

**Wirkung einer ammonium- im Vergleich zu einer
nitratbetonten Stickstoffdüngung auf die Wurzelentwicklung,
den Ertrag und die Stickstoffeffizienz von Winterweizen unter
Feldbedingungen auf einem Schwarzerde-Standort**

Dissertation

zur Erlangung des
Doktorgrades der Naturwissenschaften (Dr. rer. nat.)

der

Naturwissenschaftlichen Fakultät III
Agrar- und Ernährungswissenschaften,
Geowissenschaften und Informatik

der Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg

vorgelegt von

Herrn Tobias Kirschke

Geboren am 22.05.1991 in Lutherstadt Wittenberg

Erstgutachter: Prof. Dr. Doris Vetterlein

Zweitgutachter: Prof. Dr. Timo Kautz

Verteidigung: 28. November 2022

Inhaltsverzeichnis

Kurzfassung	IV
Summary	VI
Abbildungsverzeichnis	VIII
Tabellenverzeichnis	X
Größen, Einheiten und Abkürzungen	XII
1 Einleitung und Zielsetzung	1
2 Stand des Wissens	5
2.1 Stickstoff als Pflanzennährstoff	5
2.1.1 Umsetzung von Stickstoff im Boden	5
2.1.2 Stickstoffdüngung und Stickstoffeffizienz	9
2.1.3 Möglichkeiten zur Verbesserung der Stickstoffeffizienz	11
2.1.3.1 Allgemein	11
2.1.3.2 Inhibitoren	12
2.2 Wurzeln als Pflanzenorgan	15
2.2.1 Funktion und Entwicklung von Pflanzenwurzeln	15
2.2.2 Einfluss der Stickstoffform auf die Wurzelentwicklung	17
2.2.3 Methoden zur Untersuchung der Wurzelentwicklung im Feld	20
3 Material und Methoden	25
3.1 Versuchsstandort	25
3.2 Versuchsaufbau und Durchführung	28
3.3 Untersuchungsmethoden und Analysen	29
3.3.1 Bodenanalysen	29
3.3.2 Labormodellversuch	29
3.3.3 Wachstum, Ertrag und N-Effizienz	30
3.3.4 Wurzeluntersuchungen	31
3.4 Statistische Analyse	35
4 Ergebnisse	36
4.1 Bodenparameter	36
4.2 Pflanzenentwicklung, Ertragsstruktur und Stickstoffeffizienz	42
4.3 Wurzelwachstum in Abhängigkeit von der N-Düngung und N-Düngerform	46
4.3.1 Bohrkernmethode	46
4.3.2 Core-break Methode	52
4.3.3 Minirhizotronmethode	54

5	Diskussion	58
5.1	Standort- und Versuchsbedingungen	58
5.2	Erzeugung einer NH_4^+ - und NO_3^- -betonten N-Versorgung	59
5.2.1	Modell	59
5.2.2	Freiland	61
5.3	Einfluss der mineralischen Stickstoffform auf die pflanzenbauliche Entwicklung von Winterweizen	64
5.3.1	Wurzel	64
5.3.2	Bestandsarchitektur und Ertragskomponenten	68
5.3.3	Ertrag und Stickstoffeffizienz	69
5.4	Methodische Grenzen	72
5.4.1	N_{min} -Analyse im Feld	72
5.4.2	Wurzeluntersuchung	74
5.4.2.1	Allgemein	74
5.4.2.2	Bohrkernmethode	76
5.4.2.3	Core-break Methode	78
5.4.2.4	Minirhizontrontechnik	79
6	Schlussfolgerung und Ausblick	82
7	Literatur	84
	Anhang	104
	Danksagung	111
	Curriculum vitae	112
	Eidenstattliche Erklärung / Declaration under Oath	113

Kurzfassung

Neben der Minderung von Stickstoff (N)-Verlusten bewirkt der Einsatz von Nitrifikationsinhibitoren (NI) im Zuge der N-Düngung eine vorübergehende Angleichung des sonst sehr weiten Ammonium/Nitrat-Verhältnisses im Wurzelraum. Bei Kombination eines NI mit Harnstoff (HS) wird die Ammonium (NH_4^+)-Phase im Boden deutlich verlängert und zeitgleich die Bildung von Nitrat (NO_3^-) reduziert, sodass im Wurzelraum eine ausgewogenere Mischung aus NH_4^+ und NO_3^- zur Verfügung steht. Im Vergleich zu einer nicht inhibierten und primär auf NO_3^- -basierten N-Versorgung kann eine gleichmäßigere Mischernährung aus NH_4^+ und NO_3^- das Pflanzenwachstum und insbesondere das Wurzelwachstum spezifisch verändern.

Ziel der vorliegenden Arbeit war es deshalb, die Wirkung einer NH_4^+ -betonten und einer NO_3^- -basierten N-Ernährung auf das Wurzelwachstum von Winterweizen in drei einjährigen Feldversuchen auf einem Schwarzerde-Standort zu vergleichen. Ein mit dem Ureaseinhibitor (UI) 2-NPT (N-(2-Nitrophenyl) phosphorsäuretriamid) sowie dem NI MPA (N-[3(5)-Methyl-1H-pyrazol-1yl)methyl]acetamid) doppelt inhibierter, granulierter HS (HS+UI+NI) repräsentierte die NH_4^+ -betonte Variante. Eine primär NO_3^- -basierte N-Versorgung wurde durch einen granulierten Kalkammonsalpeter (KAS) realisiert. Beide N-Dünger wurden einheitlich mit jeweils 180 kg N ha^{-1} eingesetzt, unterschieden sich jedoch hinsichtlich der Applikationsstrategie. Wie bei NI-Anwendung in Winterweizen üblich erfolgte die NH_4^+ -betonte Düngung (HS+UI+NI) in nur zwei Gaben (100 und 80 kg N ha^{-1}), während die Applikation von KAS auf insgesamt drei Termine (60 , 60 und 60 kg N ha^{-1}) aufgeteilt wurde.

Zur Erfassung der Wurzelentwicklung unter Feldbedingungen wurden zu den drei BBCH-Stadien 32, 37 und 65 volumetrische Bodenmonolithe (sog. Bohrkerne) mit einem Durchmesser von ca. 10 cm bis zu einer Tiefe von 80 cm entnommen und in 20 cm Segmente aufgeteilt. Die enthaltenen Wurzeln wurden von mineralischen und organischen Rückständen separiert und mittels der Software WinRHIZO[®] analysiert. Auf diesem Verfahren basieren die nachfolgend dargestellten Versuchsergebnisse. Im dritten Versuchsjahr wurde die Durchwurzelung innerhalb der Bodenmonolithe zusätzlich mittels der Core-break Methode untersucht. Des Weiteren wurde im dritten Versuchsjahr parallel zur Bohrkernmethode die Minirhizontrontechnik in Kombination mit einem Rundscanner zur in-situ Erfassung der Wurzelentwicklung mittels der line intersect Methode eingesetzt. Darüber hinaus wurde mittels N_{min} -Extraktion von Bodenproben die Entwicklung von NH_4^+ und NO_3^- im Boden untersucht. Zusätzlich zur Untersuchung von Wurzel- und Bodenproben erfolgte die Erfassung von Ertrag, Qualität und N-Effizienz des angebauten Winterweizens.

Die erfassten N_{min} -Gehalte beider N-Düngervarianten richteten sich grundsätzlich stark nach dem Entnahmezeitpunkt und der jeweils applizierten N-Düngermenge. Die hemmende Wirkung des NI auf die Nitrifikation konnte anhand höherer NH_4^+ -N-Konzentrationen bei HS+UI+NI gegenüber den

Werten von KAS weitestgehend bestätigt werden. Die ermittelten NH_4^+ -N-Konzentrationen bei HS+UI+NI erreichten Werte von bis zu 25 kg N ha^{-1} , während unter KAS-Düngung durchgehend geringe Konzentrationen von $\leq 7 \text{ kg N ha}^{-1}$ ermittelt wurden. Insgesamt stand den mit HS+UI+NI gedüngten Pflanzen somit eine ausgeglichene Mischung aus NH_4^+ und NO_3^- zur Verfügung, während die N-Ernährung der mit KAS gedüngten Pflanze nahezu ausschließlich auf NO_3^- basierte.

Ein signifikanter und sich wiederholender Effekt der abweichenden N_{min} -Versorgung und dem damit verbundenen Düngeregime von KAS und HS+UI+NI auf das Wurzelwachstum der Weizenpflanzen konnte nicht nachgewiesen werden. Lediglich zu ausgewählten Entwicklungsstadien konnten tendenzielle Unterschiede in der Wurzellängendichte (WLD) zwischen beiden N-Düngervarianten erfasst werden. Demnach förderte die auf NH_4^+ -basierte N-Düngung (HS+UI+NI) das Wurzelwachstum vorwiegend zum Schossen der Pflanzen, währenddessen die Wurzelentwicklung der mit NO_3^- -gedüngten Pflanzen verstärkt zur Blüte stimuliert wurde. Die erfassbaren Abweichungen zwischen den Varianten waren jedoch auf die oberen 40 cm des Bodenprofils begrenzt. In den darunterliegenden Bodenschichten waren sowohl die absoluten WLD als auch die Unterschiede zwischen den Varianten deutlich geringer. Somit ist die vom NH_4^+ ausgehende fördernde Wirkung auf das Wurzelwachstum, wie sie bereits in der Literatur für Labor- und Gefäßversuchen beschrieben wurde, unter den gegebenen Feldbedingungen nur schwach erkennbar. Auf den Ertrag und die N-Effizienz hatte die verlängerte NH_4^+ -Phase bei HS+UI+NI, verglichen mit der NO_3^- -Variante KAS, keinen eindeutigen Effekt. In den ersten zwei Versuchsjahren resultierte vor allem die Qualitätsgabe bei der KAS-Düngung in etwas höheren Rohproteingehalten. Die Ergebnisse zeigen aber auch, dass mit der Applikation eines doppelt stabilisierten HS-Düngers (HS+UI+NI) mit nur zwei Gaben prinzipiell vergleichbare Ertragsleistungen wie mit einem KAS-Dünger bei Drei-Gaben-Applikation erreicht werden können.

Die Ergebnisse zur Methodologie der Wurzelentwicklungsuntersuchungen offenbarten eindeutige Diskrepanzen zwischen den eingesetzten Verfahren. Lediglich die Anwendung der Bohrkernmethode mit anschließender Auswertung *via* WinRHIZO[®] führte zur repräsentativen Beantwortung der Versuchsfragestellung. Die Bestimmung der Wurzelintensität mittels Core-break Methode gab einen schnellen Überblick zur Durchwurzelung in einer definierten Bodentiefe zu einem definierten Zeitpunkt. Allerdings konnte, angesichts inhomogener und über die drei Beprobungstermine abnehmender Datensätze, eine prüfungspezifische Auswertung nicht durchgeführt werden. Die Minirhizotrontechnik stellte sich als ebenfalls nicht zielführender Ansatz zur Bewertung des Effektes verschiedener N-Düngerformen auf die Wurzelentwicklung heraus. Insbesondere durch den Einbau der Röhren in den Boden wurde das Wurzelwachstum massiv beeinflusst, sodass auf Grundlage der ausgewerteten Scanbilder keine repräsentative Aussage getroffen werden konnte.

Summary

The use of a nitrification inhibitor (NI) in combination with an urea fertilizer prolongs the ammonium (NH_4^+)-phase in the soil so that a more balanced mixture of nitrate (NO_3^-) and NH_4^+ is at least temporarily available for the plants. Compared to a non-inhibited and exclusively NO_3^- -based N supply, a balanced diet of NH_4^+ and NO_3^- can influence plant growth and specifically change the root growth in particular.

The objective of the present study was therefore to compare the effect of NH_4^+ - and NO_3^- -based N-nutrition on root growth of winter wheat in three one-year field trials on a chernozem site. A granular urea (HS) fertilizer (HS+UI+NI) amended with the urease inhibitor (UI) 2-NPT (N-(2-nitrophenyl) phosphoric triamide) and the NI MPA (N-[3(5)-methyl-1H-pyrazol-1yl) methyl]acetamide) represented the NH_4^+ -treatment. A granular calcium chloride nitrate (KAS) was used as the NO_3^- -variant. Both N-fertilizers were applied at total rate of 180 kg N ha^{-1} , but differed in temporal application strategy. HS+UI+NI was fertilized in two applications (100 and 80 kg N ha^{-1} ; common for NI-treated fertilizers in winter wheat), while the application of KAS was split into three single fertilizations ($60, 60$ and 60 kg N ha^{-1}). To determine root development under field conditions, volumetric soil monoliths (i. e. soil cores) with a diameter of approx. 10 cm and a depth of 80 cm were taken at BBCH stage 32, 37, and 65 and divided into 20 cm segments. The roots were separated from mineral and organic residues and analyzed with the software WinRHIZO[®]. The following test results are based on this method. In the third year of the experiment, rooting within soil monoliths was additionally determined by using the core-break method. Concomitantly to soil core sampling, plant root development was also studied in-situ by using the minirhizontron technique in combination with a circular scanner and evaluated by the line intersect method. In addition, NH_4^+ and NO_3^- within the rhizosphere was analyzed based on N_{min} -extraction of soil samples. Moreover, yield, quality and N-efficiency of winter wheat were also determined.

Basically, the N_{min} -contents of both N-fertilizer treatments strongly depended on the time of withdrawal and the N-fertilizer quantity applied in each case. The inhibitory effect of NI on nitrification was largely confirmed by higher NH_4^+ -N-concentrations in HS+UI+NI compared to the values of the KAS treatment. Determined NH_4^+ -N-concentrations of the HS+UI+NI treatment reached values of up to 25 kg N ha^{-1} , while for KAS consistently lower values of $\leq 7 \text{ kg N ha}^{-1}$ were found. Consequently, plants fertilized with HS+UI+NI received a more balanced mixture of NH_4^+ and NO_3^- , whereas the N-nutrition of the plant fertilized with KAS was almost exclusively based on NO_3^- .

In total, no significant and consistent effect on root growth of wheat plants was observed concerning different N-supply and associated fertilizers KAS and HS+UI+NI. Only at selected developmental stages, differences between root length density (WLD) of both N-fertilizers could be

revealed. Accordingly, the NH_4^+ -based N-fertilization (HS+UI+NI) predominantly promoted root growth at shooting of the plants, whereas the root development of the NO_3^- -fertilized plants was more stimulated at flowering stage. Those differences between the treatments were limited to the upper 40 cm of the soil. In the soil layers below, both the absolute WLD and the differences between the treatments were significantly lower. Thus, a consistent promoting effect on root growth based on pronounced NH_4^+ supply as described in the literature regarding laboratory and pot experiments, could not be confirmed for the given field conditions. Concerning yield and N-efficiency, prolonged NH_4^+ -phase had no pronounced effect in HS+UI+NI compared to the NO_3^- -treatment KAS. In the first two years of the trial, the final fertilizer application of KAS led to slightly higher crude protein contents. However, results also show that urea stabilized with UI and NI and therefore fertilized by two split-applications could achieve a similar yield performance as KAS fertilized by three single fertilizer applications.

The results on root development revealed clear discrepancies between applied methods. Only soil core sampling with subsequent evaluation *via* WinRHIZO[®] provided a representative answer to the research question. The determination of the root intensity by means of the core-break method gave a quick overview of the root penetration in a defined soil depth at a defined time. However, due to inhomogeneous and decreasing data sets over the three sampling dates, a test member specific evaluation could not be performed. The minirhizotron technique also turned out to be a non-target approach to evaluate the effect of different forms of N-fertilizer on root development. In particular, root growth was massively influenced by the installation of the tubes in the soil, so that no representative statement could be made on the basis of the evaluated scan images.

Abbildungsverzeichnis

- Abbildung 2.1-1:** Funktionsweise eines Nitrifikationsinhibitors bei der Nitrifikation (verändert nach Benckiser et al. 2013). **14**
- Abbildung 2.2-1:** Skizze eines Minirhizotronsystemes zur Wurzeluntersuchung (Vamerali et al. 2012)..... **23**
- Abbildung 4.1-1:** Dynamik der NH_4^+ -N-Konzentration in den Böden aus den drei Versuchsjahren 2013/2014, 2014/2015 und 2015/2016 nach einer Düngung mit Harnstoff (HS) und HS mit Urease- (UI) und Nitrifikationsinhibitor (NI) (HS+UI+NI) unter kontrollierten Laborbedingungen bei 20 °C (n = 3). Sternchen (*) kennzeichnen signifikante Unterschiede ($p \leq 0,05$) zwischen den N-Düngerformen innerhalb eines Bodens (Jahr). **36**
- Abbildung 4.1-2:** Mineralischer Stickstoffgehalt (N_{\min}) in den Bodentiefen 0–30, 30–60 und 60–90 cm bei eine ungedüngte Kontrolle sowie den zwei mineralischen Stickstoffdüngern Kalkammonsalpeter (KAS) und einem mit Urease- und Nitrifikationsinhibitor versetzten Harnstoff (HS+UI+NI) zu drei Terminen im Vegetationsverlauf in den Versuchsjahren 2013/2014, 2014/2015 und 2015/2016 (n = 4). Kleinbuchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede ($p \leq 0,05$) zwischen den Prüfgliedern innerhalb einer Bodentiefe, Großbuchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede ($p \leq 0,05$) zwischen den Prüfgliedern in der gesamten untersuchten Bodentiefe für jeden Termin. ns = nicht signifikant, N/A = nicht verfügbar. **38**
- Abbildung 4.1-3:** Verlauf des Bodenwassergehaltes der Ackerkrume (0–30 cm) bei einer ungedüngte Kontrolle sowie den zwei mineralischen Stickstoffdüngern Kalkammonsalpeter (KAS) und einem mit Urease- und Nitrifikationsinhibitor versetzten Harnstoff (HS+UI+NI) zu drei Terminen im Vegetationsverlauf in den Versuchsjahren 2013/2014, 2014/2015 und 2015/2016. Dargestellt sind die Mittelwerte aus vier Wiederholungen sowie deren Standardfehler. Kleinbuchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede ($p \leq 0,05$) zwischen den Prüfgliedern innerhalb eines Termins und eines Versuchsjahres. **41**
- Abbildung 4.3-1:** Erfasste Wurzellängendichte (WLD) von Winterweizen zum BBCH 32, BBCH 37 und BBCH 65 in den drei Versuchsjahren 2013/2014, 2014/2015 und 2015/2016 bei unterschiedlicher N-Düngung mit Kalkammonsalpeter (KAS) und einem mit Urease- und Nitrifikationsinhibitor versetzten Harnstoff (HS+UI+NI) im Vergleich zu einer ungedüngten Kontrolle in Abhängigkeit von der Bodentiefe sowie die vertikale Verteilung der Wurzelfraktion (Y) und der Wurzelverteilungskoeffizient β . Dargestellt sind die mittels Bohrkernmethode erfassten Mittelwerte aus vier Wiederholungen und die Standardfehler. Verschiedene Kleinbuchstaben kennzeichnen signifikante Differenzen zwischen den Varianten innerhalb einer Tiefe, eines Termins und eines Versuchsjahres ($p \leq 0,05$). ns = nicht signifikant, N/A = nicht verfügbar..... **47**
- Abbildung 4.3-2:** Beziehungen zwischen den erzielten Werten mit der Core-break Methode (Abszisse) und der Wurzellängendichte (WLD, Ordinate) zu verschiedenen BBCH-Stadien im Versuchsjahr 2015/2016. Die Regressionslinien wurden mit der quadratischen Formel $y = (c + dx)^2$ aus den Mittelwerten aller Datenpaare berechnet. **54**

- Abbildung 4.3-3:** Vertikale Verteilung der Wurzelintensität (A–C) entlang von Minirhizontronröhren bis zu einer Bodentiefe von 75 cm von Winterweizen zum BBCH 32, BBCH 37 und BBCH 65 in dem Versuchsjahr 2015/2016 bei unterschiedlicher N-Düngung mit Kalkammonsalpeter (KAS) und einem mit Urease- und Nitrifikationsinhibitor versetzten Harnstoff (HS+UI+NI) im Vergleich zu einer ungedüngten Kontrolle in Abhängigkeit von der Bodentiefe sowie die vertikale Verteilung der Wurzelfraktion (Y) und der Wurzelverteilungskoeffizient β (D–F). Dargestellt sind die mittels Minirhizontrontechnik erfassten Mittelwerte aus vier Wiederholungen und die Standardfehler. Verschiedene Kleinbuchstaben kennzeichnen signifikante Differenzen zwischen den Varianten innerhalb einer Tiefe und eines Termins ($p \leq 0,05$). ns = nicht signifikant. 55
- Abbildung 4.3-4:** Scanbilder entlang von Minirhizontronröhren aus den Bodentiefen 15–30 (A) und 45–60 cm (B) der ungedüngten Kontrolle zu den BBCH-Stadien 32, 37 und 65. Die roten Pfeile kennzeichnen jene Regionen mit Zuwächsen (A) bzw. Verlusten (B) an sichtbaren Wurzeln im Versuchsverlauf. 56
- Abbildung 4.3-5:** Beziehung zwischen der flächenbezogenen Wurzellängendichte (FWLD), ermittelt mittels der Software RootSnap! (Abszisse) und der Wurzelintensität, ermittelt via line intersect Methode (Ordinate) zum BBCH 32 im Versuchsjahr 2015/2016. Die Regressionslinie wurde mit der linearen Formel $y = a + dx$ aus den Mittelwerten aller Datenpaare berechnet. ($n=120$). 57
- Abbildung A-1:** Verlauf des BBCH-Stadiums von Winterweizen in den drei Versuchsjahren 2013/2014, 2014/2015 und 2015/2016 bei unterschiedlicher N-Düngung mit Kalkammonsalpeter (KAS) und einem mit Urease- und Nitrifikationsinhibitor versetzten Harnstoff (HS+UI+NI) im Vergleich zu einer ungedüngten Kontrolle. Dargestellt sind Mittelwerte aus vier Wiederholungen. 106
- Abbildung A-2:** Verlauf des Höhenwachstums von Winterweizen in den drei Versuchsjahren 2013/2014, 2014/2015 und 2015/2016 bei unterschiedlicher N-Düngung mit Kalkammonsalpeter (KAS) und einem mit Urease- und Nitrifikationsinhibitor versetzten Harnstoff (HS+UI+NI) im Vergleich zu einer ungedüngten Kontrolle. Dargestellt sind Mittelwerte aus vier Wiederholungen. 107
- Abbildung A-3:** Beziehungen zwischen dem Strohertrag (Abszisse) und der Stickstoffkonzentration im Stroh (Ordinate) aller drei Prüfglieder in den Versuchsjahren 2013/2014, 2014/2015 und 2015/2016. Die Regressionslinien wurden mit der linearen Formel $y = a + bx$ aus den Werten aller Datenpaare berechnet. 108

Tabellenverzeichnis

Tabelle 3.1-1:	Bodeneigenschaften am Standort Merbitz in den Versuchsjahren 2013/2014, 2014/2015 und 2015/2016 in einer Tiefe von 0–30 cm.....	25
Tabelle 3.1-2:	Monatliche Durchschnittstemperatur und Niederschlagsmenge der drei Versuchsjahre 2013/2014, 2014/2015 und 2015/2016 sowie das 30-jährige Mittel (1981–2010) am Standort Merbitz.	27
Tabelle 3.2-1:	Maßnahmen und deren Durchführungszeitpunkt gegliedert nach Teilparzellen.	28
Tabelle 4.1-1:	Ammonium-(NH ₄ ⁺) und Nitratgehalt (NO ₃ ⁻) sowie der gesamte mineralischer Stickstoffgehalt (N _{min}) in der Bodentiefe 0–90 cm (1. Termin) bzw. 0–60 cm (2 + 3 Termin) sowie der prozentuale NH ₄ ⁺ -Anteil bei einer ungedüngte Kontrolle sowie den zwei mineralischen Stickstoffdüngern Kalkammonsalpeter (KAS) und einem mit Urease- und Nitrifikationsinhibitor versetzten Harnstoff (HS+UI+NI) zu drei Terminen im Vegetationsverlauf in den Versuchsjahren 2013/2014, 2014/2015 und 2015/2016 (n = 4). Kleinbuchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede (p ≤ 0,05) zwischen den Prüfgliedern innerhalb eines Termins und Versuchsjahrs. N/A = nicht verfügbar.....	40
Tabelle 4.2-1:	Ertragsbildende Komponenten von Weizenpflanzen einer ungedüngten Kontrolle sowie den zwei mineralischen Stickstoffdüngern Kalkammonsalpeter (KAS) und einem mit Urease- und Nitrifikationsinhibitor versetzten Harnstoff (HS+UI+NI) in den Versuchsjahren 2013/2014, 2014/2015 und 2015/2016 (n = 4). Unterschiedliche Buchstaben innerhalb einer Spalte kennzeichnen signifikante Differenzen zwischen den Varianten eines Versuchsjahres (p < 0,05).	43
Tabelle 4.2.2:	Korn- und Strohertrag sowie Rohproteingehalt (RPG) von Weizenpflanzen sowie das N-Saldo, der Harvestindex (HI), N-Harvestindex (NHI) und N-Verwertungseffizienz (NUE) einer ungedüngten Kontrolle sowie den zwei N-Düngern Kalkammonsalpeter (KAS) und einem mit Urease- und Nitrifikationsinhibitor versetzten Harnstoff (HS+UI+NI) in den Versuchsjahren 2013/2014, 2014/2015 und 2015/2016 sowie deren arithmetischer Mittelwert. Dargestellt sind die Mittelwerte und Standardfehler aus vier Wiederholungen. Unterschiedliche Kleinbuchstaben innerhalb einer Spalte kennzeichnen Differenzen zwischen den Varianten eines Versuchsjahres (p < 0,05). TS = Trockensubstanz.....	44
Tabelle 4.3-1:	Relevante Wurzelparameter nach einer mineralischen Stickstoffdüngung mit Kalkammonsalpeter (KAS) und einem mit Urease- und Nitrifikationsinhibitor versetzten Harnstoff (HS+UI+NI) im Vergleich zu einer ungedüngten Kontrolle in Abhängigkeit von der Bodentiefe zu den BBCH-Stadien 32, 37 und 65 im Versuchsjahr (2015/2016 n = 4). Dargestellt sind die mittels Bohrkernmethode erfassten Mittelwerte aus vier Wiederholungen. Kleinbuchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede (p ≤ 0,05) zwischen den Prüfgliedern innerhalb einer Bodentiefe, Großbuchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede (p ≤ 0,05) zwischen den Bodentiefen innerhalb eines Prüfgliedes für jeden Termin. WTMD = Wurzeltrockenmassendichte, SWL = spezifische Wurzellänge, MWD = mittlerer Wurzeldurchmesser, WGD = Wurzelgewebedichte.	51
Tabelle 4.3-2:	Größen für eine lineare und nicht-lineare Regression zwischen den Daten der Core-break Methode und Wurzellängendichte zu den BBCH-Stadien 32, 37 und 65 im Versuchsjahr 2015/2016.....	53
Tabelle A-1:	Pflanzenschutzmaßnahmen in dem Versuchsjahr 2013/2014.	104

Tabelle A-2:	Pflanzenschutzmaßnahmen in dem Versuchsjahr 2014/2015.	104
Tabelle A-3:	Pflanzenschutzmaßnahmen in dem Versuchsjahr 2015/2016.	104
Tabelle A-4:	Zeitpunkte im Kalenderjahr der durchgeführten Maßnahmen und Beprobung in den Versuchsjahren 2013/2014, 2014/2015 und 2015/2016.	105
Tabelle A-5:	Zeitpunkt an dem 50% der applizierten N-Menge (10 mg N pro 100 g Boden) einer Düngung mit Harnstoff (HS) und HS mit Urease- (UI) und Nitrifikationsinhibitor (NI) (HS+UI+NI) unter kontrollierten Laborbedingungen (20 °C) zu NO ₃ ⁻ umgesetzt waren (t ₅₀ NO ₃ ⁻ -Wert) sowie die Relation beider N-Varianten zueinander. Untersucht wurden die Böden aus den drei Versuchsjahren 2013/2014, 2014/2015 und 2015/2016.	105
Tabelle A-6:	Relevante Wurzelparameter nach einer mineralischen N-Düngung mit Kalkammonsalpeter (KAS) und einem mit Urease- und Nitrifikationsinhibitor versetzten Harnstoff (HS+UI+NI) im Vergleich zu einer ungedüngten Kontrolle in Abhängigkeit von der Bodentiefe zu den BBCH-Stadien 32, 37 und 65 im Versuchsjahr 2013/2014. Kleinbuchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede ($p \leq 0,05$) zwischen den Prüfgliedern innerhalb einer Bodentiefe, Großbuchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede ($p \leq 0,05$) zwischen den Bodentiefen innerhalb eines Prüfgebietes für jeden Termin. N/A = nicht verfügbar. WTMD = Wurzelrockenmassendichte, SWL = spezifische Wurzellänge, MWD = mittlerer Wurzeldurchmesser, WGD = Wurzelgewebedichte.	109
Tabelle A-7:	Relevante Wurzelparameter nach einer mineralischen N-Düngung mit Kalkammonsalpeter (KAS) und einem mit Urease- und Nitrifikationsinhibitor versetzten Harnstoff (HS+UI+NI) im Vergleich zu einer ungedüngten Kontrolle in Abhängigkeit von der Bodentiefe zu den BBCH-Stadien 32 und 37 im Versuchsjahr 2014/2015. Kleinbuchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede ($p \leq 0,05$) zwischen den Prüfgliedern innerhalb einer Bodentiefe, Großbuchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede ($p \leq 0,05$) zwischen den Bodentiefen innerhalb eines Prüfgebietes für jeden Termin. WTMD = Wurzelrockenmassendichte, SWL = spezifische Wurzellänge, MWD = mittlerer Wurzeldurchmesser, WGD = Wurzelgewebedichte.	110

Größen, Einheiten und Abkürzungen

Al	Aluminium
AMO	Ammonium-Mono-Oxygenase
Aq	gelöst
BBCH	Biologische Bundesanstalt für Land- und Forstwirtschaft, Bundessortenamt und Chemischen Industrie (Morphologisches Entwicklungsstadium einer Pflanze)
bez.	bezogen
BS	Basensättigung
C	Kohlenstoff
CaCl ₂	Calciumchlorid
cmol	Zentimol (Stoffmenge)
C _{org}	organischer Kohlenstoff
Cu	Kupfer
DCD	Dicyandiamid
DMPP	3,4-Dimethylpyrazolphosphat
dpi	dots per inch (Bildauflösungseinheit)
dt	Dezitonne (Gewichtseinheit)
Fe	Eisen
FWLD	flächenbezogene Wurzellängendichte
g	Gramm (Gewichtseinheit)
H	Wasserstoff
ha	Hektar (Flächeneinheit)
HATS	high affinity transport system (engl.)
HI	Harvestindex
H ₂ O	Dihydrogenmonoxid (Wasser)
HS	Harnstoff
H ₂ SO ₄	Schwefelsäure
K	Kalium
KAS	Kalkammonsalpeter
KCl	Kaliumchlorid
kg	Kilogramm (Gewichtseinheit)

km	Kilometer (Längeneinheit)
lfd. m	laufender Meter
L	Liter (Volumeneinheit)
LATS	low affinity transport system (engl.)
M	Molar (Stoffkonzentration)
m	Meter (Längeneinheit)
M.-%	Masseprozent
Mg	Magnesium
mg	Milligramm (Gewichtseinheit)
mm	Millimeter (Längeneinheit)
µm	Mikrometer (Längeneinheit)
Mn	Mangan
3-MP	3-Methylpyrazol
MPA	N-[3(5)-Methyl-1H-pyrazol-1-yl)methyl]acetamid
MWD	mittlerer Wurzeldurchmesser
n	Stichprobenanzahl
N	Stickstoff
N ₂	Distickstoff (Luftstickstoff)
NBPT	N-(n-Butyl)-thiophosphortriamid
NHI	Stickstoffharvestindex
NH ₃	Ammoniak
NH ₄ ⁺	Ammonium
NH ₂ OH	Hydroxylamin
NI	Nitrifikationsinhibitor
N _{min}	Mineralischer Stickstoff im Boden
NO ₂ ⁻	Nitrit
NO ₃ ⁻	Nitrat
N ₂ O	Distickstoffmonoxid (Lachgas)
2-NPT	N-(2-Nitrophenyl)phosphorsäuretriamid
Nr.	Nummer
NUE	Stickstoff-Nutzungseffizienz

NU _p E	Stickstoff-Aufnahmeeffizienz
NU _t E	Stickstoff-Verwertungseffizienz
P	Phosphor
PET	Polyethylenterephthalat
pH	negativer dekadischer Logarithmus der Wasserstoffionen-Konzentration
ppb	parts per billion (engl.)
PTM	Pflanzentrockenmasse
r ²	Bestimmtheitsmaß
RPG	Rohproteingehalt
Slu	schluffig-lehmiger Sand
SWL	spezifische Wurzellänge
STM	Sprosstrockenmasse
TKG	Tausendkorngewicht
TM	Trockenmasse
TS	Trockensubstanz
UA	Ureaseaktivität
UI	Ureaseinhibitor
Ut ₄	stark toniger Schluff
V	Volumen
WBD	Wissenschaftlichen Beirat für Düngungsfragen
WGD	Wurzelgewebebedichte
WK _{max}	maximale Wasserkapazität
WL	Wurzellänge
WLD	Wurzellängendichte
WTM	Wurzeltrockenmasse
WTMD	Wurzeltrockenmassendichte
WV	Wurzelvolumen
Zn	Zink
°	Grad (Winkeleinheit)
°C	Grad Celsius (Temperatureinheit)

1 Einleitung und Zielsetzung

Um den steigenden Bedarf an Nahrungsmitteln abzudecken, steht die Landwirtschaft zunehmend unter dem Druck die Produktion zu erhöhen und gleichzeitig die Verluste von Nährstoffen und somit negative Auswirkungen auf die Umwelt zu verringern (Crute & Muir 2011). Bei einer für das Jahr 2050 prognostizierten Weltbevölkerung von 9 Milliarden Menschen wäre zur Sicherstellung der Nahrungsgrundlage eine Steigerung der landwirtschaftlichen Produktivität um 70 bis 100% notwendig (Godfray et al. 2010). Der Makronährstoff Stickstoff (N) ist dabei ein essentieller Baustein des Pflanzenwachstums und zugleich häufig einer der limitierenden Faktoren für die Pflanzenproduktion (Blumenthal et al. 2008). Zur Verbesserung der Wachstumsbedingungen auf landwirtschaftlichen Böden wird N hauptsächlich in Form von Mineraldünger appliziert, wenngleich in viehhaltenden Regionen die organische Düngung ebenfalls einen relevanten Beitrag leistet (Verzeaux et al. 2017). Die Basis für den heutigen Einsatz von synthetischen N-Düngern legten Fritz Haber und Carl Bosch zu Beginn des 20. Jahrhunderts. Durch das nach ihnen benannte Haber-Bosch-Verfahren kann Ammoniak (NH_3) unter sehr hohen Drücken und Temperaturen in Gegenwart von Eisen (Fe) aus Luftstickstoff (N_2) synthetisiert werden. Diese Entdeckung führte zu einem erheblichen Anstieg der Produktivität von Kulturpflanzen (Tilman et al. 2002; Erisman et al. 2008). Derzeit sind etwa 50% der produzierten Nahrungsproteine, bei weiterhin steigendem Trend, auf den Einsatz von synthetischen N-Düngern zurückzuführen (Erisman et al. 2008). Innerhalb der vergangenen sieben Jahrzehnten stieg nicht nur der Verbrauch von synthetischen N-Dünger in der Landwirtschaft, von 11,8 Tg in 1961 auf 107,7 Tg in 2017, um mehr als das Neunfache an (IFA 2018), sondern änderte sich zugleich die eingesetzte dominierende N-Form. Während Harnstoff (HS) im Jahr 1960 lediglich ca. 5% der global verwendeten N-Düngermenge ausmachte, stellt dieser N-Dünger aktuell die vorherrschende N-Form dar (Glibert et al. 2006). Ein HS-Dünger verfügt über einen hohen N-Gehalt und weist somit geringe Kosten je Einheit N im Vergleich zu anderen N-Formen auf, ist sicher in Bezug auf den Transport und die Lagerung sowie einfach in der Anwendung (Zaman et al. 2013; Li et al. 2015). Analog zu organischen N-Düngern aus natürlichen Quellen hydrolysiert das ubiquitär im Boden vorhandene Enzym Urease den HS zu Ammonium (NH_4^+), welches anschließend durch NH_3 und Nitrit (NO_2^-) oxidierende Bakterien und NH_3 oxidierende Archaeen zu Nitrat (NO_3^-) transformiert wird (Beeckman et al. 2018). In Deutschland wird entgegen des globalen Trends der N-Düngerbedarf hauptsächlich über den Nitratdünger Kalkammonsalpeter (KAS, $\approx 37\%$) abgedeckt, während der Anteil von HS ca. 16% beträgt (IVA 2020). Jene Werte unterliegen jährlichen Schwankungen von 5–10%.

Von der applizierten N-Menge nehmen Getreidepflanzen wie Weizen auf globaler Ebene lediglich zwischen 35 bis 65% auf (Herrera et al. 2016), währenddessen ein beträchtlicher Teil aus dem landwirtschaftlichen System, mit teils tiefgreifenden Belastungen für terrestrische und aquatische Ökosystemen, verloren geht (Cameron et al. 2013; Coskun et al. 2017). Die N-Verluste

aus dem Bodensystem können über mehrere Wege erfolgen, wie z. B. in Richtung der Atmosphäre als gasförmige Emissionen über die Verflüchtigung von NH_3 , *via* Nitrifikation als N_2O oder N_2 und in Richtung des Grundwassers durch Auswaschung von NO_3^- (Abbasi et al. 2003). Zudem kann das NO_3^- bei Starkniederschlägen oder unter wassergesättigten Bodenbedingungen oberflächlich oder oberflächennah in Bäche, Seen oder Flüsse lateral transportiert werden (Widdison & Burt 2008).

Um die Verluste beim Einsatz von mineralischen N-Düngern zu reduzieren ohne die N-Versorgung der Pflanzen zu beeinträchtigen, bedarf es einer Steigerung der N-Effizienz. Zu den Möglichkeiten die Effizienz von N-Düngern zu verbessern, zählt unter praktischen Bedingungen neben einer geeigneten Bodenbearbeitung und Fruchtfolge insbesondere ein optimiertes und an den Standort angepasstes N-Düngermanagement (Ladha et al. 2005). Einen innovativen Ansatz stellt in diesem Zusammenhang die Behandlung von HS-Düngergranalien mit Ureaseinhibitoren (UI) und Nitrifikationsinhibitoren (NI) dar. Der UI verlangsamt die HS-Hydrolyse, verbunden mit einer Verringerung von NH_3 -Emissionen (Li et al. 2015), und einem zwei- bis dreifachen verlängerten Umsatz von HS (Trenkel 2010). Der zeitgleiche Einsatz eines NI hemmt die Nitrifikation von NH_4^+ zu NO_2^- und somit die Bildung von NO_3^- durch die Oxidation von NO_2^- , wodurch die NH_4^+ -Phase im Boden verlängert wird (Ruser & Schulz 2015). Höhere Mengen des Kations NH_4^+ , welches gut an negativen Oberflächen von Tonmineralen und Humus sorbiert, und geringere Mengen des leicht löslichen und mobilen Anions NO_3^- verringern die Gefahr von Auswaschung sowie Denitrifikation und ermöglichen eine Zusammenlegung von N-Gaben (Barth et al. 2008; Ni et al. 2014; Ruser & Schulz 2015). Andere N-Dünger wie KAS liegen bereits zur Hälfte als NO_3^- vor, sodass die Umwandlung vom NH_4^+ zum NO_3^- nicht bzw. nur zu Teilen stabilisiert werden kann. Dies verstärkt die Risiken von Verlusten bei wassergesättigten Böden sowie nach Niederschlagsereignissen und erhöht die Anzahl notwendiger Applikationstermine.

Vorangegangene Studien haben gezeigt, dass eine auf NH_4^+ -basierende Pflanzenernährung, im Vergleich zu einer NO_3^- betonten N-Düngung, abweichende Reaktionen in der Rhizosphäre hervorruft und u. a. den pH-Wert absenkt (Ruan et al. 2007). Eine Ansäuerung der Rhizosphäre kann insbesondere auf alkalischen und neutralen bis leicht sauren Böden die Verfügbarkeit und Aufnahme von P sowie von den Mikronährestoffen verbessern (Thomson et al. 1993). Unter Laborbedingungen konnte zudem eine vom NH_4^+ ausgehende stimulierende Wirkung auf das Wachstum und die Morphologie der Wurzeln festgestellt werden (Lima et al. 2010; Blaser et al. 2020). Im Speziellen nahm in diesen Studien mit Tomate und Gerste die Verzweigung der Seitenwurzeln zu. Die Beobachtungen der Wurzeln in den Labor- und Gefäßversuchen konzentrierten sich bisher häufig auf die erste Entwicklungsphase der Pflanzen (z. B. Drew 1975; Ogawa et al. 2014; Rabbi et al. 2017; Blaser et al. 2020), während die Wirkung einer verlängerten NH_4^+ -Phase auf die Wurzelentwicklung der Pflanzen im weiteren Vegetationsverlauf unbeantwortet blieben. Zudem fanden jene

Untersuchungen unter Modellbedingungen statt, welche von den natürlichen Boden- und Nährstoffverhältnissen deutlich abweichen und daher nur bedingt auf die Feldebene übertragbar sind.

In vergangenen Feldstudien zur Wurzelentwicklung landwirtschaftlicher Kulturpflanzen mit mineralischen N-Düngern wurde hauptsächlich der Einfluss der N-Applikationsmengen in N-Steigerungsversuchen untersucht (z. B. Wang et al. 2014; Xue et al. 2014; Rasmussen et al. 2015). In den Untersuchungen von Wang et al. (2016) wurde über die Wahl des N-Düngers zudem eine NH_4^+ sowie NO_3^- Versorgung generiert und die Wurzeln an mehreren Terminen im Vegetationsverlauf beprobt. Allerdings konzentrierten sich die Beobachtungen lediglich auf den Oberboden und die Wurzelrockenmasse (WTM) als Parameter. Weitere relevante Kenngrößen wie die Wurzellänge (WL) und der Wurzelradius (WR) sowie die Wurzelentwicklung in tieferen Bodenschichten blieben unberücksichtigt. Nach derzeitigem Forschungsstand konnte nicht eindeutig belegt werden, dass eine höhere NH_4^+ -Konzentration bzw. verlängerte NH_4^+ -Phase auch unter Feldbedingungen positive Effekte auf die Wurzelentwicklung von Kulturpflanzen wie Winterweizen hat.

- Folglich besteht der Schwerpunkt dieser Arbeit darin, die Erkenntnislücke zwischen den Ergebnissen aus dem Labor und jenen unter praxisnahen Feldbedingungen zu schließen. Dies gilt sowohl für die Erzeugung einer NH_4^+ -betonten N-Versorgung als auch deren Wirkung auf die Wurzeln im Vergleich zu einer NO_3^- -basierten N-Ernährung. Die Basis für die Bewertung des Einflusses verschiedener N-Düngerformen auf die Wurzelentwicklung legen hierbei einerseits das destruktive Verfahren der Bohrkernmethode und andererseits die nicht-destruktive Herangehensweise mittels Minirhizotronentechnik. Abschließend soll die Repräsentativität der Ergebnisse aus jenen Ansätzen bewertet werden.

Zudem wurde in anderen Studien nachgewiesen, dass durch die Behandlung von HS-Dünger mit UI und NI nicht nur der N-Bedarf von Pflanzen über einen längeren Zeitraum abgesichert ist, sondern zugleich zu einer Steigerung des Ertrages und der N-Effizienz führen kann (zusammengefasst von Abalos et al. 2014). Als Referenzvariante wurde darin in den meisten Fällen ein unbehandelter HS-Dünger mit analogem Düngeregime gewählt. Währenddessen liegen derzeit keine Informationen über die Effekte eines stabilisierter HS-Dünger im Vergleich zu einem KAS-Dünger bei abweichendem Düngeregime auf den Ertrag und die N-Effizienz vor. Dies ist insofern relevant, da mittels des Einsatzes von UI und NI zu HS die Transformationsprozesse im Boden gehemmt werden (Trenkel 2010) und dadurch höhere N-Mengen in einer Gabe zusammengefasst werden können als bei einer nicht stabilisierten Düngung mit beispielsweise KAS. Die damit einhergehenden verschiedenen Düngeregime führen speziell während der vegetativen Pflanzenentwicklung zu einer temporären Abweichung der N-Gehalte im Boden und somit auch zu einer differenzierten N-Versorgung der Pflanzen.

- Dementsprechend ist ein weiteres Ziel dieser Studie zu untersuchen, inwieweit sich die beiden N-Düngerformen KAS und ein mit UI und NI stabilisierter HS sowie deren damit verbundenen Düngeregime auf das vegetative und generative Pflanzenwachstum, den Ertrag, die Qualität und die N-Effizienz von Winterweizen auswirken.

2 Stand des Wissens

2.1 Stickstoff als Pflanzennährstoff

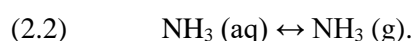
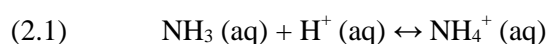
Stickstoff ist, nach Kohlenstoff (C), Sauerstoff (O) und Wasserstoff (H) quantitativ das wichtigste Element in Pflanzen und beeinflusst entscheidend deren Physiologie, Wachstum und Entwicklung. Beispielsweise ist N als Makronährstoff essentieller Bestandteil von Proteinen, Nucleinsäuren sowie Chlorophyll und maßgebend an der Bildung von Aminosäuren, Eiweiß und Vitamin B beteiligt (Schilling 2000; Knittel et al. 2012). Für ein optimales Pflanzenwachstum wird N in umfangreichen Mengen benötigt (Ladha et al. 2016). Eine unzureichende N-Versorgung beeinträchtigt die Fotosyntheserate, reduziert die Anzahl von Proteinen und unterdrückt die Zellfunktionalität (Sinclair & Rufty 2012).

2.1.1 Umsetzung von Stickstoff im Boden

Der Anteil des Bodenstickstoffs in der Krume (0–30 cm) von Ackerböden schwankt meist zwischen 2.000 bis 8.000 kg N ha⁻¹, wovon ca. 90% organisch gebunden sind (Knittel et al. 2012). Durch Auf-, Um- und Abbauprozesse werden aus dem organischen Material kontinuierlich anorganische N-Verbindungen wie NH₄⁺ und NO₃⁻ gebildet (Barker & Bryson 2016). Letztere können sowohl bei der Bodenmineralisation als auch bei der Umsetzung von N-Düngern als NO₃⁻ ausgewaschen oder in Form von Distickstoffmonooxid (N₂O), Ammoniak (NH₃) und molekularem Stickstoff (N₂) als gasförmige Emissionen verloren gehen. Diese Verluste sind mit negativen Folgen für die Umwelt verbunden. Sie führen beispielsweise zur Eutrophierung von Gewässern, zur Verschlechterung der Trinkwasserqualität von Grundwässern, zur Bodenversauerung und sind klimawirksam (Cameron et al. 2013).

Ammonifikation

Das NH₃ entsteht unter natürlichen Bedingungen als Nebenprodukt bei der Mineralisierung von organischer Substanz zu NH₄⁺ sowie bei der Hydrolyse von Harnstoff (HS) (Cameron et al. 2013). Das ubiquitär im Boden vorhandene Enzym Urease katalysiert die Hydrolyse und spaltet den grundsätzlich sehr stabilen HS über den Zwischenschritt der Carbamidsäure in zwei Moleküle NH₃ und ein Molekül Kohlensäure (Sigurdarson et al. 2018). Die Geschwindigkeit der Ammonifikation bzw. die Aktivität des Enzyms Urease wird maßgeblich von der Temperatur und Feuchte im Boden beeinflusst (Cantarella et al. 2018). Das gelöste (aq) NH₃ steht einerseits im ständigen Gleichgewicht mit seiner protonierten Form, dem NH₄⁺, und kann andererseits leicht in die gasförmige (g) Phase übergehen (Sigurdarson et al. 2018):

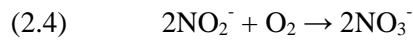
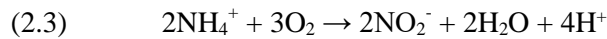


NH₃-Verluste treten bei einer Verschiebung des NH₃:NH₄⁺-Verhältnisses, insbesondere hervorgerufen durch eine Erhöhung des pH-Wertes und der NH₄⁺-Konzentration, auf (Sommer et al. 2004; Ni et al. 2014). Auf neutralen Böden (pH-Wert 7) können bereits signifikante NH₃-Mengen ausgasen, sodass kontinuierlich neues NH₃ aus dem NH₄⁺ nachgeliefert werden muss. Angesichts des chemischen Gleichgewichtes sinkt mit steigender Volatilität des NH₃ die Konzentration von NH₄⁺ im Boden (Cameron et al. 2013). Indes führt die Sorption des Kations NH₄⁺ an negativ-geladenen Bodenpartikeln, wie beispielsweise Tonminerale und Humus, zu einer Verringerung der NH₄⁺-Konzentration in der Bodenlösung und folglich zu geringeren NH₃-Verlusten (Sigurdarson et al. 2018). Für die Bildung von NH₃ sind zusätzlich der Bodenwassergehalt (BWG), die Temperatur, die Bodeneigenschaften (z. B. Bodenart, pH-Wert, Kationenaustauschkapazität (KAK)), die Windgeschwindigkeit sowie die Existenz von Pflanzen ausschlaggebend (Cameron et al. 2013; Ohnemus et al. 2021).

NH₃-Emissionen implizieren nicht nur einen ökonomischen Verlust für den Landwirt, hervorgerufen durch geringere Erträge oder einem höheren Bedarf an N-Düngern, sondern umfassen ebenso diverse Risiken für die Umwelt. Volatiles NH₃ kann entweder in gelöster Form als feuchte Deposition oder partikular als trockene Deposition der Erdoberfläche zurückgeführt werden (Cameron et al. 2013). Jene diffusen NH₃-Einträge führen zur Eutrophierung terrestrischer sowie aquatischer Ökosysteme und tragen durch weitere Umsetzungsprozesse zur Bodenversauerung sowie aufgrund anaerober Bedingungen zur Bildung des klimawirksamen Lachgases (N₂O) bei (Sutton et al. 2008; Sigurdarson et al. 2018). Die Kombination aus Eutrophierung und Versauerung verursacht zudem ein Ungleichgewicht im Nährstoffhaushalt. Weiterhin wirken hohe NH₃-Depositionen auf Pflanzen und Menschen toxisch (Erisman et al. 2007). Hierbei werden die Blätter der Vegetation direkt beschädigt und z. B. die Produktivität, das Wachstum und die Stressresistenz höherer Pflanzen sowie die Biodiversität indirekt beeinträchtigt (Krupa 2003). Ferner agiert NH₃ in der Atmosphäre als Kondensationskern für Wolken und kann, durch Reaktion mit Schwefel- und Salpetersäure, die Bildung von Staubpartikeln wesentlich steigern. Die feinen Partikel können sich in der Lunge ablagern, oxidativen Stress verstärken und letztendlich schwere Krankheiten beim Menschen hervorrufen (Sigurdarson et al. 2018). Die höchsten NH₃-Konzentrationen treten bodenoberflächennah und in unmittelbarer Umgebung zur Emissionsquelle auf (Krupa 2003). Schätzungen zufolge emittierte der gesamte landwirtschaftliche Sektor im Jahr 2016 in Deutschland ca. 630 Tsd. t NH₃, wovon der größte Teil auf die Tierhaltung zurückzuführen war. Auf die mineralischen Dünger entfielen etwa 15% (Haenel et al. 2018). Gleichwohl sind die NH₃-Emissionen in der Europäischen Union seit mehr als 30 Jahre rückläufig und haben sich von ca. 4,2 Tg N im Jahr 1985 auf ca. 2,8 Tg N im Jahr 2012 um etwa 1/3 verringert (van Grinsven et al. 2015).

