

Institut für Nutzpflanzenwissenschaften und Ressourcenschutz
- Pflanzenernährung -

**Dynamik des spezifisch gebundenen Ammoniums unter
Einfluss der Fruchtfolge und der Wurzelarchitektur
landwirtschaftlicher Nutzpflanzen**

Inaugural-Dissertation

zur

Erlangung des Grades

Doktor der Agrarwissenschaften (Dr. agr.)

der

Landwirtschaftlichen Fakultät

der

Rheinischen Friedrich-Wilhelms-Universität Bonn

vorgelegt am 20. Februar 2014 von

Dipl.-Ing. agr. Patrick Beuters

aus Jüchen

Referent: Prof. Dr. Heinrich W. Scherer

Korreferent: Prof. Dr. Ulrich Köpke

Tag der mündlichen Prüfung: 28. Mai 2014

Jahr der Veröffentlichung: 2014

Kurzfassung

Ziel der vorliegenden Arbeit war es, den Beitrag des im Unterboden spezifisch gebundenen Ammoniums (spez. geb. NH_4^+) für die Stickstoffernährung von Nutzpflanzen zu erfassen. Dazu wurden Einflussfaktoren untersucht, die für die spezifische Bindung bzw. Mobilisierung von NH_4^+ relevant sind. Besondere Aufmerksamkeit galt hierbei der Bedeutung der Bioporen bzw. dem Wurzelsystem (homorhiz vs. allorhiz) der angebauten Nutzpflanzen.

Um den Gehalt an spez. geb. $\text{NH}_4\text{-N}$ in Böden zu bestimmen wurde eine neue Methode entwickelt. In Feldversuchen wurden während der Vegetationsperioden 2010 und 2011 monatlich Proben aus dem Ober- (0-45 cm) und Unterboden (45-75 cm und 75-105 cm) aus Parzellen mit unterschiedlichen Fruchtfolgen gezogen, um die Dynamik des spez. geb. NH_4^+ während der Vegetationsperiode zu dokumentieren. Hierbei variierten Vor- und Hauptfrüchte mit jeweils unterschiedlicher Wurzelarchitektur.

Der Gehalt an spez. geb. NH_4^+ unterlag in den ersten Monaten nur geringen Veränderungen, während in der generativen Phase eine verstärkte Mobilisierung beobachtet wurde. Nach der Abreife stieg der Gehalt wieder auf das Ausgangsniveau an. Nach Rohrschwengel konnte unter Raps eine höhere Mobilisierung an spez. geb. NH_4^+ festgestellt werden als unter Gerste. Nach Luzerne war dieser Unterschied nicht zu erkennen.

In einem weiteren Versuch wurden unter Raps und Gerste (60 cm Bodentiefe) spezielle Diffusionstaschen platziert. Sie enthielten Boden, dessen Tonmineralzwischenschichten mit $^{15}\text{NH}_4^+$ markiert waren. Am Ende der Vegetationsperiode wurde überprüft, inwieweit der Boden in den Taschen an spez. geb. $^{15}\text{NH}_4^+$ verarmt wurde.

Unter beiden Pflanzenarten konnte eine deutliche Freisetzung an spez. geb. NH_4^+ festgestellt werden, unter dem allorhizen Raps war diese allerdings signifikant höher als unter der homorhizen Gerste.

Um zu überprüfen, ob organische Substanz vom Oberboden in den Unterboden transportiert und nach dessen Mineralisierung als NH_4^+ spezifisch gebunden wird, wurde im folgenden Versuch ^{15}N -markierte Luzerne auf der Bodenoberfläche ausgebracht. Nach 5 und 15 Monaten wurde im Bulk-Boden und in den Auskleidungen der Bioporen des Unterbodens der Gehalt an spez. geb. $^{15}\text{NH}_4\text{-N}$ bestimmt. Zudem wurden nach den 15 Monaten Aufwuchsproben genommen, um festzustellen, ob die Pflanzen dem Unterboden ^{15}N entzogen haben.

In den Bioporen konnte in allen drei untersuchten Tiefen spez. geb. $^{15}\text{NH}_4^+$ gefunden werden, d.h. organisch gebundener N der ^{15}N -Luzerne wurde in tiefere Bodenschichten verlagert, dort mineralisiert und als $^{15}\text{NH}_4^+$ spezifisch gebunden. Im Folgejahr wurde eine Abnahme des Gehaltes an spez. geb. $^{15}\text{NH}_4^+$ im Unterboden festgestellt und in den angebauten Pflanzen ^{15}N nachgewiesen.

Um den Einfluss von K^+ und Ca^{2+} auf die Verfügbarkeit des spez. geb. NH_4^+ zu untersuchen, wurde Boden mit $^{15}\text{NH}_4^+$ markiert und mit K^+ und/oder Ca^{2+} gedüngt. In speziellen, mit Luzerne bepflanzten Versuchsgefäßen waren die Wurzeln durch eine Gaze von Boden getrennt. In definierten Abständen von der Wurzeloberfläche (Gaze) wurde nach 49-tägiger Wachstumsperiode der Gesamtgehalt an spez. geb. $\text{NH}_4\text{-N}$ und dessen ^{15}N -Anteil ermittelt.

Es konnte bestätigt werden, dass K^+ die Tonmineralzwischenschichten kontrahiert, so dass im Vergleich zur Kontrolle weniger spez. geb. NH_4^+ freigesetzt wurde. Eine Wirkung von Ca^{2+} war nicht eindeutig festzustellen.

In einem Gefäßversuch wurde $^{15}\text{NH}_4^+$ bzw. $^{15}\text{NO}_3^-$ in jeweils 5 bzw. 50 cm Tiefe appliziert, um Aussagen über deren Verlagerung zu machen und um festzustellen, ob NO_3^- zu NH_4^+ reduziert und dann in die Tonmineralzwischenschichten eingelagert wird.

Sowohl nach Applikation von $^{15}\text{NH}_4^+$ als auch von $^{15}\text{NO}_3^-$ konnte spez. geb. $^{15}\text{NH}_4^+$ im Boden nachgewiesen werden. Somit konnte gezeigt werden, dass NO_3^- bis zum NH_4^+ reduziert und anschließend spezifisch gebunden wird.

Abstract

The objective of the present thesis was to determine the contribution of non-exchangeable ammonium (NH_4^+) in the subsoil to the N-nutrition of crops. For that, relevant influencing factors of the fixation and mobilization of NH_4^+ were investigated. Particular emphasis was put on the impact of biopores of the pre-crop and the root system (fibrous root system vs. taproot system) of growing crops. To determine the content of non-exchangeable $\text{NH}_4\text{-N}$ in soils a new method was developed.

To evaluate the dynamics of non-exchangeable NH_4^+ during a growing season, soil samples were taken monthly in field trials from the topsoil (0-45 cm) and subsoil (45-75 and 75-105 cm) in the years 2010 and 2011. The sampling was conducted on plots with different crop rotations in which pre-crops and main-crops with different root architecture varied.

During the first months of the growing seasons the content of non-exchangeable NH_4^+ changed only in a small range. However, during the vegetative phase of the crops an increase of the mobilization was observed. After ripeness the content of non-exchangeable NH_4^+ rose up to the starting content. After fescue, the mobilization was higher under oilseed rape with as compared to barley. This could not be observed after alfalfa.

In a further investigation special soil-holders were placed in 60 cm soil depth underneath oilseed rape and barley. The interlayers of the clay minerals of the soil in the soil-holders were labeled with $^{15}\text{NH}_4^+$. At the end of the growing season the degree of depletion of non-exchangeable $^{15}\text{NH}_4^+$ of the soil was detected.

Until the end of the growing season significant amounts of non-exchangeable $^{15}\text{NH}_4^+$ were released underneath both plant species. However, the mobilization underneath oilseed rape (taproot system) was higher than underneath barley (fibrous root system). Furthermore the difference between both plant species was a significant.

To investigate, whether soil organic matter from the topsoil is mineralized after translocation into deeper soil horizons and the NH_4^+ ions are fixed in the interlayers of clay minerals, ^{15}N -labeled alfalfa was spread to the soil surface. After 5 and 15 months, samples from bulk-soil and the coating of the biopores were taken to investigate the content of non-exchangeable $^{15}\text{NH}_4^+$. After 15 months also the crops were harvested and their ^{15}N uptake from the subsoil was determined.

Non-exchangeable $^{15}\text{NH}_4^+$ was found in the biopores at all sampling depths showing that the organic N of the ^{15}N -alfalfa transferred in deeper soil horizons, was mineralized and $^{15}\text{NH}_4^+$ fixed in the interlayers of the clay minerals. After 15 months the content of non-exchangeable $^{15}\text{NH}_4^+$ in the subsoil was reduced and ^{15}N could be detected in the crops.

To determine the influence of K^+ and Ca^{2+} on the mobilization of non-exchangeable NH_4^+ soil was labeled with $^{15}\text{NH}_4^+$ and fertilized with K^+ and/or Ca^{2+} . Alfalfa was planted in special pots, where the roots were separated from the soil by gauze. After 49 days of growing, the total amount of non-exchangeable $\text{NH}_4\text{-N}$ and the percentage of $^{15}\text{NH}_4\text{-N}$ were determined in defined distances to the root surface.

It could be confirmed that K^+ contracts the interlayers of the clay minerals. Compared to the control less non-exchangeable NH_4^+ was released. An obvious effect of Ca^{2+} could not be found.

To investigate, if $^{15}\text{NH}_4^+$ and $^{15}\text{NO}_3^-$ were displaced in deeper soil horizons and $^{15}\text{NO}_3^-$ gets reduced to $^{15}\text{NH}_4^+$ followed by fixation in the interlayers of clay minerals, $^{15}\text{NH}_4^+$ and $^{15}\text{NO}_3^-$, respectively, were applied in a pot experiment in 5 and 50 cm soil depth, respectively.

Non-exchangeable $^{15}\text{NH}_4\text{-N}$ could be determined after application of both $^{15}\text{NH}_4^+$ and $^{15}\text{NO}_3^-$. Hence it could be verified that $^{15}\text{NO}_3^-$ was reduced to $^{15}\text{NH}_4^+$ and fixed in the interlayers of the clay minerals.

Inhaltsverzeichnis

1.	EINLEITUNG	1
1.1	HINTERGRUND	1
1.2	ZIELE UND HYPOTHESEN.....	3
1.3	LITERATURÜBERSICHT	4
1.3.1	<i>Stickstoff.....</i>	4
1.3.2	<i>Spezifisch gebundenes Ammonium</i>	5
1.3.3	<i>Aufbau der Tonminerale und Mechanismus der spezifischen Bindung von Kationen.....</i>	6
1.3.4	<i>Gehalte an spez. geb. NH_4^+ in Böden.....</i>	8
1.3.5	<i>Pflanzenverfügbarkeit des spez. geb. NH_4^+</i>	9
1.3.6	<i>Wurzeln</i>	10
1.3.7	<i>Bedeutung der Bioporen und Lumbriciden (Regenwürmer) für den Nährstoffhaushalt des Unterbodens</i>	13
2.	METHODE ZUR BESTIMMUNG VON SPEZ. GEB. $\text{NH}_4\text{-N}$ IN BÖDEN NACH BEUTERS & SCHERER (2012).....	14
2.1	HINTERGRUND	14
2.2	MATERIAL UND METHODEN DER NEUEN METHODE.....	14
2.2.1	<i>Vergleichsböden</i>	14
2.2.2	<i>Reagenzien</i>	15
2.2.3	<i>Standardmethode nach SILVA & BREMNER (1966)</i>	15
2.2.4	<i>Methode nach BEUTERS & SCHERER (2012).....</i>	16
2.2.5	<i>^{15}N-Bestimmung in spez. geb. $\text{NH}_4\text{-N}$</i>	16
2.2.6	<i>Statistische Methoden.....</i>	17
2.3	ERGEBNISSE UND DISKUSSION	17
3.	MATERIAL UND METHODEN	20
3.1	BESCHREIBUNG DES FELDVERSUCHSSTANDORTES	20
3.2	FELDVERSUCHE.....	24
3.2.1	<i>Einfluss des Wurzelsystems und der Stickstoffversorgung des Oberbodens auf die Dynamik des spez. geb. NH_4^+</i>	24
3.2.2	<i>Verarmung der Rhizosphäre des Unterbodens an spez. geb. $^{15}\text{NH}_4^+$</i>	26
3.2.3	<i>Gehalt an spez. geb. NH_4^+ in den Bioporen verschiedener Bodentiefen nach Ausbringung von ^{15}N-markiertem Pflanzenmaterial auf die Bodenoberfläche.....</i>	29
3.3	GEFÄßVERSUCHE	32
3.3.1	<i>Einfluss von Calcium und Kalium auf die Mobilisierung von spez. geb. NH_4^+</i>	32
3.3.2	<i>Spezifische Bindung von $\text{NH}_4\text{-Ionen}$ nach Ammonium- bzw. Nitratdüngung</i>	39

4.	ERGEBNISSE	43
4.1	FELDVERSUCHE.....	43
4.1.1	<i>Einfluss des Wurzelsystems und der Stickstoffversorgung des Oberbodens auf die Dynamik des spez. geb. NH_4^+</i>	43
4.1.2	<i>Verarmung der Rhizosphäre des Unterbodens an spez. geb. $^{15}NH_4^+$</i>	65
4.1.3	<i>Gehalt an spez. geb. NH_4^+ in den Bioporen verschiedener Bodentiefen nach Ausbringung von ^{15}N-markiertem Pflanzenmaterial auf die Bodenoberfläche.....</i>	69
4.2	GEFÄßVERSUCHE	79
4.2.1	<i>Einfluss von Calcium und Kalium auf die Mobilisierung von spez. geb. NH_4^+</i>	79
4.2.2	<i>Spezifische Bindung von NH_4-Ionen nach Ammonium- bzw. Nitratdüngung</i>	103
5.	DISKUSSION	108
5.1	FELDVERSUCHE.....	108
5.1.1	<i>Einfluss des Wurzelsystems und der Stickstoffversorgung des Oberbodens auf die Dynamik des spez. geb. NH_4^+</i>	108
5.1.2	<i>Verarmung der Rhizosphäre des Unterbodens an spez. geb. $^{15}NH_4^+$</i>	113
4.1.3	<i>Gehalt an spez. geb. NH_4^+ in den Bioporen verschiedener Bodentiefen nach Ausbringung von ^{15}N-markiertem Pflanzenmaterial auf die Bodenoberfläche.....</i>	116
5.2	GEFÄßVERSUCHE	119
5.2.1	<i>Einfluss von Calcium und Kalium auf die Mobilisierung von spez. geb. NH_4^+</i>	119
5.2.2	<i>Spezifische Bindung von NH_4-Ionen nach Ammonium- bzw. Nitratdüngung</i>	122
6.	ZUSAMMENFASSUNG UND SCHLUSSFOLGERUNG	125
7.	LITERATURVERZEICHNIS	128
	DANKSAGUNG	136

Abbildungsverzeichnis

Abb. 1.1:	Stickstoff-Kreislauf mit den beteiligten Prozessen und Pools.....	5
Abb. 1.2:	Polyedermodell eines Smectits (SCHEFFER ET AL. 2010), räumliche Darstellung der Schichtstruktur der Dreischichtminerale.	7
Abb. 1.3:	Gegenüberstellung des allorhizen Wurzelsystems mit dem homorhizem Wurzelsystem	11
Abb. 2.1:	Vergleich der Standardmethode (SILVA & BREMNER 1966) und der neuen Methode (BEUTERS & SCHERER 2012) zur Bestimmung an spez. geb. $\text{NH}_4\text{-N}$	18
Abb. 2.2:	Einfluss der Partikelgröße von Boden 1 auf den Gehalt an spez. geb. $\text{NH}_4\text{-N}$	19
Abb. 3.1:	Versuchsplan CeFIT Trial A Klein-Altendorf, im Jahr 2011 (KAUTZ 2010)	23
Abb. 3.2:	Schemazeichnung einer Diffusionstasche: Aufsicht und Querschnitt.....	26
Abb. 3.3:	Fotoaufnahme des Diffusionstascheneinbaus.....	28
Abb. 3.4:	Freigelegte Regenwurmgänge in 75-105 cm Bodentiefe.	31
Abb. 3.5:	Schemazeichnung eines Kompartimentsystems	33
Abb. 3.6:	Mit Boden befülltes Kompartimentsystem.	34
Abb. 3.7:	Fotoaufnahmen des Versuchsaufbaus.	36
Abb. 3.8:	Wurzelmatte der Luzerne und Schneidvorrichtung mit eingespanntem Stechzylinder.	38
Abb. 3.9:	Schemazeichnung des Versuchsaufbaus.	41
Abb. 4.1:	Gehalte an spez. geb. $\text{NH}_4\text{-N}$ während der Vegetationsperiode 2010 unter Futtermalve und Weizen nach 3-jähr. Luzerneanbau in drei Bodentiefen.....	45
Abb. 4.2:	Gehalte an spez. geb. $\text{NH}_4\text{-N}$ während der Vegetationsperiode 2010 unter Futtermalve und Weizen nach 3-jähr. Rohrschwengel in drei Bodentiefen.....	48

Abb. 4.3: Gehalte an spez. geb. $\text{NH}_4\text{-N}$ während der Vegetationsperiode 2010 unter Futtermalve nach 3-jähr. Rohrschwingel- bzw. Luzerneanbau in drei Bodentiefen.....	50
Abb. 4.4: Gehalte an spez. geb. $\text{NH}_4\text{-N}$ während der Vegetationsperiode 2010 unter Weizen nach 3-jähr. Rohrschwingel- bzw. Luzerneanbau in drei Bodentiefen.....	52
Abb. 4.5: Gehalte an spez. geb. $\text{NH}_4\text{-N}$ während der Vegetationsperiode 2011 unter Raps und Gerste nach 3 jährigem Luzerne- und einjährigem Weizenanbau in drei Bodentiefen.....	54
Abb. 4.6: Gehalte an spez. geb. $\text{NH}_4\text{-N}$ während der Vegetationsperiode 2011 unter Raps und Gerste nach 3-jähr. Rohrschwingel- und 1-jähr. Weizenanbau in drei Bodentiefen.....	57
Abb. 4.7: Gehalte an spez. geb. $\text{NH}_4\text{-N}$ während der Vegetationsperiode 2011 unter Raps nach 3-jähr. Rohrschwingel- bzw. Luzerneanbau und 1-jähr. Weizenanbau in drei Bodentiefen.	59
Abb. 4.8: Gehalte an spez. geb. $\text{NH}_4\text{-N}$ während der Vegetationsperiode 2011 unter Gerste nach 3-jähr. Rohrschwingel- bzw. Luzerneanbau und 1-jähr. Weizenanbau in drei Bodentiefen.	61
Abb. 4.9: Gehalte an spez. geb. $\text{NH}_4\text{-N}$ während der Vegetationsperiode 2010 unter Weizen nach 3-jähr. Luzerneanbau in drei Bodentiefen bei unterschiedlicher N-Versorgung des Oberbodens.....	63
Abb. 4.10: Gehalte an spez. geb. $\text{NH}_4\text{-N}$ während der Vegetationsperiode 2010 unter Weizen nach 3-jähr. Wegwarteanaubau in drei Bodentiefen bei unterschiedlicher N-Versorgung des Oberbodens.....	64
Abb. 4.11: Aussparungen nach Entnahme der Diffusionstaschen unter Gerste im Sommer 2011.	65
Abb. 4.12: Aussparungen nach Entnahme der Diffusionstaschen unter Raps im Sommer 2011.	65
Abb. 4.13: Gehalt an spez. geb. $^{15}\text{NH}_4\text{-N}$ im Boden der Diffusionstaschen in verschiedenen Abständen zur Gaze.....	67

Abb. 4.14: Gesamt-Gehalt an spez. geb. $\text{NH}_4\text{-N}$ im Boden der Diffusionstaschen in verschiedenen Abständen zur Gaze.....	68
Abb. 4.15: Unterparzelle am Tag der Ausbringung der ^{15}N -Luzerne und am Tag der Beprobung.....	69
Abb. 4.16: Gehalt an N_{total} , $^{15}\text{N}_{\text{total}}$, spez. geb. $\text{NH}_4\text{-N}$ und spez. geb. $^{15}\text{NH}_4\text{-N}$ in den Bioporen und im Bulk-Boden verschiedener Bodentiefen nach Ausbringung von ^{15}N -Luzerne im Beprobungsjahr 2011.....	71
Abb. 4.17: spez. geb. $^{15}\text{NH}_4\text{-N}$ von Bioporen und Bulk-Boden nach Luzerne (2011) und nach Sommerweizen bzw. Futtermalve (2012) in den Bodentiefen 45-75 cm und 75-105 cm.....	73
Abb. 4.18: spez. geb. $\text{NH}_4\text{-N}$ von Bioporen und Bulk-Boden nach Luzerne (2011) und nach Sommerweizen bzw. Futtermalve (2012) in den Bodentiefen 45-75 cm und 75-105 cm.....	74
Abb. 4.19: ^{15}N -Gesamt-Stickstoff von Bioporen und Bulk-Boden nach Luzerne (2011) und nach Sommerweizen bzw. Futtermalve (2012) in den Bodentiefen 45-75 cm und 75-105 cm.....	75
Abb. 4.20: Gesamt-Stickstoff von Bioporen und Bulk-Boden nach Luzerne (2011) und nach Sommerweizen bzw. Futtermalve (2012) in den Bodentiefen 45-75 cm und 75-105 cm.....	76
Abb. 4.21: Stickstoffgehalte im Korn und Stroh des Sommerweizens (SW) und in der Futtermalve (FM), die auf dem mit ^{15}N markierten Boden bzw. der Referenzfläche gewachsen sind.	77
Abb. 4.22: Anteil des ^{15}N -Stickstoffs im Korn und Stroh des Sommerweizens (SW) und in der Futtermalve (FM), die auf dem mit ^{15}N markierten Boden bzw. den Referenzflächen wuchsen.	78
Abb. 4.23: pH-Werts der Bodenlösung im Verlauf des Versuches.	79
Abb. 4.24: Osmotisches Potential der Bodenlösung [mosmol kg^{-1}] im Verlauf des Versuches in Abhängigkeit von der Entfernung zur Wurzeloberfläche	81

Abb. 4.25: $^{15}\text{NH}_4\text{-N}$ -Konzentration der Bodenlösung [at.%] im Verlauf des Versuches in Abhängigkeit von der Entfernung zur Wurzeloberfläche	82
Abb. 4.26: $\text{NH}_4\text{-N}$ -Konzentration der Bodenlösung [μM] im Verlauf des Versuches in Abhängigkeit von der Entfernung zur Wurzeloberfläche	84
Abb. 4.27: Nitrat-N-Konzentration der Bodenlösung [μM] im Verlauf des Versuches in Abhängigkeit von der Entfernung zur Wurzeloberfläche	85
Abb. 4.28: Kaliumkonzentration der Bodenlösung [μM] im Verlauf des Versuches in Abhängigkeit von der Entfernung zur Wurzeloberfläche	87
Abb. 4.29: Ca^{2+} -Konzentration der Bodenlösung [mM] im Verlauf des Versuches in Abhängigkeit von der Entfernung zur Wurzeloberfläche	89
Abb. 4.30: Mg^{2+} -Konzentration der Bodenlösung [μM] im Verlauf des Versuches in Abhängigkeit von der Entfernung zur Wurzeloberfläche	91
Abb. 4.31: Gehalt an spez. geb. $^{15}\text{NH}_4\text{-N}$ [mg kg^{-1} Boden] nach Versuchsende in definierten Abständen zur Wurzeloberfläche.....	93
Abb. 4.32: Gesamt-Gehalt an spez. geb. $\text{NH}_4\text{-N}$ [mg kg^{-1} Boden] nach Versuchsende in definierten Abständen zur Wurzeloberfläche.....	95
Abb. 4.33: Gehalt an Gesamt-N [mg kg^{-1} Boden] nach Versuchsende in definierten Abständen zur Wurzeloberfläche.....	96
Abb. 4.34: ^{15}N -Anteil im Gesamt-N [mg kg^{-1} Boden] nach Versuchsende in definierten Abständen zur Wurzeloberfläche.....	97
Abb. 4.35: N- und ^{15}N -Entzug [mg pro Kompartimentsystem] der Luzernesprosse und –wurzeln.....	99
Abb. 4.36: K-Entzug [mg pro Kompartimentsystem] der Luzernesprosse und –wurzeln.....	100
Abb. 4.37: Ca-Entzug [mg pro Kompartimentsystem] der Luzernesprosse und –wurzeln.....	100
Abb. 4.38: Mg-Entzug [mg pro Kompartimentsystem] der Luzernesprosse und –wurzeln.....	101

Abb. 4.39: P-Entzug [mg pro Kompartimentsystem] der Luzernesprosse und – wurzeln.	102
Abb. 4.40: Gehalt an spez. geb. $^{15}\text{NH}_4\text{-N}$ im Boden nach Applikation von $^{15}\text{NH}_4\text{Cl}$ bzw. K^{15}NO_3	104
Abb. 4.41: Gehalt an spez. geb. $^{15}\text{NH}_4\text{-N}$ im Boden nach Applikation von $^{15}\text{NH}_4\text{Cl}$ bzw. K^{15}NO_3	105
Abb. 4.42: Gesamtgehalt an spez. geb. $\text{NH}_4\text{-N}$ im Boden nach Applikation von $^{15}\text{NH}_4\text{Cl}$ bzw. K^{15}NO_3	106
Abb. 4.43: Gesamtgehalt an spez. geb. $\text{NH}_4\text{-N}$ im Boden nach Applikation von $^{15}\text{NH}_4\text{Cl}$ bzw. K^{15}NO_3	107
Abb. 5.1: Niederschlag und Bodentemperatur (in 20 cm Tiefe) während des Beprobungszeitraums (01. März bis 31. August 2010) am Versuchsstandort Klein-Altendorf.....	111
Abb. 5.2: Niederschlag und Bodentemperatur (in 20 cm Tiefe) während des Beprobungszeitraums am Versuchsstandort Klein-Altendorf.	112

Tabellenverzeichnis

Tab. 2.1:	Physikochemische Parameter der Böden	15
Tab. 3.1:	Bodenbestandteile und physikochemische Bodeneigenschaften des Referenzprofils (PÄTZOLD ET AL. 2010).....	20
Tab. 3.2:	Variantenplan des CeFIT	21
Tab. 3.3:	Ausschnitt des Variantenplans des CeFIT	24
Tab. 3.4:	Variantenübersicht für den Versuch zur NH ₄ - und NO ₃ -Dynamik.....	40
Tab. 4.1:	Statistische Auswertung zwischen den Varianten 3-jähr. Luzerne als Vorfrucht und Futtermalve bzw. Weizen als Hauptfrucht (2010).	46
Tab. 4.2:	Statistische Auswertung zwischen den Varianten 3-jähr. Rohrschwingel als Vorfrucht und Futtermalve bzw. Weizen als Hauptfrucht (2010).	49
Tab. 4.3:	Statistische Auswertung zwischen den Varianten Raps und Gerste mit der mit Luzerne und Weizen als Vorfrüchte.....	55
Tab. 4.4:	Statistische Auswertung zwischen den Varianten Raps und Gerste mit Rohrschwingel und Weizen als Vorfrüchte,	58
Tab. 4.5	Trockenmasse [g pro Kompartimentsystem] der Luzernesprosse und -wurzeln.....	98
Tab. 5.1:	Verlauf der Trockenmasseentwicklung und der Stickstoffaufnahme bei Sommergetreide.....	110
Tab. 5.2:	Ausgewählte Wurzelparameter aus dem Feldversuch.....	115

1. Einleitung

1.1 Hintergrund

Nachhaltige Landnutzung ist ein erklärtes Ziel der Bundesregierung Deutschlands und der Gemeinsamen Agrarpolitik (GAP) der Europäischen Union. Ressourcenschutz und eine umweltschonende Landnutzung stellen jedoch bei steigendem Bedarf an Nahrung und nachwachsenden Rohstoffen durch eine wachsende Weltbevölkerung eine komplexe Herausforderung dar.

Eine zentrale Rolle spielt in diesem Zusammenhang die Nährstoffversorgung von landwirtschaftlichen Nutzpflanzen. Auf ackerbaulich genutzten Flächen wird diese hauptsächlich durch die Zufuhr von mineralischen und/oder organischen Düngern in den Oberboden sichergestellt. Dabei kommt es nicht selten dazu, dass ein Teil der Nährstoffe, bevor sie von den Pflanzen aufgenommen werden können, von Mikroorganismen immobilisiert werden oder aus dem Oberboden verloren gehen. Letzteres kann durch Auswaschung in den Unterboden oder ins Grundwasser geschehen, aber auch durch Ausgasung in die Atmosphäre oder durch Oberflächenabfluss bei großen Niederschlagsereignissen. Diese ausgetragenen Nährstoffe stellen nicht nur eine große Verschwendung an Ressourcen dar, sondern tragen zur Belastung der Atmosphäre bei und sind maßgeblich für die Eutrophierung von Gewässern verantwortlich. In den letzten Jahrzehnten haben Wissenschaftler und Landwirte bereits große Anstrengungen unternommen, Dünger (besonders in mineralischer Form) einzusparen und dessen Effizienz zu steigern. Dies geschah nicht zuletzt durch den Versuch, Nährstoffverluste zu unterbinden. Eine Verbesserung der Situation lässt sich auch bereits nachweisen (KEPPNER ET AL. 2012), doch dies reicht bei Weitem noch nicht aus.

Die Fähigkeit des Bodens, Nährstoffe aus den Mineralen und der organischen Bodensubstanz nachzuliefern, wurde bislang meist vernachlässigt. Dies gilt im Besonderen für den Unterboden, dieser wurde als mögliche Nährstoffquelle nahezu völlig außer Acht gelassen und auch die Fähigkeit der Pflanzen und deren Wurzeln zur Nährstoffakquise und -aufnahme aus tieferen Bodenschichten wurde stark unterschätzt.

Um den Anteil und die Bedeutung des Unterbodens für die Nährstoffversorgung von landwirtschaftlichen Nutzpflanzen und somit für den Schutz von Umwelt und Ressourcen zu untersuchen, bildete sich die Forschergruppe DFG FOR1320 mit dem Titel „Crop Sequence and the Nutrient Acquisition from the Subsoil“ („Fruchtfolge und die Nährstoffakquise aus dem Unterboden“). Das Ziel der Gruppe war zunächst die Beschreibung und die Quantifizierung von Prozessen zur Nährstofffreisetzung im und aus dem Unterboden. Im speziellen sollten die Entstehung und Bedeutung von Bioporensystemen, die Bodenstrukturdynamik, die mikrobiellen Aktivitäten, die Wasserdynamik und nicht zuletzt die Nährstofftransformationsprozesse genauer beleuchtet werden (weitere Informationen in KAUTZ ET AL. 2013). Die Forschergruppe bearbeitete zunächst zehn Teilprojekte. Im Rahmen des Teilprojektes NitroNex, mit dem Ziel das spezifisch gebundene Ammonium (in Folgendem als

spez. geb. NH_4^+ abgekürzt) im Unterboden und dessen Signifikanz für die Stickstoffernährung von Nutzpflanzen zu erforschen, entstand die vorliegende Dissertation.

Stickstoff ist das Nährelement, welches maßgeblich an der Ertragsbildung beteiligt ist und auch mengenmäßig beim Entzug an erster Stelle steht. Nitrat (NO_3^-) und Ammonium (NH_4^+) sind die beiden mineralischen Hauptstickstoffformen, die im Boden vorkommen und von Pflanzen aufgenommen werden können. NO_3^- kann im Boden weder ab- noch adsorbiert werden und liegt frei in der Bodenlösung vor. Dies ist Fluch und Segen zugleich, denn es kann somit einfach und direkt von den Wurzeln aufgenommen, aber andererseits auch leicht ausgewaschen werden. Die Landwirtschaft stellt den größten Eintragspfad von NO_3^- in das oberflächennahe Grundwasser dar (KEPPNER ET AL. 2012). NH_4^+ hingegen kann sowohl an als auch in Tonmineralen gebunden werden. Das in den Tonmineralen gebundene NH_4^+ ist das sogenannte spez. geb. NH_4^+ . Es ist nicht direkt pflanzenverfügbar, kann aber unter bestimmten Voraussetzungen aus den Tonmineralen freigesetzt werden. Die Mechanismen der Bindung und Freisetzung des NH_4^+ sind mittlerweile bekannt. Während seine Dynamik in Oberböden in zahlreichen Publikationen (siehe Literaturübersicht) beschrieben wurde, sind Untersuchungen, die den Unterboden betreffen, eher selten. Gleiches gilt auch für dessen Anteil an der Stickstoffernährung landwirtschaftlicher Nutzpflanzen.

Die Ammoniumbindungskapazität von Böden könnte auch als Stickstoffspeicher genutzt werden, um N-Verluste zu reduzieren. Dazu bedarf es konkreterem Wissen über die Dynamik des spez. geb. NH_4^+ im Unterboden und darüber, ob und wie Fruchtfolgen oder verschiedene Wurzelsysteme Einfluss auf diesen Stickstoffpool nehmen können.

In Lössböden können im Oberboden (30 cm) 80-210 mg N kg^{-1} Boden spezifisch gebunden vorliegen, dies entspricht 360-945 kg $\text{NH}_4\text{-N ha}^{-1}$, in Marschböden kann der Gehalt sogar 3800 kg $\text{NH}_4\text{-N ha}^{-1}$ überschreiten (SCHERER 1986). In Unterböden können zum Teil noch größere Mengen gebunden sein, was damit zusammenhängt, dass mit zunehmender Tiefe zumindest der Anteil des Gehaltes an spez. geb. NH_4^+ am Gesamt-N zunimmt. Sicher ist zwar auch, dass diese enormen Mengen an Stickstoff aufgrund der relativ starken Bindung nicht mobilisiert werden können, jedoch zeigen zahlreiche Untersuchungen, dass dieser Stickstoffpool durchaus für die Stickstoffversorgung von landwirtschaftlichen Nutzpflanzen relevant sein kann.

Wie und in welchem Umfang NH_4^+ im Unterboden mobilisiert, aber auch wieder spezifisch gebunden werden kann, und welche Einflussfaktoren dabei eine Rolle spielen, sollte in der vorliegenden Arbeit untersucht werden. Dazu wurden die im Folgenden aufgeführten Ziele und Hypothesen formuliert.

1.2 Ziele und Hypothesen

Das Ziel dieser Arbeit war es, die Dynamik des spez. geb. NH_4^+ unter Einfluss der Fruchtfolge und der Wurzelarchitektur landwirtschaftlicher Nutzpflanzen zu untersuchen. Dabei sollte das Hauptaugenmerk auf die Rolle des Unterbodens für die Stickstoffernährung der Pflanzen gelegt werden. Damit zusammenhängende Transformationsprozesse und Einflussfaktoren für die Bindung bzw. Mobilisierung von NH_4^+ , sowie die Bedeutung der Bioporen sollten dabei ebenfalls erforscht werden.

Zur Vermeidung der hochgefährlichen Flusssäure und zur Erhöhung des Probendurchsatzes sollte eine neue Methode zur Bestimmung des spez. geb. NH_4^+ entwickelt werden.

Folgende Hypothesen wurden aufgestellt:

1. Im Unterboden spez. geb. NH_4^+ wird während der Vegetationsperiode mobilisiert und leistet einen Beitrag zu Stickstoffversorgung von landwirtschaftlichen Nutzpflanzen.
2. In der unmittelbaren Nachbarschaft der Wurzeln entstehen Verarmungszonen an spez. geb. NH_4^+ , wodurch die Diffusion von weiterem NH_4^+ aus den Zwischenschichten der 2:1-Tonminerale erleichtert wird.
3. Organisches Material wird über die Bioporen in tiefere Bodenschichten transportiert, dort mineralisiert und die dabei gebildeten NH_4 -Ionen in den Tonmineralzwischenschichten spezifisch gebunden.
4. Das in den Bioporen des Unterbodens spez. geb. NH_4^+ trägt zur Stickstoffversorgung von landwirtschaftlichen Nutzpflanzen bei.
5. Pflanzen mit homorhizen Wurzelsystemen mobilisieren im Unterboden mehr spez. geb. NH_4^+ , als Pflanzen mit allorhizem Wurzelsystem.
6. Kaliumionen haben eine kontrahierende Wirkung auf die Tonmineralzwischenschichten und behindern so die spezifische Bindung von NH_4^+ bzw. dessen Mobilisierung.
7. Calciumionen haben eine expandierende Wirkung auf die Tonmineralzwischenschichten und erleichtern die die spezifische Bindung von NH_4^+ bzw. dessen Mobilisierung.
8. NO_3^- wird in tiefere Bodenschichten verlagert, dort zu NH_4^+ reduziert und die gebildeten NH_4 -Ionen in Tonmineralzwischenschichten spezifisch gebunden.

1.3 Literaturübersicht

1.3.1 Stickstoff

Für die Ertragsbildung von landwirtschaftlichen Nutzpflanzen ist Stickstoff (N) von großer Bedeutung und ist mengenmäßig das Hauptnährelement für Pflanzen und Mikroorganismen (SCHEFFER ET AL. 2010). Pflanzen bestehen zu 0,2% - 2,5% der Trockensubstanz aus Stickstoff, der unter anderem ein wichtiger Bestandteil der Desoxyribonukleinsäure (DNS) und des Chlorophylls ist (MORTIMER & MÜLLER 2003). Mit Ausnahme der Leguminosen sind Pflanzen nicht in der Lage, Stickstoff aus der Luft aufzunehmen. Sie sind darauf angewiesen, diesen in Form von NH_4^+ , NO_3^- oder Harnstoff (CH_4NO_2) über die Wurzeln dem Boden zu entziehen (KERSCHBERGER & SCHILLING 2000). Mineralböden enthalten meist 0,02% bis 0,4% Stickstoff. Dieser ist jedoch zum Großteil (ca. 90%) organisch gebunden (SCHEFFER ET AL. 2010), der weitaus kleinere anorganische Teil liegt als NH_4^+ , NO_3^- und in sehr kleinen Mengen als Nitrit (NO_2^-) vor. Während Böden z.T. Nährstoffe durch Verwitterungsprozesse der anorganischen Ausgangsbestandteile nachliefern, kommt Stickstoff jedoch nur in geringen Mengen im bodenbildenden Ausgangsgestein vor (SCHEFFER ET AL. 2010). Stickstoff zeichnet sich aber dadurch aus, dass er durch Ab- und Umbau der organischen Substanz in pflanzenverfügbare und -aufnehmbare Bindungsformen überführt wird (KERSCHBERGER & SCHILLING 2000). Im konventionellen Ackerbau wird Stickstoff hauptsächlich in Form von anorganischen Mineraldüngern (z.B. Ammonsulfat, Kalkammonsalpeter, Harnstoff etc.) und auch als organischer Wirtschaftsdünger (z.B. Stallmist, Gülle etc.) dem Boden zugeführt. Im organischen Landbau erfolgt die Stickstoffdüngung ausschließlich mittels organischer Düngung bzw. durch den Anbau von Leguminosen.

Die durch Düngung in den Boden eingebrachten Stickstoffverbindungen unterliegen verschiedenen Um- und Abbauprozessen wie der Nitrifikation, der Denitrifikation oder der Nitratammonifikation. Produkte dieser Prozesse sind NO_3^- , so wie NH_3 , N_2 und N_2O . Letztere gasförmige Verbindungen können zu Stickstoffausträgen in die Atmosphäre führen. NO_3^- kann im Boden nicht sorbiert werden, wodurch die Gefahr besteht, mit dem Sickerwasser ausgewaschen zu werden. Ein Großteil des anorganischen Stickstoffs wird durch den Einbau in Bodenlebewesen immobilisiert.

In den Boden eingebrachtes organisches Material unterliegt einerseits Umbauprozessen, wobei es, z.B. als Huminstoff in einem stabilen N-Pool überführt wird und andererseits Mineralisationsprozessen, bei denen unter anderem NH_4^+ und NO_3^- entstehen. NH_4^+ verbleibt größtenteils nicht als solches in der Bodenlösung, sondern es wird von Pflanzen aufgenommen, unterliegt der Nitrifikation, oder wird teilweise wieder organisch immobilisiert, d.h. in Mikroorganismen eingebaut. Im Gegensatz zum NO_3^- kann NH_4^+ im Boden sorbiert und wie Kalium auch in den Zwischenschichten von Tonmineralen spezifisch gebunden werden (Abb. 1.1).

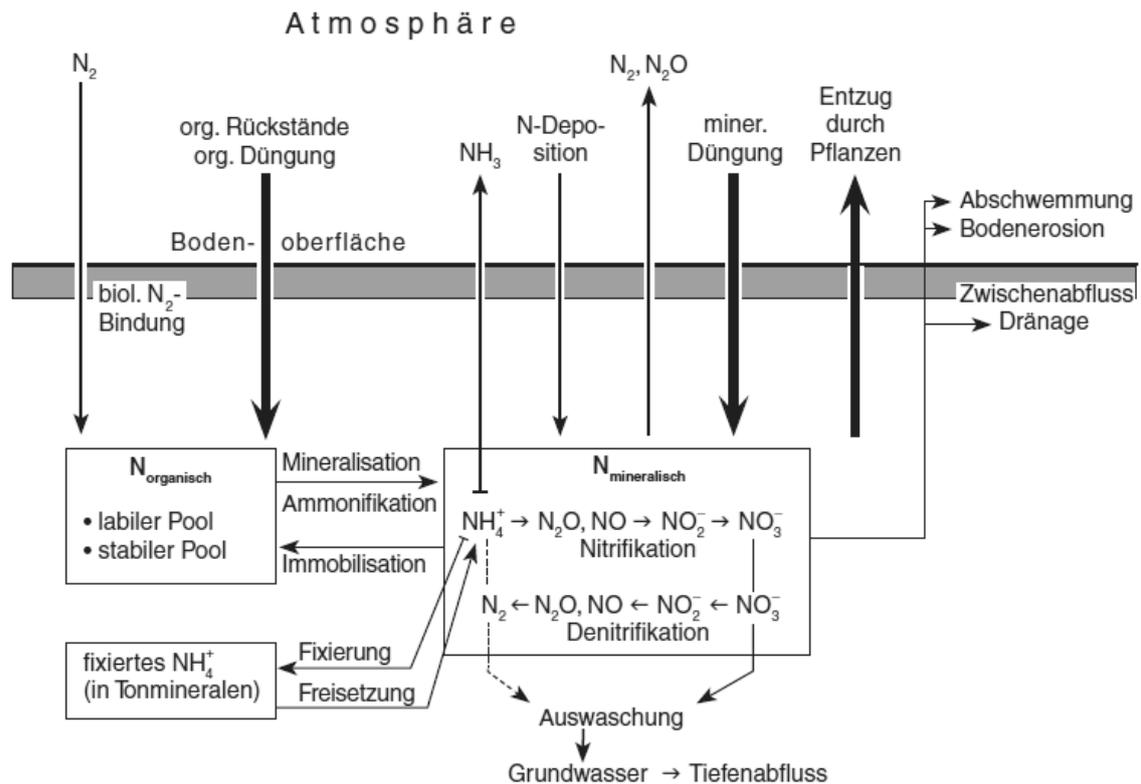


Abb. 1.1: Stickstoff-Kreislauf mit den beteiligten Prozessen und Pools (SCHEFFER ET AL. 2010).

1.3.2 Spezifisch gebundenes Ammonium

Ammonium (NH_4^+) kann in den Tonmineralzwischen-schichten spezifisch gebunden werden. Dies wird in der Literatur auch als Ammoniumfixierung bezeichnet. Die amerikanische Gesellschaft für Bodenwissenschaften (Soil Science Society of America, SSSA 1984) definierte nach (OSBORNE 1976a) Ammoniumfixierung als „the adsorption or absorption of ammonium ions by the mineral or organic fraction of the soil in a manner that they are relatively unexchangeable by usual methods of cation exchange“ („die Adsorption oder Absorption von NH_4 -Ionen durch die mineralische oder organische Fraktion des Bodens, in der Art, dass diese so gut wie nicht mit den üblichen Methoden des Kationenaustauschs austauschbar sind.“). McBETH (1917) definierte das NH_4^+ , welches nicht vollständig durch Destillation oder Extraktion mit 10%iger HCl wiedergefunden werden konnte, als „fixiertes NH_4^+ “. Um aber zwischen NH_4^+ , welches durch eine Flusssäure-Salzsäure-Lösung nach Behandlung mit Kaliumhypobromid (SILVA & BREMNER 1966) aus den Tonmineralen herausgelöst werden kann, und jenem, welches organisch oder in NH_4 -Phosphat-Komplexen gebunden ist zu unterscheiden (FRYE & HUTCHESON 1981), machte OSBORNE (1976a) den Vorschlag, den Begriff „intercalary NH_4^+ “ („Zwischenschicht- NH_4^+ “) zu nutzen. MENGEL & SCHERER (1981) verwendeten „nicht austauschbares NH_4^+ “ („non-exchangeable NH_4^+ “). Im Deutschen setzte sich jedoch der Begriff „spezifisch gebundenes NH_4^+ “ durch (SCHERER 1986), da das in den Tonmineralzwischen-schichten gebundene NH_4^+ teilweise wieder freigesetzt und von Pflanzen genutzt werden kann. Dies zeigen etliche Untersuchungen der letzten Jahrzehnte (KOWALENKO

& ROSS 1980; KUDEYAROV 1981; NOMMIK 1981; MENGEL & SCHERER 1981; SCHERER & MENGEL 1986; NOMMIK & VAHTRAS 1982; PRESTON 1982; SCHERER 1984, 1987, 1993; STEFFENS & SPARKS 1997, 1999; ELMACI ET AL. 2002; RIDER ET AL. 2007; LU ET AL. 2010).

1.3.3 Aufbau der Tonminerale und Mechanismus der spezifischen Bindung von Kationen

Tonminerale sind kleiner als 2 μm , und es wird zwischen Zweischicht- (1:1), Dreischicht- (2:1) und Vierschichttonmineralen (2:1:1) unterschieden. Sie verleihen dem Boden Eigenschaften wie Plastizität, Quellvermögen und die Fähigkeit, Moleküle und Ionen zu sorbieren oder letztere auch spezifisch zu binden. Für die hohe Reaktionsfähigkeit der Minerale sind die geringe Kristallinität und die Schichtladung verantwortlich (SCHEFFER ET AL. 2010).

Tonminerale sind Verwitterungsprodukte primärer Silikate, im speziellen von Glimmern. Daher haben sie auch strukturelle Gemeinsamkeiten wie die Grundbausteine, aus denen beide zusammengesetzt sind. Dreischichttonminerale (2:1) sind demnach aus zwei SiO_4 -Tetraederschichten und einer dazwischenliegenden Oktaederschicht aufgebaut (SCHACHTSCHABEL 1961). Die SiO_4 -Tetraeder sind in der Fläche mit drei ihrer vier O^{2-} -Ionen miteinander hexagonal vernetzt, die Tetraederschicht ist dadurch ungeladen. Das vierte O^{2-} -Ion ragt aus dem Netz heraus und verknüpft die Tetraederschicht mit der Oktaederschicht.

Das Si^{4+} der Tetraederschicht kann auch durch Al^{3+} ausgetauscht werden, wodurch die Ladung der Tetraederschicht negativ wird, die Struktur jedoch erhalten bleibt, was als isomorpher Ersatz bezeichnet wird. Eine Oktaederschicht besteht aus zwei Lagen OH^- -Ionen. Darin befinden sich oktaedrische und tetraedrische Lücken. Letztere bleiben unbelegt. Die oktaedrischen hingegen können Kationen enthalten, mit denen, je nach Wertigkeit, ein partieller oder vollständiger Ladungsausgleich erreicht werden kann. Diese sogenannten Zentralkationen können Al^{3+} , Fe^{3+} , Fe^{2+} , Mg^{2+} , Ti^{4+} oder Mn^{4+} sein. Bei den zweiwertigen Kationen müssen zum Ladungsausgleich alle Lücken belegt sein, bei den dreiwertigen hingegen nur zwei Drittel der Lücken. Demnach werden dioktaedrische Strukturen (Muskovittyp) oder trioktaedrische Strukturen (Biotittyp) unterschieden (HEIM 1990, zitiert nach AHRENS 1995).

Bei der Verknüpfung beider Schichten wird das OH^- -Ion der Oktaederschicht durch das O^{2-} -Ion der Tetraederschicht ausgetauscht. Eine Oktaederschicht wird von zwei Tetraederschichten umschlossen, sie bilden gemeinsam die sogenannten Elementarschichten. Diese werden durch schwache Ionenbindungen miteinander verknüpft. Es entstehen die Zwischenschichten (Abb. 1.2).

Durch den isomorphen Ersatz des Si^{4+} durch Al^{3+} erhalten die Dreischichttonminerale eine negative Ladung, wodurch Kationen spezifisch gebunden werden können. Aufgrund ihres Ionendurchmessers passen K^+ und NH_4^+ besonders gut in die „napfartigen“ hexagonalen Vertiefungen der Tetraederschichten. Aufgrund der Passgenauigkeit spielen zudem van der Waalssche Wechselwirkungen eine Rolle bei der spezifischen Bindung.

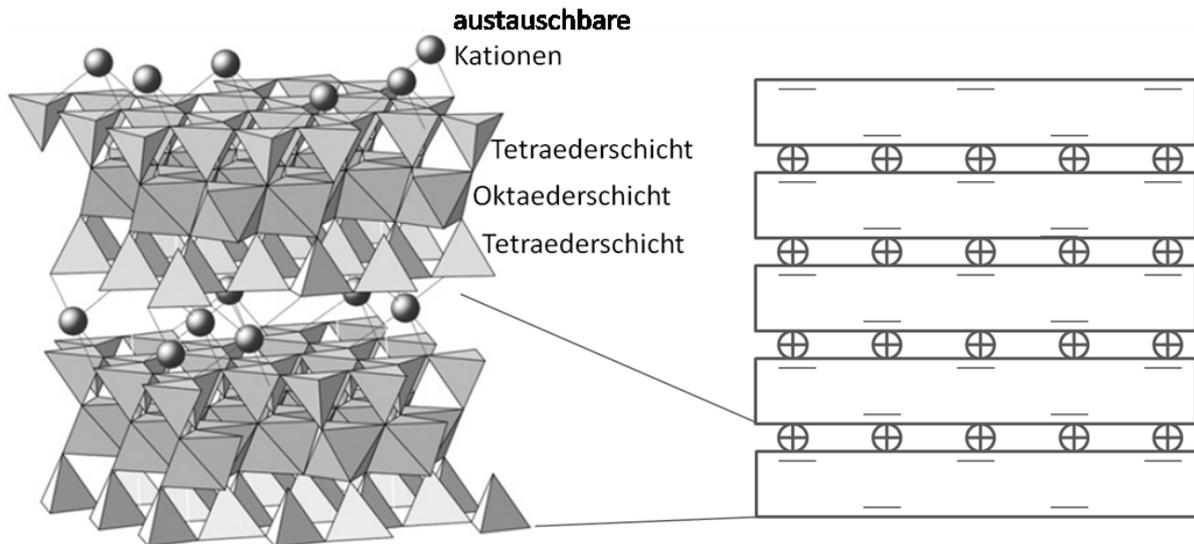


Abb. 1.2: Polyedermodell eines Smectits (links) (SCHEFFER ET AL. 2010), räumliche Darstellung der Schichtstruktur der Dreischichtminerale (rechts).

Während die Tonminerale im aufgeweiteten Zustand einen Basisabstand von 1800 pm (18 Å) bzw. 1400 pm (14 Å) haben, sind K^+ und NH_4^+ in der Lage, diesen Abstand auf 1000 pm (10 Å) zu verringern. Die Kationen geben bei diesem Kontraktionsvorgang ihre Hydrathülle ab. Dieser Prozess ist reversibel und wird als spezifische Bindung bezeichnet (SCHERER 1986). Bei der Adsorption hingegen an äußere Tonmineraloberflächen behält das NH_4 -Ion seine Hydrathülle, wodurch es leicht austauschbar bleibt. Nach VOLLMAR & SCHERER (1980) können Zwischenschichten nur kontrahieren, wenn die elektrostatische Anziehungsernergie (Coulombsche Kraft), d.h. die durch die Kontraktion freiwerdende Energie, größer ist als die Dehydratationsenergie (Energieaufwand zum Abstreifen der Hydrathülle) des zu bindenden Kations. Durchmesser der Kationen und die elektrische Ladung bestimmen die Dehydratationsenergie (bzw. Hydratationsenergie). Es gilt: je kleiner der Ionendurchmesser, desto größer die Hydratationsenergie. Die Coulombsche Kraft wird frei, wenn sich zwei Teilchen entgegengesetzter Ladung nähern. Sie ist umso größer, je höher die Aufladung der Tonminerale und je kleiner der Abstand zwischen den Ladungen von Tonmineral und zu bindendem Kation ist (SCHERER 1986). Wie oben erwähnt, steigt mit dem isomorphen Ersatz die negative Ladung der Tonminerale und damit auch die Möglichkeit, Kationen spezifisch zu binden. Da K^+ und NH_4^+ mit 266 pm (2,66 Å) und 286 pm (2,86 Å) einen fast identischen Ionendurchmesser haben, konkurrieren beide um die gleichen Bindungsstellen in den Zwischenschichten der 2:1 Tonminerale (NETTE & RESCH 1992). Zudem haben sie eine ähnliche Hydratisierungsenergie und die gleichen Bindungsmechanismen (SCHERER 1993). K^+ ist jedoch durch seinen etwas geringeren Durchmesser in der Lage, die Schichten enger zusammenzubringen und kann somit NH_4^+ daran hindern, gebunden zu werden.

Die Art der Tonminerale ist maßgeblich für die spezifische Bindung von NH_4^+ bzw. K^+ (OSBORNE 1976b; SCHERER & MENGEL 1979; STEFFENS & SPARKS 1999). Illite, Vermiculite und Smectite spielen die größte Rolle (ALLISON 1953a, b; SCHACHTSCHABEL 1961, zitiert nach WEIMAR 1995), aber auch

Montmorillonite sind dazu in der Lage, K^+ und NH_4^+ spezifisch zu binden (BLACK & WARING 1972). MENGEL (1984) misst den Montmorilloniten hingegen kaum Bedeutung bei, da sie unter feuchten Bedingungen nicht kontrahieren. Die spezifische Bindungsfähigkeit von Illiten hängt stark vom Verwitterungsgrad und der K-Sättigung ab (NOMMIK & VAHTRAS 1982). Mit fortschreitender K-Freisetzung (z.B. durch Entzug) kommt es zur Aufweitung in den Randbereichen der Tonminerale. Dies schafft die Voraussetzung für die spezifische Bindung von NH_4^+ (SCHRÖDER 1976).

Teilweise wurde NH_4^+ in Böden aus Löss und anderen Lockersedimenten bereits mit dem Beginn der Bodenentwicklung (Holozän) durch aufgeweitete Glimmer und Tonminerale spezifisch gebunden. Dieses früheingelagerte NH_4^+ wird als „natives NH_4^+ “ oder „zentral gebundenes NH_4^+ “ bezeichnet (NIEDERBUDE 1983) und spielt für den Stickstoffhaushalt im Boden keine Rolle, da es so gut wie gar nicht aus den Tonmineralen freigesetzt werden kann. Denn je weiter es von den Randpositionen entfernt gebunden ist, desto größer ist der Diffusionsweg (VOLLMAR & SCHERER 1980).

Neben diesem nativen NH_4^+ gibt es das „peripher gebundene“ oder „intermediäre NH_4^+ “ (NOMMIK & VAHTRAS 1982), welches in den Randbereichen der Tonminerale spezifisch gebunden ist.

Die Quelle für dieses peripher gebundene NH_4^+ sind NH_4 -Ionen, die durch Ammonifikation gebildet wurden oder durch atmosphärische Einträge und durch Düngung in den Boden gelangt sind. Während CHEN ET AL. (1989) und (SMITH ET AL. 1994) die Meinung vertreten, dass der Großteil des „kürzlich“ spez. geb. NH_4^+ aus mineralischem Stickstoffdünger stammt, sehen NIEDER ET AL. (1995) Mineralisation von organischer Substanz ebenfalls als wichtigen Ursprungsort für diese Stickstofffraktion.

1.3.4 Gehalte an spez. geb. NH_4^+ in Böden

Die Gehalte an spez. geb. NH_4^+ in landwirtschaftlich genutzten Böden variieren sehr stark. Allgemein kann gesagt werden, dass Böden mit grobkörniger Struktur, also mit hohem Sandanteil (z.B. Roter Sandstein oder Granit), einen Gehalt an spez. geb. NH_4 -N von 10-90 mg kg^{-1} haben, Böden mit mittel grobkörniger Struktur (z.B. Löss oder Marsche) liegen zwischen 60-270 mg spez. geb. NH_4 -N kg^{-1} Boden. Feine, sehr tonhaltige Böden erreichen Gehalt von 90-460 mg spez. geb. NH_4 -N kg^{-1} Boden (NIEDER ET AL. 2010). Der Gehalt an spezifischen NH_4 -N von Marschböden in Norddeutschland liegt zwischen 150 und 850 mg kg^{-1} Boden, Lössböden beinhalten 80 bis 150 mg kg^{-1} (SCHACHTSCHABEL 1961). Für die Köln-Aachener-Bucht liegen die Werte im gleichen Bereich (WEIMAR ET AL. 1993). NOMMIK (1967) beschreibt einen schwedischen Podsol mit einem Gehalt von 10-17 mg spez. geb. NH_4 -N kg^{-1} Boden, SCHERER und MENGEL (1979) stellten 120-160 mg spez. geb. NH_4 -N kg^{-1} Boden in hessischen Parabraunerden fest. In kanadischen Parabraunerden wurden Gehalte an spez. geb. NH_4 -N von 85-144 mg kg^{-1} Boden (SOON 1998) nachgewiesen, aus China liegen Werte von einem Chernozem in Höhe von 172 mg spez. geb. NH_4 -N kg^{-1} Boden vor (LU ET AL. 2010).

Der Anteil von spez. geb. NH_4^+ am Gesamt-N nimmt mit zunehmender Tiefe zu (BLASL 1983, NETTE & RESCH 1992), wobei es aber keinen konstanten Unterschied zwischen Ober- und Unterboden gibt. ELMACI ET AL. (2002) beschreiben Anteile von spez. geb. NH_4^+ am Gesamt-N von 20,8% im Bereich 0-20 cm und 31,5% bei 20-40 cm Bodentiefe, WEIMAR ET AL. (1993) fanden mit 19 bzw. 35% übereinstimmende Werte. Aber nicht nur die Zunahme des spez. geb. NH_4^+ führt zu höheren Anteilen dieser Stickstofffraktion am Gesamt-N, sondern zudem spielt auch die Abnahme von organischer Substanz mit zunehmender Bodentiefe eine entscheidende Rolle (DRESSLER & MENGEL 1985). Zwischen Tongehalt und dem Gehalt an spez. geb. NH_4^+ besteht auch eine Abhängigkeit, da aber die Tonfraktion meist sehr heterogen ist und nur die 2:1-Tonminerale an der spezifischen Bindung beteiligt sind, kann meist keine Korrelation zwischen beiden festgestellt werden (ELMACI ET AL. 2002). Das bedeutet, dass die Tonart die entscheidende Rolle beim Gehalt an spezifisch gebundenem NH_4^+ im Boden spielt. Zudem hängt der Gehalt an spez. geb. NH_4^+ von der K-Konzentration in der Bodenlösung, der K-Sättigung an den Austauschern und der K-Sättigung in den Zwischenschichten der 2:1-Tonminerale ab (HINMAN 1966; DORAM & EVANS 1983; NETTE & RESCH 1992). Böden, die reich an austauschbarem K^+ sind, haben also in der Regel einen geringen Gehalt an spez. geb. NH_4^+ (OPUWARIBO & ODU 1974; SCHERER & MENGEL 1979).

Die Anreicherung von spez. geb. NH_4^+ im Unterboden ist das Ergebnis der Verlagerung von löslichen organischen Substanzen im Bodenprofil nach unten, dessen Mineralisation zu NH_4^+ und Einlagerung in die Tonmineralzwischenschichten (SOON 1998). Der so gebundene Stickstoff ist dann zunächst vor der Oxidation geschützt (GUO ET AL. 1983), wodurch N-Verluste z.B. in Form von NO_3^- -Auswaschung reduziert werden.

Aber auch in den Unterboden verlagertes NO_3^- muss nicht zwangsweise ins Grundwasser ausgewaschen werden, es kann auch zur s.g. dissimilatorischen Nitratreduktion kommen (JORGENSEN 1989). Hierbei wird NO_3^- relativ schnell und direkt zu NH_4^+ reduziert (COLE & BROWN 1980; GREENAN ET AL. 2006) und das in ähnlichen Mengen wie die Entstehung von gasförmigen Oxidationsprodukten (SORENSEN 1978). Das so entstandene NH_4^+ stellt eine zusätzliche Quelle für die spezifische Bindung in den Tonmineralzwischenschichten dar.

1.3.5 Pflanzenverfügbarkeit des spez. geb. NH_4^+

Das spez. geb. NH_4^+ der Randbereiche ist nicht für die Stickstoffversorgung der Pflanzen verloren, sondern kann im Vergleich zum nativ spez. geb. NH_4^+ leicht wieder freigesetzt werden. Es ist daher an der Stickstoffdynamik beteiligt (MENGEL & SCHERER 1981) und scheint eine wichtige Komponente des Stickstoffhaushalts von landwirtschaftlich genutzten Böden zu sein (BEAUCHAMP & DRURY 1991). Die spezifische Bindung und die Freisetzung von spez. geb. NH_4^+ sind abhängig vom chemischen Gleichgewicht zwischen dem spez. geb. NH_4^+ , dem austauschbaren NH_4^+ und dem NH_4^+ in der Bodenlösung (NOMMIK & VAHTRAS 1982). Das bedeutet, dass NH_4^+ -Ionen aus den Tonmineralzwischenschichten freigesetzt werden können, wenn die beiden letzteren durch Pflanzen (SCHERER 1987) oder Nitrifikation (GREEN ET AL. 1994) verarmt worden sind. Pflanzen sind in der Lage, die Mobilisierung des spez. geb. NH_4^+ durch

unterschiedliche Mechanismen zu beeinflussen. Zum einen können sie gelöstes oder austauschbares NH_4^+ in der Nähe der Tonmineralzwischenschichten aufnehmen, was die Diffusion von spez. geb. NH_4^+ aus den Zwischenschichten fördert und zum anderen nehmen die Pflanzenwurzeln indirekt Einfluss durch Ausscheidungen, die die Mikroflora und die mikrobielle N-Aufnahme im Boden begünstigen (MARSCHNER & MARSCHNER 2012). Ein Großteil der NH_4^+ -Freisetzung hängt aber stark von der Länge der Vegetationsperiode und der Bestandsdichte ab (SAHA & MUKHOPADHYAY 1986). Nach MENGEL ET AL. (1990) und SCHERER & AHRENS (1995, 1996) verarmen Pflanzenwurzeln die Bodenlösung der Rhizosphäre und fördern somit die Mobilisierung von spez. geb. NH_4^+ .

