total
	SGA <sup>1</sup>	Bio	SGA	Bio	
Salate ( <i>Lactuca sativa</i> )	71	14	1800	227	2112
Karotten	11	5	1407	300	1723
Zwiebeln	0.4	2	891	85	978
Salate ( <i>Cichorium</i> )	33	8	557	74	672
Brokkoli	6	3	456	99	564
Blumenkohl	3	1	462	64	530
Lauch	0.5	0	335	62	398
Kabis	3	0.5	338	40	382
Bohnen	2	0	340	26	368
Spargel	2	0	335	17	354
Fenchel	1	2	289	61	353
Nüsslisalat	2	0	292	40	334
Chicorée, Wurzeln	0.2	0	312	9	321
Sellerie, Knollen-	2	0	234	45	281
Zucchetti	0	0	230	36	266
Kürbis, Speise-	0	0	210	48	258
Randen	0.1	1	147	55	203
Spinat	0	0	162	37	199
Zuckermais	1	0.2	118	53	172
Wirz	0.3	1	148	20	169
Kohlrabi	1	0	155	12	168
Chinakohl	2	0.4	129	19	150
Petersilie	1	0	72	9	82
Rosenkohl	0	0.5	71	6	78
Rhabarber	0	0.2	66	6	72
Rüben	0	0	63	3	66
Krautstiel	0	0	45	9	54
Rucola	0	0	46	5	51
Sellerie, Stangen-	0	0	42	6	48
Rettich	0	0.1	38	4	42
Radieschen	0	0	21	5	26
Knoblauch	0.1	0	10	15	25
Schnittlauch	0	0	13	11	24
Pastinake	0	0	11	8	19
Erbsen	0	0	15	2	17
Kardy	0	0	12	3	15
Pak-Choi	0	0	15	0	15
Federkohl	0	0.1	8	3	11
Schwarzwurzeln	0	0	4	3	7
Topinambur	0	0	1	4	5

<sup>1</sup> SGA = Suisse Garantie

Tabelle B: Gruppenbezeichnung und zusammengefasste Varietäten von Freilandgemüse

Gruppenbezeichnung	Varietäten
Blumenkohl	Blumenkohl, Romanesco
Bohnen	Busch-, Stangen-, Schwert-, Spargel-, Schnurbohne
Brokkoli	Brokkoli, Cima di rapa
Salate ( <i>Cichorium</i> )	Cicorino grün/rot, Trevisano, Castelfranco, Schnitzichorie, Endivie gekraust/glatt, Catalogna; Zuckerhut
Salate ( <i>Lactuca sativa</i> )	Kopfsalat, Eichblattsalat, Lollo, Batavia, Eisberg, Lattich, Lattich Mini, Lattughino
Erbse	Erbse, Kefe
Kabis	Kabis rot, weiss (neu/frisch), spitz
Kardy	Artischocke, Kardy
Karotten	Karotten (neu/frisch), Pfälzer
Kohlrabi	Kohlrabi (Stück), Boden-
Krautstiel	Krautstiel, Schnittmangold
Lauch	Lauch grün, Stangen
Petersilie	Peterli gekraust, glatt
Radieschen	Radieschen, Eiszapfen
Rüben	Herbstrüben weiss, Teltower
Sellerie, Knollen	Sellerie Knollen (neu/frisch), Suppen
Sellerie, Stangen	Sellerie Stangen gebleicht, grün
Spargel	Spargel bleich, grün
Zucchetti	Zucchetti, Zucchetti Blüten
Zwiebeln	Zwiebel gelb (neu/frisch), Gemüse, rot/weiss, Schalotten, Bundzwiebeln

Tabelle C: Mehrsprachiges Namensverzeichnis der Gemüsearten

Schweizer Hochdeutsch	Deutsch	Français	Italiano	English	Wissenschaftliche Bezeichnung
Blumenkohl	Blumenkohl	Chou-fleur	Cavolfiore	Cauliflower	<i>Brassica oleracea</i> L. var. <i>botrytis</i>
Bohne Busch-	Bohne, Busch-	Haricot nain (emb.)	Fagiolino nano	Dwarf french bean	<i>Phaseolus vulgaris</i> L. var. <i>nanus</i>
Bohne Stangen-	Bohne, Stangen-	Haricot à rame	Fagiolo rampicante	Climbing bean	<i>Phaseolus vulgaris</i> L. var. <i>vulgaris</i>
Broccoli	Brokkoli	Broccoli	Broccoletto	Sprouting broccoli	<i>Brassica oleracea</i> L. convar. <i>botrytis</i> (L.) Alef. var. <i>Italica Plenck</i>
Chicorée, Wurzeln	Chicorée, Wurzeln	Racines d'endive	Cicoria belga – radice	Chicory root	<i>Cichorium intybus</i> L. var. <i>foliosum</i>
Chinakohl	Chinakohl	Chou de chine	Cavolo cinese	Chinese cabbage	<i>Brassica rapa</i> L. subsp. <i>pekinensis</i>
Endivie	Endivie	Chicorée scarole	Scarola	Endive	<i>Cichorium endivia</i> L.
Erbse	Erbse	Petit pois	Pisello	Pea	<i>Pisum sativum</i> L.
Nüsslisalat	Feldsalat	Rampon	Formentino	Corn salad	<i>Valerianella locusta</i> L.
Fenchel	Fenchel	Fenouil	Finocchio	Florence Fennel	<i>Foeniculum</i> Mill. ssp. <i>bulgare</i> var. <i>Azoricum</i> (Mill.) Thell.
Federkohl	Grünkohl	Chou kale	Cavolo riccio	Curly kale	<i>Brassica oleracea</i> L. convar. <i>acephala</i> (D.C.) Alef. var. <i>sabellica</i> L.
Cardy	Kardone	Cardon	Cardo	Cardoon	<i>Cynara cardunculus</i>
Knoblauch	Knoblauch	Ail	Aglio	Garlic	<i>Allium sativum</i> L.
Kohlrabi	Kohlrabi	Chou-pomme	Cavolo rapa	Kohlrabi turnip cabbage	<i>Brassica oleracea</i> L. var. <i>gongylodes</i>
Kabis	Kopfkohl	Chou	Cavolo	Cabbage	<i>Brassica oleracea</i> L. var. <i>capitata alba/rubra</i>
Kürbis Speise-	Kürbis, Speise-	Courge	Zucca	Pumpkin/Winter squash	<i>Cucurbita</i> div. species
Lauch	Lauch	Poireau	Porro	Leek	<i>Allium porrum</i> L.
Krautstiel	Mangold	Côte de bette	Costa	Swiss chard	<i>Beta vulgaris</i> L. var. <i>cicla</i>
Melonen	Melone	Melon	Melone	Melon	<i>Cucumis melo</i> L.
Karotten	Möhren	Carottes	Carota	Carrot	<i>Daucus carota</i> L. spp. <i>sativus</i>
Pak-Choi	Pak-Choi	Pak-Choi	Pak-Choi	Pak-Choi	<i>Brassica rapa</i> L. subsp. <i>chinensis</i>
Pastinake	Pastinak	Panais	Pastinaca	Parsnip	<i>Pastinaca sativa</i> L.
Peterli	Petersilie	Persil	Prezzemolo	Parsley	<i>Petroselinum crispum</i> (Mill.) Nym. ex A.W. Hill convar. <i>crispum</i>
Cicorino rot	Radicchio	Chicorée rouge	Radicchio di Chioggia / Palla rossa	Chicory	<i>Cichorium intybus</i> L. var. <i>foliosum</i>
Radieschen	Radieschen	Petit radis	Rapanello	Small radish	<i>Raphanus sativus</i> L. var. <i>sativus</i>
Rettich	Rettich	Radis	Ramolaccio	Radish	<i>Raphanus sativus</i> L. var. <i>oleiformis</i> Pers.
Rhabarber	Rhabarber	Rhubarbe	Rabarbaro	Rhubarb	<i>Rheum rhabarbarum</i> L.

Tabelle C: Mehrsprachiges Namensverzeichnis der Gemüsearten

Schweizer Hochdeutsch	Deutsch	Français	Italiano	English	Wissenschaftliche Bezeichnung
Rosenkohl	Rosenkohl	Chou de Bruxelles	Cavolo di Bruxelles	Brussels sprouts	<i>Brassica oleracea</i> L. var. <i>gemmifera</i>
Randen	Rote Bete/Rüben	Betterave	Barbabietola rossa	Beetroot/Red beet	<i>Beta vulgaris</i> L. var. <i>vulgaris</i>
Rübe, Herbst-, weiss	Rübe, Herbst-, weiss	Rave d'automne-blanche	Rapa bianca autunnale	Turnip	<i>Brassica rapa</i> L. emend. Metzg. var. <i>rapa</i>
Rucola	Rukola	Roquette	Rucola	Rocket/Arugola	<i>Eruca sativa</i> Mill
Salat	Salat, Kopf-	Salade	Lattuga	Lettuce	<i>Lactuca sativa</i> L. var. <i>capitata</i>
Schalotte	Schalotte	Echalote	Scalogno	Shallot	<i>Allium ascalonicum</i> L.
Schnittlauch	Schnittlauch	Ciboulette	Erba cipollina	Chives	<i>Allium schoenoprasum</i> L.
Schwarzwurzel	Schwarzwurzel	Scorsonère	Scorzoneria di Spagna	Black salsify	<i>Scorzoneria hispanica</i> L.
Sellerie, Knollen-	Sellerie, Knollen-	Céleri-pomme	Sedano rapa	Celeriac	<i>Apium graveolens</i> L. var. <i>rapaceum</i>
Sellerie, Stangen-	Sellerie, Stangen-	Céleri-branche	Sedano costa	Celery	<i>Apium graveolens</i> L. var. <i>dulce</i>
Spargel	Spargel	Asperge	Asparago	Asparagus	<i>Asparagus officinalis</i> L.
Spinat	Spinat	Epinard	Spinacio	Spinach	<i>Spinacia oleracea</i> L.
Topinambur	Topinambur	Topinambour	Topinambur	Jerusalem artichoke	<i>Helianthus tuberosus</i> L.
Wirz	Wirsing	Chou frisé	Verza	Savoy cabbage	<i>Brassica oleracea</i> L. var. <i>sabauda</i>
Peterli, Wurzel-	Petersilie, Wurzel	Persil, racine	Radice del prezzemolo	Parsley, root	<i>Petroselinum crispum</i> (Mill.) Nym. ex A.W. Hill convar. <i>Radicosum</i> (Alef.) Danert
Cichorien	Zichorien	Chicorée	Cicoria	Chicory	<i>Cichorium</i>
Zucchetti	Zucchini	Courgette	Zucchina	Summer squash	<i>Cucurbita pepo</i> L. convar. <i>giromontiina</i>
Zuckerhut	Zuckerhut	Chicorée pain de sucre	Cicoria bianca di Milano	Sugar loaf	<i>Chichorium intybus</i> L. var. <i>foliosum</i>
Zuckermais	Zuckermais	Maïs sucré	Mais dolce	Sweet corn	<i>Zea mays</i> L. convar. <i>saccharata</i>
Zwiebel, gelb	Zwiebel, Speise	Oignon jaune	Cipolla	Onion	<i>Allium cepa</i> L.
Zwiebeln, Bund-	Zwiebel, Bund-	Oignon en botte	Cipolla a mazzi	Spring onion	<i>Allium fistulosum</i>

Tabelle D: Literatursuchergebnisse (Anzahl Publikationen) der systematischen Stichwortsuche via «ISI Web of Knowledge» von Sept. bis Nov. 2017

Gemüseart/-gruppe	Gemüsename	+ Stickstoff	+ Nitrat	+ Wurzel	+ Ernterückstände	+ Nitrat + Auswaschung	Gesamt	Relevant
Blumenkohl	6923	298	163	774	314	31	1580	160
Bohnen	144	17	0	17	2	0	36	14
Broccoli	1024	35	8	58	21	0	122	21
Chicorée, Wurzeln	1992	190	84	705	48	10	1037	64
Chinakohl	2607	197	152	498	146	7	1000	79
Erbse	38561	3119	686	5315	219	63	9402	214
Federkohl							0	
Fenchel	347	29	9	20	6	0	64	18
Kabis	13844	679	346	1742	802	36	3605	101
Kardy	554	28	9	79	15	0	131	55
Karotte	13828	400	203	2463	487	16	3569	113
Knoblauch	9055	217	67	400	154	2	840	21
Kohlrabi	450	14	11	89	19	1	134	27
Kürbis, Speise	3585	97	53	322	130	2	604	53
Lauch	1577	109	53	255	117	17	551	92
Mangold	394	38	38	80	7	2	165	22
Melonen	7083	227	95	703	220	14	1259	36
Nüsslisalat	129	9	21	17	5	0	52	21
Pak-Choi	240	20	17	37	13	0	87	11
Pastinake	456	8	6	84	4	0	102	5
Peterli, Wurzel							0	
Petersilie	2042	35	37	218	60	0	350	43
Radieschen	511	28	18	121	20	7	194	0
Randen	20	0	2	2	2	0	6	28
Rettich	0	434	198	1507	349	54	2542	48
Rhabarber	246	29	18	72	13	2	134	17
Rosenkohl	2	79	30	64	42	6	221	69

Tabelle D: Literatursuchergebnisse (Anzahl Publikationen) der systematischen Stichwortsuche via «ISI Web of Knowledge» von Sept. bis Nov. 2017

Gemüseart/-gruppe	Gemüsename	+ Stickstoff	+ Nitrat	+ Wurzel	+ Ernterückstände	+ Nitrat + Auswaschung	Gesamt	Relevant
Rüben	2	143	51	418	212	10	834	26
Rucola	1577	109	53	255	117	17	551	25
Salate ( <i>Cichorium</i> )	454	38	49	67	13	3	170	56
Salate ( <i>Lactuca sativa</i> )	14746	1086	884	2359	737	80	5146	213
Schnittlauch	471	15	12	43	18	1	89	21
Schwarzwurzel	12	0	1	7	0	0	8	12
Sellerie Knollen	156	9	16	40	11	2	78	11
Sellerie Stangen	2728	109	81	253	143	4	590	80
Spargel bleich/grün	3673	107	41	694	129	6	977	50
Spinat	16618	718	869	1201	1235	21	4044	94
Spinat Wurzel							0	
Topinambur	1261	65	5	112	41	0	223	31
Wirz	98	8	3	14	9	0	34	5
Zucchetti	1780	68	37	172	114	8	399	44
Zuckerhut	90	0	0	1	2	0	3	0
Zuckermais	2	402	93	282	189	26	992	83
Zwiebeln	17069	689	198	1806	443	26	3162	135
Zwiebeln, Bund	277	34	13	35	27	1	110	14

Tabelle E: Quellen, Suchbegriffe und Anzahl der Suchergebnisse der Literatursuche in gemüsebauspezifischen Peer-review-Literaturdatenbanken von Sept. bis Nov. 2017

Gesellschaft / Magazin	Suchbegriffe	Treffer	Relevant
<b><u>International Society for Horticultural Science</u></b>			
<b>Acta Horticulturae</b>	Nitrat + Auswaschung	200	36
<b>The European Journal of Horticultural Science (eJHS)</b>	Nitrat + Auswaschung		7
<b>Scripta Horticulturae</b>	Nitrat + Auswaschung		0
<b>Japanese Society for Horticultural Science (JSHS)</b>	Nitrat + Auswaschung		14
<b><u>Journal of the American Society for Horticultural Science</u></b>			
<b>HortScience</b>	Nitrat + Auswaschung	1188	235
<b>HortTechnology</b>	Nitrat + Auswaschung	751	33
<b><u>The Journal of Horticultural Science and Biotechnology</u></b>			
	Nitrat + Auswaschung	118	18
	Stickstoff + Verluste	666	22
<b><u>Horticultural Science</u></b>	Nitrat + Auswaschung	2	1