Nitrifikation

Bei der Nitrifikation, einem zweiten Teilprozess der Mineralisation, wird NH_4^+ zweistufig über NO_2^- zu NO_3^- oxidativ überführt:



Jene Umwandlung wird durch die Aktivität von zwei verschiedenen Gattungen autotroph lebender Bakterien bestimmt. Die erste Reaktion von NH_4^+ zu NO_2^- wird hauptsächlich von Ammoniak oxidierenden Bakterien (AOB) der Gattung *Nitrosomonas* vorgenommen. Auf Magerstandorten können zudem Ammoniak oxidierende Archaea (AOA) einen signifikanten Beitrag bei jenem Umwandlungsprozess leisten. Die zweite sehr schnell ablaufende Reaktion erfolgt über Nitrit oxidierende Bakterien (NOB) der Gattung *Nitrobacter* (Cameron et al. 2013).

Aufgrund der auftretenden Freisetzung von Protonen führt die Nitrifikation zu einer Absenkung des pH-Wertes (Amberger 1996). Das pH-Optimum der autotrophen Bakterien liegt zwischen pH 6 bis 8 (Schilling 2000). Zudem ist die Nitrifikation eng an die Verfügbarkeit von NH_4^+ und die O_2 -Konzentration gebunden und nimmt im Allgemeinen mit deren sinkender Konzentration ab (Robertson & Groffman 2015). Die höchste Nitrifikationsrate erfolgt bei einer Bodentemperatur zwischen 25 bis 35 °C (Cameron et al. 2013) und einem wassergefüllten Porenvolumen von etwa 60%. Bei jenem Wasseranteil ist eine gute Durchlüftung des Bodens und die damit verbundene Nachlieferung von O_2 noch in ausreichendem Maß gewährleistet (Robertson & Groffman 2015).

Im Gegensatz zum Kation NH_4^+ , welches vorwiegend sorptiv an negativ-geladenen Ton- und Humusoberflächen im Boden gebunden wird, liegt das Anion NO_3^- frei in der Bodenlösung vor und kann daher leicht aus dem Wurzelbereich des Bodens ausgewaschen werden (Robertson & Groffman 2015). Angesichts der eingeschränkten Sorption des NO_3^- -Ions können, insbesondere bei wassergesättigten Böden und/oder Starkniederschlagsereignissen, beträchtliche N-Mengen in Form von NO_3^- verloren gehen. In Abhängigkeit vom Standort entstehen unter mitteldeutschen Bedingungen auf Ackerböden im Winterhalbjahr durchschnittlich Verluste zwischen 30 bis 60 kg $\text{NO}_3^- \text{ ha}^{-1}$ (Schilling 2000). Auf globaler Ebene können beispielsweise bei Weizen mehr als 40% des applizierten N-Düngers *via* NO_3^- -Auswaschung verloren gehen. Jener Anteil wird maßgeblich von den Umwelt- und Bodenbedingungen sowie der Düngerform bestimmt (Coskun et al. 2017).

Der Verlust von NO_3^- verringert nicht nur die Bodenfruchtbarkeit, sondern gefährdet analog dazu die Umwelt und Gesundheit der Menschen (Cameron et al. 2013). Neben der Eutrophierung von Oberflächengewässern, verbunden mit einer zunehmenden Algen- und Planktonproduktion, einer Veränderung der Lebensgemeinschaft sowie einer verstärkten Unterwasser-Hypoxie, führen

NO_3^- -Einträge in das Grundwasser zu einer Verschlechterung der Trinkwasserqualität (Smith et al. 2006). Erhöhte NO_3^- -Konzentrationen im Trinkwasser steigern die Gefahr von Methämoglobinämie bei Babies (Blue baby syndrom) und stehen unter Verdacht Krebs und Herzerkrankungen zu begünstigen (Cameron et al. 2013).

Denitrifikation

Bei der Denitrifikation wird NO_3^- durch mikrobielle Umwandlungsprozesse über NO_2^- , Stickstoffmonooxid (NO) und N_2O zu elementarem Stickstoff (N_2) reduziert. Hierfür verantwortlich sind fakultativ anaerob lebende Bakterien, welche zur Atmung anstatt O_2 das NO_3^- als terminalen Elektronenakzeptor verwenden (Cameron et al. 2013). Da NO_3^- ein weniger effizienter Elektronenakzeptor als O_2 ist, erfolgt die Denitrifikation vorwiegend unter anaeroben Bedingungen. Jene Voraussetzungen sind insbesondere bei hohen BWG (ab 60% wassergefülltem Porenvolumen) sowie nach Starkniederschlägen gegeben, bei denen die Diffusion von O_2 drastisch eingeschränkt und das Redoxpotential gering ist (Robertson & Groffman 2015). Bodenwasserverhältnisse oberhalb der Feldkapazität erhöhen zudem die Denitrifikationsrate. Zusätzlich verstärkt wird die Denitrifikation durch hohe Gehalte an organischem Kohlenstoff (C_{org}) und mineralischem N (N_{min}) im Boden sowie einem Anstieg der Temperatur (Cameron et al. 2013). Ferner beeinträchtigen saure Bodenbedingungen die Denitrifikationsrate, währenddessen neutrale bis leicht alkalische pH-Werte eine stimulierende Wirkung auf jenen Transformationsprozess haben. Der Effekt des pH-Wertes ist jedoch nur indirekt messbar, da sich mit abweichendem pH-Wert parallel die Bodenbedingungen, wie der C_{org} - und N_{min} -Gehalt sowie die mikrobielle Gesellschaft, verändern (Šimek & Cooper 2002). Die höchste enzymatische Aktivität läuft bei der Denitrifikation im neutralen bis leicht sauren pH-Wertbereich ab (Richardson et al. 2009). Bei niedrigen pH-Werten besteht die Gefahr, dass die Reduktionsprozesse nicht bis zum N_2 fortschreiten und folglich NO und N_2O als Endformen entstehen (Schilling 2000). Der Einfluss weiterer relevanter Faktoren (Bodentextur, Düngerform, Kultur) auf die Denitrifikation und insbesondere die N_2O -Bildung sind in der Arbeit von Bouwman et al. (2002) beschrieben.

Die Entstehung von N_2O ist insofern relevant, da dieses Gas ein 298-fach größeres Potential für den globalen Erwärmungseffekt als Kohlenstoffdioxid (CO_2) hat (Zhang et al. 2015a). Wenngleich N_2O in der Troposphäre nicht reaktiv ist, wird es in der Stratosphäre durch Photolyse zu NO umgewandelt, welches die Zerstörung von stratosphärischem Ozon (O_3) katalysiert. Dadurch wird u. a. die Bildung von schädlichem troposphärischen O_3 , mit weitreichenden Folgen für die Pflanzenproduktivität und Gesundheit der Menschen, begünstigt (Vitousek et al. 1997). Zudem gibt es weitere enzymatische Prozesse bei denen N_2O entstehen kann. Beispielsweise wird N_2O sowohl bei der heterotrophen Nitrifikation und autotrophen Nitrifikation zu NH_4^+ , als auch bei der Chemodenitrifikation von NO_2^- und abiotischer Zersetzung von Ammoniumnitrat gebildet (Zhang et al. 2015a).

Die N₂O-Konzentration in der Atmosphäre ist seit der industriellen Revolution von 270 ppb auf 319 ppb in 2005 markant angestiegen. In diesem Zusammenhang stellt die Landwirtschaft, inklusive landwirtschaftlicher Böden, mit ca. 65% den größten Emittenten dar (Lebender et al. 2014). Die N₂O-Emissionen landwirtschaftlich genutzter Böden beliefen sich im Jahr 2015 global auf etwa 90 Tsd. t N₂O-N. Ein Großteil jener gasförmigen Verluste ist auf die Applikation mineralischer und organischer N-Dünger zurückzuführen (Haenel et al. 2018). Daten aus Deutschland zeigen eine flächenbezogene Emissionsrate zwischen 0,04 bis 17,1 kg N₂O-N ha⁻¹. Unter Berücksichtigung der N-Düngermenge gehen 0,2 bis 15,5% des applizierten N in Form von N₂O verloren, wobei die Emissionen stark vom Standort, der Applikationsmenge und N-Düngerform abhängen (Jungkunst et al. 2006).

2.1.2 Stickstoffdüngung und Stickstoffeffizienz

Mit Ausnahme von N-autotrophen Arten, welche über die Fähigkeit verfügen Luftstickstoff zu fixieren, nehmen Pflanzen über ihre Wurzeln gelöste anorganische N-Verbindungen, hauptsächlich in Form von NO₃⁻ und NH₄⁺, aus dem Boden auf (Schilling 2000). Durch den Einsatz synthetischer N-Dünger kann der für die Pflanzenernährung substantielle Anteil anorganischer N-Verbindungen erhöht und die Produktivität gesteigert werden. Global betrug der Verbrauch synthetischer N-Dünger im Jahr 2017 ca. 107,7 Tg, wovon mehr als die Hälfte in Form von HS appliziert wurde (IFA 2018). Der Anteil von HS, inklusive dem mit UI und/ oder NI versetzten HS, an der Gesamt-N-Düngermenge Deutschlands (≈ 1,4 Tg) lag im Düngjahr 2019/ 2020 bei ca. 16%. Mit einem Anteil von ca. 37% war hierbei KAS die Hauptdüngform. Aufgrund strengerer Auflagen ist die Applikation N-haltiger Dünger in Deutschland leicht rückläufig. Dementsprechend nahm der Einsatz mineralischer N-Dünger auf landwirtschaftlich genutzten Fläche von ca. 110 kg N ha⁻¹ zur Jahrtausendwende auf ca. 83 kg N ha⁻¹ im Düngjahr 2019/ 2020 ab (IVA 2020).

Die Unterschiede zwischen den in Deutschland am häufigsten verwendeten beiden mineralischen N-Düngern bestehen primär im N-Gehalt — 27% bei KAS und 46% bei HS — und in der N-Form. Während sich KAS zu gleichen Teilen aus NH₄⁺ und NO₃⁻ zusammensetzt, besteht HS ausschließlich aus Carbamid (Schilling 2000). Durch den zusätzlichen Einsatz von UI und NI zu HS können sowohl die Prozesse bei der Transformation des HS im Boden verlangsamt als auch die N-Verluste reduziert werden (Trenkel 2010). Dementgegen wird das im KAS enthaltene nicht inhibierte NH₄⁺ mit steigender Bodentemperatur umso schneller zu NO₃⁻ umgesetzt und unterliegt bei gesättigten Bodenverhältnissen und stärkeren Niederschlagsereignissen einer hohen Auswaschungsgefahr. Jene Verhältnisse treten u. a. im Frühjahr zum Vegetationsbeginn auf, wenn der Wasser- und der N-Bedarf der Pflanzen deutlich unterhalb des Angebotes liegen (Cameron et al. 2013; Kirschke et al. 2019). Hauptsächlich hängt die Anwendung des jeweiligen N-Düngers vom Standort (Bodentyp, Bodenart, pH-Wert) und der angebauten Kultur ab. Aufgrund der differenzierten Zusammensetzung beider N-Dünger können sich ebenfalls die Düngeregime unterscheiden. Je nach Kultur wird die

N-Applikationsmenge bei KAS auf zwei bis vier Gaben gesplittet, während eine N-Düngung mit stabilisiertem HS eine Zusammenlegung auf eine bis zwei Gaben ohne Ertragseinbußen ermöglicht. Zudem besteht die Möglichkeit beide N-Dünger im Düngeregime zu kombinieren (Schilling 2000). Die optimale N-Rate ist für eine bestimmte Kultur oder einen bestimmten Standort nicht konstant, sondern kann zwischen den Sorten, Standorten und Jahren erheblich variieren (Olfs et al. 2005). Den rechtlichen Rahmen für die maximal zulässige N-Düngermenge während einer Anbauperiode gibt die Düngeverordnung in der aktuell gültigen Fassung für die einzelnen Kulturen vor. Demzufolge hat beispielsweise ein A-Winterweizen mit einem Ertragsniveau von 80 dt ha⁻¹ ein N-Bedarf von 230 kg N ha⁻¹, abzüglich u. a. des zu Vegetationsbeginn aus 0 bis 90 cm Bodentiefe ermittelten N_{min} sowie der N-Nachlieferung aus dem Bodenvorrat und der organischen Düngung der Vorjahre. Bei einem abweichenden gemittelten Ertragsniveau muss der N-Bedarf über Zu- und Abschläge angepasst werden (Düngeverordnung 2017).

Trotz politischer Vorgaben und dem Prinzip der guten fachlichen Praxis zeigen Daten von mehr als 800 Versuchen mit Getreide, dass durchschnittlich lediglich 51% des applizierten N-Düngers von den Pflanzen aufgenommen werden (Cameron et al. 2013). In Abhängigkeit von der Kultur, den Umweltbedingungen und dem Management schwankt jener Wert weltweit zwischen 35 und 65%, wobei Gerste die höchste N-Wiederfindungsrate im Ernteprodukt aufweist (Herrera et al. 2016). Dies spiegelt sich deckungsgleich in einer abnehmenden Stickstoff-Nutzungseffizienz (NUE) innerhalb der vergangenen 50 Jahren wider, welche als Ertrag pro Einheit verfügbaren N definiert ist, der durch den Boden und über den applizierten N-Dünger bereitgestellt wird (Verzeaux et al. 2017). Mehrere Studien zeigen, dass die NUE global von 68% in den frühen 1960ern auf 47% in 2009 abnahm (Tilman et al. 2002; Lassaletta et al. 2014). Dies spiegelt sich in einem steigenden Einsatz synthetischer N-Dünger von ca. 10 Tg N in 1960 auf mehr als 90 Tg N in 2010 bei einer gleichzeitigen Ertragssteigerung um das lediglich 2,5-Fache wider (Lassaletta et al. 2014). Zudem führen höhere N-Applikationsmengen sukzessive zu einer geringeren Ertragssteigerung bzw. bei sehr hohen N-Mengen zu keiner weiteren Zunahme des Ertrages (Hawkesford 2017) und folglich zu einer geringeren NUE (Sylvester-Bradley & Kindred 2009). In diesem Zusammenhang werden große Unterschiede zwischen einzelnen globalen Regionen und deren Praktiken deutlich. Während die NUE in hochindustrialisierten Ländern mit durchschnittlichen N-Düngermengen von ca. 100 kg N ha⁻¹ seit Jahrzehnten geringfügig ansteigt und 2010 im Mittel bei etwa 60% lag, weisen Länder mit einer hohen N-Applikationsmengen von > 200 kg N ha⁻¹, wie China und Indien, eine deutlich geringere NUE von lediglich ca. 30% auf (Bouwman et al. 2017). Für Deutschland wurde zum gleichen Zeitpunkt eine NUE von ca. 72% ermittelt (Lassaletta et al. 2014). Der EU Nitrogen Expert Panel (2015) hält im Allgemeinen eine NUE zwischen 50 und 90% sowie einen maximaler N-Überschuss von 80 kg N ha⁻¹ für vertretbar. Andere Autoren, wie beispielsweise Hülsbergen (2003), grenzen das Optimum des N-Überschusses auf deutlich niedrigerem Niveau zwischen 0 bis

25 kg N ha⁻¹ ein. Damit würde einerseits der Gefahr sehr hoher N-Verluste vorgebeugt werden und andererseits der Gehalt an bodenbürtigem N langfristig erhalten bleiben.

2.1.3 Möglichkeiten zur Verbesserung der Stickstoffeffizienz

2.1.3.1 Allgemein

Die NUE von Pflanzen hängt von zahlreichen Faktoren ab. Dazu zählen insbesondere das Anbau- (Kulturart, Fruchtfolge) und Düngungssystem (Menge, Zeitpunkt, Intensität) sowie die Standortbedingungen (Bodenart, Klima) (Balasubramanian et al. 2004; Rathke et al. 2006; Xu et al. 2012). Die NUE kann im Allgemeinen auf zweierlei Wege erhöht werden: (1) durch eine Steigerung der N-Aufnahme des im Boden zur Verfügung stehenden N (Verbesserung der N-Aufnahmeeffizienz, NUpE), oder (2) durch eine effizientere Verwertung des aufgenommenen N (Verbesserung der N-Verwertungseffizienz, NUtE) (Garnett et al. 2009), wobei die Kombination aus beiden Ansätzen die effektivste Lösung repräsentiert (Good et al. 2004). Die NUpE ist definiert als das Verhältnis aus der gesamten N-Menge in den oberirdischen Pflanzenteilen zur Ernte und dem im Boden zur Verfügung stehenden N. Die NUtE bildet das Verhältnis des Kornertrages zur gesamten N-Menge in der oberirdischen Pflanze zur Ernte ab (Good et al. 2004).

Die Züchtung neuer Sorten führte in den vergangenen Jahrzehnten zu kontinuierlichen Ertragszuwächsen. Dadurch indirekt beeinflusst stiegen ebenfalls die NUpE und NUtE an (Cormier et al. 2016). Unabhängig von der N-Versorgung konnte somit zwischen den Jahren 1985 und 2010 der Ertrag und die NUE von Winterweizen global um 0,45 respektive 0,33% pro Jahr erhöht werden (Cormier et al. 2013). Aktuelle Studien zeigen, dass züchterische Fortschritte der vergangenen 50 Jahre nicht nur unter optimaler N-Versorgung, sondern ebenso auf einem niedrigeren Niveau in extensiven Systemen kontinuierliche Ertragssteigerungen hervorbrachten (Voss-Fels et al. 2019). Während traditionelle Züchtungsmethoden in jüngere Vergangenheit zunehmend an ihre Grenzen stießen und zu keiner nennenswerten Verbesserung der NUE von Kulturpflanzen führten (McAllister et al. 2012), stellt die Kombination aus Züchtung und Molekular- und Transgenetik eine wirksame Option dar. Mittels genetischer Modifizierung kann beispielsweise die Blattfläche von Pflanzen vergrößert und folglich die Fotosyntheserate und NUE erhöht werden (Cormier et al. 2016). Darüber hinaus führt eine Erhöhung des Blattwinkels ebenfalls zu Ertragssteigerungen (Sinclair & Rufty 2012). Aufgrund des inversen Zusammenhanges zwischen dem Ertrag und dem Rohproteingehalt (RPG), d. h. höhere Erträge gehen mit niedrigeren RPG einher und *vice versa* (Tamang et al. 2017), ist es hoch relevant bei Ertragszuwächsen die Remobilisierung des N (NUtE) und somit den N-Gehalt im Korn zu erhöhen oder zumindest auf einem hohen Niveau zu halten. Dies kann u. a. durch die genetische Manipulation mittels sogenannter Small Molecules erreicht werden (Cormier et al. 2016). Weitere genetische und transgenetische Forschungen zur Erhöhung des Ertrags und der NUE beabsichtigen die gezielte Beeinflussung des Fotosyntheseproteins Ribulose-1,5-bisphosphat-carboxylase, die Verzögerung der Seneszenz sowie die Entwicklung von Hybridsorten (Sinclair & Rufty 2012;

Cormier et al. 2016). Eine gezielte Veränderung des Wurzelsystems kann unter gewissen Bedingungen ebenfalls fördernd auf den Ertrag und die NUE wirken (Garnett et al. 2009; Good & Beatty 2011; Xu et al. 2012). Allerdings kann eine zu hohe Wurzelmasse mit verhältnismäßig wenigen Feinwurzeln zu Ertragseinbußen führen. Untersuchungen an 16 elitären Weizengenotypen belegen nachweislich, dass die remobilisierte N-Menge aus den Wurzeln in das Korn sehr gering ist (Allard et al. 2013).

Neben züchterischen Ansätzen gibt es auch beim N-Management Optionen, die auf eine Verbesserung der NUE abzielen. Durch die Anwendung des „4R“ Nährstoff-Managementprinzips (richtige Form, richtige Menge, richtiger Zeitpunkt und richtige Platzierung) kann im Rahmen der N-Düngung eine Steigerung der NUE wirkungsvoll realisiert werden (Johnston & Bruulsema 2014). Die Effizienz jenes Prinzips hängt von lokalen Faktoren, wie beispielsweise dem Anbausystem, dem Bodentyp, dem Klima und der sozio-ökonomischen Situation ab (Zhang et al. 2015b). Der Einsatz sensorgesteuerter präziser Technologien und die Zugabe von UI und NI, welche die N-Verfügbarkeit im Boden verlängern, stellen hierbei weitere wirkungsvolle Maßnahmen zur NUE-Erhöhung dar (Sinclair & Rufty 2012; Zhang et al. 2015b; Herrera et al. 2016). In ariden und semiariden Regionen impliziert ein angepasstes Wassermanagement zugleich Zuwächse beim Ertrag und bei der NUE (Quemada & Gabriel 2016).

Vor dem Hintergrund der landwirtschaftlichen Praxis gelten eine reduzierte Bodenbearbeitung sowie eine abwechslungsreiche Fruchtfolge mit Zwischenfrüchten und Leguminosen als weitere vielversprechende Optionen zur Verbesserung der NUE (Sieling & Kage 2010; Verzeaux et al. 2017). Multiple Anbausysteme mit langgliedriger Fruchtfolge und Zwischenfrüchten erhöhen neben der NUE ebenso die Wassernutzungseffizienz und verringern den Krankheitsbefall von Kulturpflanzen. Agroforstsysteme können jene positiven Effekte verstärken und zusätzlich reduzierend auf den Abtrag von Bodenmaterial wirken (Tilman et al. 2002). Darüber hinaus wird durch den Anbau N-effizienter Sorten das Risiko hoher N-Salden reduziert (Rathke et al. 2006).

2.1.3.2 Inhibitoren

Bei der Applikation von HS kann innerhalb der anschließenden Transformation über NH_4^+ zum NO_3^- sowohl die Hydrolyse als auch Nitrifikation entscheidend beeinflusst werden. Eine effektive Option zur Verzögerung der N-Umsetzung im Boden bei gleichzeitiger Reduzierung der N-Verluste und Erhöhung der NUE stellen Inhibitoren dar (Trenkel 2010; Abalos et al. 2014).

Ureaseinhibitoren

Ureaseinhibitoren (UI) verzögern die hydrolytische Spaltung des im HS enthaltenen Amid-N über Ammoniumhydroxid zu NH_4^+ durch Hemmung des ubiquitär im Boden verteilten Enzyms Urease (Trenkel 2010). Urease wird u. a. von Bakterien, Pilzen, Algen und Pflanzen in umfangreichen Mengen gebildet und beschleunigt die HS-Hydrolyse um den Faktor 10^{14} (Kafarski & Talma 2018).

Ohne des Enzyms Urease würde die Halbwertszeit von HS bei 25 °C bis zu 40 Jahre betragen (Sigurdarson et al. 2018). Während unter natürlichen Bedingungen die vollständige Umsetzung des HS zu NH_4^+ innerhalb weniger Tage erfolgt, verlängert der Einsatz eines UI diesen Prozess um sieben bis 14 Tage (Trenkel 2010). Dadurch wird sowohl die Zeitspanne zur Diffusion und Verteilung von NH_4^+ im Boden verlängert als auch einer NH_4^+ -Toxizität vorgebeugt (Schraml et al. 2018). Aufgrund des chemischen Gleichgewichtes von NH_4^+ und NH_3 (Kapitel 2.1.1 Ammonifikation) kann bei der Hydrolyse von HS neben NH_4^+ , CO_2 und Wasser (H_2O) auch das volatile NH_3 entstehen und in die Atmosphäre entweichen (Cameron et al. 2013). Insbesondere in unmittelbarer Umgebung von Düngerkörnern steigt der pH-Wert des Bodens vorübergehend an, sodass sich das Gleichgewicht zugunsten von NH_3 verschiebt und somit die NH_3 -Verluste ansteigen (Cantarella et al. 2018).

Der Einsatz eines UI führt neben einer verlangsamten Umsetzung zu NH_4^+ und einem geringeren Anstieg des pH-Wertes ebenfalls zu einer besseren Verteilung des HS im Boden. Dadurch können letztlich die NH_3 -Emissionen unter Feldbedingungen um 26 bis 89% effektiv reduziert werden (Sanz-Cobena et al. 2008; Schraml et al. 2018; Ni et al. 2014). In global durchgeführten Versuchen in Ackerbau- und Weidesystemen verringerte die Zugabe eines UI die NH_3 -Emissionen durchschnittlich um 54% (Pan et al. 2016). Die Bildung von NH_3 hängt gleichermaßen wie die HS-Hydrolyse sowie die Wirksamkeit des UI von diversen Bodeneigenschaften (z. B. Rauigkeit der Bodenoberfläche, Bodenart, pH-Wert) und Witterungsbedingungen (z. B. Temperatur, Niederschlag, Windgeschwindigkeit) ab (Sommer et al. 2004). Demzufolge wirkt sich eine direkte Einarbeitung von Granalien in den Boden reduzierend auf die NH_3 -Verluste aus (Schraml et al. 2018). Die effektivste Wirkung von UI auf die Produktivität und NUE ist auf alkalischen Böden mit einem pH-Wert ≥ 8 zu erwarten (Abalos et al. 2014). Es gibt eine Vielzahl an UI (Krajewska 2009), wobei N-(n-Butyl)-thiophosphortriamid (NBPT), N-(2-Nitrophenyl)phosphorsäuretriamid (2-NPT), Hydrochinon sowie Phenylphosphordiamidat am häufigsten untersucht und eingesetzt werden (Juan et al. 2010; Trenkel 2010; Cantarella et al. 2018).

Nitrifikationsinhibitoren

Nitrifikationsinhibitoren (NI) sind natürliche oder synthetische Verbindungen, welche die Aktivität von nitrifizierenden Mikroorganismen im Boden vorübergehend unterdrücken und folglich die bakterielle Oxidation von NH_4^+ verzögern. Bei der Transformation von NH_4^+ über Hydroxylamin zu NO_2^- wird durch den Einsatz von NI das Enzym Ammonium-Mono-Oxygenase (AMO) der *Nitrosomonas* ssp zeitweilig blockiert (Abbildung 2.1-1) (Trenkel 2010; Subbarao et al. 2013). Die darauffolgende Umwandlung des NO_2^- zu NO_3^- durch NOB wird nicht beeinflusst (Kleineidam et al. 2011). Untersuchungen zum Effekt des NI DMPP (3,4-Dimethylpyrazolphosphat) auf die Entwicklung der mikrobiellen Bodengemeinschaft haben gezeigt, dass ausschließlich die potentiellen Zielorganismen (d. h. Ammonium-Oxidierer) und hier insbesondere AOB hinsichtlich

Menge und Zusammensetzung reagieren (Kleineidam et al. 2011; Shi et al. 2016; Luchibia et al. 2020).

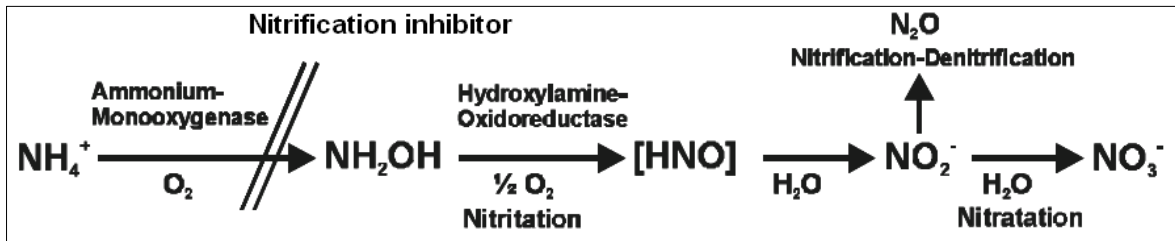


Abbildung 2.1-1: Funktionsweise eines Nitrifikationsinhibitors bei der Nitrifikation (verändert nach Benckiser et al. 2013).

Die Verzögerung der Nitrifikation führt zu einer verlängerten Phase des gut sorbierbaren NH_4^+ – einhergehend mit einer NH_4^+ -betonen Pflanzenernährung – bzw. geringeren Konzentrationen des mobilen und auswaschungsgefährdeten Anions NO_3^- (Kirschke et al. 2019). Die Sorptionsfähigkeit des Bodens wird dabei maßgebend durch die KAK bestimmt (Blume et al. 2010). Wenngleich die NH_4^+ -Konzentration an den Austauschern und in der Bodenlösung einem steten Ausgleich unterliegen (Blume et al. 2010), konnten Kirschke et al. (2019) nachweisen, dass NH_4^+ nach einer HS-Düngung mit NI zu großen Teilen im Boden austauschbar zwischengespeichert und sukzessive zu NO_3^- transformiert wird. Demzufolge erfolgt die Umwandlung von NH_4^+ zu NO_3^- in der Bodenlösung schneller als die NH_4^+ -Nachlieferung von den Austauschern in die Bodenlösung.

Durch den Einsatz eines NI werden einerseits die Nitrifikation direkt verzögert und folglich die Auswaschung von NO_3^- minimiert (Díez López & Hernaiz 2008; Zaman et al. 2013, 2013) sowie andererseits die bei der anschließenden Denitrifikation entstehenden N_2O -Emissionen indirekt eingeschränkt werden (Ruser & Schulz 2015). Die Wirkung von NI auf die Verringerung von NO_3^- -Verlusten wird u. a. durch die Bodentextur bestimmt. Diese ist bei Sand höher als in lehmigen und tonigen Böden, da in Lehm und Ton ein Teil des NH_4^+ sorbiert wird und temporär für die Reaktion nicht zur Verfügung steht sowie der NI teilweise selber an Tonpartikeln und organischen Substanzen austauschbar gebunden wird (Barth et al. 2019). Auf die Wirksamkeit von NI zur Reduzierung der N_2O -Bildung hat die Bodentextur indes keinen Einfluss (Gilsanz et al. 2016). Weitere relevante Faktoren, welche die Effektivität und Wirkungsdauer von NI beeinflussen, sind der pH-Wert des Bodens, der Gehalt an organischem Material, die chemische Zusammensetzung des NI und die applizierte N-Menge (Sha et al. 2020). Dazu zählen außerdem die NI-Konzentration sowie die Witterungsparameter Bodentemperatur und –feuchte (Barth et al. 2008). Zudem ist in der Literatur beschrieben, dass die Wirkung von NI auf die Nitrifikation unter feucht-warmen Bedingungen mit einem großen Auswaschungspotential von NO_3^- größer ist als bei trocken-kalten Umgebungen, in denen die Transformationsprozesse generell langsamer ablaufen (Chen et al. 2010).

Für jede Witterungsbedingung gültig nimmt die Effektivität und Konzentration eines eingesetzten NI mit zunehmender Zeit nach der Applikation ab (Kelliher et al. 2008).

Aufgrund des chemischen Gleichgewichtes zwischen NH_4^+ und NH_3 können durch den Einsatz von NI vermehrt NH_3 -Emissionen entstehen. Dies konnte in einigen Studien belegt werden, worin die alleinige Zugabe eines NI die NH_3 -Verluste im Mittel um ca. 7% erhöhte (Kim et al. 2012) und teilweise über den Werten einer unbehandelten HS-Düngung lagen (Ni et al. 2014). Diesen geringen Verlusten kann mit der gleichzeitigen Zugabe eines UI entgegengewirkt (Kim et al. 2012) und gleichzeitig der Ertrags und die NUE erhöht werden (Abalos et al. 2014). Eine Wirkung von UI und NI auf die Produktivität bei abweichender N-Versorgung konnte bislang jedoch nicht eindeutig festgelegt werden. Während sich in der Studie von Abalos et al. (2014) der Einsatz von Inhibitoren auf die prozentuale Ertragssteigerung bei hohen bis sehr hohen N-Mengen am besten auswirkte, zeigten die Inhibitoren in der Studie von Rose et al. (2018) dementsgegen bei moderater N-Düngung die höchsten Ertragszuwächse.

Generell verringert eine Doppelinhibierung eines HS-Düngers gasförmige Verluste (Wang et al. 2020) und minimiert, aufgrund höherer Konzentrationen des wenig mobilen NH_4^+ , die Auswaschung von NO_3^- (Zaman et al. 2013). Neben dem ökologischen Nutzen impliziert die Verwendung von HS-Dünger mit Inhibitoren ebenso ökonomische und zeitliche Vorteile (Trenkel 2010). Beispielsweise kann die Anzahl der Düngegaben reduziert und somit Arbeitsspitzen abgefangen werden. Weiterhin weist HS einen hohen N-Gehalt (46%), gute Transport- und Lagereigenschaften und generell geringere Kosten je Einheit N als andere N-Dünger auf (Zaman et al. 2013). Die am häufigsten verwendeten NI sind DMPP, DCD, Nitrapyrin und 2-Amino-4-chlor-6-methylpyrimidin (Subbarao et al. 2006; Sha et al. 2020).

2.2 Wurzeln als Pflanzenorgan

2.2.1 Funktion und Entwicklung von Pflanzenwurzeln

Wurzeln agieren als Schnittstelle von Pflanzen mit dem Boden und sind daher von zentraler Bedeutung für die Pflanzenproduktivität (Meister et al. 2014). Neben der Akquisition von Wasser und Nährstoffen bieten sie dem Spross einen stabilen Halt im Boden. Zugleich sind Wurzeln indirekt bei der Speicherung von Fotoassimilaten und der Phytohormon-Synthese beteiligt (Osmont et al. 2007). Darüber hinaus erhöhen Wurzeln den Gehalt an organischer Substanz im Boden und verbessern die physikalischen, chemischen und biologischen Eigenschaften des Bodens, was letztlich zu höheren Ernteerträgen führt (Gregory 2007; Fageria 2012). Neben ihrer Rolle als C-Senke (C-Sequestrierung) erhöhen Wurzeln in ihrer unmittelbaren Umgebung, der sog. Rhizosphäre, die Biodiversität und erbringen diverse Ökosystemleistungen. Veränderungen in der Rhizosphäre werden unter anderem durch die Abscheidung von Wurzelexsudaten, oder allgemein der sog. Rhizodeposition, impliziert, welche insbesondere im Bereich der Wurzelspitzen erfolgt. Dadurch

wird sowohl die mikrobielle Gemeinschaft als auch deren Aktivität maßgeblich beeinflusst (Gregory 2006; Hinsinger et al. 2009).

Die Ausprägung des Wurzelsystem resultiert aus der Wirkung abiotischer und biotischer Umweltreize, die Fähigkeit sich an diese Bedingungen anzupassen sowie dem genetischen Hintergrund der Pflanze (Carvalho & Foulkes 2019). Die sich daraus ergebende Wurzelarchitektur spiegelt die räumliche Konfiguration von Wurzelsegmenten unterschiedlichen Alters und Ordnung mit verschiedener Funktionalität wider (Osmont et al. 2007). Generell wird innerhalb von Wurzelsystemen, ausgehend davon wo bzw. woraus sich ein Wurzelsegment entwickelt hat, zwischen vier morphologische Klassen unterscheiden: Primärwurzel, Seminalwurzeln, Sprossbürtige Wurzeln (= Adventivwurzeln) und Basalwurzeln (Zobel & Waisel 2010). Während die Primärwurzel den Boden senkrecht in die Tiefe durchdringt (d. h. orthogravitrop) und somit die Wasserversorgung der jungen Pflanze sicherstellt, breiten sich Seminalwurzeln hauptsächlich lateral (d. h. plagiogravitrop) aus. Wenngleich alle Wurzeltypen Wurzelhaare bilden können, schaffen insbesondere die Seminalwurzeln eine optimale Grundlage von der aus kleine Lateralwurzeln (Seitenwurzeln) über ihre Wurzelhaare die Wasser- und die Nährstoffaufnahme verrichten können (Fageria 2012). Die feinen Wurzelhaare erhöhen die Kontaktfläche zum Boden und erschließen durch Eindringen in Mikroporen mehr Bodenvolumen. Dadurch wird das Aneignungsvermögen der Pflanzen für Nährstoffe und Wasser gesteigert (Gregory 2007). Die Wurzelhaare können nicht nur die Pflanzenproduktivität verbessern, sondern ebenfalls Nährstoffverluste inklusive deren negativer Auswirkungen reduzieren (Gilroy & Jones 2000). Im Allgemeinen wird die Entwicklung des Wurzelsystems durch eine gezielte Förderung oder Hemmung des primären Wurzelwachstums, durch Bildung von Seiten- und Adventivwurzeln sowie durch Vermehrung der Wurzelhaare auf verschiedene Weise gesteuert. Neben exogenen Faktoren sind hierfür insbesondere endogene Moleküle und Phytohormone wie Auxin, Cytokinin, Gibberelin- und Abscisinsäure sowie Ethylen verantwortlich (Osmont et al. 2007). Deren spezifische Wirkungen auf die Wurzelentwicklung sind u. a. in den Arbeiten von Osmont et al. (2007) und Tian et al. (2014) umfassend beschrieben.

Bei den landwirtschaftlichen Kulturarten ist zwischen zwei Wurzelsystemen zu unterscheiden. Während für einkeimblättrige Pflanzen (*Monokotyledonen*) ein homorrhizes Wurzelsystem mit mehreren gleichrangigen, ähnlichen Wurzeln charakteristisch ist, haben zweikeimblättrige Pflanzen (*Dikotyledonen*) ein allorhizes Wurzelsystem mit einer dominanten Pfahlwurzel und wenigen Seitenwurzeln (Fageria 2012). Das Wurzelsystem monokotyler Pflanzen, wie z. B. von Weizen und Gerste, besteht aus einer Primärwurzel und mehreren Seminalwurzeln (Meister et al. 2014). Die Primärwurzel entwickelt sich aus der embryonalen Keimwurzel des Samens und wächst hauptsächlich in vertikaler Richtung (Gravitropismus). Die anschließend wachsenden Seminalwurzeln entstehen hauptsächlich aus den Koleoptil-Konoten des Sprosses und der Triebe. Angesichts ihres weniger ausgeprägten Tiefenwachstums entwickelt sich aus den Seminalwurzeln oft ein faseriges Wurzelsystem (Hodge et al. 2009; Carvalho & Foulkes 2019). Dikotyle Pflanzen,

wie. z. B. Raps, haben demgegenüber eine einzige Pfahlwurzel/Primärwurzel, aus der wenige Seitenwurzeln aufeinanderfolgender Ordnungen hervorgehen (Carvalho & Foulkes 2019). Zudem verfügen die Wurzeln dikotyler Pflanzen, im Gegensatz zu monokotylen Pflanzen, über ein sekundäres Dickenwachstum (Hodge et al. 2009).

2.2.2 Einfluss der Stickstoffform auf die Wurzelentwicklung Stickstoffaufnahme-mechanismen

Pflanzenwurzeln nehmen Stickstoff hauptsächlich in anorganischer Form als NO_3^- und NH_4^+ durch Massenfluss (NO_3^-) und Diffusion (NH_4^+) in ihre Apoplasten auf. Anschließend werden beide N-Formen *via* aktiven Transportsystemen durch die Plasmamembran in die Wurzelzellen überführt. Hierbei wird zwischen hoch affinen Transportsystemen (HATS; engl. high affinity transport system) und niedrig affinen Transportsystemen (LATS; engl. low affinity transport system) unterschieden (Cormier et al. 2016). Die Aufnahmekinetik (Influx) von NO_3^- sowie NH_4^+ hängt von der jeweiligen Konzentration in der Bodenlösung ab und zeigt im Allgemeinen ein biphasiges Muster. Während der Transport bei geringen Konzentrationen vermehrt über HATS erfolgt, sind bei höheren Konzentrationen zunehmend LATS involviert. Aufgrund von Konzentrationsunterschieden in der Bodenlösung – hohe NO_3^- , geringe NH_4^+ -Konzentration – ist der relative Beitrag beider Transportsysteme an der Aufnahme zwischen NO_3^- und NH_4^+ charakteristisch voneinander verschieden. Dementsprechend spielen bei der NH_4^+ -Aufnahme vermehrt HATS eine Rolle, währenddessen bei der Aneignung von NO_3^- in die Plasmamembran der Wurzeln tendenziell LATS aktiver sind (Nacry et al. 2013).

Die funktionalen Kenntnisse zu HATS und LATS, differenziert nach NO_3^- und NH_4^+ , basieren primär auf Untersuchungen mit Acker-Schmalwand (*Arabidopsis thaliana*). Auf Grundlage dessen erfolgt der NO_3^- Transport über Proteine der NRT1- (LATS) und NRT2/ NRT3-Familie (HATS). Die Anzahl der Gene sowie die Familienstruktur innerhalb der drei Hauptfamilien variiert hierbei zwischen einzelnen Kulturen (Zuluaga & Sonnante 2019). Die NH_4^+ -Aufnahme über die Wurzel findet vorwiegend über die AMT-Familie der hoch affinen Transporter statt, welche Teil der Ammonium Transporter/ Methylammonium Permease/ Rhesus (AMT/ MEP/ Rh)- Familien sind. Jener AMT-Typ der NH_4^+ -Transporter weist mehrere Gene auf, von denen jedes spezifische Funktionen übernimmt (Nacry et al. 2013). Ähnlich der NO_3^- -Transporter weicht ebenso bei den NH_4^+ -Transportern die Anzahl der Gene zwischen einzelnen Kulturen voneinander ab. Während bei *Arabidopsis thaliana* sechs AMT-Gene nachgewiesen werden konnten, weißt beispielsweise Reis zehn AMT-Gene, gegliedert in zwei Gruppen der AMT-Familie (AMT1 und AMT2), auf (Miller & Cramer 2005). Im Gegensatz dazu sind beim Getreide, im Speziellen beim Weizen, die Wirkung und Funktionsweise der Transportsysteme noch unklar (Cormier et al. 2016).

Stickstoffreduktion und Assimilation

Sobald NO_3^- - und NH_4^+ -Ionen in die Pflanzenzellen gelangen, werden diese durch Reduktions- und Assimilationsprozesse umgewandelt und in der Pflanze verteilt. Das NO_3^- wird im Cytosol über das Enzym Nitratreduktase zu NO_2^- reduziert. In einem anschließenden Prozess wird das in die Plastiden und Chloroplasten translokalisierte NO_2^- *via* Nitritreduktase zu NH_4^+ weiter reduziert (Zuluaga & Sonnante 2019). Der Anteil des bereits in den Wurzeln reduzierten NO_3^- hängt von der Pflanzenart ab und variiert zwischen 10% und 50% (Schilling 2000). Das hierbei gebildete NH_4^+ wird über den GS/ GOGAT-Zyklus in das C-Gerüst eingebaut und zur Bildung von Aminosäuren verwendet (Miller & Cramer 2005). Aus dem direkt aufgenommenen NH_4^+ werden bereits in den Wurzeln einige Aminosäuren und Amide gebildet (Schilling 2000). Das restliche NH_4^+ wird ebenfalls über den GS/ GOGAT-Zyklus zu Glutamine und Glutamate assimiliert (Liu & von Wirén 2017). Die Assimilate wandern im Xylem und Phloem der Pflanze in die jeweils wachsenden jungen Organe. Zudem können sich NO_3^- und NH_4^+ in den Vakuolen anreichern und zwischengespeichert werden (Schilling 2000). Hinsichtlich der direkten Nutzung des NH_4^+ und einer geringeren Anzahl an Reduktionsprozessen erfordert die Assimilation von NH_4^+ weniger Energie als jene von NO_3^- . Der energetische Mehraufwand bei der NO_3^- -Assimilation wird offenbar durch die Umverteilung von Kohlenhydraten aus anderen Prozessen gedeckt, welche u. a. für das Wurzelwachstum bestimmt sind (Bloom 1997). Im Gegensatz zum NO_3^- wirken hohe NH_4^+ -Konzentrationen jedoch toxisch und führen mitunter zu einem reduzierten Pflanzenwachstum, Veränderungen in der Wurzelarchitektur und Chlorosen an den Blättern (Britto & Kronzucker 2002). Durch ein ausgeglichenes Verhältnis zwischen Angebot und Bedarf kann einer NH_4^+ -Toxizität entgegengewirkt werden. Die Sensitivität auf eine steigende NH_4^+ -Konzentrationen hängt stark von der Pflanzenart ab. Demnach sind die zwei Leguminosen Lupine und Klee sehr NH_4^+ tolerant, während bei Salat und Spinat bereits eine geringe NH_4^+ -Konzentration zu Wachstumsdepressionen führt. Weizen weist eine mittlere Toleranz gegenüber einer NH_4^+ -Toxizität auf (Esteban et al. 2016).

Nitrat- versus Ammoniumernährung

Im Zusammenhang mit der N-Aufnahme gibt die Pflanze Wurzelexudate (Efflux) passiv in den Boden ab und verändert somit den pH-Wert der Rhizosphäre sowie das Redoxpotential. Bei der Assimilation von NO_3^- entstehen Hydroxid (OH^-)-Ionen, welche während der NO_3^- -Reduktion im Wurzelgewebe zur interzellulären pH-Stabilisation in den Boden abgegeben werden und zu einem pH-Anstieg der Rhizosphäre führen. Durch diese Alkalisierung können, speziell auf sauren Böden, Fe- und Aluminium (Al)-Phosphate in Lösung gebracht, Phosphationen von Fe/ Al-Oxiden desorbiert und die mikrobielle P-Mineralisation erhöht werden. Zudem wirkt ein pH-Anstieg einer Al-Toxizität entgegen und kann die Verfügbarkeit von Molybdän verbessern (Amberger 1996; Neumann & Römheld 2002). Dementgegen bewirkt die Assimilation von NH_4^+ , durch die Bildung

und Abgabe von Protonen (H^+), eine Absenkung des pH in der Rhizosphäre. Insbesondere auf neutralen und alkalischen Böden steigert eine NH_4^+ -induzierte Versauerung die Verfügbarkeit von Phosphor (P), da Calciumphosphate mit abnehmenden pH-Wert in Lösung gehen und pflanzenverfügbar werden. Allerdings nimmt die Löslichkeit toxischer Elemente, wie z. B. Cadmium, mit abnehmendem pH-Wert zu (Neumann & Römheld 2002).

Die N-Form verändert nicht nur den pH-Wert der Rhizosphäre, sondern kann auch die Wurzelmorphologie der Pflanzen beeinflussen (Neumann & Römheld 2002). Während die Entwicklung der Primärwurzeln (Liu et al. 2013) sowie das Längenwachstum von Seitenwurzeln durch NO_3^- stimuliert wird (Sun et al. 2017), bewirkt eine NH_4^+ -betonte Ernährung verstärkt die Neubildung von Seitenwurzeln und dabei insbesondere die Verzweigung auf zweiter und dritter Ordnung (Lima et al. 2010; Araya et al. 2016). Blaser et al. (2020) wiesen in ihrer kürzlich veröffentlichten Studie bei Gerste jedoch nach, dass eine NH_4^+ -betonte N-Ernährung die Seitenwurzelbildung erster Ordnung ebenfalls stimuliert. Eine einseitige, nur auf einer N-Form basierenden N-Ernährung, entweder NH_4^+ oder NO_3^- , beeinträchtigt in den meisten Fällen das Wurzelwachstum. Ein optimales Wurzelwachstum wird dementsprechend bei einem ausgeglichenen NH_4^+ zu NO_3^- -Verhältnis erzielt, welches vom pH des Bodens abhängt. In einem Gefäßversuch mit Mais wurden die höchsten Wurzelmassen bei den NH_4^+ : NO_3^- -Verhältnissen von 75:25 und 50:50 erzielt (Pedersen et al. 2019). Dementgegen zeigen Untersuchungen an Tomaten im Hydrokulturversuch, dass die Wurzelentwicklung mit einem zunehmenden NH_4^+ -Anteil sukzessive gehemmt wird und folglich die höchsten WTM bei einem NH_4^+ : NO_3^- -Verhältnis von 25:75 und 0:100 erzielt wurden (Ferreira Barreto et al. 2018). In einem Split-Wurzel-Versuch mit Tabak, indem halbseitig NH_4^+ und NO_3^- angeboten wurde, war die Wurzelmasse auf der NO_3^- -Seite höher als auf jener des NH_4^+ (Walch-Liu et al. 2001). Dessen ungeachtet schränken hohe N-Konzentrationen von NH_4^+ oder NO_3^- generell das Längenwachstum ein. Maßgebend dafür, ab wann eine zu hohe N-Konzentration inhibierend auf die Wurzelentwicklung wirkt, sind insbesondere die Kulturart und der N-Status der Pflanze (Nacry et al. 2013).

Außerdem kann der Einfluss der N-Form auf die Wurzelmorphologie im Laufe der pflanzlichen Entwicklung variieren. Chen et al. (2016) konnten in einem Gefäßversuch mit Tomaten nachweisen, dass eine NH_4^+ -Applikation lediglich bei jungen Pflanzen zu höheren WL führt, während sich eine Ernährung auf Basis von NO_3^- insbesondere im späteren Vegetationsverlauf positiv auf die Wurzelentwicklung auswirkt. Diese Erkenntnisse decken sich partiell mit den Ergebnissen von Bloom (1997). Darin wurden bei den mit NH_4^+ -behandelten Tomatenpflanzen nach zwölf Tagen etwa 40% höhere WL als bei den mit NO_3^- ernährten Pflanzen erfasst. Obwohl die beschriebenen Prozesse einer sehr komplexen Regulierung unterliegen (Nacry et al. 2013), belegen die angeführten Studien, dass die den Pflanzen zur Verfügung stehende N-Form die Morphologie des Wurzelsystems

und damit auch die N-Aufnahme bzw. die N-Effizienz beeinflussen kann (Garnett et al. 2009). Die N-Form wiederum kann durch die Wahl des N-Düngers und dem Einsatz von stabilisierten N-Düngern reguliert werden (Kapitel 2.1.3).

2.2.3 Methoden zur Untersuchung der Wurzelentwicklung im Feld

Wurzeln gelten als die verborgene Hälfte (engl. the hidden half) von Pflanzen und können daher nicht direkt beobachtet, sondern häufig nur durch umfangreiche methodische Herangehensweisen untersucht werden (Polomski & Kuhn 2002). Insofern ist es bemerkenswert, dass Wissenschaftler bereits in den 20er Jahren des 18. Jahrhunderts das Wurzelsystem von Kulturpflanzen untersuchten. Das Interesse an Pflanzenwurzeln, hinsichtlich deren Entwicklung, Eigenschaften und auch Reaktion auf abiotische Faktoren wie der Düngung, nahm Mitte bis Ende des 19. Jahrhunderts erheblich zu. Die hierbei praktizierten Methoden reichten von Ausgrabungen im Feld, über Gefäßversuche bis hin zu der Beobachtung von Wurzeln hinter Glaswänden (sog. Rhizotrone) (Böhm 1979). Die Entwicklung und Etablierung neuer Techniken wurde im letzten Jahrhundert weiter forciert und hält bis heute an. Zudem werden vermehrt analytische Methoden aus anderen Fachbereichen wie der Humanmedizin für die Wurzelforschung adaptiert. Dazu zählen beispielsweise die Endoskopie für die Analyse von Wurzeln in Minirhizotrone (Polomski & Kuhn 2002) sowie die Computertomografie (CT), wodurch das Wurzelwachstum im Boden *in situ* untersucht werden kann (Blaser et al. 2018).

Im Folgenden werden die vielfach angewandten Methoden zur Wurzelforschung summarisch dargestellt. Eine eindeutige systematische Klassifizierung der vorhandenen Methoden ist jedoch nicht möglich, da mehrere, im Prinzip unterschiedliche Methoden, ähnliche Merkmale aufweisen. Deshalb besitzt jede Gruppierung generell einen subjektiven Charakter (Böhm 1979). Einerseits können mithilfe von Ganzpflanzenausgrabungen und Gefäßversuchen, Profilwandmethoden, Pinnwänden, Boden- bzw. Bohrkernen, Magnetresonanztomografie sowie dem Einsatz verschiedener Isotopen und Marker Aussagen zur Wurzelverteilung und -masse in bestehenden Beständen getroffen werden. Andererseits bieten sich zur Beurteilung der Wachstumsdynamik von Wurzeln insbesondere Rhizotrone, Minirhizotrone und einwachsende Taschen (engl. in-growth bags) an (Smit et al. 2013). Auf Basis der Erkenntnisse aus den genannten Methoden werden ergänzend computergestützte Modelle entwickelt, mit denen die Komplexität von Wurzelsystemen zunehmend besser verstanden wird. Dies ermöglicht sowohl die Überprüfung von Hypothesen über die aus den experimentellen Ergebnissen abgeleiteten Wechselwirkungsmechanismen und als auch eine Extrapolation kleinräumiger Aussagen auf eine höhere Darstellungsebene (Smit et al. 2013). In der Arbeit von Judd et al. (2015) sind die am häufigsten verwendeten Methoden zur Messung und Analyse von Wurzelsystemen, gegliedert nach Informationsart, Destruktivität für Wurzeln sowie Vor- und Nachteile, übersichtlich aufgelistet. Angesichts hoch komplexer Wachstums- und Umsatzprozesse von Wurzeln hängt die Wahl der Untersuchungsmethode stets vom Forschungsziel

ab (Polomski & Kuhn 2002). Demnach sind die zu erfassenden Parameter und die funktionale, physiologische oder ökologische Relevanz einzelner morphologischen Untersuchungen von Wurzeln im Vorfeld jedes Versuches klar zu definieren (Atkinson 2000; Smit et al. 2013). Um ein möglichst breites Spektrum an Wurzelparameter abdecken und das Wurzelwachstum erfassen zu können, wurden in der vorliegenden Arbeit die Bohrkernmethode sowie Minirhizotronetechnik verwendet, welche nachfolgend umfassend beleuchtet werden.