Während der Vegetationsperiode unterliegt der Gehalt an spez. geb. NH_4^+ einer gewissen Dynamik. MENGEL & SCHERER (1981) ermittelten einen Rückgang des Gehaltes an spez. geb. NH_4^+ in den oberen 60 cm bei einem Fluvisol von Februar bis Mai. In der Bodentiefe 60-90 cm wurde erst von Mai bis Juli ein entsprechender Rückgang beobachtet, der mit dem Wurzelwachstum von Hafer einherging. Am Ende der Vegetationsperiode wurden die Tonmineralzwischenschichten wieder aufgefüllt und der Gehalt an spez. geb. NH_4^+ erreichte den Ursprungsgehalt vom Frühjahr. Auch LI ET AL. (1990a, b) ermittelten einen signifikanten Rückgang des spez. geb. NH_4^+ in den ober Bodenschichten im März und in den tieferen Bodenschichten im April. Die Wiederauffüllung der Tonminerale im Herbst dürfte in der zunehmenden Mineralisierung nach der Ernte von einjährigen Feldfrüchten begründet sein (NIEDER ET AL. 2010).

Das bereits mehrfach erwähnte K^+ , welches ebenfalls in den Tonmineralen spezifisch gebunden werden kann, soll nach (NOMMIK 1957) am NH_4^+ -Gleichgewicht zwischen Bodenlösung, Austauschern und Bindungsstellen in den Tonmineralzwischenschichten beteiligt sein. An den Außenbereichen der Tonminerale gebundene K-Ionen bewirken eine Kontraktion der Zwischenschichten und können somit die Diffusion des NH_4^+ heraus aus den Tonmineralen behindern (TANG ET AL. 2008). Ca^{2+} soll eine Aufweitung der Tonminerale bewirken und somit die Mobilisierung des NH_4^+ begünstigen. Nach NOMMIK (1957) kann Ca^{2+} und auch Na^+ und Mg^{2+} die spezifische Bindung von NH_4^+ behindern. Auch die Bodenfeuchte fördert die Mobilisierung von spez. geb. NH_4^+ , denn Wasser weitet die Tonminerale auf, wodurch die Distanz zwischen den einzelnen Schichten größer wird, was die Diffusion der NH_4 -Ionen aus den Tonmineralen erleichtert (ALLISON 1953a; GOUVEIA & EUDOXIE 2007). MENGEL & SCHERER (1981) stellten eine erhöhte Mobilisierung des spez. geb. NH_4^+ mit steigendem Wassergehalt des Bodens fest. Umgekehrt konnte bei trockenen Böden eine erhöhte spezifische Bindung des NH_4^+ beobachtet werden (BLACK & WARING 1972; OPUWARIBO & ODU 1974).

1.3.6 Wurzeln

Neben der Verankerung der Pflanzen am Standort ist die Aufnahme von Wasser und Nährstoffen aus dem Boden die wichtigste Aufgabe der Wurzeln. Sie sind in der Lage, sich der jeweiligen Wasser- und Nährstoffsituation im Boden anzupassen. Im Oberboden ist die

Nährstoffverfügbarkeit in der Regel optimal, jedoch können die Wurzeln auch aus tieferen Bodenschichten Nährstoffe entziehen. Generell lassen sich zwei Arten von Wurzelsystemen unterscheiden: Einerseits die allorhize Wurzelarchitektur der Dikotylen, welche eine Primärwurzel ausbilden, aus dessen Perizykel Seitenwurzeln auswachsen, und andererseits die homorhize Wurzelarchitektur der Monokotylen, dessen Wurzeln büschelartig wachsen (TROLL 1949) (Abb. 1.3). Letztere verzweigen sich sehr stark, wobei aber die einzelnen Wurzeln gleich dick und gleich lang sind. Beide Wurzelsysteme verhalten sich gegenüber äußeren Einflüssen relativ ähnlich. Beide bilden Wurzelhaare aus, um die nährstoffaufnehmende Oberfläche zu vergrößern (KERSCHBERGER & SCHILLING 2000). Wurzelsysteme von Getreide und Gräsern sind fein verzweigt und bilden besonders im Oberboden eine große Wurzeldichte. Sie schöpfen dort intensiv Wasser- und Nährstoffvorräte aus. Leguminosen und andere Pflanzen mit allorhizem Wurzelsystem hingegen entwickeln eine Pfahlwurzel mit weniger Seitenwurzeln als homorhiz wachsende Pflanzen. Der Wurzelraum der Allorhizen ist wesentlich größer, wird jedoch deutlich extensiver durchwurzelt, als der der Homorhizen. Jedoch ist der Ort mit der größten Wurzelmenge nicht immer die Zone, in der anhand der Wasser- und Nährstoffaufnahme die größte Wurzelaktivität gemessen werden kann (BAEUMER 1992).

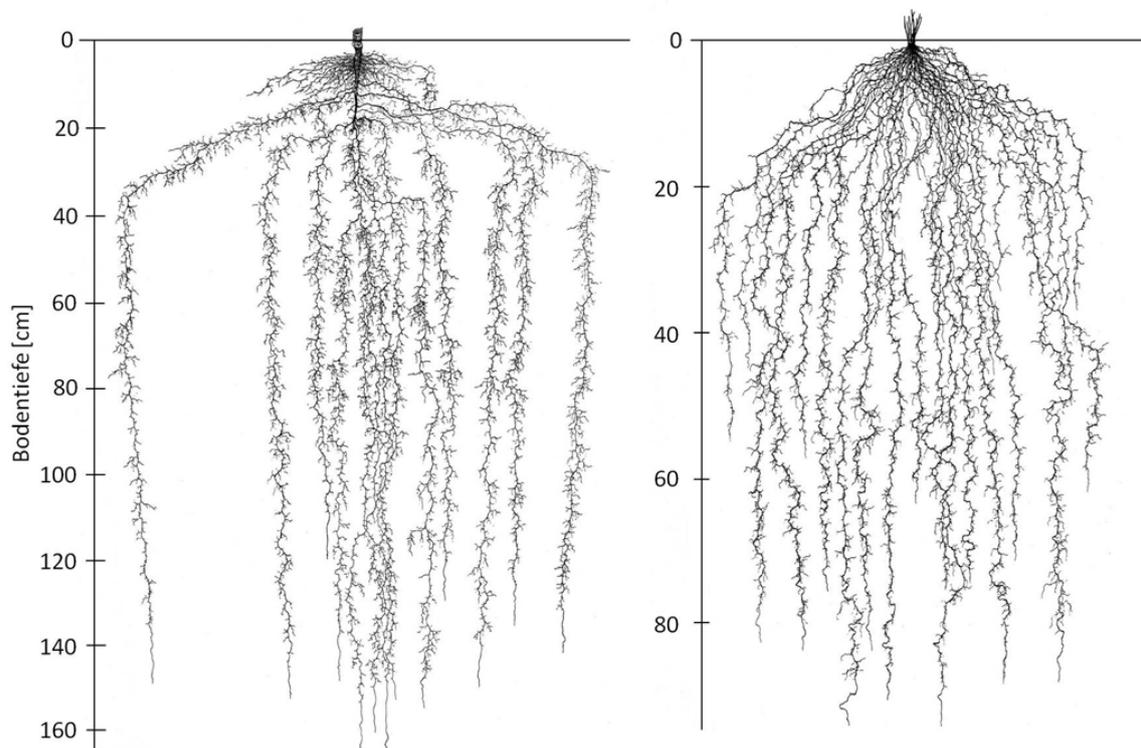


Abb. 1.3: Gegenüberstellung des allorhizen Wurzelsystems (links, *Brassica napus* L.) mit dem homorhizem Wurzelsystem (rechts, *Hordeum vulgare* L.), entnommen aus dem „Wurzelatlas mitteleuropäischer Ackerunkräuter und Kulturpflanzen“ (KUTSCHERA & LICHTENEGGER 2010). Man beachte die unterschiedliche Skalierung.

Für das Längenwachstum der Wurzeln ist die Beschaffenheit des Bodens von großer Bedeutung. So wirken das Porenvolumen, die Nährstoffkonzentration an der Wurzeloberfläche und diverse Rhizosphärenprozesse auf die Wurzeln ein (BAEUMER 1992).

Wurzeln verfolgen beim Tiefenwachstum stets den Weg des geringsten Widerstandes, sie bevorzugen Zwischenräume von Aggregaten, Wurmgänge und Poren (LOGSDON & LINDEN 1992). Unter anderem können Pflugsohlenverdichtungen die Wurzeln stark beeinträchtigen, so kann es z.B. bei Zuckerrüben zur s.g. „Beinigkei“ kommen. Aber auch die Konzentration einzelner Nährstoffe kann das Wurzelwachstum beeinflussen, so ist die ausreichende Verfügbarkeit von Calcium- und Kaliumionen von entscheidender Bedeutung. Eine Überversorgung von Stickstoff und Phosphor hingegen fördert zwar die Verzweigung der Wurzeln, unterbindet aber deren Längenwachstum. Daher ist von zu üppigen N-Gaben zu Vegetationsbeginn abzuraten, da die Wurzeln nicht in die Tiefe wachsen, sondern im Oberboden bleiben. Dies kann in trockenen Jahren zu Problemen bei der Wasserversorgung führen (KERSCHBERGER & SCHILLING 2000).

Aber auch die Pflanzen bzw. die Wurzeln selber nehmen Einfluss auf die Verfügbarkeit von Nährstoffen, indem sie Substanzen ausscheiden, z.B. um Konzentrationsgefälle für die Diffusion zu ändern oder den pH-Wert in der Rhizosphäre dahingehend anzupassen, dass Nährstoffe mobilisiert und dann leichter aufgenommen werden können. Der Beitrag des Unterbodens zur Nährstoffaufnahme ist eine Funktion der Wurzelichte, des Gehaltes an verfügbaren Nährstoffen und der Bodenfeuchte im Ober- und Unterboden (BUJNOVSKY 1993).

Bei Nährstoffmangel steigern Pflanzen das Wurzelwachstum (XIE ET AL. 2007), besonders bei Stickstoffmangel (MARSCHNER & MARSCHNER 2012). Sie bilden entweder lange dünne Wurzeln oder viele kurze Seitenwurzeln und eine insgesamt hohe Wurzellänge (LYNCH 2007). Diese Anpassung ist wichtig, denn Feinwurzeln sind effizienter bei der Nährstoffakquise als Grobwurzeln (XIE ET AL. 2009). Jedoch fällt die Reaktion der Wurzeln je nach Spezies unterschiedlich aus (HODGE 2004). Die Wurzelichte ist zum Beispiel bei Pflanzen mit einem homorhizen Wurzelsystem (z.B. bei Gräsern) höher als bei Pflanzen mit einem allorhizen Wurzelsystem. Allgemein ist aber zu sagen, dass Wurzeln, wenn sie ein nährstoffreiches Gebiet stoßen, sich stark verzweigen. Im Unterboden wachsen Wurzeln hauptsächlich in Makroporen (BÖHM & KÖPKE 1977), die durch Regenwürmer (z.B. *Lumbricus terrestris* L.) oder die Wurzeln der Vorfrucht generiert worden sind (JASSOGNE ET AL. 2009). Dikotyle Pflanzen mit allorhizem Wurzelsystem wie z.B. Luzerne, bilden allgemein stabilere Poren als Monokotyle, Pflanzen mit homorhizem Wurzelsystem wie z.B. Rohrschwengel (MATERECHERA ET AL. 1993). Die Poren von Regenwürmern und Wurzeln werden auch Bioporen genannt und zählen mit Spalten und Rissen, welche durch Quellung und Schrumpfung entstehen, zu den Makroporen (KAUTZ ET AL. 2013). PIERRET ET AL. (1999) fand über 80% der Wurzeln im Unterboden in oder angrenzend an Bioporen, denn Wurzeln folgen dem Weg des geringsten Widerstands (JASSOGNE ET AL. 2009). Auch KÖPKE (1981) und SVEISTRUP ET AL. (1997) fanden den Großteil der im Unterboden wachsenden Wurzeln in der Nähe von Bioporen. Der Grund dafür ist der geringere mechanische Widerstand und das Vorhandensein von Sauerstoff und Nährstoffen. Daher ist die Nährstoffakquise aus dem Unterboden eine Funktion der Fruchtfolge, denn Bioporensysteme sind fast ausschließlich abhängig von der Wurzelarchitektur der Feldfrüchte (STEWART ET AL. 1999). Bis zu zwei Drittel der sich im Boden vorhandenen Nährstoffe befinden sich im Unterboden. Die Erreichbarkeit dieser Nährstoffe ist jedoch durch die höhere Bodendichte, den geringeren Sauerstoffgehalt und die eingeschränkte Aktivität von

Mikroorganismen, limitiert (KAUTZ ET AL. 2013). BEARE ET AL. (1995) stellten fest, dass im Unterboden, wo die Nährstoffgehalte in der festen und flüssigen Phase und die Sauerstoffkonzentrationen in der Gasphase im Vergleich zum gepflügten Oberboden generell gering sind, die Drilosphäre, also der Boden in direkter Nähe zu den Bioporen, einen Nährstoffhotspot darstellt. Lebende Wurzeln wachsen daher in den Bioporen oft mit Kontakt zur Porenwand und entziehen dort Nährstoffe (JONES ET AL. 2004).

ATHMANN ET AL. (2013) beobachteten charakteristische Unterschiede hinsichtlich der Orientierung und des Wurzel-Boden-Kontaktes in Bioporen. So wuchsen die Wurzeln des homorhiz wachsenden Weizens zu einem großen Teil von der Seite in die Poren ein und standen in direktem Kontakt mit der Porenwand. Die Pfahlwurzeln von Malve wuchsen vornehmlich vertikal ohne direkten Kontakt zur Porenwand, nahmen aber durch eine hohe Anzahl von Seitenwurzeln Kontakt zur Porenwand auf, die dann horizontal in den angrenzenden Bulk-Boden einwuchsen.

Insgesamt wird die Aktivität der Wurzeln als Schlüsselfaktor erachtet, um einen Zugang zu den sich im Unterboden befindlichen Nährstoffen zu erhalten (KAUTZ ET AL. 2013).

1.3.7 Bedeutung der Bioporen und Lumbriciden (Regenwürmer) für den Nährstoffhaushalt des Unterbodens

Für die Verlagerung von organischen Substanzen sind die Bioporen von großer Bedeutung, sie stellen Fließwege für Wasser und darin gelöste Substanzen dar (WATT 2006, SANDER & GERKE 2009). Bis zu $65 \text{ kg N ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$ können auf diese Weise in den Unterboden verfrachtet werden (GRAFF 1967). Ein Großteil des organischen Materials wird aber auch durch die Regenwürmer selbst in den Boden transportiert. Regenwürmer spielen daher eine große Rolle in Bodenökosystemen. Sie sind durch Aufnahme, Respiration und Verdauung von organischer Substanz maßgeblich für dessen Mineralisierung verantwortlich. Die Grab- und Fressaktivitäten vergrößern die Oberfläche von organischen Substanzen und tragen erheblich zur Transformation und dem vertikalen Transport von organischem Material bei. Zudem stimulieren sie die Aktivität der Mikroorganismen und verbessern die Verfügbarkeit von Nährstoffen (ERNST ET AL. 2009). Regenwürmer ernähren sich von mikrobiell vorzersetzen Pflanzenresten an der Bodenoberfläche, die von ihnen eingesammelt und in die Röhren gezogen werden. Somit wird ein Rücktransport nährstoffreichen Materials in den Unterboden bewirkt (RAW 1962).

Die Wurmgänge sind mehr oder weniger senkrecht und können bis zu mehr als 2 m tief in den Boden reichen. Lumbriciden verbleiben in der Regel ihr gesamtes Leben in einem Gang. Das aufgenommene und verdaute Pflanzenmaterial scheiden sie wieder aus und kleiden damit ihre Wohngänge aus. Diese sind daher sehr reich an Nährstoffen. Frühere Untersuchungen haben gezeigt, dass sich die Drilosphäre generell durch hohe Nährstoffgehalte (NO_3^- , NH_4^+ , P, K, Mg und Ca) auszeichnet (GRAFF 1967; DEVLIEGHER & VERSTRAETE 1997; PARKIN & BERRY 1999; PANKHURST ET AL. 2002)

2. Methode zur Bestimmung von spez. geb. $\text{NH}_4\text{-N}$ in Böden nach BEUTERS & SCHERER (2012)

2.1 Hintergrund

In der Vergangenheit sind verschiedene Methoden zur Bestimmung von spez. geb. $\text{NH}_4\text{-N}$ in Böden entwickelt worden. Sie unterscheiden sich hauptsächlich in der Vorbehandlung der Bodenproben, die dazu dient, die organische Bodensubstanz zu zerstören und die Tonminerale aufzuspalten, damit anschließend der spez. geb. $\text{NH}_4\text{-N}$ bestimmt werden kann. BARSHAD (1951) beschrieb die „doppelte Methode“ zur Bestimmung dieser N-Fraktion in Böden. Hierbei wird eine Bodenprobe mit NaOH und eine weitere mit KOH destilliert. Die Differenz, die sich bei der späteren Bestimmung des N ergibt, wird als nicht austauschbarer $\text{NH}_4\text{-N}$ bezeichnet. Gemäß MOGILEVKINA (1964) wird spez. geb. $\text{NH}_4\text{-N}$ bestimmt, indem die Bodenprobe, je nach Gehalt an organischer Substanz, für 24 bis 72 Stunden bei 400 °C erhitzt wird. Im Anschluss erfolgt eine Stickstoffbestimmung nach Kjeldahl. Bei anderen Methoden wird Flusssäure (HF) benutzt, um die Gitterstruktur der Tonminerale aufzubrechen, nachdem die organische Substanz durch unterschiedliche Vorbehandlungen der Bodenproben entfernt wurde (RODRIGUES 1954; BREMNER 1959; SILVA & BREMNER 1966). Die Methode von SILVA & BREMNER (1966), bei der der Boden mit Kaliumhypobromid (KOB_r) vorbehandelt wird, um die organische Substanz entfernt, ist die meist akzeptierte, da diese keine offensichtlichen Fehler aufweist (SCHERER 1986).

Der Nachteil dieser Methode ist die unabdingbare Verwendung von HF. Diese höchst ätzende Säure ist unter anderem in der Lage, Glas zu lösen. Des Weiteren ist flüssige HF ein Kontaktgift, welches sehr schnell von der menschlichen Haut resorbiert wird. Einmal in die Blutbahn gelangt können die Fluoridionen den Ca- und Mg-Metabolismus nachhaltig stören und somit multiples Organversagen auslösen. Verätzungen sind zunächst beinahe schmerzlos, aber eine handtellergroße Kontamination der Haut kann zum Tode führen.

Ein weiterer Nachteil ist der extrem hohe Zeitaufwand dieser kaum automatisierten und automatisierbaren Methode.

Aus diesen Gründen war es ein Ziel dieser Arbeit, eine Methode zu entwickeln mit der in kürzerer Zeit, unter Vermeidung der gefährlichen Flusssäure und besonders auch mit der hohen Präzision der Silva-und-Bremner-Methode, der Gehalt an spez. geb. $\text{NH}_4\text{-N}$ in Bodenproben bestimmt werden kann.

2.2 Material und Methoden der neuen Methode

2.2.1 Vergleichsböden

Um die neue Methode zu verifizieren und mit der Methode von SILVA & BREMNER (1966) zu vergleichen, wurden vier deutsche Böden mit unterschiedlichem Tongehalt ausgewählt: ein Luvisol (1) auf Löss aus Meckenheim (Unterboden 30-75 cm, 50°37'47.91"N, 6°59'16.93"O), ein Cambisol (2) aus Vinxel (Unterboden 65-75 cm, 50°43'25.18"N, 7°12'12.77"O), ein

Cambisol (3) aus Uedorf (Unterboden 30-75 cm, 50°46'54.55"N, 7°1'25.59"O) und ein Alfisol (4) aus Gießen (Oberboden 0-30 cm, 50°35'54.56"N, 8°40'3.03"O). Die physikochemischen Eigenschaften dieser Böden sind in Tabelle 2.1 dargestellt. Alle Bodenproben wurden luftgetrocknet und auf 1 mm ausgesiebt.

Tab. 2.1: Physikochemische Parameter der Böden

Boden	Ton [%]	Schluff [%]	Sand [%]	C _{org} [%]	N _t [%]
1	23,9	71,4	4,8	0,42	0,04
2	49,9	41,2	9,3	0,20	0,04
3	3,4	11,0	85,7	0,23	0,04
4	30,4	59,0	6,5	4,10	2,78

2.2.2 Reagenzien

(1) Kaliumhypobromid-Lösung (KOB_r): Im Eisbad werden in 500 mL gekühlter Kaliumhydroxid-Lösung (KOH) 15 mL Brom (Br₂) unter ständigem Rühren gelöst. Die Lösung muss kurz vor der Verwendung hergestellt werden, da ansonsten zu viel Br₂ entweicht.

(2) 2 mol L⁻¹ Kaliumhydroxid-Lösung (KOH): In ca. 800 mL deionisiertem Wasser werden 112,2 g KOH gelöst. Nach dem Abkühlen wird die Lösung im Messzylinder auf 1000 mL aufgefüllt.

(3) 0,5 mol L⁻¹ Kaliumchlorid-Lösung (KCl): In 5000 mL deionisiertem Wasser werden 186 g KCl gelöst.

(4) Flusssäure-Salzsäure-Lösung (5 mol L⁻¹ HF und 1 mol L⁻¹ HCl): In einem Polyethylenmesszylinder (1000 mL) werden ca. 200 mL deionisiertes Wasser vorgelegt. Dazu werden 250 mL HF und 84 mL HCl gegeben. Mit Wasser wird dann bis zur Eichmarke aufgefüllt.

2.2.3 Standardmethode nach SILVA & BREMNER (1966)

In ein 250 mL Becherglas werden zu 1 g auf 1,0 mm gesiebten Boden 20 mL KOB_r-Lösung (1) gegeben. Nach 2 h Inkubationszeit und zwischenzeitlichem Umrühren werden 60 mL deionisiertes Wasser hinzugegeben. Auf einer Heizplatte wird die Suspension erhitzt und exakt für 5 Minuten gekocht. Anschließend über Nacht abgedeckt abkühlen und sedimentieren lassen. Später den Überstand absaugen (bzw. dekantieren) und verwerfen (unbedingt vermeiden, dass Boden mit entfernt wird). Den Bodentrückstand vollständig mit 0,5 mol L⁻¹ KCl (3) in 250 mL Zentrifugenbecher (PE, HF-beständig) überführen, mit KCl (3) auf 40 mL auffüllen und auf dem Schüttler für 5 Minuten schütteln. Bei 1.100 x g werden die Proben für 10 min zentrifugiert. Danach wird der Überstand erneut abgesaugt. Die Prozedur, 40 mL KCl zugeben,

schütteln, zentrifugieren und absaugen, wird insgesamt dreimal durchgeführt. Nach dem letzten Absaugvorgang wird der Boden mit 20 mL HF-HCl-Lösung (4) versetzt und für 20 h im Überkopfschüttler geschüttelt (ca. 40 Umdrehungen pro Minute). Die Boden-Säure-Suspension wird anschließend vollständig mit Hilfe einer Spritzflasche mit deionisiertem Wasser in Destillationskolben (nach Kjeldahl) überführt (anschließend sollten ca. 30 mL Flüssigkeit im Kolben vorliegen). Der Säureaufschluss wird nun mit dem Vapodest 5 von Gerhardt (Königswinter, Deutschland) automatisch destilliert und anschließend titriert, um den Gehalt an spez. geb. $\text{NH}_4\text{-N}$ zu bestimmen. Die Destillation erfolgt unter Zugabe von 25 mL 30%iger Natronlauge (NaOH) und dauert 5 Minuten. Das Destillat wird in einer Vorlage aus 4%iger Borsäure (H_3BO_3) aufgefangen und mit $0,005 \text{ mol L}^{-1}$ HCl titriert. Arbeiten mit HF nur unter dem Abzug durchführen und geeignete Schutzkleidung tragen!

2.2.4 Methode nach BEUTERS & SCHERER (2012)

In ein 100 mL Becherglas werden 0,5 g Boden eingewogen und mit 10 mL frisch hergestellter KOB_r-Lösung versetzt. Genauso wie bei der Methode von SILVA & BREMNER (1966) beschrieben, wird auch hier, nach einer Inkubationszeit von 2 Stunden, deionisiertes Wasser hinzugegeben (hier entsprechend 30 mL) und anschließend für 5 Minuten gesiedet. Der über Nacht entstandene klare Überstand wird abgesaugt und verworfen. Nun erfolgt, im Gegensatz zur Standardmethode, die Trocknung der Bodenprobe im Trockenschrank bei 60 °C. Im Anschluss wird die Probe mit einem Glasstab wieder homogenisiert und 30 mg in Zinnkapseln eingewogen. Zur Bestimmung des Gehaltes an spez. geb. NH_4^+ wird ein CNS-Elementaranalysator (EuroEA 3000, HEKAtech, Wegberg) mit einem Wärmeleitfähigkeitsdetektor (TCD: thermal conductivity detector) eingesetzt, welcher den noch in der Probe verbliebenen Stickstoffanteil misst. Durch die spontane Verbrennung bei 1000 °C werden die Tonminerale, welche das spez. geb. NH_4^+ enthalten, zerstört. Diese Aufspaltung erfolgt bei der Methode nach SILVA & BREMNER (1966) durch die HF-HCl-Lösung.

2.2.5 ¹⁵N-Bestimmung in spez. geb. $\text{NH}_4\text{-N}$

Durch die Entwicklung der neuen Methode durch BEUTERS & SCHERER (2012) ist es nun auch möglich, spez. geb. $^{15}\text{NH}_4\text{-N}$ einfacher zu bestimmen. Nach der Methode von SILVA & BREMNER (1966) wird das, nach der Gesamt- $\text{NH}_4\text{-N}$ -Bestimmung titrierte Destillat des Bodenaufschlusses mit HCl angesäuert und vollständig eingedampft. In dem verbleibenden Rückstand kann nun mittels Emissionsspektrometrie das ^{15}N bestimmt werden (DOU & STEFFENS 1995). Nach der neuen Methode kann man die Bodenproben so behandeln, wie es für die oben dargestellte Messung am Elementaranalysator beschrieben ist. Zur ^{15}N -Analyse gibt man die Probe stattdessen in ein Massenspektrometer (GC-MS "ANCA SL-2020", PDZ Europa Ltd., Crewe, UK.). Hierbei ist zu beachten, dass die Halogenfalle des Massenspektrometers mit mehr Silberwolle ausgestattet werden sollte, da sich in den mit KOB_r vorbehandelten Proben mehr Br befindet als bei natürlichen Bodenproben.

2.2.6 Statistische Methoden

Die statistische Analyse erfolgte mit IBM SPSS Statistics (Version 20, Chicago, USA). Alle gemessenen Ergebnisse wurden zunächst mittels klassischer deskriptiver Statistik beschrieben (arithmetisches Mittel und Standardabweichung). Die Werte aus dem Vergleich der SILVA-&-BREMNER-Methode (1966) mit der BEUTERS-&-SCHERER-Methode (2012) zur Bestimmung von spez. geb. $\text{NH}_4\text{-N}$ in Böden und die Ergebnisse zum Einfluss des Körnungsgrades der Böden wurden zunächst mit dem Kolmogorov-Smirnov-Test (K-S-Test) auf Normalverteilung überprüft. Es folgte ein doppelter t-Test ($\alpha=5\%$) zum Vergleich der Mittelwerte der beiden Stichproben, zusammen mit einem Levene-Test zur Beurteilung der Gleichheit der Varianzen.

2.3 Ergebnisse und Diskussion

Vor der Etablierung der neuen Methode zur Untersuchung von Bodenproben aus Feldversuchen im Labor wurden die Ergebnisse beider Methoden miteinander verglichen. Dafür wurden vier Böden mit unterschiedlichen Tongehalten verwendet. Die Gehalte reichten von 3,4% bis 49,9% (Tab. 2.1). Bei der Analyse der Böden mit der Methode von SILVA & BREMNER (1966) konnten wir Werte zwischen 81,7 mg und 242,3 mg spez. geb. $\text{NH}_4\text{-N}$ pro kg Boden finden. Die neu entwickelte Methode brachte Ergebnisse von 91,0 mg und 240,0 mg spez. geb. $\text{NH}_4\text{-N}$ pro kg Boden (Abb. 2.1). Jeder einzelne Wert pro Methode ist das arithmetische Mittel aus 21 Wiederholungen bei den Böden 1-3 beziehungsweise aus 38 Wiederholungen bei Boden 4. Gemäß Abbildung 2.1 weisen die Ergebnisse der Analyse des Gehalts an spez. geb. $\text{NH}_4\text{-N}$ beider Methoden bei den Böden mit relativ hohem Tongehalt (Böden 1, 2 und 4) keine signifikanten Unterschiede auf. Bei Boden 3, jenem mit dem geringsten Tongehalt, war das Ergebnis der Methode nach BEUTERS & SCHERER (2012) signifikant höher als der Wert der Methode nach SILVA & BREMNER (1966). Zum einen kann sich diese Differenz aus der Unterschreitung der Nachweisgrenze des verwendeten CNS-Analysators (EuroEA 3000, HEKAtech, Wegberg) ergeben. Das Gerät hat ein Detektionsminimum von 0,01% N (100 mg N kg^{-1} Boden). Boden 3 hat jedoch im Durchschnitt nur 0,009% N (90 mg spez. geb. $\text{NH}_4\text{-N}$ kg^{-1} Boden). Daher ist es sinnvoll nur Böden mit einem ausreichenden Gehalt an spez. geb. $\text{NH}_4\text{-N}$ (abzuschätzen am Tongehalt) mit der neuen Methode zu analysieren. Bei CNS-Analysatoren mit einem niedrigeren Detektionsminimum wäre diese Aussage entsprechend hinfällig. Es ist zudem auch möglich, die entsprechende Bodenprobe mit einer definierten Menge an N anzureichern, um das Detektionslimit des Messgerätes zu erreichen.

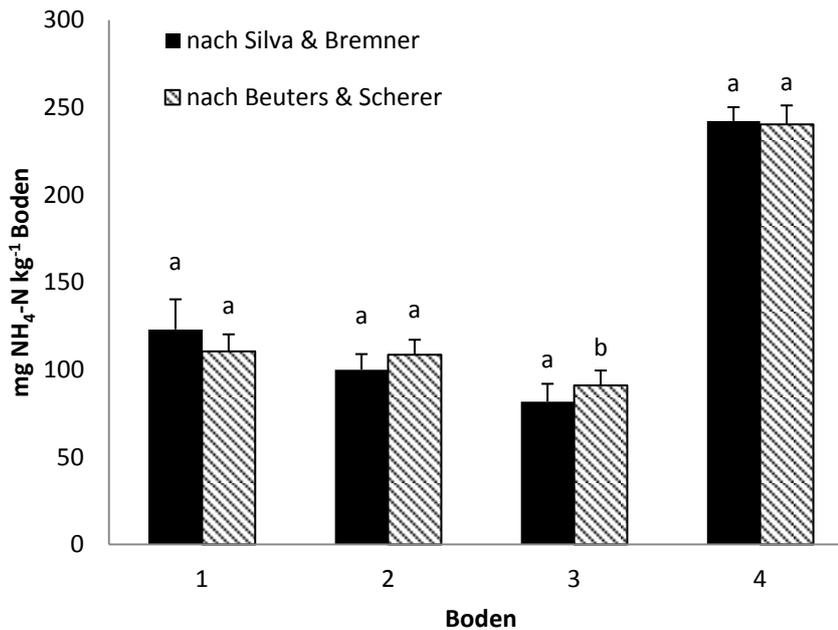


Abb. 2.1: Vergleich der Standardmethode (SILVA & BREMNER 1966) und der neuen Methode (BEUTERS & SCHERER 2012) zur Bestimmung von spez. geb. NH₄-N. Fehlerbalken: Standardabweichung. Boden 1: p=0,205; n=21; Boden 2: p=0,264; n=21; Boden 3: p=0,013; n=21; Boden 4: p=0,347; n=38. Ergebnisse, die mit gleichem Buchstaben markiert sind, sind nicht signifikant unterschiedlich voneinander.

Von der Vermeidung der Flusssäure abgesehen, ergibt sich mit der Methode nach BEUTERS & SCHERER (2012) ein weiterer Vorteil: sie ist zeitsparend. Pro Zeiteinheit lässt sich der Probendurchsatz um das 2,5-fache steigern. Der Hauptgrund hierfür ist, dass die zeitaufwändigen Waschdurchgänge wegfallen. Auch Destillation und Titration, welche bei der Standardmethode 6-8 Minuten pro Probe in Anspruch nehmen, werden hinfällig. Zwar nimmt die Messung am CNS-Analysator bzw. am Massenspektrometer bei der neuen Methode ähnliche Messzeiten in Anspruch, jedoch muss das Gerät nicht kontinuierlich überwacht und jede Probe einzeln per Hand eingegeben werden.

Ein weiterer großer Vorteil, welcher aus der neuen Methode resultiert, ist dass hiermit die ¹⁵N-Bestimmung in spez. geb. NH₄-N deutlich vereinfacht und ebenso verkürzt werden kann. Für bestimmte Versuchsanstellungen ist es nötig, die Zwischenschichten der Tonminerale mit ¹⁵NH₄-N zu markieren, um zwischen dem nativ spez. geb. NH₄-N und jenem zu unterscheiden, welcher durch Applikation von ammoniumbeinhaltenden oder -bildenden Düngern sowie durch Pflanzenreste und organische Substanz in den Boden gelangt (DOU & STEFFENS 1995). Die bisherige Methode sieht hierfür einen zeitaufwendigen und komplizierten Prozess vor. Durch die neue Methode kann eine mit ¹⁵NH₄-N markierte Bodenprobe nach der oben beschriebenen Vorbehandlung direkt in Zinnbehälter eingewogen und anschließend mit

einem Massenspektrometer (hier: GC-MS "ANCA SL-2020", PDZ Europa Ltd., Crewe, UK.) gemessen werden.

Für den CNS-Analysator und das Massenspektrometer sollten Bodenproben möglichst fein gesiebt sein. Da aber für die Bestimmung nach SILVA & BREMNER (1966) eine Korngröße von 1 mm ausreicht, waren bereits gezogene Bodenproben entsprechend aufgearbeitet. Diese sollten aber nun nach der neu entwickelten Methode gemessen werden. Um Arbeitszeit und Geld einzusparen, habe ich eine Vergleichsmessung verschiedener Korngrößen durchgeführt. Dazu wurde ein aliquoter Teil des Bodens 1 auf 1 mm ausgesiebt, ein weiterer Teil wurde gemahlen und auf 300 µm ausgesiebt. Die Analyse beider Partikelgrößen erfolgte sowohl nach der neuen Methode als auch nach Standardmethode von SILVA & BREMNER (1966). Es soll darauf hingewiesen werden, dass bei diesem Versuch der natürliche Gehalt an spez. geb. $\text{NH}_4\text{-N}$ durch die Behandlung mit NH_4Cl -Lösung, auf 220 mg kg^{-1} Boden erhöht wurde. Wie in Abbildung 2.2 zu erkennen ist, konnten keine signifikanten Unterschiede, sowohl zwischen den Partikelgrößen als auch zwischen den beiden Analysemethoden, gefunden werden. Bereits auf 1 mm ausgesiebte Bodenproben konnten also ohne weitere Vermahlung nach der neuen Methode analysiert werden.

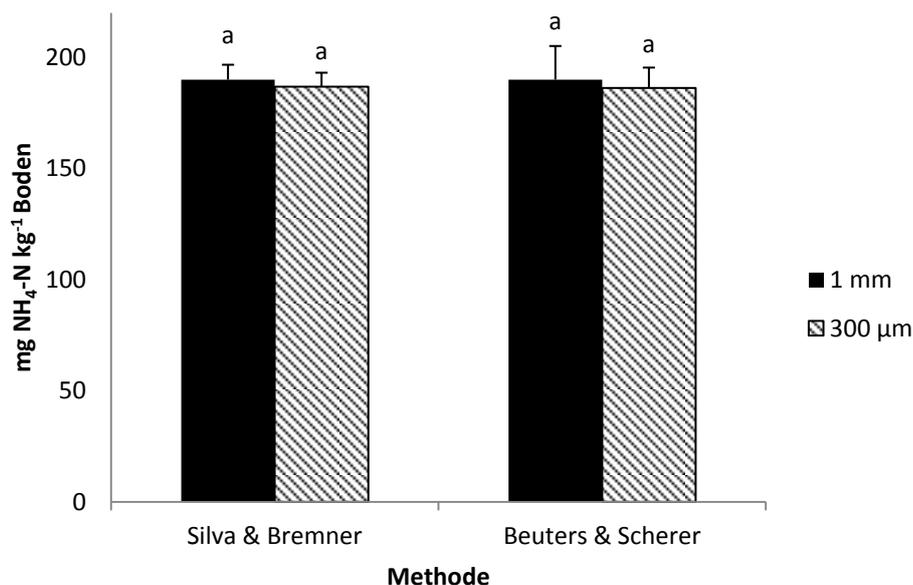


Abb. 2.2: Einfluss der Partikelgröße von Boden 1 auf den Gehalt von spez. geb. $\text{NH}_4\text{-N}$. Fehlerbalken: Standardabweichung. Original Methode $p=0,520$; $n=4$; neue Methode $p=0,645$. Ergebnisse, die mit gleichem Buchstaben markiert sind, sind nicht signifikant unterschiedlich voneinander.

Zusammenfassend ist zu sagen, dass die Methode nach BEUTERS & SCHERER (2012) zeitsparend und dass die Benutzung der gefährlichen Flusssäure hinfällig ist. Die Analyseergebnisse bei Böden mit einem Gehalt an spez. geb. $\text{NH}_4\text{-N}$ höher als 100 mg kg^{-1} Boden unterscheiden sich nicht von denen der SILVA-&-BREMNER-Methode (1966).

3. Material und Methoden

3.1 Beschreibung des Feldversuchsstandortes

Die Untersuchungen wurden im Rahmen des DFG-Projektes FOR 1320 „Crop Sequence and Nutrient Acquisition from the Subsoil“ (Fruchtfolge und Nährstoffakquisition aus dem Unterboden) durchgeführt. Das Projekt war in 10 Unterprojekte eingeteilt, die hier einzeln nicht genauer beschrieben werden. Ein Teil der Versuche, die für diese Arbeit durchgeführt wurden, waren Gemeinschaftsexperimente, auf die an entsprechender Stelle näher eingegangen wird. Diese Arbeit ist das Ergebnis des Unterprojektes 8 mit dem Titel „Spezifisch gebundenes Ammonium: Signifikanz für die Stickstoffernährung von Nutzpflanzen“.

Mittelpunkt des Großprojektes und auch des Unterprojektes war der Zentrale Feldversuch „CeFiT“ (Central Field Trial), welcher auf Versuchsflächen des landwirtschaftlichen Versuchsbetriebes Klein-Altendorf der Universität Bonn durchgeführt wurde. Der Standort liegt auf der Hauptterrasse des Rheins im Süden der Niederrheinischen Bucht bei Rheinbach (Trial A, Parzelle Nr. 4: 50°37'8.5"N, 6°59'25.4"O). Beim Boden des Standortes handelt es sich um eine schwach erodierte Normparabraunerde aus Löss (Deutsche Bodensystematik: „KA5“, AG Boden 2005), bestehend aus überwiegend lehmigem Schluff und teils tonigem Lehm, mit einer Bodenzahl 85-90 und einer Ackerzahl von 93. Die Hauptbestandteile und physikochemischen Bodeneigenschaften des Referenzprofils sind in Tabelle 3.1 dargestellt (PÄTZOLD ET AL. 2010). Der jährliche Durchschnittsniederschlag am Standort beträgt 622 L m⁻², die Durchschnittslufttemperatur liegt bei 10,6 °C und die Durchschnittsbodentemperatur in 20 cm Tiefe bei 12,2 °C (KNAUT 2010).

Tab. 3.1: Bodenbestandteile und physikochemische Bodeneigenschaften des Referenzprofils (PÄTZOLD ET AL. 2010). KA5 = bodenkundliche Kartierungsanleitung, 5. Auflage; OC = organischer Kohlenstoff.

Tiefe [cm]	Horizonte nach KA5	Textur			Bodendichte [g cm ⁻³]	OC [g kg ⁻¹]	N _{total} [g kg ⁻¹]	pH CaCl ₂	
		S [%]	U [%]	T [%]					nach KA5
0-27	Ap	8	77	15	Ut3	1,29	10,0	1,02	6,5
27-41	Al+Bt	5	74	20	Ut4	1,32	4,6	0,55	6,9
41-75	Bt1	4	69	27	Tu4	1,42	4,5	0,51	6,9
75-87	Bt2 (h)	4	65	30	Tu4	1,52	3,9	0,50	6,9
87-115	Bvt	5	70	25	Ut4	1,52	2,5	0,34	7,1

Die Forschergruppe untersuchte die Nährstoffaneignung verschiedener Nutzpflanzen aus dem Unterboden unter Einfluss der Fruchtfolge. Ziel war es, die Mengen an Nährstoffen aus dem Unterboden zu quantifizieren und Transformations- und Verlagerungsprozesse zu beschreiben. Ebenso galt es die Bioporengenease zu ergründen und deren Beitrag zur Nährstoffakquisition zu beleuchten. Dazu wurden verschiedene Vorfruchtarten mit unterschiedlicher Anbaudauer kultiviert: Luzerne (*Medicago sativa* L., cv. „Planet“), Wegwarte

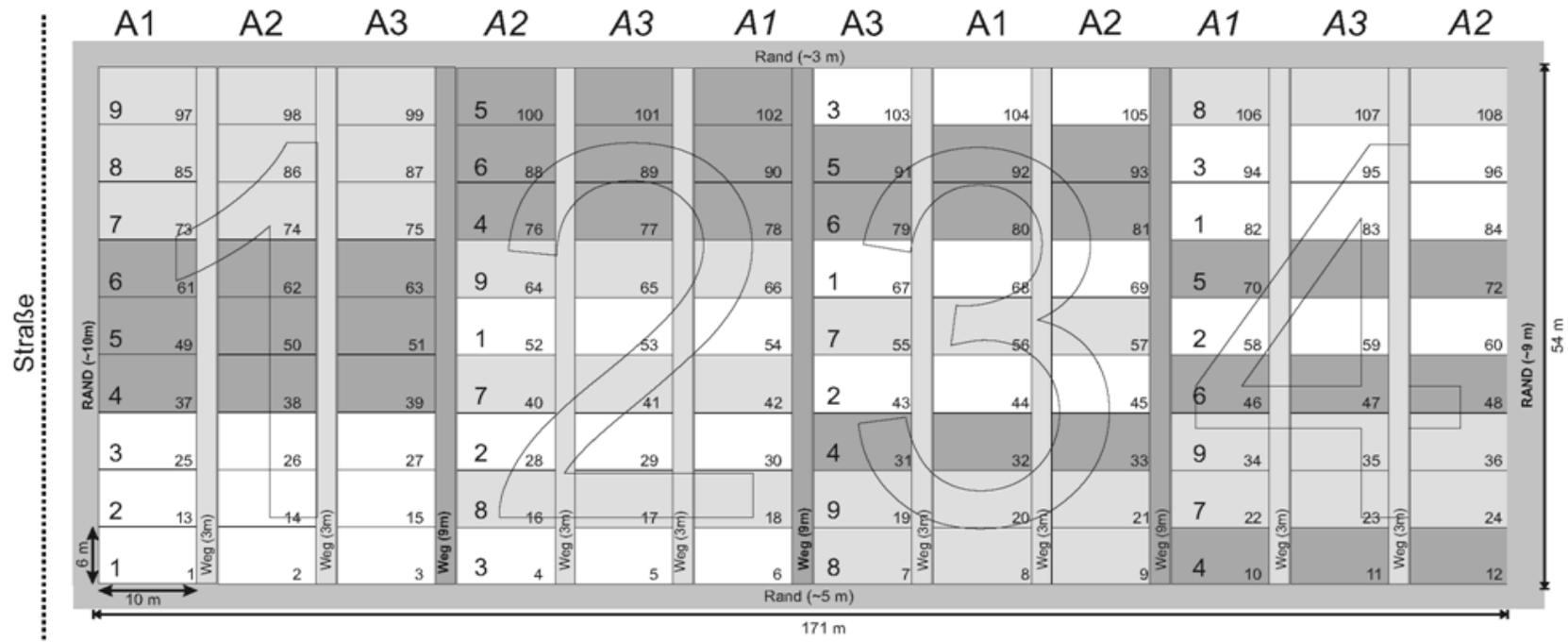
(*Chichorium intybus* L., cv. „Puna“) und Rohrschwengel (*Festuca arundinacea* SCHREB., cv. „Hykor“), jeweils ein-, zwei- und dreijährig. Nach den Vorfruchtjahren wurden Hauptfrüchte mit unterschiedlichen Wurzelsystemen (homorhiz vs. allorhiz) angebaut: Im ersten Nachfruchtjahr wurde Sommerweizen (*Triticum aestivum* L., cv. „Scirocco“) und Futtermalve (*Malva sylvestris* L., cv. „Sylva“) und im zweiten Wintergerste (*Hordeum vulgare* L., cv. „Scarlett“) bzw. Winterraps (*Brassica napus* L., cv. „Visby“) angebaut. Der Versuchsplan mit den einzelnen Varianten ist in Tabelle 3.2 dargestellt, dort findet man, zu den oben genannten, noch zwei weitere Nachfruchtjahre, welche aber für die in dieser Dissertation beschriebenen Experimente irrelevant sind.

Tab. 3.2: Variantenplan des CeFiT (KAUTZ 2010)

Variante	Jahre						
	1. (2007/09)	2. (2008/10)	3. (2009/11)	4. (2010/12)	5. (2011/13)	6. (2012/14)	7. (2013/15)
1	S-Roggen	Hafer	Luzerne	Futtermalve	W-Gerste	W-Roggen	Hafer
2	S-Roggen	Hafer	Luzerne	S-Weizen	W-Raps	W-Roggen	Hafer
3	S-Roggen	Hafer	Luzerne	S-Weizen	W-Gerste	W-Raps	Hafer
4	S-Roggen	Luzerne	Luzerne	Futtermalve	W-Gerste	W-Roggen	Hafer
5	S-Roggen	Luzerne	Luzerne	S-Weizen	W-Raps	W-Roggen	Hafer
6	S-Roggen	Luzerne	Luzerne	S-Weizen	W-Gerste	W-Raps	Hafer
7	Luzerne	Luzerne	Luzerne	Futtermalve	W-Gerste	W-Roggen	Hafer
8	Luzerne	Luzerne	Luzerne	S-Weizen	W-Raps	W-Roggen	Hafer
9	Luzerne	Luzerne	Luzerne	S-Weizen	W-Gerste	W-Raps	Hafer
10	S-Roggen	Hafer	Wegwarte	Futtermalve	W-Gerste	W-Roggen	Hafer
11	S-Roggen	Hafer	Wegwarte	S-Weizen	W-Raps	W-Roggen	Hafer
12	S-Roggen	Hafer	Wegwarte	S-Weizen	W-Gerste	W-Raps	Hafer
13	S-Roggen	Wegwarte	Wegwarte	Futtermalve	W-Gerste	W-Roggen	Hafer
14	S-Roggen	Wegwarte	Wegwarte	S-Weizen	W-Raps	W-Roggen	Hafer
15	S-Roggen	Wegwarte	Wegwarte	S-Weizen	W-Gerste	W-Raps	Hafer
16	Wegwarte	Wegwarte	Wegwarte	Futtermalve	W-Gerste	W-Roggen	Hafer
17	Wegwarte	Wegwarte	Wegwarte	S-Weizen	W-Raps	W-Roggen	Hafer
18	Wegwarte	Wegwarte	Wegwarte	S-Weizen	W-Gerste	W-Raps	Hafer
19	S-Roggen	Hafer	Rohrschwengel	Futtermalve	W-Gerste	W-Roggen	Hafer
20	S-Roggen	Hafer	Rohrschwengel	S-Weizen	W-Raps	W-Roggen	Hafer
21	S-Roggen	Hafer	Rohrschwengel	S-Weizen	W-Gerste	W-Raps	Hafer
22	S-Roggen	Rohrschwengel	Rohrschwengel	Futtermalve	W-Gerste	W-Roggen	Hafer
23	S-Roggen	Rohrschwengel	Rohrschwengel	S-Weizen	W-Raps	W-Roggen	Hafer
24	S-Roggen	Rohrschwengel	Rohrschwengel	S-Weizen	W-Gerste	W-Raps	Hafer
25	Rohrschwengel	Rohrschwengel	Rohrschwengel	Futtermalve	W-Gerste	W-Roggen	Hafer
26	Rohrschwengel	Rohrschwengel	Rohrschwengel	S-Weizen	W-Raps	W-Roggen	Hafer
27	Rohrschwengel	Rohrschwengel	Rohrschwengel	S-Weizen	W-Gerste	W-Raps	Hafer

Es wurden zwei identische, aber zeitlich um zwei Jahre versetzte Versuche (A, B) im randomisierten Blockdesign mit je 4 Feldwiederholungen angelegt. Versuch A wurde bereits 2007 angelegt, Versuch B entsprechend 2009. Insgesamt gab es pro Versuch 108 Parzellen, je mit den Abmessungen 6 m x 10 m. In Abbildung 3.1 ist der genauen Lageplan für Versuch (Trial) A dargestellt.

Mit den drei Vorfruchtarten und der unterschiedlichen Anbaudauer sollte zum einen der Einfluss auf die Bioporengeneese beobachtet werden, welche einerseits durch die Bildung von Wurzelgängen durch Pflanzen und andererseits durch Regenwürmer (*Lumbricus terrestris*) stattfindet. Zum anderen sollte die Nährstoffdynamik im Boden erforscht werden. In dieser Dissertation liegt das Hauptaugenmerk auf der Veränderung des Gehaltes an spez. geb. NH_4^+ in den Zwischenschichten der Tonminerale während der Vegetationsperiode und auf den darauf einflussnehmenden Faktoren. Neben den Feldversuchen wurden auch Gefäßversuche durchgeführt, für die Boden aus dem Feldversuch verwendet wurde.



Varianten

A= Vorfrucht

A1= Luzerne

A2= Wegwarte

A3= Rohrschwengel

B= Nutzungsdauer (B1= 1-jährig, B2=2-jährig, B3= 3-jährig)

C= Nachfrucht

C1=Start - Raps - Getreide - Getreide

C2=Start - Getreide - Raps - Getreide

C3=Start - Getreide - Getreide - Raps

1=B1 + C1

2=B1 + C2

3=B1 + C3

4=B2 + C1

5=B2 + C2

6=B2 + C3

7=B3 + C1

8=B3 + C2

9=B3 + C3

CEFIT I (Klein-Altendorf seit 2007)

3. Nutzungsjahr (Aussaart 2007)

2. Nutzungsjahr (Aussaart 2008)

1. Nutzungsjahr (Aussaart 2009)

Ver.2009.2

Abb. 3.1: Versuchsplan CeFIT Trial A Klein-Altendorf, im Jahr 2011 (KAUTZ 2010)

3.2 Feldversuche

3.2.1 Einfluss des Wurzelsystems und der Stickstoffversorgung des Oberbodens auf die Dynamik des spez. geb. NH_4^+

Dynamik des spez. geb. NH_4^+ in Abhängigkeit vom Wurzelsystem

Bekannt ist, dass spez. geb. NH_4^+ im Oberboden während der Vegetationsperiode einer gewissen Dynamik unterliegt. Wie hoch die Gehalte im Unterboden sind und wie sie sich während der Wachstumsphase verändern, sollte durch den im Folgenden beschriebenen Versuch erforscht werden. Auch der Einfluss der Fruchtfolge mit Pflanzen unterschiedlicher Wurzelsysteme (homorhiz versus allorhiz) sollte erfasst werden. Dazu wurden in den Jahren 2010 und 2011 monatlich Bodenproben aus dem in Abschnitt 3.1 genannten Feldversuch entnommen. Im Jahr 2010 wurden die Varianten 7 und 8 (Tab. 3.3) beprobt. Auf den entsprechenden Parzellen wurde dreijährig Luzerne als Vertreter der Pflanzen mit allorhizer Wurzelarchitektur als Vorfrucht angebaut. Im Beprobungsjahr (2010) wuchsen dort die Hauptfrüchte Futtermalve mit allorhizem und Sommerweizen mit homorhizem Wurzelsystem. Ebenso wurden die beiden Varianten 25 und 26 (Tab. 3.3) beprobt, bei denen dreijährig Rohrschwengel als Pflanze mit homorhizem Wurzelsystem als Vorfrucht angebaut wurde. Die Hauptfrüchte waren gleich denen der Varianten 7 und 8 (s.o.). Im Folgejahr, 2011, wurden wieder die Varianten mit den gleichen Vorfrüchten wie im 2010 ausgewählt, ebenfalls mit dreijähriger Anbaudauer. Im vierten Jahr wurde dann bei allen vier Varianten Sommerweizen angebaut. Darauf folgte im Probenahmejahr (2011) Wintergerste bzw. Winterraps, sprich wieder je ein Vertreter von Pflanzen mit homorhizer und allorhizer Wurzelarchitektur.

Tab. 3.3: Ausschnitt des Variantenplans des CeFiT (KAUTZ 2010)

Variante	Jahr				
	1. (2007)	2. (2008)	3. (2009)	4. (2010)	5. (2011)
7	Luzerne	Luzerne	Luzerne	Futtermalve	W-Gerste
8	Luzerne	Luzerne	Luzerne	S-Weizen	W-Raps
9	Luzerne	Luzerne	Luzerne	S-Weizen	W-Gerste
25	Rohrschwengel	Rohrschwengel	Rohrschwengel	Futtermalve	W-Gerste
26	Rohrschwengel	Rohrschwengel	Rohrschwengel	S-Weizen	W-Raps
27	Rohrschwengel	Rohrschwengel	Rohrschwengel	S-Weizen	W-Gerste

Die Bodenproben wurden aus je drei Tiefenstufen entnommen: 0-45 cm (Stufe I), 45-75 cm (Stufe II) und 75-105 cm (Stufe III) (gemessen ausgehend von der Bodenoberfläche), wobei Stufe I den Oberboden repräsentiert und die Stufen II und III den Unterboden. 2010 wurden am 10.03., 12.04., 14.05., 16.06., 14.07. und 12.08. Bodenproben gezogen. Im folgenden Jahr,

2011, erfolgten die Probenahmen am 24.03., 27.04., 25.05. 27.06. und am 27.07. Pro Parzelle wurde ein Pürckhauer Bohrstock (120 cm Schaftlänge) je zweimal eingeschlagen. Die so entnommenen Proben wurden dann zu einer Mischprobe vereinigt. Im Anschluss wurde der Boden luftgetrocknet, zerkleinert und auf 1 mm Korngröße abgesiebt. Die Bestimmung des Gehaltes an spez. geb. NH_4^+ wurde in den Proben aus dem Anbaujahr 2010 nach SILVA & BREMNER (1966) durchgeführt (siehe Abschnitt 2.2.3). Die große Probenanzahl und die langwierige Analyseverfahren regte Gedanken zur Entwicklung einer neuen Methode an. Wie in Abschnitt 2.2.4 beschrieben, wurde eine neue Methode entwickelt und im Labor etabliert, so dass die 2011er Proben mittels der neuen Methode nach BEUTERS & SCHERER (2012) analysiert werden konnten.

Einfluss einer gesteigerten N-Versorgung auf die Mobilisierung von spez. geb. NH_4^+

Ziel dieses Versuchs war es herauszufinden, inwiefern die Dynamik des spez. geb. NH_4^+ den verschiedenen Bodentiefen durch unterschiedlich hohe Stickstoffgaben im Bereich der oberen Rhizosphäre beeinflusst wird. Für diesen Versuch wurden zwei verschiedene Fruchtfolgevarianten ausgewählt, zum einen dreijährige Luzerne als Vorfrucht und anschließend Sommerweizen als Hauptfrucht, zum anderen dreijährig Wegwarte, ebenfalls gefolgt von Sommerweizen. Aus versuchstechnischen Gründen konnte keine Vorfrucht mit homorhizem Wurzelsystem ausgewählt werden, was den Versuch „*Dynamik des spez. geb. NH_4^+ in Abhängigkeit vom Wurzelsystem*“ sinnvoll ergänzt hätte. Die 6 m x 10 m großen Parzellen wurden in 5 Unterparzellen aufgeteilt mit je 6 m x 2 m Größe. Die Unterparzellen erhielten Stickstoffgaben zwischen 0 und 160 kg N ha⁻¹. Für die Beantwortung der Versuchsfrage wurden jedoch nur drei von fünf Düngestufen ausgewählt: 0, 80 und 160 kg N ha⁻¹. Die Düngestufen waren randomisiert auf den einzelnen Parzellen verteilt. Beprobte wurden je Variante insgesamt vier Feldwiederholungen. Es gab vier Probenahmetermine im Jahr 2010: 05.06., 23. 06., 22.07. und 16.08.. Die Probenahme erfolgte kongruent zu der Probenahmetechnik und Probenaufbereitung des unter Abschnitt *Dynamik des spez. geb. NH_4^+ in Abhängigkeit vom Wurzelsystem* beschriebenen Versuchs. Im Labor wurde dann der Gehalt an spez. geb. NH_4^+ mit der Methode nach SILVA & BREMNER (1966) bestimmt (siehe Abschnitt 2.2.3).

Statistik

Für die statistische Analyse der erhobenen Daten wurde das Programm IBM SPSS Statistics (Version 21, Chicago, USA) verwendet. Alle gemessenen Ergebnisse wurden zunächst mittels klassischer deskriptiver Statistik beschrieben (arithmetisches Mittel, Standardabweichung und Standardfehler). Um festzustellen, ob Varianzgleichheit besteht, wurde der Levene-Test durchgeführt. Zum Vergleich der Mittelwerte bei den Resultaten der regulären Proben von 2010 und 2011 wurde ein t-Test angewendet ($\alpha=0,05$) und bei den Ergebnissen der Düngesteigerung wurde bei Varianzgleichheit ein Tukey-Test ($\alpha=0,05$) genutzt, bei nicht vorliegender Varianzgleichheit erfolgte ein Tamhane-Test ($\alpha=0,05$).

3.2.2 Verarmung der Rhizosphäre des Unterbodens an spez. geb. $^{15}\text{NH}_4^+$

Einführung

Da bekannt ist, dass der Pool des spez. geb. NH_4^+ im Laufe der Vegetationsperiode aufgrund von Re-fixierung wieder aufgefüllt wird, wurde in diesem Versuch Boden mit $^{15}\text{NH}_4^+$ markiert, in Diffusionstaschen verpackt und im Unterboden unter Pflanzen mit unterschiedlichem Wurzelsystem inkubiert. Nach der Ernte der Pflanzen wurden die Taschen wieder ausgegraben und die Menge an verbliebenem gesamten spez. geb. NH_4^+ und der ^{15}N -Anteil bestimmt.

Diffusionstaschen und Versuchsboden

Die Diffusionstaschen bestanden aus dunkelgrauen Hart-PVC-Rohren mit einem Innendurchmesser von 81 mm, einem Außendurchmesser von 90 mm und einer Höhe von 30 mm. Die beiden offenen Seiten wurden mit einer Gaze (1 μm) bedeckt, welche mit passenden, in dünne Ringe geschnittenen PVC-Muffen gespannt und befestigt wurde (Abb. 3.2). Diese Gaze war durchlässig für Wasser und darin gelöste Nährstoffe, verhinderte aber das Einwachsen von Pflanzenwurzeln und Mykorrhiza.

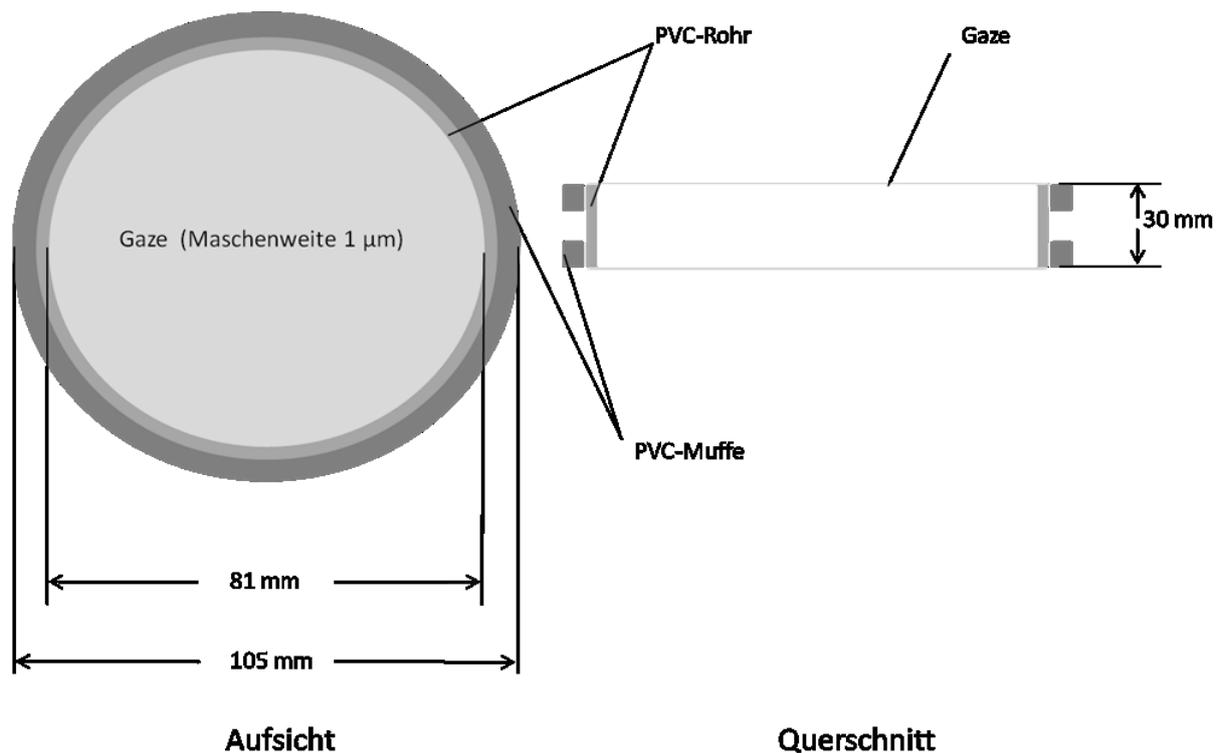


Abb. 3.2: Schemazeichnung einer Diffusionstasche: Aufsicht und Querschnitt.

Der Versuchsboden, welcher in die Diffusionstaschen eingefüllt wurde, stammt ebenfalls aus dem in Abschnitt 3.1 beschriebenen Feldversuch. Er wurde 2010 nach der Ernte des Sommerweizens aus einer Bodentiefe von 45-75 cm entnommen. Aus früheren Untersuchungen geht hervor, dass nach der Ernte von Getreide der Gehalt an spez. geb. NH_4^+

im Boden am geringsten ist (SCHERER 1986). Das war wichtig, denn der Boden wurde im Anschluss mit $^{15}\text{N-NH}_4^+$ belegt und je weniger Bindungsstellen belegt waren, desto mehr standen für das markierte NH_4^+ zur Verfügung. Insgesamt wurden 20 Diffusionstaschen mit jeweils 200 g trockenem Boden befüllt.