Tabelle F: In die Literatursuche (Sept. bis Nov. 2017) einbezogene Forschungseinrichtungen des Garten- und Gemüsebaus auf universitärer und Landesebene (Deutschland, Österreich, Schweiz), Gemüsebauverbände (Deutschland, Schweiz) und öffentliche Ämter des Bundes und der Kantone der Schweiz

Quelle	Anschrift	Web-Adresse
Agrarmarkt Informations-Gesellschaft mbH (AMI)	Dreizehnmorgenweg 10, 53175 Bonn	<a href="https://www.ami-informiert.de">https://www.ami-informiert.de</a>
Julius Kühn-Institut (JKI), Bundesforschungsinstitut für Kulturpflanzen	Erwin-Baur-Str. 27, 06484 Quedlinburg	<a href="https://www.julius-kuehn.de">https://www.julius-kuehn.de</a>
Dienstleistungszentrum ländlicher Raum (DLR) Rheinpfalz	Breitenweg 71, 67435 Neustadt	<a href="http://www.dlr-rheinpfalz.rlp.de">http://www.dlr-rheinpfalz.rlp.de</a>
Hochschule Geisenheim, Institut für Gemüsebau	Von-Lade-Str. 1, 65366 Geisenheim	<a href="http://www.hs-geisenheim.de/forschungszentren/institut-fuer-gemuesebau.html">http://www.hs-geisenheim.de/forschungszentren/institut-fuer-gemuesebau.html</a>
Hochschule Weihenstephan-Triesdorf, Institut für Gartenbau	85350 Freising	<a href="https://www.hswt.de/forschung/forschungseinrichtungen/igb.html">https://www.hswt.de/forschung/forschungseinrichtungen/igb.html</a>
Wissenschaftszentrum Weihenstephan, Technische Universität München	Emil-Ramann-Strasse 2, 85354 Freising	<a href="http://www.pe.wzw.tum.de">http://www.pe.wzw.tum.de</a>
Landesbetrieb Landwirtschaft Hessen (LLH)	Kölnische Strasse 48 – 50, 34117 Kassel	<a href="https://www.llh.hessen.de/pflanze/gemuesebau-und-kraeuter/">https://www.llh.hessen.de/pflanze/gemuesebau-und-kraeuter/</a>
Staatliche Lehr- und Versuchsanstalt für Gartenbau (LVG) Heidelberg	Diebsweg 2, 69123 Heidelberg	<a href="http://www.lvg-heidelberg.de/pb/,Lde/Startseite">http://www.lvg-heidelberg.de/pb/,Lde/Startseite</a>
Landwirtschaftliche Technologiezentrum Augustenberg (LTZ)	Nesslerstr. 25, 76227 Karlsruhe	<a href="http://www.ltz-bw.de/pb/,Lde/Startseite">http://www.ltz-bw.de/pb/,Lde/Startseite</a>
Sächsisches Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie	Archivstrasse 1, 01097 Dresden	<a href="https://www.landwirtschaft.sachsen.de/landwirtschaft/6275.htm">https://www.landwirtschaft.sachsen.de/landwirtschaft/6275.htm</a>
Thünen-Institut	Bundesallee 50, 38116 Braunschweig	<a href="http://www.thuenen.de/de/bw/produktionssysteme/gartenbau/">http://www.thuenen.de/de/bw/produktionssysteme/gartenbau/</a>
Bayerische Landesanstalt für Weinbau und Gartenbau (LWG)	An der Steige 15, 97209 Veitshöchheim	<a href="http://www.lwg.bayern.de/index.php">http://www.lwg.bayern.de/index.php</a>
Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft (LfL)	Vöttinger Strasse 38, 85354 Freising	<a href="http://www.lfl.bayern.de/cms07/index.php">http://www.lfl.bayern.de/cms07/index.php</a>
Höhere Bundeslehr- und Forschungsanstalt für Gartenbau Schönbrunn (HBLFA)	Zinshof 7, A-3244 Ruprechtshofen	<a href="http://www.zinshof.at/">http://www.zinshof.at/</a>
Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft (KTBL)	Bartingstr. 49, 64289 Darmstadt	<a href="http://www.ktbl.de">www.ktbl.de</a>

Tabelle F: In die Literatursuche (Sept. bis Nov. 2017) einbezogene Forschungseinrichtungen des Garten- und Gemüsebaus auf universitärer und Landesebene (Deutschland, Österreich, Schweiz), Gemüsebauverbände (Deutschland, Schweiz) und öffentliche Ämter des Bundes und der Kantone der Schweiz

Leibniz-Institut für Gemüse- und Zierpflanzenbau Grossbeeren/Erfurt e.V. (IGZ)	Theodor-Echtermeyer-Weg 1, 14979 Grossbeeren	<a href="http://www.igzev.de/">http://www.igzev.de/</a>
Landwirtschaftskammer Nordrhein-Westfalen	Nevinghoff 40, 48147 Münster	<a href="http://www.landwirtschaftskammer.de/gartenbau">http://www.landwirtschaftskammer.de/gartenbau</a>
Bundesfachgruppe Gemüsebau	Claire-Waldoff-Strasse 7, 10117 Berlin	<a href="http://www.gemuesebau.org">http://www.gemuesebau.org</a>
Zentralverband Gartenbau e.V.	Godesberger Allee 142-148, 53175 Bonn	<a href="http://www.g-net.de/">http://www.g-net.de/</a>
Schweizer Bauernverband	Laurstrasse 10, 5201 Brugg	<a href="https://www.sbv-usp.ch/de">https://www.sbv-usp.ch/de</a>
Schweizerische Zentralstelle für Gemüsebau und Spezialkulturen (SZG)	Bern-Zürich-Strasse 18, 3425 Koppigen	<a href="http://www.szg.ch">http://www.szg.ch</a>
Gemüseproduzenten-Vereinigung der Kantone Bern und Freiburg (GVBF)	Herrenhalde 80, 3232 Ins	<a href="https://www.gemueseschweiz.ch">https://www.gemueseschweiz.ch</a>
Verband Schweizer Gemüseproduzenten (VSGP)	Belpstrasse 26, 3007 Bern	<a href="http://www.gemuese.ch">http://www.gemuese.ch</a>
Europäische Kommission, Eurostat	Luxemburg	<a href="http://ec.europa.eu/eurostat/web/agriculture/overview">http://ec.europa.eu/eurostat/web/agriculture/overview</a>
Bundesamt für Landwirtschaft (BLW)	3003 Bern	<a href="https://www.blw.admin.ch/blw/de/home.html">https://www.blw.admin.ch/blw/de/home.html</a>
Bundesamt für Statistik (BFS)	Espace de l'Europe 10, 2010 Neuchâtel	<a href="https://www.bfs.admin.ch/bfs/de/home.html">https://www.bfs.admin.ch/bfs/de/home.html</a>
Bundesamt für Meteorologie und Klimatologie MeteoSchweiz	OperationCenter 1, 8058 Zürich	<a href="http://www.meteoschweiz.admin.ch">http://www.meteoschweiz.admin.ch</a>
Bildungs- und Beratungszentrum (BBZ) Arenenberg, Kanton Thurgau	Arenenberg 1, 8268 Salenstein	<a href="https://arenenberg.tg.ch/">https://arenenberg.tg.ch/</a>
Amt für Umwelt, Kanton Solothurn	Werkhofstrasse 5, 4509 Solothurn	<a href="https://www.so.ch/verwaltung/bau-und-justizdepartement/amt-fuer-umwelt/landwirtschaft/">https://www.so.ch/verwaltung/bau-und-justizdepartement/amt-fuer-umwelt/landwirtschaft/</a>
Bundesamt für Umwelt (BAFU)	3003 Bern	<a href="https://www.bafu.admin.ch/bafu/de/home.html">https://www.bafu.admin.ch/bafu/de/home.html</a>

Tabelle G Suchbegriffskombinationen der Literatursuche via Google von Sept. bis Nov. 2017

Boolescher Operator <sup>1</sup>	UND	NICHT	ODER	Treffer
<b>Suchbegriffe</b>	raised bed, vegetable, nitrate, leaching			89200
	raised bed, vegetable, nitrogen, mineralization			14800
	nitrogen, balance, vegetable production, open field	tropical, tropics		119000
	seasonal effects, nitrate, leaching, vegetable production, open field	tropical, tropics, greenhouse		8710
	rainfall, nitrate, leaching, vegetable production, open field	tropical, tropics, greenhouse		16900
	irrigation, nitrate, leaching, vegetable production, open field	tropical, tropics, greenhouse		10700

<sup>1</sup>Boolesche Operatoren UND (Konjunktion), ODER (Disjunktion), NICHT (Negation) und XOR (ausschliessendes ODER) kombinieren Suchbegriffe in Suchanfragen

Tabelle H: Kulturspezifische Boden-Nitratstickstoffgehalte im Freilandgemüsebau nach der Ernte oder am Ende der Kulturfolge (Herbst) (Literaturübersicht)

Gemüseart/-gruppe, Kultur- oder Fruchtfolge (Jahr 1 // Jahr 2 // Jahr 3 // Jahr 4 // Jahr 5)	N-Düngung ( kg ha <sup>-1</sup> ) (Jahr 1 // Jahr 2 // Jahr 3 // Jahr 4 // Jahr 5)	Bodenschicht (cm)	NO <sub>3</sub> -N (kg N ha <sup>-1</sup> )	Bodenart <sup>§</sup>	Land	Referenz
Blumenkohl - - // - - // - - // - - // - -	447 - - // - - // - - // - - // - -	0-30	87 // // // //	div. Böden, k.A. zu Bodenart	Belgien	De Neve <i>et al.</i> (2003)
Blumenkohl - - // - - // - - // - - // - -	k.A. - - // - - // - - // - - // - -	0-90	92 // // // //	div. Böden, k.A. zu Bodenart	Deutschland	Finck (2016)
Blumenkohl - - // - - // - - // - - // - -	250 - - // - - // - - // - - // - -	0-60	117 // // // //	schluffiger Ton	Neuseeland	Francis <i>et al.</i> (2003)
Blumenkohl - - // - - // - - // - - // - -	250 - - // - - // - - // - - // - -	0-30	60, 61, 120 // // // //	sandiger Lehm	England	Hembry und Davies (1994)
Blumenkohl - - // - - // - - // - - // - -	200 - - // - - // - - // - - // - -	0-30	20, 34, 50, 76 // // // //	sandiger Lehm	England	Hembry und Davies (1994)
Blumenkohl - - // - - // - - // - - // - -	150 - - // - - // - - // - - // - -	0-30	12, 32, 32, 38 // // // //	sandiger Lehm	England	Hembry und Davies (1994)
Blumenkohl - - // - - // - - // - - // - -	100 - - // - - // - - // - - // - -	0-30	10, 20, 26, 62 // // // //	sandiger Lehm	England	Hembry und Davies (1994)
Blumenkohl - - // - - // - - // - - // - -	180-300 - - // - - // - - // - - // - // - -	0-90	60-210 // // // //	div. Böden, k.A. zu Bodenart	EU	Neeteson (1995)
Blumenkohl - - // - - // - - // - - // - -	190 - - // - - // - - // - - // - -	0-60	49 // // // //	Ton	Niederlande	ten Berge (2002)
Blumenkohl - - // Blumenkohl - - // - - // - - // - -	130, 290 - - // 130, 370 - - // - - // - - // - -	0-100	41, 93 // k.A. // // //	lehmiger Sand	Dänemark	Thorup-Kristensen und van den Boogaard (1998)
Blumenkohl - Blumenkohl - // Blumenkohl - Blumenkohl - // - Blumenkohl - // - - // - -	210 - 210 - // 250 - 250 - // - 250 - // - - // - -	0-100	67 // k.A. // k.A. // k.A. // k.A.	lehmiger Sand	Dänemark	Thorup-Kristensen und van den Boogaard (1998)
Blumenkohl - - // - - // - - // - - // - -	k.A. - - // - - // - - // - - // - -	0-90	80, 198, 564 // // // //	Sand- und Lössböden	Deutschland	Wehrmann und Scharpf (1989)

Tabelle H: Kulturspezifische Boden-Nitratstickstoffgehalte im Freilandgemüsebau nach der Ernte oder am Ende der Kulturfolge (Herbst) (Literaturübersicht)

Gemüseart/-gruppe, Kultur- oder Fruchtfolge (Jahr 1 // Jahr 2 // Jahr 3 // Jahr 4 // Jahr 5)	N-Düngung ( kg ha <sup>-1</sup> ) (Jahr 1 // Jahr 2 // Jahr 3 // Jahr 4 // Jahr 5)	Bodenschicht (cm)	NO <sub>3</sub> -N (kg N ha <sup>-1</sup> )	Bodenart <sup>§</sup>	Land	Referenz
Blumenkohl - - // Blumenkohl - - // - - // - - // - -	102, 142 - 73, 113 - // - - // - - // - - // - -	0–150	115, 126 // 144, 161 // // //	stark sandiger Lehm	Dänemark	Xie und Kristensen (2016)
Blumenkohl - Klee, Grass - // Blumenkohl - Klee, Grass - // - - // - - // - -	102, 142 - 73, 113 - // - - // - - // - - // - -	0–150	110, 112 // 118, 114 // // //	stark sandiger Lehm	Dänemark	Xie und Kristensen (2016)
Blumenkohl - Klee - // Blumenkohl - Klee - // - - // - - // - -	180 - - // 180 - - // - - // - - // - -	0–90	34 // 16 // // //	stark sandiger Lehm	Slowenien	Xie <i>et al.</i> (2016)
Blumenkohl - Klee - // Blumenkohl - Klee - // - - // - - // - -	200 - - // 200 - - // - - // - - // - -	0–60, 90	57 // 34 // // //	div. Böden, k.A. zu Bodenart	Deutschland	Xie <i>et al.</i> (2016)
Blumenkohl - Raigras, Klee - // Blumenkohl - Raigras, Klee - // - - // - - // - -	230 - - // 230 - - // - - // - - // - -	0–150	102 // 142 // // //	stark sandiger Lehm	Dänemark	Xie <i>et al.</i> (2016)
Paprika - Blumenkohl - // Krautstiel - - // - - // - - // - -	25, 185, 260, 329 - 9, 113, 165, 242 - // 14, 169, 200, 236 - - // - - // - - // - -	0–90	87, 142, 172, 227 // k.A. // // //	sandiger Lehm	Spanien	Doltra und Munoz (2010)
Brache - Blumenkohl - // Weizen - - // Weizen - - // Gerste - - // - Blumenkohl -	- 222 - // 150 - - // 175 - - // 110 - - // 353 - -	0–100	139 // 53 // 59 // 42 // 224	div. Böden, k.A. zu Bodenart	Dänemark	Huus-Bruun (1993)
Bohnen - - // - - // - - // - - // - -	k.A. - - // - - // - - // - - // - -	0–90	72 // // // //	div. Böden, k.A. zu Bodenart	Deutschland	Finck (2016)
Bohnen - - // - - // - - // - - // - -	0, 125 - - // - - // - - // - - // - -	0–60	54, 45 // // // //	Sand	Niederlande	ten Berge (2002)
Bohnen - - // - - // - - // - - // - -	k.A. - - // - - // - - // - - // - -	0–90	60 // // // //	Sand- und Lössböden	Deutschland	Wehrmann und Scharpf (1989)
Bohnen - Gerste - // - - // - - // - - // - -	0 - 90 - // - - // - - // - - // - -	0–90	67, 72 // 40, 44 // // //	lehmiger Sand	England	Mitchell <i>et al.</i> (2001)