Bohrkernmethode

Zur Entnahme von volumetrischen Boden-Wurzel-Proben gilt die Bohrkernmethode als geeignetste und am häufigsten verwendete Herangehensweise unter Feldbedingungen. Hierbei werden die Proben mit Hilfe von Handbohrern oder mechanischen Geräten entnommen und die Wurzeln durch Waschen vom Boden getrennt (Böhm 1979). Anhand der ausgewaschenen Wurzeln lassen sich *in situ* die vertikale Wurzelverteilung und das Wurzelwachstum bestimmen. Die Ergebnisse können als Referenz und zur Evaluierung anderer Methoden und Analysen in der Wurzelforschung verwendet werden (Polomski & Kuhn 2002).

Die Basis für die Bohrkernmethode bilden die von Goedewaagen entwickelten Handbohrer, welche von Schuurman & Goedewaagen (1971) beschrieben wurden. Denselben Autoren nach sollte der Innendurchmesser des Bohrers mindestens sieben Zentimeter aufweisen. Anderenfalls muss die Anzahl der Wiederholungen erhöht werden, welche in der Regel zwischen drei bis sechs liegt (Böhm 1979). Die Beprobungstiefe wird häufig durch den Bodentyp und insbesondere den Steingehalt des Bodens eingegrenzt. Während auf Torf oder anderen weichen Böden mit nur geringem Steingehalt Handbohrer eingesetzt werden können, sind auf steinreichen Böden größere motormanuell betriebene Fallhämmer bzw. hydraulisch betriebene Maschinen notwendig (do Rosário et al. 2000; Polomski & Kuhn 2002). Wie bei den meisten Methoden zur Bestimmung der Wurzelentwicklung ist auch bei der Bohrkernmethode die Repräsentativität der Proben zu beachten. Die entnommenen Bohrkerne stellen eine Stichprobe zu einem bestimmten Entwicklungszeitpunkt der Pflanze dar, sodass die Aussagekraft *via* Wiederholungsanzahl unterstrichen werden muss (do Rosário et al. 2000).

Das Waschen der Wurzeln aus den Bodenmonolithen ist der zeitaufwändigste Abschnitt der Bohrkernmethode. Im Allgemeinen gilt, dass mit zunehmendem Sandanteil des Bodens und einer größeren Maschenweite des Siebes der Zeitaufwand abnimmt. Für Böden mit einem hohen Anteil an organischer Substanz wird eine Maschenweite von mindestens 2 mm empfohlen (do Rosário et al. 2000; Smit et al. 2013). Anhand der extrahierten Wurzeln kann die Entwicklung der Wurzeln u. a. als Gewicht, Oberfläche, Volumen, Durchmesser und Länge oder als Anzahl der Wurzelspitzen sowie als Wurzellängendichte (WLD) ausgedrückt werden (Judd et al. 2015). Der Einsatz computergestützter Programme, wie der gängigen Software WinRHIZO®, ermöglicht dabei eine schnelle und präzise Bestimmung wurzelmorphologischer Parameter (Wang & Zhang 2009). Bereits

Newman (1966) veröffentlichte in den 70er Jahren des vergangenen Jahrhunderts eine Methode mit der die WL über die Anzahl der Schnittpunkte von Wurzeln mit einer vorgegebenen Rasterfläche bestimmt werden konnte. Diese sog. Line intersect Methode wurde nachträglich von Tennant (1975) modifiziert. Aufgrund des technischen Fortschritts bei der Analyse und Auswertung von ausgewaschenen Wurzeln, wird dieses Verfahren in heutigen Studien nur noch selten eingesetzt.

Beim Waschen der Wurzeln besteht jedoch die Gefahr einen Teil der Feinwurzeln zu verlieren. Untersuchungen an verschiedenen Kulturen zeigen, dass zwischen 20–40% der Wurzelmasse verloren gehen können (do Rosário et al. 2000), wovon die größten Verluste hauptsächlich innerhalb der ersten 40 bis 60 Minuten des Waschvorganges auftreten (Metcalf et al. 2007). Zudem können an den Wurzeln Bodenpartikel und andere organische Partikel haften und somit die Masse sowie die erfassten wurzelmorphologischen Parameter beeinflussen. Dazu zählen außerdem abgestorbene Wurzeln (do Rosário et al. 2000).

Eine Alternative zum Auswaschen der Wurzeln stellt die sog. Core-break Methode dar. Hierbei werden die entnommenen Bodenmonolithe in der Mitte horizontal geteilt und die Anzahl der sichtbaren Wurzeln an beiden Bruchflächen gezählt. Anhand dieser einfachen Methode kann das Vorhandensein von Wurzeln und die Durchwurzelung in Abhängigkeit von der Tiefe mit geringem Zeitaufwand, jedoch mit geringer Genauigkeit abgeschätzt werden (Böhm 1979; do Rosário et al. 2000; van Noordwijk et al. 2001; Smit et al. 2013).

Minirhizotrontechnik

Die Minirhizotrontechnik stellt eine weitverbreitete Methode zur kontinuierlichen und zerstörungsfreien Beobachtung von Wurzelsystemen lebender Pflanzen unter Feldbedingungen dar (Smit et al. 2000). Hierbei werden transparente Röhren, meist in einem Winkel zur Vertikalen zwischen 30 bis 45°, in den Boden eingebaut und somit das angrenzende Wurzelsystem durch die Röhrenwand hindurch beobachtet (Abbildung 2.2-1). Vor der Installation der Röhren muss ein Loch mit einem minimal kleineren Durchmesser gebohrt werden, sodass ein optimaler Kontakt zwischen Boden- und Röhrenoberfläche gewährleistet ist (Johnson et al. 2001). Als Material für die Röhren wurde in der Vergangenheit verstärkt Plexiglas eingesetzt, wobei sich ebenso Röhren aus Glas, Teflon und Polycarbonat eignen (Polomski & Kuhn 2002). Die Wahl der Röhren wird häufig durch die Materialverfügbarkeit und die -kosten bestimmt. Ein markanter Einfluss des Materials auf die Wurzelentwicklung konnte nicht nachgewiesen werden. Die Abmessung der Röhren kann variieren, wenngleich sie üblicherweise 1,5 bis 2,0 m lang sind und eine Wandstärke von 3 bis 7 mm aufweisen. Der Röhrendurchmesser richtet sich generell nach der Größe der Kamera bzw. des Aufnahmegerätes. Häufig betragen die Innen- und Außerdurchmesser der Röhren 50 bzw. 57 mm. Größere Durchmesser können einerseits die Präzision verbessern und die lokale Variabilität des Bodens und Wurzelsystems überwinden, andererseits nehmen diese jedoch verstärkt Einfluss auf das Wurzelwachstum (Vamerali et al. 2012).

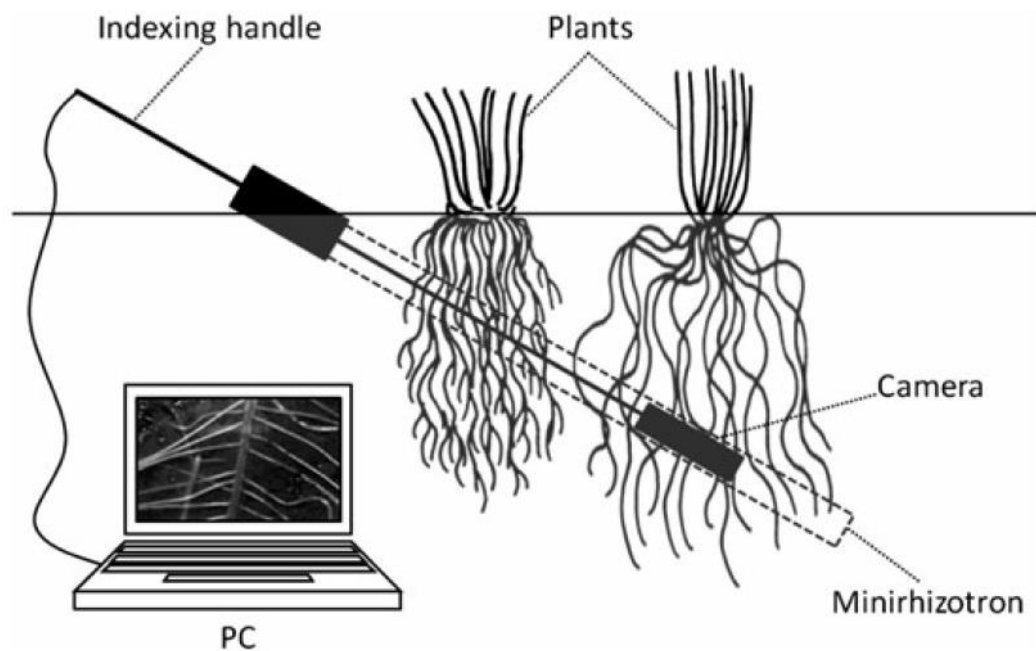


Abbildung 2.2-1: Skizze eines Minirhizotrons-systemes zur Wurzeluntersuchung (Vameralli et al. 2012).

Bereits Bates (1937) beobachtete mittels in den Boden eingesetzter Glasröhren in Kombination mit einem Spiegel und einer batteriebetriebenen Lampe das Wurzelwachstum *in situ* an gleichbleibender Position. Seit den 1970er Jahren wurde u. a. durch den Einsatz von Endo-, Tele- und Periskopen die Qualität der Bilder zunehmend verbessert sowie die Bilderfassung erleichtert. Mittlerweile werden zur Beobachtung der Wurzeln auf den Röhrenoberflächen Videokameras oder Scanner in Kombination mit einem Computer verwendet (Rewald & Ephrath 2013). Anhand von jenen digitalen Minirhizotronbildern können diverse Parameter zu mehreren Zeitpunkten in demselben Tiefensegment bestimmt werden. Zu ihnen gehören beispielsweise die maximale Wurzeltiefe, WL und Anzahl der Wurzeln in einer konkreten Tiefe (Smit et al. 2000), die Lebensdauer von Wurzeln, die Wurzelzuwächse und der WD (Johnson et al. 2001). Zudem können anhand von Minirhizotronbildern sowohl Interaktionen zwischen Wurzeln und ihren Mykorrhizapartnern als auch zwischen Wurzeln und der Bodenfauna untersucht werden (Rewald & Ephrath 2013).

Die aus dem Einbau der Röhren hervorgehenden oben beschriebenen Potentiale für die Forschung von und an Wurzeln begrenzt jedoch zugleich die quantitative Analyse der Methode. Im Vergleich zur Bohrkernmethode werden bei der Minirhizotrontechnik im Allgemeinen in den oberen Bodenschichten weniger Wurzeln erfasst, während die Durchwurzelung in tieferen Schichten tendenziell überschätzt wird (Smit et al. 2000; Vameralli et al. 2012). Zudem wird angesichts eines hohen Zeitaufwands bei der manuellen Auswertung der Bilder meist nur die Wurzelanzahl und Durchwurzelungstiefe erfasst sowie die Gesamtwurzellänge geschätzt (Smit et al. 2000) Die

Bestimmung der Durchwurzelung erfolgt häufig mittels der sog. line intersect Methode (s. o.). Auf diese Weise wurde in zahlreichen Arbeiten mit unterschiedlichen Fragestellungen die Wurzelintensität, angegeben als Schnittpunkte je m Rasterlinie, kalkuliert (z. B. Thorup-Kristensen et al. 2009; Rasmussen et al. 2015; Chen et al. 2019; Svane et al. 2019).

Eine genauere und oftmals schnellere Möglichkeit der Bildauswertung stellen semiautomatisierte und vollständig automatisierte Bildanalysesoftware dar. Die Auswahl der Auswertungssoftware hängt dabei weitestgehend von den experimentellen Einschränkungen und den für die Beantwortung der Forschungsfrage relevanten Parametern ab (Lobet et al. 2011). In der Arbeit von Lobet et al. (2013) sind 19 bewährte Softwares zur Analyse von Minirhizotronbildern zusammengefasst. Dazu zählen u. a. WinRHIZO[®] Tron, RootSnap! und Rootfly. Allerdings sind semi- und vollautomatisierte Analysen von Minirhizotronbildern auch mit Nachteilen verbunden. In semiautomatisierten Programmen wie beispielsweise RootSnap! muss der Benutzer die Wurzel am Computerbildschirm manuell nachziehen, indem die Maus entlang der Wurzeln bewegt und der Durchmesser eingestellt wird (Rewald & Ephrath 2013). Dadurch kann die Wurzel eindeutig von der Bodenmatrix abgegrenzt werden. Dies ist jedoch mit einem enormen zeitlichen Mehraufwand verbunden. Bei der vollständig automatisierten Bildanalyse besteht das Kernproblem weniger in der zeitlichen Ressource, sondern vielmehr in der exakten Abgrenzung der Wurzeln von der Bodenmatrix. Fremdkörper, wie beispielsweise Wassertropfen, abgestorbene organische Bestandteile und Insekten sowie farbliche Unterschiede zwischen mineralischen Bodenpartikeln bilden einen heterogenen Hintergrund. Im Allgemeinen wird der Wurzel-Hintergrund-Kontrast über komplexe Algorithmen erhöht und somit die anschließende Binarisierung, d. h. Bildung eines Schwellenwertes, erleichtert (Vamerali et al. 2012). Die Präzision jenes Verfahrens hängt insbesondere von der Bildqualität und der Standortcharakteristik ab. Letzteres wird einerseits von der Homogenität und Farbe des Hintergrundes sowie andererseits von der Farbe, dem Durchmesser und der Verzweigung der Wurzeln bestimmt (Polomski & Kuhn 2002). Zahlreiche Forschergruppen sind weiterhin an der Entwicklung neuer Softwares oder Modifizierung bereits vorhandener Programme interessiert (z. B. Jeudy et al. 2016; Lobet et al. 2017). Zudem bilden jene zweidimensionalen Programme die Grundlage für dreidimensionale Projektionen (Atkinson et al. 2019).

3 Material und Methoden

3.1 Versuchsstandort

Zur Untersuchung des Einflusses verschiedener N-Düngerformen und dem damit verbundenen Düngeregime auf die Ertragsbildung und primär auf das Wurzelwachstum unter praxisnahen Bedingungen wurden in drei aufeinanderfolgenden Anbaujahren (Gesamtzeitraum 2013–2016) einjährige Feldversuche mit Winterweizen (*Triticum aestivum* L.) angelegt. Die Untersuchungen fanden auf dem Agrar- und Ernährungswissenschaftlichen Versuchszentrum der Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg in Merbitz statt. Der Versuchsstandort befindet sich am südlichen Rand der Magdeburger Börde, etwa 15 km nördlich der Stadt Halle (Saale) (51°37′ nördliche Breite, 11°53′ östliche Länge, etwa 160 m über dem Meeresspiegel) (Hinz 2013). Der Bodentyp ist ein Tschernosem (FAO 1998) mit einer 40–60 cm mächtigen weichseleiszeitlichen Sandlössdecke über saaleiszeitlichen fluviatilen Sanden und einer Bodenwertzahl > 80 (Hinz 2013). Die Versuchsfläche rotierte mit der standortspezifischen Fruchtfolge, wobei die einzelnen Flächen der drei Versuchsjahre nur wenige 100 m voneinander entfernt lagen. Die Versuchsfläche (0–30 cm Bodentiefe) aus 2013/2014 ist als schluffig-lehmiger Sandboden mit einem neutralen pH-Wert von 6,9 und einer hohen KAK von 16,2 cmol kg⁻¹ charakterisiert (Tabelle 3.1-1). Währenddessen sind die Versuchsflächen der beiden anderen Versuchsjahre als stark tonige Schluffböden mit etwas geringeren pH-Werten und niedrigeren KAK als der Boden aus 2013/2014 eingestuft. Alle drei Böden wiesen hohe C_{org}-Gehalte zwischen 1,45 bis 1,59% auf. Die Ureaseaktivität (UA) des Bodens aus 2013/2014 war mit 36,1 µg NH₄⁺-N (g Boden h)⁻¹ in etwa doppelt so hoch wie in den Böden der beiden darauffolgenden Versuchsjahre. Der N_{min}-Gehalt in 0–90 cm lag in den drei Versuchsjahren vor Vegetationsbeginn im Februar bei 79, 59 und 113 kg N ha⁻¹. Dieser setzte sich nahezu vollständig aus NO₃⁻ zusammen.

Tabelle 3.1-1: Bodeneigenschaften am Standort Merbitz in den Versuchsjahren 2013/2014, 2014/2015 und 2015/2016 in einer Tiefe von 0–30 cm.

Versuchs- jahr	Textur (g kg ⁻¹)			Boden- art ^{a)}	pH _{CaCl2}	C _{org} (%)	KAK (cmol kg ⁻¹)	BS (%)	Urease- aktivität ^{b)} (µg NH ₄ ⁺ -N (g Boden h) ⁻¹)
	Ton	Schluff	Sand						
2013/2014	150	480	370	Slu	6,9	1,45	16,2	93	36,1
2014/2015	200	650	150	Ut4	6,7	1,59	14,6	113	19,9
2015/2016	210	680	110	Ut4	6,4	1,47	14,0	109	18,0

C_{org} = organischer Kohlenstoff, KAK = Kationenaustauschkapazität, BS = Basensättigung

Die Bestimmung aller Parameter, mit Ausnahme der Ureaseaktivität, erfolgte durch BioChem agrar GmbH, Deutschland. Die Ureaseaktivität wurde von der SKW Stickstoffwerke Piesteritz GmbH mittels eines Durchflussphotometers bestimmt.

^{a)} Bodenart nach KA5 (Ad-hoc-AG Boden 2005)

^{b)} Kandeler & Gerber (1988)

Für den vom ostdeutschen Binnenklima geprägten Standort sind durchschnittliche Jahrestemperaturen von 9,8 °C und Jahresniederschlagsmengen von 546 mm, mit Niederschlagsmaxima in den Sommermonaten sowie im Mai und Juni und Niederschlagsminima im Oktober, Januar und Februar, charakteristisch (DWD 2012). Alle drei Versuchsjahre waren von November bis März tendenziell durch überdurchschnittliche Temperaturen und speziell in 2013/2014 und 2014/2015 durch unterdurchschnittliche Niederschläge gekennzeichnet (Tabelle 3.1-2). Jenes Defizit in der Wasserversorgung der Pflanzen setzte sich in 2014/2015 bis in den Juni fort. Im Vergleich zum 30-jährigen Mittel fehlten in den Vegetationsmonaten März bis Juni insgesamt 82 mm. In den anderen beiden Versuchsjahren ließen stärkere Niederschlagsereignisse in den Monaten April bis Juni ein weitestgehend normales Pflanzenwachstum zu. Deutlich überdurchschnittliche Temperaturen im Februar und März 2014 begünstigten in jenem Jahr einen zeitigen Vegetationsstart, sodass die Pflanzen zwei bis drei Wochen früher das 2-Knoten-Stadium (BBCH 32) als in den beiden darauffolgenden Jahren erreichten. Auf die Abreife und den Erntetermin hatten die differenzierten Witterungs- und Wachstumsbedingungen der drei Versuchsjahre keine Auswirkungen. Zudem wurde auf Basis der täglichen Durchschnittstemperaturen die kumulierte Temperatursumme ermittelt. Dazu wurden alle positiven Tagesmittelwerte vom Tag der Aussaat bis zu einem definierten Entwicklungsstadium der Pflanzen addiert, während negative Tagesmittelwerte unberücksichtigt blieben.

Tabelle 3.1-2: Monatliche Durchschnittstemperatur und Niederschlagsmenge der drei Versuchsjahre 2013/2014, 2014/2015 und 2015/2016 sowie das 30-jährige Mittel (1981–2010) am Standort Merbitz.

Versuchsjahr	Aug	Sept	Okt	Nov	Dez	Jan	Feb	März	Apr	Mai	Jun	Jul	Mittel/ Summe
Monatsdurchschnittstemperatur (°C)													
1981–2010	18,8	14,6	9,9	5,1	1,6	0,9	1,5	5,1	9,3	14,1	16,8	19,3	9,7
2013/2014	17,0	13,7	11,0	4,6	3,9	0,8	4,4	7,2	11,4	12,9	16,4	20,6	10,3
2014/2015	21,2	15,9	12,5	6,4	2,5	2,5	1,0	5,3	8,6	12,8	16,3	20,2	10,4
2015/2016	18,9	13,8	8,4	7,7	6,6	0,1	3,4	4,1	8,2	14,3	18,1	19,8	10,3
Monatsniederschlagsmenge (mm)													
1981–2010	54	50	33	46	46	37	31	43	36	55	53	62	546
2013/2014	109	43	43	66	22	21	9	8	31	109	42	88	591
2014/2015	128	64	61	14	10	60	8	23	25	27	31	109	560
2015/2016	27	33	60	43	13	43	41	31	16	45	54	28	434

Die Werte des 30-jährigen Mittels (1981–2010) basieren auf den Daten vom (DWD 2012).

3.2 Versuchsaufbau und Durchführung

Der Feldversuch wurde mit zwei verschiedenen N-Düngern und einer ungedüngten Kontrollvariante in vierfacher Wiederholung als vollständig randomisierte einfaktorielle Blockanlage in Form eines lateinischen Rechteckes angelegt. Stellvertretend für eine NO_3^- betonte N-Düngung wurde ein granulierter Kalkammonsalpeter (Prüfglied „KAS“, Produktname YaraBela® Extran® 27, Yara GmbH & Co. KG), bestehend zu gleichen Teilen aus NH_4^+ -N und NO_3^- -N (27% N), eingesetzt. Ein mit 0,075% (N-bez.) 2-NPT und 0,15% (N-bez.) MPA versetzter granulierter Harnstoff (Prüfglied „HS+UI+NI“, Produktname ALZON® neo-N, SKW Stickstoffwerke Piesteritz GmbH) repräsentierte eine NH_4^+ -basierende N-Düngung. Hierbei kennzeichnen die Kürzel 2-NPT und MPA den UI N-(2-Nitrophenyl) phosphorsäuretriamid bzw. NI N-[3(5)-Methyl-1H-pyrazol-1yl)methyl]acetamid. Die N-Dünger wurden jeweilig mit einer N-Menge von 180 kg N ha^{-1} per Handstreuung oberflächlich aufgebracht. Der KAS wurde in drei Gaben mit je 60 kg N ha^{-1} zu Vegetationsbeginn, zu BBCH 31 und als Qualitätsgabe (BBCH 51) appliziert. Die Applikation des Prüfgliedes HS+UI+NI erfolgte mit 100 kg N ha^{-1} zu Vegetationsbeginn und mit 80 kg N ha^{-1} zu BBCH 37 in zwei Gaben. Die Einordnung der phänologischen Entwicklung des Weizens wurde nach der BBCH-Skala von Lancashire et al. (1991) vorgenommen. Die Untersuchungen fanden an Winterweizen der Sorte *Julius* statt, wobei Sommergerste (*Hordeum vulgare* L.) jeweils als Vorfrucht diente. Die Aussaat erfolgte in den drei Versuchsjahren zwischen dem 30. September und 15. Oktober mit einer Saatstärke von 300 Körner m^{-2} . Der Einsatz von Wachstumsreglern sowie die Durchführung genereller Pflanzenschutzmaßnahmen erfolgten nach guter fachlicher Praxis und über alle Varianten einheitlich.

Eine 2 m breite Gasse, welche ebenfalls mit Winterweizen bestellt wurde, teilte die vier Wiederholungsblöcke voneinander ab. Jede der insgesamt zwölf Parzellen wurde in fünf Teilparzellen von $10 \text{ m} \times 1,2 \text{ m}$ (12 m^2) segmentiert, in denen verschiedene Boden, Pflanzen- und Wurzeluntersuchungen erfolgten (Tabelle 3.2-1). Die einzelnen Maßnahmen und die dazugehörigen Analysen sind im Kapitel 3.3 beschrieben.

Tabelle 3.2-1: Maßnahmen und deren Durchführungszeitpunkt gegliedert nach Teilparzellen.

Teilparzelle	Maßnahme	Zeitpunkt (BBCH-Stadium)
I, V	Randparzelle (keine Maßnahmen ausgeführt)	-
II	Wurzelbeobachtung <i>via</i> Minirhizotrontechnik	32, 37, 65
	Bestimmung N_{\min} -Gehalt (0–60 cm)	vor VB, 32, 39
	Bonitur (BBCH-Stadium, Pflanzenhöhe)	wöchentlich ab VB
III	Ernte (Korn und Stroh)	99
IV	Wurzeluntersuchungen <i>via</i> Bohrkernmethode	32, 37, 65
	Bestimmung Bodenwassergehalt (0–30 cm)	32, 37, 65
	Erhebung relevanter Ertragskomponenten	abhängig von BBCH

N_{\min} = mineralischer Stickstoff; VB = Vegetationsbeginn

3.3 Untersuchungsmethoden und Analysen

3.3.1 Bodenanalysen

N_{min}-Gehalt des Bodens

Die Quantifizierung des N_{min}-Gehaltes im Boden erfolgte in allen drei Versuchsjahren in einer Tiefe von 0 bis 90 cm (1. Termin) bzw. von 0 bis 60 cm (2. und 3. Termin). Anhand von drei definierten Messzeitpunkten wurde sowohl die Eigenart der N-Dünger als auch die Düngestrategien erfasst: (1) zu Vegetationsbeginn und vor den ersten N-Düngergaben, (2) nach der ersten Gabe HS+UI+NI und der zweiten Gabe KAS sowie (3) nach der zweiten Gabe HS+UI+NI und vor der dritten Gabe KAS. In 2013/2014 fand die dritte Probenentnahme etwas früher und unmittelbar nach der zweiten Applikation von HS+UI+NI statt, sodass diese Werte bei der Auswertung nicht berücksichtigt wurden. Die Bodenproben wurde in die Tiefenbereiche 0 bis 30, 30 bis 60 cm und zum ersten Termin zudem in 60 bis 90 cm unterteilt. Hierzu wurden mithilfe eines Pürckhauer Bohrstocks Mischproben aus drei Einstichen je Tiefenbereich und je Wiederholung entnommen. Die anschließende Analyse, getrennt nach NH₄⁺-N und NO₃⁻-N, erfolgte nach VDLUFA-Methoden Band. I, A 6.1.4.1 durch Extraktion mit 0,0125 M CaCl₂ und wurde von der Eurofins Agraranalytik Deutschland GmbH durchgeführt.

Bodenwassergehalt

Zur Bestimmung des gravimetrischen Bodenwassergehaltes (BWG) der Ackerkrume (0–30 cm) wurde ein ca. 1 cm breiter Bohrstock in dreifacher Wiederholung je Teilparzelle eingestochen. Im Anschluss wurden 10 g des Bodenmaterials im Trockenschrank bei 105 °C für zwei Stunden getrocknet und nachfolgend zurückgewogen (nach DIN 38414-2). Die Beprobungen erfolgten parallel zu den Wurzeluntersuchungen *via* Bohrkernmethode zu den BBCH-Stadien 32, 37 und 65. Lediglich in 2014/2015 wurde die dritte Untersuchung etwas verspätet zum BBCH 71 durchgeführt.

3.3.2 Labormodellversuch

In dem sogenannten Bodenmodelltest wurde die N-Dynamik im Boden von HS ohne Inhibitoren (kein Prüfglied im Freilandversuch) und der inhibierten Variante HS+UI+NI untersucht. Auf diese Weise konnte insbesondere die Wirkung des NI in Kombination mit einer HS-Düngung unter kontrollierten und verlustfreien Bedingungen überprüft werden. Dazu wurden in allen drei Versuchsjahren zur Aussaat des Winterweizens über das gesamte Versuchsfeld randomisierte Bodenproben aus einer Tiefe von 0 bis 30 cm als Mischprobe entnommen, anschließend luftgetrocknet und auf 2 mm gesiebt. Von diesem Bodenproben wurden jeweils 100 g in dreifacher Wiederholung bis auf 50% der maximalen Wasserkapazität (WK_{max}), bei gleichzeitiger Zugabe des N-Düngers und der Inhibitoren, bewässert und in opake Kowalit-Flaschen bei 20 °C Raumtemperatur und Dunkelheit inkubiert. Die 50% WK_{max} entsprachen je nach Versuchsjahr zwischen 16 bis 20 ml destilliertem H₂O pro 100 g Boden. Zur Minimierung gasförmiger Verluste, in Form von

Wasserdampf und NH_3 , wurden die Flaschen mit einer PET-Folie verschlossen. Die applizierte HS-Düngeremenge entsprach einer Applikation von 10 mg N pro 100 g Boden.

Im weiteren Versuchsverlauf wurden durch KCl-Extraktion an Teilproben (ca. 6 g Boden) die NH_4^+ -N sowie NO_3^- -N-Konzentrationen in einem Abstand von einem bis sieben Tagen, analog zur Analyse der Feldproben, photometrisch bestimmt. Im Vergleich zur herkömmlichen Methode mit 0,0125 M CaCl_2 (s. o.) ist das hierbei verwendete 1 M KCl, aufgrund höherer Molarität, ein stärkeres Extraktionsmittel. Aus den Messwerten der Varianten HS+UI+NI und HS wurde der Einfluss des UI und NI auf die HS-Hydrolyse sowie Nitrifikation bestimmt. Zur Quantifizierung der Nitrifikationshemmung wurde das Wirkungskriterium $t_{50} \text{NO}_3^-$ -Wert genutzt. Der $t_{50} \text{NO}_3^-$ -Wert ist die Zeit in Tagen, in der 50% der eingesetzten N-Quellen in NO_3^- umgesetzt wurden.

3.3.3 Wachstum, Ertrag und N-Effizienz

Nach Ende des Winters und mit Beginn des Vegetationsbeginns wurden wöchentlich an zehn Pflanzen die phänologische Entwicklung als BBCH-Stadien und die Pflanzenhöhe an stehenden Pflanzen bestimmt. Zur Erhebung ertragsrelevanter Komponenten, wie ährentragende Halme je m^2 , Körner je Ähre, Korndichte sowie Tausendkorngewicht (TKG), wurden nach der Aussaat vier Zählreihen auf einer Länge eines laufenden (lfd.) Meters je Wiederholung abgesteckt (Tabelle 3.2-1). Dementsprechend erfolgten die Untersuchungen stets an den gleichen Pflanzen und konnten auf eine Fläche von 1 m^2 extrapoliert werden. Zur Ernte wurden die Ähren der Zählreihen per Hand geerntet und mithilfe eines Handmähdreschers gedroschen. Aus der Summe der Ähren konnten abschließend die Körner je Ähre und die Korndichte berechnet werden. Das TKG wurde unter Verwendung eines Kornzählgeräts an den gereinigten und getrockneten Teilproben des Ernteguts quantifiziert.

Die Ernte des Winterweizens erfolgte mit einem Parzellenmähdrescher an der ungestörten Teilparzelle. Die gedroschenen Weizenkörner wurden anschließend gereinigt und eine Teilprobe für die Kornfeuchte bis zur Gewichtskonstanz bei 65 °C für 48 h getrocknet. Nachfolgend wurde der Kornertrag um die Kornfeuchte korrigiert und auf einen Trockensubstanzgehalt von 86% standardisiert. Ausgewählte Teilproben des Strohens wurden bei 105 °C für 24 h getrocknet, im Anschluss zurückgewogen und der Parzellenstrohertrag an den ermittelten Feuchtegehalt angepasst. Basierend auf diesen Analysen wurde der Harvestindex (HI), als Indikator für die Verteilung der Assimilate innerhalb der Pflanze, ermittelt (Rathke et al. 2006):

$$(3.1) \quad \text{Harvestindex (HI)} = \frac{\text{Korn trockenmasse}}{\text{oberirdische Gesamt trockenmasse}}$$

Der RPG der Körner wurde nach Kjeldahl, ICC-Standard Nr. 105 (Eurofins Agraranalytik Deutschland GmbH, Deutschland) bestimmt und bezieht sich auf die Trockenmasse (TM) des Korns.

Weiterhin wurden zur Ernte die Pflanzen von 2 x 0,5 lfd. m zweier aufeinanderfolgender Pflanzenreihen bodennah geerntet. Die entnommenen Pflanzen wurden bei 65 °C für 48 h getrocknet und deren TM bestimmt. Anschließend wurden die N-Konzentrationen an Mischproben, getrennt nach vegetativen und generativen Pflanzenteilen, mittels des vario EL III Element Analyzers (Elementar Analysensysteme GmbH, Deutschland) erfasst. Dazu mussten die einzelnen Pflanzenteile vorab durch ein Mahlsieb mit einer Maschenweite von 0,08 mm zerkleinert werden. Diese Analyse legte die Grundlage für die Berechnungen weiterer agronomischer Indizes. Unter Einbezug des Kornertrages und der N-Düngermenge wurde das N-Saldo (kg N ha⁻¹) bestimmt (Sieling & Kage 2010), sowie, basierend auf den Erträgen und N-Konzentrationen, der N-Entzug der Pflanzen mit Korn und Stroh ermittelt (Schuster et al. 2007). Zur Beurteilung der Dünger-N-Ausnutzungseffizienz wurde einerseits der N-Harvestindex (NHI), definiert als Verhältnis des N im Korn zum N in der gesamten oberirdischen Masse (Rathke et al. 2006), und andererseits die N-Nutzungseffizienz (NUE, %), stellvertretend für das Output zu Input-Verhältnis des N, kalkuliert (Verzeaux et al. 2017):

$$(3.2) \quad \text{N-Saldo} = N_{\text{Input (Dünger)}} - N_{\text{Output (Korn)}}$$

$$(3.3) \quad \text{N-Entzug (Korn + Stroh)} = N_{\text{Output (Korn)}} + N_{\text{Output (Stroh)}}$$

$$(3.4) \quad \text{N-Harvestindex (NHI)} = \frac{N_{\text{Output (Korn)}}}{N_{\text{Output (Korn+Stroh)}}}$$

$$(3.5) \quad \text{N-Nutzungseffizienz (NUE)} = \frac{N_{\text{Output (Korn)}}}{N_{\text{Input (Dünger)}} + N_{\text{min}}} \times 100$$

3.3.4 Wurzeluntersuchungen

Neben dem Monitoring der oben genannten Boden- und oberirdischen Pflanzenparameter standen insbesondere Untersuchungen zur Wurzelentwicklung im Mittelpunkt des Feldversuchs. Für die Beobachtung und Quantifizierung des Wurzelwachstums unter Feldbedingungen wurde sowohl ein destruktives als auch ein nicht-destruktives Verfahren angewandt. Die Beprobungen der Wurzeln erfolgten zu den BBCH-Stadien 32, 37 und 65. Hierbei wurden die Untersuchungstermine zu BBCH 32 und 37 nach den Düngezeitpunkten ausgerichtet, sodass charakteristische Wirkungen der einzelnen N-Düngerformen in Erscheinung treten konnten. Indessen sollte durch die Beprobung zu BBCH 65 die maximale Wurzelausdehnung der Pflanzen erfasst werden (Fageria 2012; Gregory et al. 1978).

Bohrkernmethode

Die Entnahme volumetrischer Bodenmonolithe, bekannt als Bohrkernmethode, stellt die einfachste und geeignetste destruktivste Herangehensweise zur Ermittlung der Durchwurzelung im Boden unter Feldbedingungen dar (Böhm 1979). Im Versuch wurde eine 1 m lange und 10 bzw.

9,3 cm im Außen- und Innendurchmesser breite Rammkernsonde (Eijkelkamp Soil & Water, Niederlande) durch einen Schlaghammer motormanuell in eine Bodentiefe bis 80 cm getrieben. Mittels eines Hebebaums wurde der gefüllte Zylinder anschließend aus dem Boden gezogen und die Bodensäule in 20 cm Abschnitte ($\approx 1.358 \text{ cm}^3$) segmentiert. Die Entnahme der Bohrkerne erfolgte in 2013/2014 und 2014/2015 zwischen zwei Pflanzenreihen und in 2015/2016 innerhalb einer Pflanzenreihe. In den ersten zwei Versuchsjahren wurde je Wiederholung und Prüfglied zu jedem Termin eine Probe gezogen ($N=4$). Währenddessen wurden in 2015/2016 bei beiden N-Düngervarianten je Wiederholung und Termin zwei Bohrkerne entnommen und die Ergebnisse anschließend arithmetisch gemittelt. Aufgrund von trockener Bodenverhältnisse im Mai und Juni war eine Beprobung mittels Bohrkernmethode zum dritten Termin (BBCH 65) in 2013/2014 lediglich bis zu einer Bodentiefe von 40 cm möglich bzw. entfiel in 2014/2015 vollständig. Zur Vermeidung von Abbauprozessen während der Lagerung wurden die Kerne bis zum Tag der Verarbeitung eingefroren und zum Auswaschen bei Zimmertemperatur aufgetaut (White et al. 2015).

Die segmentierten Bodenmonolithe (20 cm) wurden in einem Eimer mit Wasser aufgeschlämmt und durch Wasserdruck in eine Strudelbewegung versetzt. Während sich die schwereren Bodenpartikel am Eimergrund absetzten, wurde das aufsteigende, leichtere organische Material am Überlauf von einem Sieb mit einer Maschenweite von 0,63 mm aufgefangen. Anschließend wurden die hellbeigen, vitalen Wurzeln von den dunkelgrauen bis schwarzen, abgestorbenen Wurzeln und anderen organischen Rückständen per Hand abgetrennt und in einem Gemisch aus Ethanol und destilliertem Wasser in einem 1:1-Mischungsverhältnis bei 5 °C gelagert. Die ausgewaschenen vitalen Wurzeln wurden auf einer mit destilliertem Wasser gefüllten Schale eines Flachbildscanners (Epson perfection V800 photo, Epson Europe BV, Niederlande) platziert und mit einer Auflösung von 600 dpi eingescannt. Mithilfe der Bildanalysesoftware WinRHIZO® 2013 (Recent Instruments Inc., Canada) wurden bedeutende Wurzelparameter, einschließlich WL (cm), Wurzelvolumen (WV, cm^3) und mittlerer Wurzeldurchmesser (MWD, mm), erfasst. Abschließend wurden die Wurzeln bei 105 °C für 24 h getrocknet und die WTM (g) bestimmt. Die WLD (cm cm^{-3}), Wurzelrockenmassendichte (WTMD, mg cm^{-3}), Wurzelgewebedichte (WGD, mg cm^{-3}) und spezifische Wurzellänge (SWL, m g^{-1}) wurden wie folgt berechnet (Ostonen et al. 2007; Birouste et al. 2014; Carvalho & Foulkes 2019):

$$(3.5) \quad \text{WLD} = \frac{\text{WL}}{\text{Bodenvolumen}}$$

$$(3.6) \quad \text{WTMD} = \frac{\text{WTM}}{\text{Bodenvolumen}}$$

$$(3.7) \quad \text{WGD} = \frac{\text{WTM}}{\text{WV}}$$

$$(3.8) \quad \text{SWL} = \frac{\text{WL}}{\text{WTM}}$$

Die Wurzeln vom BBCH 32 aus dem Versuchsjahr 2013/2014 konnten nicht auf deren WTM analysiert werden.

Die Bestimmung der vertikalen Wurzelverteilung erfolgte mittels der asymptotischen Gleichung nach Gale & Grigal (1987):

$$(3.9) \quad Y = 1 - \beta^d$$

wobei Y die kumulierte Wurzelfraktion (ein Wert zwischen 0 und 1) mit zunehmender Bodentiefe d (cm) und β den geschätzten dimensionslosen Wurzelverteilungskoeffizienten abbilden. Während höhere β -Werte einen höheren Wurzelanteil mit zunehmender Bodentiefe implizieren, korrespondieren niedrigere β -Werte mit einem höheren Wurzelanteil im Oberboden (Jackson et al. 1996). Darauf basierend konnte in der vorliegenden Arbeit sowohl die Wurzelverteilung zwischen den Prüfgliedern und Jahren gegenübergestellt als auch die Tiefenverläufe von Kulturpflanzen aus anderen Studien verglichen werden. Als Grundlage für das Modell dienten die prozentualen kumulierten Wurzellängen jedes Prüfglieds, welche in der Tiefe 0–20 cm am geringsten waren und im Bereich 60–80 cm den Wert 1 annahmen.

Core-break Methode

In 2015/2016 wurde innerhalb der Bohrkernmethode die sogenannte Core-break Methode als ergänzendes Instrument etabliert. Anhand dieser recht einfach durchzuführenden destruktiven Methode erhält der Betrachter einen schnellen Überblick zur Durchwurzelung des Bodens im Tiefenverlauf (Böhm 1979). Hierzu wurden nach dem Vorbild von Böhm (1979) sowie Kücke et al. (1995) die 20 cm langen aufgetauten Bodenmonolithe vor dem Auswaschen horizontal in zwei etwa gleich große Stücke geteilt, die sichtbaren vitalen Wurzeln an beiden Bruchoberflächen gezählt und die Ergebnisse beider Seiten addiert. Die Wurzeln wurden weder nach Länge noch nach Durchmesser unterschieden und stets als vollständige Wurzel erfasst (Böhm 1979). Die somit ermittelte Wurzelintensität wurde als Anzahl (n) Wurzeln je cm² angegeben.

Mit abnehmender Bodenfeuchte wurde es zunehmend schwerer die Proben zerstörungsfrei und ohne Zerbröseln zu teilen. Bodenmonolithe, die beim Zerbrechen beschädigt wurden und somit eine exakte Bestimmung der Wurzelanzahl an beiden Bruchseiten nicht mehr gewährleisten konnten, blieben bei der Bestimmung der Wurzelintensität mittels Core-break Methode außen vor. Aufgrund einer daraus resultierenden uneinheitlichen Anzahl von Wiederholungen der einzelnen Varianten zu allen drei Beprobungen war eine prüfgliedspezifische Darstellung der Ergebnisse aus der Core-break Methode nicht zielführend. Demnach wurde lediglich der Zusammenhang zur WLD der ausgewaschenen Proben untersucht und darüber die Core-break Methode verifiziert. Um eine bestmögliche Korrelation der Datenpaare zu erhalten, wurde für jeden Termin sowohl eine lineare ($y = a + bx$) als auch quadratische Gleichung ($y = (c + dx)^2$) zur Berechnung angewandt (Drew & Saker 1980).

Minirhizotrontechnik

Als weitere Methode zur Erfassung der Wurzelentwicklung im Feld wurde die Minirhizotrontechnik in Kombination mit einem Rundscanner eingesetzt. Dieses nicht-destruktive Verfahren ermöglichte ein dynamisches Wurzelmonitoring über den Zeitraum eines gesamten Versuchsjahres an einem fest definierten Abschnitt im Boden. Hierfür wurden je Wiederholung zwei 2 m lange mit 7 cm im Außen- und 6,4 cm im Innendurchmesser breite farblose Plexiglasröhren (insgesamt 24 Röhren) in einem Winkel von 45° zur Vertikalen eingebaut. Dies deckt sich mit der Literatur, worin häufig Einbauwinkel zwischen 30 und 45° angegeben werden (zusammengefasst von Rewald & Ephrath 2013). Die Installation erfolgte unmittelbar nach der Aussaat des Winterweizens unterhalb einer Saatreihe. Zuvor wurde das Bodenmaterial für die Röhren, unter Verwendung eines im Durchmesser minimal schmaleren Handbohrers ($\approx 6,5$ cm), ausgehoben. Somit wurde beim Einsetzen der Röhren ein bestmöglicher Kontakt zwischen den Röhren und der Bodenmatrix hergestellt (Johnson et al. 2001). Aufgrund von Sand- und Kiesschichten ab einer Bodentiefe von etwa 1 m konnten die Röhren maximal bis zu einer Länge von ca. 1,5 m eingebaut werden. In Anlehnung an Johnson et al. (2001) wurden die aus dem Boden herausstehenden Röhrenabschnitte mit Isolierband abgedunkelt und mit einem Deckel verschlossen. Somit wurden große Temperaturschwankungen innerhalb der Röhren sowie das Eindringen von Licht und Feuchtigkeit minimiert.

Ein Rundscanner (In-Situ Root Imager CI-600, CID Bio-Science, Inc., USA), verbunden mit einem Laptop *via* USB-Kabel, erzeugte hochauflösende 345° -Bilder (600 dpi) der Röhren-Boden Grenzfläche. Mit jedem 345° -Scan wurden 21,6 cm entlang der Röhren erfasst, resultierend in einem rechteckigen Bild von 21,6 x 19,6 cm. Angesichts eines Einbauwinkels von 45° entsprach jedes Bild einer vertikalen Tiefe von ca. 15 cm ($= \cos(45^\circ) \times 21,6$ cm). Aufgeteilt in fünf aufeinanderfolgende Tiefen (0–15, ..., 60–75 cm Bodentiefe) ergab sich daraus eine vertikale Beprobungstiefe von insgesamt 75 cm.

Grundsätzlich kann beim Einbau der Minirhizotronröhren die Bodenstruktur und damit das Durchwurzelungsmuster verändert werden, sodass die Wurzeldichte direkt auf der Röhrenoberfläche, insbesondere unterhalb der Röhre, höher ist als in der benachbarten Bodenmatrix (Johnson et al. 2001). Zur Minimierung einer potentiellen Überschätzung der Durchwurzelung mittels der Minirhizotrontechnik wurde dementsprechend lediglich der obere, zur Bodenoberfläche gerichtete Bereich der Röhren (90°) berücksichtigt. Dazu wurden die Bilder nachfolgend mit Hilfe der Software IrfanView Version 4.42 (Irfan Skiljan, Österreich) präzise auf eine Größe von 21,2 x 5,1 cm (≈ 110 cm²) zugeschnitten sowie Überschneidungen der Scans im Tiefenverlauf eliminiert. Demnach entsprach jedes Bild einer vertikalen Tiefe von 15 cm ($= \cos(45^\circ) \times 21,2$).

Die Bestimmung der Durchwurzelung erfolgte in erste Linie mittels der line intersect Methode, welche auf der Annahme basiert, dass die WL stark mit der Anzahl der Schnittpunkte von Wurzeln

mit einer vorgegebenen Rasterfläche korreliert (Newman 1966; Tennant 1975). Entsprechend wurde den zugeschnittenen Bildern ein Raster (MB-Ruler, MB-Softwaresolutions, Deutschland), bestehend aus 1 x 1 cm Quadraten, auferlegt. Über die Anzahl der Schnittpunkte von Wurzeln mit den Rasterlinien wurde die Wurzelintensität, angegeben als Schnittpunkte je m Rasterlinie, bestimmt (Thorup-Kristensen et al. 2009). Zur exakten Erfassung der Wurzelentwicklung entlang der Minirhizotronröhren und zur Validierung der line intersect Methode wurde zusätzlich die Software RootSnap! Version 1.3.2.25 (CID Bio-Science, Inc., USA) verwendet. Dazu wurden alle sichtbaren Wurzeln händisch am Computer nachgezogen und die WL bestimmt. Unter Einbezug der Bildgröße ($\approx 110 \text{ cm}^2$) wurde anschließend die flächenbezogenen Wurzellängendichte (FWLD) als m Wurzel je m^2 Röhre berechnet (Johnson et al. 2001). Eine Unterteilung zwischen vitalen und abgestorbenen Wurzeln wurde bei beiden Analysemethoden nicht vorgenommen.

Aufgrund zeitintensiver Auswertungsmethoden sowie einer Vielzahl an Wurzeln entlang des Beobachtungsbereichs der Röhren wurden letztlich allein die Aufnahmen der drei Beprobungstermine (je 120 Bilder) des Versuchsjahres 2015/2016 verwendet und diese lediglich mittels der line intersect Methode vollumfänglich analysiert. Jenes Verfahren wurde über die ermittelte FWLD der Software RootSnap! zum BBCH 32 verifiziert. Dazu wurde die Wurzelintensität mit der FWLD über eine lineare Korrelationsanalyse ($y = a + bx$) verglichen.

3.4 Statistische Analyse

Die statistische Auswertung erfolgte mit der Datenanalyse-Software SigmaPlot 13.0 (Systat Software, Inc. USA). Für die Varianzanalyse (ANOVA) des Hauptfaktors „N-Düngung bzw. N-Düngerform“ innerhalb eines Versuchsjahres wurden alle erfassten Parameter auf Normalverteilung (Shapiro-Wilk-Test) und Varianzhomogenität (Brown-Forsythe-Test) untersucht. Zum Vergleich der arithmetischen Mittelwerte wurde der Tukey als post-hoc Test verwendet und ein Signifikanzniveau von $p \leq 0,05$ festgelegt. In einer zweifaktoriellen ANOVA wurde das „Jahr“ als zusätzlicher Faktor getestet. Hierbei stellte sich heraus, dass die einzelnen ober- und unterirdischen Parameter durch die Versuchsjahre signifikant ($p \leq 0,05$) beeinflusst wurden und folglich eine Verrechnung über alle drei Versuchsjahre nicht zulässig war. Zur Untersuchung der Zusammenhänge zwischen einzelnen Parametern wurden Korrelationsanalysen nach Pearson durchgeführt. Die Berechnung des Wurzelverteilungskoeffizienten β nach Gale & Grigal (1987) erfolgte in der Programmiersoftware R Studio (Version 3.5.2) über eine nichtlineare Regression, welche mithilfe der kleinsten Quadratmethode angepasst wurde. Basis dafür waren die ermittelten kumulativen Wurzelfraktionen der Bohrkernmethode aus vier Wiederholungen in vier Tiefenbereichen. Angenommen wurden hierfür jeweils die mittleren Tiefen (10, 30, 50 und 70 cm) jeder Bodenschicht.

4 Ergebnisse

4.1 Bodenparameter

Bodenmodelltest

Unter den Versuchsbedingungen des Bodenmodelltests (10 mg N pro 100 g Boden bei 20 °C) erfolgte die vollständige Hydrolyse von HS zum NH_4^+ in den Böden aller drei Versuchsjahre überwiegend unabhängig von der N-Behandlung innerhalb weniger Tage. Bereits nach einem Tag lagen > 80% der anfangs applizierten N-Menge in Form von NH_4^+ vor (Abbildung 4.1-1). Anschließend waren die NH_4^+ -N-Konzentrationen rückläufig. Lediglich in dem Boden aus 2015/2016 zeigte die inhibierte Variante HS+UI+NI eine verlangsamte Hydrolyse, sodass erst sieben Tage nach der Applikation die höchste NH_4^+ -N-Konzentration quantifiziert wurde. Allerdings fand hierbei zwischen dem ersten und siebten Tag keine Messung statt. Die hemmende Wirkung des NI auf die Nitrifikation, resultierend in höheren NH_4^+ -N-Konzentrationen über einen längeren Zeitraum, wurde mit zunehmender Versuchsdauer in allen drei Böden ersichtlich. Während bei der Variante HS das NH_4^+ nach spätestens zehn Tagen vollständig umgesetzt war, lagen bei HS+UI+NI zeitgleich noch mindestens 40% des applizierten N-Düngers als NH_4^+ vor. Erst nach mehr als 20 Tagen befanden sich die NH_4^+ -N-Konzentrationen bei HS+UI+NI an der Nachweisgrenze. Der verzögerte NH_4^+ -Abbau bei HS+UI+NI äußerte sich folglich in einer verlangsamten Bildung von NO_3^- . Durch den Einsatz des NI wurde der vollständige Umsatz vom NH_4^+ zu NO_3^- um den Faktor zwei bis drei bzw. hinsichtlich der t_{50} NO_3^- -Werte um ca. sechs bis acht Tage verlangsamt (Tabelle A-5).