Markierung des Bodens

Der Boden wurde nach der Entnahme getrocknet und auf 1 mm Korngröße gesiebt. Zur Markierung des Bodens wurde dieser dann mit einer ^{15}N -Ammoniumchloridlösung behandelt (Masseverhältnis Boden zu Lösung = 1:1), welche 120 mg N L^{-1} enthielt und zu 98 at.% mit ^{15}N angereichert war. Die Suspension wurde anschließend für 36 h bei $45 \text{ }^\circ\text{C}$ im Trockenschrank inkubiert und zwischendurch intensiv geschüttelt. Um überschüssige Lösung zu entfernen, wurde der Boden nach der Inkubationszeit in eine Säule gefüllt und der wässrige Überstand abgesaugt. Um nicht gebundenes NH_4^+ auszutauschen, wurde der Boden mit $0,5 \text{ mol L}^{-1} \text{ CaCl}_2$ -Lösung perkoliert. Das geschieht normalerweise mit einer KCl-Lösung, da K aber zur Kontraktion der Tonminerale führt und somit eine Freisetzung im späteren Versuch behindern würde, musste hier eine Alternative angewendet werden. Letztlich wurde der Überschuss an CaCl_2 mit deionisiertem Wasser herausgewaschen. Der Boden wurde dann bei $30 \text{ }^\circ\text{C}$ getrocknet und anschließend auf 2 mm ausgesiebt, bevor er in die Diffusionstaschen gefüllt wurde. Durch die Belegung der Tonminerale konnte der Gehalt an spez. geb. $\text{NH}_4\text{-N}$ von $125,0$ auf $217,2 \text{ mg kg}^{-1}$ Boden erhöht werden, der Anteil an ^{15}N in dieser Stickstofffraktion betrug $16,0 \text{ at.}\%$.

Einbau der Diffusionstaschen

Am 06.04.2011 wurden die Taschen in zwei Feldwiederholungen unter Winterraps (Variante 17, Tab. 3.3) bzw. Wintergerste (Variante 18, Tab. 3.3) in 60 cm Bodentiefe eingebaut. Bei den beiden ausgewählten Winterungen handelt es sich um je einen Vertreter von Pflanzen mit allorhizem bzw. mit homorhizem Wurzelsystem. Die vorherige Fruchtfolge beider Varianten war die gleiche. Der Einbau der Taschen erfolgte von einer Profilwand aus, wozu eine Grube am Rand der entsprechenden Parzelle ausgehoben wurde. Ein speziell dafür entwickelter Stechzylinder ($107 \times 200 \times 30 \text{ mm}$) wurde auf 60 cm Bodentiefe horizontal eingeschlagen und schuf so eine Aussparung mit 15 cm Tiefe, in die eine Diffusionstasche exakt hineinpasste und direkten Bodenkontakt hatte (Abb. 3.3). Die Tasche befand sich waagrecht unter den Pflanzen, so dass deren Wurzeln bis auf die Gazeschicht wachsen konnten. Auf 1 m in der Breite wurden 5 Diffusionstaschen nebeneinander platziert. Die Aussparungen wurden wieder mit Boden verfüllt, ebenso die gesamte Grube. Letztlich wurde die Lage der einzelnen Diffusionstaschen noch mittels GPS eingemessen, um sie am Ende der Vegetationsperiode wiederfinden zu können.



Abb. 3.3: Fotoaufnahme des Diffusionstascheneinbaus. Rechts: rechteckiger Stechzylinder, Mitte: Aussparung für die Diffusionstasche, links: Diffusionstasche vor vollständigem Einschub in die Aussparung.

Entnahme der Diffusionstaschen und Probenahme

Nach der Ernte der Hauptfrüchte wurden die Diffusionstaschen wieder ausgegraben. Dabei wurde die ursprüngliche Orientierung der Öffnungen beibehalten (oben vs. unten) markiert. Die Proben wurden bis zur weiteren Bearbeitung bei -18 °C tiefgefroren.

Später wurden die Bodenzylinder angetaut und mit einem scharfen Keramikmesser in jeweils 11 Scheiben geschnitten. Die ersten vier Scheiben, von den Gazeoberflächen her gesehen, hatten je eine Stärke von 2 mm, die jeweils fünfte war Scheibe 4 mm und die mittlere Scheibe 6 mm dick. Um exakte Schnitte zu erhalten, wurde die Gaze an beiden Seiten der Diffusionstaschen entfernt und unter die nach unten zeigende Öffnung eine 2 mm starke Kunststoffplatte gelegt. Diese drückte dann den Boden zur anderen Seite der Tasche hinaus, so dass man mit dem Messer entlang des Randes des PVC-Rohres schneiden konnte. Für die darauf folgenden Schnitte wurden, entsprechend der gewünschten Dicke, weitere 2-mm-Kunststoffplatten untergelegt.

Die Einzelproben wurden dann im Trockenschrank bei 40 °C getrocknet und anschließend mit einer Scheibenschwingmühle für 12 Sekunden gemahlen. Das spez. geb. NH_4^+ wurde dann, wie in Absatz 2.2.4 beschrieben, mit der neuen Methode nach BEUTERS & SCHERER (2012) bestimmt.

Statistik

Für die statistische Analyse der erhobenen Daten wurde das Programm IBM SPSS Statistics (Version 21, Chicago, USA) verwendet. Alle gemessenen Ergebnisse wurden zunächst mittels klassischer deskriptiver Statistik beschrieben (arithmetisches Mittel, Standardabweichung und Standardfehler). Unterschiede zwischen den Varianten wurde mittels ANOVA und anschließendem Tukey-Test ($\alpha=0,05$) analysiert.

3.2.3 Gehalt an spez. geb. NH_4^+ in den Bioporen verschiedener Bodentiefen nach Ausbringung von ^{15}N -markiertem Pflanzenmaterial auf die Bodenoberfläche

Einführung

Das Ziel des Versuches war es herauszufinden, ob durch Regenwürmer in tiefere Bodenschichten verlagerte Pflanzenreste mineralisiert werden und ob das gebildete NH_4^+ in den Tonmineralzwischenschichten spezifisch gebunden wird. Des Weiteren sollte geklärt werden, ob die Mobilisierung dieses spez. geb. NH_4^+ von der Wurzelarchitektur der Pflanzen beeinflusst wird. Hierzu wurde Luzerne mit ^{15}N markiert und im Feldversuch auf die Bodenoberfläche ausgebracht. Nach einer Inkubationszeit von 3,5 Monaten wurden Bodenproben entnommen, um festzustellen, ob $^{15}\text{NH}_4$ in den Tonmineralzwischenschichten spezifisch gebunden wurde. Nach einer weiteren Vegetationsphase, diesmal mit Hauptfrüchten, wurden erneut Bodenproben und zudem Pflanzenproben entnommen, um festzustellen, ob zuvor spez. geb. $^{15}\text{NH}_4\text{-N}$ mobilisiert und von den Pflanzen aufgenommen wurde.

Versuchsdesign

Im oben vorgestellten Feldversuch (Abschnitt 3.1) wurden die beiden Varianten ausgewählt, bei denen Luzerne dreijährig als Vorfrucht angebaut wurde (2009 bis 2012). Als Hauptfrucht folgte zum einen Sommerweizen (*Triticum aestivum* L., cv. ‚Scirocco‘) (Variante 7-3) als Pflanze mit homorhizem Wurzelsystem und zum anderen Futtermalve (*Malva sylvestris* L., cv. ‚Sylva‘) (Variante 8-3) mit allorhizem Wurzelsystem. Auf den entsprechenden Luzerneparzellen (3. Vorfruchtjahr) wurden im Mai 2011 insgesamt 3 Unterparzellen mit je $0,25 \text{ m}^2$ eingemessen. Pro Variante wurden 3 Feldwiederholungen angelegt, insgesamt also 9 Unterparzellen. Im ersten Versuchsjahr waren diese Unterparzellen noch identisch. Vor Versuchsbeginn wurde der bestehende Luzerneaufwuchs der kompletten Parzellen zunächst gemulcht. Anschließend wurden die zuvor eingemessenen $0,25\text{-m}^2$ -Unterparzellen vollständig von Pflanzenmaterial befreit. Pro Unterparzelle wurden am 13.05.2011 900 g FM (entsprechend 120 g TM Blätter und 60 g TM Stängel) ^{15}N markiertes Luzernematerial (siehe *Anzucht von ^{15}N -markiertem Pflanzenmaterial*) gleichmäßig verteilt. Diese Menge entspricht dem durchschnittlichen Aufwuchs im Freiland. Um Tierfraß und Verwehung durch Wind auf andere Parzellen zu vermeiden, wurden die Kleinflächen mit einem Rahmen abgedeckt, welcher mit einem feinmaschigen Netz bespannt war. Nach dem erneuten Mulchen (27.07.2011) wurden weitere 86 g TM ^{15}N markierte Luzerne pro Unterparzelle ausgebracht.

Am Ende der Vegetationsperiode des Ausbringungsjahres wurden 3 der 9 Unterparzellen destruktiv beprobt (Beschreibung der Probenahme siehe Abschnitt: *Probenahme von Bioporenmaterial und Bulk-Boden*). Um sicherzustellen, dass im späteren Aufwuchs detektiertes ^{15}N aus dem Unterboden stammt, wurde der Oberboden (0-45 cm) der verbleibenden Unterparzellen ausgetauscht, indem die ersten 45 cm der $0,25\text{-m}^2$ -Parzelle mit

einem Spaten entnommen wurden und die entstandene Grube mit Oberboden einer nicht mit ^{15}N -markierten Parzelle mit gleicher Fruchtfolge aufgefüllt wurden.

Im Frühjahr des Folgejahres wurden Sommerweizen bzw. Futtermalve als Hauptfrüchte angebaut, nach deren Ernte folgte die ebenfalls destruktive Beprobung der verbliebenen Unterparzellen (Beschreibung der Probenahme siehe Abschnitt: *Probenahme von Bioporenmaterial und Bulk-Boden*). Zusätzlich wurden Proben des Aufwuchses genommen, beim Weizen in Form von Stroh und Korn und bei der Malve als Gesamtpflanze. Aus unbehandelten Bereichen der Parzellen wurden zusätzlich Kontrollproben des Bodens und des Aufwuchses entnommen.

Anzucht von ^{15}N -markiertem Pflanzenmaterial

Luzerne (*Medicago sativa* L., cv. ‚Planet‘) wurde in einem Gemisch aus Quarzsand und dem Oberboden einer Parabraunerde aus Löß (Meckenheim 50°37'48.78"N, 6°59'19.31"O) im Verhältnis 2:1, angezogen. Zuvor wurden dem Gemisch folgende Mengen an Makronährelementen zugeführt: 0,166 g K kg⁻¹, 0,065 g P kg⁻¹ und 0,050 g Mg kg⁻¹ (in Form von K₂SO₄, K₂HPO₄, Na₂HPO₄, NaH₂PO₄ und MgSO₄), zudem Mikronährelemente auf Sulfatbasis: 10 mg Fe kg⁻¹, je 2 mg Mn, Zn und Cu kg⁻¹ und je 0,5 mg Mo (als (NH₄)₆Mo₇O₂₄) und B (als H₃BO₃) kg⁻¹. Zur Regulation des pH-Werts wurden pro kg Boden-Sand-Gemisch 0,440 g CaCO₃ beigemischt. Stickstoff wurde in Form von $^{15}\text{NH}_4^{15}\text{NO}_3$ gegeben, welches zu 60 at.% mit ^{15}N angereichert war. Als Startgabe wurden 0,050 g N kg⁻¹ Gemisch appliziert. Eine zusätzliche Schwefelgabe erfolgt nicht, da durch die Düngung der anderen Nährstoffe auf Sulfatbasis dem Boden ausreichend Schwefel zugeführt wurde. Nach den jeweiligen Schnitten wurden die Makronährstoffe entsprechend des Entzuges nachgedüngt. Bei 70% der maximalen Wasserhaltekapazität wurden die Pflanzen 7 Monate lang im Gewächshaus kultiviert. Während dieser Zeit wurden 5 Schnitte durchgeführt. Das geerntete Pflanzenmaterial wurde im Trockenschrank bei 40 °C getrocknet. Um später exakte Mengen mit gleichem Blatt-Stängel-Verhältnis auf die Unterparzellen zu verteilen, wurden Blätter und Stängel getrennt, letztere in gleich große Stücke zerteilt. Das angezogene Pflanzenmaterial war durchschnittlich zu 14,5 at.% mit ^{15}N angereichert, bei einem durchschnittlichen Gesamtstickstoffgehalt von 3,8%.

Probenahme von Bioporenmaterial und Bulk-Boden

Wie in Abschnitt *Versuchsdesign* erwähnt, wurden im Jahr der Ausbringung der ^{15}N markierten Luzerne je eine Unterparzelle der drei Feldwiederholungen destruktiv beprobt. Hierzu wurden Gruben neben den entsprechenden Unterparzellen ausgehoben. Von den so entstandenen Profilwänden aus wurden aus den Bodentiefen 0-45 cm, 45-75 cm und 75-105 cm die Regenwurmgänge beprobt und Bulk-Boden entnommen. Die Beprobung der sechs verbliebenen Viertelquadratmeterflächen wurde, wie ebenfalls in Abschnitt *Versuchsdesign* erwähnt, nach der Ernte von Futtermalve und Weizen durchgeführt. Da der Oberboden ausgetauscht worden war, wurden entsprechend nur die beiden Unterbodenstufen 45-75 cm

und 75-105 cm beprobt. Zudem wurde Sprossmaterial des Aufwuchses entnommen, um festzustellen, ob die Hauptfrüchte ^{15}N aus dem Unterboden aufgenommen hatten. Die Beprobung an der Profilwand lief wie folgt ab: die Regenwurmgänge wurden vertikal geöffnet und die sichtbar dunkle Auskleidung mit einem feinen Löffel herausgekratzt (Abb. 3.4). Bei der dunklen Auskleidung handelte es sich um den Regenwurmkot, welcher das verdaute organische Material enthielt, welches die Regenwürmer an der Bodenoberfläche aufgenommen hatten. Bulk-Boden-Proben wurden aus Bereichen entnommen, wo sich keine Bioporen befanden. Der gesamte Monolith der 0,25-m²-Parzelle wurde destruktiv beprobt.



Abb. 3.4: Freigelegte Regenwurmgänge in 75-105 cm Bodentiefe.

Bodenanalyse

Das Probenmaterial aus den Bioporen und des Bulk-Boden wurden im Trockenschrank bei 40 °C getrocknet und dann mit einer Scheibenschwingmühle gemahlen. Der Aufschluss und die Bestimmung des spez. geb. $\text{NH}_4\text{-N}$ erfolgte nach der Methode von BEUTERS & SCHERER (2012), siehe Abschnitt 2.2.4.

Das Pflanzenmaterial wurde ebenfalls im Trockenschrank bei 40 °C getrocknet und anschließend gemahlen. Der Gesamtstickstoffgehalt und das Stickstoffisotopenverhältnis wurden am Massenspektrometer (GC-MS "ANCA SL-2020", PDZ Europa Ltd., Crewe, UK.) gemessen. Dazu wurden 30 mg gemahlene Pflanzensubstanz in Zinngefäße eingewogen und dem Messinstrument zugeführt.

Statistik

Für die statistische Analyse der erhobenen Daten wurde das Programm IBM SPSS Statistics (Version 21, Chicago, USA) verwendet. Alle Ergebnisse wurden zunächst mittels klassischer deskriptiver Statistik beschrieben (arithmetisches Mittel, Standardabweichung und Standardfehler). Unterschiede zwischen den Varianten wurden mittels zweifaktorieller ANOVA und anschließendem Tukey-Test ($\alpha=0,05$) analysiert.

3.3 Gefäßversuche

3.3.1 Einfluss von Calcium und Kalium auf die Mobilisierung von spez. geb. NH_4^+

Einführung

Die Freisetzung von spez. geb. NH_4^+ ist, wie die von spez. geb. K^+ , ein Austausch- und Diffusionsprozess (REICHENBACH 1972). Es wird vermutet, dass die Diffusion von NH_4 -Ionen aus den Tonmineralzwischenschichten durch K- und Ca-Ionen beeinflusst wird. Am Rand von Tonmineralen adsorbierte K-Ionen kontrahieren die Tonmineralzwischenschichten und behindern somit die Diffusion von NH_4 -Ionen aus diesen heraus (TANG ET AL. 2008). Dadurch wäre das spez. geb. NH_4^+ nicht für die Pflanzen verfügbar. Ca-Ionen sollen hingegen eine Aufweitung der Minerale begünstigen und somit die Freisetzung von spez. geb. NH_4^+ erleichtern. Um diese möglichen Effekte zu überprüfen, wurde der im Folgenden beschriebene Gefäßversuch durchgeführt.

Pflanzenmaterial und Wachstumsbedingungen

Als Versuchspflanze diente Luzerne (*Medicago sativa* L., cv. „Planet“), pro Gefäß waren 5 g trockene Samen vorgesehen. Die Samen wurden zunächst für 2 Stunden in 20 mM CaSO_4 -Lösung vorgequollen, mit deionisiertem Wasser abgewaschen und auf feuchtem Zellstoff bei 30 °C im Inkubator zum Keimen gebracht. Anschließend erfolgte die Überführung in die Kulturgefäße. Die Pflanzen wurden 49 Tage unter kontrollierten Bedingungen (einer Tagestemperatur von 24 °C, einer Nachttemperatur von 18 °C und einer relativen Luftfeuchte von 60%) in einer Klimakammer kultiviert. Die tägliche Photoperiode bestand aus 14 Stunden mit einer Photonenstromdichte (engl. Photosynthetically Active Photon Flux Density, PFD) von $350 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$, die Dunkelperiode dauerte entsprechend 10 Stunden. Aufgrund des hohen Luftaustauschs in der Kammer wurden die Gefäße zum Schutz vor Austrocknung der Keimlinge mit einer durchsichtigen Folie bedeckt, welche nach dem vollständigen Anwachsen der Pflänzchen entfernt wurde. Die Wasserspannung wurde zwischen 35 und 45 hPa gehalten, das entspricht 70% der maximalen Wasserhaltekapazität. Der Versuch war eine Kooperation mit dem Unterprojekt 6 „TransMinK“ und wurde am Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung, Department Bodenphysik in Halle an der Saale durchgeführt.

Versuchsgefäße

Bei den Versuchsgefäßen handelte es sich um spezielle Kompartimentsysteme aus Plexiglas (Abb. 3.5 und 3.6) (VETTERLEIN & JAHN 2004). In das Mittelkompartiment (88 x 32 x 100 mm), auch als Wurzelkompartiment bezeichnet, wurde die Luzerne ausgepflanzt. Zwei Seitenkompartimente (je 88 x 105 x 100 mm), im Folgenden Bulk-Boden-Kompartimente genannt, waren jeweils durch Gaze, mit einer Maschenweite von 30 μm vom Wurzelkompartiment getrennt. In diese Bulk-Boden-Kompartimente wurde der Versuchsboden eingefüllt (siehe hierzu Abschnitt: *Versuchsboden*) und mit einer Schicht Aquarien Kies als Evaporationsschutz bedeckt. Jedes Kompartimentsystem wurde auf einem

Sandbett (Quarzsand, 1-2 mm) platziert, welches regelmäßig bewässert wurde. Durch Löcher in den Böden der Kompartimentsysteme konnte die Wasserversorgung der Pflanzen durch Kapillaraufstieg sichergestellt werden. Bis auf die Öffnung des Wurzelkompartimentes, aus der die Pflanzen herauswuchsen, wurde der gesamte Aufbau mit Aluminiumfolie verpackt. Grund dafür war der Schutz vor zu hoher Evaporation einerseits und vor Moos- und Algenbildung andererseits.

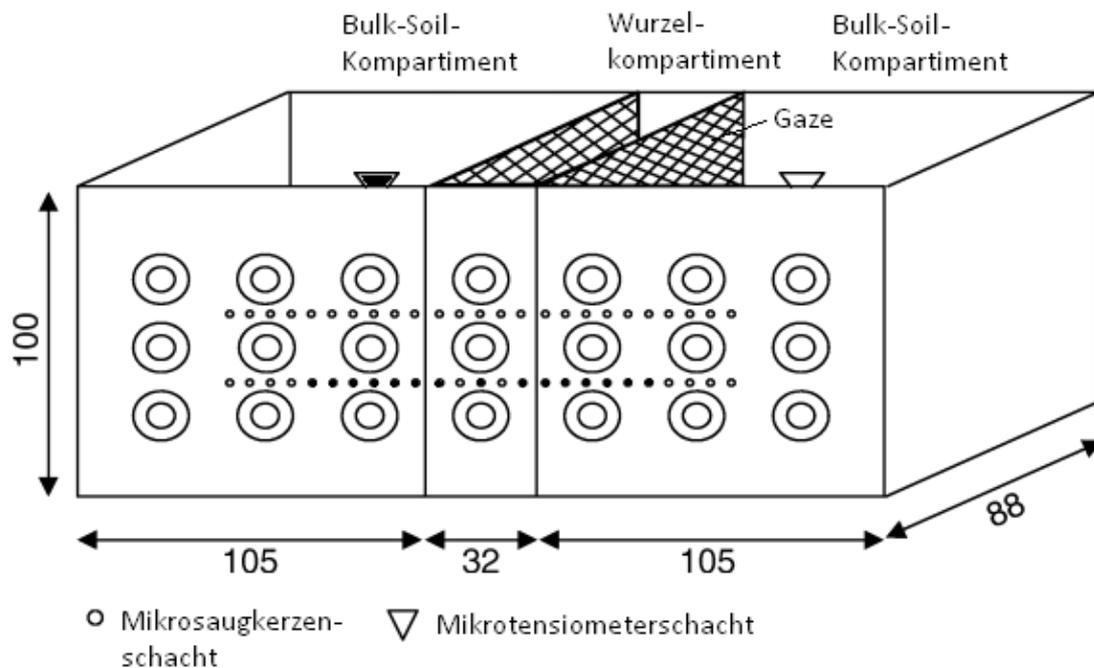


Abb. 3.5: Schemazeichnung eines Kompartimentsystems (verändert nach VETTERLEIN & JAHN 2004). Abmessungen sind in mm dargestellt. Die Kompartimentsysteme waren während des Versuchszeitraums mit Mikrotensiometern und Mikrosaugkerzen bestückt, Einzelheiten dazu sind unter Abschnitt *Messungen und Probenahme während des Untersuchungszeitraums* zu finden. Die großen kreisrunden Öffnungen waren für die Versuchsanstellung irrelevant und daher verschlossen.

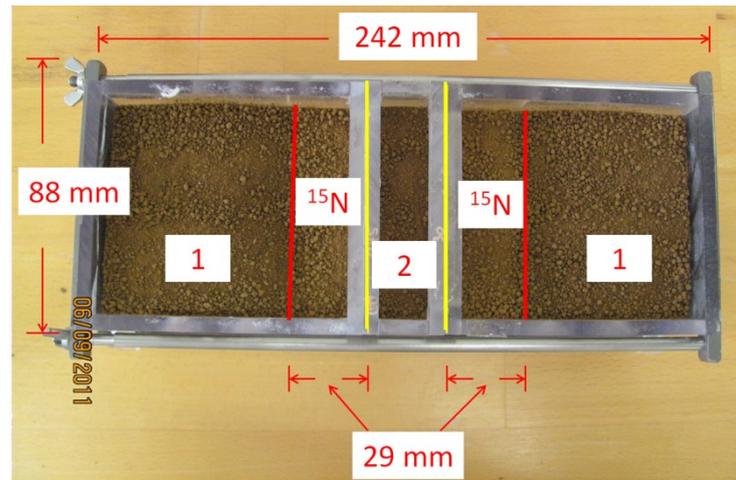


Abb. 3.6: Mit Boden befülltes Kompartimentsystem. Die Bulk-Boden-Kompartimente (1) waren durch Gaze (gelbe Linie) getrennt vom Wurzelkompartiment (2). ^{15}N zeigt den Bereich des Bulk-Bodens, der mit ^{15}N markiert war.

Versuchsboden

Für dieses Experiment wurde Unterboden aus der Tiefe 45-75 cm verwendet, welcher aus dem unter Abschnitt 3.1 beschriebenen Feldversuch stammte. Der Boden wurde vor Versuchsbeginn luftgetrocknet und auf 2 mm ausgesiebt. Ein Teil des Bodens wurde zudem mit ^{15}N markiert. Vor der Markierung mit ^{15}N betrug der Gesamtstickstoffgehalt $0,64 \text{ g kg}^{-1}$ Boden und der Gehalt an spez. geb. $\text{NH}_4\text{-N}$ lag bei 140 mg kg^{-1} Boden. Für die Bulk-Boden-Kompartimente wurde der Boden mit einer $^{15}\text{NH}_4\text{Cl}$ -Lösung behandelt, um die Tonmineralzwischenschichten mit $^{15}\text{NH}_4^+$ zu belegen. Die Prozedur erfolgte wie in Abschnitt 3.2.2 bereits für den Diffusionstaschenversuch beschrieben. Der einzige Unterschied bestand in der Auswaschung des ungebundenen und überschüssigen $^{15}\text{NH}_4^+$ aus dem Boden. Hierzu wurde in diesem Fall mehrmals mit deionisiertem Wasser, anstelle von CaCl_2 - oder KCl -Lösung, perkoliert. Im Anschluss wurde der Boden getrocknet ($40 \text{ }^\circ\text{C}$) und erneut auf 2 mm abgesiebt. Durch die Belegungsprozedur konnte der Gesamtstickstoffgehalt auf $0,78 \text{ g kg}^{-1}$ Boden erhöht werden, der Anteil an ^{15}N auf 9 at.%. Der Gehalt an spez. geb. $\text{NH}_4\text{-N}$ erhöhte sich auf 220 mg kg^{-1} Boden. Der ^{15}N -Anteil in dieser Stickstofffraktion erreichte 16 at.%.

Versuchsdesign

Der Versuch wurde als randomisiertes Blockdesign mit je drei Kompartimentsystemen pro Variante angesetzt. Jedes System bestand aus zwei identischen Bulk-Boden-Kompartimenten. In die Wurzelkompartimente wurden 275 g ungedüngter und nicht mit ^{15}N belegter Boden gefüllt. In die ersten 29 mm der Bulk-Boden-Kompartimente, gemessen von der Gazeoberfläche und abgeschottet mit einer Trennwand, wurden 275 g ^{15}N -markierter Boden eingefüllt. In das restliche Volumen wurden 660 g unmarkierter Boden gegeben und anschließend die Trennwand entfernt. Der Grund, warum nicht das gesamte Gefäß mit ^{15}N markiertem Boden befüllt wurde war, dass die Wahrscheinlichkeit, für die Verarmung über die

Rhizosphäre (unter 29 mm) hinaus, als höchst marginal angesehen wurde. Somit konnte eine enorme Kostenersparnis erzielt werden. Der Boden der Bulk-Boden-Kompartimente (sowohl mit ^{15}N , als auch ohne) wurde zudem entsprechend der folgenden fünf Varianten behandelt, um den Einfluss von Kalium und Calcium auf die Mobilisierung von spez. geb. NH_4^+ zu untersuchen:

- Kontrolle, ohne Pflanzen und ohne zusätzliche Kalium- und Calciumgabe
- Kontrolle, mit Pflanzen, ebenfalls ohne zusätzliche Kalium- und Calciumgabe
- Plus Kalium, mit Pflanzen
- Plus Calcium, mit Pflanzen
- Plus Kalium und plus Calcium, mit Pflanzen

Um deutlich höhere K^+ - und Ca^{2+} -Konzentrationen gegenüber dem Ursprungsboden zu erhalten, wurde dem Boden die dreifache Menge seines Ausgangsgehaltes an K^+ bzw. Ca^{2+} zugefügt. Das heißt dem Boden wurden $117,3 \text{ mg K}^+ \text{ kg}^{-1}$ als KCl-Lösung und/oder $60,1 \text{ mg Ca}^{2+} \text{ kg}^{-1}$ als CaCl_2 -Lösung zugeführt (die Valenz der Kationen wurde in die Berechnung einbezogen). Dem Boden der Varianten, die kein KCl- und CaCl_2 -Lösung bzw. die nur eine der beiden erhalten haben, wurde zum Ausgleich die entsprechende Menge deionisiertes Wasser zugefügt. Vor dem Einfüllen in die Kompartimentsysteme wurde alles gut durchmischt.

Messungen und Probenahme während des Untersuchungszeitraums

Während der gesamten Versuchsphase stand jedes der insgesamt 15 Kompartimentsysteme auf einer Waage, welche kontinuierlich die Gesamtmasse des entsprechenden Gefäßes zur Wassergehaltsbestimmung erfasste. Ebenso maßen Mikrotensiometer ($\varnothing 1,3 \text{ mm}$, Vetterlein *et al.*, 1993) das Wasserpotential. Pro System befanden sich je ein Tensiometer im Wurzelkompartiment und eins in einem der beiden Bulk-Boden-Kompartimente (Abb. 3.7). Die Messdaten der Waagen und Tensiometer wurden mit einer zeitlichen Auflösung von 10 Minuten gespeichert, genauso wie die Aufnahmen einer Kamera, welche das Pflanzenwachstum bildlich dokumentierte.

Einmal wöchentlich wurde Bodenlösung aus den Kompartimentsystemen entnommen. Dazu waren Mikrosaugkerzen ($\varnothing 1,3 \text{ mm}$) (GÖTTLEIN ET AL. 1996) horizontal in die Kompartimente eingebaut, mit je einer räumlichen Auflösung von $30 \times 6 \text{ mm}$. Je drei Saugkerzen wurden im Wurzelkompartiment installiert, wobei eine exakt in der Mitte platziert wurde und die beiden anderen mit jeweils 12 mm Abstand dazu, dicht an der Gaze. Sechs Saugkerzen befanden sich in jedem Bulk-Boden-Kompartiment, die erste 1 mm von der Gazeoberfläche (folglich der Wurzeloberfläche) entfernt, alle weiteren mit einem Abstand von 6 mm zueinander (vergleiche Abb. 3.5; Schächte, welche mit Mikrosaugkerzen ausgestattet waren, sind schwarz markiert). Um Wasserkonkurrenz zwischen Pflanzenwurzeln und Saugkerzen zu vermeiden, wurde die Bodenlösungsentnahme nur während der Dunkelphase durchgeführt. Die

Schläuche an den Saugkerzen endeten in einer Kammer, an die mit einer zeitgesteuerten Vakuumpumpe ein Unterdruck von 30 kPa angelegt wurde. Jede Entnahme dauerte 2 Stunden. Die Bodenlösung von jeder einzelnen Saugkerze wurde separat in 0,5-mL-fassenden Reaktionsgefäßen aufgefangen. Unmittelbar nach der Entnahme wurde die Osmolalität jeder einzelnen Probe mit einem Kryoskop (Osmomat 030, Gonotec GmbH, Deutschland) bestimmt. Hierzu wurde eine Menge von nur 15 µl verwendet, die nach der Messung zurück in das Vorratsgefäß pipettiert wurde. Aus versuchstechnischen Gründen konnten maximal 0,5 mL Bodenlösung pro Saugkerze und Entnahmeterrmin gewonnen werden, wobei diese Menge meist nicht erreicht werden konnte. Um aber alle geplanten Analysen durchführen zu können, erfolgten alle weiteren Messungen nach der Erstellung von Mischproben. Aus den beiden Bulk-Boden-Kompartimenten eines Systems wurden jeweils die beiden Proben der Saugkerzen mit gleichem Abstand zur Gaze miteinander vermischt. Zudem wurden dann entsprechend die drei Wiederholungen zu einer Probe vereint. Die Bestimmung des pH-Wertes wurde mittels einer Mikro-pH-Elektrode (ISFET IQ 240-06 mit PH 16 SS, Sentron Niederlande) durchgeführt, da diese nur 200 µl Lösung pro Messung benötigte.



Abb. 3.7: Fotoaufnahmen des Versuchsaufbaus.

Nährstoffgehalte der Bodenlösung

Um ausreichend Bodenlösung für die Analyse von NH_4^+ , NO_3^- , K^+ , Ca^{2+} und Mg^{2+} zu erhalten, wurden die oben beschriebenen Mischproben aus den beiden Bulk-Boden-Kompartimenten eines Systems mit den entsprechenden Proben aller drei Wiederholungen einer Variante zu weiteren Mischproben vereinigt. Die Konzentrationen von NH_4^+ und NO_3^- wurden mit einem Continuous-Flow-Analyser (CFA, Skalar Analytical B.V.) bestimmt. K^+ , Ca^{2+} und Mg^{2+} wurde mittels optischer Emissionsspektrometrie mit induktiv gekoppeltem Plasma (ICP-OES, Horiba Jobin Yvon GmbH) gemessen.

Die Isotopenverteilung von ^{15}N im NO_3^- wurde mit dem SPINMAS-Messsystem (STANGE ET AL. 2007) bestimmt. Für die ^{15}N -Verteilung im NH_4^+ wurde ein modifiziertes SPINMAS-System verwendet (SPOTT 2012). Hierfür wurde NH_4^+ in einem stark alkalischen Milieu und unter der Präsenz von Cu-II als Katalysator mit Hyperbromid zu N_2O anstelle von N_2 oxidiert. Diese neue

Methode erlaubt eine deutlich sensitivere Bestimmung, weil es zu keinen relevanten Interferenzen mit dem atmosphärischen Stickstoff kommt.

Nährstoffgehalte der Pflanzen

Nach Ernte der Luzerne und dem Auswaschen der Wurzeln wurde zunächst jeweils die Frisch- und Trockenmasse (nach 48 h bei 65 °C) bestimmt. Um die Gehalte an N, P, K, Ca und Mg zu bestimmen, wurde das gemahlene Pflanzenmaterial nach HNO₃-Zugabe mittels Druckaufschluss aufgeschlossen. Die Messung erfolgte mit Optischer Emissionsspektrometrie mit induktiv gekoppeltem Plasma (ICP-OES, Horiba Jobin Yvon GmbH). Die ¹⁵N-Isotopenverteilung der Luzernesprosse und -wurzeln wurde mit einem Elementaranalysator (VARIO EL, Elementar GmbH) mit gekoppeltem Massenspektrometer (quadrupole mass spectrometer ESD 100, InProcess Instruments) gemessen (RUSSOW & GOETZ 1998).

Analyse des Bodens

Am Ende des Versuches wurden die Gefäßsysteme in die jeweiligen drei Kompartimente zerlegt, wobei deutlich zu erkennen war, dass sich an der Gazeoberfläche auf der Seite des Wurzelkompartiments eine gleichmäßige Wurzelmatte gebildet hatte (Abb. 3.8 links). Der Boden aus den Bulk-Boden-Kompartimenten wurde in Scheiben mit definiertem Abstand zur Wurzeloberfläche (Gaze) geschnitten. Dazu wurde von der Seite aus, wo sich die Gaze befand, ein rechteckiger Stechzylinder in den Boden der Bulk-Boden-Kompartimente gepresst. Bis auf 0,5 cm an den Rändern wurde somit der gesamte Versuchsboden aus dem Kompartiment entnommen. Der Zylinder wurde nun in eine Vorrichtung eingespannt, mit der der Boden durch einen passenden Stempel millimetergenau aus dem Zylinder hinaus gedrückt werden konnte. Mit einem scharfen Keramikmesser wurde der aus dem Zylinder herausragende Boden abgeschnitten (Abb. 3.8 rechts). Die Einteilung der Abstände war wie folgt: 0-1, 1-3, 3-5, 5-7, 7-10, 10-20, 20-29, 29-40 und 40-100 mm. Nach Trocknung bei 40 °C im Trockenschrank und Vermahlung mit einer Schwingscheibenmühle wurde in jeder Scheibe der Gesamtstickstoff, der Anteil an ¹⁵N im Gesamtstickstoff, das spez. geb. NH₄⁺ und der ¹⁵N-Anteil im spez. geb. NH₄⁺ bestimmt. Die Bestimmung von Gesamt-N und ¹⁵N wurde ohne weitere Vorbehandlung am Massenspektrometer (GC-MS ANCA SL-2020, PDZ Europa Ltd., Crewe, UK) gemessen. Für die Bestimmung des spez. geb. NH₄⁺ wurden die Proben zunächst, wie in Abschnitt 2.2.4 beschrieben, mit Kaliumhypobromid (KOB₂) behandelt und anschließend am Massenspektrometer gemessen (BEUTERS & SCHERER 2012).



Abb. 3.8: Wurzelmatte der Luzerne (links) und Schneidevorrichtung mit eingespanntem Stechzylinder.

Statistik

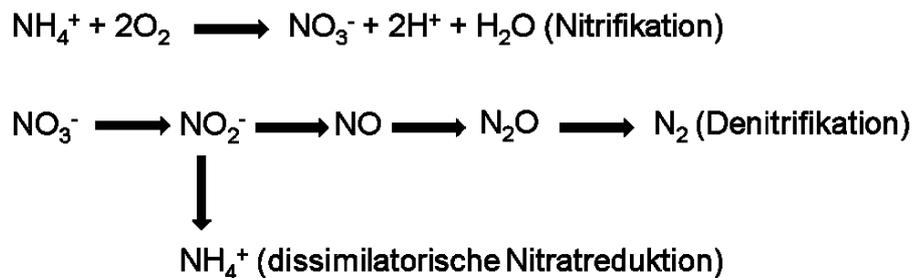
Für die statistische Analyse der erhobenen Daten wurde das Programm IBM SPSS Statistics (Version 21, Chicago, USA) verwendet. Alle gemessenen Ergebnisse wurden zunächst mittels klassischer deskriptiver Statistik beschrieben (arithmetisches Mittel, Standardabweichung und Standardfehler). Bei den einzelnen Parametern wurde zum Vergleich der Varianten die ANOVA mit anschließendem Tukey-Test ($\alpha=0,05$) genutzt.

3.3.2 Spezifische Bindung von NH_4 -Ionen nach Ammonium- bzw. Nitratdüngung

Einführung

Dieser Versuch hatte zum Ziel, den Einfluss einer NH_4 - bzw. NO_3 -Düngung auf die spezifische Bindung von NH_4 -Ionen unter verschiedenen Redoxbedingungen im Ober- und Unterboden zu beleuchten. Unter aeroben Bedingungen wird NH_4^+ zu NO_3^- oxidiert. Die so genannte Nitrifikation (Gleichung 3.1) geschieht durch aerob lebende Bakterien (*Nitrosomas* und *Nitrobacter*). NO_3^- hingegen wird bei anaeroben Verhältnissen reduziert, d.h. es kommt zur so genannten Denitrifikation. So wird Nitrat über Nitrit zu gasförmigen Stickoxiden (NO , NO_2) reduziert und kann in die Atmosphäre gelangen. Es kann auch zur so genannten dissimilatorischen NO_3 -Reduktion (*E.coli*) (Gleichung 3.1) kommen, wobei NO_3^- zu NH_4^+ reduziert wird (SCHEFFER ET AL. 2010).

Gleichung 3.1:



Um nachverfolgen zu können, ob und wie viel NO_3^- im Boden in verschiedenen Bodentiefen dissimilatorisch zu NH_4^+ reduziert wird und dieses dann in den Tonmineralzwischen-schichten spezifisch gebunden wird, wurde in dem im Folgenden beschriebene Versuch ^{15}N angereichertes NH_4^+ und NO_3^- eingesetzt.

Versuchsboden

Für das Experiment wurde Boden aus zwei Tiefenstufen, 0-30 cm und 45-75 cm, des Zentralen Feldversuchs in Klein-Altendorf entnommen (Abschnitt 3.1) und nach der Homogenisierung auf 4 mm Korngröße abgesiebt. Auf der Parzelle, aus der der Boden stammte, wurde zuvor dreijährig Wegwarte (*Cichorium intybus* L.) angebaut. Dieser Versuch wurde in Kooperation mit dem Unterprojekt 5 „MicroSub“, ansässig am Helmholtz-Zentrum für Gesundheit und Umwelt in München, Abteilung Umweltgenomik, durchgeführt.

Versuchsgefäße und Versuchsdesign

Für den Versuch wurden PVC-Rohre mit einem Durchmesser von 10 cm und einer Länge von 80 cm als Versuchsgefäße verwendet. Senkrecht stehend und am unteren Ende verschlossen wurden die Säulen mit gestörtem Boden befüllt. In die unteren 59 cm jeder Säule wurden 7,2

kg Unterboden aus der Bodentiefe 45-75 cm, geschichtet. Die darauf folgenden 19 cm wurden mit 2,3 kg Oberboden aus 0-30 cm gefüllt (Abb. 3.9). Die verbleibenden 2 cm dienten als Gießrand. Der massebezogene Wassergehalt des Oberbodens betrug zum Zeitpunkt des Einfüllens in die Säulen 11,7% und der des Unterbodens 12,7%. Je 16 Säulen wurden auf 40% bzw. 75% der maximalen Wasserhaltekapazität eingestellt. Mit diesen beiden unterschiedlichen Wasserkapazitäten sollten unterschiedliche Redoxbedingungen geschaffen werden, d.h. zum einen bei 40% Wasserkapazität ein eher sauerstoffreiches Milieu mit oxidierenden Bedingungen und bei 75% Wasserkapazität ein eher sauerstoffarmes Milieu mit reduzierenden Bedingungen. Die jeweilige Wasserkapazität wurde zehn Tage vor Versuchsbeginn eingestellt und die Säulen in einer Klimakammer bei 14 °C und einer Luftfeuchtigkeit von 70% vorbehandelt.

Nach dieser Zeit wurde entweder NH_4^+ oder NO_3^- in einer Bodentiefe von 5 cm bzw. 50 cm appliziert (Tab. 3.4, Abb. 3.9). NO_3^- wurde als Kaliumnitrat-Lösung (K^{15}NO_3) und NH_4^+ als Ammoniumchlorid-Lösung ($^{15}\text{NH}_4\text{Cl}$) zugeführt. Bei beiden Verbindungen war der Stickstoffanteil zu 98 at.% mit ^{15}N angereichert. Die Applikationsmenge wurde so gewählt, dass 120 kg N ha^{-1} in den Boden eingebracht wurden. Das entspricht 245,2 mg N pro Säule. Zur Applikation wurden entsprechend der Applikationstiefen horizontal und ringsum 7 Löcher in jede Säule gebohrt, durch die mittels Spritzen mit langen Kanülen 35 mL der entsprechenden Stickstofflösung pro Säule in den Boden injiziert wurde. Die Löcher wurden anschließend luft- und wasserdicht verschlossen. Zusätzlich zu den oben beschriebenen Varianten wurden je 4 Kontrollvarianten ohne Stickstoffapplikation pro Wasserkapazitätsstufe installiert. Nun wurden die Säulen unter den gleichen Bedingungen wie bei der Vorbehandlung inkubiert.

Tab. 3.4: Variantenübersicht für den Versuch zur NH_4^- und NO_3^- -Dynamik.

Wasserkapazität	40%		75%	
Applikationstiefe	5 cm	50 cm	5 cm	50 cm
NO_3^-	4 Wdh.	4 Wdh.	4 Wdh.	4 Wdh.
NH_4^+	4 Wdh.	4 Wdh.	4 Wdh.	4 Wdh.
Kontrolle	4 Wdh.		4 Wdh.	

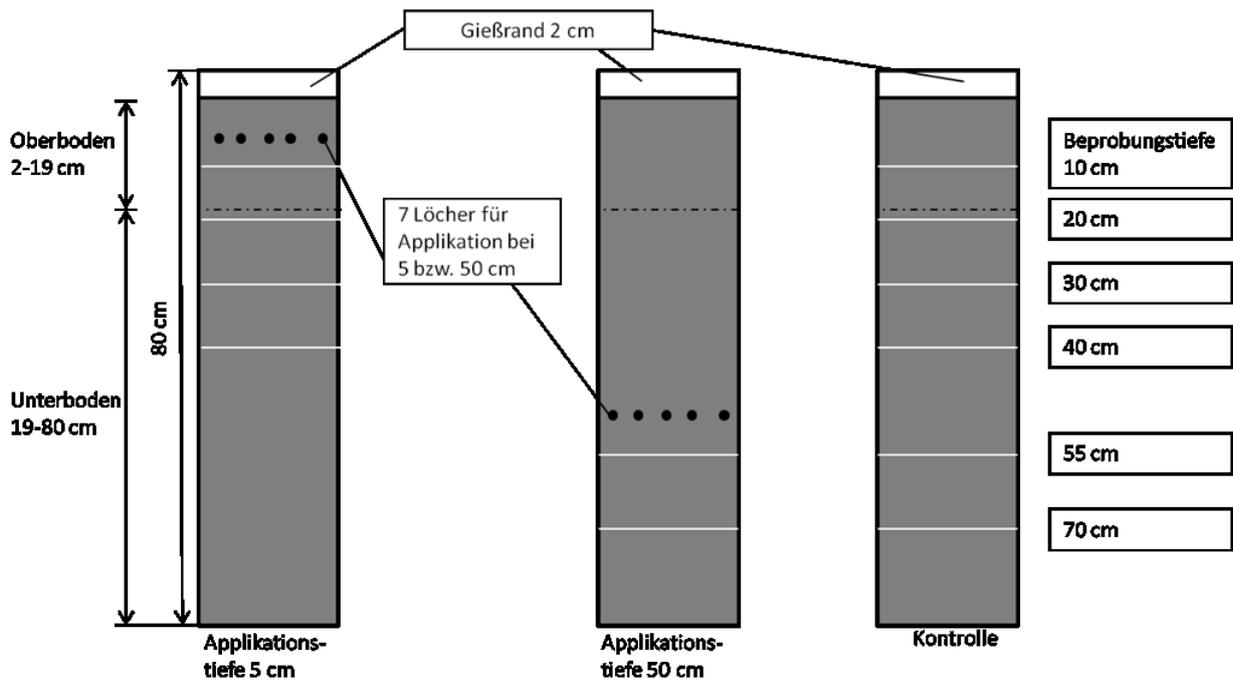


Abb. 3.9: Schemazeichnung des Versuchsaufbaus.

Probenahme und Analyse

Die Beprobung der Säulen fand nach zweiwöchiger Versuchsdauer statt, dazu wurden diese vertikal aufgeschnitten. Bodenproben wurde bei den Varianten mit einer Applikationstiefe von 5 cm aus den Tiefen 10, 20, 30 und 40 cm, gemessen von der Bodenoberfläche, entnommen. Bei den Varianten, bei denen die Stickstofflösungen in 50 cm injiziert wurden, wurden Proben aus 55 und 70 cm entnommen. Die Kontrollen wurden auf allen genannten Tiefen beprobt (Abb. 3.9). Die Bodenproben für die Analyse des spez. geb. $\text{NH}_4\text{-N}$ wurden bei $-18\text{ }^\circ\text{C}$ tiefgekühlt und nach Bonn transportiert. Nachdem der Boden bei $40\text{ }^\circ\text{C}$ getrocknet war, folgte die Vermahlung mit einer Scheibenschwingmühle. Die Bestimmung des spez. geb. $\text{NH}_4\text{-N}$ und der Anteil an ^{15}N in dieser Stickstofffraktion erfolgte nach der neuen Methode von BEUTERS & SCHERER (2012) (siehe Abschnitt 2.2.4).

Pflanzenverfügbares Kalium (CAL-Methode nach SCHÜLLER 1969)

CAL-Lösung (Vorratslösung, 5-fach konzentriert)

385,0 g Calciumlactat, 197,5 g Calciumacetat und 447,5 mL Eisessig wurden in deionisiertem Wasser gelöst und auf 5 L aufgefüllt. Zum Gebrauch wurde 1 L Vorratslösung auf 5 L mit deionisiertem Wasser aufgefüllt.

Extraktion:

5 g Boden ($< 2\text{ mm}$) wurden mit 100 mL CAL-Lösung versetzt und 2 Stunden geschüttelt und anschließend mit einem Faltenfilter (MN 619 g $\frac{1}{4}$) filtriert. Der erste Teil des Filtrats wurde verworfen.

Kaliumbestimmung:

Nach der Erstellung einer Eichkurve erfolgte die Messung am Flammenphotometer (ELEX 6361, Eppendorf, Hamburg) direkt im Filtrat.

Ammoniumfixierungskapazität

Methode verändert nach SAHRAWAT (1979): 10 g Boden (1 mm) wurden in 250 mL Schüttelflaschen (PE) gefüllt und mit 50 mg $\text{NH}_4\text{-N}$, als $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ gelöst in 20 mL deionisiertem Wasser, versetzt. Die Suspension wurde für 2 Stunden bei Raumtemperatur geschüttelt, anschließend mit 100 mL 2 M KCl versetzt und für eine weitere Stunde geschüttelt. Die Suspension wurde dann durch einen Faltenfilter (MN 640 m, $\varnothing 125$ mm) gefiltert. Der Boden wurde (mit Filter) bei 60 °C getrocknet, anschließend vom Filterpapier gelöst und mittels Mörser homogenisiert.

Mit der Methode zur Bestimmung von spez. geb. $\text{NH}_4\text{-N}$ nach BEUTERS & SCHERER (2012) (siehe Abs. 2.2.4) wurden nun der Gehalt an spez. geb. $\text{NH}_4\text{-N}$ des Bodens vor und nach der Behandlung mit $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ ermittelt. Die Differenz der beiden Gehalte gibt die Ammoniumfixierungskapazität in mg kg^{-1} Boden wider.

Statistik

Für die statistische Analyse der erhobenen Daten wurde das Programm IBM SPSS Statistics (Version 21, Chicago, USA) verwendet. Alle gemessenen Ergebnisse wurden zunächst mittels klassischer deskriptiver Statistik beschrieben (arithmetisches Mittel, Standardabweichung und Standardfehler). Zum Vergleich der beiden Wasserkapazitätsstufen und zum Vergleich der N-Varianten wurde eine ANOVA mit anschließendem Tukey-Test ($\alpha=0,05$) durchgeführt.

4. Ergebnisse

4.1 Feldversuche

4.1.1 Einfluss des Wurzelsystems und der Stickstoffversorgung des Oberbodens auf die Dynamik des spez. geb. NH_4^+

Dynamik des spez. geb. NH_4^+ in Abhängigkeit vom Wurzelsystem

Während der Vegetationsperioden der Jahre 2010 und 2011 wurden monatlich Bodenproben aus dem Feldversuch gezogen. Die Ergebnisse der Bestimmung des spez. geb. $\text{NH}_4\text{-N}$ in den Bodenproben werden im Folgenden beschrieben und graphisch dargestellt.

Untersuchungsjahr 2010

Im Untersuchungsjahr 2010 wuchsen auf den beprobten Parzellen, nach dreijährigem Luzerne- bzw. Wegwartenbau, Futtermalve bzw. Weizen als Hauptfrüchte. Aufgeteilt in die drei Beprobungsstufen (0-45, 45-75 und 75-105 cm) werden zunächst die Ergebnisse der Hauptfruchtvarianten bei gleicher Vorfrucht miteinander verglichen. Anschließend folgt der Vergleich der Vorfrüchte bei gleichen Hauptfrüchten.

Vergleich der Hauptfrüchte bei Luzerne als allorhize Vorfrucht

In Abb. 4.1 sind die Ergebnisse der sechs Beprobungstermine von Futtermalve mit allorhizem und Weizen mit homorhizem Wurzelsystem nach Luzerne dargestellt. Im Oberboden (0-45 cm) konnten am 10.03.2010 unter Futtermalve 123,9 mg spez. geb. $\text{NH}_4\text{-N kg}^{-1}$ Boden gefunden werden. Hingegen war der Gehalt unter Weizen um rund 20 mg geringer, stieg aber zum zweiten Beprobungstermin deutlich an, während der Gehalt der Futtermalvenvariante nahezu gleich blieb. Zu diesem Zeitpunkt betrug die Differenz zwar wieder ungefähr 20 mg, der Gehalt an spez. geb. $\text{NH}_4\text{-N}$ war aber dieses Mal bei der Weizenvariante höher. Zum 3. Termin gab es bei beiden Varianten einen leichten gleichmäßigen Rückgang. Bis zur vierten Beprobung kam es zu einem leichten Rückgang bei der Weizenvariante, während der Gehalt unter Futtermalve leicht angestiegen war. Am 14.07. erreichten beide Varianten ihren niedrigsten Gehalt, die Futtermalvenvariante lag bei 96,1 und die Weizenvariante bei 78,3 mg spez. geb. $\text{NH}_4\text{-N kg}^{-1}$ Boden. Bei Futtermalve war dieser Gehalt signifikant niedriger als die Gehalte des 2. und 3. Probenahmetermins. Bis zum Augusttermin konnte unter beiden Pflanzenarten ein deutlicher Wiederanstieg des Gehaltes an spez. geb. $\text{NH}_4\text{-N}$ gemessen werden, der bei beiden Varianten über dem jeweiligen Anfangsgehalt vom 10.03.2010 lag. Der Unterschied zwischen dem Juli- und Augusttermin war bei Futtermalve hoch signifikant.

In der Tiefenstufe 45-75 cm lagen die Gehalte der beiden Varianten beim ersten Beprobungstermin mit 137,5 unter Futtermalve und 130,8 mg spez. geb. $\text{NH}_4\text{-N kg}^{-1}$ Boden unter Weizen wesentlich enger zusammen, als das im Oberboden der Fall war. Der Gehalt an

spez. geb. $\text{NH}_4\text{-N}$ stieg bei beiden Varianten nahezu parallel zum 2. Termin hin an. Am 14.05. ergaben die Analysen des Bodens bei der Variante Malve einen Anstieg des Gehaltes an spez. geb. $\text{NH}_4\text{-N}$, im Vergleich dazu kam es zu einem leichten Rückgang unter Weizen. Zum Junitermin lagen mit 148,6 und 143,8 mg spez. geb. $\text{NH}_4\text{-N kg}^{-1}$ Boden die Gehalte wieder eng beieinander. Bei der Weizenvariante konnte bis zum 14.07. eine hohe Mobilisierung des spez. geb. $\text{NH}_4\text{-N}$ festgestellt werden, das heißt der Gehalt erreichte hier mit 70,2 mg spez. geb. $\text{NH}_4\text{-N kg}^{-1}$ Boden seinen niedrigsten Wert in dieser Vegetationsperiode. Der Unterschied zum vorhergegangenen Probenahmetermin konnte als signifikant eingestuft werden. Wie auch im Oberboden war der Gehalt zu diesem Beprobungstermin signifikant niedriger als die Gehalte von Termin 3. Auch unter Futtermalve kam es bis zu diesem Zeitpunkt zu einem Rückgang des spez. geb. $\text{NH}_4\text{-N}$ -Gehaltes auf 113,4 mg kg^{-1} Boden. Am letzten Beprobungstermin in der Vegetationsperiode 2010 konnte bei beiden Varianten ein Wiederanstieg des Gehaltes an spez. geb. $\text{NH}_4\text{-N}$ gemessen werden, der bei der Weizenvariante sogar hoch signifikant war. Mit 158,3 mg spez. geb. $\text{NH}_4\text{-N kg}^{-1}$ Boden unter Futtermalve und 152,0 mg spez. geb. $\text{NH}_4\text{-N kg}^{-1}$ Boden unter Weizen lagen die Gehalte auch wieder relativ nahe beieinander.

In der Tiefenstufe 75-105 cm lagen beide Varianten mit 141,0 und 140,3 mg spez. geb. $\text{NH}_4\text{-N kg}^{-1}$ Boden zum ersten Termin auf gleicher Höhe (Abb.4.1). Die Dynamik des spez. geb. $\text{NH}_4\text{-N}$ bei den folgenden drei Beprobungen beider Varianten war sehr ähnlich und die Veränderungen von Termin zu Termin nur marginal. Wie aber auch schon bei den beiden anderen Tiefenstufen beobachtet, konnte bis zum 14.07. ebenfalls eine erhöhte Mobilisierung des spez. geb. $\text{NH}_4\text{-N}$ festgestellt werden. Der Gehalt unter beiden Hauptfrüchten ging auf 116,1 (Futtermalve) und 106,6 (Weizen) mg spez. geb. $\text{NH}_4\text{-N kg}^{-1}$ Boden zurück. Am 12.08. konnte festgestellt werden, dass bei beiden Varianten wieder $\text{NH}_4\text{-N}$ spezifisch gebunden worden war.

Der Unterschied zwischen den beiden Hauptfrüchten Futtermalve und Weizen war nicht signifikant (Tab. 4.1).

Beim Vergleich der Gehalte der einzelnen Tiefenstufen unter Futtermalve war zu erkennen, dass bei allen Beprobungsterminen der Gehalt an spez. geb. $\text{NH}_4\text{-N}$ im Oberboden (0-45 cm) am geringsten war und mit zunehmender Tiefe zunahm. So konnten beispielsweise zum ersten Termin bei 0-45 cm Gehalte von 123,9 mg, bei 45-75 cm 137,5 mg und bei 75-105 cm 141,0 mg spez. geb. $\text{NH}_4\text{-N kg}^{-1}$ Boden gemessen werden. Während der Wachstumsphase der Pflanzen (10.03. bis 14.07.) wurden unter Futtermalve in der ersten Tiefenstufe 27,7 mg in der zweiten Tiefenstufe 23,9 mg und in 75-105 cm Tiefe 24,9 mg spez. geb. $\text{NH}_4\text{-N}$ freigesetzt. Unter Weizen wurden im Oberboden mit 26,8 mg ähnliche Mengen freigesetzt, in der ersten Unterbodenstufe wurde hingegen mit 60,6 mg mehr als das Doppelte mobilisiert. Bei 75-105 cm wurden 33,8 mg $\text{NH}_4\text{-N kg}^{-1}$ Boden freigesetzt. Am letzten Beprobungstermin konnten bei allen Tiefenstufen die höchsten Gehalte der Vegetationsperiode gemessen werden, im Oberboden waren 150,1 mg $\text{NH}_4\text{-N}$ spezifisch gebunden, bei 45-75 cm 158,3 mg und bei 75-105 cm 177,9 mg. Unter Weizen hingegen konnten beim Vergleich der ersten Tiefenstufe mit der zweiten nur bei der Hälfte der Termine höhere Gehalte an spez. geb. $\text{NH}_4\text{-N}$ mit zunehmender Bodentiefe festgestellt werden. Gleiches galt für den Vergleich der Tiefen 45-75

cm und 75-105 cm. Die Gehalte des Oberbodens waren jedoch bei allen Terminen deutlich geringer als die der Tiefenstufe 75-105 cm.

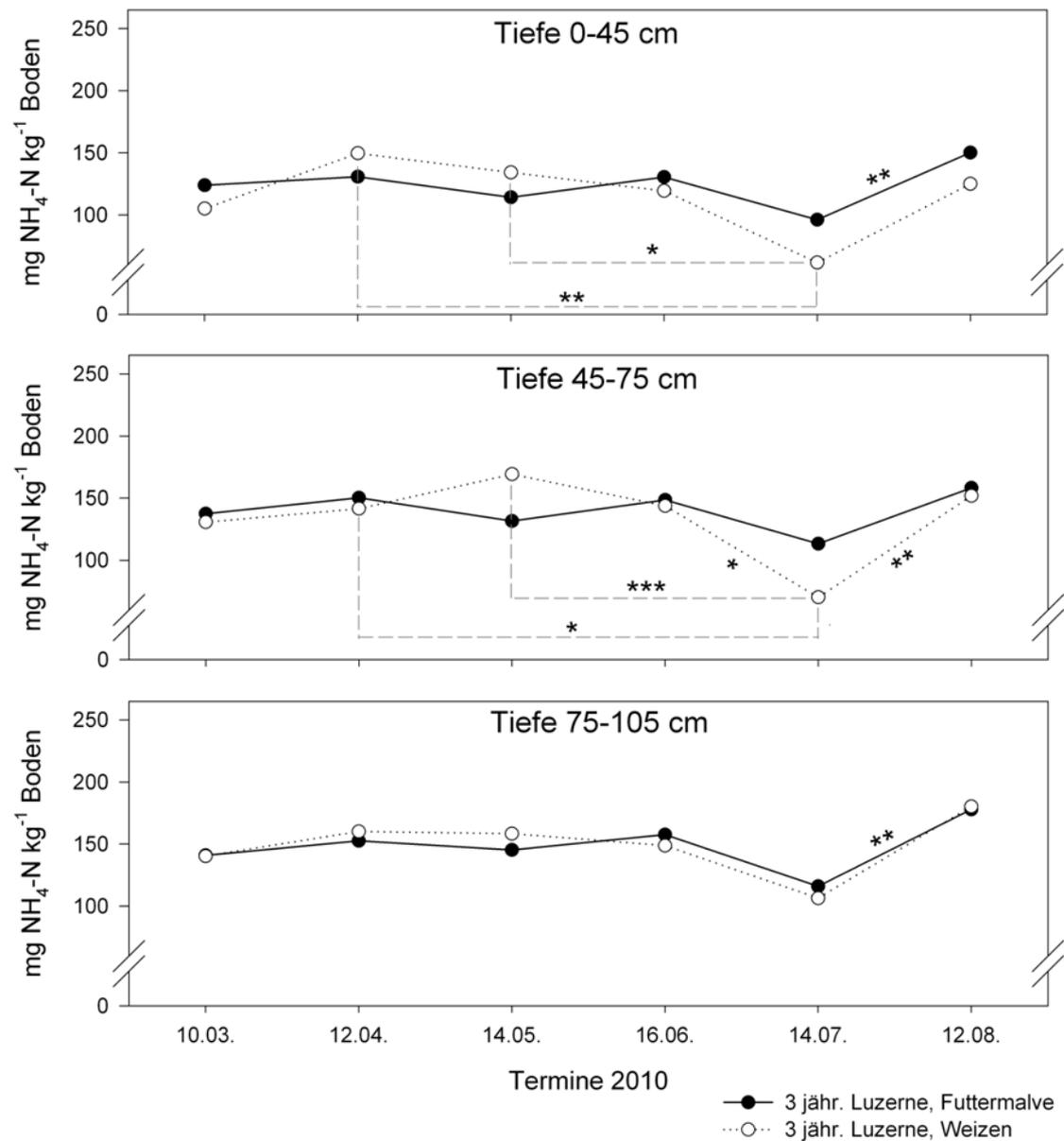


Abb. 4.1: Gehalte an spez. geb. NH₄-N während der Vegetationsperiode 2010 unter Futtermalve und Weizen nach 3-jähr. Luzerneanbau in drei Bodentiefen. Statistische Auswertung zwischen den Probenahmeterminen: ANOVA, Tukey-Test ($\alpha=0,05$): * = signifikant ($p \leq 0,05$), ** = hoch signifikant ($p \leq 0,01$), *** = höchst signifikant ($p \leq 0,001$), keine Sterne = nicht signifikant.

Tab. 4.1: Statistische Auswertung zwischen den Varianten 3-jähr. Luzerne als Vorfrucht und Futtermalve bzw. Weizen als Hauptfrucht (2010). Wurde zugunsten der Übersichtlichkeit nicht in den Graphiken dargestellt. t-Test ($\alpha=0,05$) (vorher Levene-Test auf Varianzgleichheit): n.s. = nicht signifikant.