Tabelle H: Kulturspezifische Boden-Nitratstickstoffgehalte im Freilandgemüsebau nach der Ernte oder am Ende der Kulturfolge (Herbst) (Literaturübersicht)

Gemüseart/-gruppe, Kultur- oder Fruchtfolge (Jahr 1 // Jahr 2 // Jahr 3 // Jahr 4 // Jahr 5)	N-Düngung ( kg ha <sup>-1</sup> ) (Jahr 1 // Jahr 2 // Jahr 3 // Jahr 4 // Jahr 5)	Bodenschicht (cm)	NO <sub>3</sub> -N (kg N ha <sup>-1</sup> )	Bodenart <sup>§</sup>	Land	Referenz
Bohnen - - // Weizen - - // - - // - - // - -	k.A. - - // - - // - - // - - // - -	0–60	125 // // // //	schluffiger Ton	Neuseeland	Francis <i>et al.</i> (1994)
Brokkoli - - // - - // - - // - - // - -	0, 105, 135, 165, 195, 225 - - // - - // - - // - - // - -	0–90	9,10; 11,12; 5,16; 22,20; 16,27; 13,29 // // // //	toniger Lehm	Kanada	Mellgren (2008)
Brokkoli - - // - - // - - // - - // - -	265 - - // - - // - - // - - // - -	0–60	54 // // // //	Sand	Niederlande	ten Berge (2002)
Chinakohl - - // - - // - - // - - - // - -	80, 110, 110 - - // - - // - - // - - // - -	0–60	41, 61, 51 // // // //	Sand	Niederlande	ten Berge (2002)
Gerste+Untersaat - - // Chinakohl - - // - - // - - // - -	- - // 100, 100 - - // - - // - - // - -	0–250	// 44, 40 // // //	stark sandiger Lehm	Dänemark	Kristensen und Thorup- Kristensen (2007)
Erbsen - - // - - // - - // - - // - -	20 - - // - - // - - // - - // - -	0–60	36 // // // //	Sand	Niederlande	ten Berge (2002)
Erbsen - - // - - // - - // - - // - -	k.A. - - // - - // - - // - - // - -	0–90	50 // // // //	Sand- und Lössböden	Deutschland	Wehrmann und Scharpf (1989)
Erbsen - Gerste - // - - // - - // - - // - -	0 - 90 - // - - // - - // - - // - -	0–90	84, 90 // 65, 40 // // //	lehmiger Sand	England	Mitchell <i>et al.</i> (2001)
Erbsen - - // Weizen - - // - - // - - // - -	k.A. - - // - - // - - // - - // - -	0–60	123 // // // //	schluffiger Ton	Neuseeland	Francis <i>et al.</i> (1994)
Weizen - Brache - Erbsen // Weizen - Brache - Erbsen // Weizen - Brache - Erbsen // - - // - -	0 - - // 0 - - // 0 - - // - - // - -	0–30	15-27 // 22-36 // 35-58 // //	sandiger Ton	England	Knott (1996)
Nüssllisalat - - // - - // - - // - - - // - -	k.A. - - // - - // - - // - - // - -	0–90	94 // // // //	div. Böden, k.A. zu Bodenart	Deutschland	Finck (2016)
Gerste+Untersaat - - // Kürbis - - // - - // - - // - -	- - // 100, 100 - - // - - // - - // - -	0–250	// 53, 35 // // //	stark sandiger Lehm	Dänemark	Kristensen und Thorup- Kristensen (2007)

Tabelle H: Kulturspezifische Boden-Nitratstickstoffgehalte im Freilandgemüsebau nach der Ernte oder am Ende der Kulturfolge (Herbst) (Literaturübersicht)

Gemüseart/-gruppe, Kultur- oder Fruchtfolge (Jahr 1 // Jahr 2 // Jahr 3 // Jahr 4 // Jahr 5)	N-Düngung ( kg ha <sup>-1</sup> ) (Jahr 1 // Jahr 2 // Jahr 3 // Jahr 4 // Jahr 5)	Bodenschicht (cm)	NO <sub>3</sub> -N (kg N ha <sup>-1</sup> )	Bodenart <sup>§</sup>	Land	Referenz
Kabis - - // - - // - - // - - // - -	485 - - // - - // - - // - - // - -	0–30	5 // // // //	div. Böden, k.A. zu Bodenart	Belgien	De Neve <i>et al.</i> (2003)
Kabis - - // - - // - - // - - // - -	k.A. - - // - - // - - // - - // - -	0–90	55 // // // //	div. Böden, k.A. zu Bodenart	Deutschland	Finck (2016)
Kabis - - // - - // - - // - - // - -	250 - - // - - // - - // - - // - -	0–60	93 // // // //	schluffiger Ton	Neuseeland	Francis <i>et al.</i> (2003)
Kabis - - // - - // - - // - - // - -	100 - - // - - // - - // - - // - -	0–250	7.1 // // // //	sandiger Lehm	Dänemark	Kristensen und Thorup-Kristensen (2004)
Kabis - - // - - // - - // - - // - -	300 - - // - - // - - // - - // - -	0–90	50 // // // //	div. Böden, k.A. zu Bodenart	EU	Neeteson (1995)
Kabis - - // - - // - - // - - // - -	160, 240, 320, 400 - - // - - // - -	0–100	4, 7, 11, 42 // // // //	sandiger Lehm	Dänemark	Thorup-Kristensen und Sorensen (1999)
Kabis - - // - - // - - // - - // - -	k.A. - - // - - // - - // - - // - -	0–90	71 // // // //	Sand- und Lössböden	Deutschland	Wehrmann und Scharpf (1989)
Brache - - // Kabis - - // - - // - - // - -	- - // 100 - - // - - // - - // - -	0–250	// 42 // // //	stark sandiger Lehm	Dänemark	Kristensen und Thorup-Kristensen (2007)
Brache - - // Kabis - - // Gerste - Brache - // - - // - -	- - // 100 - - // - - // - - // - -	0–250	190 // 43 // // //	stark sandiger Lehm	Dänemark	Thorup-Kristensen (2006b)
Kabis - Gerste - // - - // - - // - - // - -	250 - 90 - // - - // - - // - - // - -	0–90	207, 189 // 51, 49 // // //	lehmiger Sand	England	Mitchell <i>et al.</i> (2001)
Gerste - Bodendecker-Mix - // Kabis - - // Gerste - Bodendecker-Mix - // Kabis - - // - -	k.A. - 0 - // 0 - - k.A. // 0 - - 0 // - - // - -	0–150	126 // 49 // k.A. // k.A. //	stark sandiger Lehm	Dänemark	Thorup-Kristensen (2006a)
Ölrettich - - // Kabis - - // - - // - - // - -	- - // 100 - - // - - // - - // - -	0–250	// 26 // // //	stark sandiger Lehm	Dänemark	Kristensen und Thorup-Kristensen (2007)

Tabelle H: Kulturspezifische Boden-Nitratstickstoffgehalte im Freilandgemüsebau nach der Ernte oder am Ende der Kulturfolge (Herbst) (Literaturübersicht)

Gemüseart/-gruppe, Kultur- oder Fruchtfolge (Jahr 1 // Jahr 2 // Jahr 3 // Jahr 4 // Jahr 5)	N-Düngung ( kg ha <sup>-1</sup> ) (Jahr 1 // Jahr 2 // Jahr 3 // Jahr 4 // Jahr 5)	Bodenschicht (cm)	NO <sub>3</sub> -N (kg N ha <sup>-1</sup> )	Bodenart <sup>§</sup>	Land	Referenz
Rettich - - // Kabis - - // Gerste - Brache - // - - // - -	- - // 100 - - // - - // - - // - -	0–250	182 // 27 // // //	stark sandiger Lehm	Dänemark	Thorup-Kristensen (2006b)
Raigras - - // Kabis - - // - - // - - // - -	- - // 100 - - // - - // - - // - -	0–250	// 35 // // //	stark sandiger Lehm	Dänemark	Kristensen und Thorup-Kristensen (2007)
Raigras - - // Kabis - - // Gerste - Brache - // - - // - -	- - // 100 - - // - - // - - // - -	0–250	171 // 36 // // //	stark sandiger Lehm	Dänemark	Thorup-Kristensen (2006b)
Karotten - - // - - // - - // - - // - -	k.A. - - // - - // - - // - - // - -	0–90	28, 74 // // // //	div. Böden, k.A. zu Bodenart	Deutschland	Finck (2016)
Karotten - - // - - // - - // - - // - -	0 - - // - - // - - // - - // - -	0–250	30.9 // // // //	sandiger Lehm	Dänemark	Kristensen und Thorup-Kristensen (2004)
Karotten - - // - - // - - // - - // - -	45 - - // - - // - - // - - // - -	0–60	10 // // // //	Sand	Niederlande	ten Berge (2002)
Karotten - - // - - // - - // - - // - -	60 - - // - - // - - // - - // - -	0–60	24 // // // //	versch.	Niederlande	ten Berge (2002)
Karotten - - // - - // - - // - - // - -	60, 100, 140, 180 - - // - - // - - // - - // - -	0–100	27, 30, 42, 67 // // // //	sandiger Lehm	Dänemark	Thorup-Kristensen und Sorensen (1999)
Karotten - - // - - // - - // - - // - -	k.A. - - // - - // - - // - - // - -	0–90	91, 139 // // // //	Sand- und Lössböden	Deutschland	Wehrmann und Scharpf (1989)
Gerste - Bodendecker-Mix - // Karotten - - // Gerste - Bodendecker-Mix - // Karotten - - // - -	k.A. - 0 - // 0 - k.A. // 0 - - 0 // - - // - -	0–150	126 // 38 // k.A. // k.A. //	stark sandiger Lehm	Dänemark	Thorup-Kristensen (2006a)
Kohlrabi - Lauch - // - - // - - // - - // - -	k.A. - - // - - // - - // - - // - -	0–90	248 // // // //	Sand- und Lössböden	Deutschland	Wehrmann und Scharpf (1989)
Kürbis - - // - - // - - // - - // - -	k.A. - - // - - // - - // - - // - -	0–90	59 // // // //	div. Böden, k.A. zu Bodenart	Deutschland	Finck (2016)

Tabelle H: Kulturspezifische Boden-Nitratstickstoffgehalte im Freilandgemüsebau nach der Ernte oder am Ende der Kulturfolge (Herbst) (Literaturübersicht)

Gemüseart/-gruppe, Kultur- oder Fruchtfolge (Jahr 1 // Jahr 2 // Jahr 3 // Jahr 4 // Jahr 5)	N-Düngung ( kg ha <sup>-1</sup> ) (Jahr 1 // Jahr 2 // Jahr 3 // Jahr 4 // Jahr 5)	Bodenschicht (cm)	NO <sub>3</sub> -N (kg N ha <sup>-1</sup> )	Bodenart <sup>§</sup>	Land	Referenz
Lauch - - // - - // - - // - - - -	k.A. - - // - - // - - // - - - -	0–90	82 // // // //	div. Böden, k.A. zu Bodenart	Deutschland	Finck (2016)
Lauch - - // - - // - - // - - - -	100-150 - - // - - // - - // - - - // - -	0–90	125-200 // // // //	div. Böden, k.A. zu Bodenart	EU	Neeteson (1995)
Lauch - - // - - // - - // - - - -	235 - - // - - // - - // - - - -	0–60	24 // // // //	Sand	Niederlande	ten Berge (2002)
Lauch - - // - - // - - // - - - -	100, 160, 220, 280 - - // - - // - - // - - // - -	0–100	50, 63, 87, 122 // // // //	sandiger Lehm	Dänemark	Thorup-Kristensen und Sorensen (1999)
Lauch - - // - - // - - // - - - -	70, 70, 70, 123, 123, 123 - - // - - // - - // - - // - -	0–250	143, 140, 65, 179, 175, 227 // // // //	stark sandiger Lehm	Dänemark	Xie und Kristensen (2017)
Lauch - Klee - // Lauch - Klee - // - - // - - // - -	126 - - // 126 - - // - - // - - // - -	0–90	51 // 19 // // //	stark sandiger Lehm	Slowenien	Xie <i>et al.</i> (2016)
Lauch - Klee - // Lauch - Klee - // - - // - - // - -	200 - - // 200 - - // - - // - - // - -	0–90	44 // 52 // // //	div. Böden, k.A. zu Bodenart	Deutschland	Xie <i>et al.</i> (2016)
Lauch - Raigras, Klee - // Lauch - Raigras, Klee - // - - // - - // - -	200 - - // 200 - - // - - // - - // - -	0–250	116 // 171 // // //	stark sandiger Lehm	Dänemark	Xie <i>et al.</i> (2016)
Brache - - // Lauch - - // - - // - - // - -	- - // 100 - - // - - // - - // - - -	0–250	// 176 // // //	stark sandiger Lehm	Dänemark	Kristensen und Thorup- Kristensen (2007)
Brache - - // Lauch - - // Gerste - Brache - // - - // - -	- - // 100 - - // - - // - - // - - -	0–250	190 // 176 // // //	stark sandiger Lehm	Dänemark	Thorup-Kristensen (2006b)
Kohlrabi - Lauch - // - - // - - // - - // - -	k.A. - - // - - // - - // - - - -	0–90	248 // // // //	Sand- und Lössböden	Deutschland	Wehrmann und Scharpf (1989)
Lupine - Lauch - // - - // - - // - - // - -	k.A. - - // - - // - - // - - - -	0–90	197 // // // //	Sand- und Lössböden	Deutschland	Wehrmann und Scharpf (1989)

Tabelle H: Kulturspezifische Boden-Nitratstickstoffgehalte im Freilandgemüsebau nach der Ernte oder am Ende der Kulturfolge (Herbst) (Literaturübersicht)

Gemüseart/-gruppe, Kultur- oder Fruchtfolge (Jahr 1 // Jahr 2 // Jahr 3 // Jahr 4 // Jahr 5)	N-Düngung ( kg ha <sup>-1</sup> ) (Jahr 1 // Jahr 2 // Jahr 3 // Jahr 4 // Jahr 5)	Bodenschicht (cm)	NO <sub>3</sub> -N (kg N ha <sup>-1</sup> )	Bodenart <sup>§</sup>	Land	Referenz
Ölrettich - - // Lauch - - // - - // - - // - -	- - // 100 - - // - - // - - // - -	0–250	// 176 // // //	stark sandiger Lehm	Dänemark	Kristensen und Thorup- Kristensen (2007)
Rettich - - // Lauch - - // Gerste - Brache - // - - // - -	- - // 100 - - // - - // - - // - -	0–250	182 // 176 // // //	stark sandiger Lehm	Dänemark	Thorup-Kristensen (2006b)
Raigras - - // Lauch - - // - - // - - // - -	- - // 100 - - // - - // - - // - -	0–250	// 153 // // //	stark sandiger Lehm	Dänemark	Kristensen und Thorup- Kristensen (2007)
Raigras - - // Lauch - - // Gerste - Brache - // - - // - -	- - // 100 - - // - - // - - // - -	0–250	171 // 153 // // //	stark sandiger Lehm	Dänemark	Thorup-Kristensen (2006b)
Petersilie - - // - - // - - // - - - // - -	k.A. - - // - - // - - // - - // - -	0–90	23 // // // //	div. Böden, k.A. zu Bodenart	Deutschland	Finck (2016)
Randen - - // - - // - - // - - // - -	k.A. - - // - - // - - // - - // - -	0–90	48 // // // //	div. Böden, k.A. zu Bodenart	Deutschland	Finck (2016)
Randen - - // - - // - - // - - // - -	k.A. - - // - - // - - // - - // - -	0–90	161 // // // //	Sand- und Lössböden	Deutschland	Wehrmann und Scharpf (1989)
Brache - - // Randen - - // - - // - - // - -	- - // 100 - - // - - // - - // - -	0–250	// 153 // // //	stark sandiger Lehm	Dänemark	Kristensen und Thorup- Kristensen (2007)
Brache - - // Randen - - // Gerste - Brache - // - - // - -	- - // 100 - - // - - // - - // - -	0–250	190 // 153 // // //	stark sandiger Lehm	Dänemark	Thorup-Kristensen (2006b)
Raigras - - // Randen - - // - - - // - - // - -	- - // 100 - - // - - // - - // - -	0–250	// 80 // // //	stark sandiger Lehm	Dänemark	Kristensen und Thorup- Kristensen (2007)
Raigras - - // Randen - - // Gerste - Brache - // - - // - -	- - // 100 - - // - - // - - // - -	0–250	171 // 80 // // //	stark sandiger Lehm	Dänemark	Thorup-Kristensen (2006b)
Rhabarber - - // - - // - - // - - - // - -	k.A. - - // - - // - - // - - // - -	0–90	69 // // // //	div. Böden, k.A. zu Bodenart	Deutschland	Finck (2016)