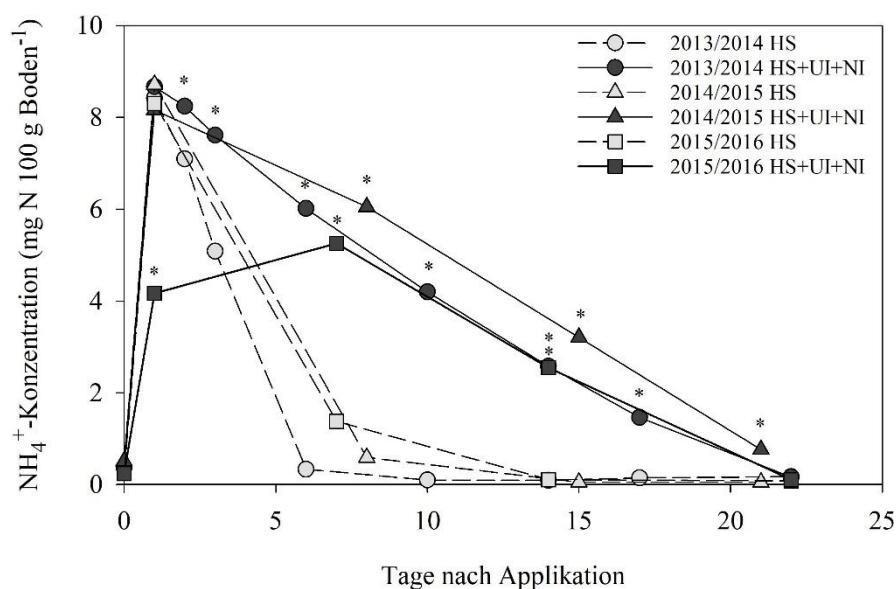


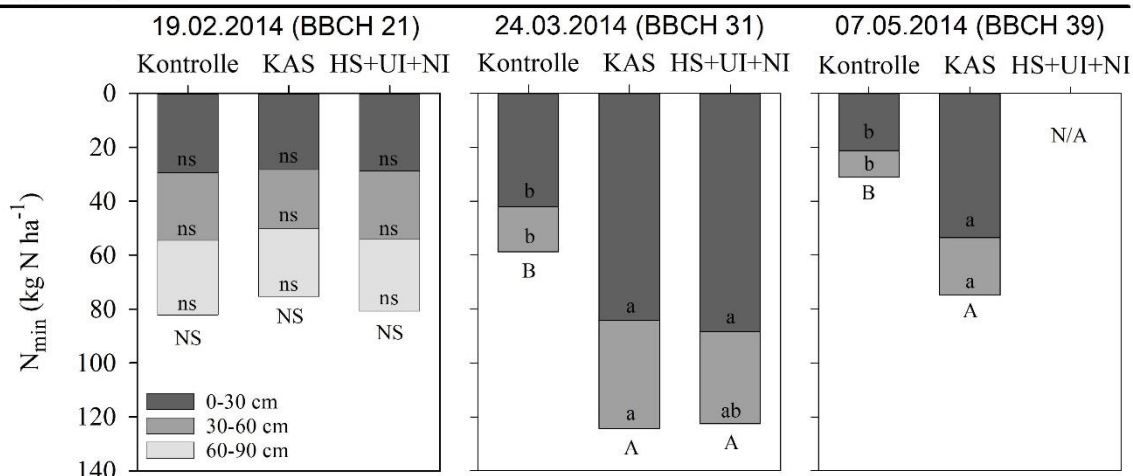
Abbildung 4.1-1: Dynamik der NH_4^+ -N-Konzentration in den Böden aus den drei Versuchsjahren 2013/2014, 2014/2015 und 2015/2016 nach einer Düngung mit Harnstoff (HS) und HS mit Urease-(UI) und Nitrifikationsinhibitor (NI) (HS+UI+NI) unter kontrollierten Laborbedingungen bei 20 °C (n = 3). Sternchen (*) kennzeichnen signifikante Unterschiede ($p \leq 0,05$) zwischen den N-Düngerformen innerhalb eines Bodens (Jahr).

N_{min}-Gehalt

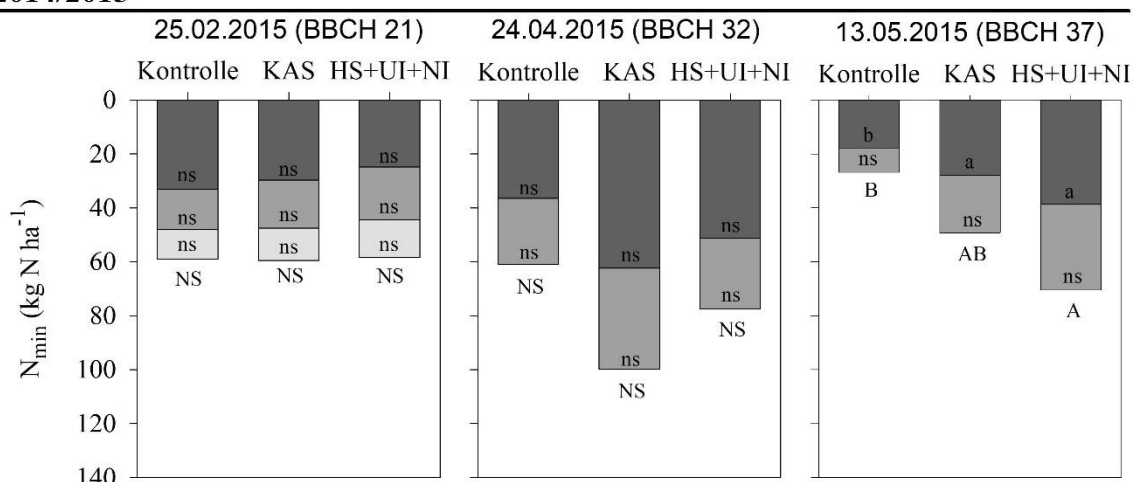
In den drei Feldversuchsjahren wurde der N_{min}-Gehalt des Bodens zu Vegetationsbeginn in der Bodentiefe 0 bis 90 cm bzw. zum zweiten und dritten Termin in 0 bis 60 cm erfasst. Vor der N-Düngung zu Vegetationsbeginn schwanken die N_{min}-Gehalte deutlich zwischen den Versuchsjahren, jedoch nicht zwischen den Prüfgliedern innerhalb eines Jahres (Abbildung 4.1-2). Die Böden enthielten hierbei entsprechend der zeitlichen Abfolge der Versuchsjahre 79, 59 und 113 kg N_{min} ha⁻¹. Auffällig für das erste und dritte Versuchsjahr war eine einheitliche Aufteilung der N_{min}-Gehalte auf alle drei Tiefenbereiche, während sich im zweiten Versuchsjahr ein deutlicher Tiefengradient zeigte.

Im Vegetationsverlauf nahm der N_{min}-Gehalt der ungedüngten Kontrolle in 2013/2014 und 2015/2016, infolge der N-Aufnahme der Pflanzen, kontinuierlich ab und wies zum dritten Termin die geringsten Werte auf. Währenddessen stieg der Wert dieser Variante in 2014/2015 zum zweiten Termin an und fiel erst zur dritten Entnahme ab. Die Applikation von KAS und HS+UI+NI führte im Vegetationsverlauf verglichen zur Kontrolle überwiegend zu signifikant höheren N_{min}-Gehalten im Boden. Beispielsweise waren die N_{min}-Gehalte (0–60 cm) der gedüngten Prüfglieder zum zweiten Termin in 2013/2014 und 2015/2016 signifikant um mehr als 60 bzw. 20 kg N ha⁻¹ höher als bei der Kontrolle. Zu diesem Zeitpunkt betrug die applizierte N-Menge bei KAS 120 kg N ha⁻¹ und bei HS+UI+NI 100 kg N ha⁻¹. Obwohl die Wirkung der N-Düngung auf den N_{min}-Gehalt zum zweiten Termin des Versuchsjahres 2014/2015 nicht statistisch abgesichert werden konnte, waren die Werte von KAS und HS+UI+NI etwa 40 bzw. 20 kg N ha⁻¹ höher als bei der Kontrolle. Die zweite Gabe von HS+UI+NI in Höhe von 80 kg N ha⁻¹ erfolgte zwischen dem zweiten und dritten Entnahmeterrin, während die dritte KAS-Applikation (60 kg N ha⁻¹) erst nach der dritten N_{min}-Beprobung stattfand. Dementsprechend unterschieden sich die N_{min}-Gehalte der gedüngten Prüfglieder zum dritten Termin nicht nur von der Kontrolle sondern ebenso untereinander. Statistisch abgesichert werden konnten die höheren N_{min}-Gehalte bei HS+UI+NI gegenüber KAS zum dritten Termin des letzten Versuchsjahres. Aufgrund einer in 2013/2014 vorgezogenen und unmittelbar nach der zweiten Applikation von HS+UI+NI erfolgten Probenentnahme, waren die N_{min}-Gehalte von HS+UI+NI in jenem Versuchsjahr nicht repräsentativ und blieben bei der Auswertung unberücksichtigt. Generell befand sich zu den zweiten und dritten Entnahmen der Großteil des detektierten N_{min} (0–60 cm) mit etwa 60 bis 80% stets in der Ackerkrume (0–30 cm).

2013/2014



2014/2015



2015/2016

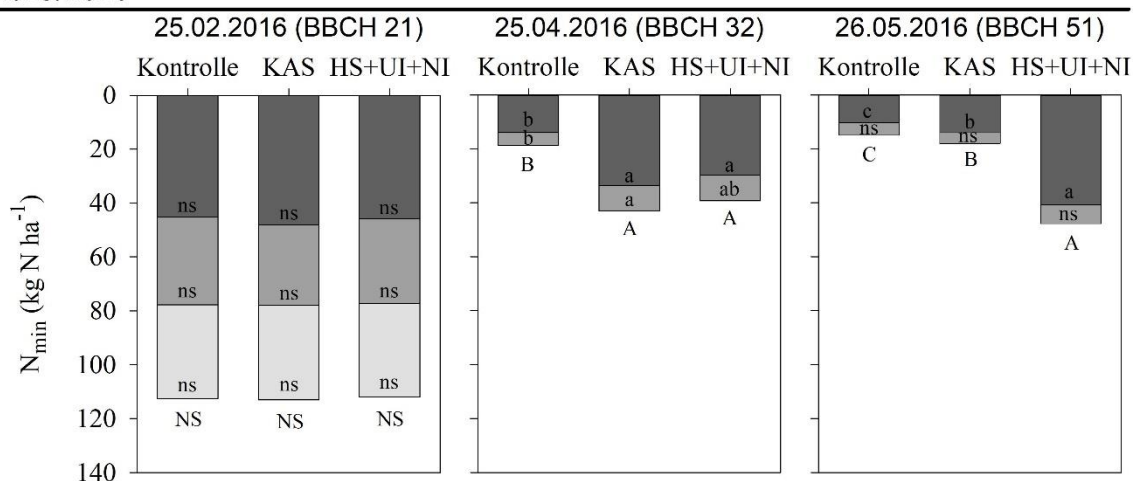


Abbildung 4.1-2: Mineralischer Stickstoffgehalt (N_{\min}) in den Bodentiefen 0–30, 30–60 und 60–90 cm bei einer ungedüngten Kontrolle sowie den zwei mineralischen Stickstoffdüngern Kalkammonsalpeter (KAS) und einem mit Urease- und Nitrifikationsinhibitor versetzten Harnstoff (HS+UI+NI) zu drei Terminen im Vegetationsverlauf in den Versuchsjahren 2013/2014, 2014/2015 und 2015/2016 ($n = 4$). Kleinbuchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede ($p \leq 0,05$) zwischen den Prüfgliedern innerhalb einer Bodentiefe, Großbuchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede ($p \leq 0,05$) zwischen den Prüfgliedern in der gesamten untersuchten Bodentiefe für jeden Termin. ns = nicht signifikant, N/A = nicht verfügbar.

Neben den oben genannten Abweichungen der N_{\min} -Gehalte zwischen den gedüngten Prüfgliedern, welche primär in den verschiedenen Düngeregimen bzw. den Zeitpunkten der Beprobung begründet sind, unterschieden sich teilweise deren Zusammensetzung, getrennt nach NH_4^+ und NO_3^- . Bei der NO_3^- -basierten N-Düngung mit KAS bestand das N_{\min} fast vollständig aus NO_3^- , sodass der Anteil von NH_4^+ in den ersten zwei Versuchsjahren maximal sieben % betrug (Tabelle 4.1-1). Hingegen machte NH_4^+ zum zweiten und dritten Termin in 2015/2016 bei demselben Prüfglied 15 bzw. 35% aus. Diese Werte sind vorrangig auf die hierbei erfassten niedrigen N_{\min} -Gehalte zurückzuführen. Die NH_4^+ -Gehalte beliefen sich zu diesen Zeitpunkt bei KAS lediglich auf 7 bzw. 6 kg N ha⁻¹. Demgegenüber wurden bei der NH_4^+ -betonten N-Düngung (HS+UI+NI) partiell NH_4^+ -N-Konzentrationen > 20 kg N ha⁻¹ quantifiziert. Die hemmende Wirkung des NI auf die Nitrifikation konnte, zumindest in 2013/2014 und 2015/2016, nachgewiesen werden. Beispielsweise lag der NH_4^+ -Anteil von HS+UI+NI in 2013/2014 zum zweiten und dritten Termin bei 19 bzw. 34% und überstieg signifikant die Werte von KAS. Zudem war der prozentuale Anteil des NH_4^+ zu jenen beiden Terminen in 2015/2016 bei HS+UI+NI ebenso am höchsten, konnte jedoch nicht statistisch abgesichert werden.

In 2014/2015 hatten die verschiedenen N-Düngerformen keinen nennenswerten Einfluss auf das $NH_4^+ : NO_3^-$ -Verhältnis, sodass der NH_4^+ -Anteil sogar bei der NH_4^+ -betonten Variante HS+UI+NI maximal 11% (10 kg NH_4^+ -N ha⁻¹) betrug (Tabelle 4.1-1). Gleichmaßen waren die NH_4^+ -N-Konzentrationen der Kontrolle und von KAS ebenso etwas geringer als in den anderen beiden Versuchsjahren. Beides war möglicherweise auf die von Vegetationsbeginn an geringen Niederschlagsmengen und daraus resultierenden niedrigen Bodenwassergehalten zurückzuführen (Abbildung 4.1-3), welche ein vollständiges Auflösen und Eindringen des Düngergranulats in den Boden verhindert sowie die Transformation des N im Boden generell reduziert haben könnten. Ferner nahm in der Kontrollvariante im Vegetationsverlauf insbesondere der prozentuale NH_4^+ -Anteil, infolge der Mineralisation organische Bestandteile im Boden bei gleichzeitiger N-Aufnahme der Pflanzen, vorwiegend zu. Aufgrund niedriger N_{\min} -Gehalte war bei diese Variante in 2013/2014 zum zweiten und dritten Termin der prozentuale Anteil von NH_4^+ signifikant höher als bei KAS. Gegenüber HS+UI+NI war der NH_4^+ -Anteil in der Kontrolle in allen drei Versuchsjahren überwiegend geringer.

Alles in allem konnte anhand der Werte aus 2013/2014 sowie 2015/2016 die bereits unter kontrollierten Laborbedingungen belegte Verzögerung der Nitrifikation durch den Einsatz des NI (s. o. Bodenmodelltest) temporär im Feldversuch bestätigt werden. Demzufolge standen den mit HS+UI+NI-gedüngten Pflanzen über einen mehrwöchigen Zeitraum relevante NH_4^+ -Mengen (> 10 kg NH_4^+ -N ha⁻¹) zur Aufnahme zur Verfügung, währenddessen die N-Ernährung der mit KAS-gedüngten Pflanzen fast ausschließlich auf der NO_3^- -Form fußte.

Tabelle 4.1-1: Ammonium- (NH_4^+) und Nitratgehalt (NO_3^-) sowie der gesamte mineralischer Stickstoffgehalt (N_{min}) in der Bodentiefe 0–90 cm (1. Termin) bzw. 0–60 cm (2 + 3 Termin) sowie der prozentuale NH_4^+ -Anteil bei einer ungedüngte Kontrolle sowie den zwei mineralischen Stickstoffdüngern Kalkammonsalpeter (KAS) und einem mit Urease- und Nitrifikationsinhibitor versetzten Harnstoff (HS+UI+NI) zu drei Terminen im Vegetationsverlauf in den Versuchsjahren 2013/2014, 2014/2015 und 2015/2016 ($n = 4$). Kleinbuchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede ($p \leq 0,05$) zwischen den Prüfgliedern innerhalb eines Termins und Versuchsjahrs. N/A = nicht verfügbar.

Termin	NH_4^+			NO_3^- (kg N ha^{-1})			N_{min} gesamt			NH_4^+ -Anteil (%)		
	Kontrolle	KAS	HS+ UI+NI	Kontrolle	KAS	HS+ UI+NI	Kontrolle	KAS	HS+ UI+NI	Kontrolle	KAS	HS+ UI+NI
	2013/2014											
BBCH 21	6a	6a	6a	76a	70a	75a	82a	76a	81a	7a	8a	7a
BBCH 31	5b	5b	25a	56b	120a	98a	61b	125a	123a	8b	4c	19a
BBCH 39	6b	3b	N/A	25c	70b	N/A	31b	73a	N/A	21a	7b	N/A
2014/2015												
BBCH 21	2a	3a	2a	58a	57a	57a	60a	60a	59a	3a	5a	3a
BBCH 32	3a	2a	1a	58a	104a	77a	61a	106a	78a	3a	1a	1a
BBCH 37	1a	4a	10a	25b	45ab	61a	26b	49ab	71a	5a	4a	11a
2015/2016												
BBCH 21	2a	1a	2a	111a	112a	111a	113a	113a	113a	2a	1a	1a
BBCH 32	2b	7ab	8a	17b	36a	31a	19b	43a	39a	11a	15a	21a
BBCH 51	6a	6a	23a	9c	12b	25a	15c	18b	48a	40a	35a	44a

Bodenwassergehalt

Die Zeitpunkte zur Bestimmung des BWG orientierten sich an den BBCH-Stadien der Pflanzen und variierten daher zwischen den Versuchsjahren teilweise um mehrere Wochen. Der BWG der Ackerkrume war stark an die Niederschlagsmengen sowie vorherrschenden Temperaturen gebunden, sodass beispielsweise in 2014/2015 geringe Winter- und Frühjahrsniederschlagsmengen (Tabelle 3.1-2) die niedrigsten BWG zum 1. Beprobungstermin aller drei Versuchsjahre zur Folge hatten (Abbildung 4.1-3). Diese lagen in jenem Versuchsjahr über alle Varianten gemittelt bei ca. 17 Masseprozent (M.-%). Dementgegen waren die BWG zur ersten Entnahme in 2013/2014 und in 2015/2016 mit ca. 20 M.-% deutlich höher. Im Versuchsverlauf nahmen die Werte stets ab und stiegen lediglich bei starken Niederschlagsereignissen, wie beispielsweise Ende Mai und Anfang Juni 2016, wieder an. Prüfgliedspezifische Differenzen stellten sich teils zum BBCH 37 und 65 heraus. Hierbei waren der BWG der Kontrolle häufig am höchsten, währenddessen zwischen den beiden N-Düngervarianten keine signifikanten Abweichungen auftraten.

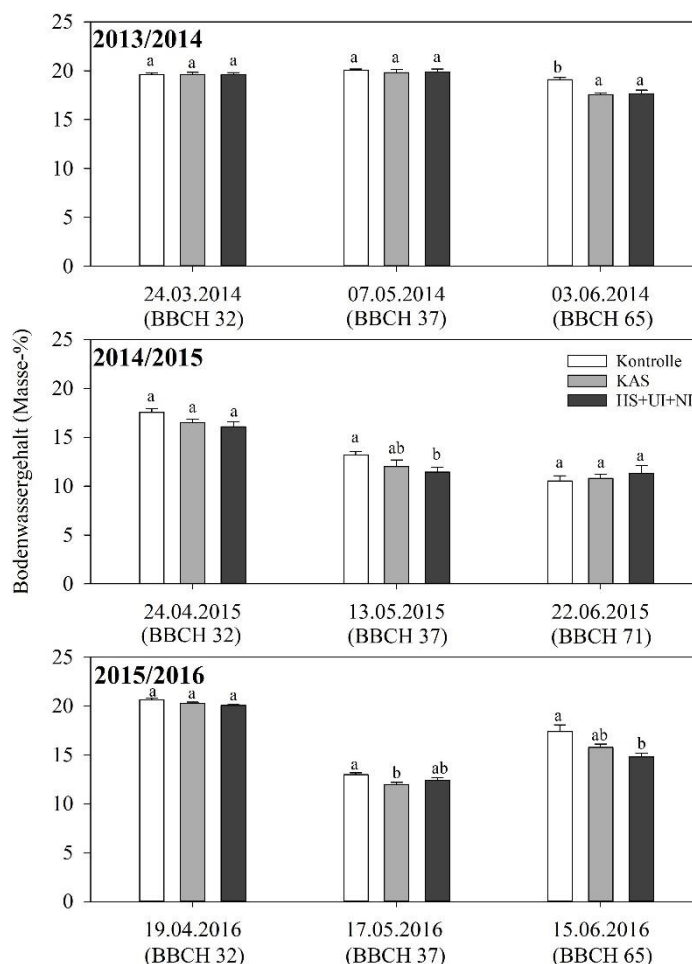


Abbildung 4.1-3: Verlauf des Bodenwassergehaltes der Ackerkrume (0–30 cm) bei einer ungedüngte Kontrolle sowie den zwei mineralischen Stickstoffdüngern Kalkammonsalpeter (KAS) und einem mit Urease- und Nitrifikationsinhibitor versetzten Harnstoff (HS+UI+NI) zu drei Terminen im Vegetationsverlauf in den Versuchsjahren 2013/2014, 2014/2015 und 2015/2016. Dargestellt sind die Mittelwerte aus vier Wiederholungen sowie deren Standardfehler. Kleinbuchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede ($p \leq 0,05$) zwischen den Prüfgliedern innerhalb eines Termins und eines Versuchsjahres.

4.2 Pflanzenentwicklung, Ertragsstruktur und Stickstoffeffizienz

Phänologische Pflanzenentwicklung

Bei der phänologischen Entwicklung der Weizenpflanzen zeigten sich in allen drei Versuchsjahren lediglich geringe Unterschiede zwischen den Prüfgliedern. Im Vergleich zu den N-Düngervarianten erreichten die Pflanzen der Kontrolle insbesondere in 2013/2014 und 2014/2015 einige Tage früher das Entwicklungsstadium der Frucht- und Samenreife (BBCH 81–89). Zwischen KAS und HS+UI+NI wurden indes keine Differenzen in der phänologischen Entwicklungsgeschwindigkeit erfasst.

Parallel zu der phänologischen Entwicklung nahm ebenfalls das Höhenwachstum der Pflanzen zu. Hierbei wiesen beide N-Varianten bereits ab dem Ende des Schossens (BBCH 37/39) Höhenwachstumsvorteile gegenüber der Kontrolle auf. Diese Unterschiede nahmen im Vegetationsverlauf stetig zu. Während die N-gedüngten Pflanzen in allen drei Versuchsjahren konform Höhen von ca. 1 m erreichten, wiesen die Pflanzen der Kontrolle eine maximale Wuchshöhe von 0,88 m auf.

Ertragsbildende Komponenten, Ertrag und Qualität

In allen drei Varianten wurde jeweils die angestrebte Bestandesdichte von 300 Pflanzen m⁻² annähernd einheitlich erreicht (Daten nicht gezeigt). Die N-Düngung wirkte sich signifikant auf die Anlage von ertragsrelevanten Komponenten aus und führte stets zu einer Steigerung an ährentragenden Halmen (Tabelle 4.2-1). Markante Unterschiede zwischen den N-Varianten zeigten sich in 2013/2014. Hierbei bildeten die mit HS+UI+NI gedüngten Pflanzen wesentlich mehr ährentragende Halme als jene mit KAS behandelten Pflanzen aus.

Analog zu den ährentragenden Halmen waren die Werte der Parameter Körner je Ähre, Korndichte und TKG prüfgliedspezifisch in 2014/2015 deutlich geringer als in den beiden weiteren Versuchsjahren. Ein limitiertes N-Angebot in der Kontrolle reduzierte gegenüber beiden N-Varianten in allen drei Versuchsjahren in der Tendenz die Kornzahl je Ähre sowie signifikant die Korndichte. Die trockenen Bedingungen in 2014/2015 wirkten sich im Speziellen auf das TKG beider N-Varianten aus, welches in jenem Jahr bei der Kontrollvariante signifikant höher war. Wenngleich in 2015/2016 die Unterschiede beim TKG zwischen HS+UI+NI und der Kontrolle statistisch abgesichert werden konnten, waren die absoluten Differenzen zwischen allen drei Prüfgliedern im ersten und dritten Versuchsjahr eher gering. Ein Einfluss der N-Düngerform auf jene untersuchten Ertragsmerkmale wurde lediglich bei der Korndichte in 2013/2014 erkennbar. Hierbei zeigte HS+UI+NI gegenüber KAS signifikant höhere Werte, welche insbesondere auf eine deutlich höhere Anzahl ährentragender Halme zurückzuführen war. Dies wurde jedoch in den darauffolgenden Versuchsjahren nicht bestätigt. Unabhängig von der Behandlung korrelierte die

Korndichte in den drei Versuchsjahren stark bis sehr stark mit den der Anzahl ährentragender Halme ($r^2 = 0,75-0,98$).

Tabelle 4.2-1: Ertragsbildende Komponenten von Weizenpflanzen einer ungedüngten Kontrolle sowie den zwei mineralischen Stickstoffdüngern Kalkammonsalpeter (KAS) und einem mit Urease- und Nitrifikationsinhibitor versetzten Harnstoff (HS+UI+NI) in den Versuchsjahren 2013/2014, 2014/2015 und 2015/2016 ($n = 4$). Unterschiedliche Buchstaben innerhalb einer Spalte kennzeichnen signifikante Differenzen zwischen den Varianten eines Versuchsjahres ($p < 0,05$).

Variante	ährentragende Halme je m ² (n)	Körner je Ähre	Korndichte (Tsd. Körner m ⁻²)	TKG (g)
2013/2014				
Kontrolle	496c	41,4a	20,5c	44,8a
KAS	600b	41,3a	24,8b	46,6a
HS+UI+NI	699a	43,0a	30,1a	44,8a
2014/2015				
Kontrolle	427b	29,6a	12,7b	40,0a
KAS	547a	32,9a	17,9a	34,9b
HS+UI+NI	560a	31,5a	17,5a	34,8b
2015/2016				
Kontrolle	501b	34,1b	17,4b	43,8b
KAS	700a	35,6a	25,4a	45,6ab
HS+UI+NI	670a	35,3ab	23,5a	46,8a

Die Korn- und Stroherträge sowie die RPG aller drei Varianten wurden, ähnlich der ertragsbildenden Komponenten, von der Wasserversorgung beeinflusst und variierten stark zwischen den Versuchsjahren. Beispielsweise lagen die Kornerträge je nach Prüfling in dem trockenen Versuchsjahr 2014/2015 zwischen etwa 40 bis 60% unterhalb der Werte beider Vergleichsjahre (Tabelle 4.2-2). Besonders auf die Erträge von KAS und HS+UI+NI wirkte sich der Wassermangel in 2014/2015 aus. Trotz des deutlich höheren N-Angebots von 180 kg N ha⁻¹ lagen die Kornerträge der N-Varianten hierbei nahezu deckungsgleich auf dem Niveau der Kontrolle. In den zwei Hohertragsjahren 2013/2014 und 2015/2016 erzielten die beiden N-gedüngten Varianten Kornerträge zwischen 133 bis 136 dt ha⁻¹ und unterschieden sich signifikant von der ungedüngten Kontrolle. Trotz des Verzichts auf eine N-Düngung waren die Kornerträge der Kontrolle in jenen beiden Versuchsjahren mit 98,0 bzw. 93,8 dt ha⁻¹ auf einem hohen Niveau. Dies war auf die am Standort Merbitz generell hohen N_{min}-Gehalte zurückzuführen (Abbildung 4.1-2). Ein signifikanter Unterschied zwischen den N-Düngerformen auf die Kornerträge konnte indes nicht quantifiziert werden.

Tabelle 4.2-2: Korn- und Strohertrag sowie Rohproteingehalt (RPG) von Weizenpflanzen sowie das N-Saldo, der Harvestindex (HI), N-Harvestindex (NHI) und N-Verwertungseffizienz (NUE) einer ungedüngten Kontrolle sowie den zwei N-Düngern Kalkammonsalpeter (KAS) und einem mit Urease- und Nitrifikationsinhibitor versetzten Harnstoff (HS+UI+NI) in den Versuchsjahren 2013/2014, 2014/2015 und 2015/2016 sowie deren arithmetischer Mittelwert. Dargestellt sind die Mittelwerte und Standardfehler aus vier Wiederholungen. Unterschiedliche Kleinbuchstaben innerhalb einer Spalte kennzeichnen Differenzen zwischen den Varianten eines Versuchsjahres ($p < 0,05$). TS = Trockensubstanz.

Variante	Kornertrag (dt ha ⁻¹)	Strohertrag	RPG (Ma-% TS)	N-Saldo (kg N ha ⁻¹)	N-Entzug (Korn + Stroh)	NUE (%)	HI	NHI
2013/2014								
Kontrolle	98,0b	43,1b	10,1b	-118a	144b	149a	0,69a	0,82a
KAS	136,2a	65,2a	14,0a	-44b	302a	86b	0,68a	0,74b
HS+UI+NI	135,6a	53,8ab	13,2a	-48b	294a	88b	0,72a	0,78ab
2014/2015								
Kontrolle	53,8a	27,6b	9,4b	-66a	74b	112a	0,66a	0,89a
KAS	56,2a	36,9a	17,1a	57b	147a	52b	0,60b	0,84b
HS+UI+NI	57,8a	35,3ab	15,7a	59b	140a	51b	0,62ab	0,87b
2015/2016								
Kontrolle	93,8b	51,6b	8,0b	-105a	126b	93a	0,65a	0,83a
KAS	134,0a	71,8a	11,6a	-23b	248a	69b	0,65a	0,82a
HS+UI+NI	133,3a	64,1a	11,6a	-16b	229a	67b	0,68a	0,86a

Analog zu den Kornerträgen fielen auch die Stroherträge in 2014/2015, gegenüber denen der beiden weiteren Versuchsjahre, in allen Varianten ab. Eine N-Düngung mit KAS führte stets zu signifikant höheren Stroherträgen, währenddessen sich die Applikation von HS+UI+NI nur in 2015/2016 in statistisch abgesicherten Strohzuwächsen gegenüber der Kontrolle äußerte. In 2014/2015 waren die Stroherträge beider N-Varianten einheitlich.

Auf den RPG der Körner wirkte sich ein limitiertes N-Angebot nachteilig aus, sodass die Werte der Kontrolle stets signifikant niedriger als von KAS und HS+UI+NI waren (Tabelle 4.2-2). Ein Vergleich beider N-Düngerformen offenbarte in 2013/2014 und 2014/2015 tendenziell höhere RPG bei KAS. Dies ist vermeintlich in den abweichenden Düngestrategien begründet, worin die dritte KAS-Applikation erst zum BBCH 51 als Qualitätsgabe erfolgte und entsprechend der generativen Pflanzenentwicklung diente. Überdies spiegelten sich bei KAS und HS+UI+NI die niedrigen Kornerträge in 2014/2015 in den höchsten RPG von 17,1 bzw. 15,7 Masse-% Trockensubstanz (TS) wieder. Trotz ähnlicher Kornerträge lagen die RPG in 2015/2016 prüfgliederspezifisch im Mittel ca. 2 Masse-% TS unter denen von 2013/2014.

N-Saldo, N-Entzug und N-Effizienzen

Die abweichenden Erträge und RPG der drei Versuchsjahre äußerten sich entsprechend im N-Saldo, sodass sich die Werte aus 2014/2015 deutlich von denen aus dem ersten und dritten Versuchsjahr differenzierten. Der Verzicht auf eine N-Düngung führte in der Kontrolle stets zu negativen N-Salden zwischen -66 (2014/2015) und -118 kg N ha⁻¹ (2013/2014) (Tabelle 4.2-2). Die N-Salden beider N-Düngervarianten waren in den Hohertragsjahren 2013/2014 und 2015/2016 mit -44 und -23 kg N ha⁻¹ bei KAS sowie mit -48 und -16 kg N ha⁻¹ bei HS+UI+NI ebenfalls im negativen Bereich. Demnach bauten die Pflanzen in diesen Jahren mehr N in die Körner ein als ihnen als N-Dünger zugegeben wurde. Unterdessen entstanden in 2014/2015 N-Überschüsse von 57 (KAS) und 59 kg N ha⁻¹ (HS+UI+NI).

Analog zum N-Saldo schwanken auch die N-Entzüge aus dem Korn und Stroh innerhalb der einzelnen Prüfglieder deutlich zwischen den Versuchsjahren (Tabelle 4.2-2). Beispielsweise waren die N-Entzüge in 2013/2014 bei der Kontrolle mit 144 kg N ha⁻¹ und bei den N-Düngervarianten mit 302 (KAS) bzw. 294 kg N ha⁻¹ (HS+UI+NI) etwa doppelt so hoch wie in dem Trockenjahr 2014/2015. Beim Vergleich der Versuchsjahre 2013/2014 und 2015/2016 zeigte sich, dass höhere Stroherträge (2015/2016) geringere N-Konzentrationen im Stroh bedingten bzw. *vice versa*. Aufgrund dessen und höherer RPG in 2013/2014 unterschieden sich die N-Entzüge aus dem Korn und Stroh zwischen beiden Hohertragsjahren um 18 kg N ha⁻¹ bei der Kontrolle sowie 54 bzw. 65 kg N ha⁻¹ bei KAS und HS+UI+NI. Innerhalb der beiden N-Düngervarianten führten die leicht höheren Stroherträge bei KAS zu tendenziell höheren N-Entzügen in allen drei Versuchsjahren gegenüber HS+UI+NI. Eine statistisch gesicherte Erhöhung der N-Aufnahme in die Pflanzen durch eine N-Düngung wurde im Vergleich zur ungedüngten Kontrolle ersichtlich.

Die Ermittlung der NUE hing neben den Erträgen und RPG zudem vom N_{\min} -Gehalt des Bodens ab. Beispielsweise führten die höchsten zu Vegetationsbeginn erfassten N_{\min} -Gehalte in 2015/2016 (113 kg N ha^{-1} , Kapitel 3.1), trotz hoher Kornerträge, mit 93% zur geringsten NUE in der Kontrolle in allen drei Versuchsjahren (Tabelle 4.2-2). Dementgegen war die NUE der Kontrolle in 2013/2014 bei einem ähnlichen Ertrags- und Qualitätsniveau wie in 2015/2016 mit 149% deutlich höher. Dies bedeutet im Umkehrschluss, dass ein geringeres N-Angebot, wie in 2013/2014 mit einem um 30 kg ha^{-1} niedrigeren N_{\min} -Gehalt als in 2015/2016, die NUE der Pflanzen in der vorliegenden Studie erhöhte. Ähnliche Tendenzen, jedoch auf einem niedrigeren Niveau, wurden bei beiden N-Düngervarianten ersichtlich. Die Prüfglieder KAS und HS+UI+NI erreichten mit 86 und 88% ebenfalls in 2013/2014 die höchsten NUE. Wenngleich die N_{\min} -Gehalte in 2014/2015 mit 59 kg N ha^{-1} am geringsten waren, führten die schwachen Erträge in jenem Versuchsjahr zu den niedrigsten NUE beider N-Düngervarianten. Der N-Saldo sowie die NUE der Kontrolle unterschieden sich in allen drei Versuchsjahren signifikant von jenen Werten beider N-Düngervarianten, während die Differenzen zwischen KAS und HS+UI+NI nicht statistisch abgesichert werden konnten.

Der Anteil des Kornertrages am Gesamtertrag der oberirdischen Biomasse, bekannt als HI, war in den drei Versuchsjahren innerhalb einer Variante verhältnismäßig einheitlich. Hierbei wiesen die Kontrolle oder HS+UI+NI stets den höchsten HI auf (Tabelle 4.2-2). Die Verteilung des N innerhalb der Pflanze in das Korn (NHI) entsprach im Trend dem HI, erfolgte jedoch auf einem höheren Niveau. Die N-Düngerform bzw. das Düngeremine hatte sowohl auf den HI als auch den NHI keinen signifikanten Einfluss.

4.3 Wurzelwachstum in Abhängigkeit von der N-Düngung und N-Düngerform

4.3.1 Bohrkernmethode

Gegenüberstellung der Wurzelentwicklung in den drei Versuchsjahren

Die Beprobungstermine richteten sich in allen drei Versuchsjahren nach dem phänologischen Entwicklungsstadium der Weizenpflanzen. Angesichts günstiger Wuchsbedingungen in 2013/2014, hervorgerufen durch überdurchschnittlicher Temperaturen im Februar und März des Jahres 2014, erfolgte die erste Beprobung bereits am 24.03. und damit ca. einen Monat früher als in den beiden nachfolgenden Versuchsjahren. Obwohl die Pflanzen bereits das BBCH 32 erreicht hatten, war die WLD speziell in den beiden oberflächennahen Bodenschichten ca. $\frac{2}{3}$ niedriger als im Vergleichsjahr 2014/2015 (Abbildung 4.3-1). Im weiteren Vegetationsverlauf stimmten die Beprobungstermine der drei Versuchsjahre hinsichtlich der Kalendertage weitestgehend überein. Dessen ungeachtet lag in 2014/2015 die Niederschlagsmenge in den Monaten Februar bis Juni 115 mm deutlich unterhalb des 30-jährigen Mittels (Tabelle 3.1-2).

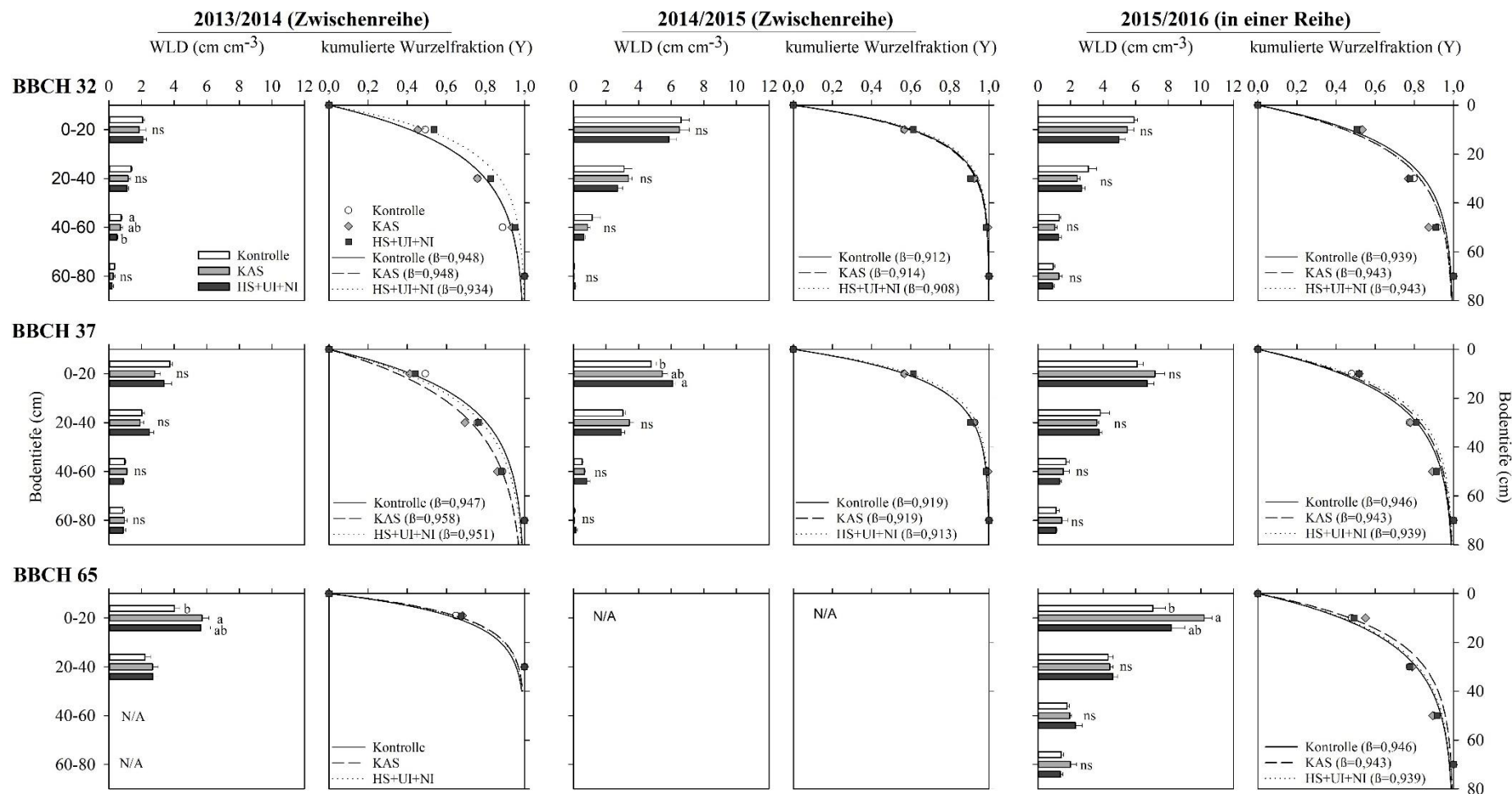


Abbildung 4.3-1: Erfasste Wurzellängendichte (WLD) von Winterweizen zum BBCH 32, BBCH 37 und BBCH 65 in den drei Versuchsjahren 2013/2014, 2014/2015 und 2015/2016 bei unterschiedlicher N-Düngung mit Kalkammonsalpeter (KAS) und einem mit Urease- und Nitrifikationsinhibitor versetzten Harnstoff (HS+UI+NI) im Vergleich zu einer ungedüngten Kontrolle in Abhängigkeit von der Bodentiefe sowie die vertikale Verteilung der Wurzelfraktion (Y) und der Wurzelverteilungskoeffizient β . Dargestellt sind die mittels Bohrkernmethode erfassten Mittelwerte aus vier Wiederholungen und die Standardfehler. Verschiedene Kleinbuchstaben kennzeichnen signifikante Differenzen zwischen den Varianten innerhalb einer Tiefe, eines Termins und eines Versuchsjahres ($p \leq 0,05$). ns = nicht signifikant, N/A = nicht verfügbar.

Analog zur oberirdischen phänologischen Entwicklung stieg die Durchwurzelung der Pflanzen in allen Varianten im ersten und dritten Versuchsjahr über die Zeit an und erreichte zum BBCH 65 in allen quantifizierten Tiefenbereichen die jeweils höchste WLD (Abbildung 4.3-1). Dementgegen konnten in 2014/2015 zwischen dem BBCH 32 und 37 keine bedeutenden Zuwächse erfasst werden, respektive nahm die WLD bei der Kontrolle und KAS ab. Besonders stark ausgeprägt war der Rückgang der WLD bei jenen beiden Prüfgliedern im Ap-Horizont (0–20 cm) mit 1,8 (Kontrolle) und 1,1 cm cm^{-3} (KAS). Die höchste zum BBCH 37 in 2014/2015 erfasste WLD aller drei Prüfglieder wies HS+UI+NI in 0–20 cm auf, welche gegenüber der Kontrollvariante statistisch abgesichert werden konnte. Zum BBCH 32, 19 Tage zuvor, zeigte sich in jenem Versuchsjahr insofern ein differenziertes Bild, indem die WLD der Kontrolle und von KAS im Ap-Horizont tendenziell um ca. 0,7 cm cm^{-3} höher war als bei HS+UI+NI. Verglichen mit den Werten aus 2013/2014, in dem die Bohrkernproben ebenfalls zwischen den Reihen entnommen wurden, durchwurzelten die Pflanzen aller Prüfglieder im Trockenjahr 2014/2015 zu beiden Zeitpunkten des Schossens speziell die oberen 40 cm des Bodens deutlich stärker.

Die methodische Umstellung in 2015/2016 auf eine Entnahme der Bohrkern innerhalb einer Reihe wirkte sich erheblich auf die ermittelte WLD in den einzelnen Tiefen aus. Beispielsweise waren die WLD zum BBCH 65 in 2015/2016 in den beiden oberflächennahen Bodentiefen 0–20 cm und 20–40 cm mit ca. 7,1 bis 10,2 und ca. 4,3 bis 4,6 cm cm^{-3} um etwa 70 bzw. 80% höher als zum gleichen Entwicklungsstadium der Pflanzen in 2013/2014. Ähnliche und oftmals größere Unterschiede zwischen jenen beiden Versuchsjahren zeigten sich zu den zwei Terminen des Schossens.

Wurzelverteilung über die Bodentiefe

In allen drei Versuchsjahren nahm die mittels Bohrkernmethode bestimmte WLD variantenunspezifisch zu allen Terminen mit zunehmender Bodentiefe exponentiell ab. Demnach wurden stets im Ap-Horizont die höchsten und in der Bodentiefe 60–80 cm die niedrigsten WLD im Beprobungsbereich (0–80 cm) erfasst (Abbildung 4.3-1). Die Ausprägung des Tiefendurchwurzelungsgradienten unterschied sich weniger zwischen den Terminen eines Jahres sondern insbesondere zwischen den Versuchsjahren. In 2014/2015 wurde im Vergleich zu den beiden weiteren Versuchsjahren eine deutlich stärkere Konzentration der Wurzeln nahe der Bodenoberfläche festgestellt. Während der Anteil der WLD in den Tiefenbereichen 0–20 und 20–40 cm in 2013/2014 und 2015/2016 in Summe bei ca. 70 bis 80% lag, wurden in 2014/2015 > 90% der quantifizierten Wurzeln in diesen Tiefen erfasst. Dies unterstreichen die niedrigsten β -Werte (0,908–0,919) in 2014/2015, welche ein deutliches Indiz für ein forciertes Wurzellängenwachstum nahe der Bodenoberfläche bzw. für einen geringen Tiefwurzelanteil waren. Zudem fiel in jenem Versuchsjahr eine nahezu wurzelfreie unterste Bodenschicht an beiden Terminen bei allen Prüfgliedern auf.

Im ersten und dritten Versuchsjahr nahm der Anteil an Wurzeln im Unterboden (40–80 cm) vom BBCH 32 zum BBCH 37 tendenziell leicht zu, was sich in einer Erhöhung der β -Werte widerspiegelte. Aufgrund von trockenen Bodenverhältnissen konnte in 2013/2014 die Wurzelentwicklung der Weizenpflanzen zur Vollblüte (BBCH 65) lediglich bis zu einer Bodentiefe von 40 cm untersucht werden. Hierbei entfielen bei allen Behandlungen ca. $\frac{2}{3}$ der erfassten WLD auf den Ap-Horizont und ca. $\frac{1}{3}$ auf die Bodentiefe von 20–40 cm. Die berechneten β -Werte wurden lediglich für die grafische Darstellung des vertikalen Verteilungsmusters der Wurzelfraktion verwendet und, hinsichtlich fehlender Messwerte aus tieferen Bodenschichten, in der Abbildung 4.3-1 nicht explizit ausgewiesen. Die methodische Veränderung in 2015/2016 hatte im untersuchten System keinen markanten Effekt auf den Tiefenverlauf der Wurzeln. Gestützt wird dies durch vergleichbare β -Werte wie in 2013/2014 von ca. 0,940 bis 0,950.

Entwicklung der WLD in Abhängigkeit von einer N-Düngung und der N-Düngerform

Die Applikation der N-Dünger sowie deren differenzierte N-Ernährung und Düngeregime wirkten sich lediglich auf die Wurzelentwicklung in den oberen Bodenschichten aus. Im ersten und dritten Versuchsjahr wirkte sich eine N-Düngung zur Vollblüte (BBCH 65) förderlich auf die Wurzelentwicklung der Winterweizenpflanzen aus. Hierbei wurden insbesondere im Ap-Horizonte höhere WLD bei beiden N-Düngervarianten von je ca. $1,5 \text{ cm cm}^{-3}$ in 2013/2014 und ca. 2,5 (KAS) bzw. ca. $1,5 \text{ cm cm}^{-3}$ (HS+UI+NI) in 2015/2016 gegenüber der ungedüngten Kontrolle deutlich (Abbildung 4.3-1). Die Unterschiede zwischen KAS und der Kontrolle konnten in beiden Jahren statistisch abgesichert werden. Im Versuchsjahr 2014/2015 war die WLD der mit HS+UI+NI gedüngten Pflanzen in 0–20 cm zum BBCH 37 signifikant höher als bei den ungedüngten Pflanzen und im Trend höher als bei denen mit einer KAS-Düngung. Dementgegen stimulierte der Verzicht auf eine N-Düngung das Wurzelwachstum der jungen Pflanzen, sodass die WLD der Kontrolle im Ap-Horizont zum BBCH 32 in 2014/2015 und 2015/2016 stets am höchsten war. Im Laufe der phänologischen Pflanzenentwicklung führte N-Mangel zu Einbußen im Wurzelwachstum. Dies wurde anhand der geringsten Zuwächse zwischen den Beprobungsterminen in der Kontrollvariante ersichtlich.

Zwischen beiden N-Düngerformen wurde kein deutlicher und sich wiederholender Effekt auf die Wurzelentwicklung der Weizenpflanzen anhand der erhobenen Werte ersichtlich. Hierbei zeigten sich über die drei Versuchsjahre hinweg lediglich Tendenzen, die teilweise inkonsistent waren. Während in den ersten zwei Versuchsjahren eine mit UI und NI stabilisierte zweigeteilte HS-Düngung die Wurzelentwicklung in 0–20 cm vom BBCH 32 zum BBCH 37 gegenüber einer dreigeteilten KAS-Düngung stärker stimulierte, konnte diese Wirkung in 2015/2016 nicht bestätigt werden. Demzufolge war die WLD im Ap-Horizont zum BBCH 37 in 2013/2014 und 2014/2015 bei HS+UI+NI um je ca. $0,6 \text{ cm cm}^{-3}$ höher als bei KAS. Im dritten Versuchsjahr verschob sich dieser Vorteil der WLD in ähnlicher Größenordnung zugunsten von KAS. Im weiteren Vegetationsverlauf

wirkte sich eine NO_3^- -basierte N-Düngung *via* KAS leicht positiver auf die Wurzelentwicklung aus als bei der NH_4^+ -betonen N-Düngung mittels HS+UI+NI. Verdeutlicht wird dies durch die Gegenüberstellung der WLD vom BBCH 37 und BBCH 65 aus dem ersten und dritten Versuchsjahr. Innerhalb dieses Zeitraumes von etwa einem Monat stieg die WLD in 0–20 cm bei KAS um ca. 0,7 (2013/2014) respektive ca. 1,5 cm cm^{-3} (2015/2016) stärker an als bei HS+UI+NI. Demzufolge waren die Werte beider N-Düngervarianten zum BBCH 65 im Ap-Horizont deckungsgleich (2013/2014) bzw. bei KAS ca. 2 cm cm^{-3} höher (2015/2016). Die Unterschiede in der WLD konnten zu keinem Zeitpunkt statistisch abgesichert werden.

Weitere relevante Wurzelparameter

Zur Beurteilung des Einflusses einer N-Düngung und verschiedener N-Düngerformen auf die Wurzelentwicklung sind neben der WLD weitere wurzelmorphologische Charakteristika, wie die WTMD, MWD, SWL sowie WGD von Bedeutung. Jene relevanten Wurzelparameter geben sowohl Auskunft zur Standortcharakteristik als auch zur Reaktion der Pflanzen auf sich verändernde Bodeneigenschaften mit zunehmender Tiefe. Aufgrund ähnlicher Tendenzen zwischen den Versuchsjahren innerhalb eines Beprobungstermins und einer Variante sowie insbesondere aufgrund von unvollständiger Datensätze aus den ersten zwei Versuchsjahren wurden nachfolgend nur die Werte aus 2015/2016 dargestellt. Die Ergebnisse aus 2013/2014 und 2014/2015 sind den Tabellen A-6 und A-7 zu entnehmen.