Bodentiefe	0-45 cm		45-75 cm		75-105 cm	
	p-Wert	Signifikanz	p-Wert	Signifikanz	p-Wert	Signifikanz
10.03.	0,344	n.s.	0,798	n.s.	0,975	n.s.
12.04.	0,209	n.s.	0,594	n.s.	0,650	n.s.
14.05.	0,132	n.s.	0,195	n.s.	0,568	n.s.
16.06.	0,469	n.s.	0,834	n.s.	0,719	n.s.
14.07.	0,273	n.s.	0,082	n.s.	0,722	n.s.
12.08.	0,092	n.s.	0,820	n.s.	0,929	n.s.

Vergleich der Hauptfrüchte bei Rohrschwengel als Vorfrucht

Im Folgenden werden nun die Varianten beschrieben, bei denen Rohrschwengel dreijährig als Vorfrucht angebaut wurde. Im Oberboden (0-45 cm) konnten zum ersten Probenahmetermin bei der Futtermalvevariante 104,4 mg spez. geb. $\text{NH}_4\text{-N kg}^{-1}$ Boden gemessen werden, im Laufe der Vegetationsperiode kam es zu einem kontinuierlichen Anstieg bis zum 4. Termin auf 148,1 mg spez. geb. $\text{NH}_4\text{-N kg}^{-1}$ Boden (Abb. 4.2). Die Weizenvariante startete im März bei 121,9 mg spez. geb. $\text{NH}_4\text{-N kg}^{-1}$ Boden, fiel dann aber auf 101,0 mg ab und stieg dann ebenfalls bis zum 4. Termin auf 149,1 mg spez. geb. $\text{NH}_4\text{-N kg}^{-1}$ Boden, also fast identisch mit den Gehalten unter Futtermalve. Statistisch konnten keine Unterschiede zwischen den beiden Fruchtarten während der ersten vier Beprobungsmonate festgestellt werden. Bis zum 14.07. wurde ein Rückgang des spez. geb. $\text{NH}_4\text{-N}$ bei beiden Pflanzenarten verzeichnet. Unter Futtermalve wurde ein Gehalt von 75,0 mg spez. geb. $\text{NH}_4\text{-N kg}^{-1}$ Boden gemessen, wobei der Unterschied zum vorherigen Termin höchst signifikant war. Auch unter Weizen konnte ein deutlicher Rückgang auf 130,4 mg spez. geb. $\text{NH}_4\text{-N kg}^{-1}$ Boden verzeichnet werden. Der Unterschied zwischen den beiden Pflanzenarten war zu diesem Termin signifikant. Zum Ende der Vegetationsperiode konnte ein Wiederanstieg des Gehaltes an spez. geb. $\text{NH}_4\text{-N}$ sowohl unter Futtermalve als auch unter Weizen beobachtet werden. Der Anstieg auf 133,9 mg kg^{-1} unter Futtermalve war höchst signifikant. Unter Weizen erreichte der Gehalt an spez. geb. $\text{NH}_4\text{-N}$ einen Wert von 198,1 mg kg^{-1} und wies somit signifikante Unterschiede zu den ersten drei Beprobungsterminen auf.

In der nächst tieferen Bodenschicht (45-75 cm) war die Dynamik des spez. geb. $\text{NH}_4\text{-N}$ unter beiden Fruchtarten im Vergleich zu der des Oberbodens sehr ähnlich. Insgesamt konnten in dieser Bodenschicht rund 10% höhere Gehalte als im Oberboden gemessen werden. Die Freisetzung des spez. geb. $\text{NH}_4\text{-N}$ war unter Futtermalve im Juli am höchsten, der Gehalt sank

auf $97,9 \text{ mg kg}^{-1}$ Boden. Der Unterschied zum vorherigen Probenahmetermin war hoch signifikant. Unter Weizen konnte nur eine geringe Mobilisierung des spez. geb. $\text{NH}_4\text{-N}$ verzeichnet werden. Die Differenz zwischen den beiden Pflanzenarten am 14.07. war statistisch gesichert, ebenso wie der Unterschied zwischen Weizen und Malve am Ende der Vegetationsperiode (Tab. 4.2). Zwischen Juli und August wurden unter Weizen mehr als $90 \text{ mg NH}_4\text{-N kg}^{-1}$ Boden spezifisch gebunden und unter Malve hingegen nur 45 mg . Der Gehalt an spez. geb. $\text{NH}_4\text{-N}$ unter Weizen war am 12.08. signifikant höher im Vergleich zu den Gehalten unter Weizen an den anderen Probenahmeterminen.

In der untersten beprobten Bodenschicht (75-105 cm) lagen die Anfangsgehalte an spez. geb. $\text{NH}_4\text{-N}$ unter Futtermalve bei $133,4 \text{ mg NH}_4\text{-N kg}^{-1}$ Boden und unter Weizen bei $140,2 \text{ mg NH}_4\text{-N kg}^{-1}$ Boden. Bis zum 3. Termin war die Dynamik des spez. geb. $\text{NH}_4\text{-N}$ vergleichbar mit denen der Bodentiefe 45-75 cm. Vom 14.05. bis zum 14.07. wurden unter Futtermalve $42,7 \text{ mg}$ spez. geb. $\text{NH}_4\text{-N}$ mobilisiert. Bis zum letzten Beprobungstermin wurden dann wieder $\text{NH}_4\text{-Ionen}$ in die Tonmineralzwischenschichten eingelagert, wodurch der Gehalt an spez. geb. $\text{NH}_4\text{-N}$ auf $159,3 \text{ mg kg}^{-1}$ Boden gestiegen ist. Unter Weizen wurden vom 14.07. bis zum 12.08. $124,1 \text{ mg NH}_4\text{-N kg}^{-1}$ Boden spezifisch gebunden, die Differenz zwischen den beiden Terminen konnte statistisch abgesichert werden. Zum Ende der Vegetationsperiode lag unter Weizen ein Gehalt von $257,7 \text{ mg spez. geb. NH}_4\text{-N kg}^{-1}$ Boden vor. Der Unterschied zwischen diesem Wert und dem der Futtermalve war signifikant.

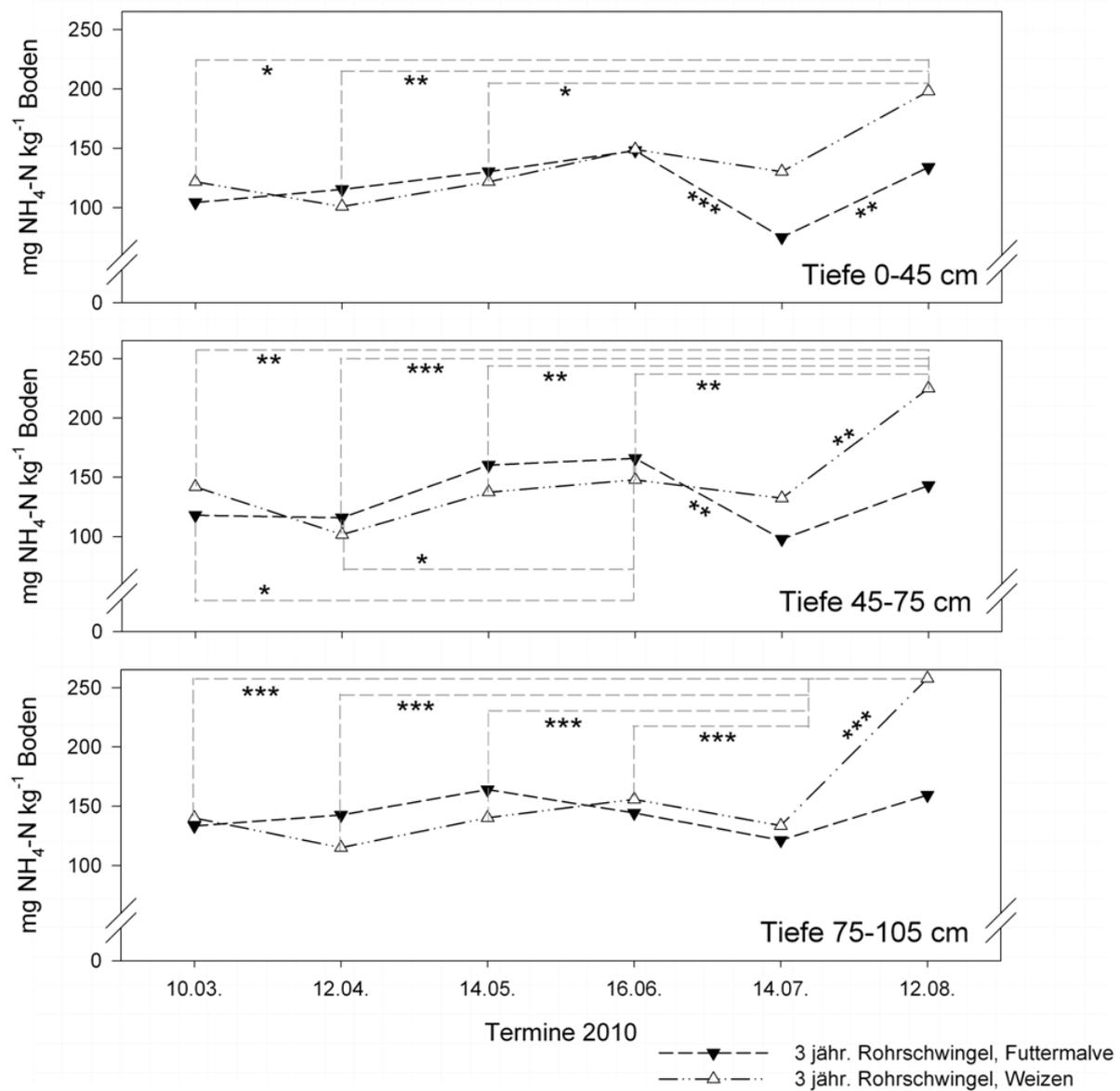


Abb. 4.2: Gehalte an spez. geb. NH₄-N während der Vegetationsperiode 2010 unter Futtermalve und Weizen nach 3-jähr. Rohrschwengel in drei Bodentiefen. Statistische Auswertung zwischen den Probenahmeterminen: ANOVA, Tukey-Test ($\alpha=0,05$): * = signifikant ($p \leq 0,05$), ** = hoch signifikant ($p \leq 0,01$), *** = höchst signifikant ($p \leq 0,001$), keine Sterne = nicht signifikant.

Tab. 4.2: Statistische Auswertung zwischen den Varianten 3-jähr. Rohrschwingel als Vorfrucht und Futtermalve bzw. Weizen als Hauptfrucht (2010). Wurde zugunsten der Übersichtlichkeit nicht in den Graphiken dargestellt. t-Test ($\alpha=0,05$) (vorher Levene-Test auf Varianzgleichheit): * = signifikant ($p\leq 0,05$), ** = hoch signifikant ($p\leq 0,01$), n.s. = nicht signifikant.

Bodentiefe	0-45 cm		45-75 cm		75-105 cm	
	p-Wert	Signifikanz	p-Wert	Signifikanz	p-Wert	Signifikanz
10.03.	0,246	n.s.	0,062	n.s.	0,703	n.s.
12.04.	0,352	n.s.	0,308	n.s.	0,214	n.s.
14.05.	0,663	n.s.	0,250	n.s.	0,247	n.s.
16.06.	0,941	n.s.	0,361	n.s.	0,525	n.s.
14.07.	0,005	**	0,034	*	0,342	n.s.
12.08.	0,116	n.s.	0,028	*	0,016	*

Einfluss der Vorfrüchte bei Futtermalve als Hauptfrucht

Um den Einfluss der Vorfrucht auf die Dynamik des spez. geb. $\text{NH}_4\text{-N}$ unter der Hauptfrucht darzustellen, werden im Folgenden die Varianten miteinander verglichen werden, deren Vorfrüchte unterschiedlich waren, aber die gleichen Hauptfrüchte hatten (Abb. 4.3). Nach Luzerne als Vorfrucht wurden im Oberboden beim 1. Probenahmetermin unter Futtermalve als Hauptfrucht $123,9 \text{ mg kg}^{-1}$ und nach Rohrschwingel $104,4 \text{ mg kg}^{-1}$ spez. geb. $\text{NH}_4\text{-N}$ festgestellt. Auch beim folgenden Probenahmetermin war der Gehalt in der Luzernevariante tendenziell etwas höher als der der Rohrschwingelvariante. Beim 3. und 4. Termin war das Gegenteil der Fall, hier wies die Rohrschwingelvariante leicht höhere Gehalte auf. Die Probenahme im Juli zeigte, dass unter beiden Pflanzenarten größere Mengen an $\text{NH}_4\text{-N}$ mobilisiert wurden, nach Luzerne waren es $34,4$ und nach Rohrschwingel $73,0 \text{ mg kg}^{-1}$ Boden. Der charakteristische Wiederanstieg zum Ende der Vegetationsperiode verlief bei beiden Varianten nahezu parallel, wobei die Gehalte an spez. geb. $\text{NH}_4\text{-N}$ unter Luzerne als Vorfrucht wieder tendenziell höher waren. Insgesamt stellen die Unterschiede zwischen den beiden Vorfruchtvarianten Tendenzen dar, die zu keinem Termin statistisch abgesichert werden konnten.

Die Beprobung der nächsten Bodentiefe (45-75 cm) ergab vom Verlauf her ein sehr ähnliches Bild wie es für den Oberboden beschrieben wurde. Ein Unterschied war, dass in dieser Bodentiefe ein durchschnittlich höherer Gesamtgehalt an spez. geb. $\text{NH}_4\text{-N}$ vorlag. Beim 2. und 3. Probenahmetermin konnten zudem größere Unterschiede zwischen den Varianten festgestellt werden. Beim 2. Termin war dieser Unterschied mit $115,9 \text{ mg}$ nach Rohrschwingel und $150,3 \text{ mg}$ spez. geb. $\text{NH}_4\text{-N kg}^{-1}$ Boden nach Luzerne auch hoch signifikant.

In der tiefsten beprobten Bodenschicht (75-105 cm) war die Dynamik des spez. geb. $\text{NH}_4\text{-N}$ vergleichbar mit der in den ersten beiden Bodenschichten. Hier lag der Gesamtgehalt an spez. geb. $\text{NH}_4\text{-N}$ noch etwas höher als in den bereits beschriebenen Bodenschichten. Die Differenzen zwischen den beiden Varianten waren zudem deutlich geringer, demnach konnten auch hier keine signifikanten Unterschiede zwischen den Varianten festgestellt werden.

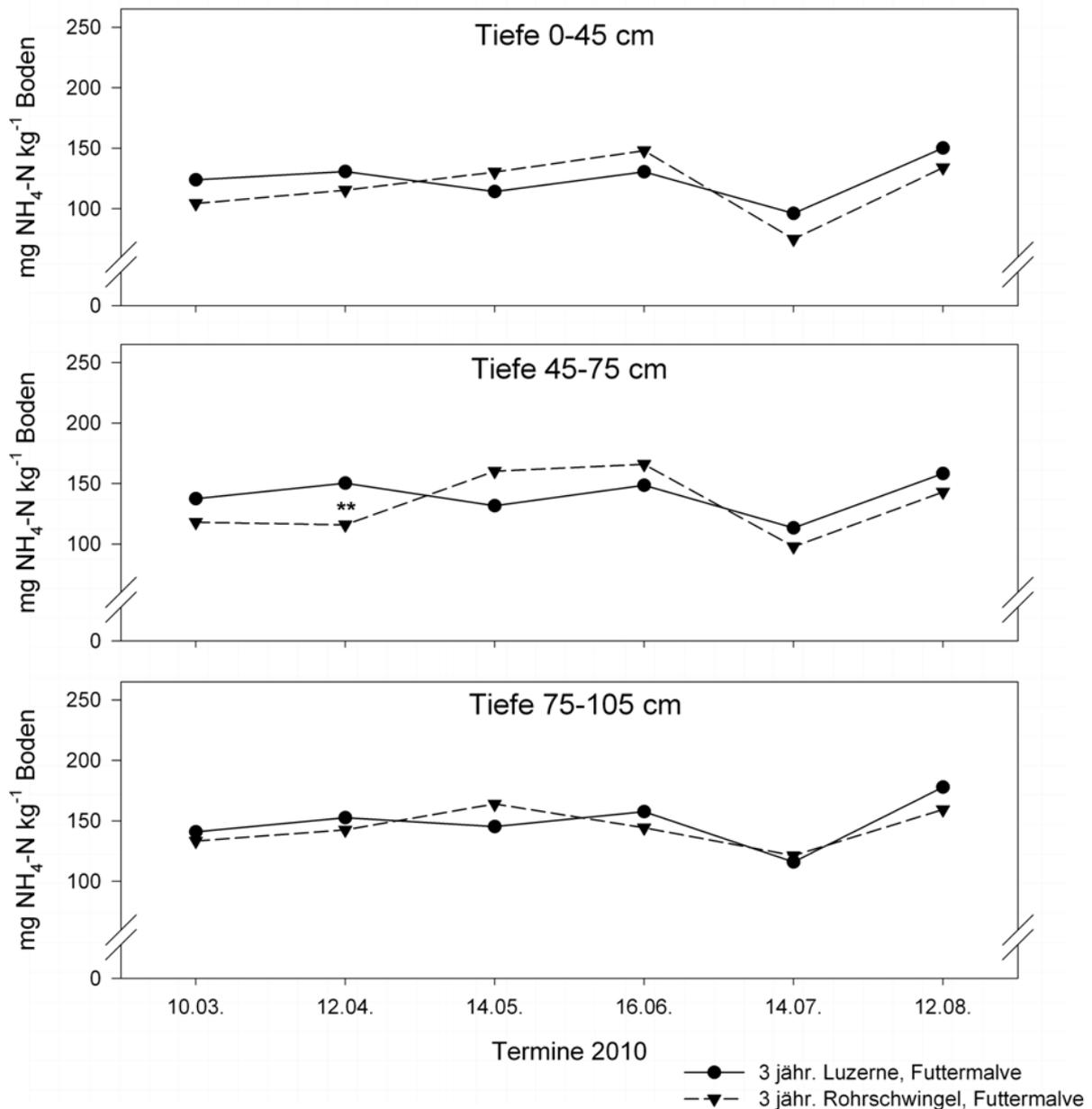


Abb. 4.3: Gehalte an spez. geb. $\text{NH}_4\text{-N}$ während der Vegetationsperiode 2010 unter Futtermalve nach 3-jähr. Rohrschwengel- bzw. Luzerneanbau in drei Bodentiefen. Statistische Auswertung zwischen den Varianten: ANOVA, Tukey-Test ($\alpha=0,05$): ** = hoch signifikant ($p \leq 0,01$), keine Sterne = nicht signifikant.

Einfluss der Vorfrüchte bei Weizen als Hauptfrucht

Die Gehalte an spez. geb. $\text{NH}_4\text{-N}$ der Bodenproben, die unter Weizen nach Rohrschwingel (homorhiz) bzw. nach Luzerne (allorhiz) gezogen wurden, wiesen insgesamt größere Unterschiede zwischen den beiden Varianten auf als bei Futtermalve als Hauptfrucht (Abb. 4.4). Der Ausgangsgehalt unter Weizen nach Luzerne lag in der obersten Bodenschicht (0-45 cm) bei 105,1 mg, nach Rohrschwingel bei 121,9 mg spez. geb. $\text{NH}_4\text{-N kg}^{-1}$ Boden. Bei der zweiten Beprobung nach Luzerne konnte ein Anstieg auf 149,7 mg spez. geb. $\text{NH}_4\text{-N kg}^{-1}$ Boden gemessen werden. Dieser Gehalt unterschied sich signifikant von dem nach Rohrschwingel mit 101,0 mg spez. geb. $\text{NH}_4\text{-N kg}^{-1}$ Boden. Bei den folgenden beiden Beprobungsterminen kehrte sich die Situation wieder um. Bei Weizen nach Luzerne war eine kontinuierliche Abnahme des Gehaltes zu beobachten und nach Rohrschwingel eine leichte Zunahme. Bis zum 14.07. konnte bei beiden Varianten eine Abnahme festgestellt werden. So konnte bei Luzerne der niedrigste Gehalt von 78,3 mg spez. geb. $\text{NH}_4\text{-N kg}^{-1}$ gemessen werden, gefolgt von einem Wiederanstieg auf 125,0 mg spez. geb. $\text{NH}_4\text{-N kg}^{-1}$. Nach Rohrschwingel fiel der Rückgang mit 130,4 mg deutlich geringer aus, der Anstieg erreichte jedoch einen Wert von 198,1 mg spez. geb. $\text{NH}_4\text{-N kg}^{-1}$. Der Unterschied zwischen beiden Varianten war am 14.07. hoch signifikant.

Bei 45-75 cm Bodentiefe war die Dynamik des Gehaltes an spez. geb. $\text{NH}_4\text{-N}$ unter Weizen nach Rohrschwingel bzw. nach Luzerne sehr ähnlich der des Oberbodens, mit dem Unterschied, dass das Gesamtniveau in der tieferen Bodenschicht um durchschnittlich 10 mg höher war. Der Unterschied im Gehalt an spez. geb. $\text{NH}_4\text{-N}$ zwischen den beiden Varianten am Ende der Vegetationsperiode konnte statistisch abgesichert werden, ebenso wie die Unterschiede beim 2. und 5. Probenahmetermin.

In der Bodenschicht 75-105 cm war der Verlauf wieder weitestgehend gleich dem des Oberbodens. Die Gehalte waren im Durchschnitt jedoch höher. Doch auch hier konnte wieder ein signifikanter Unterschied zwischen den beiden Varianten Weizen nach Luzerne (mit 160,1 mg spez. geb. $\text{NH}_4\text{-N kg}^{-1}$ Boden) und Weizen nach Rohrschwingel (mit 115,1 mg spez. geb. $\text{NH}_4\text{-N kg}^{-1}$ Boden) am 2. Beprobungstermin festgestellt werden. Auch die Differenz der Gehalte an spez. geb. $\text{NH}_4\text{-N}$ zwischen den beiden Varianten Ende des Beprobungszeitraums war mit 77,4 mg kg^{-1} signifikant.

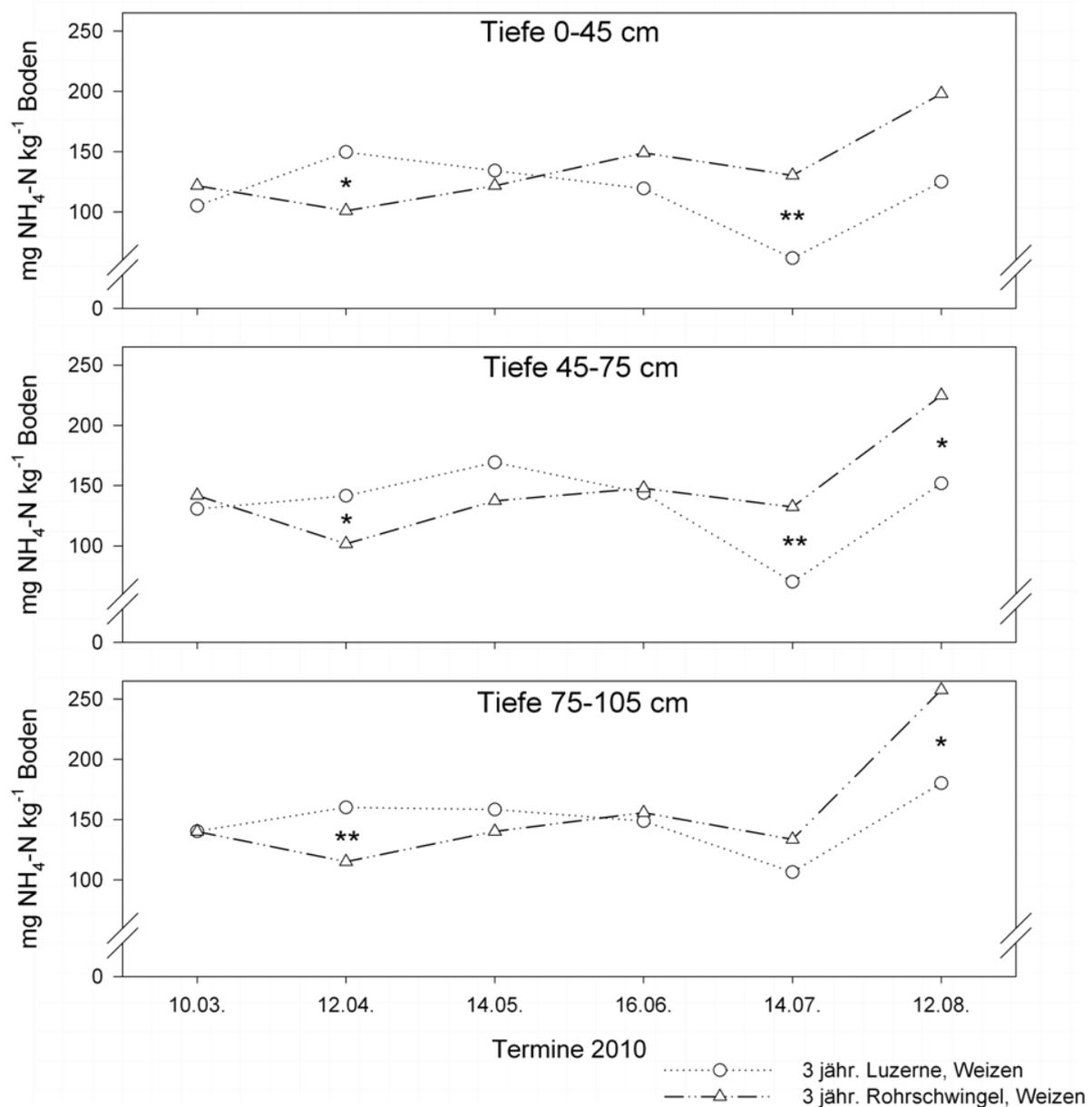


Abb. 4.4: Gehalte an spez. geb. NH₄-N während der Vegetationsperiode 2010 unter Weizen nach 3-jähr. Rohrschwengel- bzw. Luzerneanbau in drei Bodentiefen. Statistische Auswertung zwischen den Varianten: ANOVA, Tukey-Test ($\alpha=0,05$): * = signifikant ($p \leq 0,05$), ** = hoch signifikant ($p \leq 0,01$), keine Sterne = nicht signifikant.

Untersuchungsjahr 2011

Die Fruchtfolge der im Jahr 2011 beprobten Parzellen bestand zum einen, wie auch die der im Jahr 2010 beprobten Parzellen, aus dreijährigem Vorfruchtanbau (Luzerne bzw. Rohrschwengel) und gefolgt von Sommerweizen als Hauptfrucht im ersten Nachfruchtjahr. Im zweiten Nachfruchtjahr, also im Beprobungsjahr folgte Raps als Pflanze mit allorhizem bzw. Sommergerste mit homorhizem Wurzelsystem.

Einfluss der Hauptfrüchte bei Luzerne als Vorfrucht

Bei der Variante, bei der Raps auf Luzerne und Weizen folgte, lagen die Gehalte an spez. geb. $\text{NH}_4\text{-N}$ im gesamten Beprobungszeitraum zwischen 60,0 und 211,7 mg kg^{-1} Boden und unter Gerste im Bereich von 93,3 und 163,3 mg kg^{-1} Boden (Abb. 4.5). Bei der ersten Probenahme am 24.03.2011 lagen die Gehalte in einem ähnlichen Bereich wie die des Vorjahres. Zu erkennen war auch, dass mit zunehmender Bodentiefe der Gehalt an spez. geb. $\text{NH}_4\text{-N}$ anstieg. Im Vergleich zum ersten Probenahmetermin nahm der Gehalt an spez. geb. $\text{NH}_4\text{-N}$ im Oberboden zum 27.04. hin unter Raps um 36,7 mg und unter Gerste um 30,0 mg spez. geb. $\text{NH}_4\text{-N kg}^{-1}$ Boden ab. Der Unterschied zwischen den beiden Varianten war signifikant (Tab. 4.3). Unter Gerste konnten während der noch folgenden Probenahmen (25.05., 27.06. und 27.07.) nur noch marginale Veränderungen festgestellt werden. Unter Raps hingegen konnte am 25.05. ein Wiederanstieg verzeichnet werden, gefolgt von einer Mobilisierung von $\text{NH}_4\text{-N}$ von 68,3 mg kg^{-1} Boden. Der Unterschied zwischen Raps und Gerste war zu diesem Zeitpunkt signifikant. Der Gehalt am Ende der Vegetationsperiode konnte unter Gerste mit 103,3 mg und unter Raps mit 211,7 mg spez. geb. $\text{NH}_4\text{-N kg}^{-1}$ Boden beziffert werden, auch dieser Unterschied konnte statistisch abgesichert werden.

In 45-75 cm Bodentiefe war zu Beginn des Beprobungszeitraums der Unterschied zwischen dem Gehalt an spez. geb. $\text{NH}_4\text{-N}$ unter der homorhizen und der allorhizen Pflanze höchst signifikant, unter Gerste wurden 148,3 mg und unter Raps 128,3 mg spez. geb. $\text{NH}_4\text{-N kg}^{-1}$ Boden gemessen. Wie auch im Oberboden konnte in dieser Tiefenstufe zum 2. Termin eine erhöhte Mobilisierung des spez. geb. $\text{NH}_4\text{-N}$ unter beiden Pflanzenarten festgestellt werden. Unter Raps war der Unterschied zum vorherigen Termin signifikant. Bei den folgenden Probenahmen lagen die Gehalte beider Varianten relativ nah beieinander und die Veränderungen von Termin zu Termin waren marginal. Am Ende der Vegetationsperiode wurde unter Gerste wieder mehr NH_4^+ spezifisch gebunden. Statistisch abgesicherte Unterschiede gab es nicht.

Die Probenahme zu Beginn der Vegetationsperiode ergab unter Raps in der Schicht 75-105 cm Tiefe Gehalte an spez. geb. $\text{NH}_4\text{-N}$ von 150,0 mg und 136,7 mg kg^{-1} Boden unter Gerste. Während unter der allorhizen Art bis zum 3. Beprobungstermin kontinuierlich insgesamt 38,3 mg spez. geb. $\text{NH}_4\text{-N kg}^{-1}$ Boden mobilisiert wurden, blieb der Gehalt unter der Pflanze mit homorhizem Wurzelsystem im gleichen Zeitraum nahezu konstant. Eine Mobilisierung in fast gleicher Höhe folgte bei Gerste am 27.06., der Unterschied zum vorherigen Termin war signifikant. Unter Raps stieg der Gehalt zu diesem Termin wieder an, erreichte 135,0 mg spez. geb. $\text{NH}_4\text{-N kg}^{-1}$ Boden und unterschied sich mit 35,0 mg signifikant vom dem unter Gerste gemessenen Gehalt. Bis zum 27.07., dem Ende der Vegetationsperiode, wurden unter Raps 51,7 mg spez. geb. $\text{NH}_4\text{-N kg}^{-1}$ Boden mobilisiert, im Gegensatz wurden unter Gerste 63,3 mg $\text{NH}_4\text{-N kg}^{-1}$ Boden spezifisch gebunden. Die Gehalte beider Varianten waren höchst signifikant unterschiedlich zu den Gehalten der entsprechenden vorherigen Probenahme. Auch die Differenz zwischen Raps und Gerste war zum letzten Termin signifikant.

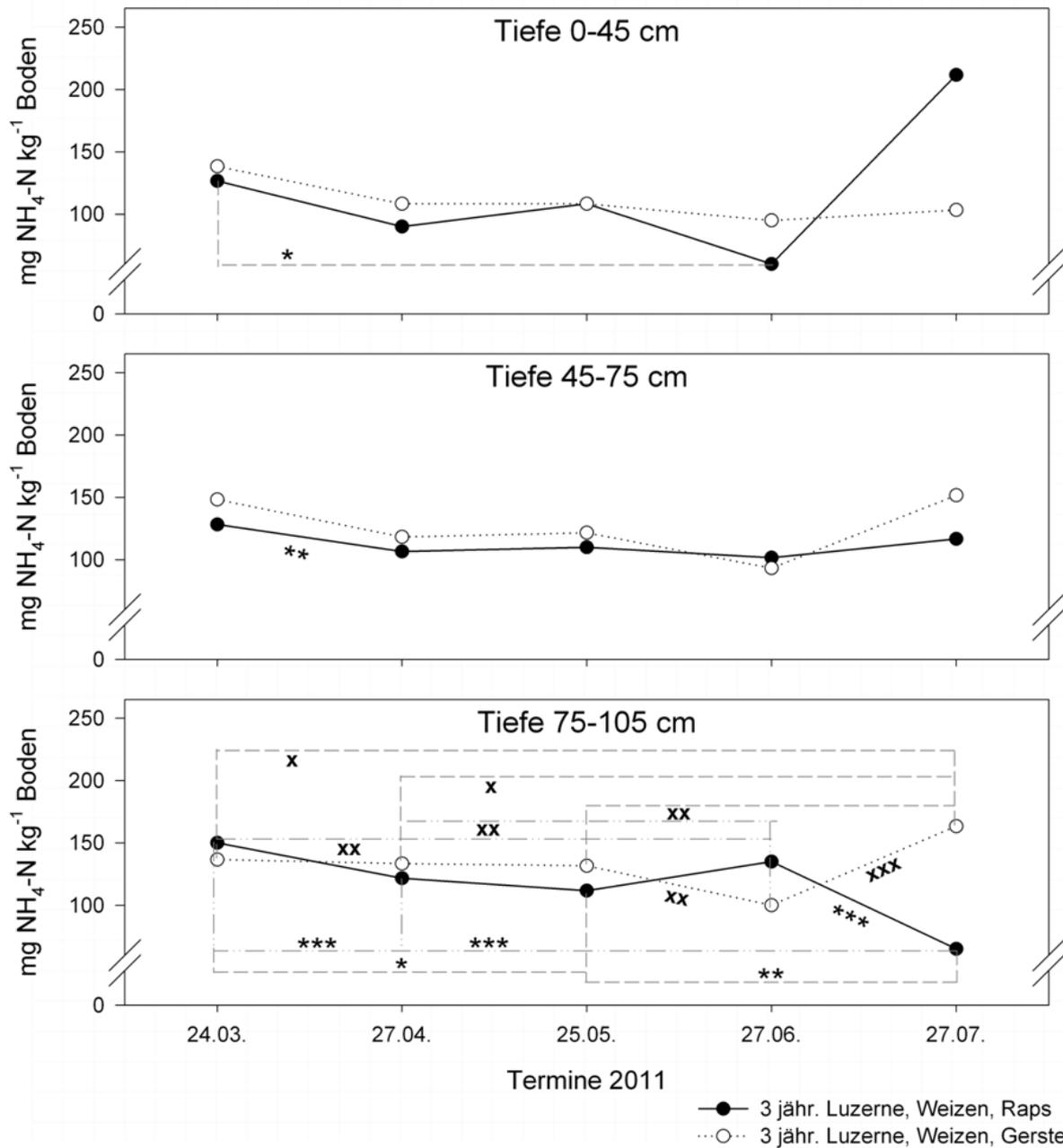


Abb. 4.5: Gehalte an spez. geb. NH₄-N während der Vegetationsperiode 2011 unter Raps und Gerste nach 3 jährigem Luzerne- und einjährigem Weizenanbau in drei Bodentiefen. Statistische Auswertung zwischen den Probenahmeterminen: ANOVA, Tukey-Test ($\alpha=0,05$): ^x/_{*} = signifikant ($p \leq 0,05$), ^{xx}/_{**} = hoch signifikant ($p \leq 0,01$), ^{xxx}/_{***} = höchst signifikant ($p \leq 0,001$), keine Sterne = nicht signifikant. ^x/_{**}/_{***} für Signifikanzen bei Gerste, _{*}/_{**}/_{***} bei Raps.

Tab. 4.3: Statistische Auswertung zwischen den Varianten Raps und Gerste mit der mit Luzerne und Weizen als Vorfrüchte. Wurde zugunsten der Übersichtlichkeit nicht in den Graphiken dargestellt. t-Test ($\alpha=0,05$) (vorher Levene-Test auf Varianzgleichheit): * = signifikant ($p \leq 0,05$), *** = höchst signifikant ($p \leq 0,001$), n.s. = nicht signifikant.

Bodentiefe	0-45 cm		45-75 cm		75-105 cm	
	p-Wert	Signifikanz	p-Wert	Signifikanz	p-Wert	Signifikanz
24.03.	0,135	n.s.	0,001	***	0,205	n.s.
27.04.	0,025	*	0,499	n.s.	0,102	n.s.
25.05.	1,000	n.s.	0,296	n.s.	0,055	n.s.
26.06.	0,022	*	0,843	n.s.	0,039	*
27.07.	0,042	*	0,357	n.s.	0,000	***

Vergleich der Hauptfrüchte nach Rohrschwengel als homorhizer Vorfrucht

Im Vergleich der beiden Varianten, bei denen Rohrschwengel dreijährig als Vorfrucht angebaut wurde und als erste Hauptfrucht Weizen folgte, konnte zu Vegetationsbeginn in der obersten Bodenschicht sowohl unter Raps (homorhiz) als auch unter Gerste (allorhiz) ein Gehalt von 136,7 mg spez. geb. $\text{NH}_4\text{-N kg}^{-1}$ Boden gefunden werden (Abb. 4.6). Bei der darauf folgenden Beprobung (27.04.) konnte bei beiden Varianten ein leichter Rückgang des Gehaltes dieser N-Fraktion festgestellt werden. Unter Raps blieb der Gehalt zum 3. Termin nahezu gleich, unter Gerste kam es zu einer weiteren Mobilisierung, die sich bis zum nächsten Probenahmetermin fortsetzte. Vom 3. auf den 4. Termin kam es dann bei Raps auch wieder zu einer Abnahme, so dass beide Varianten mit 76,7 mg (Raps) und 78,3 mg spez. geb. $\text{NH}_4\text{-N kg}^{-1}$ Boden (Gerste) nun wieder auf dem gleichen Level lagen. Unter Raps wurden 60,0 mg und unter Gerste 58,4 mg spez. geb. $\text{NH}_4\text{-N kg}^{-1}$ Boden innerhalb von vier Monaten mobilisiert. Der Unterschied zwischen den Gehalten des ersten und des vierten Termins waren signifikant. Auch war der Unterschied von der vorletzten zur letzten Probenahme bei beiden Varianten signifikant. Unter beiden Pflanzenarten wurde zum Ende der Vegetationsperiode hin NH_4^+ spezifisch gebunden, wobei unter Raps der Gehalt vom Anfang der Vegetationsperiode wieder erreicht wurde. Unterschiede zwischen den beiden Varianten Raps und Gerste waren zu keinem Beprobungstermin signifikant (Tab. 4.4).

In 45-75 cm Bodentiefe lag zu Versuchsbeginn der Gehalt an spez. geb. $\text{NH}_4\text{-N}$ unter Raps bei 156,7 mg und unter Gerste 138,3 mg kg^{-1} Boden. Bis zum 2. Termin wurde bei beiden Varianten fast die gleiche Menge an spez. geb. $\text{NH}_4\text{-N}$ mobilisiert, der Unterschied zum 1. Termin war unter Gerste signifikant. Bei der Rapsvariante wurde zwischen dem 2. und dem 3. Probenahmetermin ein starker Anstieg um 83,3 mg festgestellt, wobei der Unterschied höchst

signifikant war, ebenso die darauf folgende Mobilisierung von NH_4^+ mit 113,3 mg. Unter Gerste gab es eine ähnliche Dynamik, jedoch mit wesentlich geringeren Beträgen, wobei zwischen den Terminen auch keine signifikanten Unterschiede ermittelt werden konnten. Der Unterschied zwischen den beiden Varianten Raps und Gerste hingegen war hoch signifikant. Am 27.06. lag der Gehalt an spez. geb. $\text{NH}_4\text{-N}$ unter Gerste bei $100,0 \text{ mg kg}^{-1}$ und unter Raps bei $91,7 \text{ mg kg}^{-1}$, zum letzten Termin stiegen beide Gehalte parallel um rund 35 mg kg^{-1} an. Unter Gerste war dieser Unterschied signifikant, hingegen unter Raps nicht, was an der zu hohen Abweichung vom arithmetischen Mittel lag.

Wie auch schon im Vorjahr und bei nahezu allen anderen Varianten konnte auch bei diesen beiden Varianten in der tiefsten Bodenschicht (75-105 cm) der höchste Ausgangsgehalt an spez. geb. $\text{NH}_4\text{-N}$ festgestellt werden. Unter Raps wurden $170,0 \text{ mg}$ und unter Gerste $135,0 \text{ mg}$ spez. geb. $\text{NH}_4\text{-N kg}^{-1}$ Boden gemessen. Am 2. Beprobungstermin konnte unter beiden Pflanzenarten ein Rückgang des Gehaltes an spez. geb. $\text{NH}_4\text{-N}$ festgestellt werden, der Unterschied von $30,0 \text{ mg}$ zwischen Raps und Gerste konnte als höchst signifikant eingestuft werden. Unter Gerste konnte eine kontinuierliche Mobilisierung von NH_4^+ vom 1. bis zum 3. Probenahmetermin verzeichnet werden, während vom 3. bis zum letzten Termin NH_4^+ mit der gleichen Kontinuität spezifisch gebunden wurde. Damit war der Gehalt zu Beginn und zum Ende der Vegetationsperiode mit $135,0 \text{ mg}$ und $141,7 \text{ mg}$ spez. geb. $\text{NH}_4\text{-N kg}^{-1}$ Boden sehr ähnlich. Unter Raps wurde bis zum 4. Termin NH_4^+ mobilisiert, der Gehalt lag zu diesem Zeitpunkt bei $91,7 \text{ mg}$ spez. geb. $\text{NH}_4\text{-N kg}^{-1}$ Boden. Auch unter dieser allorhizen Pflanze wurde bis zum Ende der Vegetationsperiode wieder NH_4^+ spezifisch gebunden. Der Gehalt war mit $126,7 \text{ mg}$ spez. geb. $\text{NH}_4\text{-N kg}^{-1}$ Boden signifikant unterschiedlich zum Gehalt, der beim vorherigen Termin gemessen wurde.

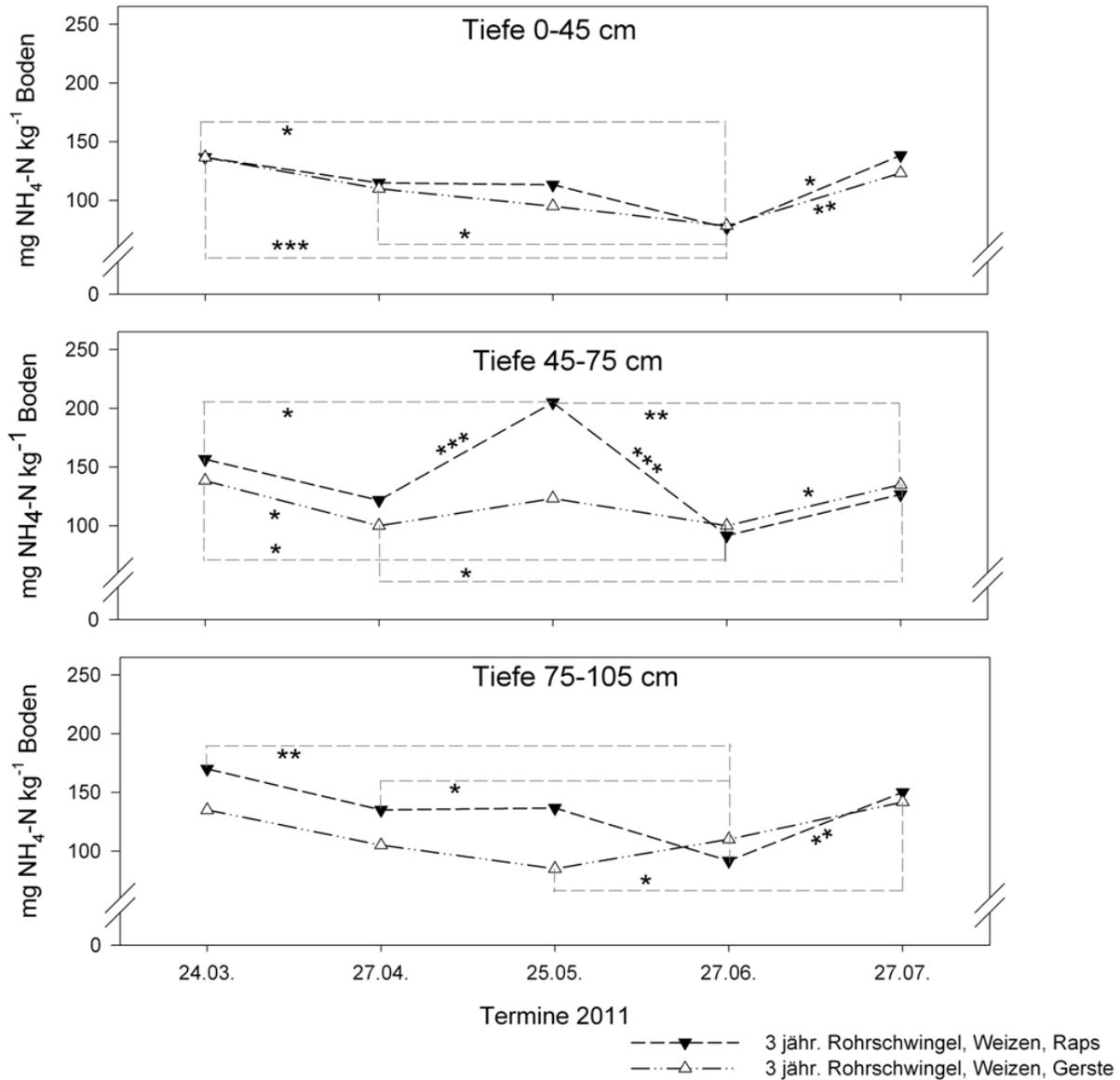


Abb. 4.6: Gehalte an spez. geb. NH₄-N während der Vegetationsperiode 2011 unter Raps und Gerste nach 3-jähr. Rohrschwengel- und 1-jähr. Weizenanbau in drei Bodentiefen. Statistische Auswertung zwischen den Probenahmeterminen: ANOVA, Tukey-Test ($\alpha=0,05$): * = signifikant ($p\leq 0,05$), ** = hoch signifikant ($p\leq 0,01$), *** = höchst signifikant ($p\leq 0,001$), keine Sterne = nicht signifikant.

Tab. 4.4: Statistische Auswertung zwischen den Varianten Raps und Gerste mit Rohrschwingel und Weizen als Vorfrüchte. Wurde zugunsten der Übersichtlichkeit nicht in den Graphiken dargestellt. t-Test ($\alpha=0,05$) (vorher Levene-Test): ** = hoch signifikant ($p \leq 0,01$), *** = höchst signifikant ($p \leq 0,001$), n.s. = nicht signifikant.

Bodentiefe	0-45 cm		45-75 cm		75-105 cm	
	p-Wert	Signifikanz	p-Wert	Signifikanz	p-Wert	Signifikanz
24.03.	1,000	n.s.	0,315	n.s.	0,084	n.s.
27.04.	0,656	n.s.	0,109	n.s.	0,000	***
25.05.	0,157	n.s.	0,006	**	0,212	n.s.
26.06.	0,911	n.s.	0,440	n.s.	0,291	n.s.
27.07.	0,187	n.s.	0,473	n.s.	0,346	n.s.

Einfluss der Vorfrüchte bei Raps als Hauptfrucht

Im folgenden Abschnitt wird der Einfluss der dreijährigen Vorfrüchte Luzerne und Rohrschwingel, jeweils gefolgt von Weizen auf die Dynamik des spez. geb. $\text{NH}_4\text{-N}$ unter Raps betrachtet (Abb. 4.7). In 0-45 cm Bodentiefe konnte unter Raps bei Luzerne als dreijähriger Vorfrucht ein Anfangsgehalt von 126,7 mg und bei Rohrschwingel als 3 jährige Vorfrucht von 136,7 mg spez. geb. $\text{NH}_4\text{-N kg}^{-1}$ Boden gemessen werden. Bei den folgenden 3 Probenahmen war der Gehalt nach Rohrschwingel tendenziell höher als nach Luzerne. Die Unterschiede zwischen diesen beiden Varianten waren jedoch zu keinem der ersten 4 Termine signifikant. Am Ende der Vegetationsperiode konnte nach Rohrschwingel und Luzerne als dreijähriger Vorfrucht ein Anstieg des spez. geb. $\text{NH}_4\text{-N}$ -Gehaltes festgestellt werden, wobei dieser nach Luzerne um 85,0 mg kg^{-1} höher war als nach Rohrschwingel und auch statistisch abgesichert werden konnte.

In der nächsten Bodenschicht (45-75 cm) konnte nach Luzerne nur eine sehr geringe Dynamik des spez. geb. $\text{NH}_4\text{-N}$ festgestellt werden. Nach Rohrschwingel hingegen war zum 3. Termin ein starker Anstieg im Gehalt dieser N-Fraktion zu verzeichnen. Die Differenz zwischen den beiden Varianten war hoch signifikant. Bis zum 4. Probenahmetermin wurden nach Rohrschwingel 113,3 mg spez. geb. $\text{NH}_4\text{-N kg}^{-1}$ Boden freigesetzt, somit waren die Gehalte nach beiden Vorfrüchten wieder fast gleich. Dies veränderte sich auch nicht bei der letzten Beprobung des Jahres 2011.

In der Bodenschicht von 75-105 cm war die Dynamik an spez. geb. $\text{NH}_4\text{-N}$ nach beiden Vorfruchtvarianten während der ersten drei Probenahmetermine sehr ähnlich, nach Rohrschwingel war der Gehalt jedoch um durchschnittlich 19,4 mg spez. geb. $\text{NH}_4\text{-N kg}^{-1}$ Boden höher als nach Luzerne. Statistisch konnte der Unterschied nicht abgesichert werden. Eine verstärkte Mobilisierung von spez. geb. $\text{NH}_4\text{-N}$ nach Luzerne und die spezifische Bindung

von $\text{NH}_4\text{-N}$ nach Rohrschwengel zwischen dem 3. und 4. Probenahmetermin ergab einen signifikanten Unterschied zwischen den beiden Varianten. Völlig entgegengesetzt entwickelten sich die Gehalte an spez. geb. $\text{NH}_4\text{-N}$ vom 27.06. zum 27.07., nach Luzerne zeigte sich eine hohe Mobilisierung, während nach Rohrschwengel eine erhöhte spezifische Bindung von $\text{NH}_4\text{-N}$ stattfand. Der Gehalt der Luzernevariante fiel auf 65 mg kg^{-1} und konnte als höchst signifikant unterschiedlich zur Rohrschwengelvariante mit $150 \text{ mg spez. geb. NH}_4\text{-N kg}^{-1}$ Boden beschrieben werden.

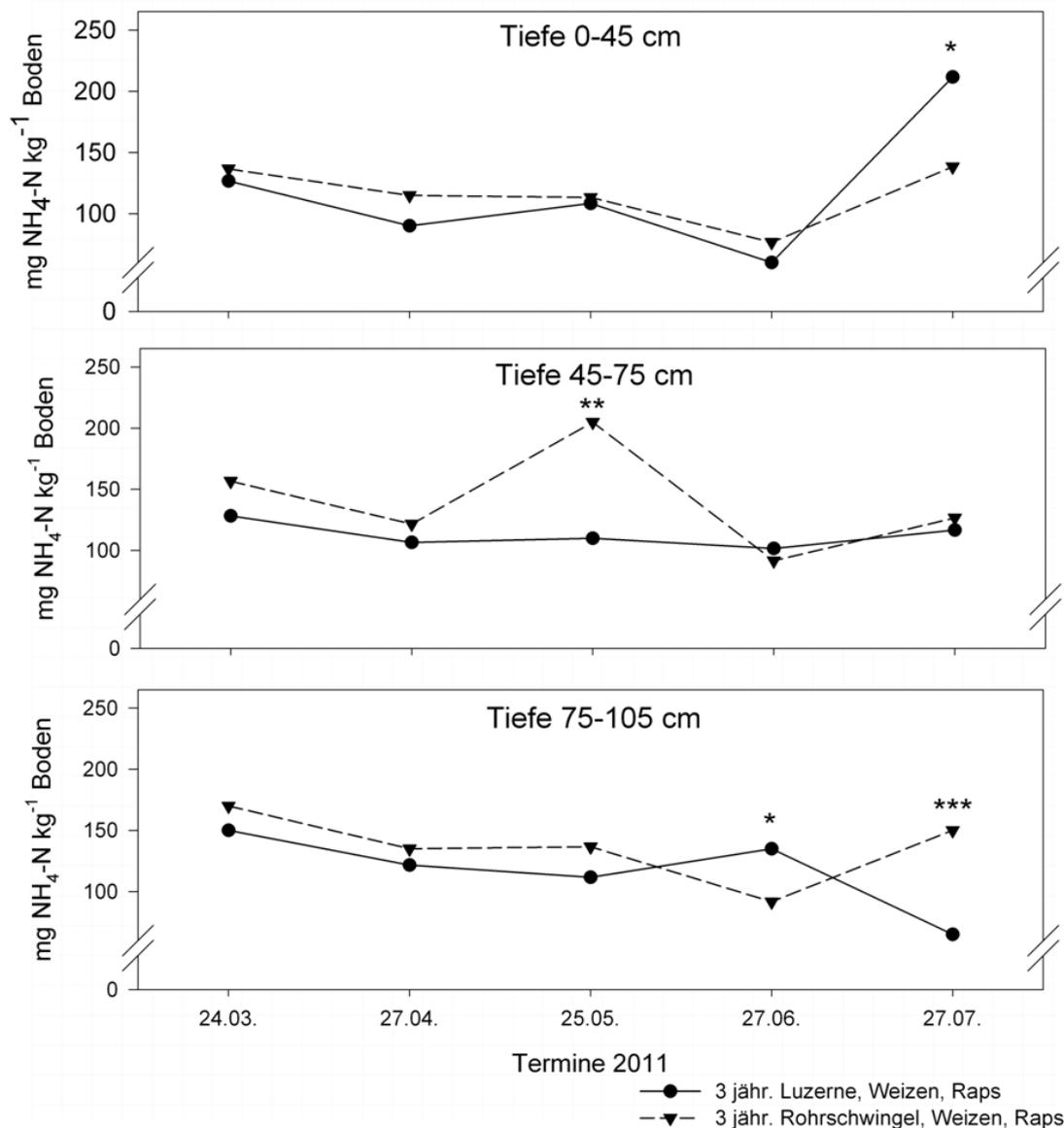


Abb. 4.7: Gehalte an spez. geb. $\text{NH}_4\text{-N}$ während der Vegetationsperiode 2011 unter Raps nach 3-jähr. Rohrschwengel- bzw. Luzerneanbau und 1-jähr. Weizenanbau in drei Bodentiefen. Statistische Auswertung zwischen den Probenahmeterminen: ANOVA, Tukey-Test ($\alpha=0,05$): * = signifikant ($p \leq 0,05$), ** = hoch signifikant ($p \leq 0,01$), *** = höchst signifikant ($p \leq 0,001$), keine Sterne = nicht signifikant.

Einfluss der Vorfrüchte bei Gerste als homorhize Hauptfrucht

Im Folgenden wird die Dynamik des spez. geb. $\text{NH}_4\text{-N}$ unter Gerste nach den dreijährig angebauten Vorfrüchten Luzerne bzw. Rohrschwingel verglichen (Abb. 4.8). Im Oberboden waren die Gehalte beider Varianten bei den ersten beiden Probenahmen nahezu gleich. Unabhängig von der Vorfrucht wurde vom 1. bis zum 4. Probenahmetermin spez. geb. $\text{NH}_4\text{-N}$ mobilisiert. Die Unterschiede zwischen den einzelnen Probenahmeterminen waren zwar nicht signifikant, ungeachtet dessen wurden aber im Mittel 43,3 mg $\text{NH}_4\text{-N}$ nach Luzerne und 58,4 mg $\text{NH}_4\text{-N}$ nach Rohrschwingel von Versuchsbeginn bis zum 4. Probenahmetermin aus den Tonmineralzwischenschichten freigesetzt. Marginal höhere Gehalte wurden nach Luzerne beim 3. und 4. Termin beobachtet. Eine signifikante Zunahme zur letzten Bodenprobenahme konnte jedoch nur nach Rohrschwingel festgestellt werden. Insgesamt konnten zu keinem Zeitpunkt statistische Unterschiede zwischen den Gehalten nach Rohrschwingel und denen nach Luzerne festgestellt werden.

In 45-75 cm Bodentiefe war die Dynamik des spez. geb. $\text{NH}_4\text{-N}$ bei beiden Varianten sehr ähnlich. Zu Beginn des Probenahmezeitraums wurden nach Luzerne 136,7 mg spez. geb. $\text{NH}_4\text{-N kg}^{-1}$ Boden gemessen. Dieser Wert war signifikant unterschiedlich zum Gehalt von 138,3 mg spez. geb. $\text{NH}_4\text{-N kg}^{-1}$ Boden nach Rohrschwingel als Vorfrucht. Alle folgenden Probenahmen ergaben keine signifikanten Unterschiede.

Im Unterboden bei 75-105 cm Tiefe konnten die meisten signifikanten Unterschiede zwischen den Varianten beobachtet werden. Bei der ersten Probenahme waren die Gehalte unter beiden Varianten fast identisch. Der folgende Termin wies nach Rohrschwingel als Vorfrucht eine Mobilisierung von spez. geb. $\text{NH}_4\text{-N}$ auf, dies führte zu einem statistisch niedrigerem Gehalt im Vergleich zu dem nach Luzerne. Am 25.05. war der Unterschied zwischen beiden Varianten mit 46,7 mg spez. geb. $\text{NH}_4\text{-N kg}^{-1}$ Boden noch größer und ebenfalls signifikant. Die Gehalte beider Varianten näherten sich zum 4. Termin wieder stark an, es gab keinen bedeutenden Unterschied mehr. Zum Ende der Vegetationsperiode wurde nach beiden Vorfrüchten wieder NH_4^+ spezifisch gebunden, wobei nach Luzerne ein signifikant höherer Gehalt im Vergleich zu dem nach Rohrschwingel gemessen wurde.

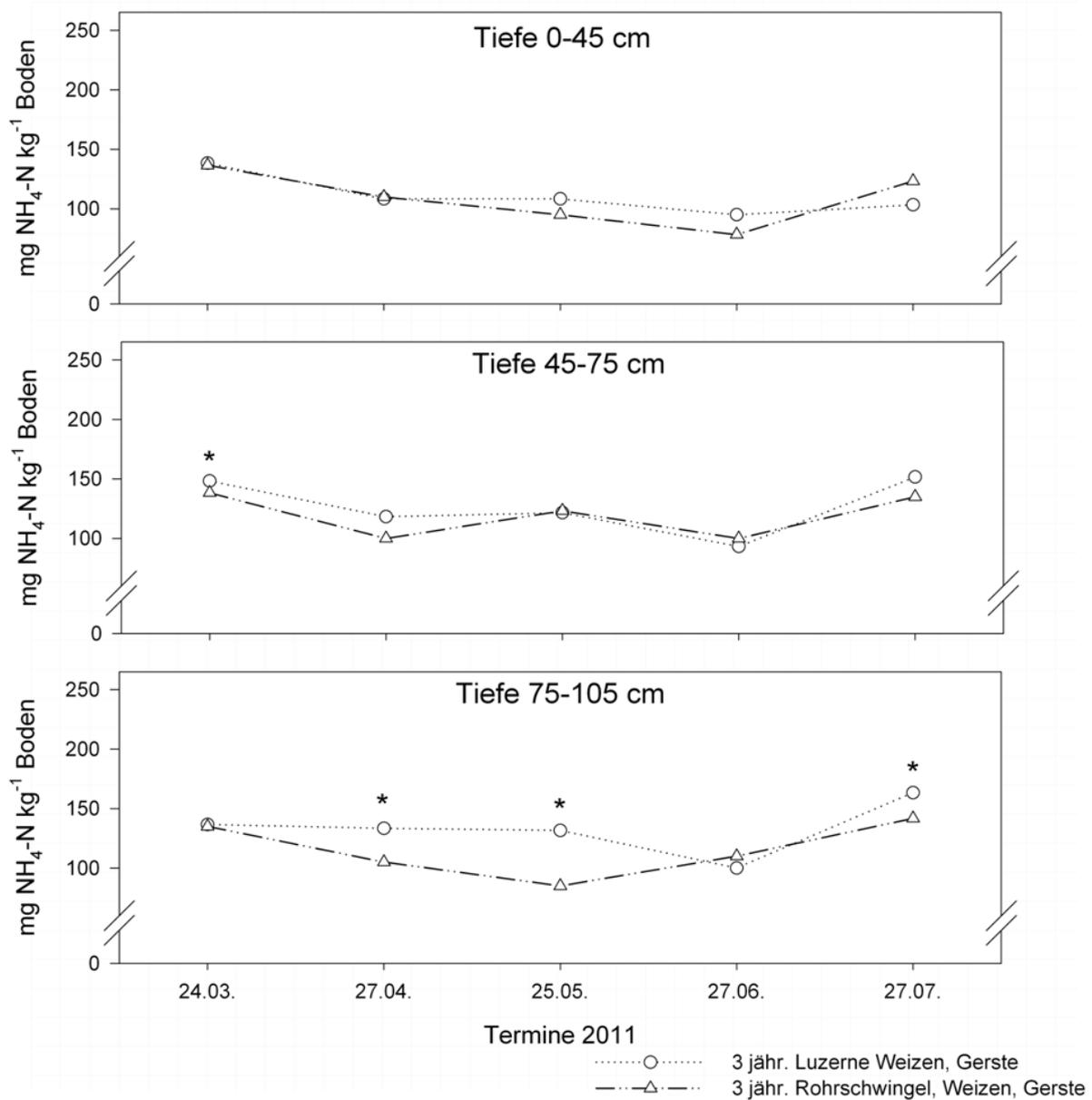


Abb. 4.8: Gehalte an spez. geb. NH₄-N während der Vegetationsperiode 2011 unter Gerste nach 3-jähr. Rohrschwengel- bzw. Luzerneanbau und 1-jähr. Weizenanbau in drei Bodentiefen. Statistische Auswertung zwischen den Varianten: ANOVA, Tukey-Test ($\alpha=0,05$): * = signifikant ($p \leq 0,05$), keine Sterne = nicht signifikant.

Einfluss einer gesteigerten N-Versorgung auf die Mobilisierung von spez. geb. NH_4^+

Der am 28.04.2010 angelegte Düngesteigerungsversuch wurde während der Vegetationsperiode 2010 viermal beprobt. Im Beprobungsjahr wurde auf den Parzellen Weizen angebaut. Als Vorfrucht dienten jeweils dreijährig Luzerne bzw. Wegwarte.