Tabelle H: Kulturspezifische Boden-Nitratstickstoffgehalte im Freilandgemüsebau nach der Ernte oder am Ende der Kulturfolge (Herbst) (Literaturübersicht)

Gemüseart/-gruppe, Kultur- oder Fruchtfolge (Jahr 1 // Jahr 2 // Jahr 3 // Jahr 4 // Jahr 5)	N-Düngung ( kg ha <sup>-1</sup> ) (Jahr 1 // Jahr 2 // Jahr 3 // Jahr 4 // Jahr 5)	Bodenschicht (cm)	NO <sub>3</sub> -N (kg N ha <sup>-1</sup> )	Bodenart <sup>§</sup>	Land	Referenz
Rosenkohl - - // - - // - - // - - // - -	k.A. - - // - - // - - // - - // - -	0–90	28 // // // //	div. Böden, k.A. zu Bodenart	Deutschland	Finck (2016)
Rosenkohl - - // - - // - - // - - // - -	120-240 - - // - - // - - // - - // - -	0–90	20-45 // // // //	div. Böden, k.A. zu Bodenart	EU	Neeteson (1995)
Rosenkohl - - // - - // - - // - - // - -	205 - - // - - // - - // - - // - -	0–60	7 // // // //	Ton	Niederlande	ten Berge (2002)
Rosenkohl - Raigras, Phacelia, Raps, Lupine - // Brokkoli - - // - - // - - // - -	200 - 50 - // 50 - - // - - // - - // - -	75–100	35, 9, 4, 38 // // // //	lehmgiger Sand	Dänemark	Thorup-Kristensen (1993)
Rosenkohl - Rettich, Roggen, Gerste, Brache - // - - // - - // - - // - -	200 - 50 - // - - // - - // - - // - -	75–100	1, 15, 18, 92 // // // //	lehmgiger Sand	Dänemark	Thorup-Kristensen (1993)
Rosenkohl - - // - - // - - // - - // - -	k.A. - - // - - // - - // - - // - -	0–90	20 // // // //	Sand- und Lössböden	Deutschland	Wehrmann und Scharpf (1989)
Rucola - - // - - // - - // - - // - -	180, 250 - - // - - // - - // - - // - -	0–250	109, 139 // // // //	Sand	Dänemark	Kristensen und Stavridou (2017)
Rucola - Rucola - // - - // - - // - - // - -	180 - 100 - // - - // - - // - - // - -	0–250	101, 101 - 219, 229 // // // //	Sand	Dänemark	Kristensen und Stavridou (2017)
Rucola - Rucola - // - - // - - // - - // - -	250 - 150 - // - - // - - // - - // - -	0–250	130, 130 - 219, 229 // // // //	Sand	Dänemark	Kristensen und Stavridou (2017)
Salat ( <i>Lactuca sativa</i> ) - - // - - // - - // - - // - -	k.A. - - // - - // - - // - - // - -	0–90	33, 40, 121 // // // //	div. Böden, k.A. zu Bodenart	Deutschland	Finck (2016)
Salat ( <i>Lactuca sativa</i> ) - - // - - // - - // - - // - -	105, 155, 105 - - // - - // - - // - - // - -	0–60	109, 136, 158 // // // //	Sand	Niederlande	ten Berge (2002)
Gerste - Bodendecker-Mix - // Salat ( <i>Lactuca sativa</i> ) - - //	k.A. - 0 - // 0 - - k.A. // 0 - - 0 // - - // - -	0–150	126 // 80 // k.A. // k.A. //	stark sandiger Lehm	Dänemark	Thorup-Kristensen (2006a)

Tabelle H: Kulturspezifische Boden-Nitratstickstoffgehalte im Freilandgemüsebau nach der Ernte oder am Ende der Kulturfolge (Herbst) (Literaturübersicht)

Gemüseart/-gruppe, Kultur- oder Fruchtfolge (Jahr 1 // Jahr 2 // Jahr 3 // Jahr 4 // Jahr 5)	N-Düngung ( kg ha <sup>-1</sup> ) (Jahr 1 // Jahr 2 // Jahr 3 // Jahr 4 // Jahr 5)	Bodenschicht (cm)	NO <sub>3</sub> -N (kg N ha <sup>-1</sup> )	Bodenart <sup>§</sup>	Land	Referenz
Gerste - Bodendecker-Mix - // Salat ( <i>Lactuca sativa</i> ) - - // - -						
Sellerie - - // - - // - - // - - // - -	k.A. - - // - - // - - // - - // - -	0-90	49, 94 // // // //	div. Böden, k.A. zu Bodenart	Deutschland	Finck (2016)
Sellerie - - // Sellerie - - // - - // - - // - -	319 - - // 435 - - // - - // - - // - -	0-100	246 // 414 // // //	div. Böden, k.A. zu Bodenart	Dänemark	Huus-Bruun (1993)
Sellerie - - // - - // - - // - - // - -	50-150 - - // - - // - - // - - // - -	0-90	50-225 // // // //	div. Böden, k.A. zu Bodenart	EU	Neeteson (1995)
Sellerie - - // - - // - - // - - // - -	185 - - // - - // - - // - - // - -	0-60	39 // // // //	Ton	Niederlande	ten Berge (2002)
Sellerie - - // - - // - - // - - // - -	k.A. - - // - - // - - // - - // - -	0-90	50, 156, 191 // // // //	Sand- und Lössböden	Deutschland	Wehrmann und Scharpf (1989)
Spargel - - // - - // - - // - - // - -	k.A. - - // - - // - - // - - // - -	0-90	58, 84, 103 // // // //	div. Böden, k.A. zu Bodenart	Deutschland	Finck (2016)
Spargel - - // Spargel - - // Spargel - - // Spargel - - // Spargel - -	100 - - // - - // - - // - - // - -	0-90	24 // 13 // 14 // 13 // 60	Sand (0.3 % C <sub>org</sub> )	Deutschland	Paschold <i>et al.</i> (1999)
Spargel - - // Spargel - - // Spargel - - // Spargel - - // Spargel - -	100 - - // - - // - - // - - // - -	0-90	425 // 120 // 285 // 40 // 145	Sand (1.4 % C <sub>org</sub> )	Deutschland	Paschold <i>et al.</i> (1999)
Spargel - Ökretich - // Spargel - Ökretich - // Spargel - Ökretich - // Spargel - Ökretich - // Spargel - Ökretich -	100 - - // - - // - - // - - // - -	0-90	12 // 14 // 12 // 12 // 30	Sand (0.3 % C <sub>org</sub> )	Deutschland	Paschold <i>et al.</i> (1999)
Spargel - Ökretich - // Spargel - Ökretich - // Spargel - Ökretich - // Spargel - Ökretich - // Spargel - Ökretich -	100 - - // - - // - - // - - // - -	0-90	270 // 80 // 185 // 24 // 70	Sand (1.4 % C <sub>org</sub> )	Deutschland	Paschold <i>et al.</i> (1999)

Tabelle H: Kulturspezifische Boden-Nitratstickstoffgehalte im Freilandgemüsebau nach der Ernte oder am Ende der Kulturfolge (Herbst) (Literaturübersicht)

Gemüseart/-gruppe, Kultur- oder Fruchtfolge (Jahr 1 // Jahr 2 // Jahr 3 // Jahr 4 // Jahr 5)	N-Düngung ( kg ha <sup>-1</sup> ) (Jahr 1 // Jahr 2 // Jahr 3 // Jahr 4 // Jahr 5)	Bodenschicht (cm)	NO <sub>3</sub> -N (kg N ha <sup>-1</sup> )	Bodenart <sup>§</sup>	Land	Referenz
Spargel - - // - - // - - // - - // - -	k.A. - - // - - // - - // - - // - -	0–90	66 // // // //	div. Böden, k.A. zu Bodenart	Deutschland	ZVG (2003)
Spinat - - // - - // - - // - - // - -	k.A. - - // - - // - - // - - // - -	0–90	122 // // // //	div. Böden, k.A. zu Bodenart	Deutschland	Finck (2016)
Spinat - - // - - // - - // - - // - -	124 - - // - - // - - // - - // - -	0–60	151, 152, 193, 215 // // // //	schluffiger Ton	Neuseeland	Francis <i>et al.</i> (2003)
Spinat - - // - - // - - // - - // - -	215-290 - - // - - // - - // - - // - // - -	0–90	160-220 // // // //	div. Böden, k.A. zu Bodenart	EU	Neeteson (1995)
Spinat - - // - - // - - // - - // - -	150, 255, 180, 180 - - // - - // // - - // - - // - -	0–60	147, 107, 98, 122 // // // //	Ton	Niederlande	ten Berge (2002)
Spinat - - // - - // - - // - - // - -	k.A. - - // - - // - - // - - // - -	0–90	130 // // // //	Sand- und Lössböden	Deutschland	Wehrmann und Scharpf (1989)
Zuckermais - - // - - // - - // - - // - - // - -	100 - - // - - // - - // - - // - -	0–250	96 // // // //	sandiger Lehm	Dänemark	Kristensen und Thorup- Kristensen (2004)
Zwiebeln - - // - - // - - // - - // - // - -	k.A. - - // - - // - - // - - // - -	0–90	37, 57 // // // //	div. Böden, k.A. zu Bodenart	Deutschland	Finck (2016)
Zwiebeln - - // - - // - - // - - // - // - -	120 - - // - - // - - // - - // - -	0–90	75 // // // //	div. Böden, k.A. zu Bodenart	EU	Neeteson (1995)
Gerste - Bodendecker-Mix - // Zwiebeln - - // Gerste - Bodendecker-Mix - // Zwiebeln - - // - -	k.A. - 0 - // 0 - - k.A. // 0 - - 0 // - - // - -	0–150	126 // 86 // k.A. // k.A. //	stark sandiger Lehm	Dänemark	Thorup-Kristensen (2006a)

<sup>§</sup>Bodentextur der jeweils obersten angegebenen Bodenschicht; k.A. = keine Angabe

Tabelle I: Kumulierte Nitratfrachten im Freilandgemüsebau ermittelt mit der Saugkerzen-Methode (Literaturübersicht)

Kultur-/Fruchtfolge <sup>†</sup>	Nitratfracht kg N ha <sup>-1</sup>	Messzeitraum	Messtiefe cm	Bodenart <sup>§</sup>	Land	Referenz
Gerste - Sellerie - Weizen // Weizen - Blumenkohl - //	4	Ganzes Jahr (1.11.-31.10.)	105	sandig schluffiger Lehm	Deutschland	Armbruster <i>et al.</i> (2008)
Weizen - Salat - Gerste // Gerste - Sellerie - Weizen //	11	Ganzes Jahr (1.11.-31.10.)	105	sandig schluffiger Lehm	Deutschland	Armbruster <i>et al.</i> (2008)
Roggen - Rüben - //	55	Ganzes Jahr (01.04.-31.03.)	180	Sand	Deutschland	Sunkel (1979)
Kabis - - //	106	Ganzes Jahr (14.06.-14.03.)	60	sandiger Lehm	Schweiz	Gysi (1994)
Weizen - Salat - Gerste // Gerste - Sellerie - Weizen //	106	Ganzes Jahr (1.11.-31.10.)	105	Sand	Deutschland	Armbruster <i>et al.</i> (2008)
Gerste - Sellerie - Weizen // Weizen - Blumenkohl - //	111	Ganzes Jahr (1.11.-31.10.)	105	Sand	Deutschland	Armbruster <i>et al.</i> (2008)
Salat - Salat - // Sellerie - Sellerie - //	118–495	Ganzes Jahr (1.11.-31.10.)	105	Sand	Deutschland	Armbruster <i>et al.</i> (2008)
Spinat - Spinat - Spinat //	120	Ganzes Jahr (01.04.-31.03.)	180	Sand	Deutschland	Sunkel (1979)
Salat - Kabis - //	127	Ganzes Jahr (27.04.-31.03.)	60	sandiger Lehm	Schweiz	Gysi (1990)
Salat - Salat - // Sellerie - Sellerie - //	145–169	Ganzes Jahr (1.11.-31.10.)	105	sandig schluffiger Lehm	Deutschland	Armbruster <i>et al.</i> (2008)
Sellerie - Sellerie - // Blumenkohl - Blumenkohl - //	148–346	Ganzes Jahr (1.11.-31.10.)	105	Sand	Deutschland	Armbruster <i>et al.</i> (2008)
Federkohl - - //	150	Ganzes Jahr (01.04.-31.03.)	180	Sand	Deutschland	Sunkel (1979)
Sellerie - Sellerie - // Blumenkohl - Blumenkohl - //	167–547	Ganzes Jahr (1.11.-31.10.)	105	sandig schluffiger Lehm	Deutschland	Armbruster <i>et al.</i> (2008)
3 x Salat ( <i>Lactuca sativa</i> , <i>Cichorium</i> ) //	216	Ganzes Jahr (01.04.-31.03.)	90	sandiger Lehm	Frankreich	Bruckler <i>et al.</i> (1997)
Roggen - Spinat - //	260	Ganzes Jahr (01.04.-31.03.)	180	Sand	Deutschland	Sunkel (1979)
Kabis - - //	280	Ganzes Jahr (01.04.-31.03.)	180	Sand	Deutschland	Sunkel (1979)
Roggen - Spinat - //	340	Ganzes Jahr (01.04.-31.03.)	180	Sand	Deutschland	Sunkel (1979)
Spinat - Spinat - //	350	Ganzes Jahr (01.04.-31.03.)	180	Sand	Deutschland	Sunkel (1979)
Spargel - - //	626	Ganzes Jahr (01.01.-31.12.)	90	Sand, kiesiger Sand	Deutschland	Simon <i>et al.</i> (1988)
Erbsen - Gerste - //	33–38	Winterhalbjahr (16.11.-30.03.)	90	lehmgiger Sand	England	Mitchell <i>et al.</i> (2001)
Spinat - - //	80–292	Winterhalbjahr (01.05.-30.09.)	60	toniger Lehm	Neuseeland	Williams <i>et al.</i> (2003)
Salat - Salat - //	138–253	Winterhalbjahr (26.10.-29.03.)	55	sandiger Lehm, lehmgiger Sand	England	Vinten <i>et al.</i> (1998)
Kabis - Gerste - //	145–150	Winterhalbjahr (16.11.-30.03.)	90	lehmgiger Sand	England	Mitchell <i>et al.</i> (2001)