Die Entwicklung der WTMD der Winterweizenpflanzen verhielt sich analog zur WLD. Zum BBCH 37 führte N-Mangel in der Kontrolle gegenüber beiden N-Düngervarianten tendenziell zu einer geringeren WTMD im Ap-Horizont (Tabelle 4.3-1). Während die Kontrolle und KAS vom BBCH 37 zum BBCH 65 in jener Schicht Zuwächse aufwiesen, nahm die WTMD von HS+UI+NI um ca. 0,10 mg cm^{-3} ab und lag zur Vollblüte (BBCH 65) auf dem Niveau der Kontrolle. Die NO_3^- -basierte Variante (KAS) bzw. deren Düngeregime wirkten sich in jenem Jahr zum BBCH 65 positiv auf die WTMD aus. Die Werte überstiegen jene der Kontrolle und HS+UI+NI im Ap-Horizont nicht signifikant um ca. 0,15 cm cm^{-3} . In den tieferen Bodenschichten waren sowohl die WTMD generell als auch die Differenzen zwischen Werten der Varianten deutlich geringer.

Tabelle 4.3-1: Relevante Wurzelparameter nach einer mineralischen Stickstoffdüngung mit Kalkammonsalpeter (KAS) und einem mit Urease- und Nitrifikationsinhibitor versetzten Harnstoff (HS+UI+NI) im Vergleich zu einer ungedüngten Kontrolle in Abhängigkeit von der Bodentiefe zu den BBCH-Stadien 32, 37 und 65 im Versuchsjahr (2015/2016 n = 4). Dargestellt sind die mittels Bohrkernmethode erfassten Mittelwerte aus vier Wiederholungen. Kleinbuchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede ($p \leq 0,05$) zwischen den Prüfgliedern innerhalb einer Bodentiefe, Großbuchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede ($p \leq 0,05$) zwischen den Bodentiefen innerhalb eines Prüfgliedes für jeden Termin. WTMD = Wurzel trockenmassendichte, SWL = spezifische Wurzellänge, MWD = mittlerer Wurzel Durchmesser, WGD = Wurzelgewebedichte.

Variante	BBCH 32				BBCH 37				BBCH 65			
	WTMD (mg cm ⁻³)	SWL (m g ⁻¹)	MWD (mm)	WGD (mg cm ⁻³)	WTMD (mg cm ⁻³)	SWL (m g ⁻¹)	MWD (mm)	WGD (mg cm ⁻³)	WTMD (mg cm ⁻³)	SWL (m g ⁻¹)	MWD (mm)	WGD (mg cm ⁻³)
0–20 cm												
Kontrolle	0,36a	162,4a	0,23b	148,3ab	0,48a	128,1a	0,23a	184,8a	0,57a	125,3a	0,22a	213,4a
KAS	0,35a	159,3ab	0,24ab	138,1b	0,60a	120,7a	0,24a	184,9a	0,72a	143,4a	0,23a	175,0b
HS+UI+NI	0,36a	137,4b	0,25b	152,1a	0,68a	104,6a	0,25a	205,4a	0,58a	143,5a	0,22a	184,3ab
20–40 cm												
Kontrolle	0,15a	205,7a	0,24a	108,4a	0,20a	191,6a	0,23a	122,9a	0,20a	215,8b	0,22a	122,0a
KAS	0,11a	213,2a	0,25a	96,9b	0,17a	209,9a	0,23a	116,5a	0,18a	245,5a	0,21b	122,3a
HS+UI+NI	0,13a	208,6a	0,25a	101,6b	0,19a	199,6a	0,23a	120,3a	0,18a	249,9a	0,21b	118,5a
40–60 cm												
Kontrolle	0,07a	190,7a	0,27a	90,0a	0,09a	197,5b	0,24a	116,8a	0,08a	214,1b	0,22a	117,2a
KAS	0,05a	199,8a	0,28a	79,4a	0,07ab	249,9a	0,20b	138,2a	0,09a	228,1ab	0,21a	133,7a
HS+UI+NI	0,07a	189,1a	0,28a	87,5a	0,06b	239,1a	0,21ab	119,4a	0,09a	268,7a	0,20a	109,0a
60–80 cm												
Kontrolle	0,07a	141,3b	0,35a	76,5a	0,07a	156,6a	0,28a	109,9a	0,06a	171,4b	0,26a	102,6a
KAS	0,07a	192,3a	0,30b	77,4a	0,06a	230,9a	0,22a	116,4a	0,08a	230,3a	0,22b	116,8a
HS+UI+NI	0,05a	167,2ab	0,31ab	84,1a	0,05a	200,8a	0,23a	118,8a	0,07a	194,2ab	0,24ab	109,3a

Beim MWD wurde zum BBCH 32 in allen Varianten ein diametraler Tiefengradient erkennbar, d. h. der MWD stieg mit zunehmender Bodentiefe an. Währenddessen waren die Werte bei beiden späteren Terminen in allen Tiefensegmenten vergleichsweise einheitlich. Diese Ergebnisse wichen von jenen aus 2013/2014 und 2014/2015 ab, worin der MWD zum BBCH 37 und BBCH 65 ebenfalls im Ap-Horizont am kleinsten und in 60–80 cm am größten war. Ungeachtet dessen differenzierten die MWD der Prüfglieder in 2015/2016 nur geringfügig, wenngleich sich in einzelnen Bodentiefen partiell signifikante Unterschiede offenbarten. Lediglich im Tiefenbereich 60–80 cm zeigte die Kontrolle gegenüber beiden N-gedüngten Varianten konstant höhere MWD zwischen 0,02 bis 0,06 mm auf. Zudem nahmen sowohl der MWD generell als auch die Unterschiede der MWD zwischen den Tiefen über die Zeit ab. Während die Werte der einzelnen Tiefen zum BBCH 32 zwischen 0,23 und 0,35 mm schwanken, war die Spanne zum BBCH 65 zwischen 0,20 und 0,26 mm deutlich kleiner.

Im Vegetationsverlauf nahmen die SWL und WGD prüfgliederspezifisch in allen Tiefen im Trend zu. Hiervon ausgenommen waren bei der SWL die Werte im Ap-Horizont, in welchem keine Tendenz erkennbar war. In jenem oberflächennahen Tiefenbereich nahm die SWL vom BBCH 32 zum BBCH 37 ab und stieg zum BBCH 65 in etwa auf das Niveau vom ersten Termin wieder an. Die WGD aller Varianten nahm insbesondere vom BBCH 32 zum BBCH 37 zu und veränderte sich zum BBCH 65 nur noch geringfügig. Während die WGD mit zunehmender Bodentiefe kleiner wurde, wiesen bei der SWL nicht die oberflächennahe Bodenschicht sondern die Tiefenbereiche 20 bis 60 cm die höchsten Werte auf.

Eine mineralische N-Düngung hatte keine Wirkung auf die WGD der Pflanzenwurzeln. Währenddessen führte die Applikation von N in den Bodentiefen 20 bis 80 cm zu einer teilweise signifikanten Erhöhung der SWL zwischen ca. 15 bis 75 m g^{-1} gegenüber der Kontrolle zum BBCH 37 und insbesondere zum BBCH 65. Angesichts einer geringeren SWL und demnach eines engeren Verhältnisses zwischen WL und WTM bei der Kontrollvariante waren die Kosten (WTM) je erzeugter Einheit Wurzellänge (Nutzen) bei einer unzureichenden N-Versorgung höher als bei den gedüngten Prüfgliedern. Folglich förderte eine N-Düngung verstärkt das Wurzellängenwachstum und forcierte in einem geringeren Ausmaß die Produktion der Wurzelbiomasse. Im Vergleich zu den vorherigen beiden Versuchsjahren waren die ermittelten SWL des Ap-Horizonts in 2015/2016 deutlich kleiner (26–62%). Auf die weiteren Tiefensegmente wirkte sich dies indes nicht aus. Davon abgesehen konnten zwischen beiden N-Düngerformen keine konsistenten bzw. sich wiederholenden Effekte auf die SWL und WGD erfasst werden.

4.3.2 Core-break Methode

Eine Gegenüberstellung der Ergebnisse aus der Core-break Methode mit den WLD der ausgewaschenen Bodenmonolithe erfolgte in 2015/2016 für jeden Beprobungstermin gesondert. Eine Unterteilung nach Prüfgliedern wurde, aufgrund einer abnehmenden Anzahl an Korrelationspaaren

über die Zeit, nicht vorgenommen. Zurückzuführen war dies auf wachsende Probleme bei der exakten Teilung der Bodenmonolithe und anschließenden visuellen Bestimmung der Wurzelanzahl an beiden Seiten mittels Core-break Methode im Untersuchungsverlauf. Die ermittelten r^2 -Werte der Regressionen zwischen der Core-break Methode (n Wurzel cm^{-2}) und der WLD (cm cm^{-3}) waren bei der quadratischen Gleichung durchgehend, wenngleich auch nur marginal höher als bei der linearen Gleichung (Tabelle 4.3-2). Beispielsweise stiegen jene Werte bei der nicht-linearen Gleichung vom BBCH 32 zum BBCH 65 von etwa 0,68 auf 0,86 konstant an. Bei der Anpassung mittels einer linearen Gleichung wies die Regressionskonstante (a) in zwei Fällen einen negativen Wert auf. Dies würde auf den Umstand hindeuten, dass bei der Core-break Methode Wurzeln gesehen wurden, welche nach dem Auswaschen im Nachgang nicht mehr erfasst werden konnten. Angesichts dessen und etwas höherer r^2 -Werte wurde lediglich die quadratische Gleichung zur Beschreibung des Zusammenhanges der Datenpaare aus der Core-break Methode und WLD verwendet.

Tabelle 4.3-2: Größen für eine lineare und nicht-lineare Regression zwischen den Daten der Core-break Methode und Wurzellängendichte zu den BBCH-Stadien 32, 37 und 65 im Versuchsjahr 2015/2016.

BBCH	Anzahl	Lineare Gleichung $y = a + bx$				Quadratische Gleichung $y = (c + dx)^2$			
		r^2	p	a	b	r^2	p	c	d
32	71	0,675	< 0,001	0,446	1,728	0,680	< 0,001	1,094	0,594
37	60	0,762	< 0,001	-0,065	1,946	0,772	< 0,001	1,040	0,536
65	42	0,826	< 0,001	-0,575	2,780	0,857	< 0,001	1,108	0,704

Die berechneten quadratischen Kurven differenzierten weniger in der Regressionskonstante (c) als vielmehr in dem Regressionskoeffizienten (d). Ein kontinuierlicher Trend des Anstieges (d) im Vegetationsverlauf stellte sich hierbei jedoch nicht heraus. Obwohl der Anstieg zum letzten Termin (BBCH 65) am höchsten war, lag jener zum BBCH 37 unterhalb des Wertes vom BBCH 32 (Abbildung 4.3-2). Letzteres könnte auf eine größere Streuung der Datenpaare zum BBCH 32 und einer damit verbundenen schlechteren Beschreibung des Zusammenhanges zwischen beiden Parametern durch die Kurve zurückzuführen sein. Diese Erklärung wird durch einen höheren r^2 -Wert zum BBCH 37 (0,77) verglichen zum BBCH 32 (0,68) bekräftigt (Tabelle 4.3-2).

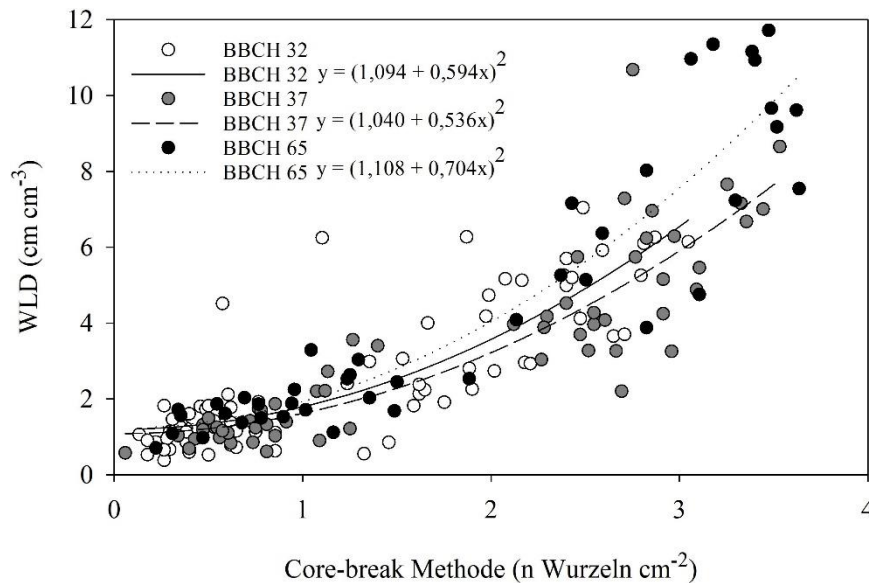


Abbildung 4.3-2: Beziehungen zwischen den erzielten Werten mit der Core-break Methode (Abszisse) und der Wurzellängendichte (WLD, Ordinate) zu verschiedenen BBCH-Stadien im Versuchsjahr 2015/2016. Die Regressionslinien wurden mit der quadratischen Formel $y = (c + dx)^2$ aus den Mittelwerten aller Datenpaare berechnet.

4.3.3. Minirhizotronmethode

Die Auswertung der Minirhizotronbilder mittels line intersect Methode zeigte zu keinem der drei Beprobungszeitpunkte signifikante Unterschiede zwischen den Prüfgliedern innerhalb einer Bodentiefe (Abbildung 4.3-3 A–C). Über das gesamte Bodenprofil gemittelt wies HS+UI+NI zu jedem Termin die höchste und die Kontrolle die geringste Wurzelintensität an den Wänden der Minirhizotronröhren auf. Diese Differenzen konnten jedoch nicht statistisch abgesichert werden. Neben generell großen Streuwerten (= Standardfehler) wurde im Vergleich zu den Ergebnissen der Bohrkernmethode (Kapitel 4.3.1) eine weniger stark mit zunehmender Tiefe abnehmende Wurzelintensität sichtbar. Dies unterstrichen deutlich höhere β -Werte als bei der Bohrkernmethode von 0,965 bis 0,969, welche sich im Vegetationsverlauf nur unwesentlich veränderten.

Obwohl die Wurzelintensität allgemein im obersten Bodenabschnitt am höchsten und in der darunterliegenden Tiefe (15–30 cm) geringer war, stieg die Durchwurzelung der Kontrolle und von KAS in 45–60 cm ersichtlich an. Diese Inkonsistenz zeigte sich zu allen drei Entwicklungsstadien. Lediglich bei HS+UI+NI nahm die Wurzelintensität entlang Minirhizotronröhren mit zunehmender Bodentiefe weitgehend konstant ab. Die vertikale Wurzelteilung aller drei Varianten war dennoch nahezu deckungsgleich (Abbildung 4.3-3 D-F). Für alle Varianten und Beprobungszeitpunkte einheitlich war die Wurzelintensität im untersten erfassten Bodenabschnitt (60–75 cm) am geringsten.

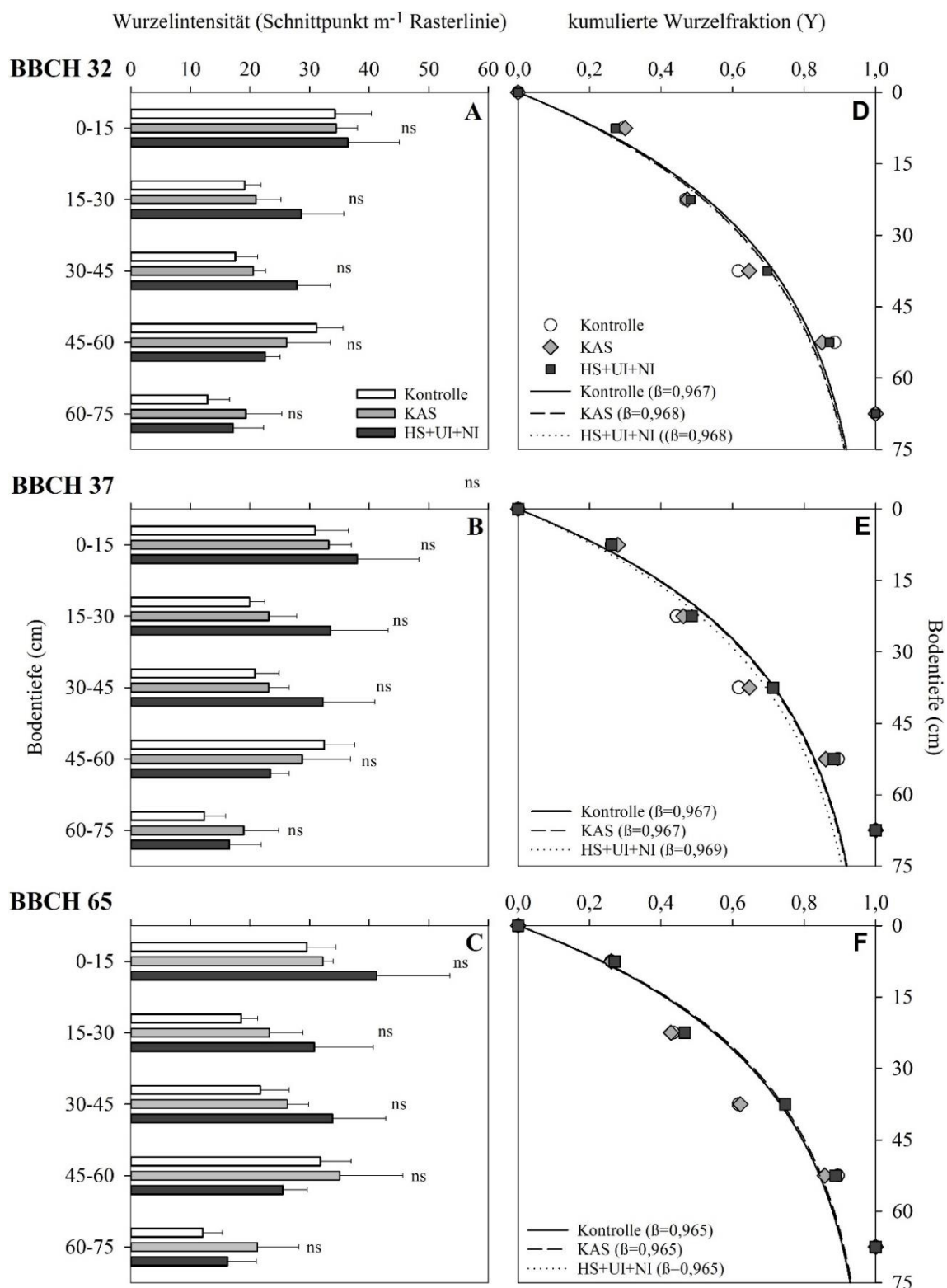


Abbildung 4.3-3: Vertikale Verteilung der Wurzelintensität (A–C) entlang von Minirhizontronnröhren bis zu einer Bodentiefe von 75 cm von Winterweizen zum BBCH 32, BBCH 37 und BBCH 65 in dem Versuchsjahr 2015/2016 bei unterschiedlicher N-Düngung mit Kalkammonsalpeter (KAS) und einem mit Urease- und Nitrifikationsinhibitor versetzten Harnstoff (HS+UI+NI) im Vergleich zu einer ungedüngten Kontrolle in Abhängigkeit von der Bodentiefe sowie die vertikale Verteilung der Wurzelfraktion (Y) und der Wurzelverteilungskoeffizient β (D–F). Dargestellt sind die mittels Minirhizontrontechnik erfassten Mittelwerte aus vier Wiederholungen und die Standardfehler. Verschiedene Kleinbuchstaben kennzeichnen signifikante Differenzen zwischen den Varianten innerhalb einer Tiefe und eines Terms ($p \leq 0,05$). ns = nicht signifikant.

Beim Vergleich der Wurzelintensitäten konnten bei allen Varianten nur geringe Veränderungen über die Zeit festgestellt werden. Die größten Zuwächse vom BBCH 32 zum BBCH 65 wurden in den Bodentiefen 30–45 und 45–60 cm sowie beim HS+UI+NI in 0–15 cm erkennbar. Dementgegen nahm die Wurzelintensität im Laufe des Versuches bei der Kontrolle und bei KAS in 0–15 cm sowie bei HS+UI+NI vom BBCH 37 zum BBCH 65 in 15–30 cm ab.

In der Abbildung 4.3-4 sind exemplarische Scanbilder mit einer kontinuierlichen Zu- (A) bzw. Abnahme (B) an sichtbaren Wurzeln respektive der Wurzelintensität über die Zeit dargestellt. Anhand der darin eingefügten roten Pfeile können die jeweils relevanten Regionen mit Zuwächsen bzw. Verlusten identifiziert werden. In jenen Bildern wird zudem eine stetige Abnahme der Kondensationswasserblasen an den Außenseiten der Minirhizotronröhren deutlich. Diese Verringerung des Wassergehaltes könnte eine mögliche Ursache für den Kontaktverlustes der Wurzeln zu den Röhren sein, wodurch die Sichtbarkeit der Wurzeln abnahm und letztlich die Bestimmung der Wurzelintensität beeinflusst wurde.

Anhand eines Vergleiches der fw (Abbildung 4.3-5). Aufgrund des sehr engen Zusammenhanges zwischen beiden Auswertungsverfahren stellte die line intersect Methode eine aussagekräftige und im Vergleich zur Software RootSnap! vielfach schnellere Herangehensweise dar.

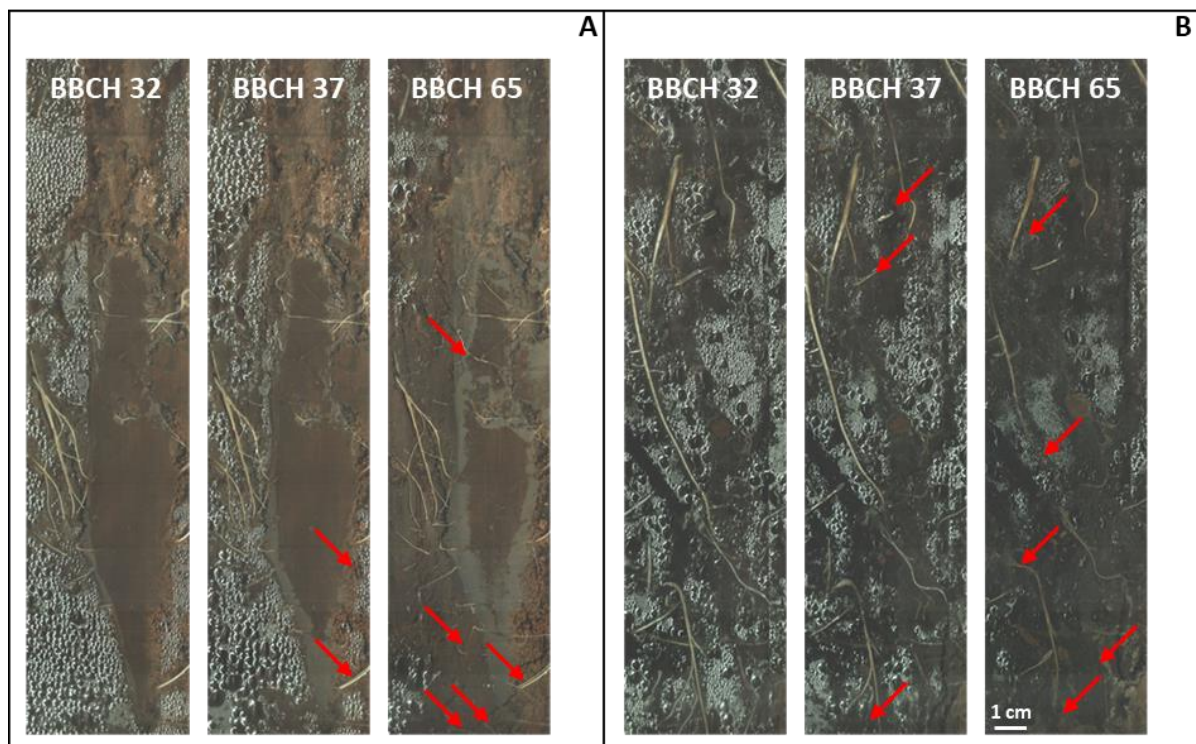


Abbildung 4.3-4: Scanbilder entlang von Minirhizotronröhren aus den Bodentiefen 15–30 (A) und 45–60 cm (B) der ungedüngten Kontrolle zu den BBCH-Stadien 32, 37 und 65. Die roten Pfeile kennzeichnen jene Regionen mit Zuwächsen (A) bzw. Verlusten (B) an sichtbaren Wurzeln im Versuchsverlauf.

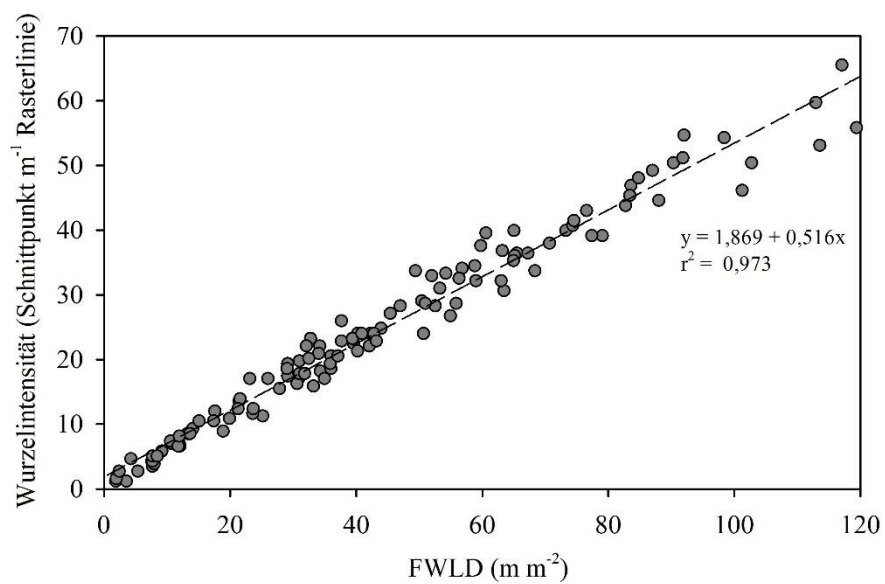


Abbildung 4.3-5: Beziehung zwischen der flächenbezogenen Wurzellängendichte (FWLD), ermittelt mittels der Software RootSnap! (Abszisse) und der Wurzelintensität, ermittelt *via* line intersect Methode (Ordinate) zum BBCH 32 im Versuchsjahr 2015/2016. Die Regressionslinie wurde mit der linearen Formel $y = a + dx$ aus den Mittelwerten aller Datenpaare berechnet. (n=120).

5 Diskussion

5.1 Standort- und Versuchsbedingungen

Die drei einjährigen Feldversuche am Versuchsstandort Merbitz wurden auf Lössböden durchgeführt, welche angesichts ihrer physikochemischen Eigenschaften und Bodenwertzahlen > 80 als sehr fruchtbar einzustufen sind (Blume et al. 2010). Unterstrichen wird dies durch einen für die meisten Kulturen optimalen Boden pH-Wert im neutralen bis leicht sauren Bereiche (Osman 2013), verhältnismäßig hohe, jedoch für Lössböden in Deutschland übliche C_{org} -Gehalte von ca. 1,5 bis 1,6% und einer hohen KAK von ca. 14 bis 16 cmol kg^{-1} (Blume et al. 2010). Als Vergleich dazu weisen beispielsweise die etwa 50 km südöstlich von Merbitz gelegenen ertragsschwächeren Standorte Cunnersdorf, Sehlis und Trossin deutlich geringe C_{org} -Gehalte und KAK von ca. 1,0 bis 1,2% bzw. ca. 4 bis 8 cmol kg^{-1} auf (Schuster et al. 2007). Aufgrund ihrer Bodentextur mit einem hohen Schluff- und Tonanteil und einem damit einhergehend gut nutzbaren Wasserhaltevermögen bieten die Böden in Merbitz den Pflanzen ausgezeichnete Voraussetzungen für ein gutes Wachstum mit hohen Erträgen (Osman 2013). Zudem verfügen die Lössböden bis zu einer Bodentiefe von 80 cm über ein Porenvolumen von 40 bis 50% mit geringen bis mittleren Lagerungsdichten zwischen 1,35 bis 1,55 g cm^{-3} (Hinz 2013), wodurch sie ausreichend durchlüftet und gut durchwurzelbar sind (Blume et al. 2010). Diese guten Bodeneigenschaften und hohen N_{min} -Gehalte zu Vegetationsbeginn von 59 bis 113 kg N ha^{-1} (0–90 cm) begrenzen gewissermaßen die Übertragbarkeit der in der vorliegenden Studie erzielten Ergebnisse auf Standorte mit vergleichbarer Bodencharakteristik. Möglicherweise könnte sich eine N-Düngung sowie verschiedene N-Düngerformen in Bezug auf die ober- und unterirdische Pflanzenentwicklung auf marginaleren Standorten anders auswirken.

Obwohl die Versuchsflächen der drei Versuchsjahre am Standort Merbitz maximal 400 m voneinander entfernt lagen, waren die Bodencharakteristiken und die $-$ reaktivität teilweise stark differenziert. Hierbei wich die Textur des Bodens aus 2013/2014 deutlich von jenen Werten der beiden darauffolgenden Versuchsjahre ab. Diese räumliche Heterogenität in der Bodentextur am Standort Merbitz wird durch die Ergebnisse von Hinz (2013) bestätigt. Darin weist der nordöstliche Teil der Versuchsanstalt, auf welchem die Versuchsfläche 2013/2014 lag, einen höheren Sandanteil auf als jener Bereich südwestlich davon, in welchem die Versuche in 2014/2015 und 2015/2016 angelegt waren. Die mit Abstand höchste Ureaseaktivität (UA) des Bodens aus dem Versuchsjahr 2013/2014 könnte zum Teil durch einen etwas höheren pH-Wert und eine höhere KAK erklärt werden, welche die Harnstoffhydrolyse fördern und UA erhöhen (Cabrera et al. 1991; Guimarães et al. 2016). Vergleichbare sowie höhere UA als im Boden aus 2013/2014 von ca. 36 $\mu\text{g NH}_4^+-\text{N (g Boden h)}^{-1}$ wurden hauptsächlich in Böden mit einem hohem pH-Wert von > 8 (Qin et al. 2010) oder in Böden mit einer deutlich höherer KAK ermittelt (Guimarães et al. 2016). Währenddessen entsprechen die UA der Böden aus 2014/2015 und 2015/2016 in etwa den ermittelten Werten sandigerer Böden mit einer teilweise deutlich niedrigeren KAK (Schuster et al. 2007; Guimarães et

al. 2016). Dieser Vergleich offenbart zugleich, dass die UA nicht zwangsläufig durch die o. g. physiokochemischen Eigenschaften des Bodens beeinflusst wird und mutmaßlich weitere standortspezifische Charakteristika und die Mikrobiologie des Bodens zu berücksichtigen sind.

Durch den jährlichen kleinräumigen Wechsel der Ackerflächen unterschieden sich zwar die bodenspezifischen Eigenschaften der einzelnen Versuchsflächen, jedoch wurde somit die Position des Winterweizens in der Fruchtfolge mit der Vorfrucht Gerste über alle drei Jahre konstant eingehalten. Dies ist insofern von Relevanz, da die Vorfrucht u. a. den Ertrag und die Ertragskomponenten (Sieling & Christen 2015), die Bodenmikrobiologie (Friberg et al. 2019), die Verfügbarkeit von Nährstoffen sowie das Wurzelwachstum (Thorup-Kristensen & Kirkegaard 2016) der Nachfrucht markant beeinflussen kann. Ein Wechsel in der Fruchtfolge hätte demnach mutmaßlich einen größeren Effekt auf die Ergebnisse der drei Versuchsjahre gehabt als sie durch den Flächentausch hervorgegangen sind. Eine Versuchsdurchführung an einer Stelle und bei gleicher Anordnung der Versuchsparzelle hätte zudem voraussichtlich zu einer Akkumulation der N-Menge im Boden in beiden N-Varianten geführt. Dadurch wären im zweiten und dritten Versuchsjahr bereits zur Aussaat Unterschiede in den N_{\min} -Gehalten der Kontrolle und beiden N-Varianten aufgetreten, welche ein Vergleich aller drei Prüfglieder in Bezug auf die Fragestellungen der vorliegenden Studie ausgeschlossen hätten.

Im Hinblick auf die Witterung waren die drei Versuchsjahre diesbezüglich einheitlich, dass die Wintermonate jeweils überdurchschnittlich warm waren und erst im Januar die Vegetationsruhe eintrat. In Anbetracht von Tageshöchstwerten von mehr als 10 °C setzen die Weizenpflanzen im ersten und dritten Versuchsjahr ihr Wachstum bereits Ende Februar fort, während die Temperaturen in 2014/2015 erst ab Anfang März das Pflanzenwachstum wieder anregen. Bei der Beurteilung der ober- und unterirdischen Pflanzenentwicklung sowie den Umsetzungsprozesse im Boden ist die Niederschlagsmenge bzw. deren Verteilung während der Vegetationszeit zu berücksichtigen. In diesem Zusammenhang können 2013/2014 und zu Teilen auch 2015/2016 als normale Jahre eingestuft werden, während das zweite Versuchsjahr extrem trocken war und von Februar bis Juni 2015 ein Niederschlagsdefizit über 104 mm aufwies. Die fehlende Feuchtigkeit wirkte sich sowohl auf die Prozesse im Boden als auch das Pflanzenwachstum aus. Zudem schränken die trockenen Bodenverhältnisse stellenweise die methodischen Verfahren zur Untersuchung des Wurzelwachstums zur Blüte der Weizenpflanzen ein.

5.2 Erzeugung einer NH_4^+ - und NO_3^- -betonten N-Versorgung

5.2.1 Modell

Auf die HS-Hydrolyse hatte der UI 2-NPT unter den Versuchsbedingungen des Bodenmodelltests (10 mg N pro 100 g Boden / 20 °C) in den Böden der ersten beiden Versuchsjahre lediglich einen geringen Einfluss. Dies wurde anhand der hohen NH_4^+ -N-Konzentrationen (mehr als 80% des

applizierten N) unmittelbar nach der Düngerapplikation sowie der ab dem zweiten Tag nach der Applikation rückläufigen NH_4^+ -N-Konzentrationen des Prüfgliedes HS+UI+NI deutlich (Abbildung 4.1-1). Vergleichbare Verläufe wurden mit dem UI NBPT unter Gewächshausbedingungen erzielt (Dawar et al. 2011), wobei sich hierin die NH_4^+ -N-Konzentrationen der inhibierten und unbehandelten HS-Varianten bereits vier Tage nach der Applikation wieder annäherten. Dementgegen berichteten Hartmann et al. (2020) in jüngerer Vergangenheit bei ähnlichen Laborbedingungen bis etwa zehn Tage nach der Applikation von einer deutlich geringeren NH_4^+ -N-Konzentration in dem Prüfglied mit NBPT, verglichen mit HS-Variante ohne Inhibitor. Der hierbei erfasste flachere Anstieg der NH_4^+ -N-Konzentration in der Variante mit UI entspricht in etwa dem Verlauf des Prüfgliedes HS+UI+NI im Versuchsjahr 2015/2016, wobei die Kurve von HS analog zu den ersten beiden Jahren nach dem zweiten Tag abfiel. Dessen ungeachtet konnte in den durchgeführten Laborversuchen nachgewiesen werden, dass HS bei optimaler Bodenfeuchte (50% WK_{max}), weitestgehend unabhängig von der Inhibition, bereits nach einem Tag in adäquate NH_4^+ -Mengen umgesetzt wird und so die pflanzliche Ernährung sicherstellt.

Der Einsatz des verwendeten NI MPA hemmte den Umsatz von NH_4^+ zum NO_3^- . Die dabei ermittelten höheren NH_4^+ -N-Konzentrationen im Versuchsverlauf, verglichen mit der nicht stabilisierten HS-Variante, bestätigen mehrere Laborversuchen mit anderen NI und teilweise verschiedenen Bodentexturen (z. B. Suter et al. 2010; Duan et al. 2017 und Barth et al. 2019). Dabei ist die Wirkung von NI im Allgemeinen auf leichten Standorten mit einem geringeren Anteil an organischem Material und bei niedriger Temperatur am höchsten bzw. *vice versa* (Subbarao et al. 2006). Angesichts der globalen Verbreitung wurden in der Vergangenheit hauptsächlich Experimente mit Nitrapyrin, DMPP und DCD durchgeführt (Subbarao et al. 2006; Ruser & Schulz 2015). Hingegen liegt zum erst seit wenigen Jahren in Deutschland zugelassenen MPA derzeit lediglich eine publizierte Studie vor (Kirschke et al. 2019). Umfassende Untersuchungen fanden indes zu einer Teilkomponente des MPA, dem 3-MP (3-Methylpyrazol), statt (Trenkel 2010; Misselbrook et al. 2014; Wolf et al. 2014; Pietzner et al. 2017). Davon abgesehen führte der Einsatz des NI in alle drei Böden unter Modellbedingungen zu einer deutlich verlängerten NH_4^+ -Phase, sodass die im Feldversuch untersuchte Variante HS+UI+NI als eine NH_4^+ -basierende N-Düngung angesehen werden kann.

Die Zulassung der beiden in der vorliegenden Studie eingesetzten Inhibitoren 2-NPT und MPA erfolgte durch den Wissenschaftlichen Beirat für Düngungsfragen (WBD) des Landwirtschaftsministeriums in Deutschland anhand umfassender zur Verfügung gestellter Unterlagen und Studien. Diese Studien wurden nach international anerkannten Richtlinien (OECD Richtlinien) durchgeführt, dokumentiert und ausgewertet. Entsprechend der Einschätzung vom WBD geht bei sachgerechter Anwendung der Inhibitoren keine Gefahr für den Naturhaushalt, die Fruchtbarkeit des Bodens sowie die Gesundheit von Menschen, Tieren und Pflanzen aus. Auf

Grundlage dieser Beurteilung wurden beide Inhibitoren in die Düngemittelverordnung in Deutschland aufgenommen. Gleichzeitig sind die Substanzen gemäß REACH (Registration, Evaluation, Authorisation and Restriction of Chemicals) registriert (European Parliament and Council 2006).

5.2.2 Freiland

Die Wirkung des NI auf die Nitrifikation, resultierend in einer verlängerten NH_4^+ -Phase und höheren NH_4^+ -N-Konzentrationen im Prüfglied HS+UI+NI gegenüber der Düngerform KAS, konnte partiell auch im Freiland nachgewiesen werden. Dieser verzögernde Effekt des NI ist konsistent mit den Ergebnissen aus dem Feldversuch von Díez López & Hernaiz (2008). Ein Grund für die geringen NH_4^+ -N-Gehalte an einzelnen Beprobungsterminen nach der Applikation von HS+UI+NI könnte in der Beprobungsmethode liegen. Anhand der entnommenen Bodenproben und anschließenden Extraktion des NH_4^+ und NO_3^- (= N_{\min}) ist v. a. beim NH_4^+ eine Unterteilung zwischen den austauschbar sorbierten und sich in der Bodenlösung befindenden Mengen nicht möglich. Dies ist insofern relevant, da die Wirkung des NI weniger im Bodenextrakt als viel mehr in der Bodenlösung ersichtlich wird, wie Kirschke et al. (2019) in einer Feldstudie ohne pflanzlichen Bewuchs nachweisen konnten. Selbigen Autoren zufolge sind die prozentualen Differenzen in den NH_4^+ -N-Konzentrationen zwischen einer NI-behandelten und einer nicht-inhibierten Variante in der Bodenlösung ausgeprägter als im Bodenextrakt. Zugleich führt die Hemmung der Nitrifikation durch den NI zu höheren NH_4^+ -N-Konzentrationen respektive geringeren NO_3^- -N-Konzentrationen in der Bodenlösung, wodurch die Auswaschungsgefahr des applizierten N verringert wird. Dies ist in einem sich ständig wechselnden Gleichgewicht zwischen der Konzentration in der Lösung und derjenigen an den Austauschern begründet (Dou & Steffens 1995). Somit gehen die an negativ-geladenen Oberflächen von Tonmineralen und Humus sorbierten positiv-geladenen NH_4^+ -Ionen, in Abhängigkeit von der NH_4^+ -N-Konzentration in der Bodenlösung, sukzessiv in Lösung (Nieder et al. 2011) und können anschließend von den Pflanzen aufgenommen werden (Schimel & Bennett 2004). Die absoluten NH_4^+ -N-Konzentrationen sind jedoch im Bodenextrakt höher als in den Bodenlösung (Cavalli et al. 2015; Kirschke et al. 2019).

Dessen ungeachtet beeinflussten die Witterung sowie der Applikations- und Beprobungszeitpunkt die NH_4^+ -N-Konzentration und damit die quantifizierbare Wirkung des NI respektive die Unterschiede in der Zusammensetzung des N_{\min} von KAS und HS+UI+NI. Durch einen größeren zeitlichen Abstand zwischen der Applikation und der Beprobung, wie in den beiden Versuchsjahren 2014/2015 und 2015/2016, wurde die Wirkung des NI auf die NH_4^+ -Transformation deutlicher (Tabelle 4.1-1). Von vergleichbaren jährlichen Schwankungen der NH_4^+ -N-Konzentration nach einer N-Düngung mit NI, wie in der vorliegenden Studie erkennbar, berichteten u. a. Pfab et al. (2012).

Höhere NH_4^+ -N-Konzentrationen im Prüfglied HS+UI+NI bedeuteten gleichzeitig einen höheren prozentualen Anteil des NH_4^+ am gesamten N_{min} . Diese Beobachtungen werden durch eine Metaanalyse an 81 Studien gestützt, worin die Wirkung der NI DCD und DMPP auf die Veränderung des anorganischen N-Gehalts im Boden unter Feldbedingungen gleichermaßen belegt wurde (Yang et al. 2016). Demnach führt die Applikation von jedem der beiden NI zu höheren NH_4^+ -N-, respektive geringeren NO_3^- -N-Gehalten als in einer nicht-inhibierten Variante. Während sich das N_{min} beim KAS annähernd vollständig aus NO_3^- zusammensetzte und demnach jenes Prüfglied eine NO_3^- -betonte N-Düngervariante darstellt, wurden bei HS+UI+NI stellenweise zwei Wochen nach der Applikation noch mehr als $10 \text{ kg NH}_4^+ \text{ N ha}^{-1}$ quantifiziert. Jenes Ergebnis wird durch einen Feldversuch aus Großbritannien gestützt, indem die Kombination von UI und NI zu HS verglichen mit einem unbehandelten HS zu einer Verlängerung der NH_4^+ -N-Phase führte und zugleich die NO_3^- -N-Konzentration innerhalb der ersten 15 Tage nach der Applikation um etwa die Hälfte verringerte (Fu et al. 2020). Darin konnte ebenfalls nachgewiesen werden, dass der größte Teil des applizierten N auch unter Feldbedingungen mit einer gemittelten Bodentemperatur von $9 \text{ }^\circ\text{C}$ nach zwei Tagen als NH_4^+ oder bereits als NO_3^- vorlag. Dies weist auf eine rasche Hydrolyse des HS hin, welche bei ausreichender Verteilung im Boden durch die Existenz des UI nicht wesentlich verlangsamt wurde.

Die Unterschiede in den NH_4^+ -N-Konzentrationen zwischen beiden N-Düngervarianten lassen darauf schließen, dass die mit HS+UI+NI gedüngten Weizenpflanzen zumindest temporär größere Mengen in Form von NH_4^+ aufgenommen haben bzw. die N-Ernährung überwiegend aus einer Mischung von NH_4^+ und NO_3^- bestand. Dies wurde in allen drei Versuchsjahren während des Schossens (BBCH 31 bis 37/39) und in 2015/2016 bis zum BBCH 51 nachgewiesen. Dementgegen basierte die N-Ernährung der mit KAS gedüngten Pflanzen nahezu vollständig auf NO_3^- . Ähnliche Unterschiede in den N_{min} -Formen zwischen einem KAS und einem mit NI-behandelten HS stellten Harty et al. (2016) unter Feldbedingungen fest. Eine stärkere Wirkung des NI, resultierend in höheren NH_4^+ -N-Konzentrationen über einen längeren Zeitraum, wäre auf leichteren Böden mit einem geringeren Tonanteil zu erwarten gewesen (Barth et al. 2019). Anhand von Inkubationsversuchen mit DMPP konnte nachgewiesen werden, dass ein zunehmender Tongehalt des Bodens die Sorption des NI erhöht und dadurch die Inhibierung der NH_4^+ -Oxidation vermindert (Barth et al. 2001). Eine vor kurzem veröffentlichte Studie lässt vermuten, dass die Wirksamkeit von NI prägnant durch die mikrobielle Aktivität und Diversität reguliert wird (Ganasamurthy et al. 2021). Im Umkehrschluss bedeutet dies, je diverser und aktiver die Mikrobiologie am Standort ist, desto höher ist die Wahrscheinlichkeit, dass der NI lediglich eine begrenzte Anzahl an mikrobiellen Gruppen hemmt, während andere Mikroorganismen uneingeschränkt den NH_4^+ -Abbau vollführen können. Eine vielfältige Mikrobiologie würde wiederum zu einer kürzeren Stabilisierungszeit führen und könnte eine Ursache für die nur temporär quantifizierte Wirkung des NI auf die NH_4^+ -N-Konzentration in der vorliegenden Studie sein. Die Standortbedingungen in Merbitz mit einem leicht sauren bis

neutralen pH-Wert, einem hohen Schluffanteil sowie einem hohen C_{org} -Gehalt (Tabelle 3.1-1) sind bevorzugte Lebensräume für diverse Mikroorganismen in den gemäßigten Breiten (Blume et al. 2010; Osman 2013). Zur Absicherung dessen wäre eine umfassende Untersuchung der mikrobiologischen Gruppen notwendig gewesen. Zudem ist die Wirkung von Inhibitoren, aufgrund einer Vielzahl an Einflussfaktoren und einer stärkeren Heterogenität des Bodens, im Feld oftmals geringer nachzuweisen als unter kontrollierten Laborbedingungen. Wie aus mehreren Studien hervorgeht (Barth et al. 2008; Suter et al. 2010; McGeough et al. 2016; Beeckman et al. 2018) kann die NI-Effizienz neben der Bodentextur ebenso von der Bodentemperatur abhängen und je nach Typ und Konzentration des NI variieren. Ferner kann durch den Einsatz von NI die Aktivität von Bodenorganismen kleinräumig beeinträchtigt werden (Trenkel 2010). Dies trifft jedoch nur für sehr hohe Konzentrationen zu, die das 10-Fache und darüber hinaus der empfohlenen Konzentration überschreiten. (Tindaon et al. 2011). Demnach können negative Effekte von NI auf den Bodenmetabolismus und die Mikroflora bei Einhaltung der empfohlenen NI-Konzentrationen vernachlässigt werden.

Die N_{min} -Gehalte der Kontrolle setzten sich nahezu vollständig aus NO_3^- zusammen und entsprachen der natürlichen Mineralisation der organischen Bodensubstanz (Osman 2013). Das hierbei anfangs gebildete NH_4^+ wurde rasch zu NO_3^- nitrifiziert (Robertson & Groffman 2015). Größere Niederschlagsmengen wenige Tage vor der Beprobung, wie zu den dritten Beprobungen in 2013/2014 und 2015/2016 mit 21 bzw. 44 mm, regten die Mineralisation im Boden stark an, sodass der Anteil vom NH_4^+ in der Kontrolle mit 21 bzw. 40% am gesamten N_{min} deutlich größer als zu einem früheren Entnahmepunkte war. Jener Anstieg der NH_4^+ -Werte deutet zugleich auf ein großes N-Nachlieferungsvermögen der Böden hin, sodass auch die ungedüngten Weizenpflanzen zumindest temporär und speziell im Jugendstadium nicht unter N-Mangel litten. Exemplarisch dafür sind die hohen Korn- und Stroherträge in 2013/2014 und 2015/2016 (Tabelle 4.2-2). Unterschiede der N_{min} -Gehalte und der N-Formen zwischen den Jahren innerhalb der Kontrolle sind einerseits in den abweichenden Mineralisationsraten und andererseits in den N-Entzügen der Pflanzen begründet. Zur Beurteilung der N-Dynamik im Boden in der einzelnen Prüfglieder wären engere Abstände zwischen den Entnahmen notwendig gewesen, wie sie beispielsweise von Kirschke et al. (2019) und Schulze (2020) durchgeführt wurden. Dies hätte jedoch einen bedeutenden Mehraufwand zur Folge gehabt. Aus den erhobenen N_{min} -Gehalten der vorliegenden Studie lässt sich dennoch schlussfolgern, dass auf einem fruchtbaren Boden wie in Merbitz neben dem Effekt einer N-Düngergabe auch die hemmende Wirkung des NI auf die Nitrifikation, einhergehend mit einer verlängerten NH_4^+ -Phase, partiell verifiziert werden kann.

5.3 Einfluss der mineralischen Stickstoffform auf die pflanzenbauliche Entwicklung von Winterweizen

5.3.1 Wurzel

In der vorliegenden Studie wurde u. a. der Effekt einer mineralischen N-Düngung auf das Wurzelwachstum im Vergleich zu einer ungedüngten Kontrolle erkennbar. Der fehlende Stickstoff wirkte sich zunächst (BBCH 32) positiv auf die Wurzelentwicklung der Weizenpflanzen in der Kontrolle aus. Angesichts hoher N_{\min} -Gehalte zu Vegetationsbeginn lagen auch den ungedüngten Pflanzen bis zu Beginn des Schossens (BBCH 31/32) verhältnismäßig gute Wachstumsbedingungen vor, sodass die Pflanzen der Kontrolle lediglich unter mildem N-Mangel litten. Wie aus den Untersuchungen von Gruber et al. (2013) hervorgeht, stimuliert moderater N-Mangel insbesondere das Längenwachstum der Seitenwurzeln und erhöht den Anteil der Wurzeln in Bezug auf die gesamte Pflanzenbiomasse. Demnach investieren Pflanzen bei geringer N-Versorgung mehr Energie ins Wurzelwachstum als bei üppiger Nährstoffverfügbarkeit. Durch ein stärker ausgebildetes Wurzelsystem können die Pflanzen einen größeren Bereich der Bodenmatrix erschließen und somit ihren Nährstoffbedarf besser decken. Eine stark eingeschränkte N-Versorgung, wie sie beispielsweise auf ertragsschwachen Standorten mit geringen N_{\min} -Gehalten besteht, beeinträchtigt indessen bereits bei jungen Pflanzen die Wurzelentwicklung (Gruber et al. 2013). Im weiteren Versuchsverlauf und spätestens zum BBCH 65 schränkte der N-Mangel das Wurzelwachstum in der vorliegenden Arbeit ein. Besonders im Ap-Horizont wurden Unterschiede in der WLD zwischen der Kontrolle und den mit N versorgten Varianten von $> 2 \text{ cm cm}^3$ erfasst. Ähnliche Effekte der N-Versorgung auf die Wurzelentwicklung haben Wang et al. (2016) in einem Feldversuch mit Weizen festgestellt.

Im Speziellen sollte in der vorliegenden Studie die Wirkung einer NH_4^+ -betonten N-Ernährung auf die Wurzelentwicklung mit jener auf NO_3^- -basierten N-Ernährung im Feld verglichen werden. Unter den gegebenen Bedingungen zeigten sich zwischen den beiden dafür repräsentativen Varianten HS+UI+NI (NH_4^+) und KAS (NO_3^-) über alle drei Versuchsjahre keine signifikanten Unterschiede im Wurzelwachstum. Eine fördernde Wirkung einer NH_4^+ -betonten N-Ernährung auf die WLD konnte zumindest tendenziell in den ersten beiden Versuchsjahren während des Schossens der Winterweizenpflanzen (BBCH 37) bestätigt werden (Abbildung 4.3-1). Zur Vollblüte (BBCH 65) waren die WLD beider N-Düngerformen auf einem Niveau bzw. bei KAS etwas höher. Einen stärker ausgeprägten zeitlich versetzter Effekt von NH_4^+ und NO_3^- auf die Wurzelentwicklung wiesen u. a. Chen et al. (2016) in einem Gefäßversuch mit Tomaten nach. Darin wurde das Wurzelwachstum der jungen Pflanzen vor allem nach einer NH_4^+ -Düngung gefördert, während sich die NO_3^- -Düngung im weiteren Vegetationsverlauf verstärkt positiv auf die Entwicklung der Wurzeln auswirkte.