Im Folgenden wird zunächst die Variante mit Luzerne als Vorfrucht beschrieben. Zum ersten Probenahmetermin, der 5 Wochen nach dem Applikationstermin lag, konnten im Oberboden Gehalte an spez. geb. $\text{NH}_4\text{-N}$ von $100,2 \text{ mg kg}^{-1}$ Boden bei 0 kg N ha^{-1} , $78,9 \text{ mg kg}^{-1}$ Boden bei 80 kg N ha^{-1} und $92,2 \text{ mg kg}^{-1}$ Boden bei 160 kg N ha^{-1} festgestellt werden (Abb. 4.9). Beim Termin im Juni wurde bei der 80-kg-Variante eine Zunahme um $24,2 \text{ mg}$ spez. geb. $\text{NH}_4\text{-N}$ gemessen, hingegen wurden bei den anderen Varianten geringe Mengen mobilisiert. Bei der 3. Probenahme war ein deutlicher Anstieg bei der 160-kg-N-Variante zu verzeichnen, der sich bis zum letzten Termin fortsetzte und im Oberboden mit $134,4 \text{ mg}$ spez. geb. $\text{NH}_4\text{-N kg}^{-1}$ Boden den höchsten Gehalt aller drei Varianten erreichte. Vom 2. zum 3. Termin konnte bei 0 kg N nur ein marginaler Anstieg beobachtet werden, am Ende der Vegetationsperiode konnten $125,1 \text{ mg}$ spez. geb. $\text{NH}_4\text{-N}$ ermittelt werden. Bis zum Julitermin wurden bei der 80-kg-N-Variante $10,4 \text{ mg}$ $\text{NH}_4\text{-N}$ mobilisiert, aber bis zum Ende der Beprobungszeit auch wieder spezifisch gebunden.

In der Bodenschicht 45-75 cm lagen die Gehalte aller Varianten bei der ersten Probenahme eng zusammen, das Gesamtniveau jedoch war höher als im Oberboden. Bei der 80-kg-N-Variante kam es bis zum 3. Probenahmetermin zu einem leichten Anstieg des Gehaltes an spez. geb. $\text{NH}_4\text{-N}$, dann folgte zum letzten Termin hin sehr starker Anstieg. Insgesamt wurden in der Vegetationsperiode bei dieser Variante $47,8 \text{ mg}$ $\text{NH}_4\text{-N kg}^{-1}$ in den Tonmineralzwischenschichten gebunden. Ohne zusätzliche Düngung konnte bereits zum Junitermin ein deutlicher Anstieg des spez. geb. $\text{NH}_4\text{-N}$ auf $124,9 \text{ mg kg}^{-1}$ Boden gemessen werden, gefolgt von einer Mobilisierung von $12,3 \text{ mg kg}^{-1}$ Boden. Zum Ende des Zeitraumes wurde wieder ein höherer Gehalt an spez. geb. $\text{NH}_4\text{-N}$ von $143,1 \text{ mg kg}^{-1}$ Boden gemessen. Bei der Düngestufe 160 kg N kam es zu einem verhältnismäßigen starken Anstieg zum 2. Termin auf $141,0 \text{ mg kg}^{-1}$ Boden, im darauf folgenden Zeitraum wurde eine Mobilisierung von $34,7 \text{ mg}$ spez. geb. $\text{NH}_4\text{-N kg}^{-1}$ Boden ermittelt. Wie auch bei den beiden anderen Varianten konnte zum Ende der Vegetationsperiode ein Wiederanstieg festgestellt werden.

Zu Beginn des Beprobungszeitraums konnten in der tiefsten Bodenschicht (75-105 cm) zwischen den N-Düngerstufen 0 kg und 80 kg nur geringe Unterschiede festgestellt werden, wohingegen die 160-kg-Stufe mit $151,0 \text{ mg}$ spez. geb. $\text{NH}_4\text{-N kg}^{-1}$ Boden rund 24 mg kg^{-1} Boden über den beiden anderen Stufen lag. Zum 2. Termin wurde bei den gedüngten Varianten eine Mobilisierung von 13 mg $\text{NH}_4\text{-N}$ verzeichnet. Bei der 0-kg-Variante hingegen wurde ein Anstieg des $\text{NH}_4\text{-N}$ -Gehaltes von $131,0 \text{ mg}$ auf $142,1 \text{ mg kg}^{-1}$ Boden ermittelt, gefolgt von einer Freisetzung von 19 mg . Zum Ende der Vegetationsperiode wurden $162,4 \text{ mg}$ spez. geb. $\text{NH}_4\text{-N kg}^{-1}$ Boden gemessen. Die 80-kg- und 160-kg-Varianten hatten eine sehr ähnliche Dynamik, bei beiden konnte ein marginaler Anstieg zum Julitermin und ein etwas steilerer Anstieg zum August hin verzeichnet werden. Die hohe Düngestufe erreichte einen

Gehalt von 167,9 mg und die niedrige 131,1 mg spez. geb. $\text{NH}_4\text{-N kg}^{-1}$ Boden. Alle beschriebenen Unterschiede waren nicht signifikant und zeigen daher nur Tendenzen auf.

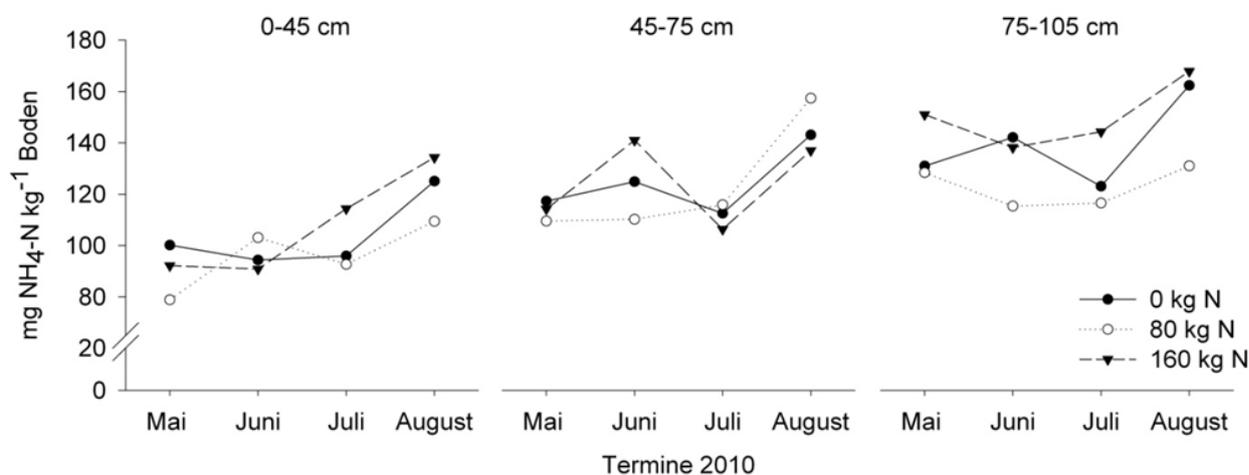


Abb. 4.9: Gehalte an spez. geb. $\text{NH}_4\text{-N}$ während der Vegetationsperiode 2010 unter Weizen nach 3-jähr. Luzerneanbau in drei Bodentiefen bei unterschiedlicher N-Versorgung des Oberbodens. Statistische Auswertung zwischen den Varianten: ANOVA, Tukey-Test ($\alpha=0,05$): ergab keine signifikanten Unterschiede.

Unter Weizen nach dreijährigem Wegwarteanaub waren die Gehalte an spez. geb. $\text{NH}_4\text{-N}$ in der obersten Bodenschicht (0-45 cm) während des Beprobungszeitraums bei der 0 und 160 kg Düngestufe von einem zum nächsten Termin nahezu gleich, wenn auch mit Unterschieden im Betrag der Zu- bzw. Abnahme (Abb. 4.10). Die 160-kg-N-Variante hatte mit 103,7 $\text{mg spez. geb. NH}_4\text{-N kg}^{-1}$ Boden die höchsten Gehalte zum ersten Probenahmeterrin, ohne Stickstoffdüngung lag der Gehalt bei 88,6 mg kg^{-1} Boden. Bei der mittleren Düngestufe wurde vom ersten bis zum 3. Termin eine leichte aber kontinuierliche Mobilisierung des in den Tonmineralzwischen-schichten gebundenen $\text{NH}_4\text{-N}$ in Höhe von 12,1 mg kg^{-1} festgestellt. Im Zeitraum Juni bis Juli konnte bei allen Düngestufen eine Mobilisierung des spez. geb. $\text{NH}_4\text{-N}$ festgestellt werden. Während die Freisetzung bei 80 kg N nur marginal war, wurden bei 160 kg N 31,4 $\text{mg spez. geb. NH}_4\text{-N kg}^{-1}$ Boden mobilisiert. Der Gehalt der Variante, die keinen Dünger erhalten hatte, fiel von 94,6 mg auf 79,3 $\text{mg spez. geb. NH}_4\text{-N kg}^{-1}$ Boden. Die Ergebnisse der Probenahme im August zeigten, dass bei allen drei Varianten wieder $\text{NH}_4\text{-N}$ in den Tonmineralzwischen-schichten gebunden wurden. Der Gehalt der ungedüngten Variante lag mit 106,7 mg nur knapp unter der 80-kg-N-Variante mit 109,7 $\text{mg spez. geb. NH}_4\text{-N kg}^{-1}$ Boden, bei der hohen Düngergabe lag der Gehalt bei 132,5 $\text{mg spez. geb. NH}_4\text{-N kg}^{-1}$ Boden.

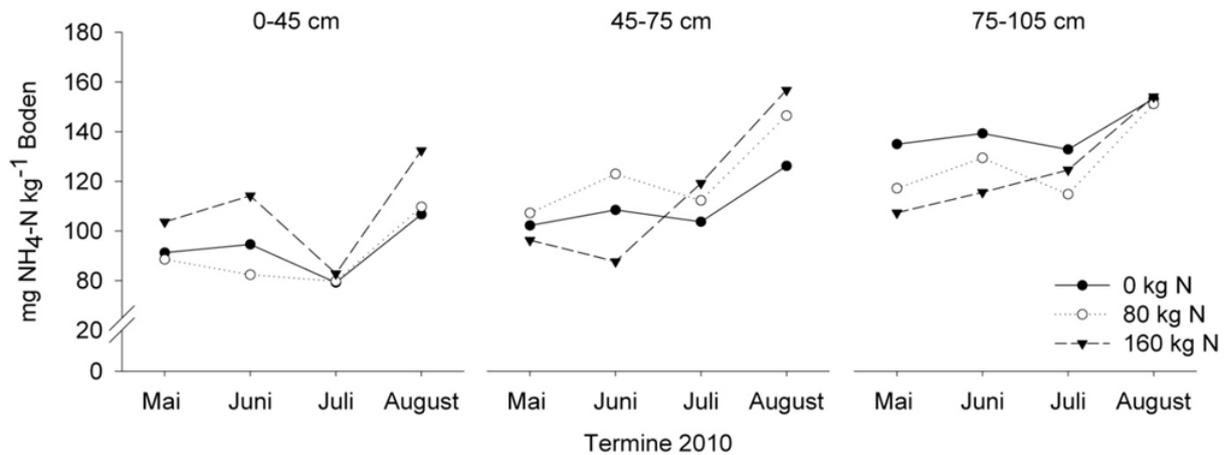


Abb. 4.10: Gehalte an spez. geb. NH₄-N während der Vegetationsperiode 2010 unter Weizen nach 3-jähr. Wegwarteanaubau in drei Bodentiefen bei unterschiedlicher N-Versorgung des Oberbodens. Statistische Auswertung zwischen den Varianten: ANOVA, Tukey-Test ($\alpha=0,05$): ergab keine signifikanten Unterschiede.

In der Bodentiefe 45-75 cm wurde in der höchsten Düngevariante mit 96,3 mg kg⁻¹ Boden der geringste Gehalt an spez. geb. NH₄-N zu Beginn des Probenahmezeitraums gefunden, die 0-kg- und die 80-kg-Variante lagen mit 102,3 mg kg⁻¹ Boden bzw. 107,2 mg kg⁻¹ Boden nahe dabei. Während es bei der ungedüngten und der 80-kg-N-Variante von Mai bis Juni zu einem Anstieg des Gehaltes an spez. geb. NH₄-N kam, wurde bei 160 kg N NH₄-N mobilisiert. Vom Juni- bis zum Augusttermin wurden bei der hohen Düngestufe 69,0 mg NH₄-N kg⁻¹ Boden spezifisch gebunden. Bei den beiden anderen Varianten konnte zum 2. Beprobungstermin eine Zunahme des Gehaltes an spez. geb. NH₄-N festgestellt werden, gefolgt von einer Mobilisierung in gleichem Maße. Zum Ende der Vegetationsperiode wurden, wie auch bereits im Oberboden, bei beiden Düngestufen NH₄-N spezifisch gebunden. Die Endgehalte lagen ohne Düngung bei 126,2 mg kg⁻¹ Boden, bei der 80-kg-Variante bei 146,5 mg kg⁻¹ Boden und bei der 160-kg-Variante bei 156,8 mg spez. geb. NH₄-N kg⁻¹ Boden. Wie auch im Oberboden konnten alle beschriebenen Unterschiede statistisch nicht abgesichert werden.

In 75-105 cm Bodentiefe wies die Dynamik des spez. geb. NH₄-N bei der 0-kg- und der 80 kg Variante ähnliche Muster auf wie in der vorherigen Tiefenstufe, nur dass hier das Niveau der ungedüngten Variante höher war als das der 80-kg-N-Variante. Der Gehalt der 160-kg-N-Variante stieg stetig bis auf 154,1 mg kg⁻¹ zum Termin im August an. Auch die anderen beiden Varianten erreichten am Ende des Beprobungszeitraums einen Gehalt an spez. geb. NH₄-N von knapp über 150 mg kg⁻¹ Boden. Die hier aufgezeigten Unterschiede zwischen den Varianten waren ebenfalls zu keinem Probenahmetermin signifikant und stellen nur Tendenzen dar.

4.1.2 Verarmung der Rhizosphäre des Unterbodens an spez. geb. $^{15}\text{NH}_4^+$

Die mit $^{15}\text{NH}_4^+$ markiertem Boden gefüllten Diffusionstaschen wurden nach viermonatiger Inkubation in 60 cm Bodentiefe unter Gerste bzw. unter Raps wieder entnommen. Die Abbildungen 4.11 und 4.12 zeigen die Aussparungen in denen die Diffusionstaschen während des Versuchszeitraums platziert waren. Es ist deutlich zu erkennen, dass die Wurzeln der Pflanzen auch von unten gegen die untere Gazeoberfläche der Diffusionstaschen gewachsen waren.



Abb. 4.11: Aussparungen nach Entnahme der Diffusionstaschen unter Gerste im Sommer 2011.



Abb. 4.12: Aussparungen nach Entnahme der Diffusionstaschen unter Raps im Sommer 2011.

Der Versuchsboden in den Diffusionstaschen, dessen Tonmineralzwischenschichten mit $^{15}\text{NH}_4^+$ belegt wurden, enthielt zu Beginn des Versuches $35,2 \text{ mg spez. geb. } ^{15}\text{NH}_4\text{-N kg}^{-1}$ Boden. Nach vier Monaten Versuchsdauer konnten davon insgesamt unter Raps noch 81% und unter Gerste noch 89% wiedergefunden werden. Beim Betrachten der Werte der einzelnen Bodenscheiben, die jede für sich eine bestimmte Distanz zur Wurzeloberfläche darstellte, war zu erkennen, dass die Verarmung innerhalb einer Diffusionstasche nicht homogen war. In Abbildung 4.13 sind die Einzelwerte der 11 Bodenscheiben dargestellt. Die ersten vier Scheiben von den Gazeoberflächen her gesehen hatten je eine Stärke von 2 mm, die jeweils fünfte Scheibe 4 mm und die mittlere Scheibe 6 mm. Scheibe 1 war die oberste Scheibe,

welche in Richtung Pflanze gerichtet war, Scheibe 11 zeigte entsprechend nach unten. Unter Raps wurde im Durchschnitt 1,5-mal so viel spez. geb. $^{15}\text{NH}_4\text{-N}$ ($7,8 \text{ }^{15}\text{NH}_4\text{-N kg}^{-1}$ Boden) freigesetzt, als unter Gerste ($5,1 \text{ mg spez. geb. }^{15}\text{NH}_4\text{-N kg}^{-1}$ Boden).

In den ersten 2 mm des Bodens unterhalb der Gaze wurden unter Raps noch $28,2 \text{ mg spez. geb. }^{15}\text{NH}_4\text{-N kg}^{-1}$ Boden gefunden. Somit wurden $7,1 \text{ mg }^{15}\text{NH}_4\text{-N}$ mobilisiert. Nach einer etwas geringeren Freisetzung aus Scheibe 2 und 3 folgte eine erhöhte Mobilisierung des $^{15}\text{NH}_4\text{-N}$ aus den Tonmineralzweischichten aus Scheibe 5 ($7,8 \text{ mg spez. geb. }^{15}\text{NH}_4\text{-N kg}^{-1}$ Boden). In Scheibe 6 (Mitte der Diffusionstasche) wurde mit $25,9 \text{ mg spez. geb. }^{15}\text{NH}_4\text{-N kg}^{-1}$ Boden der geringste Gehalt an spez. geb. $\text{NH}_4\text{-N}$ nach der Inkubation gemessen, was einer Freisetzung von $9,3 \text{ mg spez. geb. }^{15}\text{NH}_4\text{-N kg}^{-1}$ Boden entspricht. Die Analyse der Scheibe 8 ergab eine reduzierte Freisetzung des spez. geb. $^{15}\text{NH}_4$, ihr Gehalt erreichte fast wieder den Wert von Scheibe 1. Die darauf folgenden Scheiben wiesen marginale Schwankungen auf, so dass Scheibe 11, welche direkt an der Gaze (Wurzeloberfläche) lag, einen Gehalt von $28,0 \text{ mg spez. geb. }^{15}\text{NH}_4\text{-N kg}^{-1}$ Boden hatte. Ohne Ausnahme waren die Unterschiede zwischen Ursprungsboden und jeder einzelner Bodenscheibe der Diffusionstaschen unter Raps höchst signifikant. Verallgemeinert kann gesagt werden, dass die Freisetzung aus den ersten 6 mm von den beiden Gazeoberflächen her gesehen ähnlich hoch war. Im Gegensatz dazu war die Mobilisierung von $^{15}\text{NH}_4^+$ aus den Tonmineralzweischichten im Zentrum der Diffusionstaschen unter Raps, mit $9,3 \text{ mg spez. geb. }^{15}\text{NH}_4\text{-N kg}^{-1}$ Boden, am höchsten. Insgesamt wurde unter Raps aus einer Diffusionstasche, gefüllt mit 200 g Boden, $1,6 \text{ mg spez. geb. }^{15}\text{NH}_4\text{-N}$ freigesetzt, das entspricht $7,8 \text{ mg spez. geb. }^{15}\text{NH}_4\text{-N kg}^{-1}$ Boden.

Unter Gerste konnten in der ersten Scheibe von oben $30,8 \text{ mg spez. geb. }^{15}\text{NH}_4\text{-N kg}^{-1}$ Boden gefunden werden. Ein Rückgang der Freisetzung, erkennbar am höheren Gehalt von $31,7 \text{ mg spez. geb. }^{15}\text{NH}_4\text{-N kg}^{-1}$ Boden, wurde bei Scheibe 4 verzeichnet. Der geringste Gehalt an spez. geb. $\text{NH}_4\text{-N}$, der unter Gerste gemessen wurde, lag bei $29,0 \text{ mg spez. geb. }^{15}\text{NH}_4\text{-N kg}^{-1}$ Boden in Scheibe 7, was einer Freisetzung von $6,2 \text{ mg spez. geb. }^{15}\text{NH}_4\text{-N kg}^{-1}$ Boden entspricht. Die Scheiben 8 bis 11 zeigten Werte zwischen $30,1 \text{ mg}$ und $30,7 \text{ mg spez. geb. }^{15}\text{NH}_4\text{-N kg}^{-1}$ Boden und lagen damit im Bereich der Scheiben 1 und 2. Wie auch bei der Rapsvariante war der Unterschied der einzelnen Scheiben zum Ursprungsboden höchst signifikant. Allgemein kann festgestellt werden, dass aus den ersten 4 mm, gemessen von der nach unten bzw. nach oben gerichteten Gaze (Wurzeloberfläche), ähnlich viel spez. geb. $^{15}\text{NH}_4\text{-N}$ freigesetzt wurde. Im Vergleich dazu war die Freisetzung aus den darauf folgenden 4 mm messbar geringer. Die Analyse der mittleren Scheiben ergab wieder eine höhere Freisetzung an spez. geb. $^{15}\text{NH}_4\text{-N}$ von $5,8 \text{ mg kg}^{-1}$ Boden. Aus einer Diffusionstasche, gefüllt mit 200 g Boden, wurden unter Gerste $1,0 \text{ mg spez. geb. }^{15}\text{NH}_4\text{-N}$ freigesetzt, das entspricht $5,1 \text{ mg spez. geb. }^{15}\text{NH}_4\text{-N kg}^{-1}$ Boden.

Die Werte der Bodenscheiben der Variante Raps unterschieden sich signifikant von den entsprechenden Werten der Bodenscheiben der Variante Gerste, Ausnahmen bildeten die Scheiben 2 und 7.

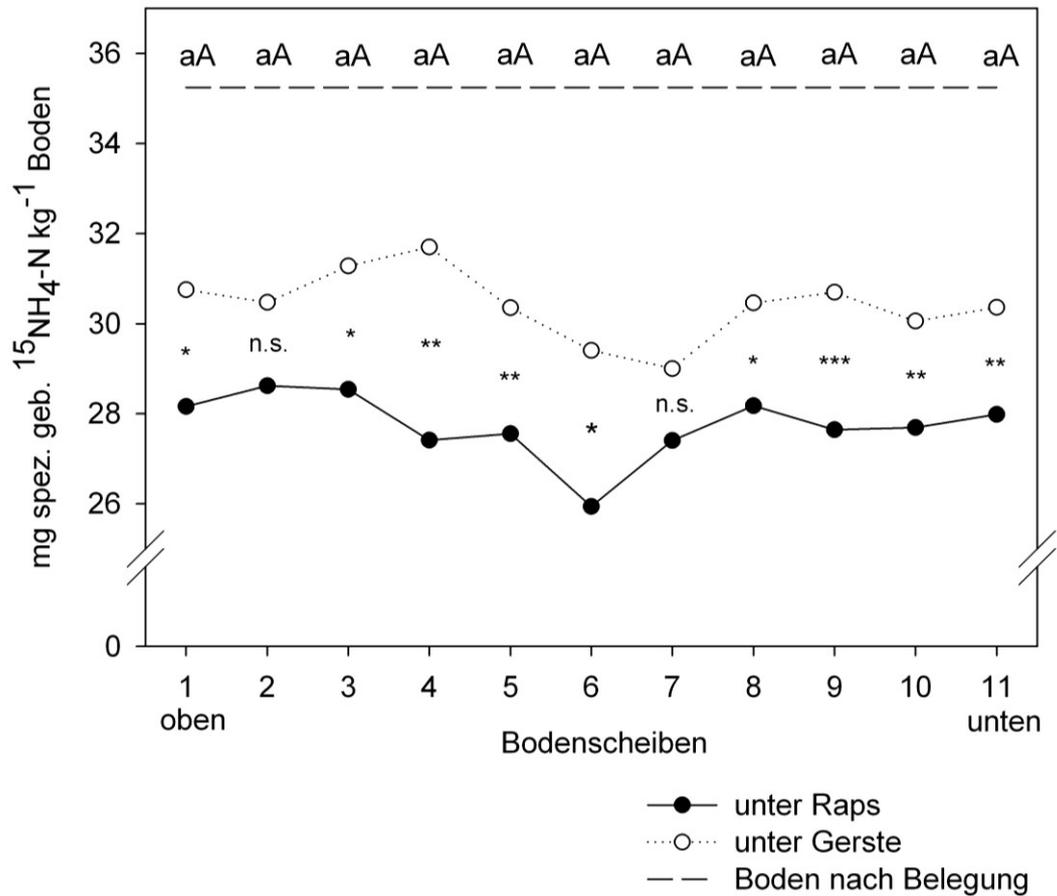


Abb. 4.13: Gehalt an spez. geb. $^{15}\text{NH}_4\text{-N}$ im Boden der Diffusionstaschen in verschiedenen Abständen zur Gaze. ANOVA, Tukey-Test ($\alpha=0,05$), signifikanter Unterschied zwischen Boden nach der Belegung mit $^{15}\text{NH}_4$ und Boden unter Raps (a) bzw. Gerste (A). Unterschied zwischen Boden unter Raps und Boden unter Gerste: n.s. = nicht signifikant ($p>0,05$), * = signifikant ($p\leq 0,05$), ** = hoch signifikant ($p\leq 0,01$), *** = höchst signifikant ($p\leq 0,001$).

Durch das Belegen des Versuchsbodens mit $^{15}\text{NH}_4\text{-N}$ stieg der Gesamtgehalt an spez. geb. $\text{NH}_4\text{-N}$ von $125,0 \text{ mg kg}^{-1}$ Boden auf $217,2 \text{ mg spez. geb. NH}_4\text{-N kg}^{-1}$ Boden an. Nach dem Ausgraben der Diffusionstaschen wies der Gesamtgehalt an spez. geb. $\text{NH}_4\text{-N}$ in den Bodenscheiben eine nahezu identische Verarmungskurve auf wie der Gehalt an spez. geb. $^{15}\text{NH}_4\text{-N}$ (Abb. 4.14). Durchschnittlich wurden unter Raps $33,9 \text{ mg spez. geb. NH}_4\text{-N kg}^{-1}$ Boden freigesetzt, unter Gerste hingegen nur $16,2 \text{ mg kg}^{-1}$ Boden. Die Unterschiede zwischen Gerste und Raps konnten statistisch nicht abgesichert werden. Auch die Unterschiede zwischen dem Gesamtgehalt an spez. geb. $\text{NH}_4\text{-N}$ vor dem Versuch und dem nach dem Versuch waren bei der Variante Gerste meistens nicht signifikant.

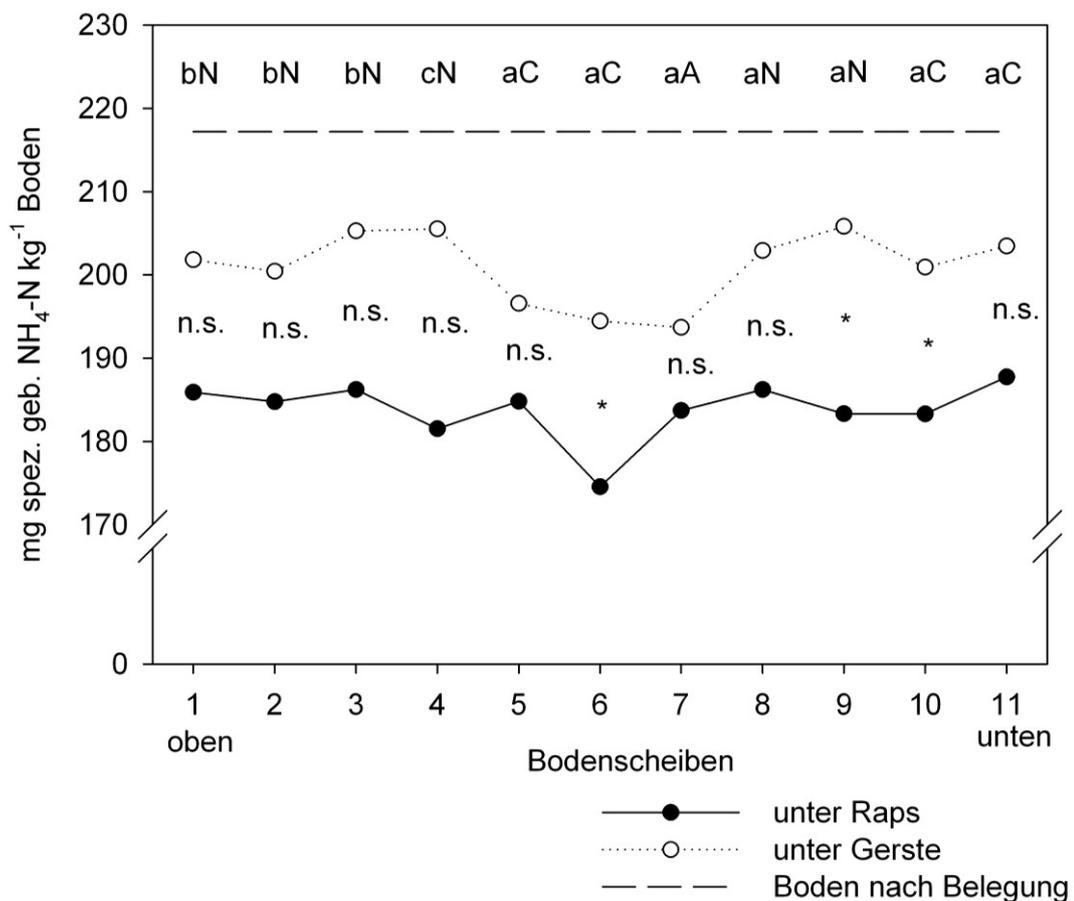


Abb. 4.14: Gesamt-Gehalt an spez. geb. $\text{NH}_4\text{-N}$ im Boden der Diffusionstaschen in verschiedenen Abständen zur Gaze. ANOVA, Tukey-Test ($\alpha=0,05$). Kleine Buchstaben: Vergleich des Bodens nach der Belegung mit $^{15}\text{NH}_4$ und Boden unter Raps, große Buchstaben: Vergleich des Bodens nach der Belegung mit $^{15}\text{NH}_4$ und unter Gerste; n, N = nicht signifikant ($p>0,05$); a, A = signifikant ($p\leq 0,05$); b, B = hoch signifikant ($p\leq 0,01$); c, C = höchst signifikant ($p\leq 0,001$); n.s. = nicht signifikant.

4.1.3 Gehalt an spez. geb. NH_4^+ in den Bioporen verschiedener Bodentiefen nach Ausbringung von ^{15}N -markiertem Pflanzenmaterial auf die Bodenoberfläche

Bodenproben

Nach der Ausbringung der mit ^{15}N markierten Luzerne (Anreicherung an ^{15}N im Pflanzenmaterial 15 at.%) am 13.05.2011 konnte im Laufe der Vegetationsperiode beobachtet werden, dass das ausgebrachte Pflanzenmaterial auf der Bodenoberfläche weniger wurde (Abb. 4.15). Bei der destruktiven Beprobung von drei Unterparzellen im Herbst 2011 konnten in den Bioporen und im Bulk-Boden sowohl im Oberboden (0-45 cm) als auch in den beiden Unterbodenstufen (45-75 und 75-105 cm) erhöhte Mengen ^{15}N bzw. spez. geb. $^{15}\text{NH}_4\text{-N}$ gefunden werden (Abb. 4.16). Auch im zweiten Beprobungsjahr konnte noch eine Anreicherung von ^{15}N bzw. spez. geb. $^{15}\text{NH}_4\text{-N}$ im Boden nachgewiesen werden. Ebenso wurden erhöhte ^{15}N -Mengen im Aufwuchs festgestellt.



Abb. 4.15: Unterparzelle am Tag der Ausbringung (13.05.2011) der ^{15}N -Luzerne und am Tag der Beprobung (25.10.2011).

Beprobungsjahr 2011

Der Gesamtstickstoffgehalt in den Bioporen war in allen drei Bodentiefen signifikant höher als im Bulk-Boden (Abb. 4.16). So konnten in den Bioporen im Oberboden (0-45 cm) Gehalte von $1473,1 \text{ mg Gesamt-N kg}^{-1}$ Boden gemessen werden, im Bulk-Boden hingegen $1042,7 \text{ mg N kg}^{-1}$ Boden. Mit zunehmender Bodentiefe reduzierte sich der Stickstoffgehalt sowohl in den Bioporen als auch im Bulk-Boden deutlich. Während der Gehalt in den Bioporen in der Bodentiefe 45-75 cm um weniger als 27% auf $1083,0 \text{ mg N kg}^{-1}$ Boden sank, konnte im Bulk-Boden ein Rückgang von über 50% auf $508,1 \text{ mg N kg}^{-1}$ Boden verzeichnet werden. Der Unterschied zwischen Bioporen und Bulk-Boden stieg mit zunehmender Tiefe von rund 430 mg auf über 570 mg N kg^{-1} Boden. Der Gesamt-N-Gehalt zwischen Bioporen und Bulk-Boden blieb auch bei 75-105 cm signifikant unterschiedlich. In den Bioporen konnten noch $984,9 \text{ mg N kg}^{-1}$ Boden gefunden werden, wohingegen im Bulk-Boden $444,3 \text{ mg N kg}^{-1}$ Boden gemessen wurden. Die Differenz zwischen Bioporen und Bulk-Boden war in dieser Tiefenstufe geringer

als die der vorherigen. Auch die Verminderung des Gesamtstickstoffgehalts von Tiefe 45-75 cm auf Tiefe 75-105 cm im Vergleich zum vorhergehenden Tiefenstufenwechsel war nicht mehr so hoch, trotzdem war der Unterschied sowohl bei den Bioporen als auch beim Bulk-Boden signifikant.

Der ^{15}N -Stickstoff aus der Luzerne bewirkte eine deutliche Anreicherung von ^{15}N in den Bioporen. So konnten im Oberboden $32,6 \text{ mg } ^{15}\text{N kg}^{-1}$ Boden gemessen werden, im Vergleich dazu war der Gehalt im Bulk-Boden mit $7,0 \text{ mg } ^{15}\text{N kg}^{-1}$ Boden signifikant niedriger. In der nächsten Tiefenstufe konnte noch die Hälfte der ^{15}N -Menge des Oberbodens in den Auskleidungen der Bioporen gefunden werden, im Bulk-Boden konnte keine Anreicherung mehr festgestellt werden, hier lag der Wert mit $2,0 \text{ mg } ^{15}\text{N kg}^{-1}$ Boden im natürlichen Bereich. Der Unterschied zwischen Bioporen und Bulk-Boden war auch hier signifikant. In den Bioporen wurden in einer Tiefe von 75-105 cm noch $10,6 \text{ mg } ^{15}\text{N kg}^{-1}$ Boden gemessen, während die Menge im Bulk-Boden im natürlichen Bereich blieb, der Unterschied konnte jedoch nicht mehr als signifikant eingestuft werden.

Die Gesamtgehalte an spez. geb. $\text{NH}_4\text{-N}$ in den Bioporen und im Bulk-Boden wiesen nur marginale Schwankungen auf, welche keine signifikanten Unterschiede zeigten. Insgesamt konnten im Mittel Werte von $116,0 \text{ mg spez. geb. } \text{NH}_4\text{-N kg}^{-1}$ Boden gemessen werden. Tendenziell war im Oberboden eine Differenz zwischen Bioporen und Bulk-Boden zu erkennen. So waren in den Bioporen $122,4 \text{ mg } \text{NH}_4\text{-N kg}^{-1}$ Boden spezifisch gebunden und im Bulk-Boden nur $110,5 \text{ mg}$. Dieser Unterschied konnte aber statistisch ebenfalls nicht abgesichert werden. Ebenso wenig gab es einen statistischen Unterschied zwischen den Tiefenstufen.

Bei der Betrachtung des spez. geb. $^{15}\text{NH}_4\text{-N}$ war deutlich zu erkennen, dass es dort zu deutlichen Unterschieden innerhalb der Faktoren Bioporen/Bulk-Boden bzw. Tiefe kam. Mit $1,08 \text{ mg spez. geb. } ^{15}\text{NH}_4\text{-N kg}^{-1}$ Boden in den Bioporen des Oberbodens konnte eine deutliche Anreicherung gegenüber dem Bulk-Boden nachgewiesen werden. Der Anteil des ^{15}N am spez. geb. $\text{NH}_4\text{-N}$ im Bulk-Boden war ebenfalls erhöht, er lag mit $0,57 \text{ mg spez. geb. } ^{15}\text{NH}_4\text{-N kg}^{-1}$ Boden jedoch nur knapp über dem natürlichen Anteil von $0,45 \text{ mg spez. geb. } ^{15}\text{NH}_4\text{-N kg}^{-1}$ Boden. Der Unterschied zwischen Bioporen und Bulk-Boden war höchst signifikant. Bei 45-75 cm Bodentiefe lag der Wert der Bioporen bei $0,76 \text{ mg spez. geb. } ^{15}\text{NH}_4\text{-N kg}^{-1}$ Boden und zeigte auch hier einen signifikanten Unterschied zum Bulk-Boden, dessen Wert bereits nicht mehr als Anreicherung anzusehen war, sondern sich dem natürlichen Gehalt angeglichen hatte. In der tiefsten beprobten Schicht konnte in den Bioporen, trotz einer weiteren Reduktion des ^{15}N -Anteils auf $0,60 \text{ mg spez. geb. } ^{15}\text{NH}_4\text{-N kg}^{-1}$ Boden, eine deutliche Anreicherung gegenüber des natürlichen Wertes gemessen werden. Der Gehalt des Bulk-Bodens änderte sich nicht mehr. Der Unterschied zwischen beiden Bodenbereichen war auch hier signifikant. Der Unterschied zwischen Oberboden und 45-75 cm Bodentiefe war sowohl bei den Bioporen als auch beim Bulk-Boden signifikant. Zwischen 45-75 cm und 75-105 cm Tiefe konnte kein statistisch abgesicherter Unterschied mehr festgestellt werden.

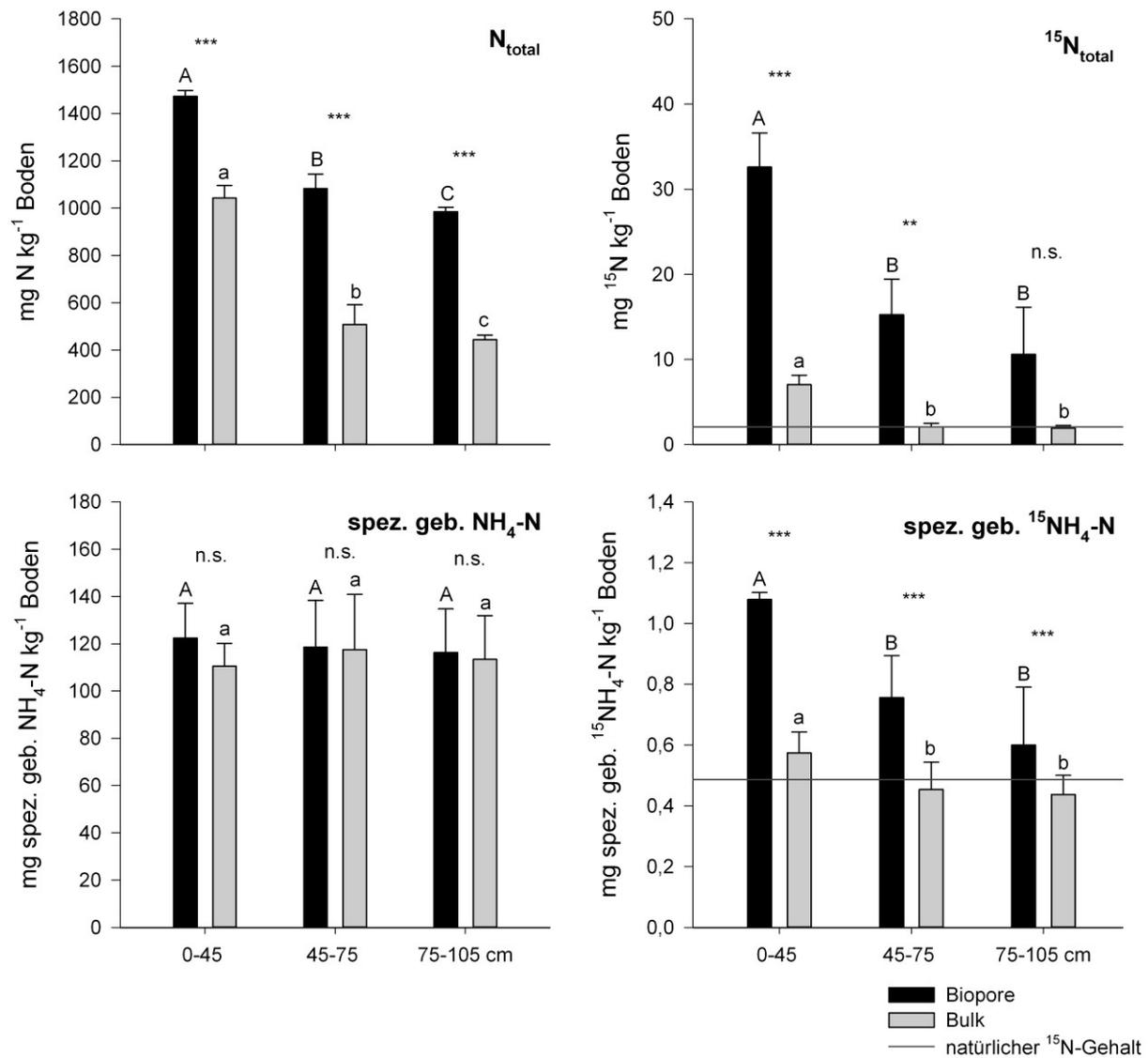


Abb. 4.16: Gehalt [mg kg⁻¹] an N_{total} , $^{15}N_{total}$, spez. geb. NH_4-N und spez. geb. $^{15}NH_4-N$ in den Bioporen und im Bulk-Boden verschiedener Bodentiefen nach Ausbringung von ^{15}N -Luzerne im Beprobungsjahr 2011. Fehlerbalken stellen die Standardabweichung dar (n=3). 2-faktorielle ANOVA, Tukey-Test ($\alpha=0,05$): Große Buchstaben: Vergleich der Bioporenergebnisse in den unterschiedlichen Tiefenstufen, kleine Buchstaben: Vergleich der Bulk-Boden-Ergebnisse in den unterschiedlichen Bodentiefen. Vergleich von Bioporen und Bulk-Boden: n.s. = nicht signifikant, ** = hoch signifikant ($p \leq 0,01$), *** = höchst signifikant ($p \leq 0,001$).

Beprobungsjahr 2012 und Vergleich beider Probenahmejahre

Die folgende Graphik (Abb. 4.17) zeigt den Vergleich der Gehalte nach der Ausbringung der markierten Luzerne im Jahr 2011 und denen nach der Ernte der Hauptfrüchte Sommerweizen und Futtermalve im Jahr 2012. Dargestellt sind die Tiefenstufen des Unterbodens (45-75 und 75-105 cm), da der Oberboden vor der Aussaat der Hauptfrüchte ausgetauscht wurde und entsprechend nach der Ernte nicht beprobt werden konnte (vgl. Abs. 3.2.3). Wie bereits an den Ergebnissen der Bodenproben aus dem Jahr 2011 (Abb. 4.16) festgestellt werden konnte, gab es auch im Jahr 2012 signifikante Unterschiede zwischen den Bioporen und dem Bulk-Boden im Gehalt des spez. geb. $^{15}\text{NH}_4\text{-N}$. Dies konnte sowohl für die Bodentiefe 45-75 cm, als auch für 75-105 cm gezeigt werden (Abb. 4.17).

In den Bioporen der Tiefe 45-75 cm nahm der Gehalt an spez. geb. $^{15}\text{NH}_4\text{-N}$ unter Sommerweizen von 0,76 mg auf 0,64 mg kg^{-1} Boden und unter Futtermalve auf 0,56 mg ab. Somit wurden unter den entsprechenden Pflanzen 16% bzw. 26% des spez. geb. $^{15}\text{NH}_4\text{-N}$ mobilisiert. Diese Unterschiede waren nicht signifikant. Während der Gehalt an spez. geb. $^{15}\text{NH}_4\text{-N}$ im Bulk-Boden nach Luzerne (2011) nur marginal über dem natürlichen Gehalt von 0,49 mg kg^{-1} Boden lag, konnte im Jahr 2012 unter Sommerweizen und Futtermalve ein leichter Anstieg auf 0,53 mg bzw. 0,50 mg kg^{-1} Boden nachgewiesen werden. Statistisch waren diese Unterschiede allerdings nicht signifikant.

In 75-105 cm Bodentiefe lagen die Werte der Vorfrucht Luzerne und der Hauptfrüchte Sommerweizen und Futtermalve in den Bioporen mit 0,60 mg, 0,63 mg und 0,62 mg spez. geb. $^{15}\text{NH}_4\text{-N kg}^{-1}$ Boden sehr nahe beieinander. Die Anreicherung der Bioporen war somit noch deutlich feststellbar. Im Gegensatz dazu lagen die gemessenen Werte des Bulk-Bodens unter Luzerne und Sommerweizen im natürlichen Bereich. Unter Futtermalve konnte im Mittel 0,52 mg spez. geb. $^{15}\text{NH}_4\text{-N kg}^{-1}$ Boden gefunden werden. Statistisch war dieser Unterschied zwischen den verschiedenen Fruchtarten jedoch nicht abzusichern.

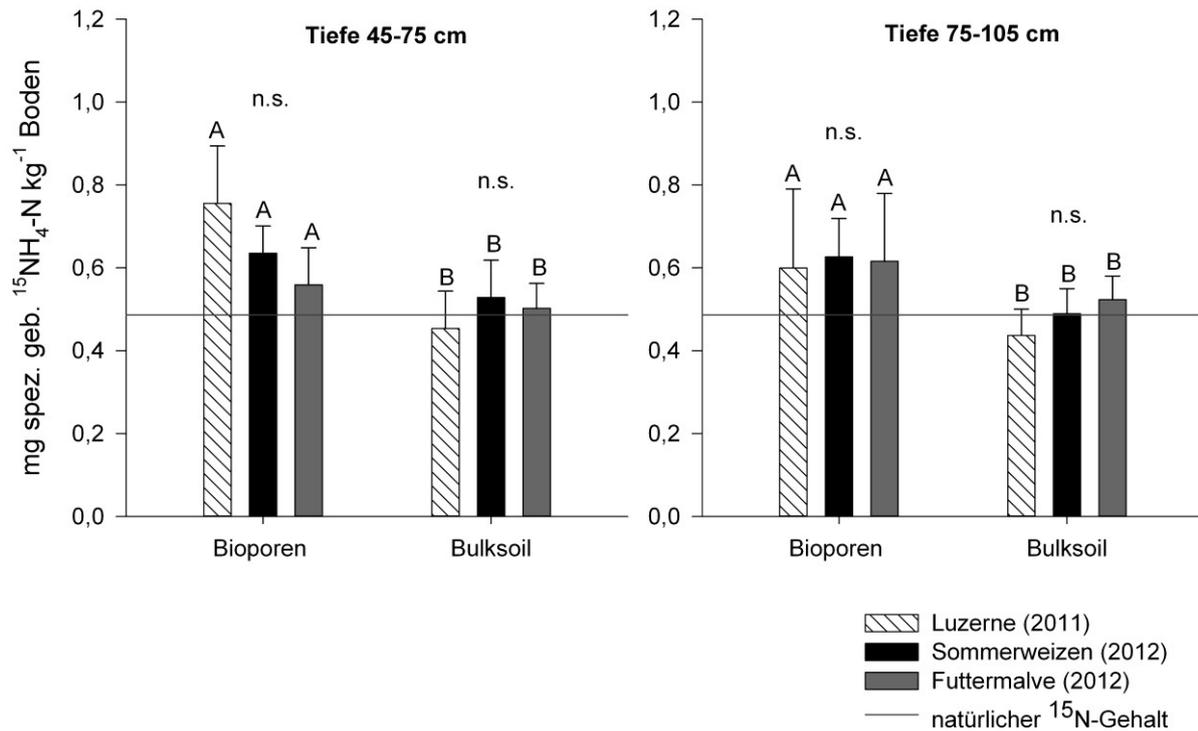


Abb. 4.17: spez. geb. $^{15}\text{NH}_4\text{-N}$ von Bioporen und Bulk-Boden nach Luzerne (2011) und nach Sommerweizen bzw. Futtermalve (2012) in den Bodentiefen 45-75 cm und 75-105 cm. Fehlerbalken stellen die Standardabweichung dar ($n=3$). 2-faktorielle ANOVA, Tukey-Test ($\alpha=0,05$), Buchstaben: Vergleich der Bioporen mit dem Bulk-Boden. Vergleich der Pflanzenarten (Beprobungsjahren): nicht signifikante Unterschiede (n.s.).

Der Gesamtgehalt an spez. geb. $\text{NH}_4\text{-N}$ unter Luzerne lag mit Werten zwischen 113,0 und 119,0 mg kg^{-1} Boden in beiden Bodentiefen auf gleichem Niveau (Abb. 4.18). Auch zwischen Bioporen und Bulk-Boden konnte kein signifikanter Unterschied festgestellt werden. Ähnliches galt entsprechend für die Ergebnisse der Bodenproben aus den Sommerweizen- und den Futtermalveflächen. Zwischen der Vorrucht aus 2011 und den Hauptfrüchten aus 2012 konnte ein Trend beobachtet werden. So lagen die Gehalte an spez. geb. $\text{NH}_4\text{-N}$ nach Sommerweizen und Futtermalve tendenziell über den Gehalten nach der Luzerne. Der Mittelwert lag unter Sommerweizen zudem marginal über dem der Futtermalve, diese Tendenz konnte jedoch nur in 45-75 cm Bodentiefe beobachtet werden. Die statistische Auswertung ergab keine signifikanten Unterschiede.

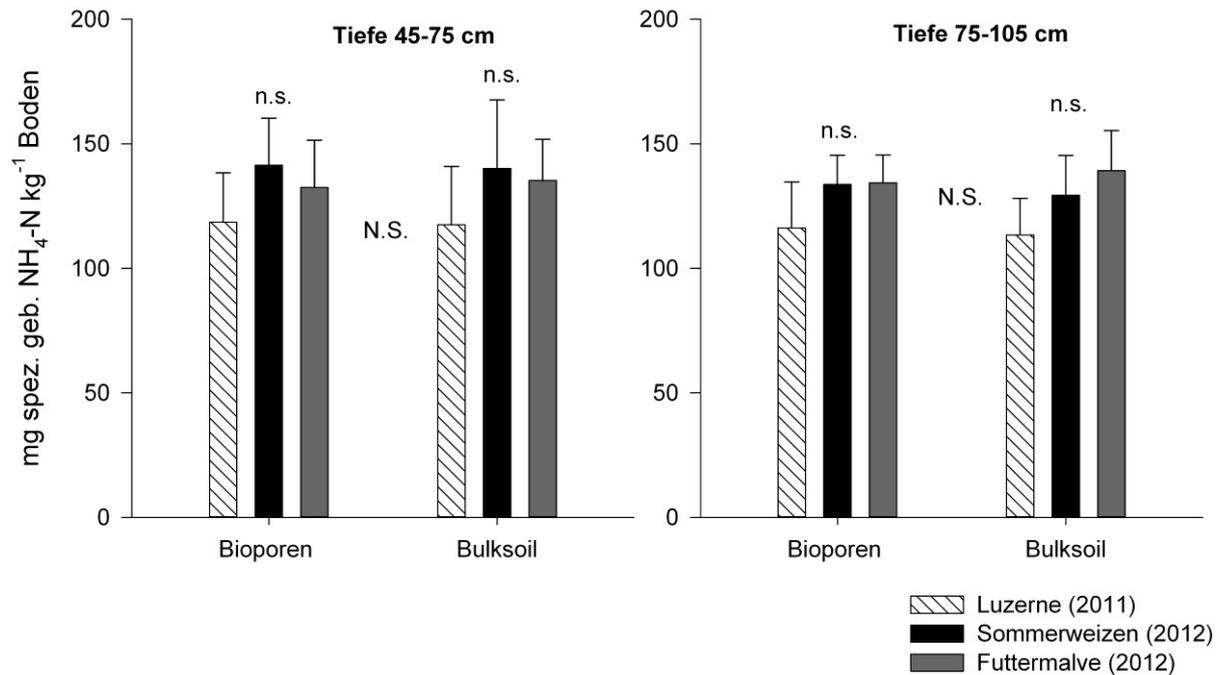


Abb. 4.18: spez. geb. NH₄-N von Bioporen und Bulk-Boden nach Luzerne (2011) und nach Sommerweizen bzw. Futtermalve (2012) in den Bodentiefen 45-75 cm und 75-105 cm. Fehlerbalken stellen die Standardabweichung dar (n=3). 2-faktorielle ANOVA, Tukey-Test ($\alpha=0,05$), Vergleich der Bioporen mit dem Bulk-Boden: nicht signifikante Unterschiede (N.S.). Vergleich der Pflanzenarten (Beprobungsjahren): nicht signifikante Unterschiede (n.s.).

Während der ¹⁵N-Gehalt am Gesamt-Stickstoff im Bulk-Boden beider Tiefenstufen und unter allen drei Pflanzenarten keine Anreicherung aufwies, konnte in den Bioporen deutlich höhere Gehalte an ¹⁵N festgestellt werden (Abb. 4.19). Nach Luzerne erreichte der ¹⁵N-Gehalt in der Bodentiefe 45-75 cm einen Wert von 15,3 mg kg⁻¹ Boden. Signifikant davon unterschieden sich die Werte nach der Vegetationsperiode des Jahres 2012. So konnte nach Sommerweizen noch die Hälfte dessen gefunden werden was 2011 gemessen wurde, nach Futtermalve noch 6,5 mg ¹⁵N kg⁻¹ Boden.

In der untersten Bodenschicht lag der Gehalt an ¹⁵N unter Luzerne bei 10,6 mg kg⁻¹ Boden, unter Sommerweizen bei 8,3 und unter Futtermalve bei 8,5 mg kg⁻¹ Boden. Die Unterschiede waren nicht signifikant, es zeichnete sich aber ein ähnliches Verhältnis wie in der Bodentiefe 45-75 cm ab.

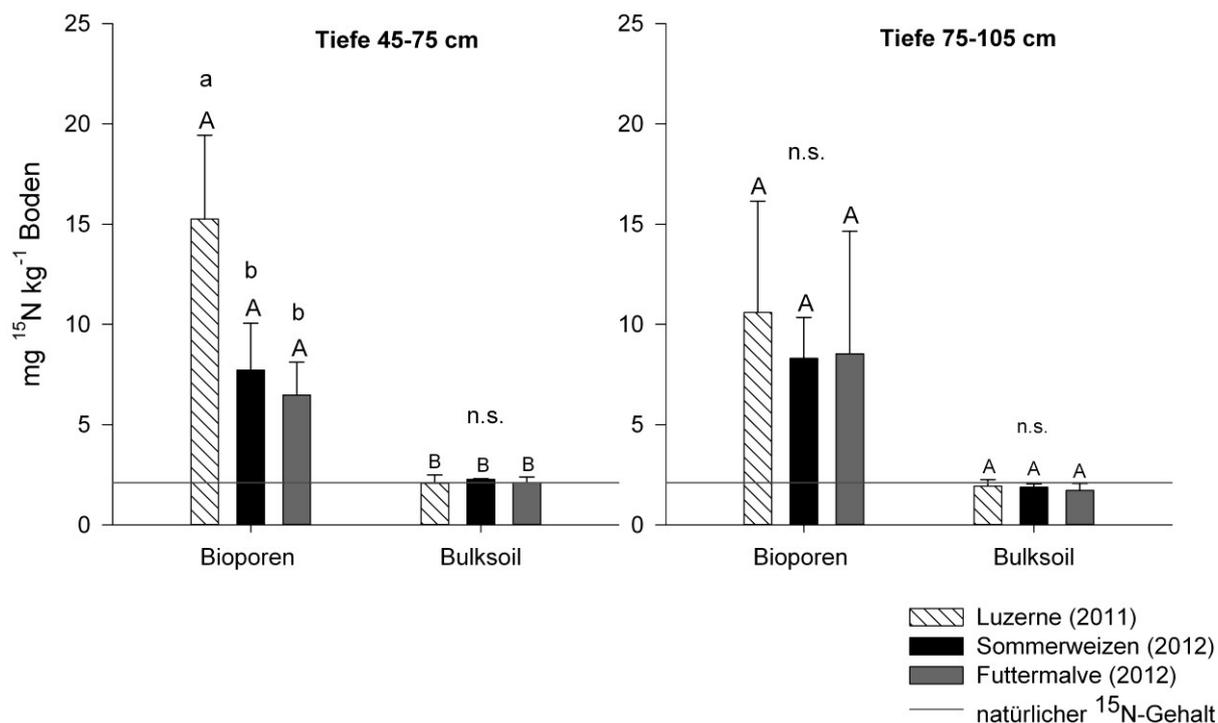


Abb. 4.19: ^{15}N -Gesamt-Stickstoff von Bioporen und Bulk-Boden nach Luzerne (2011) und nach Sommerweizen bzw. Futtermalve (2012) in den Bodentiefen 45-75 cm und 75-105 cm. Fehlerbalken stellen die Standardabweichung dar ($n=3$). 2-faktorielle ANOVA, Tukey-Test ($\alpha=0,05$), große Buchstaben: Vergleich der Bioporen mit dem Bulk-Boden. Kleine Buchstaben: Vergleich der Pflanzenarten (Beprobungsjahren), n.s.: nicht signifikante Unterschiede.

Wie auch schon bei den anderen Stickstofffraktionen zeigte sich beim Gesamt-Stickstoff, dass in den Bioporen der Gehalt signifikant höher war als im Bulk-Boden (Abb. 4.20). Zwischen den Pflanzenarten konnten keine signifikanten Unterschiede gefunden werden, ebenso wenig zwischen den beiden Bodentiefen. Während der Gehalt an Gesamt-Stickstoff in den Bioporen zwischen 960,0 und 1082,0 mg kg^{-1} Boden lag, wurden im Bulk-Boden Gehalte von 428,0 und 540,0 mg kg^{-1} Boden gemessen.

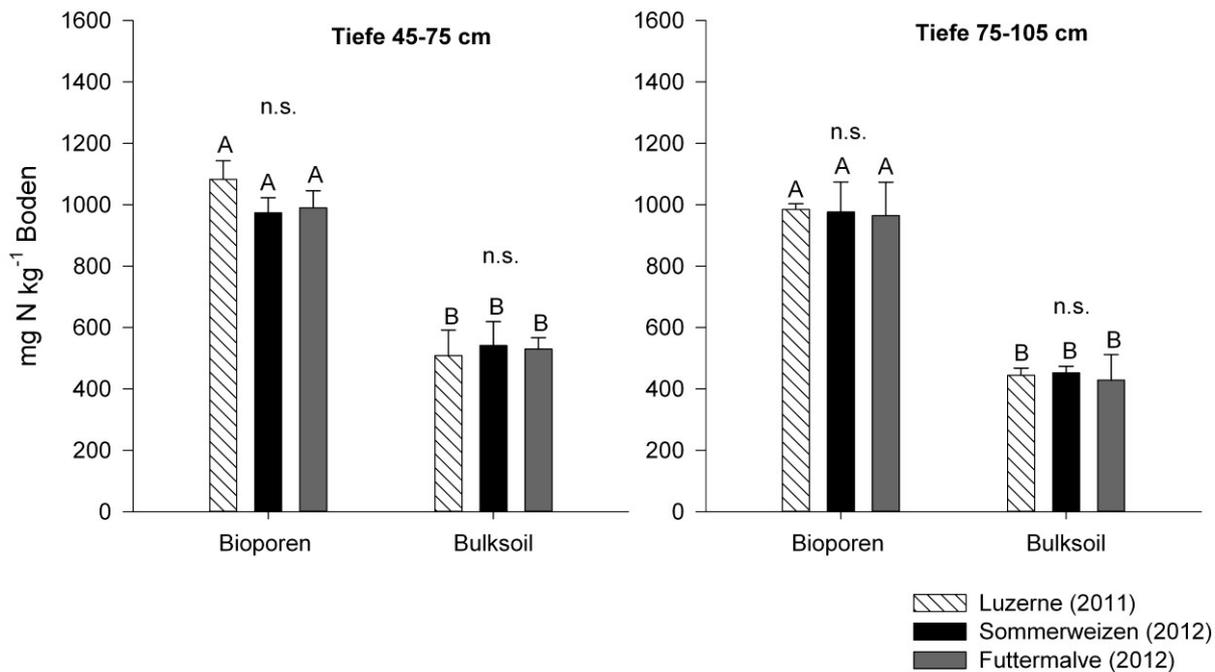


Abb. 4.20: Gesamt-Stickstoff von Bioporen und Bulk-Boden nach Luzerne (2011) und nach Sommerweizen bzw. Futtermalve (2012) in den Bodentiefen 45-75 cm und 75-105 cm. Fehlerbalken stellen die Standardabweichung dar (n=3). 2-faktorielle ANOVA, Tukey-Test ($\alpha=0,05$), große Buchstaben: Vergleich der Bioporen mit dem Bulk-Boden. Vergleich der Pflanzenarten (Beprobungsjahren): nicht signifikante Unterschiede (n.s.).

Gesamt-N und ^{15}N -Anteil des Aufwuchses

Am Ende des zweiten Versuchsjahres (2012) wurden die Stickstoffgehalte in den geernteten Hauptfrüchten, welche auf den ^{15}N -markierten Unterparzellen gewachsen waren, bestimmt. Ebenso wurde der Aufwuchs der Referenzparzellen untersucht. Die Ergebnisse sind zum Vergleich in Abb. 4.21 dargestellt. Beim Sommerweizen wurden das Korn und das Stroh getrennt voneinander untersucht. Während in den Unterparzellen im Korn Stickstoffgehalte von 2,6% und im Stroh von 0,8% gemessen wurden, lagen diese in den Referenzparzellen bei 2,5% N bzw. 0,9% N. Die Unterschiede zwischen Referenzparzelle und Versuch waren sowohl bei Korn als auch beim Stroh nicht signifikant. Bei der Futtermalve, welche als Gesamtpflanze analysiert wurde, konnte ein signifikanter Unterschied zwischen Versuchs- und Referenzparzelle festgestellt werden. Die auf ^{15}N -markiertem Boden gewachsenen Pflanzen enthielten 2,1% N, die der Referenzparzelle hingegen 1,8% N.

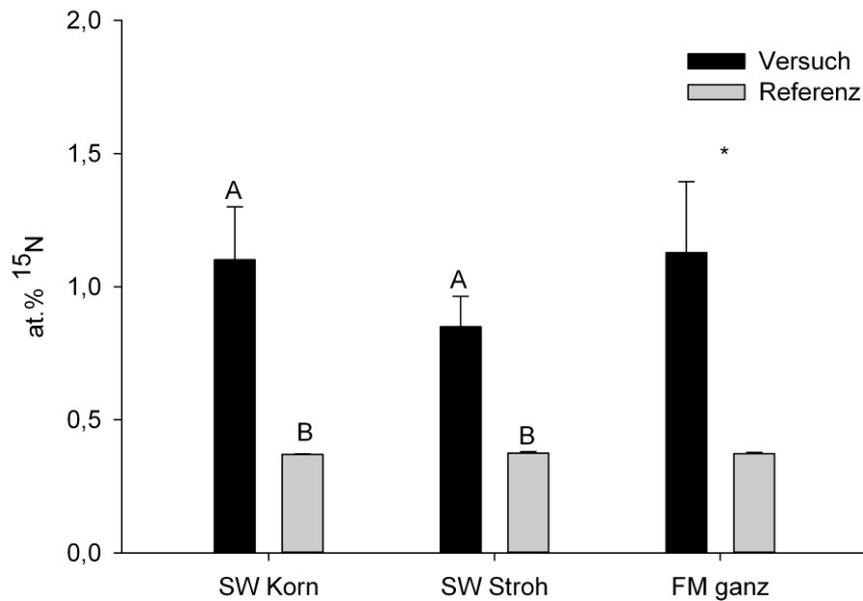


Abb. 4.21: Stickstoffgehalte im Korn und Stroh des Sommerweizens (SW) und in der Futtermalve (FM), die auf dem mit ¹⁵N markierten Boden bzw. der Referenzfläche gewachsen sind. Fehlerbalken stellen die Standardabweichung dar (n=3). Sommerweizen: ANOVA, Tukey-Test ($\alpha=0,05$), n.s.=nicht signifikant. Futtermalve: T-Test, $p=0,031^*$.