<sup>§</sup>Bodentextur der jeweils obersten angegebenen Bodenschicht

<sup>†</sup>Bei mehrjährige Fruchtfolgen erfolgte die Zuordnung der Gemüseart bzw. den Gemüsearten in einer Kulturfolge entsprechend dem Messzeitraum (Winterhalbjahr oder ganzjährig)

Tabelle J: Kumulierte Nitratfrachten im Freilandgemüsebau ermittelt mit der Lysimeter-Methode (Literaturübersicht)

Kultur-/Fruchtfolge <sup>†</sup>	Nitratfracht kg N ha <sup>-1</sup>	Messzeitraum	Messtiefe cm	Lysimeter-Typ	Düngung kg N ha <sup>-1</sup>	Bodenart <sup>§</sup>	Land	Referenz
Salat - Salat - Salat - Winter Weizen // Winter Weizen -	18–117	Ganzes Jahr (01.11.–31.10.)	120	Lysimeter (Sickerwasser- sammler, Ø 0.58 m)	k.A.	stark sandiger Lehm	Österreich	Liebhard <i>et al.</i> (2003)
Bohnen - - // Gurken - - // Kabis - - // Raps - - // Zwiebeln - - // Blumenkohl - - // Kabis - - // Pfefferminze - - // Pfefferminze - - // Blumenkohl - - //	27 (10-Jahres- durchschnitt)	Ganzes Jahr (01.11.–31.10.)	230	Feld-Lysimeter (monolithisch befüllt, wägbar)	151	schluffiger Lehm	Deutschland	Knoblauch (2013)
Kartoffeln - Blumenkohl - //	28–143	Ganzes Jahr (01.03.–28.02.)	200	Lysimeter (Ø 2.5 m)	150	lehmiger Schluff	Frankreich	Akkal-Corfini <i>et al.</i> (2010)
Grünroggen // Sellerie - -	32	Ganzes Jahr (01.11.–31.10.)	120	Lysimeter (Sickerwasser- sammler, Ø 0.58 m)	154	stark sandiger Lehm	Österreich	Liebhard <i>et al.</i> (2003)
	63				38			
	65				112			
	136				57			
Zwiebeln - - //	64–139	Ganzes Jahr (01.03.–28.02.)	k.A.	Lysimeter (V = 420 L, wägbar)	k.A.	sandiger Lehm	Deutschland	Schmidt <i>et al.</i> (2017)
Salat - Salat - Salat // Salat - Salat - Salat - Phacelia //	94–250	Ganzes Jahr (01.11.–31.10.)	120	Lysimeter (Sickerwasser- sammler, Ø 0.58 m)	k.A.	stark sandiger Lehm	Österreich	Liebhard <i>et al.</i> (2003)
Phacelia // Salat - Salat - Salat	95	Ganzes Jahr (01.11.–31.10.)	120	Lysimeter (Sickerwasser- sammler, Ø 0.58 m)	195	stark sandiger Lehm	Österreich	Liebhard <i>et al.</i> (2003)
	126				286			
Grünroggen // Salat - Salat - Salat	107	Ganzes Jahr (01.11.–31.10.)	120	Lysimeter (Sickerwasser- sammler, Ø 0.58 m)	196	stark sandiger Lehm	Österreich	Liebhard <i>et al.</i> (2003)
	120				281			
Grünroggen // Blumenkohl - Grünroggen	108	Ganzes Jahr (01.11.–31.10.)	120	Lysimeter (Sickerwasser- sammler, Ø 0.58 m)	148	stark sandiger Lehm	Österreich	Liebhard <i>et al.</i> (2003)
	431				194			
Blumenkohl - Phacelia //	215	Ganzes Jahr (01.11.–31.10.)	120	Lysimeter (Sickerwasser- sammler, Ø 0.58 m)	255	stark sandiger Lehm	Österreich	Liebhard <i>et al.</i> (2003)
	234				241			
Salat - Salat - Salat // Salat - Salat - Salat //	242–500	Ganzes Jahr (01.11.–31.10.)	120	Lysimeter (Sickerwasser- sammler, Ø 0.58 m)	k.A.	stark sandiger Lehm	Österreich	Liebhard <i>et al.</i> (2003)

Tabelle J: Kumulierte Nitratfrachten im Freilandgemüsebau ermittelt mit der Lysimeter-Methode (Literaturübersicht)

Kultur-/Fruchtfolge <sup>†</sup>	Nitratfracht kg N ha <sup>-1</sup>	Messzeitraum	Messtiefe cm	Lysimeter-Typ	Düngung kg N ha <sup>-1</sup>	Bodenart <sup>§</sup>	Land	Referenz
Salat - Salat - Salat // Salat - Salat - Salat - Grünroggen //	276–400	Ganzes Jahr (01.11.–31.10.)	120	Lysimeter (Sickerwasser- sammler, Ø 0.58 m)	k.A.	stark sandiger Lehm	Österreich	Liebhard <i>et al.</i> (2003)
Zuckermais - Wicke/Triticale - //	6	Winterhalbjahr (01.11.–01.05.)	120	Dochtlysimeter (Brandi-Dohrn <i>et al.</i> 1996)	0	sandiger Lehm	USA	Feaga <i>et al.</i> (2010)
	8				56			
	11				224			
Zuckermais - Roggen - // - -	7–26	Winterhalbjahr (01.11.–01.05.)	120	Dochtlysimeter (Brandi-Dohrn <i>et al.</i> 1996)	0	sandiger Lehm	USA	Feaga <i>et al.</i> (2010)
	7–56				56			
	21–89				224			
Brokkoli - Roggen/Triticale //	9–19	Winterhalbjahr (01.11.–01.05.)	120	Dochtlysimeter (Brandi-Dohrn <i>et al.</i> 1996)	0	sandiger Lehm	USA	Feaga <i>et al.</i> (2010)
	13–46				140			
	25–48				280			
Zuckermais - Brache - //	9–30	Winterhalbjahr (01.11.–01.05.)	120	Dochtlysimeter (Brandi-Dohrn <i>et al.</i> 1996)	0	sandiger Lehm	USA	Feaga <i>et al.</i> (2010)
	11–66				56			
	38–129				224			
Brokkoli - Brache - //	12–28	Winterhalbjahr (01.11.–01.05.)	120	Dochtlysimeter (Brandi-Dohrn <i>et al.</i> 1996)	0	sandiger Lehm	USA	Feaga <i>et al.</i> (2010)
	23–49				140			
	38–90				280			
Bohnen - Triticale - //	22	Winterhalbjahr (01.11.–01.05.)	120	Dochtlysimeter (Brandi-Dohrn <i>et al.</i> 1996)	0	sandiger Lehm	USA	Feaga <i>et al.</i> (2010)
	33				67			
	34				134			
Erbsen - - //	35–40	Winterhalbjahr (01.09.–01.03.)	40	Lysimeter (Ø 0.3 m)	k.A.	lehmgiger Sand	Dänemark	Ambus <i>et al.</i> (2001)
Bohnen - Brache - //	43–85	Winterhalbjahr (01.11.–01.05.)	120	Dochtlysimeter (Brandi-Dohrn <i>et al.</i> 1996)	0	sandiger Lehm	USA	Feaga <i>et al.</i> (2010)
	65–85				67			
	98–150				134			
Bohnen - Wicke/Triticale - //	57	Winterhalbjahr (01.11.–01.05.)	120	Dochtlysimeter (Brandi-Dohrn <i>et al.</i> 1996)	0	sandiger Lehm	USA	Feaga <i>et al.</i> (2010)
	80				67			
	126				134			

§Bodentextur der jeweils obersten angegebenen Bodenschicht; k.A. = keine Angaben

<sup>†</sup>Bis auf Knoblauch (2013) konnte bei mehrjährigen Fruchtfolgen der Nitrat-N-Austrag während eines Messzeitraums (Winterhalbjahr oder ganzjährig) der entsprechenden Gemüseart bzw. den Gemüsearten in einer Kulturfolge zugeordnet werden.

Tabelle K: Nitratakkumulation im Boden im Freilandgemüsebau ermittelt mit Ionenakkumulatoren (Literaturübersicht)

Kultur-/Fruchtfolge <sup>†</sup>	NO <sub>3</sub> -N Akkumulation kg N ha <sup>-1</sup>		Messzeitraum	Mess- tiefe	Methode	Düngerate	Bodenart <sup>§</sup>	Land	Referenz
	Vegetations- zeit	Winterhalb- jahr							
	in Tagen			cm		kg N ha <sup>-1</sup>			
Gemüse, n.n.d.	43	77	Ganzes Jahr	60–100	SIA <sup>‡</sup>	<i>n.n.d.</i>	k.A.	Deutschland	Bischoff (2007)
Salat - Brokkoli - Roggen	75	195	Ganzes Jahr	60	SIA	0	toniger Schluff	Deutschland	Schwarz <i>et al.</i> (2010)
	7.5, 26	306, 300				128, 146			
	7.5, 40	423, 318				282, 284			
Salat - Lauch - Roggen	141	6.3	Ganzes Jahr	60	SIA	0	toniger Schluff	Deutschland	Schwarz <i>et al.</i> (2010)
	176, 160	85, 214				149, 155			
	271, 208	76, 118				190, 198			
Spinat - Amarant - Rettich	35, 66	13,12	Ganzes Jahr	60	SIA	0	toniger Schluff	Deutschland	Schwarz <i>et al.</i> (2010)
	84, 153	52, 98				137, 158			
	95, 73	62, 58				149, 169			
Fenchel - Roggen	36, 52	k.A.	Ganzes Jahr	60	SIA	0	toniger Schluff	Deutschland	Schwarz <i>et al.</i> (2010)
	51, 84					218, 239			
	82, 59					229, 276			
Karotten - Karotten	23	k.A.	Sommer, 127 Tage Monate (1. Karottenkultur)	100	AA-Hartz	538	lehmgiger Sand	USA	Allaire-Leung <i>et al.</i> (2001)
Phacelia - Salat - Salat	51	k.A.	Sommer, 4 Monate (1. Salatkultur)	75	AA-Hartz <sup>#</sup>	169	Sand	USA	Jackson (2000)
Brokkoli - Brache // Brokkoli - Brokkoli	k.A.	74–255	Winterhalbjahr	60	AA-Hartz	882	lehmgiger Sand	USA	Wyland <i>et al.</i> (1996)

k.A. = keine Angaben; n.n.d. = nicht näher definiert

<sup>§</sup>Bodentextur der jeweils obersten angegebenen Bodenschicht<sup>†</sup>Bei mehrjährige Fruchtfolgen erfolgte die Zuordnung der Gemüseart bzw. den Gemüsearten in einer Kulturfolge entsprechend dem Messzeitraum (Winterhalbjahr oder ganzjährig)<sup>#</sup>Anion-Austauschharz<sup>‡</sup>Selbst-Integrierende Akkumulatoren

Tabelle L: Modellbasierte Schätzungen der N-Verluste im Freilandgemüsebau (Literaturübersicht)

Kultur- oder Fruchtfolge	N – Auswaschung kg N ha <sup>-1</sup>	Zeitraum	Mess- tiefe cm	Düngerate kg N ha <sup>-1</sup> a <sup>-1</sup>	Modell	Bodenart <sup>§</sup>	Land	Referenz
Karotten // Weizen // Weizen	6	Gesamte Fruchtfolge	90	58	EU-Rotate_N	lehmgiger Sand	Deutschland	Nendel (2009)
<b>Kabis // Salat - Salat - Salat // Weizen</b>	27	Gesamte Fruchtfolge	90	78	EU-Rotate_N	schluffiger Lehm	Deutschland	Nendel (2009)
Kabis (Verarbeitung) // Salat - Salat - Salat // Weizen	30	Gesamte Fruchtfolge	90	80	EU-Rotate_N	schluffiger Lehm	Deutschland	Nendel (2009)
Rettich - Lauch // Zwiebeln // Weizen	30	Gesamte Fruchtfolge	90	73	EU-Rotate_N	schluffiger Lehm	Deutschland	Nendel (2009)
Gurken // Weizen // Zwiebeln	35	Gesamte Fruchtfolge	90	76	EU-Rotate_N	lehmgiger Sand	Deutschland	Nendel (2009)
Blumenkohl - Salat // Kleegrass // Kartoffeln	49	Gesamte Fruchtfolge	90	52	EU-Rotate_N	schluffiger Lehm	Deutschland	Nendel (2009)
Salat - Fenchel // Kabis // Karotten	56	Gesamte Fruchtfolge	90	46	EU-Rotate_N	schluffiger Lehm	Deutschland	Nendel (2009)
Salat - Kabis // Kartoffeln // Zwiebeln	57	Gesamte Fruchtfolge	90	76	EU-Rotate_N	lehmgiger Sand	Deutschland	Nendel (2009)
Gurken // Weizen // Zwiebeln	97	Gesamte Fruchtfolge	90	139	EU-Rotate_N	lehmgiger Sand	Deutschland	Nendel (2009)
Karotten // Weizen // Weizen	102	Gesamte Fruchtfolge	90	131	EU-Rotate_N	lehmgiger Sand	Deutschland	Nendel (2009)
Blumenkohl - Salat // Kleegrass // Kartoffeln	122	Gesamte Fruchtfolge	90	163	EU-Rotate_N	schluffiger Lehm	Deutschland	Nendel (2009)
Rettich - Lauch // Zwiebeln // Weizen	133	Gesamte Fruchtfolge	90	193	EU-Rotate_N	schluffiger Lehm	Deutschland	Nendel (2009)
Randen - Salat // Lauch - Nüsslisalat // Rettich - Kohlrabi	171	Gesamte Fruchtfolge	90	167	EU-Rotate_N	lehmgiger Sand	Deutschland	Nendel (2009)
<b>Kabis // Salat - Salat - Salat // Weizen</b>	177	Gesamte Fruchtfolge	90	264	EU-Rotate_N	schluffiger Lehm	Deutschland	Nendel (2009)
Kabis (Verarbeitung) // Salat - Salat - Salat // Weizen	188	Gesamte Fruchtfolge	90	264	EU-Rotate_N	schluffiger Lehm	Deutschland	Nendel (2009)
Blumenkohl - Bohnen - Nüsslisalat // Bohnen - Nüsslisalat // Fenchel - Bohnen	195	Gesamte Fruchtfolge	90	148	EU-Rotate_N	lehmgiger Sand	Deutschland	Nendel (2009)
Salat - Fenchel // Kabis // Karotten	200	Gesamte Fruchtfolge	90	189	EU-Rotate_N	schluffiger Lehm	Deutschland	Nendel (2009)

Tabelle L: Modellbasierte Schätzungen der N-Verluste im Freilandgemüsebau (Literaturübersicht)