Aus mehreren Arbeiten ist bekannt, dass beide N-Formen abweichende Reaktionen der Wurzelentwicklung hervorrufen können. Während durch NH_4^+ vermehrt die Verzweigung der lateralen Wurzeln gefördert wird (Lima et al. 2010), wirkt sich NO_3^- insbesondere auf das Längenwachstum der Seitenwurzeln aus (Sun et al. 2017). Dabei reagieren einzelne Kulturen bezüglich des Wurzelwachstums mit verschiedener Sensitivität auf die Versorgung mit NH_4^+ (Gerendás et al. 1997). In den Gefäßversuchen von Blaser et al. (2020) mit Gerste erhöhte NH_4^+ die WL der ersten Ordnung, während in Experimenten von Lima et al. (2010) auf Agarplatten mit Tomaten das laterale Wurzelwachstum der zweiten und dritten Ordnung gesteigert wurde. Eine Unterteilung der einzelnen funktionalen Wurzelklassen, wie in diesen Arbeiten praktiziert, wurde in der vorliegenden Studie nicht vorgenommen. Es ist jedoch davon auszugehen, dass unter den gegebenen Feldbedingungen zwischen den einzelnen Ordnungen der lateralen Wurzeln von HS+UI+NI und KAS keine markanten Abweichungen existierten bzw. nur sehr lokal an einzelnen Wurzeln Unterschiede auftraten, welche aufgrund des Probenvolumens nicht quantifizierbar wären. Gestützt wird diese Hypothese durch die zwei Umstände. Einerseits brachte eine Unterteilung der Wurzeln von HS+UI+NI und KAS in verschiedene Wurzeldurchmesserklassen keine Unterschiede hervor (Daten nicht gezeigt) und andererseits zeigen auch Studien unter kontrollierten Bedingungen, wie zum Beispiel jene von Blaser et al. (2020) mit den Modellpflanzen Ackerbohne und Gerste, dass einzelne Kulturen verschieden sensitiv auf eine Versorgung mit NH_4^+ reagieren.

Studien, in denen die Wirkung von NH_4^+ und NO_3^- auf die Wurzelentwicklung untersucht wurde, fanden weitestgehend unter Laborbedingungen mit Nährlösung (Bloom et al. 2006), auf Agarplatten (Lima et al. 2010) oder in Gefäßen (Drew 1975; Schortemeyer et al. 1993; Ogawa et al. 2014; Rabbi et al. 2017; Blaser et al. 2020) statt und umfassten dabei lediglich die erste Entwicklungsphase der Pflanzen. Die darin bestehenden Bedingungen lassen sich nur in Ansätzen auf die Feldebene übertragen, da diverse zusätzliche Faktoren unter praxisnahen landwirtschaftlichen Bedingungen das Wurzelwachstum beeinflussen. In den Studien auf Agarplatten und mit Nährlösung wies die N-Konzentration keine Dynamik auf, sondern wurde kontinuierlich ausgetauscht und erneuert. Zudem haben die Wurzeln darin direkten Kontakt zum Nährstoff, welcher oftmals in deutlich höherer Konzentration als unter natürlichen Bedingungen im Feldeboden vorliegt. Im Gegensatz dazu befindet sich im Boden nur ein kleiner Teil des NH_4^+ in der Bodenlösung, während die weitaus größere Menge austauschbar an negativ geladenen Bodenpartikeln gebunden ist (Kirschke et al. 2019). Die Immobilität von NH_4^+ zwingt die Pflanze zu einem aktiven Wachstum hin zum Nährstoff und beugt damit der potentiellen Gefahr eines „Luxuskonsums“ vor (Amberger 1996). Das weitestgehend mobil in der Bodenlösung vorliegende und leicht aufzunehmende NO_3^- erreicht die Wurzel währenddessen passiv *via* Massenfluss (Giehl & von Wirén 2014).

Auf dem ertragreichen Standort in Merbitz ist es eher unwahrscheinlich, dass die unterschiedliche Mobilität der NH_4^+ - und NO_3^- -Ionen im Boden die Aufnahme von N in die Pflanze beeinflusst hat

(Blankenau et al. 2002) und sich demnach markant auf die Wurzelentwicklung auswirkte. Auf einem sandigeren Boden mit einem geringeren N_{\min} -Hintergrundgehalt wären mögliche Effekte einer NH_4^+ -betonten N-Düngung auf die Wurzeln, wie sie beispielsweise Drew (1975) und Blaser et al. (2020) unter kontrollierten Bedingungen erfassten, wahrscheinlich besser nachweisbar. Davon abgesehen, liegt unter natürlichen Bedingungen der Stickstoff auch bei einem mit NI stabilisierten N-Dünger in einem Gemisch aus NO_3^- und NH_4^+ vor. In einer Studie unter kontrollierten Bedingungen konnte nachgewiesen werden, dass die jungen Maispflanzen bei einem NH_4^+ zu NO_3^- Verhältnis von 50:50 und 75:25 die höchsten WTM aufweisen (Pedersen et al. 2019). Außerdem wurde unter jenen Verhältnissen der beiden N-Formen die STM und P-Aufnahme gesteigert. Vergleichbare Ergebnisse stellten Xu et al. (2014) in ihren Untersuchungen mit Weizen fest. Darin wurde durch die Zugabe eines NI bei homogener Verteilung des HS-Düngers im Boden der Anteil von NH_4^+ auf mehr als 50% am gesamten N-Gehalt erhöht, was sich positiv auf die Wurzelentwicklung sowie das Sprosswachstum der jungen Pflanzen auswirkte. Eine lokale Platzierung von NH_4^+ wirkte sich in der Feldstudie von Jing et al. (2010) mit Mais ebenfalls fördernd auf das Wurzelwachstum aus. Die in der vorliegenden Studie ermittelten WLD der Weizenpflanzen beider N-Düngervarianten fügen sich, trotz starker Schwankungen zwischen den drei Versuchsjahren, gut in die Ergebnisse anderer Arbeitsgruppen ein (Asseng et al. 1997; Ford et al. 2006; Gregory 2007; White et al. 2015; Hodgkinson et al. 2017). In Abhängigkeit vom Genotyp, Entwicklungsstadium der Pflanze, Bodentiefe und Umweltfaktoren kann die WLD von Weizen zwischen 2 und 10 cm cm^{-3} schwanken (Manschadi et al. 2013).

Bei einer schnell ablaufenden Nitrifikation und/oder hohen Entzügen durch die Pflanze, wie beispielsweise im Frühjahr, kann NH_4^+ unter Feldbedingungen nur unzureichend schnell vom Sorbenten nachgeliefert werden. In der Folge nimmt die NH_4^+ -Verfügbarkeit in der Bodenlösung deutlich ab, sodass auch nach einer mit NI behandelten N-Düngung den Pflanzen weitestgehend NO_3^- als N-Quelle zur Verfügung steht. Zur Bestätigung dessen wäre in der vorliegenden Studie eine zusätzliche und engmaschige Analyse der Bodenlösung notwendig gewesen, wie sie beispielsweise in den Untersuchungen von Kirschke et al. (2019) vorgenommen wurde (s. o.). Auf Basis von Extraktionsverfahren, insbesondere unter Feldbedingungen, ist es daher äußerst schwierig die im Labor erfassten Effekte von NO_3^- und NH_4^+ auf die laterale Wurzelentwicklung zu validieren. Dies ist mutmaßlich nur in Ausnahmefällen und bei jungen Pflanzen möglich. Erschwerend kommt unter Feldbedingungen der Einfluss weitere abiotischer Faktoren, wie pH-Wert, Wasserverfügbarkeit, Temperatur und Konzentration weiterer Nährstoffe hinzu, welche die Quantifizierung einer spezifische Reaktion der N-Düngerform auf das Wurzelwachstum nahezu ausschließen (Nacry et al. 2013). Gestützt werden die vorliegenden Ergebnisse durch die Arbeit von Wang et al. (2016), worin der Applikation von zwei verschiedenen N-Düngerformen, welche stellvertretend für eine NH_4^+ - bzw. NO_3^- -betonte Ernährung standen, keine signifikanten Wirkungen auf die WTM der

Weizenpflanzen unter Feldbedingungen hatten. Die darin durchgeführten Untersuchungen fanden ebenfalls auf einem ertragsstarken Standort statt.

Der Einfluss der Temperatur auf die Wurzelentwicklung der Pflanzen im Feld wird anhand der stark variierenden WLD aller Varianten zum BBCH 32 deutlich. Beispielsweise waren die WLD in 2013/2014 zum BBCH 32 in den oberen 40 cm des Bodens um Faktor zwei bis drei kleiner als im zweiten Versuchsjahr 2014/2015 zum gleichen Entwicklungsstadium. Das ist darin begründet, dass Wurzeln deutlich sensitiver auf steigende Temperaturen als die oberirdischen Pflanzenteile reagieren (Rich & Watt 2013) und das Wurzelwachstum auch während der Winterperiode aktiv stattfindet (Rasmussen et al. 2015). Während dieser Phase ist für die Wurzelentwicklung die Temperatursumme entscheidend. Von der Aussaat bis zur ersten Beprobung zum BBCH 32 lag die kumulierte Temperatursumme in 2013/2014 bei ca. 273 °C Tag und war damit geringer als im zweiten Versuchsjahr 2014/2015. In drei einjährigen Feldversuchen mit Weizen wiesen Thorup-Kristensen et al. (2009) nach, dass die kumulierte Temperatursumme insbesondere in den Herbst- und Wintermonaten nicht nur die WLD beeinflusst, sondern ebenfalls über die maximale Wurzeltiefe entscheidet. Die mittlere Wachstumsrate von Weizen beträgt je nach Standort und Sorte in vertikaler Ausrichtung ca. 0,7 mm (°C Tag)⁻¹ und in horizontaler Ausrichtung ca. 0,5 mm (°C Tag)⁻¹ (Andresen et al. 2016). Diese kann jedoch auch mit steigender Porosität des Bodens (White & Kirkegaard 2010) deutlich größer sein (Thorup-Kristensen et al. 2009; Rasmussen et al. 2015).

Darüber hinaus kann in der vorliegenden Studie eine vom NH₄⁺ ausgehende toxische Wirkung ausgeschlossen werden. Eine NH₄⁺-Toxizität kann u. a. zu Wachstumsdepressionen, kleineren Blättern sowie einem gestauchten Wurzelsystem führen (zusammengefasst von Britto & Kronzucker 2002) und somit möglicherweise die Ergebnisse der Wurzelparameter von HS+UI+NI beeinflusst haben. Wie Kirschke et al. (2019) jedoch zeigten, verlängert der Einsatz des MPA als NI in einer Konzentration von 0,15% (N-bez.) im Feld die NH₄⁺-Phase sowohl in der Bodenlösung als auch am Sorbenten. Bei einer hohen Anzahl an negativen Bindungsstellen, wie in Merbitz (Tabelle 3.1-1), kann ein Großteil vom NH₄⁺ austauschbar an der Bodenmatrix gebunden werden, während lediglich ein geringer Teil des gesamten NH₄⁺ gelöst und pflanzenverfügbar ist. Zu allen Messterminen, bei denen der N_{min}-Gehalt des Bodens bestimmt wurde, nahm auch in der Variante HS+UI+NI das NO₃⁻ den Hauptanteil ein. Der höchste erfasste Anteil vom NH₄⁺ am gesamten N_{min} betrug 44%. Studien, in denen eine nachteilige Wirkung von NH₄⁺ auf die Wurzelentwicklung festgestellt wurde, fanden unter Extremsituationen bei lokaler NH₄⁺-Platzierung (Li et al. 2010) oder sehr hohen NH₄⁺-N-Konzentrationen statt (Gerendás et al. 1997; Chen et al. 2013), welche unter natürlichen Bedingungen nahezu ausgeschlossen sind. Im Feld liegt die NH₄⁺-N-Konzentration in der Bodenlösung meistens unter 1 mM, während jene von NO₃⁻, v. a. nach der Dünger auf bis zu 10 mM ansteigen können (Nacry et al. 2013). Zudem ist bekannt, dass eine moderate NH₄⁺-N-Konzentration

von 0,05 mM das Wurzelwachstum junger Maispflanzen stärker stimuliert, als bei einer N-Ernährung auf Basis von NO_3^- (Gerendás et al. 1997).

Wenngleich eine verlängerte NH_4^+ -Phase in der Variante HS+UI+NI unter den gegebenen Bedingungen in Merbitz keinen markanten Effekt auf die Wurzelentwicklung hatte, zeigen Studien, dass die Pflanzen möglicherweise anderweitig von den höheren NH_4^+ -N-Konzentrationen profitierten. Bei der Aufnahme von NH_4^+ -Ionen in die Pflanze werden zum Ladungsausgleich über die Wurzeln H^+ -Ionen in den Boden abgegeben und somit der pH-Wert der Rhizosphäre abgesenkt (Neumann & Römheld 2002). Diese Ansäuerung der Rhizosphäre verbessert insbesondere auf alkalischen und neutralen bis leicht sauren Böden, wie am Versuchsstandort Merbitz, die Verfügbarkeit und Aufnahme von P sowie den Mikronährstoffen Fe, Mangan (Mn), Zink (Zn) und Kupfer (Cu) (Thomson et al. 1993). Unabhängig von der Veränderung des pH-Wertes hat eine NH_4^+ -Ernährung im Vergleich zur Aufnahme von NO_3^- auch einen ökonomischen Vorteil für die Pflanze. Bereits 1987 wiesen Salsac und Kollegen nach, dass bei der Aufnahme von NH_4^+ 10 ATP je mol N weniger Energie benötigt wird als bei der Akquisition von NO_3^- . Die hierbei eingesparte Energie kann u. a. für die Verteilung von Assimilaten innerhalb der Pflanze verwendet werden.

5.3.2 Bestandsarchitektur und Ertragskomponenten

Die Voraussetzung zur Beurteilung der Wirkung verschiedener N-Düngerformen auf die Ertragsbildung, den Ertrag sowie die Qualität setzt eine einheitliche Saatedichte aller Varianten voraus. Im Versuch wurde eine für Deutschland übliche Bestandesdichte von 300 Pflanzen m^{-2} angestrebt, die sich an der Empfehlung des Züchters orientierte. In Abhängigkeit vom Standort, Ertragsziel und Sortentyp bewegt sich dieser Wert in einem Bereich von 200 bis 500 Pflanzen m^{-2} (Diepenbrock et al. 2016). Angesichts der guten Standortbedingungen mit tiefgründigen Böden, welche die unterdurchschnittlichen Winterniederschläge teilweise kompensierten, sowie milden Winter, kann in allen drei Versuchsjahren von einem homogenen Auflauf der Pflanzen und einer einheitlichen Bestandesdichte ausgegangen werden (Sticksel et al. 1996).

Zur Beurteilung des Einflusses der N-Düngerform bzw. des Düngeregimes auf das Pflanzenwachstum im Vegetationsverlauf wäre eine kontinuierliche Erhebung der Pflanzentrockenmasse (PTM) erforderlich gewesen. Die für jene Zwischenernten notwendige hohe Stichprobenmenge an Pflanzenmaterial stand nicht, ohne andere Maßnahmen und Analysen zu beeinflussen, zur Verfügung. Ersatzweise zur PTM wurde die Pflanzenhöhe herangezogen, da sich diese als gut geeignet erwies, um die Unterschiede im Wachstumsverlauf zwischen der Kontrolle und den gedüngten Varianten aufzuzeigen. Zwischen den N-Düngervarianten konnten keine Unterschiede bei den Pflanzenhöhen detektiert werden. Daher ist davon auszugehen, dass auch die PTM von KAS und HS+UI+NI auf einem Niveau lagen. Wie jedoch Andrews und Kollegen 2013 zusammenfassten, weisen die meisten Pflanzen bei NO_3^- als N Quelle eine größere Blattausdehnung

auf als jene, die ausschließlich eine NH_4^+ -Ernährung erhielten. Hohe NH_4^+ -N-Konzentrationen können toxisch wirken und verringern u. a. die Anzahl und Größe von Pflanzenzellen (Andrews et al. 2013), wodurch das Wachstum oft eingeschränkt wird (Wiesler 1997). Hierbei handelt es sich jedoch um Extremsituationen, welche in der NH_4^+ -basierten Varianten HS+UI+NI nicht erreicht wurden und in heutigen landwirtschaftlichen Systeme nur selten auftreten (Andrews et al. 2013). Ein ausgewogenes NH_4^+ zu NO_3^- -Verhältnis, wie es temporär bei HS+UI+NI vorlag, kann bei Weizen zu Wuchsvorteilen führen und im Vergleich zu einer reinen NO_3^- -Ernährung höhere Erträge erzielen (Heberer & Below 1989; Chen et al. 1998). Zudem verhindert eine kontinuierliche NH_4^+ -Nachlieferung vom Sorbenten in die Bodenlösung ein Überwachsen der Bestände und die Bildung von unproduktiven schwachen Trieben, welche im späteren Entwicklungsprozess der Pflanzen wieder reduziert werden und zu keinem Ertragszuwachs führen.

Die ertragsbildenden Komponenten von KAS und HS+UI+NI aus dem ersten und dritten Versuchsjahr ordnen sich weitestgehend in die Werte mehrerer Feldstudien in Deutschland ein (z. B. Sieling et al. 2005; Erekul & Köhn 2006). Wie Ergebnisse aus jenen beiden Versuchsjahren und auch Vergleichsstudien zeigen (Diekmann & Fischbeck 2005; Weber et al. 2008), können ähnlich hohe Erträge über verschiedene Relationen der einzelnen Komponenten zueinander erzielt werden. Somit verfügen Weizenpflanzen über die Fähigkeit, Einbußen bei einer der ertragsbildenden Komponenten durch höhere Werte bei einer anderen Komponente auszugleichen.

Eine von Wiesler (1997) beschriebene höhere Ährenausbildung nach einer NH_4^+ -Düngung (analog zu HS+UI+NI) gegenüber einer NO_3^- -Düngung (analog zum KAS) konnte in 2013/2014 statistisch belegt werden. In den beiden nachfolgenden Versuchsjahren zeigten beiden N-Varianten vergleichbare Werte bei jenem Parameter. Für die in 2014/2015 ermittelten geringsten Werte aller untersuchten Ertragskomponenten innerhalb der drei Versuchsjahre sind hauptsächlich die fehlenden Niederschläge im Frühjahr und Sommer 2015 und die damit verbundene Trockenheit ursächlich (Balla et al. 2011). Verglichen mit den etwas feuchteren Versuchsjahren 2013/2014 und 2015/2016 kompensierte die ungedüngte Kontrolle die Einbußen quantitativ am besten. Dies könnte auf die geringere Anzahl an ährentragender Halme zurückzuführen sein. Untersuchungen haben gezeigt, dass bei starker Trockenheit eine reduzierte Anzahl an Trieben den Bodenwasserhaushalt schont und schlussendlich die Erträge erhöht (Allard et al. 2013).

5.3.3 Ertrag und Stickstoffeffizienz

Das Ertragspotential des Bodens wurde durch sehr hohe Kornerträge von über 130 dt ha⁻¹ bei beiden N-Düngervarianten im ersten und dritten Versuchsjahr erkennbar. Diese Werte lagen damit deutlich über den Erträgen mehrerer Feldversuche in Deutschland mit stellenweise höheren N-Applikationsmengen (Sieling et al. 2005; Erekul & Köhn 2006; Prey et al. 2019). Allerdings sind die Ergebnisse von HS+UI+NI und KAS darin zu relativieren, dass in allen drei Versuchsjahren stets

180 kg N ha⁻¹ einheitlich und ohne Bezug auf die Düngeverordnung appliziert wurden. Dementsprechend blieben Zu- und Abschläge unberücksichtigt, welche u. a. für das Ertragsniveau des Standortes, die Vorfrucht sowie den N_{min}- und Humusgehalt notwendig gewesen wären (Düngeverordnung 2017). Beim Vergleich beider N-Düngervarianten mit der Kontrolle wird dennoch klar erkennbar, dass eine N-Düngung in Jahren, die nicht durch extreme Trockenheit geprägt sind, das Pflanzenwachstum, den Ertrag und auch die Qualität markant positiv beeinflussen kann.

Anhand der vorliegenden Ergebnisse konnte nachgewiesen werden, dass weder die N-Düngerform noch die damit einhergehende Düngestrategie einen Einfluss auf den Ertrag, das N-Saldo, den N-Entzug und die NUE von Winterweizen unter den gegebenen Feldbedingungen am Standort Merbitz haben. Auch auf die Verteilung des aufgenommenen Stickstoffs innerhalb der oberirdischen Pflanzenteile (NHI) sowie den HI generell konnten keine markanten Effekte festgestellt werden. Angesichts höhere Stroherträge bei KAS waren der HI und NHI von HS+UI+NI etwas höher. Dessen ungeachtet ist der Einfluss der Wasserversorgung auf die Ergebnisse der drei Versuchsjahre hervorzuheben. Deutlich unterdurchschnittliche Niederschlagsmengen in den Monaten Februar bis Juni im Jahr 2015 und dem damit einhergehenden Trockenstress schränkten das Wachstum der Weizenpflanzen markant ein. Dies äußerte sich in mehr als einer Halbierung der Kornerträge beider N-Düngervarianten im Vergleich zu den Hohertragsjahren 2013/2014 und 2015/2016. Der Ertragsabfall wurde auch bei der ungedüngten Kontrolle, jedoch in einem geringeren Ausmaß, erkennbar. Daher lagen die Erträge aller drei Varianten in 2014/2015 nahezu auf einem Niveau. Die zum BBCH 65 erhobenen BWG zeigen, dass mit steigenden Erträgen der Wasserverbrauch der Pflanzen zunimmt und zu einer stärkeren Abnahme des BWG führt. Während im ersten und dritten Versuchsjahr bei beiden N-Düngervarianten der BWG zur Blüte geringer als bei der Kontrolle war, lag jener Wert aller drei Prüfglieder in 2014/2015 bei nahezu einheitlichen Erträge ebenfalls auf einem Niveau.

Die Trockenheit in 2014/2015 verursachte bei den Pflanzen eine frühere Abreife mit einer kürzeren Reproduktionsphase (Hlaváčová et al. 2018) und führte letztlich zu den beschriebenen Ertragseinbußen. Damit verbunden sind veränderte Assimilations- und Translokationsprozesse von Kohlenhydraten und Aminosäuren während der Kornfüllung, die, wie im Trockenjahr 2015 ersichtlich, zu steigenden RPG führen (Zörb et al. 2017). Aufgrund der geringen Erträge trotz einer Applikationsmenge von 180 kg N ha⁻¹ lagen die N-Salden beider N-Düngervarianten mit knapp 60 kg N ha⁻¹ über dem Optimalbereich von 0 bis 25 kg N ha⁻¹ (Hülsbergen 2003). Dementgegen waren die N-Salden von KAS und HS+UI+NI in den beiden anderen Versuchsjahren negativ. Angesichts des Verzichts auf eine N-Düngung in der Kontrolle waren die N-Salden bei jener Variante in allen drei Versuchsjahren, in Abhängigkeit vom Ertrag und der Qualität, stark negativ. Langfristig würde somit der N-Vorrat im Boden abgereichert und letztlich die Ertragsfähigkeit des Standortes reduziert werden (Hülsbergen 2003). Die N-Salden spiegelten sich zudem in der NUE wieder.

Demnach gingen die N-Überschüsse in 2014/2015 mit der geringsten NUE von jeweils lediglich 50% einher. Gemittelt über alle drei Versuchsjahre betrug die NUE beider N-Düngervarianten fast 70% und lag damit über den Werten von Winterweizen nordeuropäischer Standorte, welche mit 65% angegeben sind (Gaju et al. 2011). Die NUE der Kontrolle schwankte in den drei Versuchsjahren zwischen 93 und 149% und lag damit deutlich über den Werten von KAS und HS+UI+NI. Die negative Wirkung von Wassermangel auf den Kornertrag, das N-Saldo sowie die NUE nach einer N-Düngung bestätigen die Ergebnisse von Guardia et al. (2018) unter mediterranen Bedingungen mit Weizen. Nahezu einheitliche Kornerträge aller Varianten in 2014/2015 zeigen eindrucksvoll, dass der applizierte Stickstoff nur in Anteilen von den Pflanzen aufgenommen werden konnte und unwesentlich zu einem Ertragszuwachs führte. Um die aufgenommene N-Düngermenge exakt zu quantifizieren, hätte der N-Dünger mit ^{15}N -Isotopen markiert werden müssen. Somit wäre eine Abtrennung zwischen dem Dünger-N vom bodenbürtigen-N möglich gewesen (Barraclough et al. 2010). Zudem wäre die Bestimmung des N_{\min} nach der Ernte hilfreich gewesen.

Verstärkt wurde der Trockenstress in 2014/2015 mutmaßlich durch eine Steinschicht in ca. 50 cm Bodentiefe, welche den Eindringungswiderstand und folglich das Pflanzenwurzelwachstum erschwerte. Dieser Umstand wiederum hat zu einer starken Akkumulation der Wurzeln in den oberen 40 cm des Bodens geführt (Lipiec et al. 2003) und wird durch durchgängig geringere β -Werten in 2014/2015 als in den beiden Vergleichsjahren verdeutlicht (Abbildung 4.3-1). Die fehlenden Wurzeln in der Bodentiefe 60 bis 80 cm könnten eine Erklärung für die sehr geringen Erträge in 2014/2015 sein. Tiefreichende Wurzeln können speziell bei Trockenheit die Wasserverfügbarkeit markant erhöhen und somit für stabilere Erträge sorgen (Palta et al. 2011).

Die Qualitätsanforderungen an die Güteklasse E-Weizen mit einem RPG von 14% erfüllten beide N-gedüngten Prüfglieder nur im Trockenjahr 2014/2015 und KAS in 2013/2014. Eine späte N-Gabe wie bei KAS kann die Qualität der Ernte absichern und unter günstigen Bedingungen den RPG steigern. Durch ausbleibenden Niederschlag im späten Frühling sowie frühen Sommer unterliegt eine Qualitätsgabe allerdings der steigenden Gefahr, nicht mehr gelöst werden zu können um in den Boden zu gelangen. Letzteres würde nicht nur zu Ertragseinbußen und schlechten Qualitäten führen, da die Pflanzen in Summe weniger N erhalten haben, sondern insbesondere das N-Saldo des Anwenders belasten. Daher kann unter den gegebenen Witterungsbedingungen und strenger werdenden Umweltauflagen (Düngeverordnung 2017) die Anwendung von stabilisierten N-Düngern in Verbindung mit zeitigen Applikationsterminen an Bedeutung gewinnen.

Wie bereits in den vorangestellten Kapiteln 5.2.2 und 5.3.1 beschrieben, wurde die Wirkung des NI am Versuchsstandort nicht vollständig sichtbar. Mehrere Studien zeigen, dass der Effekt einer stabilisierten N-Düngung auf den Ertrag und die NUE auf sandigen Böden mit einer geringen Bodenwertzahl stärker ist als auf Hohertragsstandorten mit einer feinen Bodentextur und hoher Bodenwertzahl (z. B. Knittel et al. 2007, Abalos et al. 2014). Ungeachtet der Wirkung einer

NH_4^+ -basierte N-Düngung auf Ertrag, Qualität und NUE kann eine Mischernährung wie bei HS+UI+NI die Aufnahme von Mikronährstoffen und deren Translokation in das Korn steigern (Barunawati et al. 2013). Hydrokulturversuche mit Weizen haben gezeigt, dass NH_4^+ -ernährte Pflanzen die Nährstoffe verstärkt in die oberirdische Biomasse translokalisieren, während NO_3^- -ernährte Pflanzen mehr Nährstoffe in den Wurzeln einlagern (Carlisle et al. 2012).

Die Ergebnisse zeigen auch, dass insbesondere durch den Einsatz eines NI die Anzahl der Gaben reduziert werden kann ohne der Gefahr von Ertragseinbußen zu unterliegen. Dies konnte bereits in zahlreichen Studien nachgewiesen werden und wurde von Hu et al. (2014) zusammengefasst. Dadurch vergrößert sich wiederum die zeitliche Flexibilität im Rahmen der Ausbringung des Düngers bei zeitgleicher Risikoreduktion gegenüber Starkniederschlägen oder einer langen Frühjahrstrockenheit. Durch die verlängerte NH_4^+ -Phase nimmt bei gleichzeitiger Absicherung der Erträge die Gefahr von NO_3^- -Austrägen in das Grundwasser ab (Díez López & Hernaiz 2008). Außerdem wird durch die geringere Anzahl notwendiger Überfahrten sowohl der Landwirt finanziell entlastet und Arbeitsspitzen im Frühjahr abgefedert als auch die Bodenverdichtung verringert (Hu et al. 2014).

Der Verzicht auf eine Qualitätsgabe zu Beginn des Ähren- und Rispenschiebens (BBCH 51) hatte keine signifikanten Auswirkungen auf den RPG der Weizenkörner. Somit kann festgehalten werden, dass mit einer zweigeteilten stabilisierten HS-Düngung zu Vegetationsbeginn und zum BBCH 37 vergleichbare Erträge und Qualitäten erreicht werden können wie bei einer dreigeteilten Düngung mit KAS. Trotz der zeitigen zweiten Gabe zum Ende des Schossens konnte bei der Düngung von HS+UI+NI die N-Versorgung der Pflanzen bis zur Reife sichergestellt werden. Eine vorgezogene zweite HS-Gabe mit DMPP als NI zu Beginn des Schossens (BBCH 31) erzielte in zwei einjährigen Feldversuchen mit Winterweizen ähnliche Kornerträge wie eine mehrfach-geteilte KAS-Düngung (Weber et al. 2008). Allerdings fielen in diesem Fall die RPG der stabilisierten HS-Variante unter das Niveau von KAS ab. Die beiden Studien aus Süddeutschland von Weber et al. (2008) und Schulz et al. (2015) bestätigen, dass die N-Düngerform und die Düngestrategie bei gleicher N-Applikationsmenge unter praxisnahen Feldbedingungen lediglich zu geringfügigen und meist nicht quantifizierbaren Abweichungen in den Erträgen führt.

5.4 Methodische Grenzen

5.4.1 N_{\min} -Analyse im Feld

Im Rahmen der N_{\min} -Beprbung sollte geprüft werden, inwieweit sich ein KAS-Dünger und ein mit UI und NI stabilisierter HS-Dünger im Hinblick auf die NO_3^- -N- und NH_4^+ -N-Konzentration im Boden unter praxisnahen Feldbedingungen unterscheiden. Anhand von teilweise signifikant höheren NH_4^+ -N-Konzentrationen bei HS+UI+NI konnte temporär die hemmende Wirkung des NI auf die Nitrifikation nachgewiesen werden. Eine zusätzliche Analyse der Bodenlösung hätte, wie bereits

weiter oben beschrieben, größere Unterschiede zwischen den NH_4^+ -N-Konzentrationen von KAS und HS+UI+NI gezeigt (Kirschke et al. 2019). Erschwerend kam hinzu, dass die Voraussetzungen für die Weizenpflanzen bezüglich des N_{\min} im Boden zu Vegetationsbeginn im späten Winter respektive frühen Frühjahr in den drei Versuchsjahren stark differenzierten (Abbildung 4.1-2). Zwischen dem geringsten zu diesem Zeitpunkt erfassten N_{\min} -Gehalt in 2014/2015 und dem höchsten Wert in 2015/2016 lagen mehr als 50 kg N ha^{-1} . Diese Abweichungen wirkten sich nicht nur auf die Pflanzenentwicklung während der Bestockungsphase aus, sondern nahmen ebenso Einfluss auf die Erzeugung einer NO_3^- -betonten (KAS) bzw. NH_4^+ -basierten N-Ernährung (HS+UI+NI). Abweichende N_{\min} -Gehalte sind insofern relevant, da sich mit zunehmendem N im Boden die Effizienz des NI verringert und somit die NH_4^+ -Phase verkürzt wird bzw. weniger stark ausgeprägt ist (McGeough et al. 2016).

Durch die zufällige Beprobung an drei Punkten je Termin und je Wiederholung sowie der Erzeugung einer Mischprobe der einzelnen Tiefenbereiche wurde ein guter Kompromiss zwischen der Handhabbarkeit der Bodenprobenentnahme und der Repräsentativität der Proben gefunden. Angesichts der weitgefassten Unterteilung der Bodenproben in 30 cm Segmente wurden möglicherweise kleinräumige Effekte, insbesondere in den oberen 15 cm des Bodens, durch die zusätzliche Bodenmenge der darunterliegenden 15 cm verzerrt. Dies ist vor allem bei geringer Bodenfeuchte und fehlenden Niederschläge von Relevanz, da sich die Düngergranalien unter jenen Bedingungen schlecht auflösen und der Stickstoff lediglich in die obersten Bereiche des Ap-Horizonts eindringt. Eine ausbleibende vertikale Verlagerung des N in tiefere Bodenschichten wurde in unterschiedlicher Ausprägung in allen drei Versuchsjahren ersichtlich (Abbildung 4.1-2) und ist auf unterdurchschnittliche Niederschlagsmengen vom Februar bis April sowie ein Niederschlagsdefizit aus den Wintermonaten zurückzuführen. In einem Gülleinjektionsversuch mit Mais wiesen Westerschulte et al. (2017) in zwei aufeinanderfolgenden Feldversuchsjahren eindrucksvoll den Einfluss der Niederschlagsmenge auf die vertikale N_{\min} -Verteilung und N-Dynamik nach. Hierbei führte eine begrenzte Wasserverfügbarkeit im Boden einerseits zu einer stärkeren Akkumulation des N_{\min} in der Ackerkrume und andererseits zu deutlich höheren N_{\min} -Gehalten im gesamten Vegetationsverlauf. Letzteres wurde in den durchgeführten Feldversuchen in Merbitz vor allem in die ersten beiden Versuchsjahre zur zweiten Beprobung ersichtlich. Die kumulierten N_{\min} -Gehalte (0–60 cm) waren zu diesem Zeitpunkt in beiden Versuchsjahren etwa doppelt so hoch wie in 2015/2016 zum gleichen Termin. Die differenzierten Niederschlagsmengen in den Monaten Februar bis April spiegelten sich in den BWG der Ackerkrume zum ersten Beprobungstermin wider und unterstrichen den Einfluss der Bodenfeuchte auf die N_{\min} -Dynamik im Frühjahr.

Die drei Zeitpunkte zur N_{\min} -Probenentnahme waren an den Applikationsterminen der beiden N-Dünger ausgerichtet. Damit sollte sowohl die Eigenart der N-Dünger und die damit

einhergehenden Düngestrategien erfasst werden als auch eine Vergleichbarkeit der drei Versuchsjahre hergestellt werden. Die Repräsentativität der quantifizierten N_{\min} -Gehalte kann anhand der Werte beider N-Düngervarianten zur zweiten und dritten Beprobung eingeschätzt werden, da sich zu jenem beiden Zeitpunkten die applizierte N-Düngermenge von KAS und HS+UI+NI unterschieden. In den meisten Fällen zeigten sich die Abweichungen der N-Applikationsmengen auch im N_{\min} (Abbildung 4.1-2) und unterstreichen somit die Eignung der Methode. Allerdings lässt sich anhand der wenigen Entnahmen lediglich eine Tendenz darstellen. Unterdessen wären für eine Analyse der N-Dynamik, mit Abschnitten hoher Mineralisationsraten im Boden und hoher N-Aufnahmen der Pflanzen, deutlich kürzere Abstände zwischen den Beprobungen notwendig gewesen. Dies gilt nicht nur für den N_{\min} -Gehalt generell, sondern insbesondere für das Verhältnis der beiden N-Formen NO_3^- und NH_4^+ zueinander. Sowohl die Wahl des Düngers als auch diverse abiotische Faktoren beeinflussen die Relation vom NO_3^- und NH_4^+ zueinander markant (Robertson & Groffman 2015). Bei Entnahmen untermittelbar oder nur wenige Tage nach der Düngung besteht die Gefahr einer ungleichmäßigen Verteilung des N-Düngers im Oberboden. Damit hängt der N_{\min} -Gehalt stark von der Wahl der Einstichstelle ab und kann, wie bei HS+UI+NI zum dritten Termin in 2013/2014 ersichtlich, die Ergebnisse stark verzerren. Speziell unter trockenen Witterungsbedingungen liegen die Düngergranalien mehrere Tage auf der Bodenoberfläche oder sind nicht vollständig aufgelöst, sodass der Stickstoff lediglich unmittelbar unterhalb der Granalien in den Boden eindringt. Wird bei der Beprobung jene Stelle zufällig beprobt, sind die Werte deutlich höher als in den umliegenden Bereichen und verzerren den Effekt der N-Düngung.

5.4.2 Wurzeluntersuchung

5.4.2.1 Allgemein

Zur Bestimmung der Durchwurzelung des Bodens im Feld wurden die destruktive Bohrkernmethode mittels Bohrkern sowie das nicht destruktive Verfahren mit Minirhizontroröhren gewählt. Damit standen zwei verschiedene Herangehensweise zur Verfügung, mit denen die Wirkung der N-Düngerform sowie N-Versorgung auf die Wurzelentwicklung von Winterweizen untersucht werden konnten. In der Literatur wird empfohlen, die Ergebnisse aus der Minirhizontronmethode mit denen einer destruktiven Verfahrensweise, wie der Bohrkernmethode, zu validieren (Heeraman & Juma 1993). Mehrere Arbeiten haben eine hohe Korrelation zwischen den Werten aus beiden Methoden festgestellt, wenngleich große Abweichungen zwischen den Kulturen und Studien bestehen (zusammengefasst von Rewald & Ephrath 2013). Die differenzierten Berichte sind möglicherweise das Ergebnis zahlreicher Faktoren, die beim Vergleich verschiedener Studien zu berücksichtigen sind und zu falschen Schlussfolgerungen führen können. Dazu zählen beispielsweise die Kultur, der Bodentyp und die -dichte, der Einbauwinkel der Röhren und die Installationstechnik sowie die Wiederholungszahl (Rewald & Ephrath 2013). Zudem können heterogene Bodenstrukturen die Wurzelmorphologie und -architektur markant beeinflussen.

Demnach ist bei Wurzeluntersuchungen eine sehr hohe Anzahl an Wiederholungen notwendig, welche sich flächenbezogen an jener für die Erhebung oberirdischer Parameter orientieren sollte (Rich & Watt 2013). Um beispielsweise mit einer Wahrscheinlichkeit von 90% signifikante Unterschiede zwischen den Prüfgliedern feststellen zu können, sind bei einem Konfidenzintervall von 10% zwischen 15 und 20 Bohrkernproben (10 cm Durchmesser) pro Variante erforderlich. Für ein Konfidenzintervall von 5% würde die Wiederholungszahl sogar auf 60 bis 90 ansteigen (Gregory 2007). Angesichts des hohen zeitlichen Aufwands und der hohen räumlichen Inanspruchnahme beider Untersuchungsmethoden lag in der vorliegenden Studie die Anzahl an biologischen Wiederholungen je Termin mit vier deutlich unter den Empfehlungen der Literatur, entsprach jedoch der gängigen Praxis in Feldstudien (z. B. Thorup-Kristensen et al. 2009; Rich & Watt 2013; Herbrich et al. 2018).

Bei der Anzahl und Auswahl der Beprobungstermine wurde ebenfalls ein Kompromiss zwischen der Handhabbarkeit und der Repräsentativität, hinsichtlich der Wirkung einer NH_4^+ - und NO_3^- -betonten N-Düngung auf die Wurzelentwicklung gewählt. Mit der Wahl der drei Termine sollte einerseits ein potentieller Effekt der einzelnen N-Düngerformen und Düngestrategien quantifiziert werden und andererseits mit der Beprobung zum BBCH 65 die maximale Wurzelausdehnung der Pflanzen erfasst werden. Im Hinblick auf die Wirkungsdauer des NI und der damit einhergehenden Erzeugung einer NH_4^+ -basierten N-Ernährung war der zweite Termin zur Wurzeluntersuchung mutmaßlich zu dicht an der zweiten Applikation von HS+UI+NI gewählt. Zwischen beiden Terminen lagen in allen drei Versuchsjahren lediglich wenige Tage. Bei einer um etwa zwei Wochen späteren Analyse unmittelbar vor der dritten KAS-Gabe zur Mitte des Ährenswellens (BBCH 45) wären möglicherweise charakteristischere Unterschiede in der Wurzelentwicklung zwischen beiden N-Ernährungsformen ersichtlich gewesen. Dabei hätten sich möglicherweise die zeitlich begrenzten Unterschiede zwischen beiden N-Düngerformen wiederum überlagert.

Analog zum oberirdischen Wachstum und den Erträgen (Olfs et al. 2005) gibt es auch den Wurzeln Hinweise für ein optimales N-Niveau, ab welchem das Wachstum nicht weiter gesteigert wird bzw. sogar abnimmt. Dies haben einige mehrjährige Feldversuche mit Weizen nachgewiesen (Svoboda & Haberle 2006; Rasmussen et al. 2015). Angesichts der hohen N_{min} -Gehalte zu Vegetationsbeginn im ersten und insbesondere im dritten Versuchsjahr sowie der jeweils zusätzlich applizierten N-Menge von 180 kg ha^{-1} wurde möglicherweise in beiden Düngervarianten das optimale N-Niveau für die Wurzelentwicklung überschritten. Bei etwas geringeren N-Applikationsmengen wären die Unterschiede in der WLD zwischen der Kontrolle und beiden N-Düngervarianten zum BBCH 65 womöglich noch ausgeprägter gewesen. In diesem Zusammenhang sind auch die bereits zum BBCH 37 in 2014/2015 teils signifikant höheren WLD bei den N-Varianten gegenüber der Kontrolle zu begründen. In jenem Jahr waren die N_{min} -Gehalte am geringsten, sodass die gedüngten Pflanzen mutmaßlich bis zum Schossen unter einer nahezu

optimalen N-Versorgung für die Wurzelentwicklung wuchsen. Folglich entwickelten diese Pflanzen ein ausgedehnteres Wurzelsystem als die ungedüngten Pflanzen.

5.4.2.2 Bohrkernmethode

Anhand der Bohrkernmethode erhält der Beobachter bis zu einer bestimmten Tiefe zu einem definierten Zeitpunkt einen Einblick in die tatsächliche Durchwurzelung des Bodens. Darin besteht gleichzeitig der Nachteil dieser destruktiven Methode, da jener Abschnitt des Bodens nur einmal untersucht werden kann. Wie bereits von Schuurman & Goedewaagen (1971) berichtet und in der vorliegenden Studie praktiziert, kann die Wurzelndynamik an einem Standort über die periodische Entnahme von Bohrkernen ermittelt werden. Dabei sollten zu jedem Termin die Proben sowohl in der Reihe als auch zwischen den Reihen gezogen (do Rosário et al. 2000) und die Ergebnisse anschließend gemittelt werden (Ford et al. 2006). Aufgrund des hohen Zeitaufwandes der Methode wurde diese Empfehlung über die drei Versuchsjahre verteilt. Demnach fanden die Untersuchungen in den ersten beiden Versuchsjahren zwischen zwei Reihen und in 2015/2016 in der Reihe statt. Dieser Wechsel des Beprobungsbereiches spiegelte sich in den Ergebnissen der Wurzelparameter insofern wieder, dass die Durchwurzelung in der Reihe insbesondere zum BBCH 37 und 65 in allen Tiefen höher war als zwischen den Reihen. Wenngleich die Auswahl der Einstichstelle möglichst objektiv erfolgte, könnten insbesondere die Ergebnisse aus 2015/2016 durch die individuelle Entwicklung einer Pflanze beeinflusst worden sein. Demgegenüber stehen jedoch vergleichbare Standardfehler der WLD aller drei Versuchsjahre, welche generell gering waren und daher auf eine hohe Repräsentativität der Ergebnisse schließen lassen. Darüber hinaus zeigen die Untersuchungen von White & Kirkegaard (2010) mit Weizen, dass die WLD im Feld unterhalb der Pflanze nicht zwangsläufig signifikant höher sein muss als zwischen zwei Reihen. Dementgegen stehen die Ergebnisse von Qin et al. (2004), worin zur Ernte speziell in den ersten 5 cm des Bodens in der Reihe höhere WLD von ca. 6 cm cm^{-3} quantifiziert wurden. Ab einer Bodentiefe von 15 cm war in jener Studie die räumliche Wurzelverteilung direkt unter den Weizenpflanzen und zwischen zwei Reihen einheitlich.

Der Einfluss des Beprobungsbereiches wirkte sich in der vorliegenden Studie nicht nur auf die WLD sondern auch auf weitere wurzelmorphologische Parameter wie die SWL aus. Im Ap-Horizont waren die SWL innerhalb einer Reihe (2015/2016) deutlich kleiner als in den zwei Versuchsjahren, bei denen die Beprobung zwischen zwei Pflanzenreihen erfolgte. Zurückzuführen sind die kleineren SWL auf die im Durchmesser dickeren Adventivwurzeln mit einem niedrigeren WL:WTM-Verhältnis (= SWL), welche bei der Entnahme innerhalb einer Reihe verstärkt erfasst wurden. Auf die SWL in den tieferen Bodensegmenten hatte die Wahl der Beprobungsbereiches keinen Effekt.

Die Grenzen der Bohrkernentnahme wurden in den ersten beiden Versuchsjahren zur Entnahme zum BBCH 65 ersichtlich. Aufgrund sehr trockener Bodenverhältnisse konnten die Bodenproben zu

diesen Terminen bis zu einer Tiefe von lediglich 40 cm entnommen werden (2013/2014) bzw. war in 2014/2015 keine Beprobung möglich. In jenem Trockenjahr 2014/2015 nahm die WLD speziell im Ap-Horizont bereits während des Schossens leicht ab. Jener Rückgang der WLD in 0 bis 20 cm wurde möglicherweise durch methodische und standortspezifische Artefakte verursacht. Allerdings zeigt es eindeutig, dass der Wassermangel in 2014/2015 bereits Ende April, Anfang Mai die Wurzelentwicklung zu einem frühen Entwicklungsstadium erheblich beeinflusste.

Das Auswaschen und Separieren der Wurzeln von Bodenpartikeln und anderem organischen Material ist der zeitintensivste Abschnitt der Bohrkernmethode. Hierbei blieb der Anteil an Totwurzeln unberücksichtigt. Jene abgestorbenen Pflanzenteile wurden, analog zu anderen den Weizenpflanzen nicht unmittelbar zuzuordnenden Bestandteilen, entfernt und von der Analyse ausgespart. Dies ist insofern relevant, da das Verhältnis von vitalen zu toten Wurzeln einer hohen Dynamik unterliegt und die Mortalität von Wurzeln stark von abiotischen Einflüssen wie der Verfügbarkeit von Nährstoffen und Wasser abhängt (Gwenzi et al. 2011). Die Wurzeln der Kontrolle waren zum BBCH 65 mutmaßlich bereits stärker in die Seneszenz übergegangen als jene der gedüngten Pflanzen, wodurch sich der Unterschied zwischen den WLD der gedüngten und ungedüngten Varianten zu jenem Entwicklungsstadium nochmals verstärkte. Dessen ungeachtet können auch bei sorgfältiger Verfahrensweise 20 bis 40% der Wurzelrockenmasse während des Auswaschens verloren gehen und letztlich zu einer Unterschätzung der Durchwurzelung führen (van Noordwijk & Floris 1979). Der Verlustanteil hängt in erster Linie von der Maschenweite des verwendeten Siebes ab. Eine Verringerung der Maschenweite von 0,5 mm auf 0,2 mm erhöhte in den Untersuchungen von Munoz-Romero et al. (2010) die Wurzelbiomasse um etwa 29%. Dies ist v. a. auf die zunehmende Anzahl an Feinwurzeln zurückzuführen (Judd et al. 2015). Ein feineres Sieb würde nicht nur die aufgefangene Wurzelmenge erhöhen, sondern vielmehr zu einer Zunahme an Bodenpartikeln im Sieb führen und einen deutlichen Mehraufwand bei der manuellen Sortierung bedeuten (Metcalf et al. 2007). Deshalb wurde in der vorliegenden Studie mit einem 0,63 mm Sieb ein Kompromiss zwischen einer möglichst hohen Genauigkeit und handhabbaren Praktikabilität gewählt. Gestützt wird diese Herangehensweise u. a. von den Arbeiten um Nakhforoosh et al. (2014) und Perkins et al. (2014), in deren Feldversuchen mit Weizen vergleichbare und stellenweise Siebe mit einer größeren Maschenweite verwendet wurden.

Einige Untersuchungen mit verschiedenen Sieben haben gezeigt, dass die wurzelmorphologische Parameter WD und WL besonders sensitiv auf die Wahl des Siebes reagieren. Mit feiner werdender Maschenweite des Siebes nimmt die WL zu und der MWD ab (Amato & Pardo 1994). Dies ist beim Vergleich von Ergebnissen verschiedener Studien relevant, sollte bei der Gegenüberstellung der Ergebnisse innerhalb der Studie jedoch unbedeutend sein. Ebenso könnte das Einfrieren der Bodenmonolithe die Oberfläche der darin enthaltenen Wurzeln vergrößert und einzelne wurzelmorphologische Parameter, wie WD und WV, beeinflusst haben. Allerdings wurde diese

Herangehensweise für alle Proben einheitlich praktiziert, sodass die Beantwortung der Versuchsfragestellung davon unbeeinträchtigt bleibt.

Die ausgewaschenen und sortierten Wurzeln wurden in einem 1:1-Gemisch aus Ethanol und destilliertem Wasser bei 5 °C konserviert. Untersuchungen mit Weidelgras- und Kleewurzeln (70% Ethanol, 30% Wasser) zeigen, dass sich insbesondere innerhalb der ersten sieben bis 14 Tage der Lagerung die WTM um etwa $\frac{1}{4}$ verringert (Crush et al. 2010). Im weiteren Lagerungsprozess kam es hierbei zu keinem weiteren Verlust der WTM. Angesichts einer Lagerzeit von mindestens einem Monat kann ein Einfluss der Konservierung auf die Abweichungen zwischen den Prüfglieder innerhalb der vorliegenden Arbeit ausgeschlossen werden.

Die Bestimmung morphologischer Wurzelparameter mittels der Software WinRHIZO[®] ist sowohl bei Gefäß- (z. B. Blaser et al. 2020) als auch Feldversuchen (z. B. Nakhforoosh et al. 2014; Perkons et al. 2014) eine weit verbreitete Methode. Wie von Bouma et al. (2000) publiziert, haben Änderungen von relevanten Softwareparametern, wie Schwellenwert, Helligkeit und Auflösung, einen entscheidenden Einfluss auf die WL sowie den WD und folglich auf alle sich daraus ergebenden wurzelmorphologischen Größen. Darüber hinaus kann die Anordnung und Menge der Wurzeln auf dem Objektträger die quantifizierten Werte signifikant beeinflussen und Überlappungen der Wurzeln zur Unterschätzung der WL und Überschätzung des MWD führen (Wang & Zhang 2009). Zur Minimierung dessen wurden die Wurzeln äußerst sorgfältig und gut verteilt auf dem Objektträger platziert und mit einem Scanvorgang maximal 800 bis 1.000 cm WL erfasst.

Eine weitere Schwierigkeit bei der Quantifizierung wurzelmorphologischer Parameter stellen die Wurzelhaare dar. Aufgrund ihrer Konfirmation – sehr dünn und dazu verhältnismäßig lang – ist deren exakte Erfassung und Quantifizierung problematisch und kann zu Verzerrungen der Ergebnisse führen. Zur Vorbeugung dessen haben u. a. Blaser et al. (2020) in ihren Untersuchungen die Wurzelsegmente mit Durchmessern unter 0,04 mm verworfen und von der Analyse ausgeschlossen. Eine entsprechende Bearbeitung der quantifizierten Werte aus WinRHIZO[®] wurde in der vorliegenden Studie nicht vorgenommen, sodass einzelne Wurzelparameter, wie WD und SWL dadurch möglicherweise beeinflusst wurden.