Neben dem Gesamtstickstoffgehalt wurde auch der ¹⁵N-Anteil bestimmt (Abb. 4.22). Im Korn des auf dem ¹⁵N markierten Boden gewachsenen Sommerweizens konnten 1,10 at.% ¹⁵N und im Stroh 0,85 at.% ¹⁵N nachgewiesen werden, während auf der Referenzfläche erwartungsgemäß jeweils 0,37 at.% ¹⁵N ermittelt wurden, was dem natürlichen Vorkommen an ¹⁵N entspricht. Im Stroh wurden 0,85 at.% ¹⁵N auf den Versuchsflächen und 0,37 at.% auf den Referenzflächen gemessen. Die Malve wies ebenfalls keine Anreicherung an ¹⁵N auf den Referenzflächen auf. Auf den, mit ¹⁵N markierten Fläche hingegen konnten Werte von durchschnittlich 1,13 at.% ¹⁵N bestimmt werden. Die Unterschiede zwischen Versuchs- und Referenzflächen waren bei allen Pflanzen bzw. Pflanzenteilen signifikant.

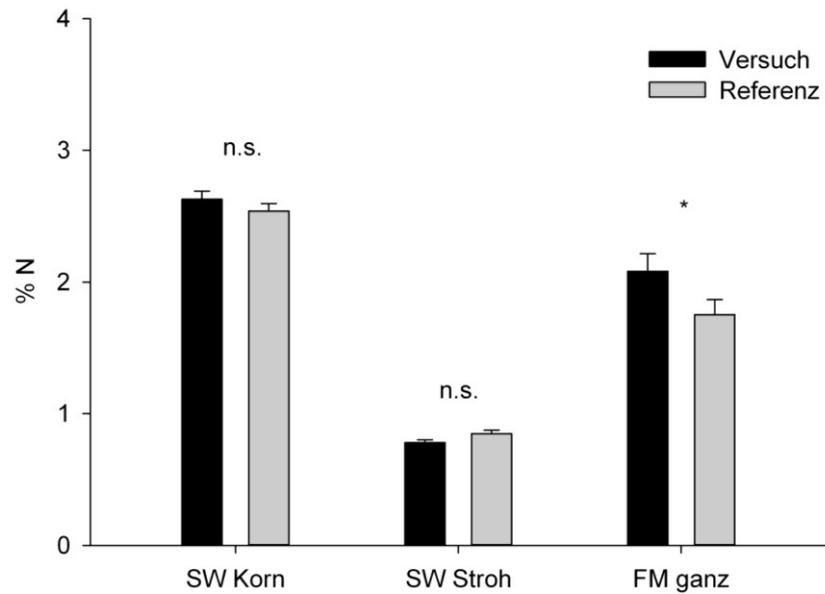


Abb. 4.22: Anteil des ^{15}N -Stickstoffs im Korn und Stroh des Sommerweizens (SW) und in der Futtermalve (FM), die auf dem mit ^{15}N markierten Boden bzw. den Referenzflächen wuchsen. Fehlerbalken stellen die Standardabweichung dar ($n=3$). Sommerweizen: ANOVA, Tukey-Test ($\alpha=0,05$), A ist signifikant unterschiedlich zu B. Futtermalve: T-Test, $p=0,028^*$.

4.2 Gefäßversuche

4.2.1 Einfluss von Calcium und Kalium auf die Mobilisierung von spez. geb. NH_4^+

Parameter der Bodenlösung

pH-Wert der Bodenlösung

Der pH-Wert wurde in den Mischproben der wöchentlich entnommenen Bodenlösung gemessen. Zwischen den Werten der einzelnen Abstände zur Wurzeloberfläche (Gaze) konnten innerhalb einer Variante keine Unterschiede festgestellt werden. Die Standardabweichung vom arithmetischen Mittel lag hierbei zwischen 0,0 und 0,3. Aus diesem Grund wurde in Abb. 4.23 darauf verzichtet, die Werte der einzelnen Abstände widerzugeben, stattdessen wurde das arithmetische Mittel pro Variante (n=8) errechnet und im Zeitverlauf dargestellt, die Standardabweichungen lagen zwischen 0,01 und 0,10 und wurden zu Gunsten der Übersichtlichkeit nicht dargestellt.

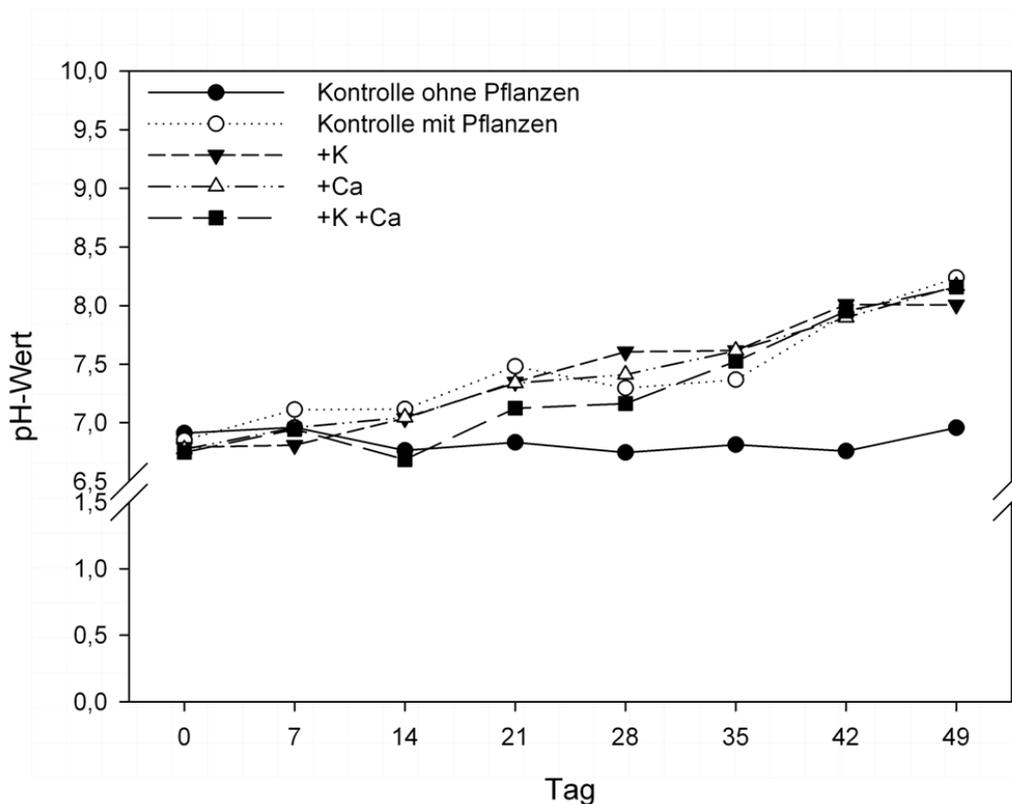


Abb. 4.23: pH-Werts der Bodenlösung im Verlauf des Versuches.

Die Kontrollvariante ohne Pflanzen und ohne zusätzliche K- oder Ca-Gabe zeigte über die 8 Probenahmeterminale hinweg kaum Veränderungen, der pH-Wert schwankte zwischen 6,7 und 7,0. Bei den anderen Varianten mit Pflanzen konnte ein leichter, aber kontinuierlicher Anstieg des pH-Wertes während der 49 Tage dauernden Versuchsphase verzeichnet werden. Am Anfang lag der pH-Wert bei allen Varianten zwischen 6,6 und 6,9, am Ende des Versuches

zwischen 8,0 und 8,2, was einer Erhöhung von 1,1 bis 1,6 Einheiten entsprach. Somit konnte der pH-Wert der Bodenlösung während des gesamten Versuchszeitraums bei allen Varianten als konstant eingestuft werden.

Osmotisches Potential der Bodenlösung

Das osmotische Potential (Osmolalität) spiegelt die Menge der gelösten Ionen in der Bodenlösung wider. Die dargestellten Ergebnisse sind das arithmetische Mittel der drei Wiederholungen und der Werte der einzelnen Saugkerzen mit gleichem Abstand zur Wurzeloberfläche (entsprechend auf der rechten bzw. linken Seite eines Kompartimentsystems) (Abb. 4.24).

Die Werte der Kontrolle ohne Pflanzen zeigten während des Versuchszeitraums nur geringfügige Veränderungen, sie lagen zwischen 12,0 mosmol kg⁻¹ und 22,8 mosmol kg⁻¹. Bei den vier Varianten mit Pflanzen konnte bei den ersten drei Probenahmen ebenfalls keine relevante Veränderung festgestellt werden. Die Varianten, denen K⁺ und/oder Ca²⁺ zugeführt wurde, wiesen in diesem Zeitraum ein durchschnittliches osmotisches Potential von 25,8 mosmol kg⁻¹ auf, wobei Werte von bis zu 36,8 mosmol kg⁻¹ erreicht wurden, bei der Kontrolle mit Pflanzen lag es bei 16,7 mosmol kg⁻¹. Ein Unterschied zwischen den verschiedenen Abständen zur Wurzeloberfläche war nicht festzustellen. Ab Tag 21 konnte bei der Kontrolle insgesamt eine Reduzierung des osmotischen Potentials verzeichnet werden.

Bei den Varianten mit K⁺ und/oder Ca²⁺ war ebenfalls ein Rückgang der Osmolalität im Bulk-Boden erkennbar, während ein Anstieg im Wurzelkompartiment (WK) beobachtet werden konnte. Dieser Trend setzte sich bei den folgenden Probenahmen fort. Im wurzelfernen Bereich kam es zur weiteren Abnahme der Osmolalität. Zur Wurzeloberfläche (Gaze) hin war ein deutlicher Anstieg messbar. Die höchsten Werte wurden in der Bodenlösung der Wurzelkompartimente gemessen, sie erreichten bei den letzten Probenahmen teilweise über 60 mosmol kg⁻¹, außerhalb der Rhizosphäre sanken die Werte deutlich unter 10 mosmol kg⁻¹. Bei der K-Ca-Variante waren im Vergleich zu den anderen Varianten im Durchschnitt höhere Werte messbar. Probleme bei den Bodenlösungsentnahmen sind der Grund für das Fehlen von Säulen in einzelnen Diagrammen.

Ammonium-¹⁵N-Konzentration in der Bodenlösung

Die ¹⁵NH₄-N-Anreicherung in den Bodenlösungen der ersten beiden Probenahmen erreichte Werte bis 52 at.%, wobei die Werte der beiden Varianten mit Ca-Zufuhr tendenziell am höchsten waren (Abb. 4.25). Beim zweiten Beprobungstermin konnte zudem ein Anstieg der Anreicherung des ¹⁵NH₄-N in den Wurzelkompartimenten der Varianten mit Pflanzen beobachtet werden. Nach Tag 7 kam es bei allen Varianten zur massiven Reduktion des ¹⁵NH₄-N in den Bodenlösungen. Ab Tag 35 gingen die Werte gegen Null, es konnte nur noch wenig bis gar kein ¹⁵NH₄-N nachgewiesen werden. Auffallend war auch, dass sich die Trends nicht nur bei den Varianten mit Pflanzen zeigten, sondern auch bei der Kontrolle ohne Pflanzen.

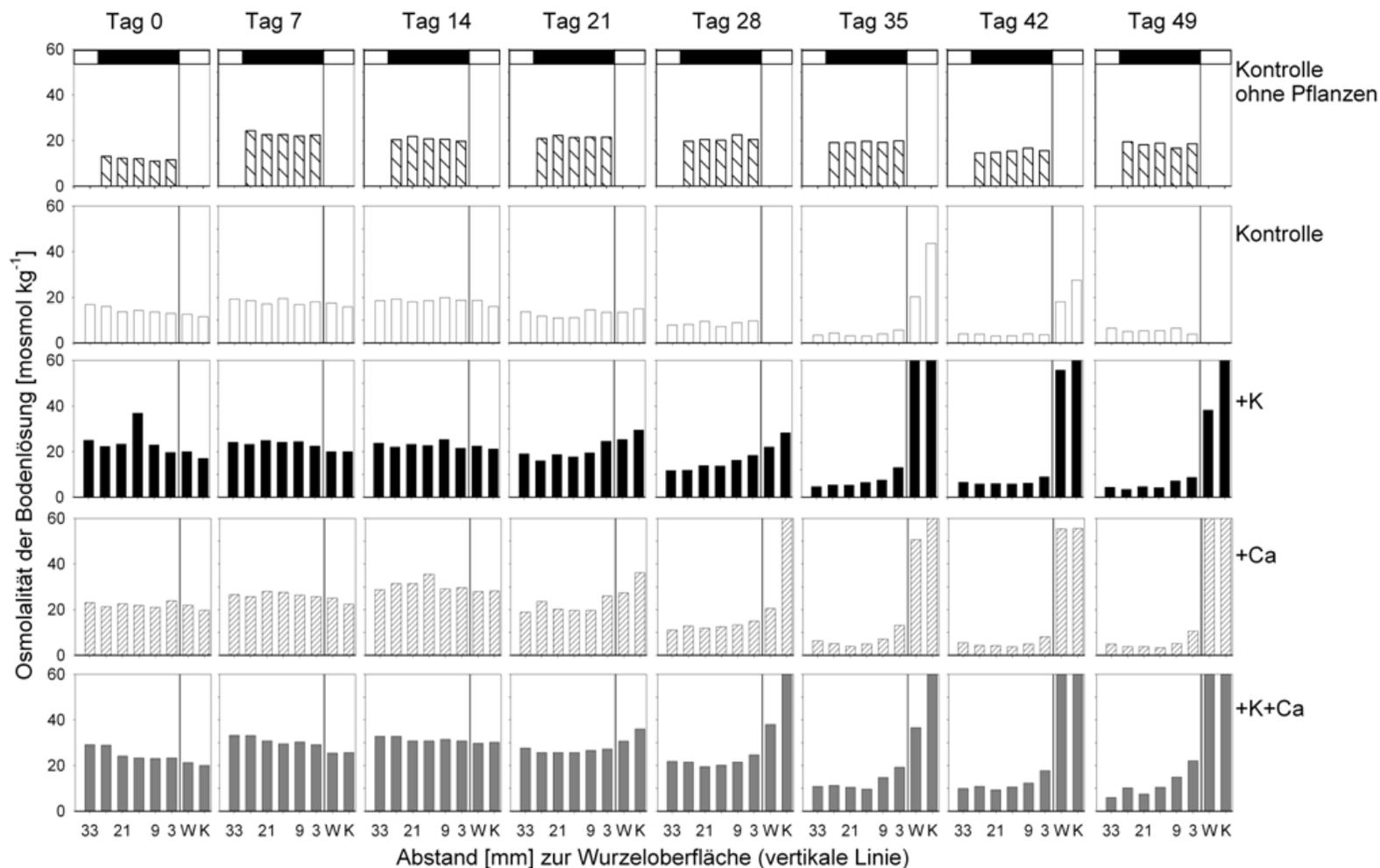


Abb. 4.24: Osmotisches Potential der Bodenlösung [mosmol kg⁻¹] im Verlauf des Versuches in Abhängigkeit von der Entfernung zur Wurzeloberfläche (als vertikale Linie dargestellt). WK stellt das Wurzelkompartiment dar. Der schwarze waagrechte Balken in der obersten Reihe zeigt den mit ¹⁵N markierten Bereich an. Die Säulen bilden die Mittelwerte aus den beiden Hälften des jeweiligen Kompartimentsystems und der drei Wiederholungen ab.

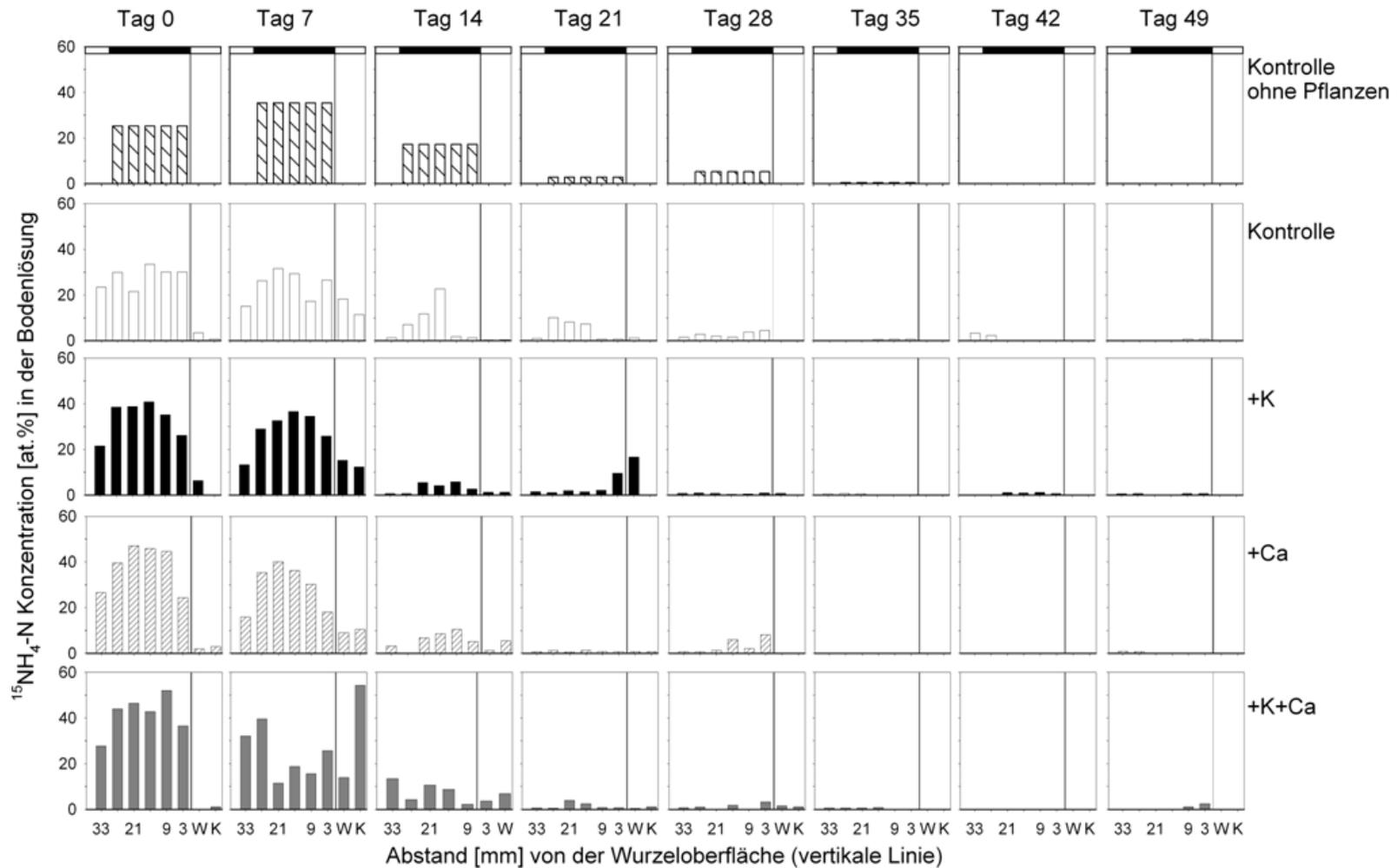


Abb. 4.25: $^{15}\text{NH}_4\text{-N}$ -Konzentration der Bodenlösung [at. %] im Verlauf des Versuches in Abhängigkeit von der Entfernung zur **Wurzeloberfläche** (als vertikale Linie dargestellt). WK stellt das Wurzelkompartiment dar. Der schwarze waagrechte Balken in der obersten Reihe zeigt den mit ^{15}N markierten Bereich an. Werte sind aus Mischproben.

Ammonium-N in der Bodenlösung

Zu Beginn des Versuchszeitraums (Tag 0) wurden durchschnittlich $185 \mu\text{M}$ $\text{NH}_4\text{-N}$ in der Bodenlösung aller Varianten gemessen (Abb. 4.26). Zum zweiten Beprobungstermin konnte ein deutlicher Anstieg verzeichnet werden. In der verbleibenden Versuchszeit konnten keine eindeutigen Tendenzen erkannt werden, weder kam es zu Verarmungen noch zu Anreicherungen, die in Zusammenhang mit den Varianten oder mit den Abständen zur Wurzeloberfläche gestanden hätten. Die $\text{NH}_4\text{-N}$ -Konzentration in der Bodenlösung fluktuierte zwischen $213 \mu\text{M}$ und $341 \mu\text{M}$ mit einem arithmetischen Mittel von $266 \mu\text{M}$.

Nitrat-N in der Bodenlösung

Die Nitrat-N-Konzentration in der Bodenlösung der Kontrolle ohne Pflanzen lag zu Beginn des Versuches bei $2,8 \mu\text{M}$ und stieg bis zum Tag 21 stetig bis auf $6,5 \mu\text{M}$ an. An Tag 42 konnte ein leichter Rückgang auf $5,5 \mu\text{M}$ verzeichnet werden (Abb. 4.27). Zum Ende des Versuches erreichte die $\text{NO}_3\text{-N}$ -Konzentration ihren Höchstwert von $9,2 \mu\text{M}$. Die Dynamik des $\text{NO}_3\text{-N}$ in der Bodenlösung der Varianten mit Pflanzen verhielt sich konträr zu der Variante ohne Pflanzen. Zu Beginn kam es zwar auch hier zu einem Anstieg, doch ab dem 3. Beprobungstermin (Tag 21) kam es besonders in den Wurzelkompartimenten zu einem deutlichen Rückgang dieser Stickstofffraktion in der Bodenlösung. Zu Beginn des Versuches lagen die Werte zwischen $1,7$ und $3,7 \mu\text{M}$ $\text{NO}_3\text{-N}$. Beim 2. und 3. Termin konnten Werte von $3,1$ bis $6,1 \mu\text{M}$ gemessen werden.

Ab Tag 35 war im Wurzelbereich kein $\text{NO}_3\text{-N}$ mehr nachzuweisen. In den Bulk-Boden-Kompartimenten entstand ein Konzentrationsgefälle mit der niedrigsten $\text{NO}_3\text{-N}$ -Konzentration an der Wurzeloberfläche. Am Ende des Versuchszeitraums (Tag 49) konnte auch in den Bulk-Boden-Kompartimenten kein $\text{NO}_3\text{-N}$ mehr festgestellt werden. Eine Ausnahme bildete die K-Ca-Variante, hier konnten noch Konzentrationen von bis zu $0,6 \mu\text{M}$ Nitrat-N gemessen werden. Zwischen den Varianten wurden keine nennenswerten Unterschiede im Konzentrationsniveau beobachtet.

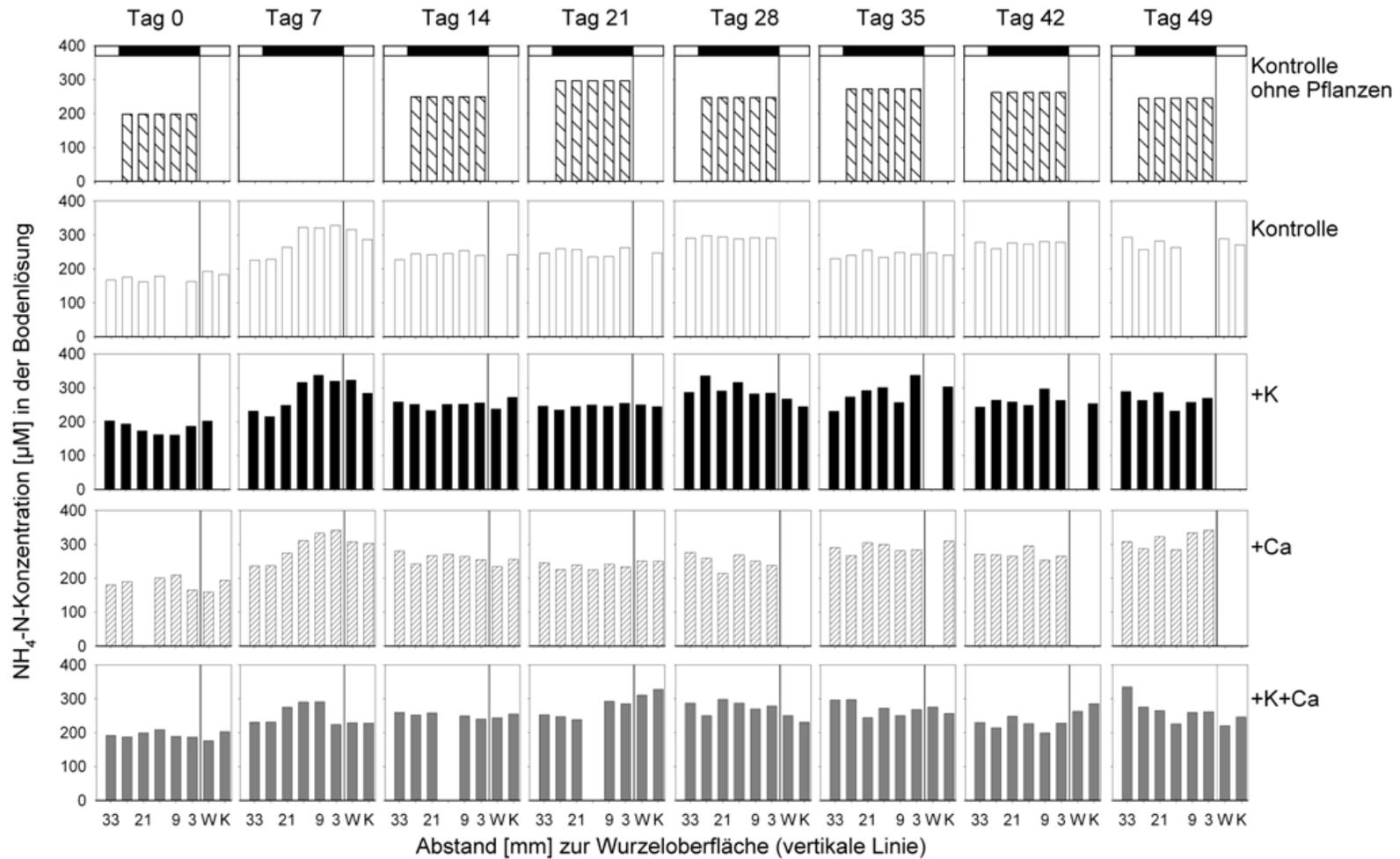


Abb. 4.26: $\text{NH}_4\text{-N}$ -Konzentration der Bodenlösung [μM] im Verlauf des Versuches in Abhängigkeit von der Entfernung zur Wurzeloberfläche (Einzelheiten siehe Abb. 4.25). Fehlende Werte an Tag 7 sind versuchstechnisch bedingt.

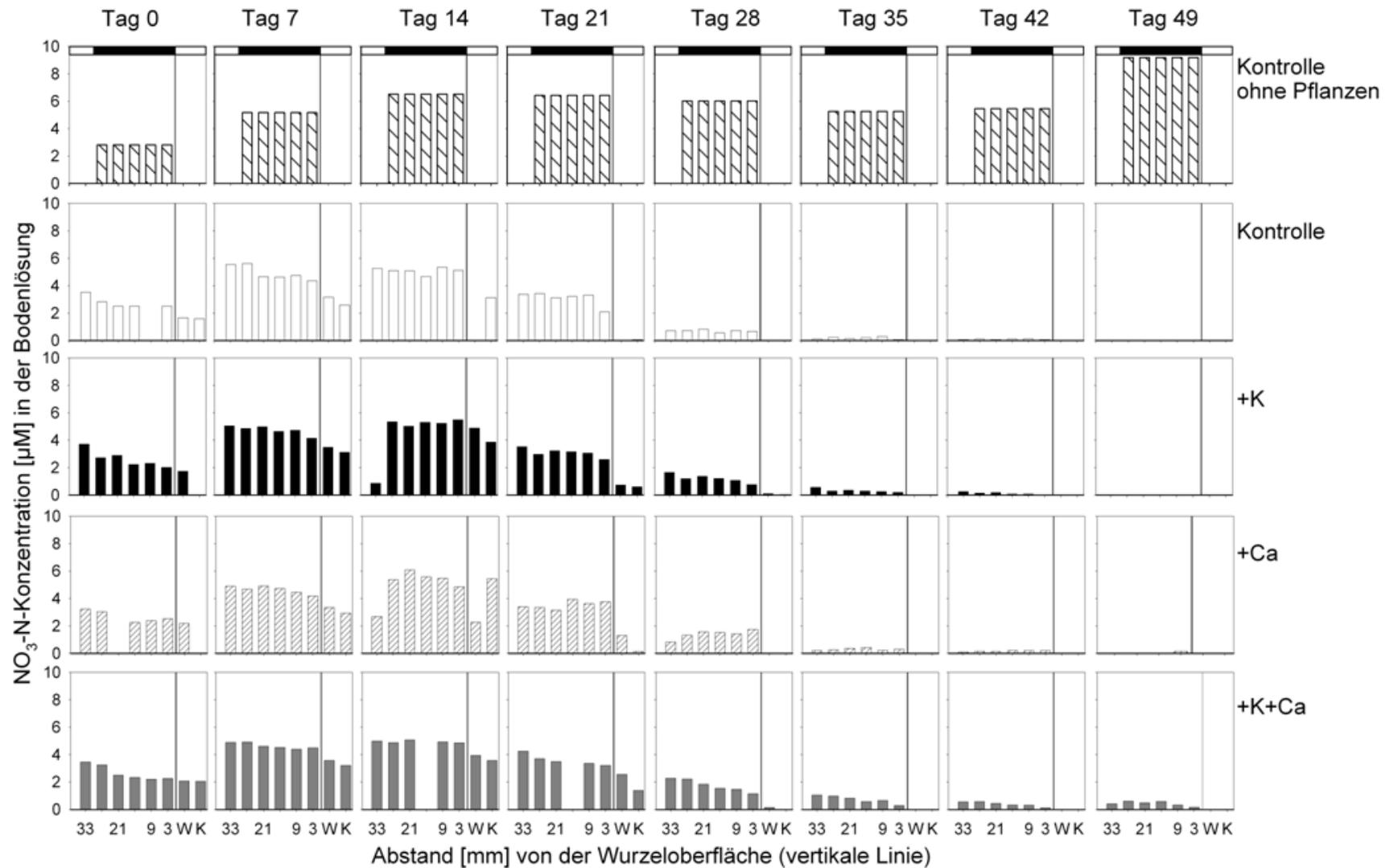


Abb. 4.27: Nitrat-N-Konzentration der Bodenlösung [μM] im Verlauf des Versuches in Abhängigkeit von der Entfernung zur Wurzeloberfläche (Einzelheiten siehe Abb. 4.25)

Kalium in der Bodenlösung

Zu Beginn des Versuches lag die K^+ -Konzentration in der Bodenlösung der Kontrollvariante ohne Pflanzen bei durchschnittlich $95 \mu\text{M}$ (Abb. 4.28). Während der Versuchsdauer sank die Konzentration kontinuierlich ab und erreichte bei Tag 49 noch die Hälfte des o.g. Wertes. Bei den Varianten, die eine K-Gabe erhalten hatten, lagen die Werte in den Bulk-Boden-Kompartimenten an den Tagen 0 und 1 deutlich über $150 \mu\text{M}$, die Werte im Wurzelkompartiment hingegen bei $100 \mu\text{M}$. Wie auch bei der oben beschriebenen Kontrollvariante kam es hier zu einer Abnahme der K-Konzentration während des Versuchszeitraums. Zum letzten Beprobungstermin konnte noch durchschnittlich ein Drittel der Ursprungskonzentration gemessen werden. Die K-Konzentration, welche in den Bulk-Boden-Kompartimenten direkt an der Gaze gemessen wurde, war bei allen Probenahmen tendenziell niedriger als die Konzentrationen in weiterer Entfernung. Die Kontrollvariante und die Ca-Variante wiesen K-Konzentrationen (an den Tagen 0 und 1) auf, die im Bereich von $100 \mu\text{M}$ lagen. Auch hier nahm die Konzentration in der Bodenlösung während des Versuches ca. um ein Drittel ab.

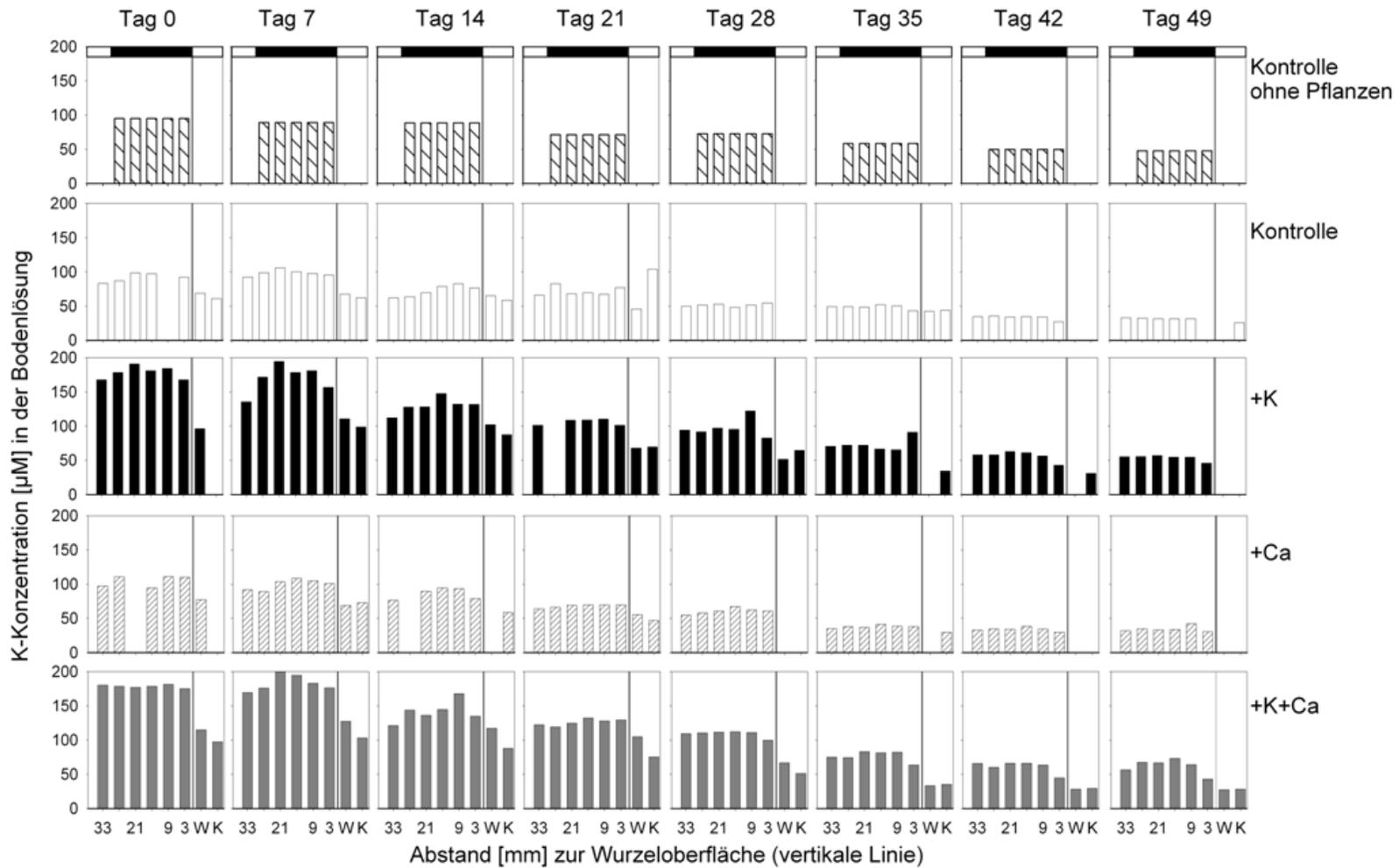


Abb. 4.28: Kaliumkonzentration der Bodenlösung [µM] im Verlauf des Versuches in Abhängigkeit von der Entfernung zur Wurzeloberfläche (Einzelheiten siehe Abb. 4.25).

Calcium in der Bodenlösung

Die Ca^{2+} -Konzentration in der Bodenlösung war durchschnittlich um das 50-fache höher als die K^+ -Konzentration. Die Kontrolle ohne Pflanzen hatte am ersten Probenahmetag eine Konzentration von weniger als 5 mM Ca^{2+} in der Bodenlösung (Abb. 4.29). An allen folgenden Terminen lag der Wert bei knapp über 5 mM. In einem ähnlichen Bereich lagen die Werte der Kontrolle mit Pflanzen, wobei aber ab Tag 21 eine messbare Abnahme der Konzentration begann. Bei der letzten Probenahme konnte nur noch ein Höchstwert von 1,5 mM Ca^{2+} festgestellt werden. Für die Tage 28, 42 und 49 liegen keine Werte für die Wurzelkompartimente vor. Am 35. Tag konnte im Wurzelbereich jedoch ein Anstieg der Ca^{2+} -Konzentration auf fast 20 mM gemessen werden. Die K-Variante zeigte einen ähnlichen Verlauf wie die Kontrollvariante mit Pflanzen, wobei die Ausgangskonzentration etwas höher war. In den Wurzelkompartimenten konnte nicht nur an Tag 35 ein Anstieg verzeichnet werden, sondern bereits ab Tag 21 und auch an den Tagen 28 und 42. Für Tag 49 lagen keine Werte vor. Die Werte von Tag 35 und Tag 42 weisen im Wurzelkompartiment Konzentrationen von fast 35 mM Ca^{2+} auf, wohingegen die Bulk-Boden-Werte deutlich unter 5 mM gefallen waren. Die beiden Varianten, die zusätzlich Ca^{2+} erhalten hatten, wiesen einen sehr ähnlichen Verlauf in der Konzentrationsveränderung während des Versuchszeitraums auf. Die Ergebnisse der ersten drei Probenahmetermine ergaben bei der Ca-Variante Werte zwischen 4,0 und 7,9 mM, bei der Ca-K-Variante waren es zwischen 5,2 und 9,2 mM. Ab Tag 21 konnte man bereits bei diesen beiden Varianten eine leichte Konzentrationssteigerung im Wurzelkompartiment beobachten. In den Bulk-Boden-Kompartimenten kam es zeitgleich zu Abnahmen bis auf fast 1 mM im wurzelfernen Bereich. Der Trend des Anstiegs der Konzentration im Wurzelkompartiment setzte sich deutlich bei den folgenden vier Bodenlösungsentnahmen fort. Bei der Ca-Variante war dies jedoch an Tag 35 zu erkennen, da an den anderen Tagen die Probenahme fehlgeschlagen war und dementsprechend keine Werte vorlagen. Bei der K-Ca-Variante erreichte der Höchstwert 48,7 mM Ca^{2+} . Im Bulk-Boden war tendenziell ein Konzentrationsgefälle erkennbar, im wurzelnahen Bereich konnte demnach eine höhere Ca^{2+} -Konzentration in der Bodenlösung gemessen werden, als im wurzelfernen.

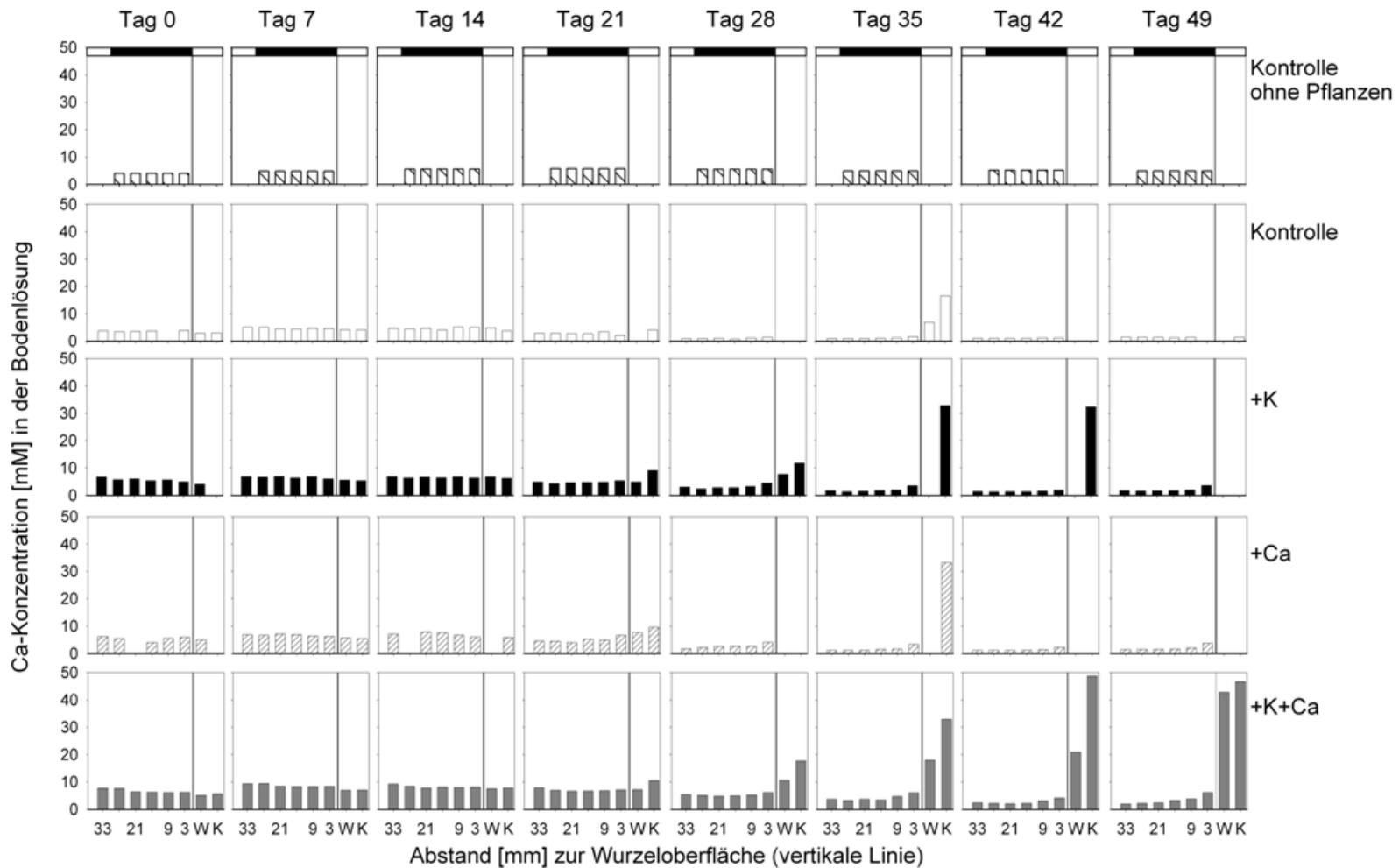


Abb. 4.29: Ca²⁺-Konzentration der Bodenlösung [mM] im Verlauf des Versuches in Abhängigkeit von der Entfernung zur Wurzeloberfläche (nähere Einzelheiten siehe Abb. 4.25).

Magnesium in der Bodenlösung

Die Veränderung der Mg^{2+} -Konzentration der Bodenlösung während des Versuchszeitraums war analog zu der der Ca^{2+} -Konzentration, mit dem Unterschied, dass das Niveau der Mg^{2+} -Konzentration um durchschnittlich das 20fache geringer war als das der Ca^{2+} -Konzentration. Ab Tag 21 konnte eine Anreicherung des Mg^{2+} im Wurzelkompartiment beobachtet werden, einhergehend mit einer Abnahme des Mg^{2+} in den Bulk-Boden-Kompartimenten, wobei dort ein leichtes Konzentrationsgefälle hin zu den wurzelfernen Arealen gab (Abb. 4.30). Im Vergleich der Varianten wurden bei +K+Ca die höchsten Anfangswerte gemessen, sie lagen bei den ersten drei Beprobungsterminen zwischen 500 und 900 $\mu M Mg^{2+}$. Die Konzentration der Ca-Variante schwankte zwischen 350 und 720 μM und lag somit gleichauf mit den Werten der K-Variante. Die beiden Kontrollen lagen meist deutlich unter 500 $\mu M Mg^{2+}$. Höchstwerte wurden ebenfalls bei der K-Ca-Variante festgestellt, sie erreichten an Tag 35 und Tag 42 über 1700 $\mu M Mg^{2+}$.

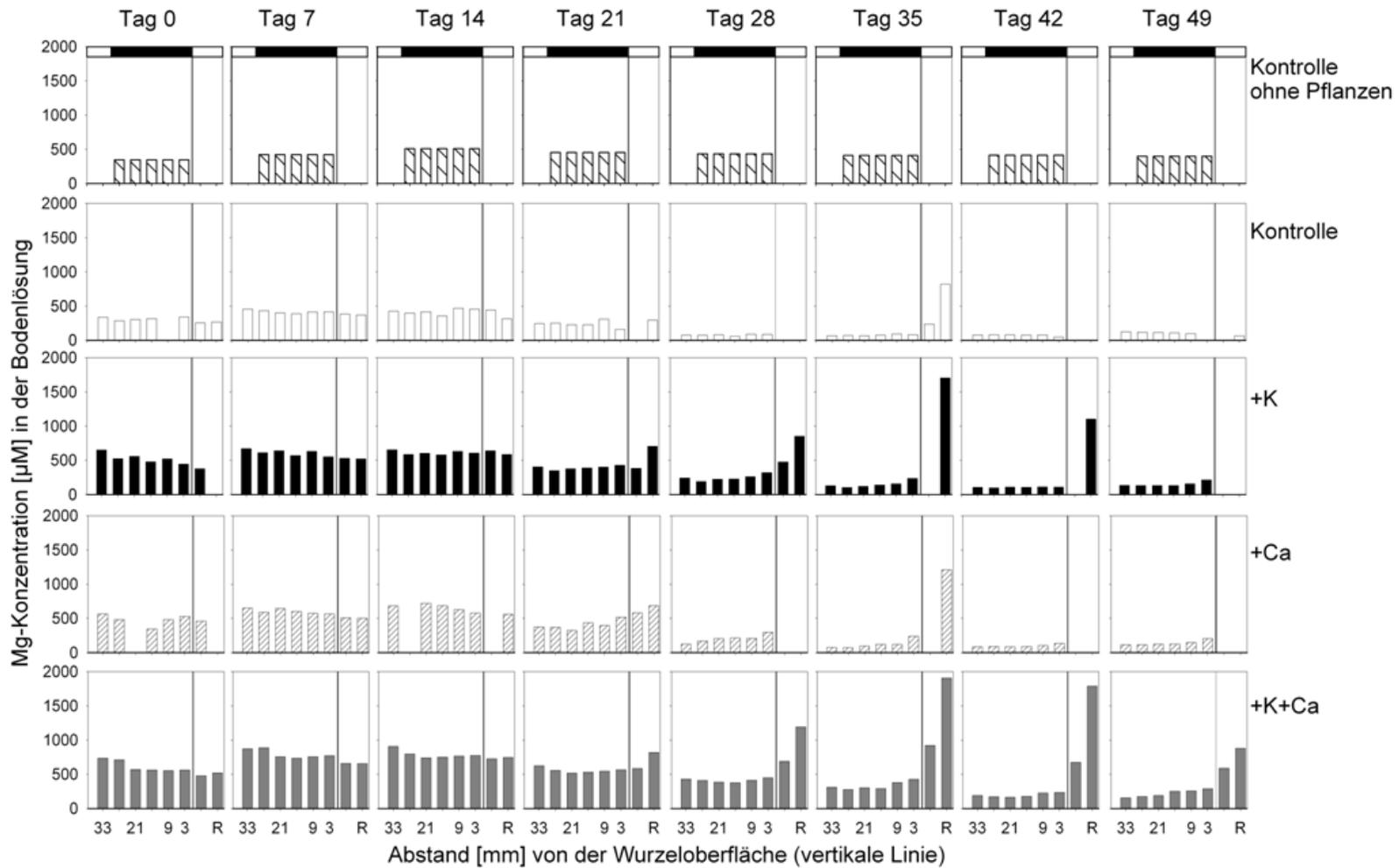


Abb. 4.30: Mg²⁺-Konzentration der Bodenlösung [µM] im Verlauf des Versuches in Abhängigkeit von der Entfernung zur Wurzeloberfläche (Einzelheiten siehe Abb. 4.25).

Parameter im Boden

Spez. geb. $^{15}\text{NH}_4\text{-N}$ im Boden

Im Folgenden werden die Ergebnisse der Analyse des spez. geb. $^{15}\text{NH}_4\text{-N}$ der einzelnen Bodenscheiben in definierten Abständen zur Wurzeloberfläche beschrieben. In Abb. 4.31 ist der absolute Gehalt an spez. geb. $^{15}\text{NH}_4\text{-N}$ in mg kg^{-1} Boden angegeben. Es sind die Werte der Abstände von 0 mm bis 29 mm dargestellt, was dem Bereich mit markiertem Boden entspricht. Der unmarkierte Teil der Kompartimentsysteme (29-100 mm) wird nicht in die Versuchsauswertung mit einbezogen. Der Ausgangswert des mit $^{15}\text{NH}_4\text{Cl}$ markierten Versuchsbodens lag bei $36,5 \text{ mg spez. geb. } ^{15}\text{NH}_4\text{-N kg}^{-1}$ Boden. Zu Versuchsende konnte eine Abnahme von mindestens 37% festgestellt werden. Der Unterschied zwischen den Gehalten vor und nach dem Versuch war bei allen Varianten signifikant.

Die Kontrollvariante ohne Pflanzen wies zwischen den einzelnen Distanzsegmenten von 0-1 und 7-10 mm keine Unterschiede im absoluten Gehalt an spez. geb. $^{15}\text{NH}_4\text{-N}$ auf. Die Werte schwankten mit einer Standardabweichung von 0,97 um einen Mittelwert von $14,7 \text{ mg } ^{15}\text{NH}_4\text{-N kg}^{-1}$ Boden. Ab einem Abstand von 10 mm zur Gazeoberfläche konnten signifikant geringere ^{15}N -Gehalte gemessen werden, welche sich in den wurzelfernsten Bereichen den natürlichen Gehalten angleichen.

Die Gehalte der Kontrolle mit Pflanzen zeigten eine deutliche Verarmung an spez. geb. $^{15}\text{NH}_4\text{-N}$ in der Rhizosphäre bis zu einer Distanz von 1 mm zur Wurzeloberfläche. So war die Konzentration dieser Variante mit $8,3 \text{ mg spez. geb. } ^{15}\text{NH}_4\text{-N kg}^{-1}$ Boden fast um die Hälfte geringer als die der Kontrolle ohne Pflanzen. Zwischen den Distanzsegmenten 0-1 und 1-3 mm konnte innerhalb der Kontrolle mit Pflanzen ein signifikanter Unterschied festgestellt werden. Beim Abstand 1-3 mm wurde ein Wert von $13,0 \text{ mg spez. geb. } ^{15}\text{NH}_4\text{-N kg}^{-1}$ Boden gemessen, womit dieser sich dem Gehalt der Kontrolle ohne Pflanzen annäherte und auch in den folgenden Distanzsegmenten weiter angleich. Auch bei der Kontrollvariante mit Pflanzen konnte in den entferntesten Bereichen (20-29 mm) keine erhöhten ^{15}N -Gehalte festgestellt werden.

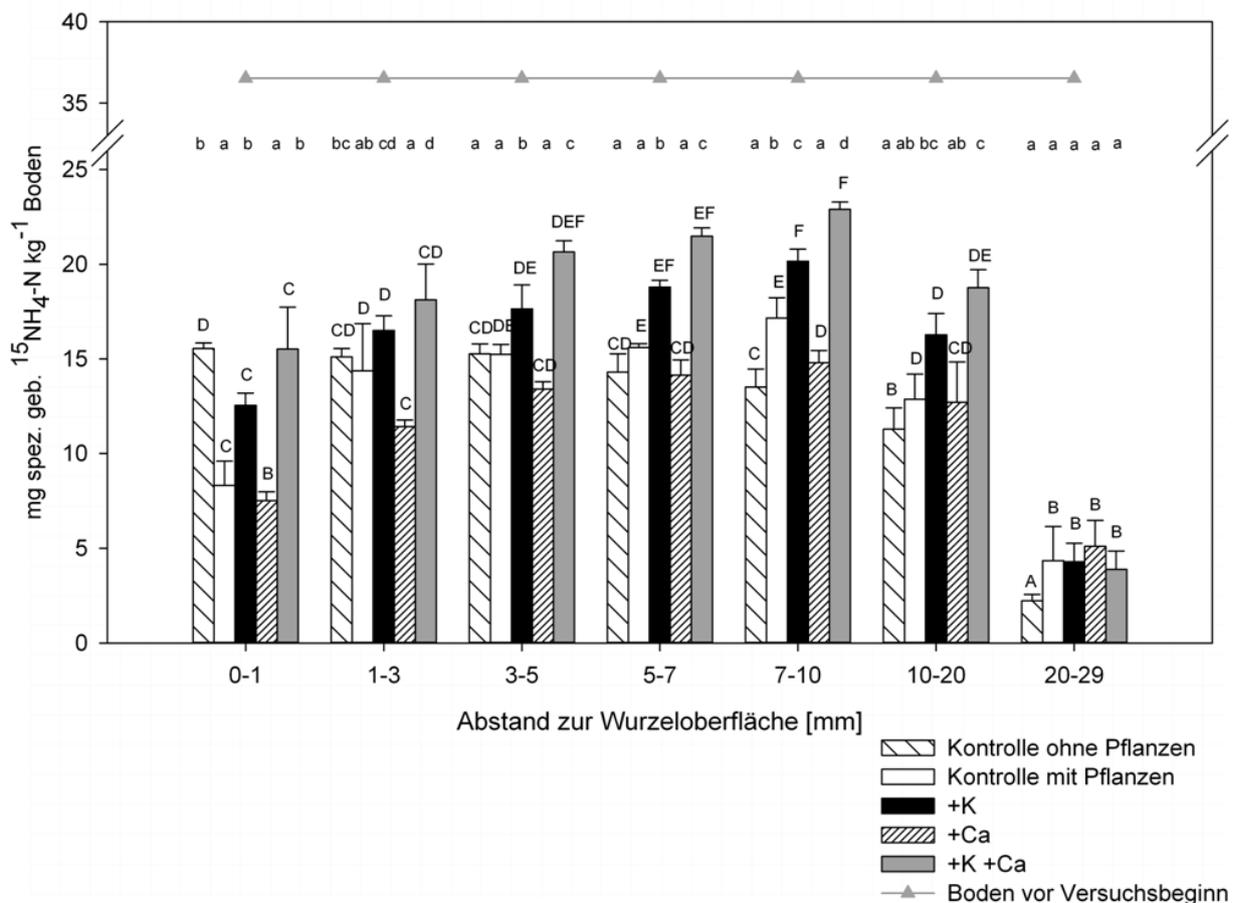


Abb. 4.31: Gehalt an spez. geb. $^{15}\text{NH}_4\text{-N}$ [mg kg^{-1} Boden] nach Versuchsende in definierten Abständen zur Wurzeloberfläche. Die Balken zeigen Mittelwerte, $n=3$. Fehlerbalken stellen die Standardabweichung dar. Kleine Buchstaben: Vergleich der Varianten (innerhalb der Abstände), große Buchstaben: Vergleich der Abstände, Tukey-Test ($\alpha=0,05$)

Die Variante +K zeigte mit einem Gehalt von $12,5 \text{ mg spez. geb. } ^{15}\text{NH}_4\text{-N kg}^{-1}$ Boden eine signifikant geringere Verarmung im Vergleich zur Kontrolle mit Pflanzen im Bereich 0-1 mm. Auch bei der Distanz 1-3 mm war dieser Unterschied statistisch abgesichert. Innerhalb der K-Variante war zwischen den Distanzsegmenten von 0-1 mm bis 7-10 mm ein Konzentrationsgefälle des ^{15}N im spez. geb. NH_4^+ hin zur Wurzeloberfläche erkennbar, der Unterschied zwischen beiden Distanzen war signifikant.

Im Vergleich zur Kontrolle mit Pflanzen lagen die Gehalte an spez. geb. $^{15}\text{NH}_4\text{-N}$ in der Variante +Ca zwar niedriger, die Unterschiede waren aber mit Ausnahme des Distanzsegments 7-10 mm nicht signifikant. Während K^+ eher die Diffusion der $^{15}\text{NH}_4\text{-Ionen}$ aus den Tonmineral-Zwischenschichten blockierte, wirkte sich Ca^{2+} fördernd aus. Die Gehalte an spez. geb. $^{15}\text{NH}_4\text{-N}$ waren bei der Variante +Ca in fast allen Distanzsegmenten deutlich geringer als bei der Variante +K; ausgenommen vom wurzelfernsten Segment (20-29 mm). Innerhalb der Ca-Variante fiel die Konzentration an spez. geb. $\text{NH}_4\text{-N}$ vom Abstand 7-10 mm

hin zur Wurzeloberfläche ab. Die Unterschiede zwischen den Segmenten 0-1 mm und 1-3 mm waren signifikant.

Die Ergebnisse der Ca-Variante standen im Kontrast zu denen der K-Variante. So war der Anteil des spez. geb. $^{15}\text{NH}_4\text{-N}$ bei der Ca-Variante im Abstand 0-1 mm signifikant geringer als bei der K-Variante, 7,5 zu 12,5 mg spez. geb. $^{15}\text{NH}_4\text{-N kg}^{-1}$ Boden. Auch in den Distanzsegmenten 1-3, 3-5, 5-7 und 7-10 mm blieb der Unterschied zwischen diesen beiden Varianten zu groß, um als zufällig gelten zu können. Zwischen den Abständen war der Unterschied bezüglich der Ca-Variante jedoch nur bei 0-1 und 1-3 mm signifikant. Tendenziell konnte man auch bei dieser, so wie bei den anderen Varianten mit Pflanzen, bis zu einer Distanz von einschließlich 7-10 mm, ein Konzentrationsgefälle im Gehalt an spez. geb. $^{15}\text{NH}_4\text{-N}$ hin zur Wurzeloberfläche erkennen. Zwischen der Kontrolle mit Pflanzen und der Ca-Variante konnte kein abgesicherter Unterschied festgestellt werden, jedoch zeichnete sich bei der Ca-Variante eine stärkere Verarmung bei den Distanzen bis 10 mm ab.

Die Gehalte an spez. geb. $^{15}\text{NH}_4\text{-N}$ der Variante +K+Ca waren bei 0-1 mm gleich der der Kontrolle ohne Pflanzen (15,53 mg bzw. 15,55 mg spez. geb. $^{15}\text{NH}_4\text{-N kg}^{-1}$ Boden). Danach waren sie signifikant höher. Im Vergleich zur Kontrolle mit Pflanzen waren sie bis zum Distanzsegment 10-20 mm signifikant höher. Die fördernde Wirkung des Ca^{2+} konnte nicht bestätigt werden. Im Gegenteil scheint Ca^{2+} die blockierende Wirkung des K^+ ab einem Abstand >3 mm von der Wurzeloberfläche noch zu verstärken. Auch in der Variante +K+Ca konnte ein Verarmungsprofil an spez. geb. $^{15}\text{NH}_4\text{-N}$ nachgewiesen werden. Allerdings unterschieden sich die Gehalte in den jeweils benachbarten Segmenten nicht signifikant von einander.

spez. geb. $\text{NH}_4\text{-N}$, Gesamt-N, Gesamt- ^{15}N

Außer dem Gehalt an spez. geb. $^{15}\text{NH}_4\text{-N}$ wurden auch die Gesamt-Gehalte an spez. geb. $\text{NH}_4\text{-N}$, so wie der Gesamt-N und der darin enthaltene ^{15}N -Anteil in den Bodenscheiben bestimmt.

Bei den Gesamt-Gehalten an spez. geb. $\text{NH}_4\text{-N}$ (^{14}N und ^{15}N) in den einzelnen Bodenscheiben zeichneten sich tendenziell die gleichen Relationen ab (Abb. 4.32), wie bei den Ergebnissen des spez. geb. $^{15}\text{NH}_4\text{-N}$.

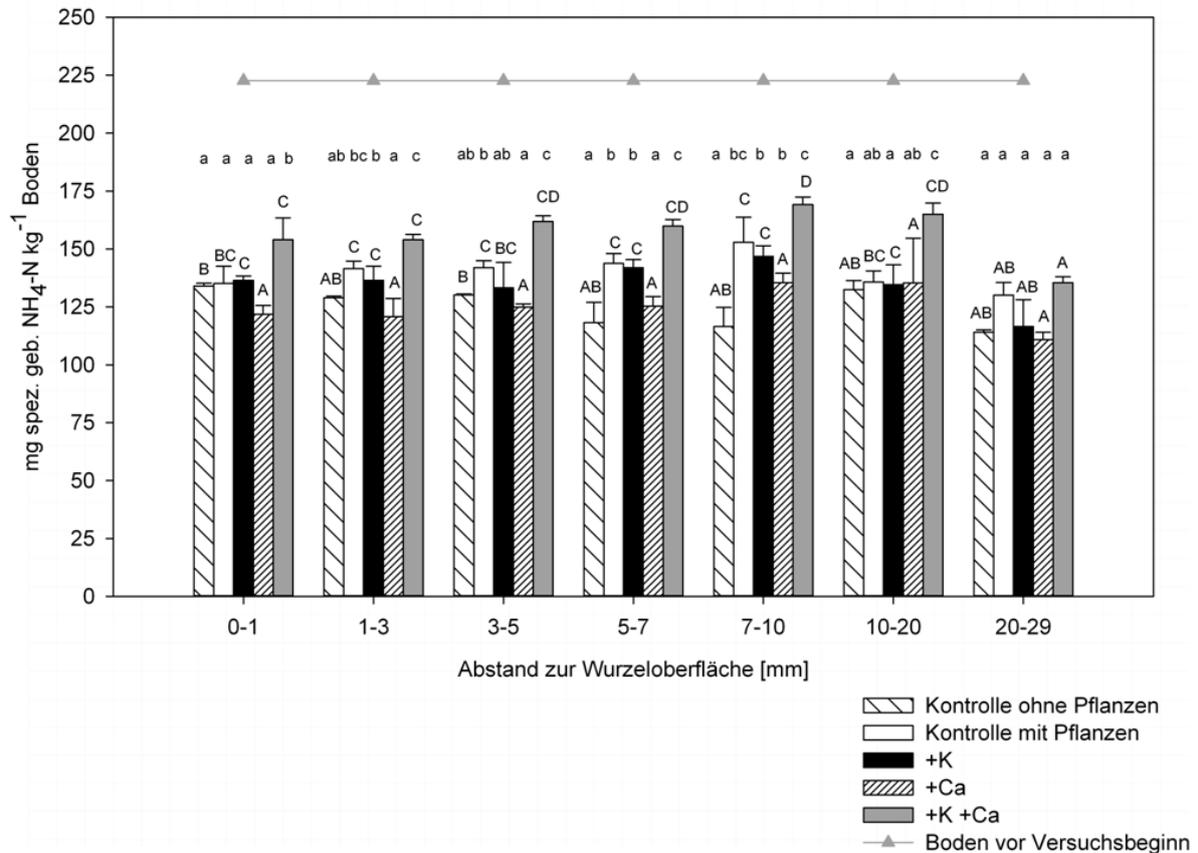


Abb. 4.32: Gesamt-Gehalt an spez. geb. $\text{NH}_4\text{-N}$ [mg kg^{-1} Boden] nach Versuchsende in definierten Abständen zur Wurzeloberfläche. Die Balken zeigen Mittelwerte, $n=3$. Fehlerbalken stellen die Standardabweichung dar. Kleine Buchstaben: Vergleich der Varianten, große Buchstaben: Vergleich der Abstände, Tukey-Test ($\alpha=0,05$)

Der Gesamt-N-Gehalt des Bodens vor dem Versuch betrug $779,0 \text{ mg kg}^{-1}$ Boden, in den Bodenscheiben nach dem Versuch konnten Gehalte zwischen $674,4 \text{ mg}$ und $777,4 \text{ mg N kg}^{-1}$ Boden (Abb. 4.33) nachgewiesen werden. Die Unterschiede zwischen den Gehalten vor und nach dem Versuch waren nicht signifikant, ebenso konnten zwischen den Varianten und zwischen den verschiedenen Abständen keine signifikanten Unterschiede gefunden werden (Tukey-Test, $\alpha=0,05$).