Kultur- oder Fruchtfolge	N – Auswaschung kg N ha <sup>-1</sup>	Zeitraum	Mess- tiefe cm	Düngerate kg N ha <sup>-1</sup> a <sup>-1</sup>	Modell	Bodenart <sup>§</sup>	Land	Referenz
Salat -Kabis // Kartoffeln // Zwiebeln	205	Gesamte Fruchtfolge	90	208	EU-Rotate_N	lehmgiger Sand	Deutschland	Nendel (2009)
Nüsslisalat - Nüsslisalat // Blumenkohl // Salat - Salat	207	Gesamte Fruchtfolge	90	106	EU-Rotate_N	sandiger Lehm	Deutschland	Nendel (2009)
Sellerie - Fenchel - Spinat // Karotten - Wirz // Spinat - Kohlrabi	242	Gesamte Fruchtfolge	90	168	EU-Rotate_N	lehmgiger Sand	Deutschland	Nendel (2009)
Nüsslisalat - Nüsslisalat // Blumenkohl // Salat - Salat	344	Gesamte Fruchtfolge	90	203	EU-Rotate_N	sandiger Lehm	Deutschland	Nendel (2009)
Blumenkohl - Bohnen - Nüsslisalat // Bohnen - Nüsslisalat // Fenchel - Bohnen	356	Gesamte Fruchtfolge	90	285	EU-Rotate_N	lehmgiger Sand	Deutschland	Nendel (2009)
Randen - Salat // Lauch - Nüsslisalat // Rettich - Kohlrabi	372	Gesamte Fruchtfolge	90	323	EU-Rotate_N	lehmgiger Sand	Deutschland	Nendel (2009)
Sellerie - Fenchel - Spinat // Karotten - Wirz // Spinat - Kohlrabi	520	Gesamte Fruchtfolge	90	376	EU-Rotate_N	lehmgiger Sand	Deutschland	Nendel (2009)
Paprika - Blumenkohl // Krautstiel	175	Gesamte Fruchtfolge	60	25	Hydrus-2D	sandiger Lehm	Spanien	Doltra und Munoz (2010)
	375			185				
	455			260				
	509			329				
Paprika - Blumenkohl // Krautstiel	98	Gesamte Fruchtfolge	60	25	EU-Rotate_N	sandiger Lehm	Spanien	Doltra und Munoz (2010)
	235			185				
	365			260				
	515			329				
Rosenkohl	56	Winterhalbjahr (November-Mai)	90	k.A.	Burns-leaching-Modell	Ton	Niederlande	Whitmore (1996)
Gemüsefläche in Hausgärten	63	Winterhalbjahr (November-Mai)	90	k.A.	Mischzellenmodell	lehmgiger Sand	Deutschland	Kliebsch <i>et al.</i> (1998)
Kabis	72	Winterhalbjahr (Oktober-März)	90	485	Burns-leaching-Modell	k.A.	Belgien	De Neve <i>et al.</i> (2003)
Rosenkohl	79	Winterhalbjahr (November-Mai)	90	k.A.	Burns-leaching-Modell	Sand	Niederlande	Whitmore (1996)
Kabis	107	Winterhalbjahr (November-Mai)	90	k.A.	Burns-leaching-Modell	Ton	Niederlande	Whitmore (1996)
Salat - Salat	108, 134	Sommerhalbjahr (Mai bis Oktober)	105	184	EPIC	lehmgiger Schluff	USA	Jackson <i>et al.</i> (1994)
	148			356				
Kabis	130	Winterhalbjahr (November-Mai)	90	k.A.	Burns-leaching-Modell	Sand	Niederlande	Whitmore (1996)

Tabelle L: Modellbasierte Schätzungen der N-Verluste im Freilandgemüsebau (Literaturübersicht)

Kultur- oder Fruchtfolge	N – Auswaschung kg N ha <sup>-1</sup>	Zeitraum	Mess- tiefe cm	Düngerate kg N ha <sup>-1</sup> a <sup>-1</sup>	Modell	Bodenart <sup>§</sup>	Land	Referenz
Lauch	182	Winterhalbjahr (November-Mai)	90	k.A.	Burns-leaching- Modell	Sand	Niederlande	Whitmore (1996)
Lauch	195	Winterhalbjahr (November-Mai)	90	k.A.	Burns-leaching- Modell	Ton	Niederlande	Whitmore (1996)
Spinat	237	Winterhalbjahr (November-Mai)	90	k.A.	Burns-leaching- Modell	Ton	Niederlande	Whitmore (1996)
Spinat	248	Winterhalbjahr (November-Mai)	90	k.A.	Burns-leaching- Modell	Sand	Niederlande	Whitmore (1996)
Blumenkohl	293	Winterhalbjahr (Oktober-März)	90	447	Burns-leaching- Modell	k.A.	Belgien	De Neve <i>et al.</i> (2003)

k.A. = keine Angaben

§Bodentextur der jeweils obersten angegebenen Bodenschicht

Tabelle M: Frischmasse und N-Menge der marktfähigen Ware und der Ernterückstände im Freilandgemüsebau nach Wonneberger *et al.* (2004), Röber und Schacht (2008), Feller *et al.* (2015b), Andreas *et al.* (2017), AELF (2017), BMEL (2017) und Neuweiler und Krauss (2017)

Gemüseart	Frischmasse der Ernterückstände			N-Menge der Ernterückstände			Frischmasse der marktfähigen Ware			N-Entzug der Marktware		
	dt Frischmasse ha <sup>-1</sup>			kg N ha <sup>-1</sup>			dt Frischmasse ha <sup>-1</sup>			kg N ha <sup>-1</sup>		
	min <sup>‡</sup>	max <sup>‡</sup>	mittel <sup>‡</sup>	min	max	mittel	min	max	mittel	min	max	mittel
Rosenkohl	650	650	650	260	845	553	100	300	200	146	325	236
Brokkoli	550	700	625	165	550	358	100	400	250	68	250	159
Zucchetti	500	500	500	150	425	288	500	735	618	80	553	316
Blumenkohl	450	600	525	135	360	248	300	400	350	98	300	199
Kabis	350	500	425	105	375	240	300	1400	850	80	750	415
Wirz	300	400	350	120	320	220	250	700	475	105	320	213
Zuckermais	330	400	365	99	240	170	170	200	185	60	150	105
Lauch	340	420	380	100	231	166	200	650	425	100	330	215
Randen	100	500	300	25	300	163	300	1000	650	108	300	204
Chinakohl	500	500	500	90	225	158	400	900	650	90	180	135
Bohnen	220	450	335	88	180	134	60	300	180	20	138	79
Erbsen	320	320	320	128	130	129	40	100	70	0	80	40
Fenchel	250	300	275	75	135	105	300	400	350	60	180	120
Kürbis	400	400	400	100	100	100	300	600	450	100	200	150
Pastinake	200	200	200	100	100	100	400	400	400	100	200	150
Federkohl	250	250	250	88	90	89	200	500	350	140	240	190
Sellerie	250	300	275	75	100	88	300	800	550	113	260	186
Topinambur	400	400	400	80	80	80	500	500	500	90	90	90
Chicorée	300	300	300	75	75	75	200	550	375	80	180	130
Karotten	100	300	200	11	135	73	250	1000	625	60	153	107
Zwiebeln	120	250	185	24	100	62	250	900	575	80	180	130
Kohlrabi	150	200	175	42	70	56	200	700	450	104	196	150
Melone	200	200	200	55	55	55	200	400	300	30	150	90
Schnittlauch	0	220	110	0	110	55	100	700	400	30	250	140
Schwarzwurzel	200	200	200	50	50	50	150	300	225	46	52	49

Tabelle M: Frischmasse und N-Menge der marktfähigen Ware und der Ernterückstände im Freilandgemüsebau nach Wonneberger *et al.* (2004), Röber und Schacht (2008), Feller *et al.* (2015b), Andreas *et al.* (2017), AELF (2017), BMEL (2017) und Neuweiler und Krauss (2017)

Gemüseart	Frischmasse der Ernterückstände			N-Menge der Ernterückstände			Frischmasse der marktfähigen Ware			N-Entzug der Marktware		
	dt Frischmasse ha <sup>-1</sup>			kg N ha <sup>-1</sup>			dt Frischmasse ha <sup>-1</sup>			kg N ha <sup>-1</sup>		
Salat ( <i>Lactuca sativa</i> )	100	250	175	10	88	49	150	800	475	33	175	104
Rettich	100	250	175	17	75	46	400	1000	700	70	165	118
Rüben	100	250	175	25	63	44	150	700	425	26	293	159
Salat ( <i>Cichorium</i> )	100	220	160	20	66	43	160	700	430	28	180	104
Petersilie	60	200	130	6	80	43	150	500	325	16	252	134
Spinat	50	150	100	18	68	43	100	450	275	10	190	100
Zuckerhut	200	200	200	40	40	40	350	600	475	120	170	145
Rucola	100	150	125	30	45	38	120	300	210	35	210	123
Krautstiel	100	100	100	35	35	35	300	1000	650	96	160	128
Radieschen	50	50	50	3	10	6	200	300	250	15	60	38
Nüsslisalat	20	20	20	1	9	5	60	160	110	4	59	31
Knoblauch	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	120	120	120	36	36	36
Rhabarber	500	500	500	k.A.	k.A.	k.A.	100	800	450	99	140	120
Spargel	30	30	30	k.A.	k.A.	k.A.	25	150	88	24	150	87

k.A. = keine Angaben in der zu Grunde liegenden Literatur

\*Minimale und maximale Werte beruhen auf unterschiedlichen Angaben zwischen den Publikationen, der Gruppierung der Gemüsearten (z. B. Kabis = rot, weiss, spitz) sowie dem Verwendungszweck der Gemüse (Frischmarkt, Lager, Verarbeitung) und der daraus resultierenden Kulturdauer

Tabelle N: Gemessene maximale vertikale Bodendurchwurzelung der Gemüsearten / -gruppen (Literaturübersicht)

Gemüseart/-gruppe	max. Wurzeltiefe (cm)	Bodentyp	Land	Referenz
Blumenkohl	80	sandiger Lehm	England	Greenwood <i>et al.</i> (1982)
	112	Braunerde	Österreich	Kutschera <i>et al.</i> (2009)
	95	lehmiger Sand	Dänemark	Thorup-Kristensen und van den Boogaard (1998)
	137	schluffiger, sandiger Lehm	USA	Weaver und Bruner (1927)
Bohnen	106	Braunerde	Österreich	Kutschera <i>et al.</i> (2009)
Brokkoli	112	Braunerde	Österreich	Kutschera <i>et al.</i> (2009)
	112	lehmiger Sand	Dänemark	Thorup-Kristensen (1993)
	75	lehmiger Sand	USA	Wyland <i>et al.</i> (1996)
Chinakohl	144	lehmiger Sand	Dänemark	Kristensen und Thorup-Kristensen (2007)
	161	Braunerde	Österreich	Kutschera <i>et al.</i> (2009)
Erbsen	70	sandiger Lehm	England	Greenwood <i>et al.</i> (1982)
	160	Braunerde	Österreich	Kutschera <i>et al.</i> (2009)
	75	lehmiger Sand	Dänemark	Thorup-Kristensen (1998)
	106	schluffiger Lehm	Frankreich	Vocanson <i>et al.</i> (2006)
	98	schluffiger, sandiger Lehm	USA	Weaver und Bruner (1927)
Federkohl	127	Braunerde	Österreich	Kutschera <i>et al.</i> (2009)
Fenchel	210	Braunerde	Österreich	Kutschera <i>et al.</i> (2009)
Kabis	220	sandiger Lehm	Dänemark	Kristensen und Thorup-Kristensen (2002)
	238	sandiger Lehm	Dänemark	Kristensen und Thorup-Kristensen (2004)
	242	lehmiger Sand	Dänemark	Kristensen und Thorup-Kristensen (2007)
	170	Braunerde	Österreich	Kutschera <i>et al.</i> (2009)
	240	lehmiger Sand	Dänemark	Thorup-Kristensen (2006b)
	125	stark sandiger Lehm	Dänemark	Thorup-Kristensen (2006a)
Kardy	171	Braunerde	Österreich	Kutschera <i>et al.</i> (2009)
	177	Schwemmlandboden	Österreich	Kutschera <i>et al.</i> (2009)
Karotten	110	sandiger Lehm	Dänemark	Kristensen und Thorup-Kristensen (2002)
	128	sandiger Lehm	Dänemark	Kristensen und Thorup-Kristensen (2004)
	170	Braunerde	Österreich	Kutschera <i>et al.</i> (2009)
	125	stark sandiger Lehm	Dänemark	Thorup-Kristensen (2006a)
Karotten	100	sandiger Lehm	Dänemark	Thorup-Kristensen und Sorensen (1999)

Tabelle N: Gemessene maximale vertikale Bodendurchwurzelung der Gemüsearten / -gruppen (Literaturübersicht)

Gemüseart/-gruppe	max. Wurzeltiefe (cm)	Bodentyp	Land	Referenz
	305	schluffiger, sandiger Lehm	USA	Weaver und Bruner (1927)
Knoblauch	80	Schwemmlandboden	Österreich	Kutschera <i>et al.</i> (2009)
	76	schluffiger, sandiger Lehm	USA	Weaver und Bruner (1927)
Kohlrabi	140	Braunerde	Österreich	Kutschera <i>et al.</i> (2009)
	60	Lössboden	Deutschland	Schenk <i>et al.</i> (1991)
	259	schluffiger, sandiger Lehm	USA	Weaver und Bruner (1927)
Krautstiel	157	Braunerde	Österreich	Kutschera <i>et al.</i> (2009)
Kürbis	202	lehmiger Sand	Dänemark	Kristensen und Thorup-Kristensen (2007)
	95	Braunerde	Österreich	Kutschera <i>et al.</i> (2009)
	183	schluffiger, sandiger Lehm	USA	Weaver und Bruner (1927)
Lauch	50	lehmiger Sand	Dänemark	Kristensen und Thorup-Kristensen (2007)
	125	Braunerde	Österreich	Kutschera <i>et al.</i> (2009)
	45	humoser Sand	Niederlande	Smit <i>et al.</i> (1995)
	85	lehmiger Sand	Dänemark	Thorup-Kristensen (2006b)
	76	schluffiger, sandiger Lehm	USA	Weaver und Bruner (1927)
	50	lehmiger Sand	Dänemark	Xie und Kristensen (2017)
Melonen	55	Schwemmlandboden	Österreich	Kutschera <i>et al.</i> (2009)
	70	Lehm, sandiger Lehm	USA	Sharma <i>et al.</i> (2017)
	118	schluffiger, sandiger Lehm	USA	Weaver und Bruner (1927)
Nüsslisalat	24	Anmoor über Sand	Österreich	Kutschera <i>et al.</i> (2009)
Pastinake	80	sandiger Lehm	England	Greenwood <i>et al.</i> (1982)
	150	Gleyauboden	Österreich	Kutschera <i>et al.</i> (2009)
	274	schluffiger, sandiger Lehm	USA	Weaver und Bruner (1927)
Petersilie, Wurzel-	160	Braunerde	Österreich	Kutschera <i>et al.</i> (2009)
Petersilie, Blatt-	97	Anmoor über Sand	Österreich	Kutschera <i>et al.</i> (2009)
	122	schluffiger, sandiger Lehm	USA	Weaver und Bruner (1927)
Radieschen	170	Auboden	Österreich	Kutschera <i>et al.</i> (2009)
Randen	187	lehmiger Sand	Dänemark	Kristensen und Thorup-Kristensen (2007)
	304	Braunerde	Österreich	Kutschera <i>et al.</i> (2009)
	240	lehmiger Sand	Dänemark	Thorup-Kristensen (2006b)

Tabelle N: Gemessene maximale vertikale Bodendurchwurzelung der Gemüsearten / -gruppen (Literaturübersicht)