5.4.2.3 Core-break Methode

Die im dritten Versuchsjahr zusätzlich etablierte Core-break Methode stellte im Vergleich zum Auswaschen und Digitalisieren der Wurzeln eine deutlich schnellere Herangehensweise zur Bestimmung der Durchwurzelung in Bodenmonolithen dar. Anhand dieser Methode erhielt der Beobachter einen schnellen Überblick über die Wurzelintensität in den einzelnen Tiefensegmenten. Dies belegen mittlere bis hohe Korrelationswerte zwischen der summierten Wurzelanzahl an beiden Bruchseiten und der *via* WinRHIZO[®] erfassten WLD. Analog zu Kücke et al. (1995) bildete die quadratische Gleichung den Zusammenhang zwischen beiden Vergleichsparametern besser ab als

die lineare Funktion, welche zeitweise konträre Verläufe mit negative Regressionskonstanten aufwies. Drew & Saker (1980) verweisen indes auf die Gefahr einer möglichen Überschätzung der tatsächlichen WL durch das Aufsummieren der Werte beider Seiten und verwendeten das arithmetische Mittel als Berechnungsgrundlage. Jene Verfahrensweise wird in der Praxis nur selten angewandt. Zudem kann eine Überschätzung der WL in der vorliegenden Studie insofern ausgeschlossen, da bei zunehmender Wurzelanzahl an den Bruchoberflächen die Durchwurzelung des Bodens durch die Core-break Methode tendenziell unterschätzt wurde (Abbildung 4.3-2).

Unabhängig davon war eine prüfungspezifische Auswertung der Ergebnisse angesichts einer großen Varianz sowie einer inhomogenen Anzahl an Wertepaaren nicht zielführend. Die im Versuchsverlauf abnehmende Bodenfeuchte beeinträchtigte hierbei zunehmend eine exakte und zerstörungsfreie Teilung der Bodenmonolithe. Speziell im oberen Segment des Bohrkernes (0–20 cm) kam die hohe Wurzeldichte als zusätzlicher Faktor erschwerend hinzu, weshalb beispielsweise Wasson et al. (2014) in ihrer Studie die oberen 10 cm bei der Auswertung ausschlossen. Zur Verbesserung der Core-break Methode werden in neueren Studien die Oberflächen der geteilten Bodenmonolithe eingescannt (White & Kirkegaard 2010; Hodgkinson et al. 2017). Dadurch wird nicht nur die Genauigkeit der gezählten Wurzeln erhöht, sondern kann ebenfalls das Wachstumsmuster der Wurzeln, beispielsweise in Poren und Rissen, besser erfasst und dokumentiert werden.

5.4.2.4 Minirhizontrontechnik

Anhand der Minirhizontrontechnik lässt sich präzise ermitteln, bis zu welcher Bodentiefe eine Pflanze bzw. Kultur zu einem definierten Zeitpunkt gewurzelt hat (Herbrich et al. 2018). Ein weiterer Vorteil gegenüber destruktiven Methoden besteht bei den Minirhizontronröhren in der dynamischen Betrachtung eines fest definierten Abschnittes im Boden (Iversen et al. 2012), weshalb diese Herangehensweise insbesondere bei mehrjährigen Kulturen wie Bäumen zielführend ist. Aufgrund des Beobachtungszeitraumes über mehrere Jahre werden einzelne Einflussfaktoren, wie beispielsweise zusätzliche Hohlräume und die Zerstörung der Bodenstruktur, im Laufe der Jahre reduziert respektive ausgeglichen. Dadurch ergibt sich ein realitätsnahes Bild der Wurzelintensität bei verbesserter Nachverfolgung wurzeldynamischer Prozesse (Majdi 1996).

Die Schwierigkeiten beim Einsatz der Minirhizontronmethode unter praxisnahen landwirtschaftlichen Bedingungen wurden in der vorliegenden Studie bereits im ersten Versuchsjahr deutlich. Insbesondere die Auswertung der Bilder war angesichts einer Vielzahl an Wurzeln entlang des Beobachtungsbereichs der Röhren ein sehr zeitintensiver Arbeitsschritt. Eine hierfür in Betracht bezogene Auswertung mittels einer semiautomatisierten Bildanalysesoftware musste aufgrund eines zu geringen farblichen Kontrastes zwischen den Wurzeln und dem mineralischen Boden verworfen werden (Vamerli et al. 2012). Die Ergebnisse aus dem Versuchsjahr 2015/2016 zeigten keinen signifikanten Anstieg der Wurzelintensität über den Versuchszeitraum, da bereits zum ersten

Beprobungstermin (BBCH 32) zahlreiche Wurzeln entlang der Röhren bis in eine Bodentiefe von 75 cm sichtbar waren. Dementgegen beobachteten Herbrich et al. (2018) ebenfalls bei Winterweizen eine dynamische Zunahme der Wurzeln bis zum BBCH 71 bei einer maximalen Durchwurzelung bis in Bodentiefen von 133 bis 143 cm.

Angesichts einer nicht quantifizierbaren dynamischen Wurzelentwicklung, wie aus anderen Arbeiten mit Minirhizontroröhren (Rasmussen et al. 2015; Herbrich et al. 2018) und den Ergebnissen der Bohrkernmethode hervorgeht, wurde auf die zeitintensive Bildauswertung der Versuchsjahre 2013/2014 und 2014/2015 im Rahmen der Minirhizontronmethode verzichtet. Ein potentieller Methodenfehler der line intersect Methode kann anhand zweierlei Sachverhalte ausgeschlossen werden. Einerseits wurde ein sehr hoher Zusammenhang ($r^2=0,972$) zur Software RootSnap! sichergestellt und andererseits ist die line intersect Methode ein gängiges und in internationalen Publikationen häufig eingesetztes Verfahren zur Bestimmung der Wurzelentwicklung mittels Minirhizontroröhren (z. B. Thorup-Kristensen et al. 2009; Rasmussen et al. 2015; Herbrich et al. 2018). Zudem stellt die Beschränkung des Beobachtungsabschnittes auf den oberen, zur Bodenoberfläche gerichteten Bereich eine ebenso etablierte Verfahrensweise dar, welche nicht nur zeitsparend ist sondern vielmehr einer drastischen Überschätzung der Wurzelintensität in tieferen Bodenschichten vorbeugt (Thorup-Kristensen et al. 2009; Rasmussen et al. 2015; Svane et al. 2019).

Die dargestellten Ergebnisse der Minirhizontrontechnik wurden nicht durch die Auswertungsmethode der Bilder, sondern mutmaßlich vielmehr durch die Röhren beeinflusst und gestört. Im Vergleich zur *via* Bohrkernmethode erfassten WLD nahm die Wurzelintensität entlang der Röhren deutlich weniger mit zunehmender Bodentiefe ab. Dies ist u. a. auf eine bessere Durchlüftung an der Grenzfläche zwischen dem Boden und den Röhren, einer günstigeren Temperatur für das Wurzelwachstum sowie einer höheren Feuchtigkeit, durch entlang der Röhren fließendes Kondenswasser, zurückzuführen. Letzteres schränkte zudem die Sichtbarkeit der Wurzeln auf den Röhren und demzufolge auch die Wurzelintensität ein. Ein weiterer möglicher Grund für die Abweichungen zu den Ergebnissen aus der Bohrkernmethode könnte in der Röhre selber liegen, durch welche die natürliche Wuchsausrichtung der Wurzel manipuliert wurde (Rytter & Rytter 2012). Speziell auf den Bildern der unteren Bodenschichten wurde dieser Effekt ersichtlich. Hierbei wuchsen die Wurzeln nach auftreffen auf der Röhre weiter auf dieser entlang (Abbildung 4.3 4). Das zusätzliche Wachstum über eine künstliche Oberfläche führt zu einer Überschätzung des Neulängenwachstums und der Wurzelintensität (Milchunas 2009). Mehrere Vergleiche zwischen den Untersuchungsmethoden Minirhizontroröhre und Bohrkern mit verschiedenen Kulturen legen offen, dass bei dem Ansatz mit Minirhizontroröhre die Durchwurzelung in den oberen Bodenschichten (je nach Kultur bis zu 30 cm) unterschätzt und in tieferen Bodenbereichen überschätzt wird (Heeraman & Juma 1993; Samson & Sinclair 1994; Machado et al. 2003; Gregory 2007). Hohe Korrelationen

zwischen beiden Methoden werden für Bodenschichten tiefer als 20–30 cm beschrieben (Polomski & Kuhn 2002).

Die beschriebenen Einflüsse der Röhren führten, wie in der Feldstudie von Wiesler & Horst (1994) mit Mais, zu starken Divergenzen zwischen den Wiederholungen einer Variante und zu hohen Standardfehlern. Daher werden zur Sicherstellung einer aussagekräftigen Abschätzung in der Literatur mindestens acht Röhren je Wiederholung empfohlen (Johnson et al. 2001). Dem konnte in der vorliegenden Studie aufgrund einer notwendigen Vergrößerung der Parzellen und eines dadurch entstehenden zeitlichen Mehraufwands nicht nachgekommen werden.

Angesichts der o. g. Einschränkungen konnte mittels der Minirhizontrontechnik keine zuverlässige Aussage zur Wirkung einer N-Düngung sowie einer NH_4^+ -betonten N-Versorgung im Vergleich zu einer NO_3^- -basierten N-Ernährung auf die Wurzelentwicklung getroffen werden. Ein ähnliches Fazit kann auch für die Core-break Methode gezogen werden. Allerdings wurden hierbei einerseits die Abweichungen zwischen den einzelnen BBCH-Stadien deutlicher ersichtlich und andererseits erhielt der Beobachter einen schnellen Überblick zur Durchwurzelung in einer definierten Bodentiefe. Trotz des hohen zeitlichen Aufwands stellten die Entnahme der Bodenmonolithe mit anschließender Separation und digitaler Analyse der Wurzeln den geeignetsten Ansatz zur Untersuchung des Wurzelwachstums in der vorliegenden Studie dar. Mittels der Bohrkernmethode konnte nicht nur ein realitätsnahes Bild der Durchwurzelung in Raum und Zeit erstellt werden, sondern eröffnete sich damit zugleich die Möglichkeit weitere Wurzelparameter, wie den MWD und die WGD zu bestimmen.

6 Schlussfolgerung und Ausblick

In der vorliegenden Arbeit sollten die beiden N-Dünger KAS sowie ein doppelt inhibierter HS (HS+UI+NI) hinsichtlich ihrer Auswirkungen auf (I) den N_{\min} -Gehalt des Bodens, getrennt nach NH_4^+ und NO_3^- , (II) die individuelle Wurzelentwicklung, untersucht mittels der destruktiven Bohrkernmethode und der nicht-destruktive Herangehensweise *via* Minirhizotronmethode, sowie (III) die oberirdische vegetative und generative Pflanzenentwicklung von Weizen auf einem Schwarzerde-Standort untersucht werden. Der Schwerpunkt lag insbesondere darauf, inwieweit verschiedene N-Ernährungsformen unter Feldbedingungen erzeugt werden können und sich auf diese Weise auf die ober- und unterirdische Pflanzenentwicklung sowie N-Effizienz auswirken. Eine hemmende Wirkung des eingesetzten NI auf die Aktivität der nitrifizierenden Mikroorganismen im Boden und einer damit verbundenen verzögerten bakteriellen Oxidation von NH_4^+ konnte anhand von höheren NH_4^+ -N-Konzentrationen bei HS+UI+NI gegenüber KAS partiell festgestellt werden. Dementgegen basierten bei KAS die N_{\min} -Gehalte und demnach auch die N-Ernährung der Pflanzen nahezu ausschließlich auf der N-Form NO_3^- . Es zeigte sich, dass lediglich anhand der Bohrkernmethode mit anschließender Analyse mittels WinRHIZO[®] repräsentative Ergebnisse zur Wurzelentwicklung erhoben werden konnten. Dementgegen wurde das Wurzelwachstum durch die eingebauten Minirhizotronröhren, u. a. aufgrund von Hohlräumen zwischen den Röhren und dem Boden, maßgebend beeinflusst, sodass die Minirhizotronmethode zur Beantwortung der Versuchsfragestellung keinen zielführenden Ansatz darstellte. Während eine auf NH_4^+ -basierende N-Düngung das Wurzelwachstum vorwiegend während des Schossens (BBCH 37) förderte, verstärkte eine NO_3^- -betonte N-Düngung die Durchwurzelung zur Blüte (BBCH 65). Dabei waren die Abweichungen auf die oberen 40 cm des Bodens beschränkt. Eindeutige und sich wiederholende Effekte konnten jedoch nicht erfasst werden.

Etwas höhere Stroherträge bei KAS sind ein Indiz dafür, dass durch das NO_3^- das vegetative Pflanzenwachstum stärker angeregt wurde als bei HS+UI+NI. Eine dritte Applikation mit KAS zum BBCH 51, bekannt als Qualitätsgabe, äußerte sich in den ersten zwei Versuchsjahren in geringfügig höheren RPG als bei der stabilisierten HS-Variante. Auf die N-Effizienz und das N-Saldo hatte die Wahl der N-Düngerform keinen Effekt. Dies bedeutet im Umkehrschluss, dass beim Einsatz eines mit einem UI und NI versetzten HS-Düngers vergleichbare Ergebnisse wie mit KAS, bei gleichzeitiger Einsparung einer Überfahrt, erzielt werden. Dadurch können nicht nur Arbeitsspitzen entzerrt, sondern auch Betriebskosten, wie Kraftstoff, Arbeitslohn und Materialverschleiß eingespart werden. Darüber hinaus wird durch die nur zweiteilige Gabe bei NI-Anwendung, inklusive der Möglichkeit des Vorziehens des Düngetermins, der zunehmenden Gefahr trockener Frühjahre entgangen, da zum Applikationszeitpunkt zumeist noch ausreichend Feuchtigkeit im Boden vorhanden ist um die Granalien aufzulösen. Somit kann sich der Stickstoff ausreichend verteilen und von den Pflanzenwurzeln aufgenommen werden.

Anhand der dargestellten Ergebnisse lässt sich schlussfolgernd festhalten, dass sich zwischen einer NH_4^+ - und einer NO_3^- -betonten N-Düngung keine markanten Unterschiede in Bezug auf die Wurzelentwicklung, den Ertrag und die N-Effizienz von Winterweizen unter Feldbedingungen auf einem Schwarzerde-Standort nachweisen lassen. Dies ist mitunter auch der Tatsache geschuldet, dass der Schwarzerde-Standort Merbitz ein hohes N-Nachlieferungsvermögen besitzt und dementsprechend auch größere Mengen an nativem NO_3^- zur Pflanzenernährung bereitstellt. Die Identifizierung N-Spezies-abhängiger Wachstumseffekte wird somit potentiell erschwert. D. h. aufgrund hoher N_{\min} -Gehalte zu Vegetationsbeginn in allen drei Versuchsjahren sowie den allgemein guten Bodeneigenschaften am Standort in Merbitz wurde das Potential der Inhibitoren die N-Transformation zu beeinflussen eventuell nicht vollumfänglich ausgeschöpft. In zukünftigen Untersuchungen zur Wirkung verschiedener N-Düngerformen auf die Zusammensetzung des N_{\min} -Gehaltes im Boden und daraus resultierend auf die ober- und unterirdische Pflanzenentwicklung sollten leichte Standorte mit einem höheren Sandanteil gewählt werden. Dadurch kann die Effizienz des NI gesteigert und die NH_4^+ -betonte Phase über einen längeren Zeitraum gehalten werden. Zudem sollte in Zukunft neben dem Bodenextrakt ebenso die Bodenlösung entnommen und analysiert werden. Die Bodenlösung gibt einen repräsentativen Aufschluss über die für die Pflanzen tatsächlich zur Verfügung stehenden N_{\min} -Formen.

Weiterhin könnten anhand von engermaschigeren Intervallen bei der Beprobung des N_{\min} -Gehaltes im Boden und insbesondere der Pflanzenwurzeln die von einigen Arbeitsgruppen im Labor erfassten Unterschiede zwischen einer NH_4^+ -betonten und einer auf NO_3^- -basierten N-Düngung auch unter Feldbedingungen bestätigt werden. In Bezug auf die Wurzeln sind zusätzliche Untersuchungen jedoch nur dann zielführend, wenn automatische bzw. semiautomatische Wurzelmessmethoden eingesetzt werden oder der Standort einen sehr hohen Sandanteil aufweist und somit das Auswaschen der Wurzeln im Rahmen der Bohrkernmethode deutlich weniger Zeit in Anspruch nimmt. Die Untersuchung an weiteren Kulturpflanzen, wie Mais, könnte zudem neue Erkenntnisse bezüglich der Sensibilität einzelner Kulturen auf eine NH_4^+ - und NO_3^- -betonte N-Ernährung offenbaren.

7 Literatur

- Abalos D., Jeffery S., Sanz-Cobena A., Guardia G., Vallejo A. (2014): Meta-analysis of the effect of urease and nitrification inhibitors on crop productivity and nitrogen use efficiency. *Agriculture, ecosystems & environment* 189:136–144. 10.1016/j.agee.2014.03.036.
- Abbasi M. K., Shah Z., Adams W. A. (2003): Effect of the nitrification inhibitor nitrapyrin on the fate of nitrogen applied to a soil incubated under laboratory conditions. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science* 166(4):513–518.
- Ad-hoc-AG Boden (2005): *Bodenkundliche Kartieranleitung*. KA5. 5. verbesserte und erweiterte Auflage. Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung, Stuttgart.
- Allard V., Martre P., Le Gouis J. (2013): Genetic variability in biomass allocation to roots in wheat is mainly related to crop tillering dynamics and nitrogen status. *European Journal of Agronomy* 46:68–76. 10.1016/j.eja.2012.12.004.
- Amato M., Pardo A. (1994): Root length and biomass losses during sample preparation with different screen mesh sizes. *Plant and Soil* 161(2):299–303.
- Amberger A. (1996): *Pflanzenernährung: Ökologische und physiologische Grundlagen; Dynamik und Stoffwechsel der Nährelemente*. Eugen Ulmer, Stuttgart.
- Andresen M., Dresbøll D. B., Jensen L. S., Magid J., Thorup-Kristensen K. (2016): Cultivar differences in spatial root distribution during early growth in soil, and its relation to nutrient uptake—a study of wheat, onion and lettuce. *Plant and Soil* 408(1):255–270.
- Andrews M., Raven J. A., Lea P. J. (2013): Do plants need nitrate? The mechanisms by which nitrogen form affects plants. *Annals of applied Biology* 163(2):174–199.
- Araya T., Kubo T., Wirén N. von, Takahashi H. (2016): Statistical modeling of nitrogen-dependent modulation of root system architecture in *Arabidopsis thaliana*. *Journal of integrative plant biology* 58(3):254–265.
- Asseng S., Richter C., Wessolek G. (1997): Modelling root growth of wheat as the linkage between crop and soil. *Plant and Soil* 190(2):267–277.
- Atkinson D. (2000): Root characteristics: why and what to measure. In *Root methods*. Springer, S 1–32.
- Atkinson J. A., Pound M. P., Bennett M. J., Wells D. M. (2019): Uncovering the hidden half of plants using new advances in root phenotyping. *Current opinion in biotechnology* 55:1–8. 10.1016/j.copbio.2018.06.002.
- Balasubramanian V., Alves B., Aulakh M., Bekunda M., Cai Z., Drinkwater L., Mugendi D., van Kessel C., Oenema O. (2004): Crop, environmental, and management factors affecting nitrogen use efficiency. *Agriculture and the Nitrogen Cycle*, edited by: Mosier, AR, Syers, JK, and Freney, J., SCOPE 65:19–33.
- Barker A. V., Bryson G. M. (2016): Nitrogen. In *Handbook of plant nutrition*. CRC Press, S 37–66.

- Barracough P. B., Howarth J. R., Jones J., Lopez-Bellido R., Parmar S., Shepherd C. E., Hawkesford M. J. (2010): Nitrogen efficiency of wheat: genotypic and environmental variation and prospects for improvement. *European Journal of Agronomy* 33(1):1–11.
- Barth G., Tucher S. v., Schmidhalter U. (2001): Influence of soil parameters on the effect of 3, 4-dimethylpyrazole-phosphate as a nitrification inhibitor. *Biology and Fertility of Soils* 34(2):98–102.
- Barth G., Tucher S. v., Schmidhalter U. (2008): Effectiveness of 3, 4-dimethylpyrazole phosphate as nitrification inhibitor in soil as influenced by inhibitor concentration, application form, and soil matric potential. *Pedosphere* 18(3):378–385.
- Barth G., Tucher S. von, Schmidhalter U., Otto R., Motavalli P., Ferraz-Almeida R., Meinel Schmiedt Sattolo T., Cantarella H., Vitti G. C. (2019): Performance of nitrification inhibitors with different nitrogen fertilizers and soil textures. *J. Plant Nutr. Soil Sci.* 182(5):694–700. 10.1002/jpln.201800594.
- Barunawati N., Hettwer Giehl R. F., Bauer B., Wirén N. von (2013): The influence of inorganic nitrogen fertilizer forms on micronutrient retranslocation and accumulation in grains of winter wheat. *Frontiers in plant science* 4:320.
- Bates G. H. (1937): A device for the observation of root growth in the soil. *Nature* 139(3527):966–967.
- Beeckman F., Motte H., Beeckman T. (2018): Nitrification in agricultural soils: impact, actors and mitigation. *Current opinion in biotechnology* 50:166–173.
- Benckiser G., Christ E., Herbert T., Weiske A., Blome J., Hardt M. (2013): The nitrification inhibitor 3,4-dimethylpyrazole-phosphat (DMPP) - quantification and effects on soil metabolism. *Plant Soil* 371(1-2):257–266. 10.1007/s11104-013-1664-6.
- Birouste M., Zamora-Ledezma E., Bossard C., Pérez-Ramos I. M., Roumet C. (2014): Measurement of fine root tissue density: A comparison of three methods reveals the potential of root dry matter content. *Plant Soil* 374(1-2):299–313. 10.1007/s11104-013-1874-y.
- Blankenau K., Olf H.-W., Kuhlmann H. (2002): Strategies to Improve the Use Efficiency of Mineral Fertilizer Nitrogen Applied to Winter Wheat. *J Agron Crop Sci* 188(3):146–154. 10.1046/j.1439-037X.2002.00548.x.
- Blaser S. R., Koebernick N., Spott O., Thiel E., Vetterlein D. (2020): Dynamics of localised nitrogen supply and relevance for root growth of *Vicia faba* ('fuego') and *Hordeum vulgare* ('Marthe') in soil. *Scientific reports* 10(1):1–16.
- Blaser, Sebastian R. G. A., Schlüter S., Vetterlein D. (2018): How much is too much?—influence of X-ray dose on root growth of faba bean (*Vicia faba*) and barley (*Hordeum vulgare*). *PLoS one* 13(3).
- Bloom A. J. (1997): Interactions between inorganic nitrogen nutrition and root development. *Zeitschrift für Pflanzenernährung und Bodenkunde* 160(2):253–259.

- Bloom A. J., Frensch J., Taylor A. R. (2006): Influence of inorganic nitrogen and pH on the elongation of maize seminal roots. *Annals of botany* 97(5):867–873.
- Blume H.-P., Brümmer G. W., Horn R., Kandeler E., Kögel-Knabner I., Kretzschmar R., Stahr K., Wilke B.-M., Thiele-Bruhn S., Welp G. (2010): Scheffer/Schachtschabel. *Lehrbuch der Bodenkunde* 16.
- Blumenthal J. M., Baltensperger D. D., Cassman K. G., Mason S. C., Pavlista A. D. (2008): Importance and effect of nitrogen on crop quality and health. In *Nitrogen in the Environment*. Elsevier, S 51–70.
- Böhm W. (1979): *Methods of Studying Root Systems*, Band 33. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg.
- Bouma T. J., Nielsen K. L., Koutstaal B. A. (2000): Sample preparation and scanning protocol for computerised analysis of root length and diameter. *Plant and Soil* 218(1-2):185–196.
- Bouwman A. F., Beusen A. H. W., Lassaletta L., van Apeldoorn D. F., van Grinsven, H J M, Zhang J., Ittersum van M. K. (2017): Lessons from temporal and spatial patterns in global use of N and P fertilizer on cropland. *Scientific reports* 7:40366. 10.1038/srep40366.
- Bouwman A. F., Boumans L. J. M., Batjes N. H. (2002): Modeling global annual N₂O and NO emissions from fertilized fields. *Global Biogeochem. Cycles* 16(4):28-1-28-9. 10.1029/2001GB001812.
- Britto D. T., Kronzucker H. J. (2002): NH₄⁺ toxicity in higher plants: a critical review. *Journal of plant physiology* 159(6):567–584.
- Cabrera M. L., Kissel D. E., Bock B. R. (1991): Urea hydrolysis in soil: Effects of urea concentration and soil pH. *Soil Biology and Biochemistry* 23(12):1121–1124.
- Cameron K. C., Di H. J., Moir J. L. (2013): Nitrogen losses from the soil/plant system: A review. *Ann Appl Biol* 162(2):145–173. 10.1111/aab.12014.
- Cantarella H., Otto R., Soares J. R., Silva, Aijânio Gomes de Brito (2018): Agronomic efficiency of NBPT as a urease inhibitor: A review. *Journal of advanced research* 13:19–27. 10.1016/j.jare.2018.05.008.
- Carlisle E., Myers S. S., Raboy V., Bloom A. J. (2012): The effects of inorganic nitrogen form and CO₂ concentration on wheat yield and nutrient accumulation and distribution. *Frontiers in plant science* 3:195.
- Carvalho P., Foulkes M. J. (2019): Roots and Uptake of Water and Nutrients. *Crop Science*:107–130.
- Cavalli D., Consolati G., Marino P., Bechini L. (2015): Measurement and simulation of soluble, exchangeable, and non-exchangeable ammonium in three soils. *Geoderma* 259:116–125.
- Chen C., Xu F., Zhu J.-R., Wang R.-F., Xu Z.-H., Shu L.-Z., Xu W.-W. (2016): Nitrogen forms affect root growth, photosynthesis, and yield of tomato under alternate partial root-zone irrigation. *J. Plant Nutr. Soil Sci.* 179(1):104–112. 10.1002/jpln.201500179.

- Chen D., Suter H. C., Islam A., Edis R. (2010): Influence of nitrification inhibitors on nitrification and nitrous oxide (N₂O) emission from a clay loam soil fertilized with urea. *Soil Biology and Biochemistry* 42(4):660–664. 10.1016/j.soilbio.2009.12.014.
- Chen G., Guo S., Kronzucker H. J., Shi W. (2013): Nitrogen use efficiency (NUE) in rice links to NH₄⁺ toxicity and futile NH₄⁺ cycling in roots. *Plant and Soil* 369(1):351–363.
- Chen J., Cheng S., Cao W., Zhou X. (1998): Involvement of endogenous plant hormones in the effect of mixed nitrogen source on growth and tillering of wheat. *Journal of Plant Nutrition* 21(1):87–97.
- Chen S., Svane S. F., Thorup-Kristensen K. (2019): Testing deep placement of an ¹⁵N tracer as a method for in situ deep root phenotyping of wheat, barley and ryegrass. *Plant methods* 15:148. 10.1186/s13007-019-0533-6.
- Cormier F., Faure S., Dubreuil P., Heumez E., Beauchêne K., Lafarge S., Praud S., Le Gouis J. (2013): A multi-environmental study of recent breeding progress on nitrogen use efficiency in wheat (*Triticum aestivum* L.). *TAG. Theoretical and applied genetics. Theoretische und angewandte Genetik* 126(12):3035–3048. 10.1007/s00122-013-2191-9.
- Cormier F., Foulkes J., Hirel B., Gouache D., Moëgne-Loccoz Y., Le Gouis J., Ordon F. (2016): Breeding for increased nitrogen-use efficiency: A review for wheat (*T. aestivum* L.). *Plant Breed* 135(3):255–278. 10.1111/pbr.12371.
- Coskun D., Britto D. T., Shi W., Kronzucker H. J. (2017): Nitrogen transformations in modern agriculture and the role of biological nitrification inhibition. *Nature plants* 3:17074. 10.1038/nplants.2017.74.
- Crush J., Ouyang L., Nichols S. (2010): Loss of weight in ryegrass and clover roots preserved in ethanol prior to image analysis for root traits. *Acta Physiologiae Plantarum* 32(3):605–606.
- Crute I. R., Muir J. F. (2011): Improving the productivity and sustainability of terrestrial and aquatic food production systems: future perspectives. *The Journal of Agricultural Science* 149(S1):1–7.
- Dawar K., Zaman M., Rowarth J. S., Blennerhassett J., Turnbull M. H. (2011): Urea hydrolysis and lateral and vertical movement in the soil: Effects of urease inhibitor and irrigation. *Biol Fertil Soils* 47(2):139–146. 10.1007/s00374-010-0515-3.
- Diekmann F., Fischbeck G. (2005): Differences in wheat cultivar response to N supply. I: Differences in grain yield formation. *Journal of Agronomy and Crop Science* 191(5):351–361.
- Diepenbrock W., Ellmer F., Léon J. (2016): *Ackerbau, Pflanzenbau und Pflanzenzüchtung: Grundwissen Bachelor*. UTB.
- Díez López J. A., Hernaiz P. (2008): Effect of a nitrification inhibitor (DMPP) [3,4-dimethylpyrazole phosphate] on nitrate leaching and maize yield during two growing seasons. *Span J Agric Res* 6(2):294. 10.5424/sjar/2008062-320.

- do Rosário M. G., van Noordwijk M., Gaze, SR, Brouwer G., Bona S., Mosca G., Hairiah K. (2000): Auger sampling, ingrowth cores and pinboard methods. In *Root methods*. Springer, S 175–210.
- Dou H., Steffens D. (1995): Recovery of ¹⁵N labelled urea as affected by fixation of ammonium by clay minerals. *Zeitschrift für Pflanzenernährung und Bodenkunde* 158(4):351–354.
- Drew M. C. (1975): Comparison of the effects of a localised supply of phosphate, nitrate, ammonium and potassium on the growth of the seminal root system, and the shoot, in barley. *New Phytologist* 75(3):479–490.
- Drew M. C., Saker L. R. (1980): Assessment of a rapid method, using soil cores, for estimating the amount and distribution of crop roots in the field. *Plant and Soil* 55(2):297–305.
- Duan Y.-F., Kong X.-W., Schramm A., Labouriau R., Eriksen J., Petersen S. O. (2017): Microbial N transformations and N₂O emission after simulated grassland cultivation: effects of the nitrification inhibitor 3, 4-dimethylpyrazole phosphate (DMPP). *Applied and environmental microbiology* 83(1).
- Düngeverordnung (2017): Verordnung über die Anwendung von Düngemitteln, Bodenhilfsstoffen, Kultursubstraten und Pflanzenhilfsmitteln nach den Grundsätzen der guten fachlichen Praxis beim Düngen (Düngeverordnung - DüV). https://www.gesetze-im-internet.de/d_v_2017/D%C3%BCV.pdf. Zuletzt geprüft am 21. Oktober 2020.
- DWD (2012): Mittlere monatliche Temperatur und Niederschlagsmenge für Naundorf in dem Zeitraum von 1981 bis 2010. www.dwd.de. Zuletzt geprüft am 18. November 2019.
- Ereku O., Köhn W. (2006): Effect of weather and soil conditions on yield components and bread-making quality of winter wheat (*Triticum aestivum* L.) and winter Triticale (*Triticosecale* Wittm.) varieties in North-East Germany. *Journal of Agronomy and Crop Science* 192(6):452–464.
- Erisman J. W., Bleeker A., Galloway J., Sutton M. S. (2007): Reduced nitrogen in ecology and the environment. *Environmental pollution* (Barking, Essex : 1987) 150(1):140–149. 10.1016/j.envpol.2007.06.033.
- Erisman J. W., Sutton M. A., Galloway J., Klimont Z., Winiwarter W. (2008): How a century of ammonia synthesis changed the world. *Nature Geosci* 1(10):636–639. 10.1038/ngeo325.
- Esteban R., Ariz I., Cruz C., Moran J. F. (2016): Review: Mechanisms of ammonium toxicity and the quest for tolerance. *Plant science : an international journal of experimental plant biology* 248:92–101. 10.1016/j.plantsci.2016.04.008.
- EU Nitrogen Expert Panel (2015): Nitrogen Use Efficiency (NUE) an indicator for the utilization of nitrogen in food systems. Wageningen University, Alterra, Wageningen, Netherlands.
- European Parliament and Council (2006): Regulation (EC) No 1907/2006 of the European Parliament and of the Council of 18 December 2006 concerning the Registration, Evaluation, Authorisation and Restriction of Chemicals (REACH), establishing a European Chemicals

- Agency, amending Directive 1999/45/EC and repealing Council Regulation (EEC) No 793/93 and Commission Regulation (EC) No 1488/94 as well as Council Directive 76/769/EEC and Commission Directives 91/155/EEC, 93/67/EEC, 93/105/EC and 2000/21/EC. Official Journal of the European Union L396:1–858.
- Fageria N. K. (2012): The role of plant roots in crop production. CRC Press.
- FAO (1998): World reference base for soil resources. World Soil Resources Report No. 84, Rome.
- Ferreira Barreto R., Rodrigues Cruz F. J., Aparecido Gaion L., Mello Prado R. de, Falleiros Carvalho R. (2018): Accompanying ions of ammonium sources and nitrate: ammonium ratios in tomato plants. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science* 181(3):382–387.
- Ford K. E., Gregory P. J., Gooding M. J., Pepler S. (2006): Genotype and fungicide effects on late-season root growth of winter wheat. *Plant and Soil* 284(1):33–44.
- Friberg H., Persson P., Jensen D. F., Bergkvist G. (2019): Preceding crop and tillage system affect winter survival of wheat and the fungal communities on young wheat roots and in soil. *FEMS microbiology letters* 366(15):fnz189.
- Fu Q., Abadie M., Blaud A., Carswell A., Misselbrook T. H., Clark I. M., Hirsch P. R. (2020): Effects of urease and nitrification inhibitors on soil N, nitrifier abundance and activity in a sandy loam soil. *Biology and Fertility of Soils* 56(2):185–194.
- Gaju O., Allard V., Martre P., Snape J. W., Heumez E., LeGouis J., Moreau D., Bogard M., Griffiths S., Orford S. (2011): Identification of traits to improve the nitrogen-use efficiency of wheat genotypes. *Field Crops Research* 123(2):139–152.
- Gale, Grigal D. F. (1987): Vertical root distributions of northern tree species in relation to successional status. *Canadian Journal of Forest Research* 17(8):829–834.
- Ganasamurthy S., Rex D., Samad M. S., Richards K. G., Lanigan G. J., Grelet G.-A., Clough T. J., Morales S. E. (2021): Competition and community succession link N transformation and greenhouse gas emissions in urine patches. *Science of the Total Environment* 779:146318.
- Garnett T., Conn V., Kaiser B. N. (2009): Root based approaches to improving nitrogen use efficiency in plants. *Plant, cell & environment* 32(9):1272–1283. 10.1111/j.1365-3040.2009.02011.x.
- Gerendás J., Zhu Z., Bendixen R., Ratcliffe R. G., Sattelmacher B. (1997): Physiological and biochemical processes related to ammonium toxicity in higher plants. *Zeitschrift für Pflanzenernährung und Bodenkunde* 160(2):239–251.
- Giehl R. F. H., Wirén N. von (2014): Root nutrient foraging. *Plant physiology* 166(2):509–517.
- Gilroy S., Jones D. L. (2000): Through form to function: root hair development and nutrient uptake. *Trends in plant science* 5(2):56–60.
- Gilsanz C., Báez D., Misselbrook T. H., Dhanoa M. S., Cárdenas L. M. (2016): Development of emission factors and efficiency of two nitrification inhibitors, DCD and DMPP. *Agriculture, ecosystems & environment* 216:1–8. 10.1016/j.agee.2015.09.030.

- Glibert P. M., Harrison J., Heil C., Seitzinger S. (2006): Escalating Worldwide use of Urea – A Global Change Contributing to Coastal Eutrophication. *Biogeochemistry* 77(3):441–463. 10.1007/s10533-005-3070-5.
- Godfray H. C. J., Beddington J. R., Crute I. R., Haddad L., Lawrence D., Muir J. F., Pretty J., Robinson S., Thomas S. M., Toulmin C. (2010): Food security: The Challenge of Feeding 9 Billion people. *Science* 327:812–818.
- Good A. G., Beatty P. H. (2011): Biotechnological approaches to improving nitrogen use efficiency in plants: alanine aminotransferase as a case study. *The molecular and physiological basis of nutrient use efficiency in crops*:165–191.
- Good A. G., Shrawat A. K., Muench D. G. (2004): Can less yield more? Is reducing nutrient input into the environment compatible with maintaining crop production? *Trends in plant science* 9(12):597–605. 10.1016/j.tplants.2004.10.008.
- Gregory P. (2007): *Plant roots*. Wiley Online Library.
- Gregory P. J. (2006): Roots, rhizosphere and soil: The route to a better understanding of soil science? *Eur J Soil Science* 57(1):2–12. 10.1111/j.1365-2389.2005.00778.x.
- Gregory P. J., McGowan M., Biscoe P. V., Hunter B. (1978): Water relations of winter wheat: 1. Growth of the root system. *The Journal of Agricultural Science* 91(1):91–102.
- Gruber B. D., Giehl R. F. H., Friedel S., Wirén N. von (2013): Plasticity of the Arabidopsis root system under nutrient deficiencies. *Plant physiology* 163(1):161–179.
- Guardia G., Sanz-Cobena A., Sanchez-Martín L., Fuertes-Mendizábal T., González-Murua C., Álvarez J. M., Chadwick D., Vallejo A. (2018): Urea-based fertilization strategies to reduce yield-scaled N oxides and enhance bread-making quality in a rainfed Mediterranean wheat crop. *Agriculture, ecosystems & environment* 265:421–431.
- Guimarães G. G. F., Mulvaney R. L., Khan S. A., Cantarutti R. B., Silva A. M. (2016): Comparison of urease inhibitor N-(n-butyl) thiophosphoric triamide and oxidized charcoal for conserving urea-N in soil. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science* 179(4):520–528.
- Gwenzi W., Veneklaas E. J., Holmes K. W., Bleby T. M., Phillips I. R., Hinz C. (2011): Spatial analysis of fine root distribution on a recently constructed ecosystem in a water-limited environment. *Plant and Soil* 344(1):255–272.
- Haenel H.-D., Rösemann C., Dämmgen U., Döring U., Wulf S., Eurich-Menden B., Freibauer A., Döhler H., Schreiner C., Osterburg B. (2018): Calculations of gaseous and particulate emissions from German agriculture 1990-2016: Report on methods and data (RMD) Submission 2018.
- Hartmann T. E., Guzman-Bustamante I., Ruser R., Müller T. (2020): Turnover of Urea in a Soil from the North China Plain as Affected by the Urease Inhibitor NBPT and Wheat Straw. *Agronomy* 10(6):857. 10.3390/agronomy10060857.

- Harty M. A., Forrestal P. J., Watson C. J., McGeough K. L., Carolan R., Elliot C., Krol D., Laughlin R. J., Richards K. G., Lanigan G. J. (2016): Reducing nitrous oxide emissions by changing N fertiliser use from calcium ammonium nitrate (CAN) to urea based formulations. *Science of the Total Environment* 563:576–586.
- Hawkesford M. J. (2017): Genetic variation in traits for nitrogen use efficiency in wheat. *Journal of experimental botany* 68(10):2627–2632. 10.1093/jxb/erx079.
- Heberer J. A., Below F. E. (1989): Mixed nitrogen nutrition and productivity of wheat grown in hydroponics. *Annals of botany* 63(6):643–649.
- Heeraman D. A., Juma N. G. (1993): A comparison of minirhizotron, core and monolith methods for quantifying barley (*Hordeum vulgare* L.) and fababean (*Vicia faba* L.) root distribution. *Plant and Soil* 148(1):29–41.
- Herbrich M., Gerke H. H., Sommer M. (2018): Root development of winter wheat in erosion-affected soils depending on the position in a hummocky ground moraine soil landscape. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science* 181(2):147–157.
- Herrera J., Rubio G., Häner L., Delgado J., Lucho-Constantino C., Islas-Valdez S., Pellet D. (2016): Emerging and Established Technologies to Increase Nitrogen Use Efficiency of Cereals. *Agronomy* 6(2):25. 10.3390/agronomy6020025.
- Hinsinger P., Bengough A. G., Vetterlein D., Young I. M. (2009): Rhizosphere: Biophysics, biogeochemistry and ecological relevance. *Plant Soil* 321(1-2):117–152. 10.1007/s11104-008-9885-9.
- Hinz M. (2013): Standortcharakterisierung der Versuchsflächen des Agrar- und Ernährungswissenschaftlichen Versuchszentrums (AEVZ) in Wettin-Löbejün/OT Merbitz unter besonderer Berücksichtigung physikalischer Bodenparameter. Unveröffentlichte Bachelorarbeit. Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg.
- Hlaváčová M., Klem K., Rapantová B., Novotná K., Urban O., Hlavinka P., Smutná P., Horáková V., Škarpa P., Pohanková E. (2018): Interactive effects of high temperature and drought stress during stem elongation, anthesis and early grain filling on the yield formation and photosynthesis of winter wheat. *Field Crops Research* 221:182–195.
- Hodge A., Berta G., Doussan C., Merchan F., Crespi M. (2009): Plant root growth, architecture and function. *Plant Soil* 321(1-2):153–187. 10.1007/s11104-009-9929-9.
- Hodgkinson L., Dodd I. C., Binley A., Ashton R. W., White R. P., Watts C. W., Whalley W. R. (2017): Root growth in field-grown winter wheat: some effects of soil conditions, season and genotype. *European Journal of Agronomy* 91:74–83.
- Hu Y., Schraml M., Tucher S. v., Li F., Schmidhalter U. (2014): Influence of nitrification inhibitors on yields of arable crops: A meta-analysis of recent studies in Germany. *Int. J. Plant Prod* 8:33–50.

- Hülsbergen K.-J. (2003): Entwicklung und anwendung eines bilanzierungsmodells zur bewertung der nachhaltigkeit landwirtschaftlicher systeme. Shaker.
- IFA (2018): International Fertilizer Industry Association. <http://ifadata.fertilizer.org/ucSearch.aspx>.
- IVA (Hrsg.) (2018): Industrieverband Agrar e. V. Wichtige Zahlen Düngemittel - Produktion-Markt-Landwirtschaft 2017-2018.
- Iversen C. M., Murphy M. T., Allen M. F., Childs J., Eissenstat D. M., Lilleskov E. A., Sarjala T. M., Sloan V. L., Sullivan P. F. (2012): Advancing the use of minirhizotrons in wetlands. *Plant Soil* 352(1-2):23–39. 10.1007/s11104-011-0953-1.
- Jackson R. B., Canadell J., Ehleringer J. R., Mooney H. A., Sala O. E., Schulze E. D. (1996): A global analysis of root distributions for terrestrial biomes. *Oecologia* 108(3):389–411.
- Jedy C., Adrian M., Baussard C., Bernard C., Bernaud E., Bourion V., Busset H., Cabrera-Bosquet L., Cointault F., Han S., Lamboeuf M., Moreau D., Pivato B., Prudent M., Trouvelot S., Truong H. N., Vernoud V., Voisin A.-S., Wipf D., Salon C. (2016): RhizoTubes as a new tool for high throughput imaging of plant root development and architecture: test, comparison with pot grown plants and validation. *Plant methods* 12:31. 10.1186/s13007-016-0131-9.
- Jing J., Rui Y., Zhang F., Rengel Z., Shen J. (2010): Localized application of phosphorus and ammonium improves growth of maize seedlings by stimulating root proliferation and rhizosphere acidification. *Field Crops Research* 119(2-3):355–364.
- Johnson M. G., Tingey D. T., Phillips D. L., Storm M. J. (2001): Advancing fine root research with minirhizotrons. *Environmental and Experimental Botany* 45(3):263–289.
- Johnston A. M., Bruulsema T. W. (2014): 4R nutrient stewardship for improved nutrient use efficiency. *Procedia Engineering* 83:365–370.
- Juan Y. H., Chen Z. H., Chen L. J., Wu Z. J., Wang R., Sun W. T., Zhang Y. L. (2010): Kinetic and thermodynamic behaviors of soil urease as affected by urease inhibitors. *Revista de la ciencia del suelo y nutrición vegetal* 10(1):1–11.
- Judd L. A., Jackson B. E., Fonteno W. C. (2015): Advancements in root growth measurement technologies and observation capabilities for container-grown plants. *Plants* 4(3):369–392.
- Jungkunst H. F., Freibauer A., Neufeldt H., Bareth G. (2006): Nitrous oxide emissions from agricultural land use in Germany— a synthesis of available annual field data. *J. Plant Nutr. Soil Sci.* 169(3):341–351. 10.1002/jpln.200521954.
- Kafarski P., Talma M. (2018): Recent advances in design of new urease inhibitors: A review. *Journal of advanced research* 13:101–112. 10.1016/j.jare.2018.01.007.
- Kandeler E., Gerber H. (1988): Short-term assay of soil urease activity using colorimetric determination of ammonium. *Biology and Fertility of Soils* 6(1):68–72.
- Kelliher F. M., Clough T. J., Clark H., Rys G., Sedcole J. R. (2008): The temperature dependence of dicyandiamide (DCD) degradation in soils: A data synthesis. *Soil Biology and Biochemistry* 40(7):1878–1882. 10.1016/j.soilbio.2008.03.013.

- Kim D.-G., Saggar S., Roudier P. (2012): The effect of nitrification inhibitors on soil ammonia emissions in nitrogen managed soils: A meta-analysis. *Nutr Cycl Agroecosyst* 93(1):51–64. 10.1007/s10705-012-9498-9.
- Kirschke T., Spott O., Vetterlein D. (2019): Impact of urease and nitrification inhibitor on NH_4^+ and NO_3^- dynamic in soil after urea spring application under field conditions evaluated by soil extraction and soil solution sampling. *J. Plant Nutr. Soil Sci.* 182(3):441–450. 10.1002/jpln.201800513.
- Kleineidam K., Košmrlj K., Kublik S., Palmer I., Pfab H., Ruser R., Fiedler S., Schloter M. (2011): Influence of the nitrification inhibitor 3,4-dimethylpyrazole phosphate (DMPP) on ammonia-oxidizing bacteria and archaea in rhizosphere and bulk soil. *Chemosphere* 84(1):182–186. 10.1016/j.chemosphere.2011.02.086.
- Knittel H., Albert E., Ebertseder T. (2012): *Praxishandbuch Dünger und Düngung*. Agrimedia.
- Knittel H., Pasda G., Mannheim T. (2007): *Düngestrategien beim Einsatz von stabilisierten Stickstoffdüngern zu Winterweizen. 1. Wechselwirkungen zwischen Düngesystemen, Witterung und Boden. Pflanzenbauwissenschaften* 11(2):77–83.
- Krajewska B. (2009): Ureases I. Functional, catalytic and kinetic properties: A review. *Journal of Molecular Catalysis B: Enzymatic* 59(1-3):9–21. 10.1016/j.molcatb.2009.01.003.
- Krupa S. (2003): Effects of atmospheric ammonia (NH_3) on terrestrial vegetation: A review. *Environmental Pollution* 124(2):179–221. 10.1016/S0269-7491(02)00434-7.
- Kücke M., Schmid H., Spiess A. (1995): A comparison of four methods for measuring roots of field crops in three contrasting soils. *Plant and Soil* 172(1):63–71.
- Ladha J. K., Pathak H., Krupnik T. J., Six J., van Kessel C. (2005): Efficiency of fertilizer nitrogen in cereal production: retrospects and prospects. *Advances in agronomy* 87:85–156.
- Ladha J. K., Tirol-Padre A., Reddy C. K., Cassman K. G., Verma S., Powlson D. S., van Kessel C., B Richter D. de, Chakraborty D., Pathak H. (2016): Global nitrogen budgets in cereals: A 50-year assessment for maize, rice, and wheat production systems. *Scientific reports* 6:19355. 10.1038/srep19355.
- Lancashire P. D., BLEIHOLDER H., van den BOOM T., LANGELÜDDEKE P., STAUSS R., Weber E., WITZENBERGER A. (1991): A uniform decimal code for growth stages of crops and weeds. *Annals of applied Biology* 119(3):561–601.
- Lassaletta L., Billen G., Grizzetti B., Anglade J., Garnier J. (2014): 50 year trends in nitrogen use efficiency of world cropping systems: The relationship between yield and nitrogen input to cropland. *Environ. Res. Lett.* 9(10):105011. 10.1088/1748-9326/9/10/105011.
- Lebender U., Senbayram M., Lammel J., Kuhlmann H. (2014): Effect of mineral nitrogen fertilizer forms on N_2O emissions from arable soils in winter wheat production. *J. Plant Nutr. Soil Sci.* 177(5):722–732. 10.1002/jpln.201300292.

- Li Q., LI B., Kronzucker H. J., SHI W. (2010): Root growth inhibition by NH₄⁺ in Arabidopsis is mediated by the root tip and is linked to NH₄⁺ efflux and GMPase activity. *Plant, cell & environment* 33(9):1529–1542.
- Li Q., Yang A., Wang Z., Roelcke M., Chen X., Zhang F., Pasda G., Zerulla W., Wissemeier A. H., Liu X. (2015): Effect of a new urease inhibitor on ammonia volatilization and nitrogen utilization in wheat in north and northwest China. *Field Crops Research* 175:96–105. 10.1016/j.fcr.2015.02.005.
- Lima J. E., Kojima S., Takahashi H., Wirén N. von (2010): Ammonium triggers lateral root branching in Arabidopsis in an AMMONIUM TRANSPORTER1;3-dependent manner. *The Plant cell* 22(11):3621–3633. 10.1105/tpc.110.076216.
- Lipiec J., Medvedev V. V., Birkas M., Dumitru E., Lyndina T. E., Rousseva S., Fulajtar E. (2003): Effect of soil compaction on root growth and crop yield in Central and Eastern Europe. *International agrophysics* 17(2):61–69.
- Liu Y., Lai N., Gao K., Chen F., Yuan L., Mi G. (2013): Ammonium inhibits primary root growth by reducing the length of meristem and elongation zone and decreasing elemental expansion rate in the root apex in Arabidopsis thaliana. *PloS one* 8(4):e61031. 10.1371/journal.pone.0061031.
- Liu Y., Wirén N. von (2017): Ammonium as a signal for physiological and morphological responses in plants. *Journal of experimental botany* 68(10):2581–2592. 10.1093/jxb/erx086.
- Lobet G., Draye X., Périlleux C. (2013): An online database for plant image analysis software tools. *Plant methods* 9(1):38.
- Lobet G., Koevoets I. T., Noll M., Meyer P. E., Tocquin P., Pagès L., Périlleux C. (2017): Using a Structural Root System Model to Evaluate and Improve the Accuracy of Root Image Analysis Pipelines. *Frontiers in plant science* 8:447. 10.3389/fpls.2017.00447.
- Lobet G., Pagès L., Draye X. (2011): A novel image-analysis toolbox enabling quantitative analysis of root system architecture. *Plant physiology* 157(1):29–39. 10.1104/pp.111.179895.
- Machado R. M. A., do Rosário M., Oliveira G. (2003): Comparison of tomato root distributions by minirhizotron and destructive sampling. In *Roots: The dynamic interface between plants and the Earth*. Springer, S 375–385.
- Majdi H. (1996): Root sampling methods - applications and limitations of the minirhizotron technique. *Plant Soil* 185(2):255–258. 10.1007/BF02257530.
- Manschadi A. M., Manske G., Vlek P. (2013): Root architecture and resource acquisition: Wheat as a model plant. *Plant roots—the hidden half*, 4th edn. CRC Press, London.
- McAllister C. H., Beatty P. H., Good A. G. (2012): Engineering nitrogen use efficient crop plants: the current status. *Plant biotechnology journal* 10(9):1011–1025. 10.1111/j.1467-7652.2012.00700.x.