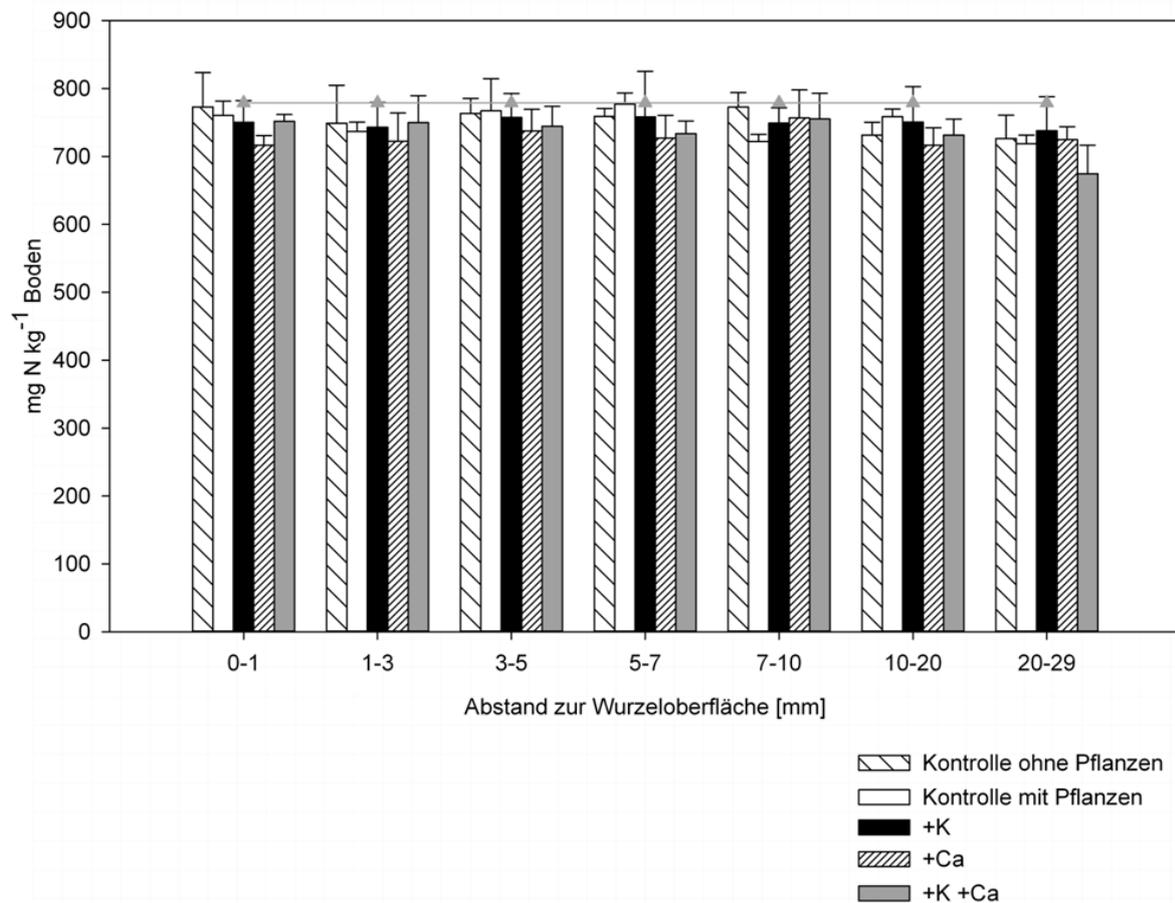


Abb. 4.33: Gehalt an Gesamt-N [mg kg^{-1} Boden] nach Versuchsende in definierten Abständen zur Wurzeloberfläche. Die Balken zeigen Mittelwerte, $n=3$. Fehlerbalken stellen die Standardabweichung dar.

Die Unterschiede im ^{15}N -Anteil am Gesamt-N waren sowohl zwischen den Varianten, als auch zwischen den einzelnen Abständen zur Wurzeloberfläche nicht signifikant (Tukey-Test, $\alpha=0,05$) (Abb. 4.34).

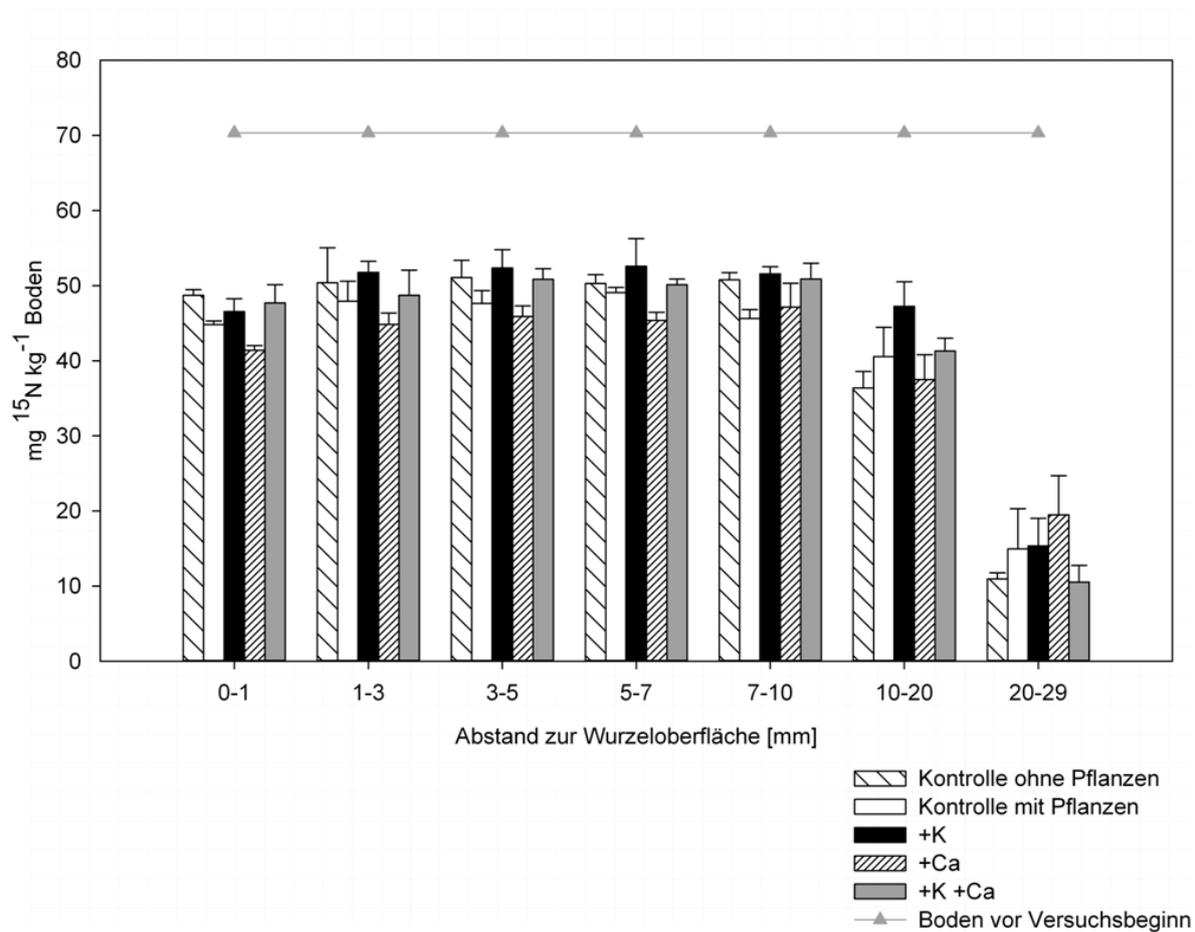


Abb. 4.34: ^{15}N -Anteil im Gesamt-N [mg kg^{-1} Boden] nach Versuchsende in definierten Abständen zur Wurzeloberfläche. Die Balken zeigen Mittelwerte, $n=3$. Fehlerbalken stellen die Standardabweichung dar.

Ergebnisse der Pflanzenanalyse

Trockenmasse

In Tabelle 4.5 ist der Mittelwert der Trockenmasse-Ertrag der Luzernesprosse und -wurzeln aus den jeweils drei Kompartimenten pro Variante dargestellt. Die Sprosse wiesen Erträge zwischen 4,16 und 5,43 g pro Kompartiment auf, jedoch konnten keine statistisch abgesicherten Unterschiede gefunden werden. Gleiches gilt für den Trockenmasse-Ertrag der Wurzeln.

Tab. 4.5 Trockenmasse [g pro Kompartimentsystem] der Luzernesprosse und –wurzeln. n=3, Tukey-Test ($\alpha=0,05$): Unterschiede zwischen den Varianten waren nicht signifikant.

Variante	Spross [g TM]		Wurzel [g TM]	
	arithm. Mittel	Standardabw.	arithm. Mittel	Standardabw.
Kontrolle	5,43	0,65	4,87	1,75
+K	4,72	1,20	4,68	1,50
+Ca	4,64	0,88	3,91	0,90
+K +Ca	4,16	0,73	3,63	0,60

N- und ¹⁵N-Entzüge

Der durchschnittliche N-Gehalt der Luzernesprosse lag bei 2,73% und der der Wurzeln bei 1,77%. Es konnten keine signifikanten Unterschiede zwischen den Varianten (Kontrolle, +K, +Ca, +K+Ca) festgestellt werden. In Abb. 4.35 sind die N-Entzüge und die ¹⁵N-Entzüge der Sprosse und der Wurzeln pro Kompartimentsystem dargestellt.

Der ¹⁵N-Entzug der Sprosse der Kontrollvariante und der Variante +Ca und war fast doppelt so hoch wie der der Variante +K. Sie wiesen Entzüge von 7,68 mg bzw. 7,17 mg ¹⁵N pro Kompartimentsystem auf, während die Variante +K einen mittleren ¹⁵N-Entzug von 4,00 mg pro Kompartimentsystem und die Variante +K+Ca von 3,40 mg erreichten. Auch bei den Wurzeln konnten Unterschiede beobachtet werden: die Kontrolle und die Variante +Ca ergaben mit 4,18 mg bzw. 4,19 mg ¹⁵N fast identische Ergebnisse, die Variante +K und die Variante +K+Ca lagen bei 2,35 mg bzw. 1,85 mg ¹⁵N pro Kompartimentsystem. Dementsprechend konnten die Unterschiede zwischen der Kontrolle und den Varianten +K und +K+Ca-sowohl bei den Sprossen als auch bei den Wurzeln als höchst signifikant eingestuft werden, ebenso die Unterschiede zwischen der Variante +Ca und der Varianten +K und +K+Ca (Abb. 4.35).

Beim Vergleich der Varianten +K und +K+Ca konnten nur marginale, nicht signifikante Unterschiede festgestellt werden.

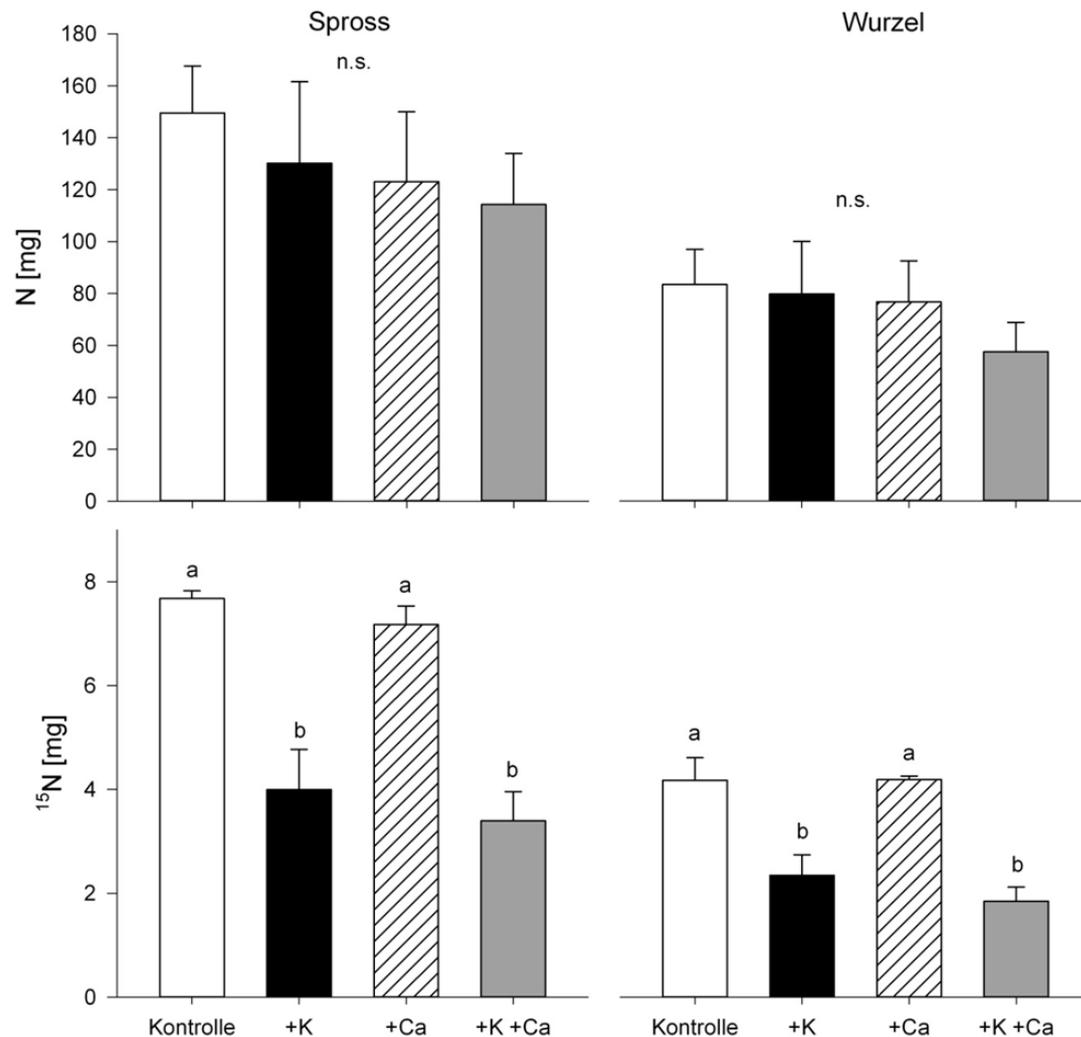


Abb. 4.35: N- und ¹⁵N-Entzug [mg pro Kompartimentsystem] der Luzernesprosse und –wurzeln. Die Fehlerbalken stellen die Standardabweichung dar (n=3), Tukey-Test ($\alpha=0,05$), n.s.: nicht signifikant, mit unterschiedlichen Buchstaben gekennzeichnete Balken sind signifikant unterschiedlich voneinander.

K-Entzüge

Die K-Entzüge des Sprosses hatten bei der Kontrolle einen Wert von 38,3 mg und die der Variante +Ca einen Wert von 37,5 mg, womit beide relativ eng beieinander lagen (Abb. 4.36). Im Gegensatz dazu waren die K-Entzüge der Varianten, welche eine zusätzliche K-Gabe erhalten hatten, mit 48,1 mg bei der Variante +K und 43,4 mg bei der Variante +K+Ca deutlich höher. Bei den Entzügen der Wurzeln konnten analoge Unterschiede zwischen den Varianten beobachtet werden, insgesamt aber auf einem niedrigeren Niveau. Die beschriebenen Unterschiede können nur als Tendenzen angesehen werden, da sie statistisch nicht signifikant waren.

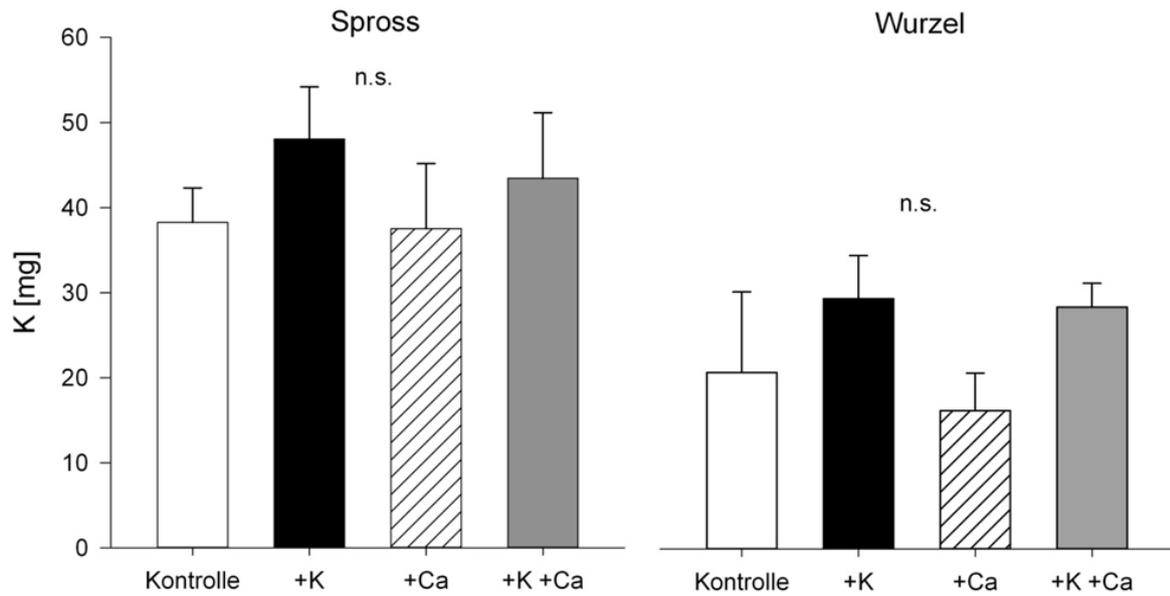


Abb. 4.36: K-Entzug [mg pro Kompartimentsystem] der Luzernesprosse und -wurzeln. Nähere Einzelheiten siehe Abb. 4.35. n.s.: nicht signifikant.

Ca-Entzüge

Die Ca-Entzüge des Sprosses waren um ca. das Fünffache höher als die der Wurzeln. Statistische signifikante Unterschiede zwischen den Varianten konnten nicht festgestellt werden (Abb. 4.37).

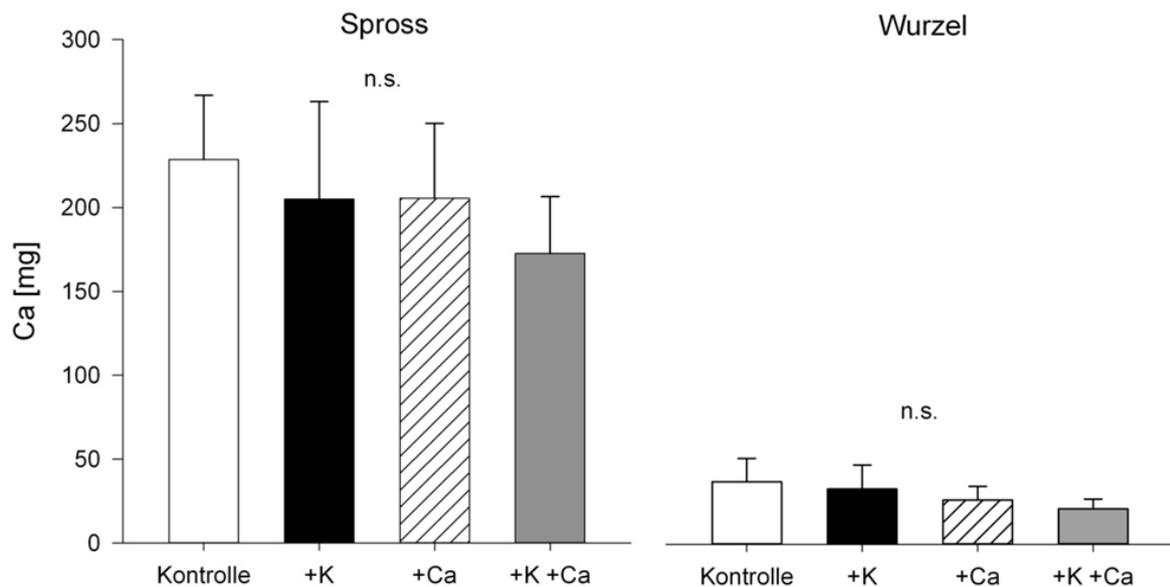


Abb. 4.37: Ca-Entzug [mg pro Kompartimentsystem] der Luzernesprosse und -wurzeln. Nähere Einzelheiten siehe Abb. 4.35. n.s.: nicht signifikant.

Mg-Entzüge

Der Gesamt-Mg-Entzug der Luzernepflanzen aller Varianten lag zwischen 46 mg und 56 mg pro Kompartimentsystem. Der Anteil an aufgenommenem Mg der Wurzeln bzw. der Sprosse war jedoch, je nach Variante, sehr unterschiedlich (Abb. 4.38). So hatten die Wurzeln der Kontrolle und der Variante +Ca einen Anteil von ca. 64% des gesamten entzogenen Mg, die Wurzeln der Variante +K und +K+Ca hingegen einen Anteil von ca. 74%. Beim Betrachten der Sprossentzüge der Varianten, die zusätzlich eine K-Gabe erhalten hatten fiel auf, dass sie tendenziell niedriger waren als die der Kontrolle und der Variante +Ca. Bei den Wurzeln war das Gegenteil zu beobachten, hier waren die Entzüge der Kontrolle und der Variante +Ca tendenziell geringer. Die beschriebenen Ergebnisse stellen jedoch nur einen Trend dar, die Unterschiede waren nicht signifikant.

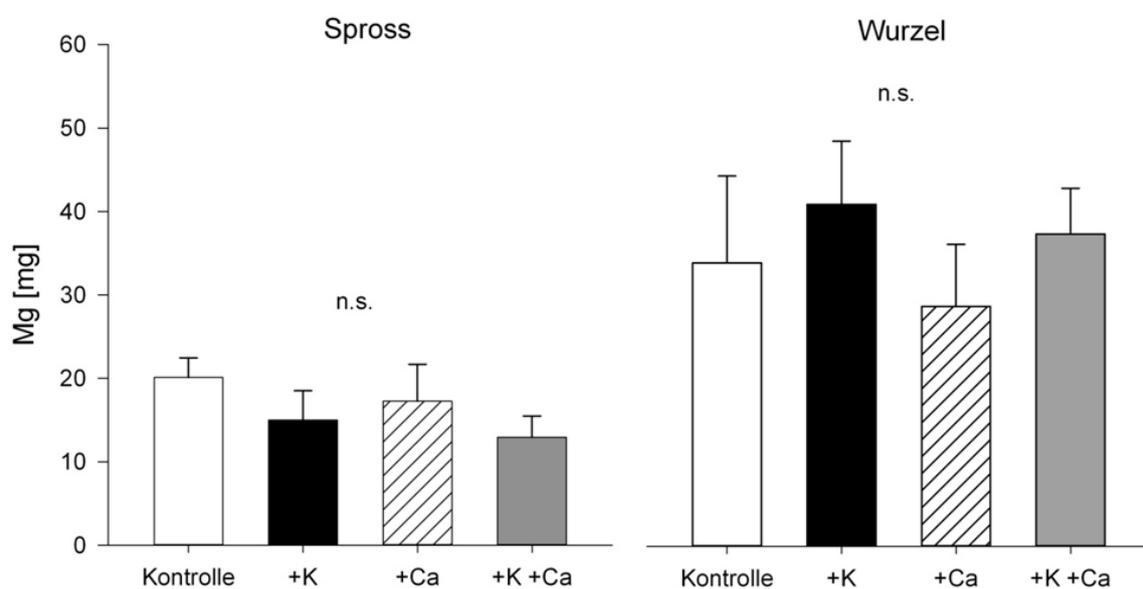


Abb. 4.38: Mg-Entzug [mg pro Kompartimentsystem] der Luzernesprosse und –wurzeln. Nähere Einzelheiten siehe Abb. 4.35. n.s.: nicht signifikant.

P-Entzüge

Die P-Entzüge der Luzernepflanzen lagen zwischen 7,8 mg und 11,2 mg pro Kompartimentsystem (Abb. 4.39). Der Anteil der Sprosse am P-Entzug betrug ca. 50-60%. Klar erkennbare Trends zwischen den Varianten waren beim P nicht zu erkennen.

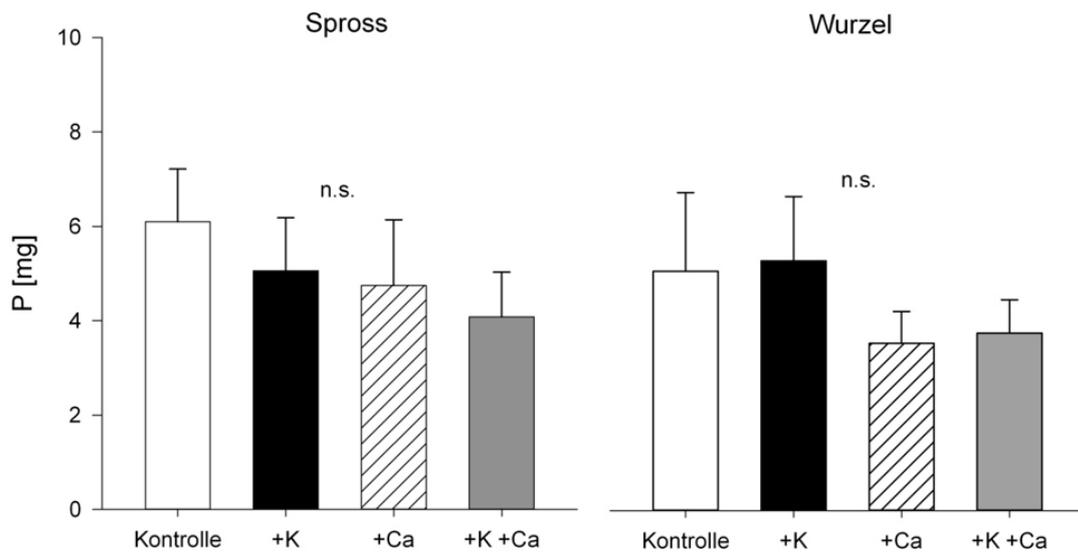


Abb. 4.39: P-Entzug [mg pro Kompartimentsystem] der Luzernesprosse und -wurzeln.
Nähere Einzelheiten siehe Abb. 3.35. n.s.: nicht signifikant

4.2.2 Spezifische Bindung von NH_4 -Ionen nach Ammonium- bzw. Nitratdüngung

Im Folgenden werden die Ergebnisse des Gefäßversuches zur NH_4^+ - und NO_3^- -Dynamik beschrieben.

Der Gehalt an spez. geb. $^{15}\text{NH}_4\text{-N}$ in den Proben des Oberbodens (Beprobungstiefe 10 cm) aus dem Säulenversuch reichte von $0,52 \text{ mg kg}^{-1}$ Boden bei den Kontrollvarianten, was dem natürlichen Gehalt entspricht, bis zu einer Anreicherung von $22,07 \text{ mg kg}^{-1}$ Boden bei den $^{15}\text{NH}_4\text{Cl}$ -Varianten (Abb. 4.40). Bei der Variante mit dem niedrigen Wassergehalt (40% der max. WK) lagen nach der Applikation von $^{15}\text{NH}_4\text{Cl}$ $22,07 \text{ mg spez. geb. } ^{15}\text{NH}_4\text{-N kg}^{-1}$ Boden vor, und nach der Applikation von K^{15}NO_3 waren es $11,77 \text{ mg spez. geb. } ^{15}\text{NH}_4\text{-N kg}^{-1}$ Boden. Der Unterschied zwischen beiden Varianten war signifikant. Im Vergleich zur Kontrolle war der Gehalt der $^{15}\text{NH}_4\text{Cl}$ -Variante um das 43-fache, der der K^{15}NO_3 -Variante um den 23-fache höher. Die Differenzen zwischen Kontrolle und den beiden Varianten konnten ebenfalls statistisch abgesichert werden. Beim höheren Wassergehalt (75% der max. WK) wurden nach $^{15}\text{NH}_4\text{Cl}$ -Zufuhr $17,74$ und nach K^{15}NO_3 -Zufuhr $4,78 \text{ mg spez. geb. } ^{15}\text{NH}_4\text{-N kg}^{-1}$ Boden ermittelt. Der Unterschied zwischen den beiden Varianten war auch hier signifikant, ebenso wie der Unterschied der beiden Varianten zur Kontrolle. Somit lag der Gehalt an spez. geb. $^{15}\text{NH}_4\text{-N}$ um $17,20$ bzw. um $4,24 \text{ mg kg}^{-1}$ Boden über dem Gehalt der Kontrolle. Unabhängig von der Bodenfeuchte war der Gehalt an spez. geb. $^{15}\text{NH}_4\text{-N}$ nach der $^{15}\text{NH}_4$ -Applikation höher als bei $^{15}\text{NO}_3$ -Applikation. Tendenziell konnten bei der niedrigen Wasserkapazitätsstufe sowohl nach $^{15}\text{NH}_4\text{Cl}$ - als auch nach K^{15}NO_3 -Applikation höhere Gehalte an spez. geb. $^{15}\text{NH}_4\text{-N}$ gefunden werden.

Die Unterbodenproben (Beprobungstiefe 55 cm) wiesen Gehalte an spez. geb. $^{15}\text{NH}_4\text{-N}$ zwischen $0,67 \text{ mg kg}^{-1}$ Boden bei den Kontrollvarianten, was dem natürlichen Gehalt entspricht und $27,40 \text{ mg kg}^{-1}$ Boden bei den $^{15}\text{NH}_4\text{Cl}$ -Varianten (Abb. 4.40). Bei der Variante mit dem niedrigen Wassergehalt wurden nach der Applikation von $^{15}\text{NH}_4\text{Cl}$ $5,59$ und nach der Applikation von K^{15}NO_3 $8,31 \text{ mg spez. geb. } ^{15}\text{NH}_4\text{-N kg}^{-1}$ Boden gefunden. Tendenziell war der Gehalt bei K^{15}NO_3 -Variante in dieser Bodentiefe höher als bei der $^{15}\text{NH}_4$ -Variante. Der Unterschied war jedoch nicht signifikant, ebenso wenig wie der Unterschied zwischen der Kontrolle und den beiden ^{15}N -Varianten. Beim höheren Wassergehalt wurden nach $^{15}\text{NH}_4\text{Cl}$ -Zufuhr $27,40$ und nach K^{15}NO_3 -Zufuhr $7,05 \text{ mg spez. geb. } ^{15}\text{NH}_4\text{-N kg}^{-1}$ Boden ermittelt. Der Unterschied zwischen den beiden Varianten war signifikant, ebenso wie der Unterschied zwischen der $^{15}\text{NH}_4\text{Cl}$ -Variante und der Kontrolle. Der Gehalt an spez. geb. $^{15}\text{NH}_4\text{-N}$ der K^{15}NO_3 -Variante lag mit $6,36 \text{ mg kg}^{-1}$ Boden über dem Gehalt der Kontrolle, diese Differenz konnte statistisch nicht abgesichert werden. Die Unterschiede zwischen den beiden Wassergehaltsstufen konnten nur bei der $^{15}\text{NH}_4\text{Cl}$ -Variante statistisch nicht abgesichert werden.

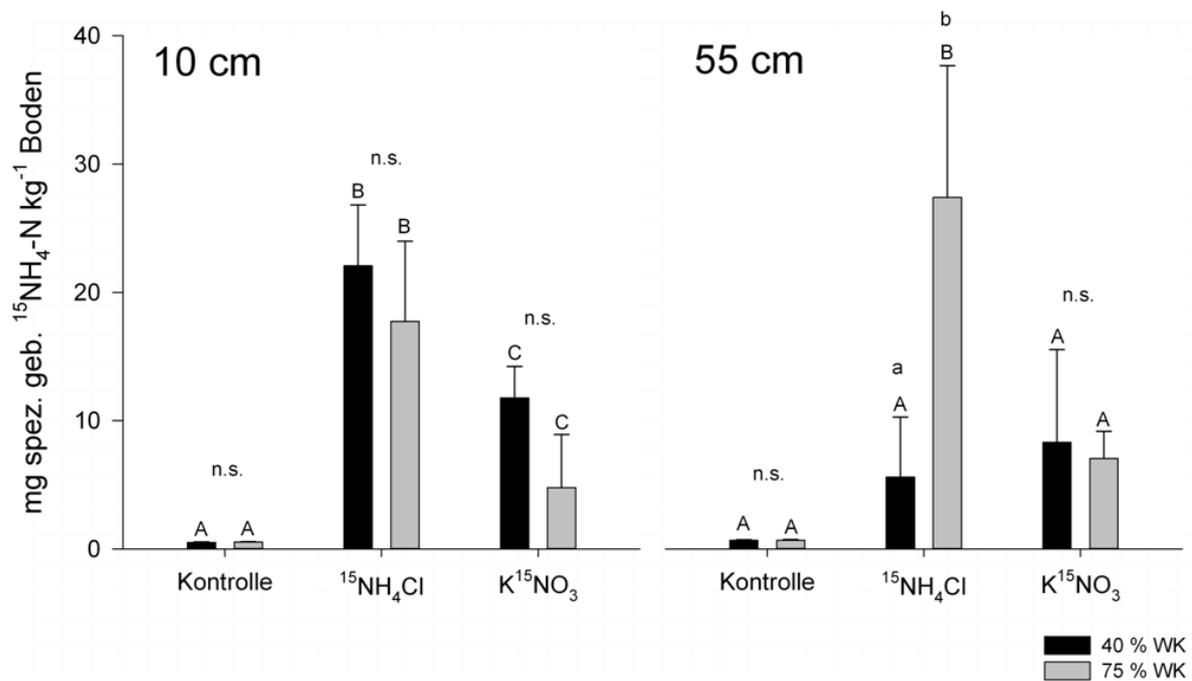


Abb. 4.40: Gehalt an spez. geb. $^{15}\text{NH}_4\text{-N}$ im Boden nach Applikation von $^{15}\text{NH}_4\text{Cl}$ bzw. K^{15}NO_3 auf 5 bzw. 50 cm Bodentiefe und Beprobung bei 10 bzw. 55 cm. ANOVA, Tukey-Test ($\alpha=0,05$): kleine Buchstaben zeigen signifikante Unterschiede zwischen den Wasserkapazitätsstufen, große Buchstaben zwischen der Kontrolle und den beiden N-Varianten.

Zu Beantwortung der Frage, ob das zugeführte NH_4^+ bzw. NO_3^- in tiefere Bodenschichten verlagert, im Falle des Nitrates reduziert und dann spezifisch gebunden wird, wurden weitere Proben aus tieferen Bodenschichten entnommen. Bei der Applikation der entsprechenden Stickstoffverbindung auf 5 cm Bodentiefe wurden Proben aus 20 cm, 30 cm und 40 cm entnommen, bei 55 cm Applikationstiefe erfolgte die Entnahme bei 70 cm Tiefe. Die Ergebnisse der Beprobungstiefen 30 cm und 40 cm wurden nicht dargestellt, da hier keine Anreicherung an ^{15}N und keine Veränderung des Gesamtgehalts an spez. geb. $\text{NH}_4\text{-N}$ mehr festgestellt werden konnte.

Bei der niedrigen Wassergehaltsstufe konnten weder bei der $^{15}\text{NH}_4\text{Cl}$ - noch bei der K^{15}NO_3 -Variante Anreicherungen an ^{15}N im spez. geb. $\text{NH}_4\text{-N}$ in den Proben aus 20 cm Bodentiefe gefunden werden (Abb. 4.41). Bei 75% WK hingegen war der Gehalt an spez. geb. $^{15}\text{NH}_4\text{-N}$ mit $1,92 \text{ mg kg}^{-1}$ bei der Variante mit K^{15}NO_3 -Zufuhr höher als bei der Kontrolle und der $^{15}\text{NH}_4\text{Cl}$ -Variante. Die Differenz zur Kontrolle war mit $1,24 \text{ mg}$ im Vergleich zu den Differenzen bei 10 cm Beprobungstiefe sehr gering, aber dennoch signifikant. Der Unterschied zur $^{15}\text{NH}_4\text{Cl}$ -Variante betrug $1,17 \text{ mg}$ und konnte ebenfalls statistisch abgesichert werden. Unterschiede zwischen den Wasserkapazitätsstufen waren nicht signifikant.

In 70 cm Beprobungstiefe waren die Verhältnisse sehr ähnlich, bei niedrigem Wassergehalt konnten keine ^{15}N -Anreicherungen ermittelt werden. Hingegen beim feuchteren Boden

konnten bei der $K^{15}NO_3$ -Variante 2,33 mg spez. geb. $^{15}NH_4-N$ kg^{-1} Boden gefunden werden. Der Unterschied zur 40% WK war signifikant. Die Differenzen zwischen $K^{15}NO_3$ -Variante und Kontrolle bzw. $^{15}NH_4Cl$ -Variante waren signifikant.

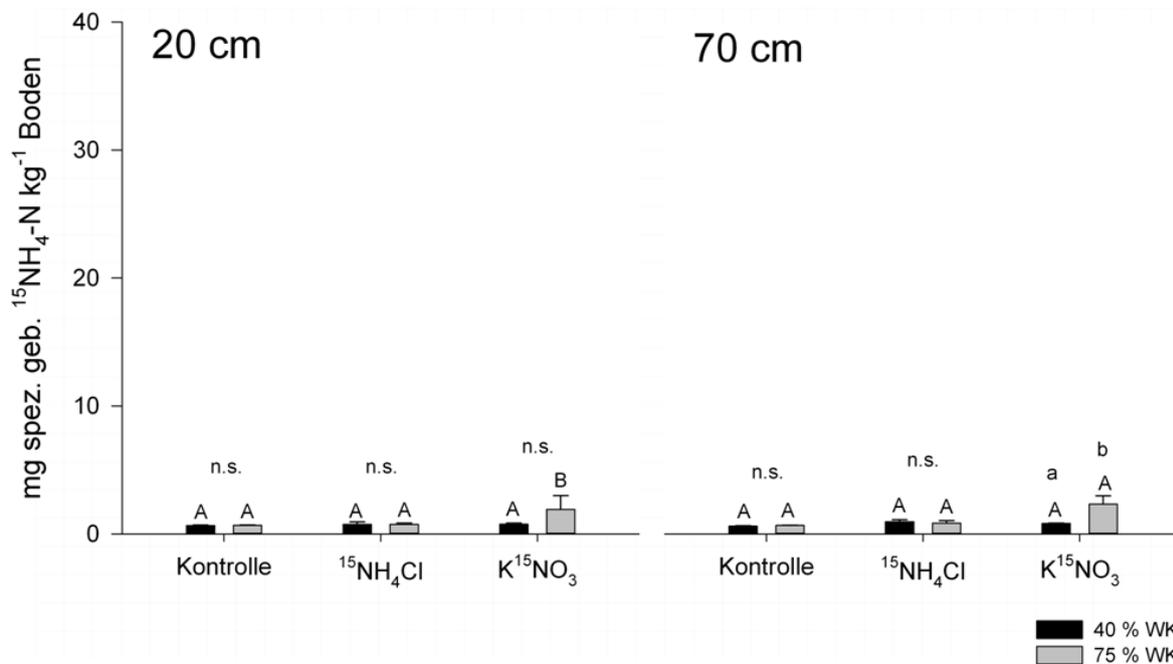


Abb. 4.41: Gehalt an spez. geb. $^{15}NH_4-N$ im Boden nach Applikation von $^{15}NH_4Cl$ bzw. $K^{15}NO_3$ auf 5 bzw. 50 cm Bodentiefe und Beprobung bei 20 bzw. 70 cm. Nähere Einzelheiten siehe Abb. 4.40.

Der Gesamtgehalt an spez. geb. NH_4-N im Oberboden wies tendenziell die gleichen Verhältnisse zwischen den Varianten bzw. Wasserkapazitäten auf, wie der Gehalt an spez. geb. $^{15}NH_4-N$. In 10 cm Beprobungstiefe lag der Gehalt der Kontrolle bei 132,1 mg spez. geb. NH_4-N kg^{-1} Boden. Bei der Variante mit dem niedrigen Wassergehalt (40% der max. WK) lagen nach Zufuhr von $^{15}NH_4Cl$ 172,4 vor und nach Zufuhr von $K^{15}NO_3$ 163,3 mg spez. geb. NH_4-N kg^{-1} Boden (Abb. 4.42). Bei höherem Wassergehalt (75% der max. WK) wurden nach $^{15}NH_4$ -Zufuhr 163,5 und nach $^{15}NO_3$ -Zufuhr 144,4 mg spez. geb. NH_4-N kg^{-1} Boden ermittelt. Unterschiede zwischen der Kontrolle und der $^{15}NH_4Cl$ - bzw. der $K^{15}NO_3$ -Variante waren beim trockeneren Boden signifikant. Die Unterschiede zwischen den Wasserkapazitätsstufen waren nicht signifikant.

Im Unterboden (55 cm) wurde bei der Kontrolle 155,6 mg spez. geb. NH_4-N kg^{-1} Boden bei 40% der max. WK ermittelt, nach Zufuhr von $^{15}NH_4Cl$ 176,1 mg und nach Zufuhr von $K^{15}NO_3$ 187,0 mg spez. geb. NH_4-N kg^{-1} Boden. Die Unterschiede beliefen sich somit auf 2,3 mg bzw. 13,2 mg kg^{-1} und waren im Vergleich zur Kontrolle nicht signifikant. Auch waren die Unterschiede zwischen $^{15}NH_4$ -Zufuhr und $^{15}NO_3$ -Zufuhr statistisch nicht abzusichern. Bei dem höheren Wassergehalt wurden Gehalte von 204,8 mg bzw. 177,7 mg spez. geb. NH_4-N

kg⁻¹ Boden gemessen, was Unterschiede zur Kontrolle (176,2 mg spez. geb. NH₄-N kg⁻¹ Boden) von 28,6 mg bzw. 1,5 mg kg⁻¹ ausmacht, welche auch hier nicht signifikant waren. Bei der ¹⁵NH₄Cl-Variante konnte zwischen den beiden Wasserkapazitätsstufen ein signifikanter Unterschied festgestellt werden.

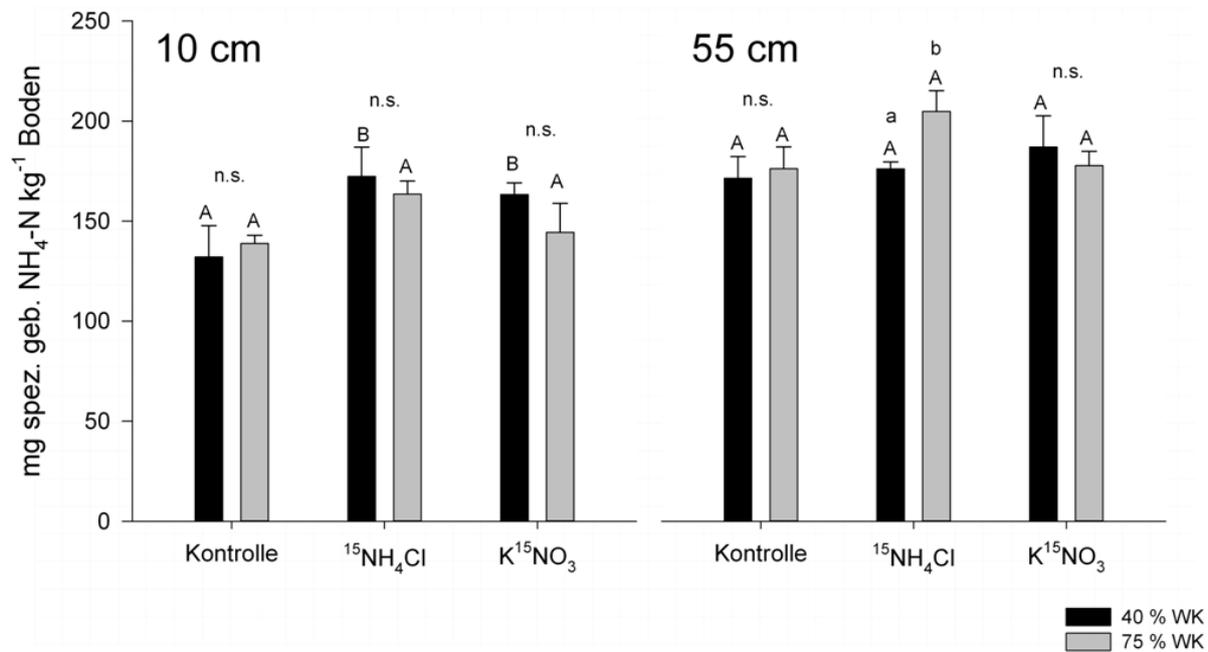


Abb. 4.42: Gesamtgehalt an spez. geb. NH₄-N im Boden nach Applikation von ¹⁵NH₄Cl bzw. K¹⁵NO₃ auf 5 bzw. 50 cm Bodentiefe und Beprobung bei 10 bzw. 55 cm. Nähere Einzelheiten siehe Abb. 4.40.

In den Beprobungstiefen 20 bzw. 70 cm konnten weder zwischen den ^{15}N -Varianten noch zwischen den beiden Wasserkapazitätsstufen signifikante Unterschiede im Gesamtgehalt an spez. geb. $\text{NH}_4\text{-N}$ festgestellt werden (Abb. 4.43).

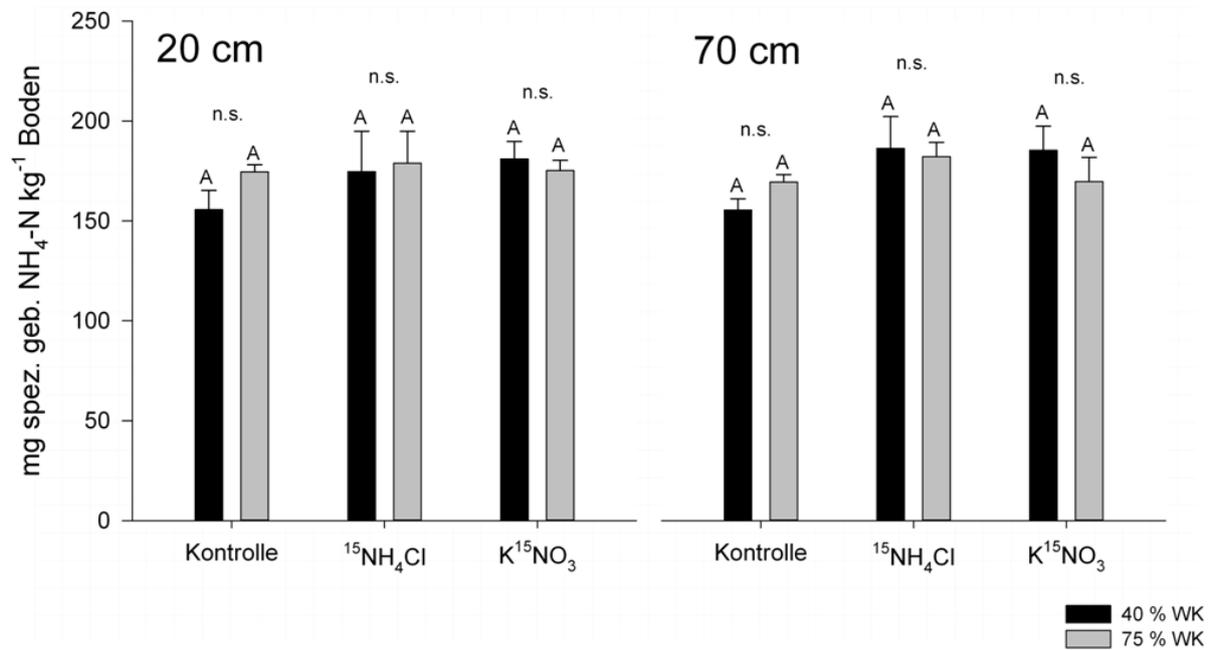


Abb. 4.43: Gesamtgehalt an spez. geb. $\text{NH}_4\text{-N}$ im Boden nach Applikation von $^{15}\text{NH}_4\text{Cl}$ bzw. K^{15}NO_3 auf 5 bzw. 50 cm Bodentiefe und Beprobung bei 20 bzw. 70 cm. Nähere Einzelheiten siehe Abb. 4.40.

5. Diskussion

5.1 Feldversuche

5.1.1 Einfluss des Wurzelsystems und der Stickstoffversorgung des Oberbodens auf die Dynamik des spez. geb. NH_4^+

Dynamik des spez. geb. NH_4^+ in Abhängigkeit vom Wurzelsystem

In Untersuchungen von MENGEL & SCHERER (1981) konnte gezeigt werden, dass das spez. geb. NH_4^+ keine statische Fraktion ist, sondern z.T. in Mengen mobilisiert wird, die für die N-Versorgung der Pflanzen eine nicht zu unterschätzende Rolle spielen. Neben diesen Autoren stellten auch KOWALENKO & ROSS (1980), KUDEYAROV (1981), NOMMIK (1981), MENGEL & SCHERER (1981, 1986), NOMMIK & VAHTRAS (1982), PRESTON (1982), SCHERER (1984, 1987, 1993), STEFFENS & SPARKS (1997, 1999), ELMACI ET AL. (2002), RIDER ET AL. (2007) und LU ET AL. (2010) fest, dass der Gehalt dieser N-Fraktion bis zur Ernte abnimmt und häufig am Ende der Vegetationsperiode wieder das im zeitigen Frühjahr vorliegende Niveau erreicht wird. Der Einfluss der Wurzelarchitektur auf die Dynamik des spez. geb. NH_4^+ wurde seither nicht überprüft und war deshalb Gegenstand der hier diskutierten Untersuchungen. Als Versuchspflanzen wurden im Jahr 2010 die allorhize Futtermalve und der homorhize Weizen nach den Vorfrüchten Luzerne und Rohrschwingel angebaut. Die Dynamik des spez. geb. NH_4^+ im Jahresverlauf war unter beiden Pflanzenarten sehr ähnlich. Bis zum 16.06. waren nur marginale nicht signifikante Unterschiede im Gehalt dieser N-Fraktion zu erkennen, so dass kaum einheitliche Aussagen über den Einfluss des Wurzelsystems auf die Mobilisierung des spez. geb. $\text{NH}_4\text{-N}$ getroffen werden können (siehe Abb. 4.1 und 4.2). Die Veränderungen von einem zu nächsten Termin und die damit verbundenen tendenziellen Unterschiede zwischen den beiden Wurzelsystemen lassen sich teilweise eher mit dem Witterungsverlauf oder anhand der Wachstumsstadien, in denen sich die jeweiligen Pflanzenarten zum Probenahmezeitpunkt befanden, erklären. Einzelne Zu- bzw. Abnahmen im Gehalt an spez. geb. NH_4^+ sind aber meist nur schwer einem konkreten Einflussfaktor zuzuordnen; sie sind in der Regel ein Resultat aus der Kombination dieser. Ansteigende Bodentemperaturen ab Mitte März 2010 (Abb. 5.1) begleitet von diversen Niederschlagsereignissen, welche die Bodenfeuchte ansteigen ließen, könnten Einfluss auf den Quellungszustand der Tonminerale gehabt haben. So trägt Bodenfeuchte dazu bei, dass sich die Tonminerale aufweiten und somit die Distanz zwischen den einzelnen Schichten größer wird, was die Diffusion der $\text{NH}_4\text{-Ionen}$ aus den Tonmineralen erleichtert (ALLISON 1953b; GOUVEIA & EUDOXIE 2007). SCHERER & MENGEL (1981) stellten eine erhöhte Mobilisierung des spez. geb. NH_4^+ mit steigendem Wassergehalt des Bodens fest. Zudem haben feuchtwarme Bodenverhältnisse auch einen positiven Einfluss auf im Boden lebende Mikroorganismen, welche für Prozesse wie die Nitrifikation oder die N-Mineralisation verantwortlich sind. Bei der Nitrifikation wird in der Bodenlösung vorliegendes NH_4^+ zu NO_3^- oxidiert, wodurch das Gleichgewicht zwischen dem spez. geb. NH_4^+ und dem NH_4^+ in der Bodenlösung gestört und somit die Diffusion von $\text{NH}_4\text{-Ionen}$ aus den Tonmineralzwischen-schichten gefördert wird. Hingegen wird bei der Mineralisation von Stickstoff unter anderem NH_4^+ gebildet, welches dann zum Teil spezifisch gebunden werden kann.

Zwischen dem 16.06. und 14.07.2010 war die Mobilisierung an spez. geb. $\text{NH}_4\text{-N}$ auffallend hoch bzw. am 14.07.2010 konnte bei nahezu allen Varianten ein Tiefpunkt beim Gehalt des spez. geb. NH_4^+ festgestellt werden. In diesem Zeitabschnitt durchlief der Weizen die Entwicklungsstadien Ährenschieben bis Reife (BBCH 55 bis 87). Das ist die Periode, in der die Fruchtbildung und somit die Eiweißsynthese stattfindet, wozu während der Vegetationsphase des Weizens am meisten Stickstoff benötigt wird (Tab. 5.1). Die Futtermalve befand sich zu diesem Zeitpunkt in der Hauptinfloreszenzphase und bildete bereits Samen aus, wozu ebenfalls große Mengen Stickstoff benötigt werden. Diese Ergebnisse bestätigen die von SOON (1998), der einen signifikant niedrigeren Gehalt an spez. geb. NH_4^+ zum Zeitpunkt der Kornausbildung von Gerste feststellte. Zu dem Zeitpunkt, wo das Wachstum der Pflanzen am stärksten und somit die Stickstoffaufnahme am höchsten ist, liegt also der geringste Gehalt an spez. geb. NH_4^+ vor (STURM & JUNG 1973). Zum letzten Probenahmetermin 2010, also zur Totreife des Weizens (BBCH 92) bzw. nach der Mahd der Futtermalve (30.07.), wurde ein Wiederanstieg des Gehaltes an spez. geb. NH_4^+ festgestellt. Der Grund für diesen meist signifikanten Anstieg war das Absterben der Pflanzen und Mineralisierung des abgestorbenen organischen Materials. Diese Beobachtung deckt sich mit Ergebnissen von SCHERER (1986), der unter Hafer in einem Auengley im Spätsommer einen Wiederanstieg des spez. geb. NH_4^+ beobachtete; der Gehalt erreichte Werte, wie sie im Frühjahr gemessen wurden. Auch FLEIGE ET AL. (1971) beobachteten diese „Refixierung“ bei ihren Versuchen.

Im Gegensatz zur Vorfrucht Luzerne war nach Rohrschwingel als Vorfrucht der Unterschied zwischen den beiden Hauptfrüchten Weizen und Futtermalve in den ersten beiden Tiefenstufen (0-45 und 45-75 cm) signifikant. Unter der allorhizen Futtermalve wurde deutlich mehr spez. geb. NH_4^+ mobilisiert als unter Weizen mit homorhizem Wurzelsystem. Auch nach dem Wiederanstieg zum Ende der Vegetationsperiode hin konnten signifikante Unterschiede zwischen diesen beiden Pflanzenarten festgestellt werden. Dieser Unterschied zwischen Pflanzen mit unterschiedlichem Wurzelsystem konnte ebenfalls bei zwei weiteren Versuchen festgestellt werden. Zum einen bei dem Diffusionstaschenversuch (Abschnitt 4.1.2), wo unter Raps mehr spez. geb. NH_4^+ mobilisiert wurde als unter Gerste, zum anderen bei dem Versuch zur Verlagerung oberirdischer Pflanzenrückstände in Bioporen und der spezifischen Bindung von NH_4^+ nach dessen Mineralisierung (Abschnitt 4.1.3), wo ebenfalls unter Futtermalve weniger spez. geb. NH_4^+ gefunden werden konnte als unter Weizen.

Die Dynamik des spez. geb. NH_4^+ in den drei Tiefenstufen war sehr ähnlich, teilweise jedoch zeitlich versetzt, was mit dem Tiefenwachstum der Wurzeln zusammenhängen könnte, da eine Verarmung an spez. geb. NH_4^+ im Unterboden, im Vergleich zum Oberboden, erst später in der Vegetationsperiode auftritt, da das Wachstum der Pflanzenwurzeln zu Beginn noch nicht so weit vorangeschritten ist (MENGEL & SCHERER 1981). Die Unterschiede im Gehalt an spez. geb. NH_4^+ zwischen den Bodentiefenstufen sind durch den ansteigenden Tongehalt mit der Tiefe zu erklären (siehe Tab. 2.1).

Tab. 5.1: Verlauf der Trockenmasseentwicklung und der Stickstoffaufnahme bei Sommergetreide (Auszug aus Faustzahlen für die Landwirtschaft, DÖHLER 2009).

	BBCH Stadien						91 Korn	91 Stroh
	23	25	31	35	39	59		
Trockenmasse [dt ha ⁻¹]	6	8	14	24	44	80	56	50
N-Aufnahme [kg ha ⁻¹]	22	24	48	68	90	122	90	28

Beim Vergleich der Vorfrüchte Luzerne und Rohrschwingel kann insgesamt ein tendenziell höherer Gehalt an spez. geb. NH_4^+ nach Luzerne unter Futtermalve festgestellt werden, der auf die symbiontische N_2 -Fixierung zurückzuführen sein dürfte. Unter Weizen hingegen konnte am 2. Beprobungstermin in allen drei Tiefenstufen ein signifikanter Unterschied zwischen den Vorfrüchten Luzerne und Rohrschwingel ermittelt werden. Nach Luzerne wurde weniger mobilisiert als nach Rohrschwingel, was wiederum darauf schließen lässt, dass durch die N_2 -Fixierung bei der Luzernevariante mehr Stickstoff für die Weizenentwicklung zur Verfügung stand. Während der folgenden Probenahmen näherten sich beide Vorfruchtvarianten einander an. Die bereits oben beschriebene Mobilisierung des spez. geb. NH_4^+ zwischen dem 16.06. und dem 14.07. ergab signifikante Unterschiede zwischen den Vorfrüchten. Diesmal jedoch war der Gehalt nach Luzerne deutlich geringer als nach Rohrschwingel. Auch der letzte Probenahmetermin wies diese Unterschiede auf. Der Grund für dafür könnte sein, dass eine relativ höhere Menge an N im Boden durch die N_2 -Fixierung der Leguminose das Wachstum der Nachfrucht derart gesteigert hat, dass der Entzug im fortgeschrittenen Wachstumsstadium so hoch war, dass es dadurch zu einer erhöhten Mobilisierung von spez. geb. NH_4^+ gekommen ist.

Im Jahr 2011 wurden Parzellen beprobt, die sich im zweiten Nachfruchtjahr befanden. Nach Luzerne war auch hier unter Raps im Vergleich zu Weizen eine tendenziell stärkere Verarmung an spez. geb. NH_4^+ erkennen. Nach Rohrschwingel konnte diese Beobachtung nicht gemacht werden. Dies bestätigt die bereits mehrfach erwähnte Aussage, dass Pflanzen mit allorhizem Wurzelsystem einen größeren Einfluss auf die Mobilisierung an spez. geb. NH_4^+ haben als Pflanzen mit homorhizem Wurzelsystem. Im Verlauf der Vegetationsperiode ist zu erkennen, dass der Gehalt an spez. geb. NH_4^+ unter beiden Pflanzenarten kontinuierlich abnahm und am 27.06. seinen Tiefpunkt erreichte. Auch hier wird ein Einfluss des Temperaturanstieges auf die Mobilisierung vermutet (Abb. 5.2). Nach dem 27.06. konnte im Jahr 2011 ebenfalls ein Wiederanstieg an NH_4^+ in den Tonmineralen festgestellt werden, der jedoch meist nicht so hoch ausfiel wie im Jahr zuvor, was möglicherweise damit zusammenhängt, dass die Vorfruchtphase bereits zwei Jahre zurücklag. Beim Vergleich der Vorfruchtwirkung, bei gleichen Hauptfrüchten, sind nur marginale bis keine Unterschiede zwischen Rohrschwingel und Luzerne zu erkennen. Zu den beschriebenen Ergebnissen die mehr oder weniger deutliche Tendenzen aufweisen, gibt es Extreme, die oft auch signifikante Unterschiede darstellen, für die aber keine offensichtliche Erklärung gefunden werden konnte und auf die daher nicht näher eingegangen wird.