Gemüseart/-gruppe	max. Wurzeltiefe (cm)	Bodentyp	Land	Referenz
	335	schluffiger, sandiger Lehm	USA	Weaver und Bruner (1927)
Rettich	153	Braunerde	Österreich	Kutschera <i>et al.</i> (2009)
	219	schluffiger, sandiger Lehm	USA	Weaver und Bruner (1927)
Rhabarber	244	Braunerde	Österreich	Kutschera <i>et al.</i> (2009)
	305	schluffiger, sandiger Lehm	USA	Weaver und Bruner (1927)
Rosenkohl	147	Braunerde	Österreich	Kutschera <i>et al.</i> (2009)
	100	humoser Sand	Niederlande	Smit <i>et al.</i> (1995)
Rüben	80	sandiger Lehm	England	Greenwood <i>et al.</i> (1982)
	125	Braunerde	Österreich	Kutschera <i>et al.</i> (2009)
	168	schluffiger, sandiger Lehm	USA	Weaver und Bruner (1927)
Rucola	88	Sand	Dänemark	Kristensen und Stavridou (2017)
	140	Sand	Dänemark	Kristensen und Stavridou (2017)
	150	Braunerde	Österreich	Kutschera <i>et al.</i> (2009)
Salat ( <i>Cichorium</i> )	160	Braunerde	Österreich	Kutschera <i>et al.</i> (2009)
	140	Braunerde	Österreich	Kutschera <i>et al.</i> (2009)
	105	Gleyboden	Österreich	Kutschera <i>et al.</i> (2009)
	120	Braunerde	Österreich	Kutschera <i>et al.</i> (2009)
	229	schluffiger, sandiger Lehm	USA	Weaver und Bruner (1927)
Salat ( <i>Lactuca sativa</i> )	60	sandiger Lehm	England	Greenwood <i>et al.</i> (1982)
	75	schluffiger Lehm	USA	Jackson und Stivers (1993)
	75	lehmiger Sand	USA	Jackson und Stivers (1993)
	75	Lehm	USA	Jackson und Stivers (1993)
	75	lehmiger Schluff	USA	Jackson <i>et al.</i> (1994)
	61	stark sandiger Lehm	Dänemark	Thorup-Kristensen (2006a)
	30	sandiger Ton	England	Vinten <i>et al.</i> (1998)
Schnittlauch	60	Auboden	Österreich	Kutschera <i>et al.</i> (2009)
Schwarzwurzel	170	Braunerde	Österreich	Kutschera <i>et al.</i> (2009)
Sellerie, Knollen-	110	Braunerde	Österreich	Kutschera <i>et al.</i> (2009)
Sellerie, Stangen-	25	Sand	Deutschland	Feller und Fink (2001)
	110	Braunerde	Österreich	Kutschera <i>et al.</i> (2009)

Tabelle N: Gemessene maximale vertikale Bodendurchwurzelung der Gemüsearten / -gruppen (Literaturübersicht)

Gemüseart/-gruppe	max. Wurzeltiefe (cm)	Bodentyp	Land	Referenz
Spargel	319	Auboden	Österreich	Kutschera <i>et al.</i> (2009)
	320	schluffiger, sandiger Lehm	USA	Weaver und Bruner (1927)
Spinat	147	Auboden	Österreich	Kutschera <i>et al.</i> (2009)
	60	Lössboden	Deutschland	Schenk <i>et al.</i> (1991)
Topinambur	183	schluffiger, sandiger Lehm	USA	Weaver und Bruner (1927)
	130	Braunerde	Österreich	Kutschera <i>et al.</i> (2009)
Wirsing	150	Braunerde	Österreich	Kutschera <i>et al.</i> (2009)
	177	schluffiger, sandiger Lehm	USA	Weaver und Bruner (1927)
Zucchetti	200	Braunerde	Österreich	Kutschera <i>et al.</i> (2009)
Zuckermais	50	sandiger Lehm	Dänemark	Kristensen und Thorup-Kristensen (2002)
	58	sandiger Lehm	Dänemark	Kristensen und Thorup-Kristensen (2004)
	241	diverse Böden	Österreich	Kutschera <i>et al.</i> (2009)
Zwiebeln	174	schluffiger, sandiger Lehm	USA	Weaver und Bruner (1927)
	100	Braunerde	Österreich	Kutschera <i>et al.</i> (2009)
	98	schluffiger, sandiger Lehm	USA	Weaver und Bruner (1927)
	60	sandiger Lehm	England	Greenwood <i>et al.</i> (1982)
	33	stark sandiger Lehm	Dänemark	Thorup-Kristensen (2006a)

Tabelle O: Mittlerer Gesamtwasserbedarf von Gemüsearten kultiviert an 10 deutschen Standorten (Augsburg, Braunschweig, Freiburg, Geisenheim, Köln, Leipzig, Nürnberg, Osnabrück, Schleswig und Schwerin) für die Jahre 1962 bis 2016 nach Zinkernagel *et al.* (2017)

Gemüseart/-Gruppe	Kulturdauer (Tage)	Wasserbedarf (mm) <sup>§</sup>
Salate ( <i>Cichorium</i> )	60	145
Kabis	69	180
Spargel	73	244
Rettich	37–56	128–166
Salate ( <i>Lactuca sativa</i> )	56–65	145–212
Bohnen	62–72	162–200
Chinakohl	81–133	177–263
Karotten	114–129	220–354
Blumenkohl	79–92	250–285
Brokkoli	58–77	266–286
Zucchetti	76–100	286–442
Lauch	113–117	291–486
Zwiebeln	139	450
Sellerie, Knollen-	162	544
Rosenkohl	169	696

<sup>§</sup>berechnet aus Verdunstungs- und Niederschlagsdaten, die der Deutsche Wetterdienst für die Jahre 1962 bis 2016 für 10 über ganz Deutschland verteilte Wetterstationen erhoben hat. Der Gesamtwasserbedarf ergibt sich aus der Summe der täglichen Verdunstung ohne Berücksichtigung der Regenmengen. Die Verdunstung der Gemüsekulturen berechnet sich aus den Verdunstungswerten nach Penman, die mit Hilfe der vom Kultur- und Entwicklungsstadium abhängigen Geisenheimer kc-Werte angepasst werden.

Tabelle P: Vor- und Nachteile der Bodenfeuchtemessung gegenüber der Geisenheimer-Steuerung nach Paschold *et al.* (2009)

Methode	Vorteile	Nachteile
Geisenheimer Steuerung	<ul style="list-style-type: none"> <li>keine Sensoren auf dem Feld nötig, Material- und Wartungskosten entfallen</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Startwert der Bodenfeuchte muss vor Beginn der Berechnung bestimmt werden</li> </ul>
	<ul style="list-style-type: none"> <li>Basiswerte der Verdunstung gelten für alle Pflanzenarten und Anbausätze des Gebietes</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Niederschlagsmessung in Schlagnähe erforderlich</li> </ul>
	<ul style="list-style-type: none"> <li>Bewässerungsnotwendigkeit in niederschlagsfreien Perioden vorher gut kalkulierbar</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Wassernachlieferung an grundwassernahen Standorten muss geschätzt werden, um die Bewässerung entsprechend zu reduzieren.</li> </ul>
	<ul style="list-style-type: none"> <li>Wetterprognosen können bei der Entscheidung über die Bewässerung berücksichtigt werden</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Korrektur der kc-Werte für Tropfbewässerung erforderlich</li> </ul>
	<ul style="list-style-type: none"> <li>Bewässerungsbedarf gut dokumentierbar als Nachweis einer sachgerechten Bewässerung</li> </ul>	
Messen der Bodenfeuchte	<ul style="list-style-type: none"> <li>aktuelle Bodenfeuchte direkt ablesbar</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>repräsentativer Standort auf dem Schlag wegen der erheblichen Streuung schwer zu finden – viele Sensoren sind erforderlich</li> </ul>
	<ul style="list-style-type: none"> <li>keine Niederschlagsmessung auf dem Schlag erforderlich</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>für jeden Schlag und Anbausatz gesonderte Messungen notwendig</li> </ul>
	<ul style="list-style-type: none"> <li>schnelle Kontrolle der erfolgten Bewässerung</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Kosten der Sensoren, Ein- und Ausbau erforderlich</li> </ul>
	<ul style="list-style-type: none"> <li>Tropfbewässerung automatisierbar</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Aufwand für Erfassen der Messwerte</li> </ul>
	<ul style="list-style-type: none"> <li>bei Einsatz mehrerer Sensoren Störungen der Wasserverteilung erkennbar</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Kontrolle der Funktionsfähigkeit der Sensoren</li> </ul>
		<ul style="list-style-type: none"> <li>Störungen und Behinderungen bei Feldarbeiten durch Sensoren oder Kabel möglich</li> </ul>

Tabelle Q: Charakterisierung verschiedener Zwischenfruchtarten in Bezug auf die N-Aufnahme in Anlehnung an Tribouillois *et al.* (2015), LLH (2016) und LfL (2017)

Pflanzenfamilie	Art	Saatzeit <sup>‡</sup>	Saatkosten <sup>§</sup>	N-Bindung, Grundwasserschutz <sup>†</sup>	Sicheres Abfrieren <sup>†</sup>	NAR <sup>¶</sup> (g N ha <sup>-1</sup> WGT <sup>-1</sup> )	
Gräser	Einj. Raigras	A. Aug	mittel–hoch	++	-	k.A.	
	Welsches Raigras	A. Sept	mittel–hoch	++	--	78	
	Grünroggen	A. Okt	hoch	++	---	48	
	Sand-/Rauhafer	M. Aug	mittel–hoch	++	+	65	
Leguminosen	Perserklee	A. Aug	mittel	o	++	k.A.	
	Alexandrinerklee	A. Aug	mittel	o	++	82	
	Inkarnatklee	E. Aug	mittel	o	-	83	
	Ackerbohne	A. Aug	hoch	o	+++	95	
	Futtererbsen	A. Aug	hoch	o	++	k.A.	
	Bitterlupine, blau	A. Aug	hoch	o	+++	34	
	Sommerwicke	A. Aug	mittel–hoch	o	++	60	
	Winterwicke	M. Sept	hoch	o	--	124	
	Kreuzblütler	Senf – nicht nematodenresistent	M. Sept	niedrig	++	++	134
		Senf – nematodenresistent	E. Aug	niedrig–mittel	++	++	134
Ölrettich - nicht nematodenresistent		A. Sept	niedrig	++	o <sup>#</sup>	141	
Ölrettich - nematodenresistent		M. Aug	mittel	++	o <sup>#</sup>	141	
Winterrübsen		M. Sept	niedrig	+++	---	103	
Sommerfutterraps		E. Aug	niedrig	++	o	130	
Winterfutterraps		A. Sept	niedrig	++	--	130	
Kresse		A. Sept	mittel	++	+++	k.A.	
Sonstige		Phacelia	E. Aug	niedrig–mittel	++	+++	138
	Buchweizen	M. Aug	mittel-hoch	+	+++	99	
	Rantillkraut	M. Aug	niedrig	+	+++	129	
	Sonnenblume	M. Aug	mittel–hoch	++	++	153	
Mischungen	Landsberger Gemenge	M. Sept	hoch	o	--	k.A.	
	Landsberger Gemenge ohne Leguminosen	M. Aug	mittel	+++	Untersch. (meist +)	k.A.	
	60 % Sudangras, 40 % Öllein	A. Aug	k.A.	++	k. A.	k.A.	
	50 % Ölrettich, 50 % Gelbsenf	A. Aug – M. Sept	k.A.	++	Ölrettich friert nicht sicher ab	k.A.	

<sup>‡</sup>A. (Anfang), M. (Mitte) und E. (Ende) eines Monats

<sup>†</sup>--- sehr ungünstig, -- ungünstig, - eher ungünstig, o mittel, + eher günstig, ++ günstig, +++ sehr günstig

<sup>§</sup>niedrig = < 50 € ha<sup>-1</sup>, mittel = 50-100 € ha<sup>-1</sup>, hoch = > 100 € ha<sup>-1</sup>

<sup>#</sup>in milden Wintern problematisch

<sup>¶</sup>N-Akkumulationsrate in Abhängigkeit von der Wärmesumme der Wachstumsgradtage (WGT)

Tabelle R: Massnahmen zur Verminderung der Nitratauswaschung im Freilandgemüsebau

Massnahmen†	Reduktionspotenzial	Wissensstand	Praxis-tauglichkeit	Bemerkungen	Referenzen
<b>1. Bewässerung</b>					
Anpassung der Wassergabe an den Wasserbedarf der Kultur (Bewässerungssteuerung durch Tensiometer, Geisenheimer-Methode etc.)	+++	+++	++		(Jackson <i>et al.</i> 1994; Larson <i>et al.</i> 1996; de Paz und Ramos 2001; Hartz 2006; Wiesler <i>et al.</i> 2008; Zupanc <i>et al.</i> 2011; Quemada <i>et al.</i> 2013; Cameira und Mota 2017)
Verringerung der Bewässerung zwischen den Pflanzen in Reihenkulturen durch eine verbesserte Bewässerungstechnik (z. B. Tröpfchenbewässerung),	+++	+++	++/+	Unterschiedliche Praxis-tauglichkeit je nach Reihenabstand einer Kultur	
Berücksichtigung des N-Eintrags durch das Bewässerungswasser	+	+++	+		
<b>2. N-Düngung</b>					
Überwachen des saisonalen Boden- und Pflanzen-N-Status zur Bestimmung des N-Düngerbedarfs (z. B. KNS-Methode)	+++	+++	++	KNS-System in der Schweiz noch nicht im Einsatz	(Jackson <i>et al.</i> 1994; Bacher und Lenz 1996; Di und Cameron 2002; Rahn 2002; Menneer <i>et al.</i> 2004; LfL/LfU 2005; Hartz 2006; van Dijk und Smit 2006; VDLUFA 2006; Biedermann <i>et al.</i> 2007; Osterburg <i>et al.</i> 2007; Armbruster <i>et al.</i> 2008; Röber und Schacht 2008; Wiesler <i>et al.</i> 2008; LfL 2009; Nendel 2009; Agostini <i>et al.</i> 2010; Akkal-Corfini <i>et al.</i> 2010; Doltra und Munoz 2010; Rather 2011; Zupanc <i>et al.</i> 2011; Zessner <i>et al.</i> 2012; Quemada <i>et al.</i> 2013; BZL 2014; Garming 2015; Bach <i>et al.</i> 2016; Cameira und Mota 2017)
EDV-gestützte Automatisierung der N-Düngeplanung (z. B. N-Expert)	+++	+++	++	Noch keine entsprechenden Modelle in der Schweiz im Einsatz	
N-Düngeplanung der Kulturen mit Einbezug der Fruchtfolge	+++	++	++		
Bedarfsgerechte N-Düngung nach Düngeempfehlungen (z. B. GRUD, N-Schlagbilanz etc.) ohne Sicherheitszuschläge	+++	+++	+++		
N-Düngung nach Pflanzendiagnose (z. B. SPAD-Chlorophyllmeter)	++	++	++	Geringe Anwendung in der Schweiz	
Boden-N-Test zur Bestimmung des N-Düngerbedarfs (z. B. N <sub>min</sub> -Methode)	+++	+++	++	Nur noch geringe Anwendung in der Schweiz	
Reduzierte N-Düngung, z. B. Düngungsbemessung nach GRUD um 10–30 % reduziert	++	++	+	Hierzu ist das Risiko von Qualitätsbeeinträchtigungen des Ernteguts zu beachten	
Optimierung des Zeitpunkts und Splittung der N-Düngung	++	++	++		
Beschränkung der maximalen Einzelgabe mineralischer N-Dünger	++	++	++		
Anwendung stabilisierter Langzeit-N-Dünger (z. B. durch Nitrifikationsinhibitoren)	+	+	++		

Tabelle R: Massnahmen zur Verminderung der Nitrat auswaschung im Freilandgemüsebau