- McGeough K. L., Watson C. J., Müller C., Laughlin R. J., Chadwick (2016): Evidence that the efficacy of the nitrification inhibitor dicyandiamide (DCD) is affected by soil properties in UK soils. *Soil Biology and Biochemistry* 94:222–232.
- Meister R., Rajani M. S., Ruzicka D., Schachtman D. P. (2014): Challenges of modifying root traits in crops for agriculture. *Trends in plant science* 19(12):779–788. 10.1016/j.tplants.2014.08.005.
- Metcalfe D. B., Williams M., Aragão, L E O C, da Costa, A C L, Almeida S. S. de, Braga A. P., Gonçalves P. H. L., Athaydes J. de, Junior S., Malhi Y., Meir P. (2007): A method for extracting plant roots from soil which facilitates rapid sample processing without compromising measurement accuracy. *The New phytologist* 174(3):697–703. 10.1111/j.1469-8137.2007.02032.x.
- Milchunas D. G. (2009): Estimating root production: comparison of 11 methods in shortgrass steppe and review of biases. *Ecosystems* 12(8):1381–1402.
- Miller A. J., Cramer M. D. (2005): Root Nitrogen Acquisition and Assimilation. *Plant Soil* 274(1-2):1–36. 10.1007/s11104-004-0965-1.
- Misselbrook T. H., Cardenas L. M., Camp V., Thorman R. E., Williams, JR, Rollett A. J., Chambers B. J. (2014): An assessment of nitrification inhibitors to reduce nitrous oxide emissions from UK agriculture. *Environmental Research Letters* 9(11):115006.
- Munoz-Romero V., Benítez-Vega J., López-Bellido L., López-Bellido R. J. (2010): Monitoring wheat root development in a rainfed vertisol: Tillage effect. *European Journal of Agronomy* 33(3):182–187.
- Nacry P., Bouguyon E., Gojon A. (2013): Nitrogen acquisition by roots: Physiological and developmental mechanisms ensuring plant adaptation to a fluctuating resource. *Plant Soil* 370(1-2):1–29. 10.1007/s11104-013-1645-9.
- Nakhforoosh A., Grausgruber H., Kaul H.-P., Bodner G. (2014): Wheat root diversity and root functional characterization. *Plant and Soil* 380(1-2):211–229.
- Neumann G., Römheld V. (2002): Root-Induced Changes in the Availability of Nutrients in the Rhizosphere. In: *Plant Roots: The Hidden Half*. Marcel Dekker, Inc.:617–649.
- Newman E. I. (1966): A Method of Estimating the Total Length of Root in a Sample. *The Journal of Applied Ecology* 3(1):139. 10.2307/2401670.
- Ni K., Pacholski A., Kage H. (2014): Ammonia volatilization after application of urea to winter wheat over 3 years affected by novel urease and nitrification inhibitors. *Agriculture, ecosystems & environment* 197:184–194. 10.1016/j.agee.2014.08.007.
- Nieder R., Benbi D. K., Scherer H. W. (2011): Fixation and defixation of ammonium in soils: a review. *Biology and Fertility of Soils* 47(1):1–14.
- Ogawa S., Valencia M. O., Ishitani M., Selvaraj M. G. (2014): Root system architecture variation in response to different NH₄⁺ concentrations and its association with nitrogen-deficient tolerance traits in rice. *Acta Physiologiae Plantarum* 36(9):2361–2372.

- Ohnemus T., Spott O., Thiel E. (2021): Spatial distribution of urea induced ammonia loss potentials of German cropland soils. *Geoderma* 394:115025.
- Olf H.-W., Blankenau K., Brentrup F., Jasper J., Link A., Lammel J. (2005): Soil- and plant-based nitrogen-fertilizer recommendations in arable farming. *J. Plant Nutr. Soil Sci.* 168(4):414–431. 10.1002/jpln.200520526.
- Osman K. T. (2013): *Soils: Principles, Properties and Management*. Springer, 295 S.
- Osmont K. S., Sibout R., Hardtke C. S. (2007): Hidden branches: developments in root system architecture. *Annual review of plant biology* 58:93–113. 10.1146/annurev.arplant.58.032806.104006.
- Ostonen I., Püttsepp Ü., Biel C., Alberton O., Bakker M. R., Löhmus K., Majdi H., Metcalfe D., Olsthoorn A. F. M., Pronk A., Vanguelova E., Weih M., Brunner I. (2007): Specific root length as an indicator of environmental change. *Plant Biosystems - An International Journal Dealing with all Aspects of Plant Biology* 141(3):426–442. 10.1080/11263500701626069.
- Palta J. A., Chen X., Milroy S. P., Rebetzke G. J., Dreccer M. F., Watt M. (2011): Large root systems: are they useful in adapting wheat to dry environments? *Functional Plant Biology* 38(5):347–354.
- Pan B., Lam S. K., Mosier A., Luo Y., Chen D. (2016): Ammonia volatilization from synthetic fertilizers and its mitigation strategies: A global synthesis. *Agriculture, ecosystems & environment* 232:283–289. 10.1016/j.agee.2016.08.019.
- Pedersen I. F., Sørensen P., Rasmussen J., Withers P. J. A., Rubæk G. H. (2019): Fertilizer ammonium: Nitrate ratios determine phosphorus uptake by young maize plants. *J. Plant Nutr. Soil Sci.* 182(4):541–551. 10.1002/jpln.201800553.
- Perkons U., Kautz T., Uteau D., Peth S., Geier V., Thomas K., Holz K. L., Athmann M., Pude R., Köpke U. (2014): Root-length densities of various annual crops following crops with contrasting root systems. *Soil and Tillage Research* 137:50–57.
- Pfab H., Palmer I., Buegger F., Fiedler S., Müller T., Ruser R. (2012): Influence of a nitrification inhibitor and of placed N-fertilization on N₂O fluxes from a vegetable cropped loamy soil. *Agriculture, ecosystems & environment* 150:91–101.
- Pietzner B., Rücknagel J., Koblenz B., Bednorz D., Tauchnitz N., Bischoff J., Köbke S., Meurer K. H. E., Meißner R., Christen O. (2017): Impact of slurry strip-till and surface slurry incorporation on NH₃ and N₂O emissions on different plot trials in Central Germany. *Soil and Tillage Research* 169:54–64.
- Polomski J., Kuhn N. (2002): Root research methods. In *Plant Roots*. CRC Press, S 475–516.
- Prey L., Kipp S., Hu Y., Schmidhalter U. (2019): Nitrogen use efficiency and carbon traits of high-yielding european hybrid vs. line winter wheat cultivars: potentials and limitations. *Frontiers in plant science* 9:1988.

- Qin R., Stamp P., Richner W. (2004): Impact of tillage on root systems of winter wheat. *Agronomy Journal* 96(6):1523–1530.
- Qin S., Hu C., Dong W. (2010): Nitrification results in underestimation of soil urease activity as determined by ammonium production rate. *Pedobiologia* 53(6):401–404.
- Quemada M., Gabriel J. L. (2016): Approaches for increasing nitrogen and water use efficiency simultaneously. *Global Food Security* 9:29–35. 10.1016/j.gfs.2016.05.004.
- Rabbi S. M. F., Guppy C., Flavel R., Tighe M., Young I. (2017): Root plasticity not evident in N-enriched soil volumes for wheat (*Triticum aestivum* L.) and Barley (*Hordeum vulgare* L.) varieties. *Communications in Soil Science and Plant Analysis* 48(17):2002–2012.
- Rasmussen I. S., Dresbøll D. B., Thorup-Kristensen K. (2015): Winter wheat cultivars and nitrogen (N) fertilization—Effects on root growth, N uptake efficiency and N use efficiency. *European Journal of Agronomy* 68:38–49. 10.1016/j.eja.2015.04.003.
- Rathke G.-W., Behrens T., Diepenbrock W. (2006): Integrated nitrogen management strategies to improve seed yield, oil content and nitrogen efficiency of winter oilseed rape (*Brassica napus* L.): a review. *Agriculture, ecosystems & environment* 117(2-3):80–108.
- Rewald B., Ephrath J. E. (2013): Minirhizotron techniques. In *Plant roots: the hidden half*, Band 42. CRC Press New York, NY, S 1–16.
- Rich S. M., Watt M. (2013): Soil conditions and cereal root system architecture: review and considerations for linking Darwin and Weaver. *Journal of experimental botany* 64(5):1193–1208.
- Richardson D., Felgate H., Watmough N., Thomson A., Baggs E. (2009): Mitigating release of the potent greenhouse gas N₂O from the nitrogen cycle - could enzymic regulation hold the key? *Trends in biotechnology* 27(7):388–397. 10.1016/j.tibtech.2009.03.009.
- Robertson G. P., Groffman P. M. (2015): Chapter 14—Nitrogen Transformations. *Soil Microbiology Ecology and Biochemistry*; Elsevier Inc.: Amsterdam, The Netherlands:421–446.
- Rose T. J., Wood R. H., Rose M. T., van Zwieten L. (2018): A re-evaluation of the agronomic effectiveness of the nitrification inhibitors DCD and DMPP and the urease inhibitor NBPT. *Agriculture, ecosystems & environment* 252:69–73. 10.1016/j.agee.2017.10.008.
- Ruan J., Gerendas J., Hardter R., Sattelmacher B. (2007): Effect of nitrogen form and root-zone pH on growth and nitrogen uptake of tea (*Camellia sinensis*) plants. *Annals of botany* 99(2):301–310. 10.1093/aob/mcl258.
- Ruser R., Schulz R. (2015): The effect of nitrification inhibitors on the nitrous oxide (N₂O) release from agricultural soils—a review. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science* 178(2):171–188.
- Rytter R.-M., Rytter L. (2012): Quantitative estimates of root densities at minirhizotrons differ from those in the bulk soil. *Plant and Soil* 350(1-2):205–220.
- Salsac L., Chaillou S., Morot-Gaudry J.-F., Lesaint C. H., Jolivet E. (1987): Nitrate and ammonium nutrition in plants. *Plant physiology and biochemistry (Paris)* 25(6):805–812.

- Samson B. K., Sinclair T. R. (1994): Soil core and minirhizotron comparison for the determination of root length density. *Plant and Soil* 161(2):225–232.
- Sanz-Cobena A., Misselbrook T. H., Arce A., Mingot J. I., Diez J. A., Vallejo A. (2008): An inhibitor of urease activity effectively reduces ammonia emissions from soil treated with urea under Mediterranean conditions. *Agriculture, ecosystems & environment* 126(3-4):243–249. 10.1016/j.agee.2008.02.001.
- Schilling G. (2000): *Pflanzenernährung und Düngung: 164 Tabellen*. Ulmer.
- Schimel J. P., Bennett J. (2004): Nitrogen mineralization: challenges of a changing paradigm. *Ecology* 85(3):591–602.
- Schortemeyer M., Feil B., Stamp P. (1993): Root morphology and nitrogen uptake of maize simultaneously supplied with ammonium and nitrate in a split-root system. *Annals of botany* 72(2):107–115.
- Schraml M., Weber A., Heil K., Gutser R., Schmidhalter U. (2018): Ammonia losses from urea applied to winter wheat over four consecutive years and potential mitigation by urease inhibitors. *J. Plant Nutr. Soil Sci.* 181(6):914–922. 10.1002/jpln.201700554.
- Schulz R., Makary T., Hubert S., Hartung K., Gruber S., Donath S., Döhler J., WEI K., Ehrhart E., Claupein W. (2015): Is it necessary to split nitrogen fertilization for winter wheat? On-farm research on Luvisols in South-West Germany. *The Journal of Agricultural Science* 153(4):575–587.
- Schulze G. (2020): Standortbezogene Erfassung der Nmin-Dynamik im Boden und der N-Aufnahme von Winterweizen während der Hauptvegetationsperiode zur Prüfung N-stabilisierter Düngungssysteme. Masterarbeit, Hochschule für Technik und Wirtschaft.
- Schuster C., Wozniak H., Niclas H. J. (2007): Erhöhung von N-Entzug und Dünger-N-Ausnutzung bei Harnstoff-Düngung mit einem neuen Ureaseinhibitor. *Pflanzenbauwissenschaften* 11.
- Schuurman J. J., Goedewaagen M. A. (1971): *Methods for the examination of root systems and roots*. Centre for agricultural publications and documentation Wageningen.
- Sha Z., Ma X., Wang J., Lv T., Li Q., Misselbrook T., Liu X. (2020): Effect of N stabilizers on fertilizer-N fate in the soil-crop system: A meta-analysis. *Agriculture, ecosystems & environment* 290:106763. 10.1016/j.agee.2019.106763.
- Sieling K., Christen O. (2015): Crop rotation effects on yield of oilseed rape, wheat and barley and residual effects on the subsequent wheat. *Archives of Agronomy and Soil Science* 61(11):1531–1549.
- Sieling K., Kage H. (2010): Efficient N management using winter oilseed rape. A review. *Agronomy for Sustainable Development* 30(2):271–279.
- Sieling K., Stahl C., Winkelmann C., Christen O. (2005): Growth and yield of winter wheat in the first 3 years of a monoculture under varying N fertilization in NW Germany. *European Journal of Agronomy* 22(1):71–84. 10.1016/j.eja.2003.12.004.

- Sigurdarson J. J., Svane S., Karring H. (2018): The molecular processes of urea hydrolysis in relation to ammonia emissions from agriculture. *Rev Environ Sci Biotechnol* 17(2):241–258. 10.1007/s11157-018-9466-1.
- Šimek M., Cooper J. E. (2002): The influence of soil pH on denitrification: progress towards the understanding of this interaction over the last 50 years. *European Journal of Soil Science* 53(3):345–354.
- Sinclair T. R., Rufty T. W. (2012): Nitrogen and water resources commonly limit crop yield increases, not necessarily plant genetics. *Global Food Security* 1(2):94–98. 10.1016/j.gfs.2012.07.001.
- Smit A. L., Bengough A. G., Engels C., van Noordwijk M., Pellerin S., van de Geijn, Siebe C (2013): *Root methods: a handbook*. Springer Science & Business Media.
- Smit A. L., George E., Groenwold J. (2000): Root observations and measurements at (transparent) interfaces with soil. In *Root methods*. Springer, S 235–271.
- Smith V. H., Joye S. B., Howarth R. W. (2006): Eutrophication of freshwater and marine ecosystems. *Limnology and Oceanography* 51(1part2):351–355.
- Sommer S. G., Schjoerring J. K., Denmead O. T. (2004): Ammonia emission from mineral fertilizers and fertilized crops. *Advances in agronomy* 82(557622):82008-4.
- Sticksel E., Maidl F.-X., Ludwig A., Fischbeck G. (1996): Die Ertragsbildung landwirtschaftlicher Kulturpflanzen in Abhängigkeit von der nutzbaren Feldkapazität bei differenzierter Stickstoffdüngung in Trockenjahren. *Die Bodenkultur* 47(3):163–172.
- Subbarao G. V., Ito O., Sahrawat K. L., Berry W. L., Nakahara K., Ishikawa T., Watanabe T., Suenaga K., Rondon M., Rao I. M. (2006): Scope and Strategies for Regulation of Nitrification in Agricultural Systems—Challenges and Opportunities. *Critical Reviews in Plant Sciences* 25(4):303–335. 10.1080/07352680600794232.
- Subbarao G. V., Sahrawat K. L., Nakahara K., Rao I. M., Ishitani M., Hash C. T., Kishii M., Bonnett D. G., Berry W. L., Lata J. C. (2013): A paradigm shift towards low-nitrifying production systems: the role of biological nitrification inhibition (BNI). *Annals of botany* 112(2):297–316. 10.1093/aob/mcs230.
- Sun C.-H., Yu J.-Q., Hu D.-G. (2017): Nitrate: A Crucial Signal during Lateral Roots Development. *Frontiers in plant science* 8:485. 10.3389/fpls.2017.00485.
- Suter H., Chen D., Li H., Edis R., Walker C. (2010): Comparison of the ability of the nitrification inhibitors DCD and DMPP to reduce nitrification and N₂O emissions from nitrogen fertilisers. 19th World Congress of Soil Science, Soil Solutions for a Changing World 1 – 6 August 2010, Brisbane, Australia. Published on DVD.:24–27.
- Sutton M. A., Erismann J. W., Dentener F., Möller D. (2008): Ammonia in the environment: from ancient times to the present. *Environmental pollution (Barking, Essex : 1987)* 156(3):583–604. 10.1016/j.envpol.2008.03.013.

- Svane S. F., Jensen C. S., Thorup-Kristensen K. (2019): Construction of a large-scale semi-field facility to study genotypic differences in deep root growth and resources acquisition. *Plant methods* 15:26. 10.1186/s13007-019-0409-9.
- Svoboda P., Haberle J. (2006): The effect of nitrogen fertilization on root distribution of winter wheat. *Plant Soil and Environment* 52(7):308.
- Sylvester-Bradley R., Kindred D. R. (2009): Analysing nitrogen responses of cereals to prioritize routes to the improvement of nitrogen use efficiency. *Journal of experimental botany* 60(7):1939–1951. 10.1093/jxb/erp116.
- Tamang B. G., Brasier K. G., Thomason W. E., Griffey C. A., Fukao T. (2017): Differential responses of grain yield, grain protein, and their associated traits to nitrogen supply in soft red winter wheat. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science* 180(3):316–325.
- Tennant D. (1975): A Test of a Modified Line Intersect Method of Estimating Root Length. *The Journal of Ecology* 63(3):995. 10.2307/2258617.
- Thomson C. J., Marschner H., Römheld V. (1993): Effect of nitrogen fertilizer form on pH of the bulk soil and rhizosphere, and on the growth, phosphorus, and micronutrient uptake of bean. *Journal of Plant Nutrition* 16(3):493–506.
- Thorup-Kristensen K., Cortasa M. S., Loges R. (2009): Winter wheat roots grow twice as deep as spring wheat roots, is this important for N uptake and N leaching losses? *Plant and Soil* 322(1-2):101–114.
- Thorup-Kristensen K., Kirkegaard J. (2016): Root system-based limits to agricultural productivity and efficiency: the farming systems context. *Annals of botany* 118(4):573–592.
- Tian H., Smet I. de, Ding Z. (2014): Shaping a root system: regulating lateral versus primary root growth. *Trends in plant science* 19(7):426–431.
- Tilman D., Cassman K. G., Matson P. A., Naylor R., Polasky S. (2002): Agricultural sustainability and intensive production practices. *Nature* 418(6898):671.
- Tindaon F., Benckiser G., Ottow C. G. (2011): Side effects of nitrification inhibitors on non target microbial processes in soils. *Journal of Tropical Soils* 16(1):7–16.
- Trenkel M. E. (2010): Slow- and controlled-release and stabilized fertilizers: An option for enhancing nutrient use efficiency in agriculture. *International fertilizer industry association (IFA), Paris, 160 S.*
- Vamerali T., Bandiera M., Mosca G. (2012): Minirhizotrons in modern root studies. In *Measuring roots*. Springer, S 341–361.
- van Grinsven, H J M, Bouwman L., Cassman K. G., van Es H. M., McCrackin M. L., Beusen A. H. W. (2015): Losses of Ammonia and Nitrate from Agriculture and Their Effect on Nitrogen Recovery in the European Union and the United States between 1900 and 2050. *Journal of environmental quality* 44(2):356–367. 10.2134/jeq2014.03.0102.

- van Noordwijk M., Brouwer G., Meijboom F., Oliveira, M do Rosário G, Bengough A. G. (2001): Trench profile techniques and core break methods. In *Root methods*. Springer, S 211–233.
- van Noordwijk M., Floris J. (1979): Loss of dry weight during washing and storage of root samples. *Plant and Soil*:239–243.
- Verzeaux J., Hirel B., Dubois F., Lea P. J., Tétu T. (2017): Agricultural practices to improve nitrogen use efficiency through the use of arbuscular mycorrhizae: Basic and agronomic aspects. *Plant science : an international journal of experimental plant biology* 264:48–56. 10.1016/j.plantsci.2017.08.004.
- Vitousek P. M., Aber J. D., Howarth R. W., Likens G. E., Matson P. A., Schindler D. W., Schlesinger W. H., Tilman D. G. (1997): Human alteration of the global nitrogen cycle: sources and consequences. *Ecological applications* 7(3):737–750.
- Voss-Fels K. P., Stahl A., Wittkop B., Lichthardt C., Nagler S., Rose T., Chen T.-W., Zetzsche H., Seddig S., Majid Baig M., Ballvora A., Frisch M., Ross E., Hayes B. J., Hayden M. J., Ordon F., Leon J., Kage H., Friedt W., Stützel H., Snowdon R. J. (2019): Breeding improves wheat productivity under contrasting agrochemical input levels. *Nature plants* 5(7):706–714. 10.1038/s41477-019-0445-5.
- Walch-Liu P., Neumann G., Engels C. (2001): Response of shoot and root growth to supply of different nitrogen forms is not related to carbohydrate and nitrogen status of tobacco plants. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science* 164(1):97–103.
- Wang C., Liu W., Li Q., Ma D., Lu H., Feng W., Xie Y., Zhu Y., Guo T. (2014): Effects of different irrigation and nitrogen regimes on root growth and its correlation with above-ground plant parts in high-yielding wheat under field conditions. *Field Crops Research* 165:138–149.
- Wang H., Köbke S., Dittert K. (2020): Use of urease and nitrification inhibitors to reduce gaseous nitrogen emissions from fertilizers containing ammonium nitrate and urea. *Global Ecology and Conservation* 22:e00933.
- Wang M.-B., Zhang Q. (2009): Issues in using the WinRHIZO system to determine physical characteristics of plant fine roots. *Acta Ecologica Sinica* 29(2):136–138. 10.1016/j.chnaes.2009.05.007.
- Wang Z.-H., Miao Y.-f., Li S.-X. (2016): Wheat responses to ammonium and nitrate N applied at different sown and input times. *Field Crops Research* 199:10–20. 10.1016/j.fcr.2016.09.002.
- Wasson A. P., Rebetzke G. J., Kirkegaard J. A., Christopher J., Richards R. A., Watt M. (2014): Soil coring at multiple field environments can directly quantify variation in deep root traits to select wheat genotypes for breeding. *Journal of experimental botany* 65(21):6231–6249.
- Weber E. A., Koller W., Graeff S., Hermann W., Merkt N., Claupein W. (2008): Impact of different nitrogen fertilizers and an additional sulfur supply on grain yield, quality, and the potential of acrylamide formation in winter wheat. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science* 171(4):643–655.

- Westerschulte M., Federolf C.-P., Trautz D., Broll G., Olf H.-W. (2017): Nitrogen dynamics following slurry injection in maize: soil mineral nitrogen. *Nutrient cycling in agroecosystems* 107(1):1–17.
- White C. A., Sylvester-Bradley R., Berry P. M. (2015): Root length densities of UK wheat and oilseed rape crops with implications for water capture and yield. *Journal of experimental botany* 66(8):2293–2303.
- White R. G., Kirkegaard J. A. (2010): The distribution and abundance of wheat roots in a dense, structured subsoil—implications for water uptake. *Plant, cell & environment* 33(2):133–148.
- Widdison P. E., Burt T. P. (2008): Nitrogen cycle. *Encyclopedia of Ecology*. Jorgensen, S. E. & Fath, B. (eds). Oxford: Academic Press:2526–2533.
- Wiesler F. (1997): Agronomical and physiological aspects of ammonium and nitrate nutrition of plants. *Zeitschrift für Pflanzenernährung und Bodenkunde* 160(2):227–238.
- Wiesler F., Horst W. J. (1994): Root growth of maize cultivars under field conditions as studied by the core and minirhizotron method and relationships to shoot growth. *Zeitschrift für Pflanzenernährung und Bodenkunde* 157(5):351–358.
- Wolf U., Fuß R., Höppner F., Flessa H. (2014): Contribution of N₂O and NH₃ to total greenhouse gas emission from fertilization: results from a sandy soil fertilized with nitrate and biogas digestate with and without nitrification inhibitor. *Nutrient cycling in agroecosystems* 100(1):121–134.
- Xu G., Fan X., Miller A. J. (2012): Plant nitrogen assimilation and use efficiency. *Annual review of plant biology* 63:153–182. 10.1146/annurev-arplant-042811-105532.
- Xu L., Chen H., Xu J., Yang J., Li X., Liu M., Jiao J., Hu F., Li H. (2014): Nitrogen transformation and plant growth in response to different urea-application methods and the addition of DMPP. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science* 177(2):271–277.
- Xue Y.-F., Zhang W., Liu D.-Y., Yue S.-C., CUI Z.-L., CHEN X.-P., Zou C.-Q. (2014): Effects of nitrogen management on root morphology and zinc translocation from root to shoot of winter wheat in the field. *Field Crops Research* 161:38–45.
- Yang M., Fang Y., Di Sun, Shi Y. (2016): Efficiency of two nitrification inhibitors (dicyandiamide and 3, 4-dimethylpyrazole phosphate) on soil nitrogen transformations and plant productivity: a meta-analysis. *Scientific reports* 6:22075. 10.1038/srep22075.
- Zaman M., Zaman S., Adhinarayanan C., Nguyen M. L., Nawaz S., Dawar K. M. (2013): Effects of urease and nitrification inhibitors on the efficient use of urea for pastoral systems. *Soil Science and Plant Nutrition* 59(4):649–659. 10.1080/00380768.2013.812940.
- Zhang J., Müller C., Cai Z. (2015a): Heterotrophic nitrification of organic N and its contribution to nitrous oxide emissions in soils. *Soil Biology and Biochemistry* 84:199–209. 10.1016/j.soilbio.2015.02.028.

- Zhang X., Davidson E. A., Mauzerall D. L., Searchinger T. D., Dumas P., Shen Y. (2015b): Managing nitrogen for sustainable development. *Nature* 528(7580):51–59.
- Zobel R. W., Waisel Y. (2010): A plant root system architectural taxonomy: A framework for root nomenclature. *Plant Biosystems - An International Journal Dealing with all Aspects of Plant Biology* 144(2):507–512. 10.1080/11263501003764483.
- Zörb C., Becker E., Merkt N., Kafka S., Schmidt S., Schmidhalter U. (2017): Shift of grain protein composition in bread wheat under summer drought events. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science* 180(1):49–55.
- Zuluaga D. L., Sonnante G. (2019): The Use of Nitrogen and Its Regulation in Cereals: Structural Genes, Transcription Factors, and the Role of miRNAs. *Plants* 8(8):294. 10.3390/plants8080294.

Anhang

Tabelle A-1: Pflanzenschutzmaßnahmen in dem Versuchsjahr 2013/2014.

Datum	Pflanzenschutzmittel	Wirkstoffgruppe	Hersteller	Aufwandmenge (L ha ⁻¹ /g ha ⁻¹)
14.03.2014	Husar [®] OD	Herbizid	Bayer	0,20
	Mero [®]	Zusatzstoff	Bayer	1,00
23.04.2014	Fandango [®]	Fungizid	Bayer	0,65
	Aviator [®] Xpro	Fungizid	Bayer	0,65
	Moddus [®]	Wachstumsregulator	Syngenta	0,20
	CCC [®]	Wachstumsregulator	BASF	0,50
25.04.2014	Ralon [®] Super	Herbizid	Nufarm	1,20
21.05.2014	Champion [®]	Fungizid	BASF	0,80
	Diamant [®]	Fungizid	BASF	0,50

Tabelle A-2: Pflanzenschutzmaßnahmen in dem Versuchsjahr 2014/2015.

Datum	Pflanzenschutzmittel	Wirkstoffgruppe	Hersteller	Aufwandmenge (L ha ⁻¹ /g ha ⁻¹)
15.10.2014	Herbaflex	Herbizid	FMC	2,00
	BeFlex [®]	Herbizid	FMC	0,30
10.04.2015	Atlantis WG	Herbizid	Bayer	500
	FHS	Herbizid	Bayer	500
	Pointer [®]	Herbizid	Bayer	30
	Fandango [®]	Fungizid	Bayer	0,75
	Aviator [®] Xpro	Fungizid	Bayer	0,75
	CCC	Wachstumsregulator	Syngenta	1,00
11.05.2015	Radius	Fungizid	Syngenta	1,50
	Moddus [®]	Wachstumsregulator	BASF	0,50

Tabelle A-3: Pflanzenschutzmaßnahmen in dem Versuchsjahr 2015/2016.

Datum	Pflanzenschutzmittel	Wirkstoffgruppe	Hersteller	Aufwandmenge (L ha ⁻¹ /g ha ⁻¹)
23.03.2016	Pointer [®]	Herbizid	Bayer	30
	CCC	Wachstumsregulator	Syngenta	1,00
	Axial	Herbizid	Syngenta	0,45
	FHS	Herbizid	Bayer	1,36
08.04.2016	Fandango [®]	Fungizid	Bayer	0,75
	Aviator [®] Xpro	Fungizid	Bayer	0,75
	Moddus [®]	Wachstumsregulator	BASF	0,40
20.04.2016	Ralon [®] Super	Herbizid	Nufarm	1,00
02.05.2016	Cerone [®] 660	Wachstumsregulator	Bayer	0,70
	Acanto [®]	Fungizid	DuPont [™]	1,00
27.05.2016	Skyway [®] Xpro	Fungizid	Bayer	1,25
31.05.2016	Biscaya [®]	Insektizid	Bayer	0,30

Tabelle A-4: Zeitpunkte im Kalenderjahr der durchgeführten Maßnahmen und Beprobung in den Versuchsjahren 2013/2014, 2014/2015 und 2015/2016.

Maßnahme/Beprobung	2013/2014	2014/2015	2015/2016
Aussaat	07.10.2013	30.09.2014	06.10.2015
Düngung 180 kg N ha ⁻¹			
KAS*	24.02.2014 17.04.2014 26.05.2014	09.03.2015 14.04.2015 26.05.2015	03.03.2016 12.04.2016 30.05.2016
HS+UI+NI**	24.02.2014 06.05.2014	09.03.2015 04.05.2015	03.03.2016 13.05.2016
Pflanzenschutzmaßnahmen			
Herbizide	13.03.2014 25.04.2014	15.10.2014 10.04.2015	23.03.2016 20.04.2016
Fungizide	23.04.2014 21.05.2014	10.04.2015 11.05.2015	08.04.2016 02.05.2016 27.05.2016
Wachstumsregler	23.04.2014	10.04.2015 11.05.2015	08.04.2016 02.05.2016
Insektizide	-	-	31.05.2016
Bodenuntersuchungen			
N _{min}	19.02.2014 24.03.2014 07.05.2014	25.02.2015 24.04.2015 13.05.2015	25.02.2016 25.04.2016 26.05.2016
Bodenwassergehalt	24.03.2014 07.05.2014 03.06.2014	24.04.2015 13.05.2015 22.06.2015	19.04.2016 17.05.2016 15.06.2016
Pflanzenuntersuchungen			
Triebe je Pflanze	19.02.2014	07.05.2015	26.05.2016
Ährentragende Halme	15.07.2014	06.07.2015	23.06.2016
Ernte	23.07.2014	30.07.2015	26.07.2016
Wurzeluntersuchungen ***	24.03./17.04.2014 07.05./01.05.2014 03.06./05.06.2014	24.04./16.04.2015 13.05./15.05.2015 - /11.06.2015	19.04./22.04.2016 17.05./12.05.2016 15.06./16.06.2016

* 3 Gaben in Höhe von jeweils 60 kg N ha⁻¹** 2 Gaben in Höhe von 100 und 80 kg N ha⁻¹

*** 1. Datum Bohrkernmethode; 2. Datum Minirhizotrontechnik

Tabelle A-5: Zeitpunkt an dem 50% der applizierten N-Menge (10 mg N pro 100 g Boden) einer Düngung mit Harnstoff (HS) und HS mit Urease- (UI) und Nitrifikationsinhibitor (NI) (HS+UI+NI) unter kontrollierten Laborbedingungen (20 °C) zu NO₃⁻ umgesetzt waren (t₅₀ NO₃⁻-Wert) sowie die Relation beider N-Varianten zueinander. Untersucht wurden die Böden aus den drei Versuchsjahren 2013/2014, 2014/2015 und 2015/2016.

Versuchsjahr	t ₅₀ NO ₃ ⁻ -Wert (Tage nach Applikation)		t ₅₀ NO ₃ ⁻ (HS+UI+NI)/t ₅₀ NO ₃ ⁻ (HS) (-)
	HS	HS+UI+NI	
2013/2014	3,5	10,0	2,9
2014/2015	5,0	13,0	2,6
2015/2016	4,9	10,4	2,1

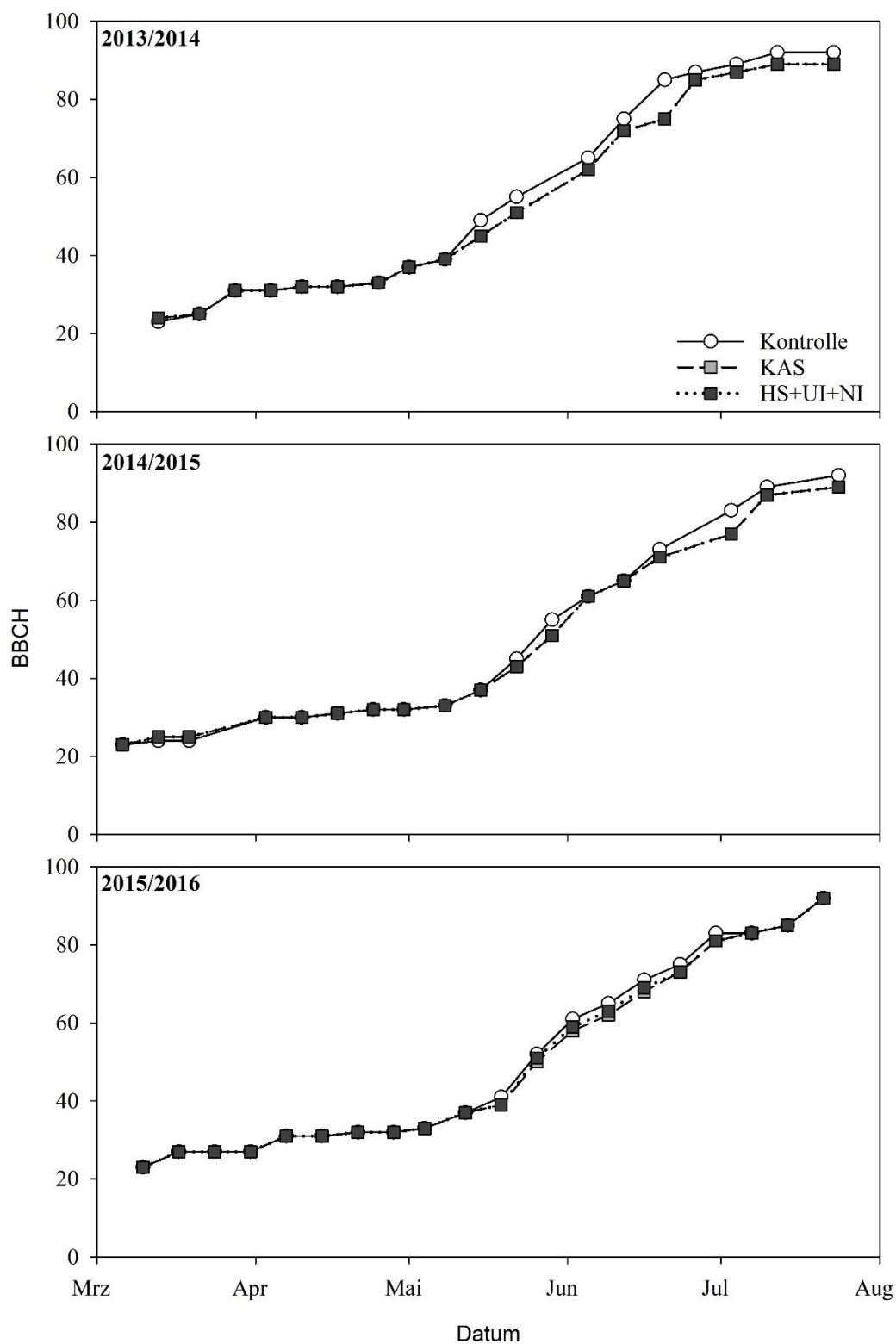


Abbildung A-1: Verlauf des BBCH-Stadiums von Winterweizen in den drei Versuchsjahren 2013/2014, 2014/2015 und 2015/2016 bei unterschiedlicher N-Düngung mit Kalkammonsalpeter (KAS) und einem mit Urease- und Nitrifikationsinhibitor versetzten Harnstoff (HS+UI+NI) im Vergleich zu einer ungedüngten Kontrolle. Dargestellt sind Mittelwerte aus vier Wiederholungen.

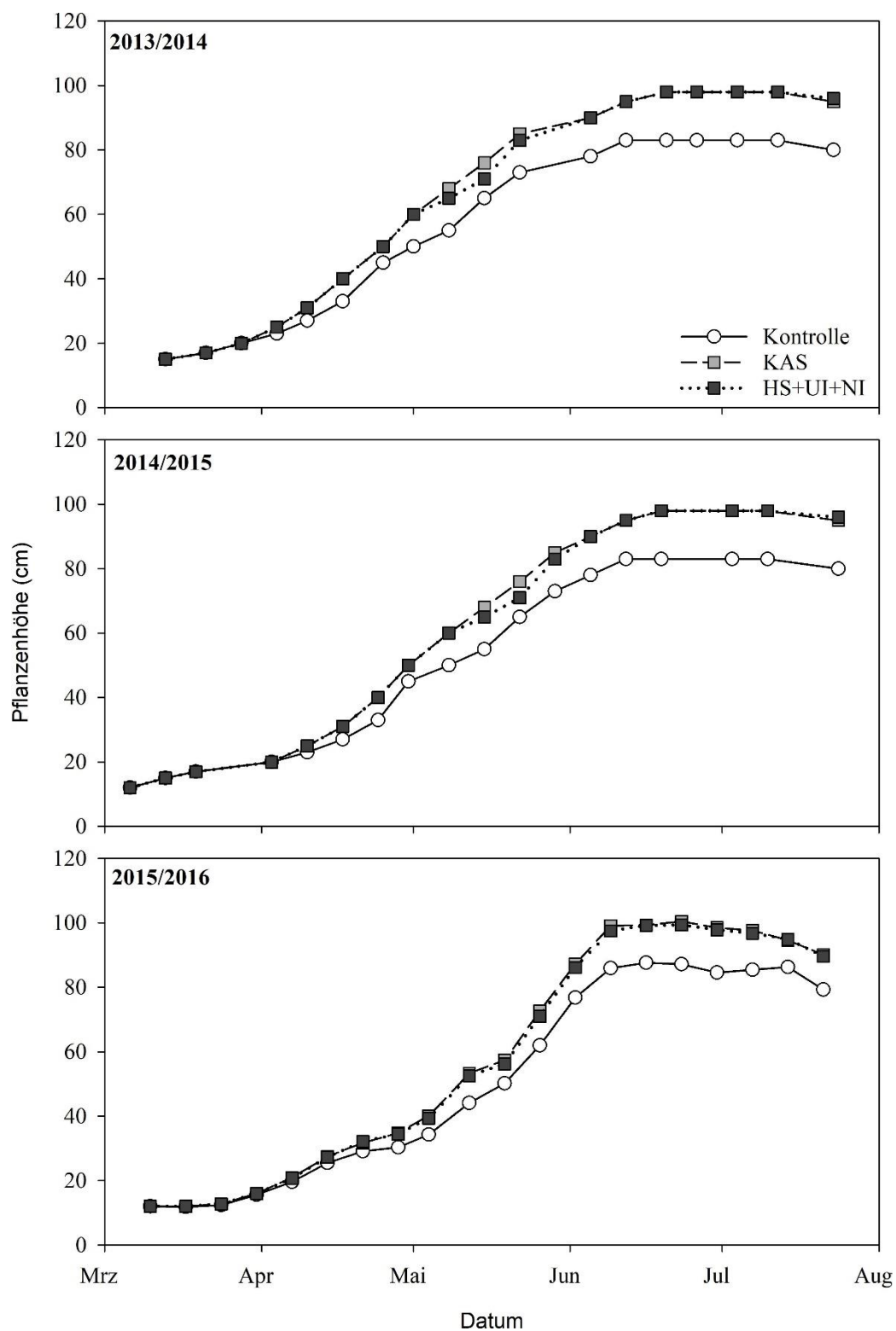


Abbildung A-2: Verlauf des Höhenwachstums von Winterweizen in den drei Versuchsjahren 2013/2014, 2014/2015 und 2015/2016 bei unterschiedlicher N-Düngung mit Kalkammonsalpeter (KAS) und einem mit Urease- und Nitrifikationsinhibitor versetzten Harnstoff (HS+UI+NI) im Vergleich zu einer ungedüngten Kontrolle. Dargestellt sind Mittelwerte aus vier Wiederholungen.

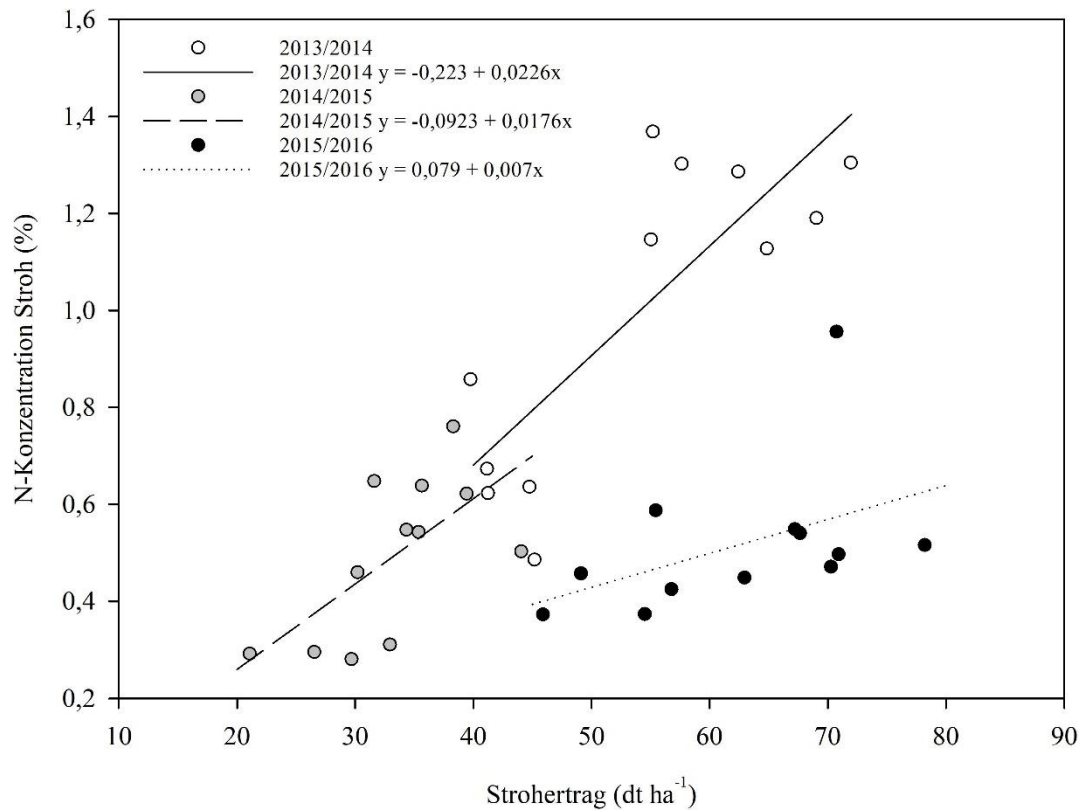


Abbildung A-3: Beziehungen zwischen dem Strohertrag (Abszisse) und der Stickstoffkonzentration im Stroh (Ordinate) aller drei Prüfglieder in den Versuchsjahren 2013/2014, 2014/2015 und 2015/2016. Die Regressionslinien wurden mit der linearen Formel $y = a + bx$ aus den Werten aller Datenpaare berechnet.

Tabelle A-6: Relevante Wurzelparameter nach einer mineralischen N-Düngung mit Kalkammonsalpeter (KAS) und einem mit Urease- und Nitrifikationsinhibitor versetzten Harnstoff (HS+UI+NI) im Vergleich zu einer ungedüngten Kontrolle in Abhängigkeit von der Bodentiefe zu den BBCH-Stadien 32, 37 und 65 im Versuchsjahr 2013/2014. Kleinbuchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede ($p \leq 0,05$) zwischen den Prüfgliedern innerhalb einer Bodentiefe, Großbuchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede ($p \leq 0,05$) zwischen den Bodentiefen innerhalb eines Prüfgliedes für jeden Termin. N/A = nicht verfügbar. WTMD = Wurzel trockenmassendichte, SWL = spezifische Wurzellänge, MWD = mittlerer Wurzel durchmesser, WGD = Wurzelgewebebedichte.

Variante	BBCH 32				BBCH 37				BBCH 65			
	WTMD (mg cm ⁻³)	SWL (m g ⁻¹)	MWD (mm)	WGD (mg cm ⁻³)	WTMD (mg cm ⁻³)	SWL (m g ⁻¹)	MWD (mm)	WGD (mg cm ⁻³)	WTMD (mg cm ⁻³)	SWL (m g ⁻¹)	MWD (mm)	WGD (mg cm ⁻³)
0–20 cm												
Kontrolle	N/A	N/A	0,28a	N/A	0,27a	190,1a	0,28a	87,8ab	0,23b	175,5a	0,25a	120,9a
KAS	N/A	N/A	0,31a	N/A	0,22a	174,6a	0,28a	94,9a	0,32a	181,3a	0,26a	108,4a
HS+UI+NI	N/A	N/A	0,29a	N/A	0,25a	182,2a	0,29a	82,8b	0,34a	164,8a	0,26a	112,2a
20–40 cm												
Kontrolle	N/A	N/A	0,31a	N/A	0,13a	218,7a	0,29a	70,3a	0,14a	155,4a	0,28a	109,9a
KAS	N/A	N/A	0,32a	N/A	0,10a	264,1a	0,26b	72,8a	0,13a	199,8a	0,26a	101,0a
HS+UI+NI	N/A	N/A	0,32a	N/A	0,15a	224,0a	0,27ab	76,9a	0,15a	183,2a	0,26a	104,8a
40–60 cm												
Kontrolle	N/A	N/A	0,35a	N/A	0,06a	222,7a	0,32a	57,6a	N/A	N/A	N/A	N/A
KAS	N/A	N/A	0,39a	N/A	0,05ab	299,7a	0,27b	60,7a	N/A	N/A	N/A	N/A
HS+UI+NI	N/A	N/A	0,40a	N/A	0,04b	279,1a	0,29ab	55,7a	N/A	N/A	N/A	N/A
60–80 cm												
Kontrolle	N/A	N/A	0,42a	N/A	0,07a	168,3a	0,40a	47,4a	N/A	N/A	N/A	N/A
KAS	N/A	N/A	0,47a	N/A	0,05a	265,3a	0,32a	50,4a	N/A	N/A	N/A	N/A
HS+UI+NI	N/A	N/A	0,44a	N/A	0,06a	197,4a	0,36a	52,6a	N/A	N/A	N/A	N/A

Tabelle A-7: Relevante Wurzelparameter nach einer mineralischen N-Düngung mit Kalkammonsalpeter (KAS) und einem mit Urease- und Nitrifikationsinhibitor versetzten Harnstoff (HS+UI+NI) im Vergleich zu einer ungedüngten Kontrolle in Abhängigkeit von der Bodentiefe zu den BBCH-Stadien 32 und 37 im Versuchsjahr 2014/2015. Kleinbuchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede ($p \leq 0,05$) zwischen den Prüfgliedern innerhalb einer Bodentiefe, Großbuchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede ($p \leq 0,05$) zwischen den Bodentiefen innerhalb eines Prüfgliedes für jeden Termin. WTMD = Wurzelrockenmassendichte, SWL = spezifische Wurzellänge, MWD = mittlerer Wurzelradius, WGD = Wurzelgewebedichte.

Variante	BBCH 32				BBCH 37			
	WTMD (mg cm^{-3})	SWL (m g^{-1})	MWD (mm)	WGD (mg cm^{-3})	WTMD (mg cm^{-3})	SWL (m g^{-1})	MWD (mm)	WGD (mg cm^{-3})
0–20 cm								
Kontrolle	0,33a	200,5a	0,22a	127,7a	0,26a	182,1a	0,22a	141,2a
KAS	0,34a	190,6a	0,24a	118,1a	0,28a	195,2a	0,23a	122,4b
HS+UI+NI	0,31a	187,3a	0,24a	121,2a	0,32a	193,8a	0,23a	126,6ab
20–40 cm								
Kontrolle	0,17a	184,4a	0,26a	106,0a	0,18a	165,1b	0,25ab	120,7a
KAS	0,17a	201,7a	0,25a	100,1a	0,17a	197,1a	0,24b	112,9a
HS+UI+NI	0,14a	188,6a	0,26a	99,7a	0,15a	189,2ab	0,25a	111,8a
40–60 cm								
Kontrolle	0,07a	152,9a	0,33a	81,0a	0,04a	148,5a	0,30a	94,3a
KAS	0,05a	172,9a	0,31a	80,6a	0,04a	157,9a	0,27b	112,9a
HS+UI+NI	0,04a	167,3a	0,31a	78,7a	0,05a	163,7a	0,29ab	97,7a
60–80 cm								
Kontrolle	0,01a	72,3b	0,37a	146,4a	0,01a	130,6a	0,31a	119,3a
KAS	0,00a	147,1a	0,35a	75,9b	0,00a	99,5a	0,35a	129,5a
HS+UI+NI	0,01a	140,4a	0,32a	63,9b	0,01a	122,0a	0,32a	115,7a

Danksagung

An erster Stelle möchte ich Prof. Dr. Olaf Christen meinen aufrichtigen Dank aussprechen, dessen Ermutigung und konsequente Unterstützung mich durch dieses Forschungsprojekt geführt hat. Obwohl er bedauerlicherweise nicht mehr unter uns weilt, inspirierte er mich und gab mir die Kraft die Dissertation zu vollenden.

Mein besonderer Dank gilt Prof. Dr. Doris Vetterlein für ihre Anleitung und Expertise sowie die wie selbstverständliche Übernahme meiner Betreuung. Während des Schreibens dieser Dissertation habe ich viel Großzügigkeit und Vertrauen von ihr erfahren.

Darüber hinaus möchte ich dem Forschungsteam und ehemaligen Kolleginnen und Kollegen, insbesondere Dr. Barbara Koblenz, Dr. Insa Kühling und PD Dr. Jan Rücknagel, für die fachlichen Gespräche, Ratschläge und aufschlussreichen Feedbacks danken.

Ein großer Dank geht an die SKW Stickstoffwerke Piesteritz GmbH, die mir es erst ermöglicht hat an diesem Themengebiet zu forschen. In diesem Zusammenhang danke ich insbesondere dem Team um Dr. Enrico Thiel und Dr. Oliver Spott für die Aufbereitung und Analyse der Laborproben sowie die konstruktiven Gespräche und breitgefächerten Gedanken, welche meine fachliche Perspektive auf die vorliegende Arbeit vergrößert haben.

Nicht zuletzt gilt mein Dank den Leuten der AEVZ Merbitz, ohne die ich diese Untersuchungen nicht hätte durchführen können. Sie waren immer bereit und enthusiastisch mir bei der Datenerhebung im Feld zu helfen.

Schließlich möchte ich meiner Familie für all die bedingungslose Unterstützung in diesen sehr intensiven Jahren danken.

Curriculum vitae

PERSÖNLICHE DATEN

Name: **Tobias Kirschke**
Geburtsdatum: **22.05.1991**
Geburtsort: **Lutherstadt Wittenberg**

BERUFLICHER WERDEGANG

01/2020 – aktuell **Verkäufer für Düngemittel**
SKW Stickstoffwerke Piesteritz GmbH

01/2017 – 12/2019 **Wissenschaftlicher Mitarbeiter (Doktorand)**
Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg, Institut für Agrar- und Ernährungswissenschaften, Professur Allgemeiner Pflanzenbau/ Ökologischer Landbau im Projekt des Agrochemischen Instituts Piesteritz e. V. (AIP)

10/2015 – 12/2017 **Wissenschaftlicher Mitarbeiter**
Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg, Institut für Agrar- und Ernährungswissenschaften, Professur Allgemeiner Pflanzenbau/ Ökologischer Landbau

STUDIUM

10/2013 – 09/2015 **Master of Science in Management natürlicher Ressourcen**
Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg, Institut für Agrar- und Ernährungswissenschaften

10/2010 – 09/2013 **Bachelor of Science in Management natürlicher Ressourcen**
Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg, Institut für Agrar- und Ernährungswissenschaften

Eidenstattliche Erklärung / Declaration under Oath

Ich erkläre an Eides statt, dass ich, Tobias Kirschke, die Arbeit selbstständig und ohne fremde Hilfe verfasst, keine anderen als die von mir angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt und die den benutzten Werken wörtlich oder inhaltlich entnommenen Stellen als solche kenntlich gemacht habe.

I, Tobias Kirschke declare under penalty of perjury that this thesis is my own work entirely and has been written without any help from other people. I used only the sources mentioned and included all the citations correctly, both in word and content.

Datum/ Date

Unterschrift / Signature