Massnahmen†	Reduktions- potenzial	Wissensstand	Praxis- tauglichkeit	Bemerkungen	Referenzen
Verwendung von Düngemitteln auf Ammoniumbasis (z. B. Cultan)	++	+	+		
Gezielte N-Dünger Platzierung durch verbesserte N-Mineraldünger ausbringungstechnik (z. B. Bandablage, Reihendüngung, Depots)	++	+++	++		
Fertigation (Flüssigdüngung in Verbindung mit der Tropfbewässerung)	++	++	+		
<b>3. Frucht-/Kulturfolge</b>					
Entwicklung optimierter Frucht-/Kulturfolgen ohne Zwischenfruchtanbau (z. B. durch Wechsel von Flach- und Tiefwurzlern, Kulturen mit kurzer und langer Vegetationszeit)	++	++	+		
Entwicklung optimierter Frucht-/Kulturfolgen mit Zwischenfruchtanbau (Sommer-, Winterbegrünung)	+++	+++	+++		(Jackson <i>et al.</i> 1994; Leclerc <i>et al.</i> 1995; Whitmore 1996; Thorup-Kristensen 2002; Menneer <i>et al.</i> 2004; LfL/LfU 2005; Hartz 2006; Thorup-Kristensen 2006b, 2006a; van Dijk und Smit 2006; VDLUFA 2006; Biedermann <i>et al.</i> 2007; Osterburg <i>et al.</i> 2007; Armbruster <i>et al.</i> 2008; Röber und Schacht 2008; Wiesler <i>et al.</i> 2008; LfL 2009; Pedersen <i>et al.</i> 2009; Rather 2011; Zupanc <i>et al.</i> 2011; Zessner <i>et al.</i> 2012; Quemada <i>et al.</i> 2013; BZL 2014; Laber und Lattauschke 2014; Thorup-Kristensen und Rasmussen 2015; Bach <i>et al.</i> 2016; Cameira und Mota 2017)
Integration von landwirtschaftlichen Kulturen in gemüsebauliche Fruchtfolgen (z. B. Gemüse-/Getreidefruchtfolge)	+	+	++		
Grüneinsaaten zwischen die Reihen der Kulturpflanzen (Untersaaten)	++	++	+	Risiko von Konkurrenz der Hauptkultur bei ungünstigen Witterungsverhältnissen (z. B. Trockenheit)	
Sortenwahl: Verwendung von Kulturpflanzen mit hoher N-Nutzungseffizienz	+	+	+	Erst sehr wenige entsprechende Sorten auf dem Markt	
Jungpflanzenanzucht (Pflanzkulturen statt Ansaat)	+	+	++		

Tabelle R: Massnahmen zur Verminderung der Nitratauswaschung im Freilandgemüsebau					
Massnahmen†	Reduktions-potenzial	Wissensstand	Praxis-tauglichkeit	Bemerkungen	Referenzen
<b>4. Ernterückstände</b>					
Verbleib auf dem Feld mit verzögerter Einarbeitung (z. B. Frühjahr)	++	+	++		(Whitmore 1996; Menneer <i>et al.</i> 2004; van Dijk und Smit 2006; VDLUFA 2006; Armbruster <i>et al.</i> 2008; Wiesler <i>et al.</i> 2008; Rather 2011; Agneessens <i>et al.</i> 2014; BZL 2014; Cameira und Mota 2017)
Abfuhr vom Feld (z. B. Verarbeitung in Biogasanlage)	+++	++	++		
Zugabe von Materialien mit einem hohen C:N-Verhältnis (z. B. Stroh)	+	+	+		
<b>5. Bodenbearbeitung</b>					
Pfluglose Bodenbearbeitung (z. B. Mulchsaat/-pflanzung, Streifenfrässaat)	++	+	++		(Menneer <i>et al.</i> 2004; LfL/LfU 2005; LfL 2009; Zessner <i>et al.</i> 2012)
Direktsaat	++	+	+		
Bodenbearbeitung (Einarbeitung der Zwischenfrüchte) spät im Herbst oder im Frühjahr	+	++	++		
<b>6. Informationsaustausch</b>					
Umfassende Beratung durch Rundbriefe, Versammlungen, Demonstrationsversuche und Feldbegehungen	++	++	+++		(Peterson und Frye 1989; LfL/LfU 2005; LfL 2009; Rather 2011; Alscher <i>et al.</i> 2015; Garming 2015)
Einrichten einer Internetplattform	+	++	++		
Einzelbetriebliche Beratung (z. B. Kosten-Nutzen-Analyse)	+++	+++	++		
<b>7. Umstellung des Anbausystems</b>					
Betriebsbewirtschaftung nach Kriterien des biologischen Landbaus	+	++	+++		(De Neve <i>et al.</i> 2003; LfL/LfU 2005; Biedermann <i>et al.</i> 2007; Osterburg <i>et al.</i> 2007; LfL 2009; Zessner <i>et al.</i> 2012; Breukers <i>et al.</i> 2014; de Haan <i>et al.</i> 2014; de Haan <i>et al.</i> 2015; Bach <i>et al.</i> 2016)
Bodenunabhängiger Anbau von Gemüse im Freiland mit Rezyklierung	+++	++	0		

Tabelle R: Massnahmen zur Verminderung der Nitratauswaschung im Freilandgemüsebau

Massnahmen†	Reduktions- potenzial	Wissensstand	Praxis- tauglichkeit	Bemerkungen	Referenzen
<b>8. Precision-farming (GIS-, GPS- und Modellierungstechnologien)</b>					
Implementierung eines Simulationssystems als Grundlage für eine Übertragung der an Einzelstandorten erzielten Ergebnisse auf grössere Gebiete	0	++	0		(Menneer <i>et al.</i> 2004; LfL/LfU 2005; VDLUFA 2006; Osterburg <i>et al.</i> 2007; Agostini <i>et al.</i> 2010; Obenauf und Kock 2013; Stohl 2013; Bach <i>et al.</i> 2016)
Sensorgestützte teilflächenspezifische N-Grunddüngung abgestimmt auf die N-Nachlieferung des Bodens	+	+	+		
<b>9. Sonstiges</b>					
Ausbringen von Schichtdoppelhydroxiden (LDH) oder «anionischen» Tonmineralen mit einer hohen Anion-Austauschkapazität zum Aufbau eines Nitrat-Puffersystems im Boden	0	+	0		(Schipper und Vojvodic-Vukovic 1998; Torres-Dorante <i>et al.</i> 2009; Bargmann <i>et al.</i> 2014)
Ausbringen von Hydro-Kohle (hergestellt durch hydrothermale Karbonisierung) zum Aufbau eines Nitrat-Puffersystems im Boden	0	+	0		
Legende: +++ = gross, sehr gut; ++ = mittel, gut; + = gering; 0 = keine nennenswerte Wirkung, Kontrolle sehr aufwendig; ? = unklar					
†Für eine genaue Beschreibung der Massnahmen sei auf die Referenzen verwiesen, sowie auf die Beispiele und Angaben in den jeweiligen Berichtsabschnitten, die diesen Themenbereich behandeln					

## Abkürzungsverzeichnis

Abb.	Abbildung
Bio	Biologischer Anbau
C	Kohlenstoff
Cultan	Controlled Uptake Long Term Ammonium Nutrition
dt	Dezitonne
EDV	Elektronische Datenverarbeitung
FiBL	Forschungsinstitut für biologischen Landbau
ha	Hektare
IGZ	Leibniz-Institut für Gemüse- und Zierpflanzenbau
IP	Integrierte Produktion
kc-Wert	kultur- und entwicklungsabhängiger Koeffizient zur Wasserbedarfsberechnung je Pflanzenart
kg	Kilogramm
KNS	Kulturbegleitende N <sub>min</sub> -Sollwerte
N	Stickstoff
<sup>15</sup> N	stabiles Isotop von Stickstoff
N <sub>2</sub>	Molekularer Stickstoff
N <sub>2</sub> O	Lachgas
nFK	nutzbare Feldkapazität
NH <sub>3</sub>	Ammoniak
N <sub>min</sub>	Mineralstickstoff im Boden
NO <sub>3</sub> -N	Nitratstickstoff
P	Phosphor
SA	Standardabweichung
SchALVO	Schutzgebiets- und Ausgleichsverordnung (Baden-Württemberg)
SGA	Suisse Garantie
SIA	Selbstintegrierender Akkumulator
SZG	Schweizerische Zentralstelle für Gemüsebau und Spezialkulturen
t	Tonne
TS	Trockensubstanz

## Abbildungsverzeichnis

Abb. 1	Schematische Einteilung des Gemüseanbaus nach Ort, Produktionsintensität und Verwendungszweck der Ernteprodukte .....	10
Abb. 2	Gemüsearten mit den grössten Flächenanteilen am Frisch-, Lager- und Verarbeitungsgemüseanbau im Freiland in der Schweiz und im Kanton Solothurn im 5-jährigen Mittel (2012-2016) .....	11
Abb. 3	NO <sub>3</sub> -N-Restmenge im Boden (0-90 cm) nach der Gemüseernte oder am Ende der Kulturfolge (Herbst) im Freilandanbau dargestellt in einem Boxplot-Diagramm.....	14
Abb. 4	N-Frachten im Winterhalbjahr nach Bohnen, Brokkoli und Zuckermais mit (extensiv) und ohne Zwischenfrucht (intensiv) in Abhängigkeit der Düngermenge .....	16
Abb. 5	Kumulierte N-Verluste unterhalb von 90 cm Bodentiefe im Freilandgemüsebau in Abhängigkeit von N-Düngerate und Fruchtfolge (dreijährig) simuliert mit dem Modell EU-Rotate_N .....	19
Abb. 6	Durchschnittliche N-Mengen der oberirdischen Ernterückstände und der entsprechenden marktfähigen Ware im Freilandgemüsebau gemittelt .....	22
Abb. 7	Wurzeltiefen der Gemüsearten im Freilandanbau gemessen am Ende der Kulturperiode dargestellt in einem Boxplot-Diagramm .....	30
Abb. 8	N <sub>min</sub> -Sollwerte der Gemüsearten zur Bestimmung des N-Düngebedarfs im Freilandgemüsebau nach der N <sub>min</sub> -Methode, gemittelt nach den Angaben in BMLFUW (2008), Röber und Schacht (2008) und Feller et al. (2011); senkrechte Linien zeigen die Einteilung der Gemüsearten in vier Klassen: sehr hoch (> 250 kg N ha <sup>-1</sup> ), hoch (200–250 kg N ha <sup>-1</sup> ), niedrig (150–200 kg N ha <sup>-1</sup> ) und gering (< 150 kg N ha <sup>-1</sup> ); k.A. = keine Angabe) .....	37
Abb. 9	N-Dynamiken im System Pflanze-Boden mit und ohne Zwischenfrucht (in Anlehnung an Justes et al. 2012). Die Mengenangabe in kg N ha <sup>-1</sup> ist hypothetisch. N <sub>min</sub> = mineralischer Boden N-Gehalt. ....	50

## Tabellenverzeichnis

Tabelle 1	Vergleich der empfohlenen (max.) Probenahmetiefe nach Gemüsearten für die Bestimmung des mineralischen N-Gehaltes im Boden zur Abschätzung der N-Verfügbarkeit während der Kulturzeit (N <sub>min</sub> -Methode) .....	31
Tabelle 2	Potenzielle Vor- und Nachteile von Langzeitdüngern.....	34
Tabelle 3	Neuartige Düngemittel für den Einsatz im Freilandgemüsebau .....	35
Tabelle 4	Vergleich N-Sollwerte und N-Mindestvorrat zur Bestimmung des N-Düngebedarfs im Freilandgemüsebau nach der N <sub>min</sub> -Methode .....	39
Tabelle 5	Methoden zur objektiven Steuerung von Bewässerung im Freilandgemüsebau .....	44
Tabelle 6	Beschreibung von Verfahren und Herausforderungen der Mulch- und Direktpflanzungsverfahren im ökologischen Gemüsebau unter Verwendung der Reihenmulchschneide-Pflanztechnik .....	47
Tabelle 7	Auswirkungen des Zwischenfruchtanbaus auf die N-Auswaschung und den mineralischen Boden-N-Gehalt (N <sub>min</sub> ) im Herbst/Winter im Freilandgemüsebau .....	52
Tabelle 8	Nitratauswaschungspotenzial der Gemüsearten im Freilandanbau in Abhängigkeit der Wurzeltiefe, der N-Gehalte in den Ernterückständen und der N-Düngung .....	55
Tabelle 9	Die wichtigsten Einflussfaktoren der Nitratauswaschung .....	56

## Anhangverzeichnis

Tabelle A	Fläche (ha) der als Frischgemüse im Freiland angebauten Gemüsearten im 5-jährigen Mittel (2012-2016) für die Schweiz und den Kanton Solothurn.....	76
Tabelle B	Gruppenbezeichnung und zusammengefasste Varietäten/Gattungen von Freilandgemüse .....	77
Tabelle C	Mehrsprachiges Namensverzeichnis der Gemüsearten .....	79
Tabelle D	Literatursuchergebnisse (Anzahl Publikationen) der systematischen Stichwortsuche via «ISI Web of Knowledge» von Sept. bis Nov. 2017 .....	80
Tabelle E	Quellen, Suchbegriffe und Anzahl der Suchergebnisse der Literatursuche in gemüsebau spezifischen Peer-review-Literaturdatenbanken von Sept. bis Nov. 2017 .....	82
Tabelle F	In die Literatursuche (Sept. bis Nov. 2017) einbezogene Forschungseinrichtungen des Garten- und Gemüsebaus auf universitärer und Landesebene (Deutschland, Österreich, Schweiz), Gemüsebauverbände (Deutschland, Schweiz) und öffentliche Ämter des Bundes und der Kantone der Schweiz.....	83
Tabelle G	Suchbegriffskombinationen der Literatursuche via Google von Sept. bis Nov. 2017 .....	85
Tabelle H	Kulturspezifische Boden-Nitratstickstoffgehalte im Freilandgemüsebau nach der Ernte oder am Ende der Kulturfolge (Herbst).....	86
Tabelle I	Kumulierte Nitratfrachten im Freilandgemüsebau ermittelt mit der Saugkerzen-Methode .....	96
Tabelle J	Kumulierte Nitratfrachten im Freilandgemüsebau ermittelt mit der Lysimeter-Methode .....	97
Tabelle K	Kumulierte Nitratakkumulation im Freilandgemüsebau ermittelt mit Ionenakkumulatoren .....	99
Tabelle L	Modellbasierte Schätzungen der N-Verluste im Freilandgemüsebau .....	100
Tabelle M	Frischmasse und N-Gehalt der marktfähigen Ware und der Ernterückstände im Freilandgemüsebau .....	103
Tabelle N	Gemessene maximale vertikale Bodendurchwurzelung der Gemüsearten / -gruppen.....	105
Tabelle O	Mittlerer Gesamtwasserbedarf von Gemüsearten kultiviert an 10 deutschen Standorten (Augsburg, Braunschweig, Freiburg, Geisenheim, Köln, Leipzig, Nürnberg, Osnabrück, Schleswig und Schwerin) für die Jahre 1962 bis 2016.....	109
Tabelle P	Vor- und Nachteile der Bodenfeuchtemessung gegenüber der Geisenheimer-Steuerung.....	110
Tabelle Q	Charakterisierung verschiedener Zwischenfruchtarten in Bezug auf die N-Aufnahme.....	111
Tabelle R	Massnahmen zur Verminderung der Nitratauswaschung im Freilandgemüsebau .....	112