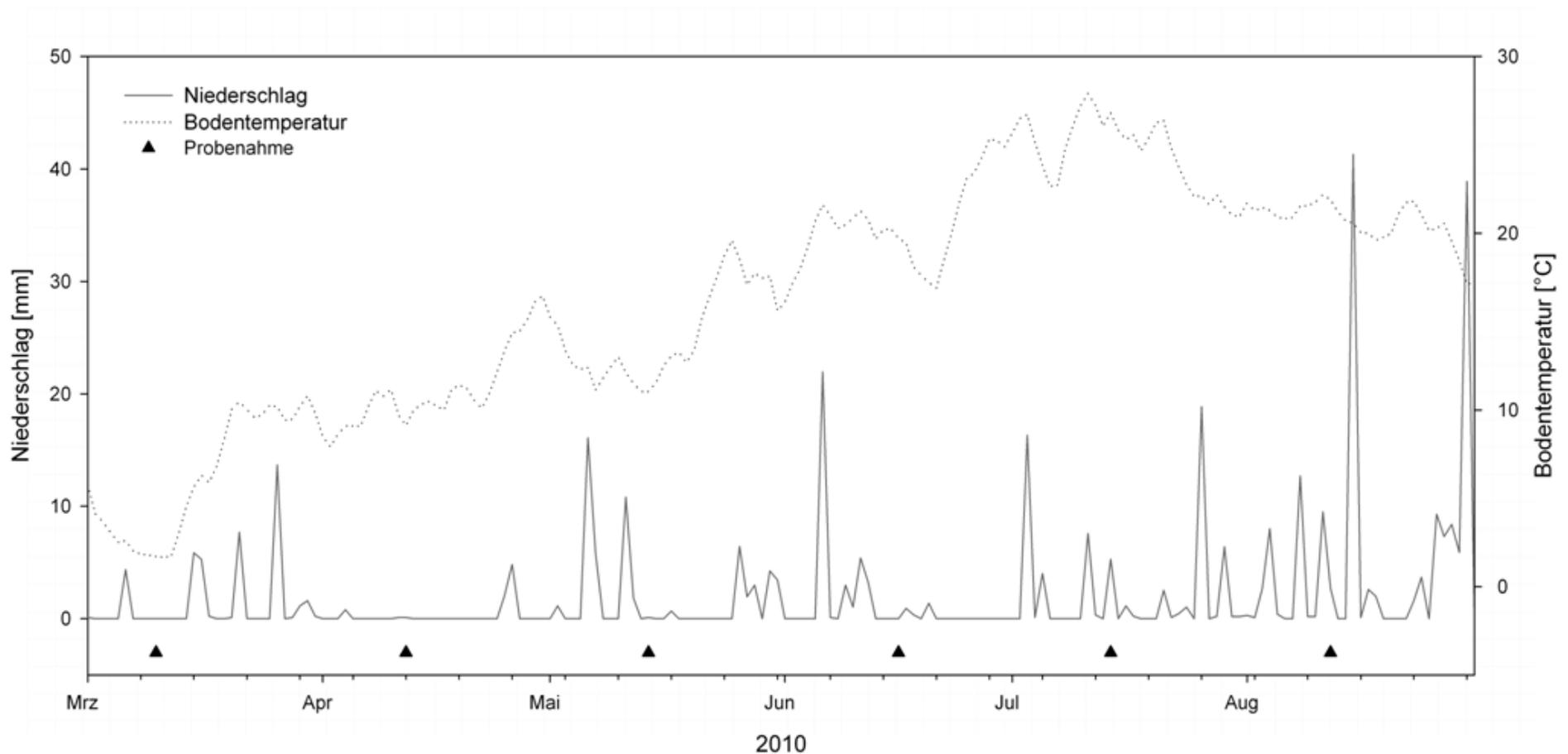


Abb. 5.1: Niederschlag und Bodentemperatur (in 20 cm Tiefe) während des Beprobungszeitraums (01. März bis 31. August 2010) am Versuchsstandort Klein-Altendorf. Die Probenahmetermine sind mit schwarzen Pfeilen gekennzeichnet. (Quelle: Wetterstation Campus Klein-Altendorf Nord, Universität Bonn)

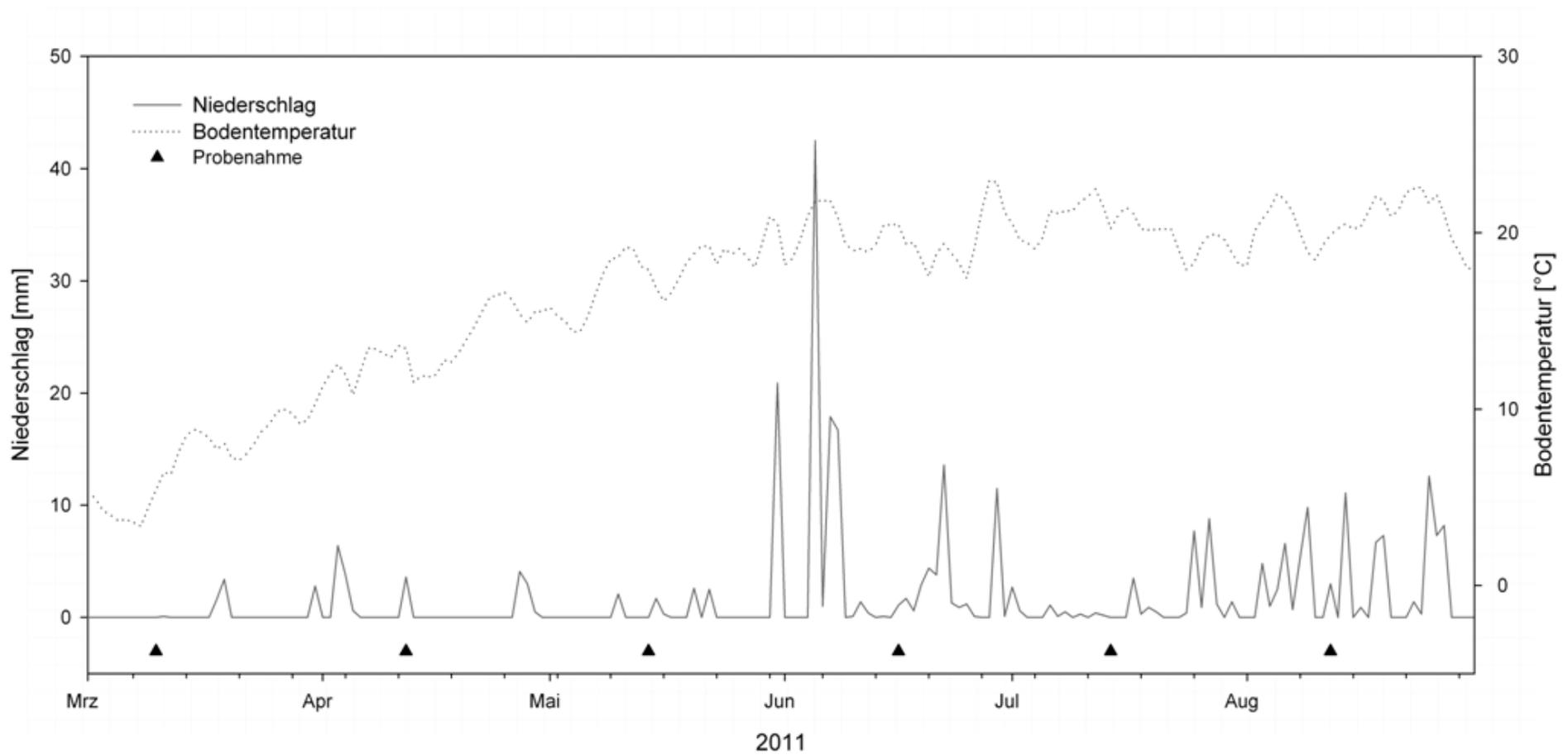


Abb. 5.2: Niederschlag und Bodentemperatur (in 20 cm Tiefe) während des Beprobungszeitraums (01. März bis 31. August 2011) am Versuchsstandort Klein-Altendorf. Die Probenahmetermine sind mit schwarzen Pfeilen gekennzeichnet. (Quelle: Wetterstation Campus Klein-Altendorf Nord, Universität Bonn)

Einfluss einer gesteigerten N-Versorgung auf die Mobilisierung von spez. geb. NH_4^+

Da zwischen dem $\text{NH}_4\text{-N}$ der Bodenlösung und dem spez. geb. NH_4^+ eine Gleichgewichtsbeziehung besteht (NOMMIK 1957), ist für die Diffusion von NH_4 -Ionen aus den Tonmineralzwischenschichten ein Diffusionsgefälle erforderlich, d.h. je niedriger die Konzentration der Bodenlösung ist, umso eher ist eine Mobilisierung von spez. geb. NH_4^+ möglich (SCHERER 1986). Umgekehrt führt eine Zufuhr von NH_4^+ enthaltender oder bildender Dünger zu einem Anstieg der NH_4^+ -Konzentration in der Bodenlösung, was einer Freisetzung von NH_4^+ -Ionen aus den Tonmineralzwischenschichten entgegenwirkt. In den vorliegenden Versuch sollte deshalb der Einfluss der gesteigerten N-Versorgung (0 kg, 80 kg und 160 kg N ha^{-1}) in Form von KAS auf die Mobilisierung von spez. geb. NH_4^+ untersucht werden, wozu im Laufe der Vegetationsperiode an vier Terminen Bodenproben aus drei Tiefen entnommen wurden. Aus den Abbildungen 4.9 und 4.10 ist zu entnehmen, dass wider Erwarten kein Einfluss der Höhe der N-Zufuhr auf die Mobilisierung des spez. geb. NH_4^+ festgestellt werden konnte. Grund hierfür könnten versuchstechnische Umstände sein, denn die Unterparzellen mit den entsprechenden Düngegraden waren mit einer Fläche von 1 m^2 nicht allzu groß und lagen zudem direkt nebeneinander, Trennstreifen waren aus versuchstechnischen Gründen nicht möglich, so dass es aufgrund von Oberflächenabfluss durch Niederschlag kurz nach der Düngerapplikation zu einer Vermischung der unterschiedlichen Düngegraden gekommen sein könnte. Auch spätere Niederschläge könnten zur horizontalen Verlagerung des Dünger-N im Boden geführt haben, was Unterschiede zwischen den Varianten verwischt haben könnte.

5.1.2 Verarmung der Rhizosphäre des Unterbodens an spez. geb. $^{15}\text{NH}_4^+$

Von verschiedenen Autoren (KOWALENKO & CAMERON 1976; SOWDEN 1976; KOWALENKO & ROSS 1980; MENGEL & SCHERER 1981; LI ET AL. 1990 a, b; BEAUCHAMP & DRURY 1991; GREEN ET AL. 1994; SOON 1998) konnte gezeigt werden, dass der Gehalt an spez. geb. NH_4^+ in Ackerböden unter Bewuchs im Laufe der Vegetationsperiode abnimmt und aufgrund von Refixierung im Herbst etwa wieder das Ausgangsniveau erreicht wird. Dabei soll die mobilisierte Menge u.a. von der Vegetationsperiode und der Dichte des Pflanzenbestandes abhängen (SAHA & MUKHOPADHYAY 1986). Da in der Literatur jedoch keine Untersuchungen über den Einfluss des Wurzelsystems auf die Mobilisierung des spez. geb. NH_4^+ vorliegen, wurde ein weiterer Versuch mit Raps (allorhizes Wurzelsystem) und Gerste (homorhizes Wurzelsystem) angelegt, wobei sich auf die Dynamik dieser N-Fraktion im Unterboden beschränkt wurde. Um zu gewährleisten, dass die wirklich freigesetzte Menge an spez. geb. NH_4^+ erfasst und nicht durch Refixierung unterbewertet wird, wurde das stabile Isotop ^{15}N eingesetzt. Dazu wurde der aus einer Bodentiefe von 45-75 cm entnommene Boden zunächst mit $^{15}\text{NH}_4^+$ belegt, wodurch der Gesamtgehalt an spez. geb. $\text{NH}_4\text{-N}$ -Gehalt um 92,2 mg kg^{-1} auf 217,2 mg kg^{-1} angestiegen war.

Am Ende der Vegetationsperiode wurde unter den beiden Versuchspflanzen im Boden der Diffusionstaschen eine Verarmung an spez. geb. $^{15}\text{NH}_4^+$ festgestellt. Der Einfluss der Pflanzenwurzeln auf die Mobilisierung des im Unterboden (60 cm) spez. geb. NH_4^+ wurde im Versuch eindeutig nachgewiesen. Unter Raps wurden 19% des spez. geb. $^{15}\text{NH}_4\text{-N}$ mobilisiert, unter Gerste hingegen 11%. Ein deutlicher Einfluss von Bewuchs auf die Mobilisierung von

spez. geb. NH_4^+ wurde bei einem „Diffusionstaschenversuch“ mit Oberboden (25 cm) von SCHERER (1986) deutlich, wobei die Mobilisierungsrate an markiertem spez. geb. $\text{NH}_4\text{-N}$ unter einer Brache bei 14% und unter Haferbewuchs bei 97% lag. Auch ADELT (1986) ermittelte eine Abnahme des spez. geb. $\text{NH}_4\text{-N}$ von 30% in einem Lößboden nach einem 4. Grasschnitt, ohne Bewuchs wurde keine Veränderung festgestellt. In den vorliegenden Untersuchungen war eindeutig der Einfluss des Wurzelsystems auf die Verarmung zu erkennen. So war die Mobilisierung an spez. geb. $^{15}\text{NH}_4\text{-N}$ unter Raps um 42% höher als unter Gerste. Das Tiefenwachstum der Wurzeln und somit der Anteil des Unterbodens an der Nährstoffversorgung der Nutzpflanzen hängt von der Wurzellängendichte, dem Gehalt an verfügbaren Nährstoffen im Oberboden und dem Wassergehalt im Unter- und Oberboden ab. Für die Mobilisierung von spez. geb. NH_4^+ aus dem Unterboden bedeutet das konkret, dass eine hohe Wurzellängendichte, ein geringer Gehalt an verfügbarem Stickstoff und eine geringe Bodenfeuchte im Oberboden sowie eine hohe Feuchte im Unterboden diese begünstigen (BUJNOVSKY 1993). So wirkt eine zu hohe N-Gabe im Frühjahr einschränkend auf das Längenwachstum der Wurzeln und hat somit eine schlechte Erschließung tieferer Bodenschichten zur Folge (KERSCHBERGER & SCHILLING 2000). Pflanzenwurzeln reagieren auf eine räumlich verminderte N-Verfügbarkeit mit lateralem Wurzelwachstum hin zu N-reicheren Arealen (MARSCHNER & MARSCHNER 2012). Speziell NH_4^+ löst laterales Wurzelwachstum aus (LIMA ET AL. 2010). Dies konnte auch im eigenen Versuch beobachtet werden, wo im Bereich der Diffusionstaschen eine deutlich erhöhte Wurzelverzweigung zu erkennen war (Abb. 4.11 und 4.12). Der Grund dafür dürfte das höhere N-Angebot in den Diffusionstaschen im Vergleich zum Unterboden sein. Zwischen den beiden Wurzelsystemen sind allerdings optisch keine Unterschiede zu erkennen. Im Feldversuch wurden bei den Varianten, mit der Fruchtfolge: 2-jährig Wegwarte gefolgt von Winterraps bzw. Wintergerste, die Wurzellängendichten bestimmt. Bei Gerste lagen die Werte mit $0,89 \text{ cm cm}^{-3}$ deutlich über denen von Raps mit $0,62 \text{ cm cm}^{-3}$ (Tab. 5.2, PERKONS 2011), was eine höhere Mobilisierung unter Gerste hätte erwarten lassen. Aber offensichtlich spielt nicht nur die Wurzellängendichte eine wichtige Rolle, sondern auch der Feinwurzelanteil (0-0,2 mm \varnothing). Dieser war bei den Rapswurzeln mit 24,3% um fast 36,0% höher als bei Gerste (15,6%) (Tab. 5.2, PERKONS 2011). Feinwurzeln nehmen mehr Nährstoffe auf als Grobwurzeln, also entsprechend auch mehr NH_4^+ . Da bei der NH_4^+ -Dünger Aufnahme der pH-Wert in der Rhizosphäre durch erhöhte H^+ -Freisetzung der Wurzeln sinkt (ORTAS & ROWELL 2004), wird die Mobilisierung des spez. geb. NH_4^+ begünstigt. Denn nach NEWMAN (1969) dringen H^+ -Ionen in die Randbereiche der Tonminerale ein und verdrängen spezifisch gebundene Kationen, wodurch also auch die Freisetzung von spez. geb. NH_4^+ gefördert wird.

Eine zu hohe Wurzellängendichte kann unter Umständen auch eine Stagnation der Nährstoffaufnahme zur Folge haben, die durch die Überlappung der Verarmungszonen der Wurzeln verursacht wird; dies führt zu Konkurrenz um Nährstoffe zwischen den Wurzeln (MARSCHNER & MARSCHNER 2012). Dieses Phänomen könnte ein Grund für die geringere NH_4^+ -Mobilisierung, trotz höherer Wurzellängendichte, von Gerste im Vergleich zu Raps sein.

Tab. 5.2: Ausgewählte Wurzelparameter aus dem Feldversuch. Vorfruchtvariante: 2-jährig Wegwarte. Bestimmt nach der Monolithmethode (55-65 cm Bodentiefe) im Juni 2011 (PERKONS 2011).

Parameter	Wintergerste	Winterraps
Wurzellängendichte [cm cm^{-3}]	0,89	0,62
mittlerer Wurzeldurchmesser [mm]	0,46	0,43
Anteil Wurzeln 0-0,2 mm [%]	15,60	24,30

Im März 2011 wurde eine N-Gabe in Form von KAS in Höhe von 63 kg N ha^{-1} zu Gerste gegeben und, aufgrund des zu erwartenden höheren N-Entzug, 83 kg N ha^{-1} zu Raps. Der im Herbst ermittelte Stickstoffentzug wies erwartungsgemäß bei Raps mit 125 kg N ha^{-1} einen etwas höheren Wert auf als bei Gerste mit 115 kg N ha^{-1} (berechnet aus Daten von KÜPPER 2011, unveröffentlicht). Dies zeigt, dass Unterschiede in der Mobilisierung des spez. geb. $\text{NH}_4\text{-N}$ nicht auf den Stickstoffentzug der beiden Pflanzenarten zurückzuführen sind.

Die unterschiedlichen Gehalte an spez. geb. NH_4^+ der einzelnen Bodenscheiben in den Diffusionstaschen lassen sich nur schwer erklären, besonders der geringe Gehalt in der Mitte. Obwohl eigentlich die höchste Verarmung im direkten Einflussbereich der Wurzeln, also bei den Scheiben 1-3, zu erwarten gewesen wäre, wurde hier der höchste Gehalt an spez. geb. $^{15}\text{NH}_4\text{-N}$ nachgewiesen. Ein möglicher Erklärungsansatz könnte jedoch sein, dass es durch relativ hohen Wurzelbesatz der äußeren Gazeoberflächen zu einem mengenmäßig großen NH_4^+ -Entzug aus der Diffusionstasche gekommen ist und der Boden in unmittelbarer Nähe zur Gaze stark verarmt wurde. Zum Ausgleich des dadurch entstandenen Konzentrationsgradienten wurde NH_4^+ in wurzelferneren Bereichen mobilisiert und durch Diffusionsstrom Richtung Wurzeln transportiert. Während der Wachstumsphase der Pflanzen wurde kontinuierlich NH_4^+ aus der gesamten Diffusionstasche mobilisiert und ging entsprechend in die Bodenlösung über. Durch den Entzug der Pflanzenwurzeln kam es zu einem Konzentrationsgefälle mit relativ niedriger Konzentration im Zentrum der Diffusionstaschen und vergleichsweise hoher in den Randbereichen. Am Ende der Vegetationsperiode wurde der Entzug geringer, bis er vollständig zum Erliegen kam. Zu diesem Zeitpunkt in Lösung befindliches $^{15}\text{NH}_4^+/\text{NH}_4^+$ wurde an Ort und Stelle wieder spezifisch gebunden. Da NH_4^+ im Boden aber kaum beweglich ist, wenn keine Senke vorhanden ist, fand kein Transport zurück in die Mitte der Diffusionstaschen statt. Dementsprechend findet man in den Außenbereichen der Diffusionstaschen mehr spez. geb. $^{15}\text{NH}_4^+$ als in der Mitte.

Der Gesamt-Gehalt an spez. geb. $\text{NH}_4\text{-N}$, der nach der Belegung auf $217,2 \text{ mg kg}^{-1}$ Boden angestiegen war, nahm während des Versuchszeitraums unter beiden Pflanzenarten messbar ab. Das Verarmungsprofil war gleich dem des spez. geb. $^{15}\text{NH}_4\text{-N}$. Jedoch konnten die Unterschiede zwischen dem Gehalt nach Belegung und dem nach dem Versuch beim Gesamt- NH_4^+ im Gegensatz zum spez. geb. $^{15}\text{NH}_4^+$ statistisch nicht abgesichert werden. Grund dafür könnte einerseits der relativ hohe Gehalt an spez. geb. NH_4^+ vor der Belegung sein und andererseits die Tatsache, dass Raps und Gerste bereits am 11. bzw. 12.07.2011 geerntet wurden und die Entnahme der Diffusionstaschen erst am 03.08.2011 erfolgte und man daher davon ausgehen kann, dass bereits wieder in der Bodenlösung befindliches bzw. an den Austauschern gebundenes NH_4^+ in den Zwischenschichten der Tonminerale gebunden wurde.

Das könnte bedeuten, dass die tatsächliche Mobilisierung an spez. geb. NH_4^+ (gesamt) während der Vegetationszeit deutlich höher gewesen ist. Diese Annahme wird auch durch die Ergebnisse der regelmäßigen Probenahmen im Zentralen Feldversuch während der Versuchsjahre 2010 und 2011 bestätigt. Dort wurden in der entsprechenden Tiefe nach der Reife bzw. der Ernte von Raps bis zu $35 \text{ mg NH}_4\text{-N kg}^{-1}$ Boden spezifisch gebunden und nach Gerste bis zu $58 \text{ mg NH}_4\text{-N kg}^{-1}$ Boden.

Zusammenfassend ist zu sagen, dass zwar die Wurzelarchitektur einen Einfluss auf die Mobilisierung des spez. geb. NH_4^+ hat. Dies bezieht sich auf die Wurzelverzweigung und damit verbunden auf die Genese von Feinwurzeln. Was offensichtlich weniger eine Rolle spielt ist die Allorhizie bzw. die Homorhizie. Bei Betrachtung der kompletten Wurzelsysteme von Raps und Gerste (Abb. 1.3, Abschnitt 1.3) wird nämlich deutlich, dass im Unterboden in der Tiefe von 60 cm, also dort wo die Diffusionstaschen abgelegt waren, die Wurzelsysteme sehr ähnlich sind. Die Hauptwurzel des allorhizen Rapses reicht so gerade bis in eine Tiefe von 30 cm, Seitenwurzeln hingegen dringen in tiefere Bodenschichten vor.

4.1.3 Gehalt an spez. geb. NH_4^+ in den Bioporen verschiedener Bodentiefen nach Ausbringung von ^{15}N -markiertem Pflanzenmaterial auf die Bodenoberfläche

In zahlreichen Versuchen konnte nachgewiesen werden, dass Regenwürmer anfallende Pflanzenstreu in den Boden einarbeiten und damit das Recycling von Nährstoffen wesentlich verbessern (TEBRÜGGE 1987; WERNER 1990; WERNER & DINDAL 1990). Sie ernähren sich von mikrobiell vorzersetzten Pflanzenresten an der Bodenoberfläche, die von ihnen eingesammelt und in die Röhren gezogen werden. Somit wird ein Rücktransport nährstoffreichen Materials in den Unterboden bewirkt (RAW 1962). Aber nicht nur die aktive Verlagerung von organischer Substanz durch Regenwürmer spielt eine Rolle, sondern auch Makroporen, welche von Regenwürmern geschaffen wurden, stellen einen möglichen Fließweg für Wasser und organische Substanz in tiefere Bodenschichten dar (WATT 2006; SANDER & GERKE 2009). Laut GRAFF (1967) können bis zu $65 \text{ kg N ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$, der zunächst organisch gebunden ist, in den Unterboden transportiert werden. Ein Teil des in organischer Bindung vorliegenden N wird zu NH_4^+ mineralisiert. Ob und in welchem Ausmaße diese NH_4 -Ionen auch spezifisch gebunden werden, war seither nicht Gegenstand von Untersuchungen. Aus diesem Grund wurde ^{15}N markierte Luzerne am 13.05.2011 auf einem Luzerneschlag ausgebracht und nach 23 Wochen eine Beprobung der Regenwurmgänge sowie des Bulk-Bodens im Ober- und Unterboden vorgenommen.

In den vorliegenden Untersuchungen konnte im Beprobungsjahr 2011 in den Bioporen sowohl des Ober- als auch des Unterbodens ^{15}N in der Fraktion „Gesamtstickstoff“ nachgewiesen werden, was Ergebnisse von VINTHER ET AL. (1999) bestätigt. Dieser ^{15}N stammte aus der als Mulch ausgebrachten markierten Luzerne. Somit kann bestätigt werden, dass Regenwürmer organische Substanz aufnehmen und sie in ihren Gängen verdaut wieder ausscheiden, wodurch an den Wandungen eine Auskleidung aus verschiedenen organischen Nährstoffverbindungen entsteht. Dieser abgesonderte Mucus der Regenwürmer weist ein sehr enges C/N-Verhältnis auf (SCHEU 1991) und kann somit schnell mineralisiert werden. Gebildete NH_4 -Ionen stehen dann potentiell für eine spezifische Bindung zur Verfügung. In der

Tat konnte auch ^{15}N -markiertes spez. geb. NH_4^+ in den Bioporen im Ober- und Unterboden nachgewiesen werden. Im Gegensatz zum Unterboden konnte auch im Bulk-Boden der obersten 45 cm eine vergleichsweise geringe ^{15}N -Anreicherung nachgewiesen werden. Grund für das Vorliegen von ^{15}N dürfte die räumliche Nähe zwischen der ausgebrachten Luzerne und dem Oberboden sein.

Der Gesamtgehalt an spez. geb. NH_4^+ war sowohl in allen Tiefenstufen als auch in den Bioporen und im Bulk-Boden nahezu gleich, was zunächst vermuten lässt, dass der Einfluss der Regenwürmer bzw. der Bioporen auf die spezifische Bindung von NH_4^+ äußerst marginal war. Dem widersprechen jedoch die Gehalte des spez. geb. $^{15}\text{NH}_4^+$, die zwar gering waren, jedoch höchst signifikante Unterschiede zwischen Bioporen und Bulk-Boden aufwiesen. Ebenso gab es Unterschiede zwischen Ober- und Unterboden. Gründe dafür, dass Unterschiede im Gesamtgehalt an spez. geb. NH_4^+ nur marginal waren, kann es verschiedene geben: Nach dem vorausgegangenen zweijährigen Luzerneanbau war die Ammoniumfixierungskapazität der Tonmineralzwischenstufen bereits vollständig ausgeschöpft, so dass im dritten Anbaujahr (Ausbringung der ^{15}N -Luzerne) nur noch kleine Mengen an NH_4^+ spezifisch gebunden werden konnten. Die Ammoniumfixierungskapazität wird nicht nur vom Tongehalt und der Tonmineralzusammensetzung des Bodens beeinflusst, sondern ist auch maßgeblich abhängig vom pflanzenverfügbaren K^+ , welches ebenso wie das NH_4^+ über die organische Substanz in den Unterboden verlagert wird. In den Boden verlagertes K^+ konkurriert mit dem NH_4^+ um Bindungsstellen. Dass genügend Stickstoff für die spezifische Bindung zur Verfügung stand, lässt sich nur vermuten, ist aber aufgrund des Gesamt-N-Gehalt wahrscheinlich; hier waren die Unterschiede zwischen Ober- und Unterboden bzw. Bioporen und Bulk-Boden sehr deutlich.

Geplant war auch eine Beprobung der Drilosphäre, also dem direkt an die Bioporen angrenzenden Bodenbereich, wo der Gehalt an spez. geb. NH_4^+ vermutlich deutlich höher gewesen wäre. Da es jedoch zum Probenahmezeitpunkt sehr trocken war, funktionierte die eingesetzte Probenahmetechnik nicht. Frühere Untersuchungen haben gezeigt, dass die Drilosphäre sich generell durch hohe Nährstoffgehalte (NO_3^- , NH_4^+ , PO_4^{3-} , K^+ , Mg^{2+} und Ca^{2+}) auszeichnet (GRAFF 1967; DEVLIEGHER & VERSTRAETE 1997; PARKIN & BERRY 1999; PANKHURST ET AL. 2002). Auch BEARE ET AL. (1995) stellten fest, dass im Unterboden, wo die Nährstoffgehalte in der festen und flüssigen Phase und die Sauerstoffkonzentrationen in der Gasphase im Vergleich zum gepflügten Oberboden generell niedriger sind, die Drilosphäre stellt eine Region mit erhöhtem Nährstoffvorkommen dar.

Das von den Regenwürmern geschaffene kontinuierliche Röhrensystem ermöglicht den Pflanzenwurzeln Zugang zu Wasser- und Nährstoffvorräten im Unterboden. Dabei ist vor allem die Porenkontinuität für das Wurzelwachstum von Bedeutung, das die Wasser- und Nährstoffversorgung der Pflanzen beeinflusst (WERNER & DINDAL 1990). In Wurmgingen wachsende Wurzeln profitieren von den nährstoffreichen Röhrenauskleidungen (GRAFF 1971), die hauptsächlich durch Sekretionen der Regenwürmer gebildet werden.

In den vorliegenden Untersuchungen konnte nach der Ernte der Hauptfrüchte Sommerweizen und Futtermalve im Jahr 2012 ein Rückgang des Gehaltes an spez. geb. $^{15}\text{NH}_4^+$ in den Bioporen des Unterbodenbereiches 45-75 cm nachgewiesen werden. Obwohl der Unterschied zwischen

Versuchsbeginn und -ende nicht signifikant war, weisen die Ergebnisse trotzdem darauf hin, dass spez. geb. NH_4^+ aus den Bioporen bzw. der Drilosphäre mobilisiert und von den Pflanzen aufgenommen wurde. Dies konnte durch die Untersuchung des oberirdischen Aufwuchses bestätigt werden, da im Sommerweizen und in der Futtermalve ^{15}N nachgewiesen werden konnte. Dieser ^{15}N muss aus dem Unterboden stammen, denn der Oberboden wurde vor der Aussaat durch nicht markierten Boden ausgetauscht. Weiterhin muss der ^{15}N aus den Bioporen bzw. der Drilosphäre stammen, denn im Bulk-Boden des Unterbodens wurde keine ^{15}N -Anreicherung ermittelt.

Von besonderem Interesse ist der Vergleich der beiden Pflanzenarten Futtermalve (allorhizes Wurzelsystem) und Sommerweizen (homorhizes Wurzelsystem). Erstere mobilisierte tendenziell mehr spez. geb. $^{15}\text{NH}_4^+$ als Sommerweizen. Dieser Unterschied zwischen den beiden Wurzelsystemen konnte auch schon bei dem in dieser Arbeit unter Abschnitt 3.2.2 beschriebenen Diffusionstaschenversuch festgestellt werden. Dort wurde unter dem allorhiz wachsenden Raps mehr spez. geb. NH_4^+ mobilisiert als unter der homorhiz wachsenden Gerste. Bei endoskopischen Untersuchungen von Bioporen unter Weizen und unter Futtermalve wurden charakteristische Unterschiede hinsichtlich der Orientierung und des Wurzel-Boden-Kontaktes in den Bioporen festgestellt. Die Wurzeln des homorhiz wachsenden Weizens wuchsen zu einem großen Teil von der Seite in die Poren ein und standen in direktem Kontakt mit der Porenwand. Demgegenüber wuchsen die Pfahlwurzeln der Futtermalve vornehmlich vertikal ohne direkten Kontakt zur Porenwand, nahmen aber durch eine hohe Anzahl Seitenwurzeln Kontakt zur Porenwand auf, die dann horizontal in den angrenzenden Bulk-Boden einwuchsen. Beide Arten nutzen somit die im Vergleich zum umgebenden Bulk-Boden nährstoffreiche Porenwandung (ATHMANN ET AL. 2013). Der Großteil der Wurzeln, welche im Unterboden zu finden sind, wächst in oder in der Nähe von Bioporen (KÖPKE 1981; SVEISTRUP ET AL. 1997; PIERRET ET AL. 1999).

Der Gesamtgehalt an spez. geb. NH_4^+ lag im zweiten Probenahmejahr nach der Ernte von Weizen und Futtermalve in beiden Unterbodentiefenstufen über dem Gehalt nach Luzerne im Jahr 2011. Das bedeutet, dass die Tonmineralzwischenschichten wieder aufgefüllt worden waren, was die bereits unter Abschnitt 4.1.1 beschriebenen Ergebnissen bestätigt. Zu gleichem Ergebnis kam auch SCHERER (1986) bei mehrmaligen Probenahmen während der Vegetationsphase, wobei vom Frühjahr bis Sommer eine Abnahme des spez. geb. NH_4^+ festgestellt wurde, gefolgt von einer Wiederauffüllung desgleichen im Herbst. Die nach dem Hauptfruchtjahr im Vergleich nach dem dreijährigen Luzerneanbau höheren Gehalte an spez. geb. NH_4^+ könnten mit dem K-Gehalt im Unterboden zusammenhängen. Es ist denkbar, dass durch die stärkere Absenkung der K-Konzentration der Bodenlösung durch den höheren K-Entzug von Weizen und Futtermalve die Diffusion von K^+ -Ionen aus den Tonmineralzwischenschichten gefördert wurde und somit den NH_4^+ -Ionen mehr Bindungspositionen zur Verfügung standen.

5.2 Gefäßversuche

5.2.1 Einfluss von Calcium und Kalium auf die Mobilisierung von spez. geb. NH_4^+

In der Literatur liegen unterschiedliche Ergebnisse über den Einfluss von K^+ auf die spezifische Bindung von NH_4^+ vor. K^+ und NH_4^+ konkurrieren um die gleichen Bindungsstellen in den Tonmineralzwischenschichten (NOMMIK 1957; SCHERER 1986), was einen Einfluss auf die Bindung bzw. Mobilisierung dieser Kationen hat. Nach HINMAN (1966) und DORAM & EVANS (1983) spielt die K-Konzentration in der Bodenlösung, der K-Sättigungsgrad der Austauschere und die K-Sättigung der Zwischenschichten der 2:1-Tonminerale eine Rolle bei der spezifischen Bindung von NH_4^+ (NIEDER ET AL. 2010). In einigen Studien konnte gezeigt werden, dass eine K-Gabe vor der NH_4 -Düngung die spezifische Bindung von NH_4^+ behindern kann (STANFORD & PIERRE 1947; NOMMIK & VAHTRAS 1982). TANG ET AL. (2008) stellten fest, dass eine Adsorption von K^+ an den Endpositionen der Tonminerale eine Kontraktion der gleichen zur Folge hat und somit die NH_4 -Ionen daran hindert, aus den Tonmineralzwischenschichten zu diffundieren. Einige Autoren (DRURY ET AL. 1989; CHEN ET AL. 1989) konnten keinen negativen Einfluss des K^+ auf die spezifische Bindung des NH_4^+ feststellen. Im vorliegenden Versuch sollte nun überprüft werden, ob die Verfügbarkeit des spez. geb. NH_4^+ von K^+ beeinflusst wird. Zudem sollte auch der Effekt von Ca^{2+} , dem eine expandierende Wirkung auf Tonminerale zugeschrieben wird, auf die Mobilisierung des spez. geb. NH_4^+ untersucht werden. Nach NOMMIK (1957) kann Ca^{2+} (und auch Na^+ und Mg^{2+}) die spezifische Bindung von NH_4^+ behindern.

Im vorliegenden Versuch wurde dazu Boden, dessen Tonminerale mit $^{15}\text{NH}_4^+$ belegt worden waren, mit K^+ , Ca^{2+} oder beiden gleichzeitig gedüngt. Luzerne sollte dem Boden nun spez. geb. NH_4^+ entziehen.

Nach der 49 Tage dauernden Versuchsphase konnte bei allen Varianten eine signifikante Abnahme des Gehaltes an spez. geb. $^{15}\text{NH}_4^+$ festgestellt werden, was ein weiterer Hinweis dafür ist, dass spez. geb. NH_4^+ einen Anteil an der Stickstoffernährung von landwirtschaftlichen Nutzpflanzen hat. Aber auch zwischen den Varianten gab es jedoch deutliche Unterschiede.

Die Abnahme des Gehaltes an spez. geb. $^{15}\text{NH}_4^+$ bei der Kontrollvariante ohne Pflanzen ist dadurch zu erklären, dass der zunächst trockene Boden zu Beginn des Versuches auf 60% der maximalen Wasserkapazität eingestellt wurde und sich dadurch zunächst ein Gleichgewicht zwischen dem $^{15}\text{NH}_4^+$ in den Tonmineralzwischenschichten, dem an den Austauschern und dem in der Bodenlösung eingestellt haben wird. Wasser trägt zur Aufweitung der Tonminerale bei, was zur Folge hat, dass $^{15}\text{NH}_4^+$ leichter aus den Zwischenschichten hinaus diffundieren kann (ALLISON ET AL. 1953b). OSBORNE (1976b) stellte im Vergleich zum trockenen Boden eine 25%ige Reduzierung des Gehaltes an spez. geb. NH_4^+ bei einem Tonboden fest, der auf eine Wasserkapazität von 60% gebracht wurde. Auch GOUVEIA & EUDOXIE (2007) kommen zu ähnlichen Ergebnissen. Zudem wurde das Gleichgewicht durch die wöchentliche Entnahme von Bodenlösung regelmäßig gestört und ein gewisser Anteil an $^{15}\text{NH}_4^+$ dem System entzogen. Dies ist auch an der relativ hohen $^{15}\text{NH}_4^+$ -Konzentration in der Bodenlösung bei den ersten

drei Probenahmeterminen (Abb. 4.25) zu erkennen, später im Versuchsverlauf sinkt diese deutlich ab.

Der Gehalt an spez. geb. $^{15}\text{NH}_4^+$ war bei der Kontrollvariante ohne Pflanzen bis zum Abstand von 7 mm zur Wurzeloberfläche konstant. In den entfernteren Bereichen war er hingegen geringer, was mit dem Konzentrationsausgleich mit dem nicht markierten Bodenbereich ab dem 29. Millimeter zu erklären ist. Hier war der Boden weder markiert, noch waren die Tonminerale mit NH_4^+ aufgefüllt. Dieser Umstand nimmt den Ergebnissen aber nicht ihre Aussagekraft, da der direkte Einflussbereich der Wurzeln maximal in den ersten 3 mm liegt.

Der Gehalt an spez. geb. $^{15}\text{NH}_4^+$ der K-Variante war bei den Abständen 0-1 mm bis 7-10 mm im Vergleich zur Kontrolle mit Pflanzen und zur Ca-Variante signifikant höher. Das bedeutet, dass K^+ die Mobilisierung von NH_4^+ aus den Tonmineralzwischenschichten behinderte. Vollständig unterdrückt wurde die Diffusion jedoch nicht, wie der Vergleich des Abstandes 0-1 mm mit den darauffolgenden Abständen zeigt, denn der Gehalt an spez. geb. $^{15}\text{NH}_4^+$ war bei 0-1 mm signifikant geringer als bei 1-3 mm. Der Einfluss der Wurzeln ist maximal bis zu einem Abstand von 3 mm zur Wurzeloberfläche statistisch gesichert nachzuweisen. Der Unterschied zwischen der Ca-Variante und der Kontrolle mit Pflanzen war bis zum Abstand von 5-7 mm nicht signifikant, tendenziell hatte der mit Ca^{2+} gedüngte Boden aber einen geringeren Gehalt an spez. geb. $^{15}\text{NH}_4\text{-N}$, so dass eine expandierende Wirkung von Ca^{2+} nicht eindeutig nachgewiesen werden konnte.

Die Variante, welche gleichzeitig mit K^+ und Ca^{2+} gedüngt wurde, wies im Vergleich zu den anderen bepflanzt Varianten den höchsten Gehalt an spez. geb. $^{15}\text{NH}_4^+$ zum Ende des Versuchszeitraums auf. Ein Grund dafür könnte ein neues Gleichgewicht nach Zufuhr von K^+ und Ca^{2+} zwischen Bodenlösung, Tonmineralzwischenschichten und den Austauschern sein, welches sich bei der Einstellung der Wasserkapazität zu Beginn des Versuches einstellte. Die Zugabe beider Kationen führte zu einer vergleichsweise hohen Ionenkonzentration in der Bodenlösung (vgl. Abb. 4.23, 4.28 und 4.29). Zum Konzentrationsausgleich könnte mehr $^{15}\text{NH}_4^+$ in die Tonmineralzwischenschichten diffundiert sein, was durch die expandierende Wirkung des Ca^{2+} noch begünstigt wurde. Die spezifische Bindung der K-Ionen findet vermutlich zunächst an den Rändern der Tonminerale statt, wodurch diese dann wieder kontrahiert werden und das $^{15}\text{NH}_4^+$ faktisch eingeschlossen wird. Die frühere bzw. schnellere spezifische Bindung des $^{15}\text{NH}_4^+$ im Inneren der Tonminerale im Gegensatz zum K^+ ist in der Diffusionsgeschwindigkeit der Kationen begründet. Aufgrund der höheren Masse des K^+ (39,1 u) im Vergleich zum $^{15}\text{NH}_4^+$ (29 u) diffundiert das $^{15}\text{NH}_4^+$ schneller in die Zwischenschichten der 2:1 Tonminerale. Zudem hat $^{15}\text{NH}_4^+$ einen etwas größeren Ionenradius als K^+ und somit eine geringere Hydratationsenergie. Denn bei gleichwertigen Kationen nimmt die Affinität zu Oberflächen mit steigendem Kationenradius zu, was durch die höhere Hydratationsenergie von kleineren Kationen zu erklären ist. Diese haben dann entsprechend eine dickere Hydrathülle als größere Kationen. Dieser Hydratationseffekt ist bei einwertigen Kationen besonders stark ausgeprägt (VOLLMAR & SCHERER 1980; SCHEFFER ET AL. 2010).

Der NO_3^- -Gehalt der Bodenlösung nahm während des Versuchsverlaufs stark ab und ging besonders zum Schluss gegen Null, was sehr wahrscheinlich mit dem hohen Entzug der Pflanzen zusammenhängt. Bemerkenswert war, dass offensichtlich nur wenig NO_3^- durch

Nitrifikation nachgeliefert wurde, obwohl der pH-Wert neutral bis leicht alkalisch war, was diesen Prozess begünstigt. Ein Grund dafür könnte sein, dass die nitrifizierenden Mikroorganismen während des Belegungsprozesses mit $^{15}\text{NH}_4\text{Cl}$ und der anschließenden Trocknung des Bodens bei $30\text{ }^\circ\text{C}$ gehemmt wurden.

Die K^+ - und Ca^{2+} -Konzentration in der Bodenlösung ist entsprechend in den Varianten mit K^+ - und/oder Ca^{2+} -Zufuhr hoch. Während bei beiden Kationen eine Abnahme während des Versuchsverlaufs in den Bulk-Boden-Kompartimenten festzustellen war, wurde in den Wurzelkompartimenten bei der Ca^{2+} -Konzentration das Gegenteil beobachtet. Hier kam es zu einem starken Anstieg, womit auch die erhöhte Osmolalität in den Wurzelkompartimenten zum Versuchsende hin erklärt werden kann. Die stark erhöhten Ca^{2+} -Gehalte kamen sehr wahrscheinlich dadurch zustande, dass durch das Wachstum der Pflanzen die Transpiration und somit der Wasserverbrauch massiv gestiegen war. Das Wasser musste größtenteils durch die Bulk-Boden-Kompartimente hin zu den Wurzeln transportiert werden, wodurch große Mengen an gelösten Nährstoffen zu den Wurzeln gelangten. Werden diese Nährstoffe nun in geringerem Maße aufgenommen als Wasser, reichern sie sich in den Wurzelkompartimenten an (KERSCHBERGER & SCHILLING 2000). Die Konzentrationsveränderungen von Mg^{2+} sind ebenso zu erklären.

Der Gesamt-N-Gehalt des Bodens wies keine signifikanten Unterschiede auf, an denen sich ein Einfluss von K^+ oder Ca^{2+} auf die Mobilisierung von spez. geb. NH_4^+ hätte festmachen lassen. Dies hängt womöglich mit dem relativen hohen N-Versorgungsstatus des Bodens zusammen, wodurch kleine Veränderungen zum Tragen kamen. Beim Gesamt- ^{15}N -Gehalt konnte im Vergleich zum Ursprungsboden eine Abnahme bei allen Varianten festgestellt werden. Bei den Varianten, die eine K-Gabe erhalten hatten, war diese Abnahme geringer als bei der Variante, die nur mit Ca^{2+} gedüngt wurde und der Kontrolle mit Pflanzen. Diese Unterschiede zwischen den Varianten waren deutlicher als beim Gesamt-N-Gehalt, stellten jedoch wegen mangelnder statistischer Sicherheit nur Tendenzen dar.

Bei der Betrachtung des spez. geb. NH_4^+ (gesamt) waren tendenziell die gleichen Unterschiede zu erkennen wie beim spez. geb. $^{15}\text{NH}_4^+$, jedoch waren diese nicht signifikant. Dies hängt damit zusammen, dass die Unterschiede im Verhältnis zum Gesamtgehalt an spez. geb. NH_4^+ relativ gering waren und daher auch nur Tendenzen abbilden können. Dies war ein Grund für den Einsatz von ^{15}N -markiertem NH_4Cl .

Anhand der ^{15}N -Entzüge der Luzernepflanzen lassen sich die Unterschiede zwischen den Varianten, die bereits bei Analyse des spez. geb. $^{15}\text{NH}_4^+$ im Boden festgestellt wurden, ebenfalls deutlich erkennen. So findet man einen fast doppelt so hohen ^{15}N -Entzug bei der Kontrolle und bei der Ca-Variante als bei den Varianten mit K- bzw. gleichzeitiger K- und Ca-Zufuhr. Diese Unterschiede sind signifikant und sowohl im Spross als auch in den Wurzeln zu finden. Die Ergebnisse zeigen eindeutig, dass K^+ die Mobilisierung von spez. geb. NH_4^+ aus den Tonmineralzwischenschichten unterdrückt. Bei Ca^{2+} konnte kein Einfluss auf die Mobilisierung von spez. geb. NH_4^+ nachgewiesen werden.

5.2.2 Spezifische Bindung von NH_4 -Ionen nach Ammonium- bzw. Nitratdüngung

Zunächst kann bestätigt werden, dass NH_4^+ , welches einem Bodensystem zugeführt wird, zu einem gewissen Anteil in den Zwischenschichten von 2:1-Tonmineralen spezifisch gebunden wird. Des Weiteren konnte nachgewiesen werden, dass NO_3^- bis zum NH_4^+ reduziert werden kann und anschließend spezifisch gebunden wird. Dies bestätigt die 6. Hypothese, dass NO_3^- zu NH_4^+ reduziert wird und dieses gebildete NH_4^+ in den Tonmineralzwischenschichten spezifisch gebunden wird. Diese Ergebnisse unterstützen die Aussagen von COLE & BROWN (1980) und GREENAN ET AL. (2006), nach denen NO_3^- bis zum NH_4^+ reduziert werden kann. Diese Autoren gingen aber nicht dem weiteren Verbleib des gebildeten Ammoniums nach. Somit wurden in den vorliegenden Untersuchungen mittels Einsatz eines ^{15}N -markierten NO_3^- -Düngers nicht nur die Ergebnisse der genannten Autoren bestätigt, sondern auch zum ersten Mal nachgewiesen, dass dieses gebildete NH_4^+ auch in Zwischenschichten von 2:1-Tonmineralen wieder gefunden werden kann. Der so gebundene N ist dann zunächst vor der Oxidation geschützt (GUO ET AL. 1983), wodurch N-Verluste z.B. in Form von NO_3^- reduziert werden. Das spez. geb. NH_4^+ kann aber unter bestimmten Voraussetzungen wieder mobilisiert und ertragswirksam werden, worauf bereits in Abschnitt 5.1.4 eingegangen wurde.

Im Oberboden konnten bis zu 11% des zugesetzten $^{15}\text{NH}_4\text{Cl}$ als spez. geb. $\text{NH}_4\text{-N}$ wiedergefunden werden. Diese relativ geringe Fixierung dürfte auf den relativ niedrigen Tongehalt des Oberbodens von 15,5% und dem hohen Gehalt an pflanzenverfügbarem K von $319,6 \text{ mg kg}^{-1}$ und der dadurch bedingten niedrigen spezifischen $\text{NH}_4\text{-N}$ -Bindungskapazität mit $22,5 \text{ mg kg}^{-1}$ Boden zurückzuführen sein. Bei 40% WK und Zugabe von $245,2 \text{ mg }^{15}\text{N}$ in Form von $^{15}\text{NH}_4\text{Cl}$ wurde mit der spezifischen Bindung von $22,1 \text{ mg }^{15}\text{NH}_4\text{-N kg}^{-1}$ Boden die spezifische $\text{NH}_4\text{-N}$ -Bindungskapazität des Oberbodens bereits ausgeschöpft. Bei 75% WK war die spezifisch gebundene Menge an ^{15}N tendenziell noch niedriger. Wird die Beobachtung von SCHERER & MENGEL (1981), dass die Mobilisierung von spez. geb. NH_4^+ mit zunehmender Bodenfeuchte begünstigt wird, auch auf die Diffusion von NH_4 -Ionen in die Tonmineralzwischenschichten übertragen, wäre bei den vorliegenden Untersuchungen unter den feuchteren Bedingungen eine zumindest gleiche NH_4 -Fixierung wie bei 40% WK zu erwarten gewesen. Unter eher trockeneren Bedingungen soll nämlich der Diffusionsweg der NH_4 -Ionen unterbrochen werden.

Die Menge von $11,8 \text{ mg }^{15}\text{N kg}^{-1}$ Boden, die nach der Applikation von K^{15}NO_3 bei 40% WK spezifisch gebunden wurde, ist etwa halb so hoch wie nach Applikation von $^{15}\text{NH}_4\text{Cl}$ und macht rund 6% des zugeführten ^{15}N aus. Aber auch hier wurde bei der höheren WK-Stufe eine tendenziell geringere Fixierung festgestellt, was der Hypothese widerspricht, dass in feuchterem und dadurch sauerstoffärmeren Milieu mehr NO_3^- reduziert und dadurch potentiell mehr NH_4^+ gebildet wird. Der Grund für die geringere Fixierung im Vergleich zur Applikation von $^{15}\text{NH}_4\text{Cl}$ könnte sein, dass die Säulen vor der Applikation von K^{15}NO_3 zwei Wochen bei der entsprechenden Wasserkapazität vorinkubiert wurden. Hierbei könnte bei der hohen WK bereits im Boden vorliegendes nicht markiertes NO_3^- zu NH_4^+ reduziert und in den Tonmineralzwischenschichten gebunden worden sein. Aufgrund der geringen Fixierungskapazität des Bodens konnte dann nicht mehr $^{15}\text{NH}_4\text{-N}$ spezifisch gebunden werden.

Im Nachhinein war die Entscheidung $K^{15}NO_3$ als Nitratverbindung zu verwenden nicht ideal, denn wie die Ergebnisse des Versuches zum Einfluss von Ca^{2+} und K^+ auf die Verfügbarkeit von spez. geb. NH_4 -N zeigen, konkurrieren K-Ionen mit NH_4 -Ionen um spezifische Bindungspositionen von 2:1-Tonmineralen und beeinträchtigen somit die NH_4^+ -Bindung (SCHERER 1985). Dieser Umstand könnte dazu beigetragen haben, dass nach der Reduktion von $^{15}NO_3^-$ gebildetes $^{15}NH_4^+$ nicht in vollem Umfang spezifisch gebunden werden konnte.

Im Unterboden konnten bis zu 14% und somit nur 3 Prozentpunkte mehr als im Oberboden des zugeführten $^{15}NH_4^+$ als spez. geb. $^{15}NH_4^+$ bei der 75% WK wiedergefunden werden. Dieser Befund überrascht umso mehr, als der Unterboden mit einer NH_4 -Fixierungskapazität von $117,5 \text{ mg kg}^{-1}$ Boden, was auf den höheren Tongehalt von 27% und zudem einen nur halb so hohen Gehalt an pflanzenverfügbarem K mit $115,7 \text{ mg kg}^{-1}$ zurückzuführen ist, potentiell die besseren Voraussetzungen aufwies, mehr NH_4^+ spezifisch zu binden. Bei 40% WK wurde nur ein Bruchteil des bei der höheren WK gefundenen spez. geb. $^{15}NH_4^+$ festgestellt, was die bereits o.g. Beobachtungen zum Einfluss des Wassergehaltes des Bodens von SCHERER & MENGEL (1981) bestätigt. Vom zugeführten $^{15}NO_3^-$ wurden nur 4% (bei 40% WK) in den Tonmineralzwischenschichten als spez. geb. NH_4^+ wiedergefunden, bei der 75% WK war es marginal weniger. Für den Unterboden trifft zu, dass unter anaeroben Bedingungen, also bei hohem Wassergehalt, weniger NH_4^+ zu NO_3^- oxidiert wird und dementsprechend mehr spezifisch gebunden werden kann. Bei der niedrigeren Wasserkapazitätsstufe kam es sehr wahrscheinlich durch ausreichend Sauerstoff zu verstärkter Nitrifikation des zugesetzten $^{15}NH_4^+$, was den geringeren Gehalt an spez. geb. NH_4^+ bei 40% WK im Vergleich zu 75% WK erklären würde. Bei Zufuhr von $K^{15}NO_3$ war der Unterschied der Gehalte an spez. geb. $^{15}NH_4^+$ zwischen den beiden Wasserkapazitäten marginal. Der Grund dafür, dass im anaeroben Milieu nicht mehr NO_3^- zu NH_4^+ reduziert wurde, könnte sein, dass unter anderem der im Boden vorliegende organisch gebundene Kohlenstoff mit $4,5 \text{ g kg}^{-1}$ der limitierende Faktor für die anaerob lebenden Mikroben war, welche das NO_3^- zu NH_4^+ reduzieren. Prozesse wie die mikrobielle Denitrifikation und auch die dissimilatorische Nitratreduktion, sind im Unterboden generell durch die Verfügbarkeit von organisch gebundenem Kohlenstoff limitiert (McCARTY & BREMNER 1992; CAMBARDELLA ET AL. 1999; RICHARDS & WEBSTER 1999).

Des Weiteren sollte im vorliegenden Versuch überprüft werden, ob aus dem Ober- in den Unterboden ausgewaschenes NO_3^- bis zum NH_4^+ reduziert und dann spezifisch gebunden werden kann. Dies wäre sowohl aus ökologischer als auch ökonomischer Sicht positiv zu bewerten, da somit sowohl eine Nitratbelastung des Grund- und Trinkwassers als auch N-Verluste für den Landwirt zumindest reduziert werden könnten. Die Auswaschung von NH_4^+ ist eher unwahrscheinlich, da NH_4 -Ionen bereits nach austauschbarer Bindung an Tonminerale vor der Auswaschung geschützt sind. So konnte im vorliegenden Versuch jeweils in der 2. Beprobungstiefe (20 bzw. 70 cm) bei der Variante mit Applikation von $^{15}NH_4Cl$ kein spez. geb. $^{15}NH_4$ -N gefunden werden. Bei Applikation von $K^{15}NO_3$ konnten hingegen in 20 cm Bodentiefe und der hohen Wassergehaltsstufe signifikante Unterschiede im Gehalt an spez. geb. $^{15}NH_4^+$ im Vergleich zu 40% WK gefunden werden. Bei 70 cm Tiefe konnte dies tendenziell auch beobachtet werden. Bei 20 cm Beprobungstiefe konnten rund 1,0% und bei 70 cm rund 1,2% des zugeführten $K^{15}NO_3$ in Form von spez. geb. NH_4^+ wieder gefunden werden. In den Tiefen

30 und 40 cm konnte kein spez. geb. $^{15}\text{NH}_4^+$ mehr gemessen werden. Grund für die geringe Verlagerung von $^{15}\text{NO}_3^-$ im Versuch könnte der nicht vorhandene Niederschlag und das somit ausgebliebene Sickerwasser sein, denn der Versuchsboden wurde zu Beginn des Versuches auf die entsprechende Wasserkapazität eingestellt und aufgrund ausbleibenden Wasserverbrauchs war ein Nachgießen nicht erforderlich. Die Niederschlags- bzw. Sickerwassermenge ist der größte Einflussfaktor der auf die Nitratverlagerung einwirkt (SCHEFFER ET AL. 2010).

6. Zusammenfassung und Schlussfolgerung

Ziel der vorliegenden Arbeit war es, den Beitrag des im Unterboden spez. geb. NH_4^+ für die Stickstoffernährung von Nutzpflanzen zu erfassen. Dazu wurden Einflussfaktoren untersucht, die für die spezifische Bindung bzw. Mobilisierung von NH_4^+ relevant sind. Besondere Aufmerksamkeit galt hierbei der Bedeutung der Bioporen, der Fruchtfolge und der damit in Verbindung stehenden unterschiedlichen Wurzelsysteme (homorhiz versus allorhiz) landwirtschaftlicher Nutzpflanzen.

Grundsätzlich unterliegt der Gehalt des spez. geb. NH_4^+ im Boden während einer Vegetationsperiode einer gewissen Dynamik. Diese wurde in den Jahren 2010 und 2011 durch monatliche Bodenprobennahmen dokumentiert. Besonders auffällig dabei war, dass der Gehalt an spez. geb. NH_4^+ in den Monaten Juni und Juli deutlich abgesunken war. Dies weist auf eine verstärkte Mobilisierung des spez. geb. NH_4^+ aufgrund eines erhöhten Stickstoffbedarfs der Pflanzen zum Zeitpunkt der vegetativen Phase (Fruchtbildung) hin. Zum Ende der Vegetationszeit konnte ein Wiederanstieg des Gehaltes an spez. geb. NH_4^+ festgestellt werden, der sich auf die Mineralisierung von abgestorbenem Pflanzenmaterial zurückführen lässt. Diese Veränderungen der Gehalte an spez. geb. NH_4^+ waren in allen drei beprobten Tiefenstufen zu erkennen, teilweise jedoch zeitlich versetzt und mit zunehmender Bodentiefe in abgeschwächter Form.

Beim Vergleich der Gehalte an spez. geb. NH_4^+ unter Pflanzen mit unterschiedlichem Wurzelsystem konnten teilweise signifikante Unterschiede nachgewiesen werden, die darauf hinweisen, dass allorhize Pflanzen in der Lage sind, mehr spez. geb. NH_4^+ zu mobilisieren als homorhize. Dies scheint jedoch auch von der Vorfrucht abzuhängen, denn nach Luzerne (allorhiz) als Vorfrucht konnten beim Vergleich der darauffolgenden Hauptfrüchte Futtermalve (allorhiz) und Weizen (homorhiz) keine Unterschiede gefunden werden. Hingegen wurde bei Rohrschwengel (homorhiz) als Vorfrucht unter Futtermalve bei den späteren Probenahmeterminen eine stärkere Verarmung des spez. geb. NH_4^+ gefunden als unter Weizen. Insgesamt konnte nachgewiesen werden, dass im Laufe einer Vegetationsperiode erhebliche Mengen an spez. geb. NH_4^+ mobilisiert werden. So konnten unter Futtermalve nach dreijährigem Rohrschwengelanbau durchschnittlich $32,3 \text{ mg spez. geb. NH}_4\text{-N kg}^{-1} \text{ Boden}$ während der Vegetationsperiode 2010 aus dem Unterboden (45-105 cm) mobilisiert werden, das entspricht $190 \text{ kg N ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$. Unter Weizen nach dreijährigem Luzerneanbau wurden im Durchschnitt sogar $557 \text{ kg N ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$ freigesetzt. Dies bestätigt Hypothese 1, wonach spez. geb. NH_4^+ während einer Vegetationsperiode mobilisiert wird und einen Beitrag zur Stickstoffversorgung landwirtschaftlicher Nutzpflanzen leistet.

Ein Einfluss der Stickstoffversorgung des Oberbodens auf die Mobilisierung des spez. geb. NH_4^+ im Unterboden konnte bei einem durchgeführten Stickstoffsteigerungsversuch nicht nachgewiesen werden.

In einen Versuch mit ^{15}N -markiertem Boden, der einer Tiefe von 60 cm in speziellen Diffusionstaschen unter Raps (allorhiz) und Gerste (homorhiz) inkubiert wurde, konnte bestätigt werden, dass Pflanzenwurzeln auch im Unterboden spez. geb. NH_4^+ mobilisieren. Während der viermonatigen Versuchsdauer wurden mehr als 10% des ursprünglich spez. geb.

$^{15}\text{NH}_4^+$ freigesetzt. Das durch die Wurzeln geschaffene Verarmungsprofil erstreckte sich über den gesamten 30 mm mächtigen Bodenmonolithen der einzelnen Diffusionstaschen. Da die Wurzeln keinen direkten Kontakt zum Boden hatten, förderte das durch den N-Entzug an der Gazeoberfläche entstandene Konzentrationsgefälle die Diffusion des spez. geb. NH_4^+ aus den Tonmineralen in wurzelfernerer Zonen. Wie schon bei den oben beschriebenen regelmäßigen Probennahmen festgestellt werden konnte, gab es auch hier einen signifikanten Unterschied zwischen der allorhizen Pflanze Raps und der homorhizen Gerste. Unter Raps wurde deutlich mehr spez. geb. NH_4^+ mobilisiert als unter Gerste. Mit diesen Ergebnissen konnte die 2. Hypothese bestätigt werden, dass in der unmittelbaren Nachbarschaft der Wurzeln Verarmungszonen an spez. geb. NH_4^+ entstehen, wodurch die Diffusion von NH_4^+ aus den Zwischenschichten der 2:1-Tonminerale erleichtert wird.

Anhand von ^{15}N -markierter Luzerne, die auf die Bodenoberfläche ausgebracht wurde, konnte nachgewiesen werden, dass organisches Material durch Regenwürmer in den Unterboden transportiert wird. In den dunklen Auskleidungen der Bioporen konnten in allen Tiefenstufen signifikant erhöhte ^{15}N -Gehalte gefunden werden. Im Bulk-Boden hingegen wurden nur im Oberboden gering erhöhte Mengen festgestellt. Der zu $^{15}\text{NH}_4^+$ mineralisierte organische ^{15}N konnte zudem als spez. geb. $^{15}\text{NH}_4^+$ in den Bioporenwänden nachgewiesen werden, nicht dagegen im bioporenfernen Bulk-Boden. Im Jahr nach der Ausbringung der markierten ^{15}N -Luzerne und Austausch des Oberbodens gegen nicht markierten Boden wurde auf den entsprechenden Parzellen Weizen (homorhiz) bzw. Futtermalve (allorhiz) angebaut. Am Ende der Vegetationsperiode konnte im Aufwuchs beider Pflanzenarten ^{15}N festgestellt werden, dessen Gehalt deutlich über der natürlichen Anreicherung lag. Durch den Anbau beider Pflanzenarten war der Gehalt an spez. geb. $^{15}\text{NH}_4^+$ in den Bioporen im Vergleich zum Gehalt im Ausbringungsjahr tendenziell zurück gegangen. Tendenzuell zeigte sich auch hier der Unterschied zwischen den beiden Wurzelsystemen, der bereits durch die Ergebnisse der oben genannten Versuche nachgewiesen werden konnte: Unter Futtermalve konnte eine höhere Mobilisierung an spez. geb. NH_4^+ festgestellt werden als unter Weizen. Dass organisches Material über die Bioporen in tiefere Bodenschichten transportiert, dort mineralisiert wird und die gebildeten NH_4 -Ionen in den Tonmineralzwischenschichten spezifisch gebunden werden (Hypothese 3) konnte also eindeutig nachgewiesen werden. Ebenso konnte Hypothese 4 bestätigt werden, wonach das in den Bioporen des Unterbodens spez. geb. NH_4^+ zur Stickstoffversorgung von landwirtschaftlichen Nutzpflanzen beiträgt.

Hypothese 5, die besagt, dass Pflanzen mit homorhizen Wurzelsystemen im Unterboden mehr spez. geb. NH_4^+ mobilisieren, als Pflanzen mit allorhizem Wurzelsystem, trifft nicht zu. In den drei vorweg beschriebenen Versuchen konnte das Gegenteil festgestellt werden.

Die Ergebnisse des Versuches, in dem Luzernepflanzen auf einem mit K^+ und/oder Ca^{2+} gedüngten Boden angebaut wurden, zeigten einen deutlichen Einfluss von K^+ auf die Mobilisierung des spez. geb. NH_4^+ . Im direkten Einflussbereich der Wurzeln konnte nachgewiesen werden, dass K^+ die Mobilisierung von spez. geb. NH_4^+ aus den Tonmineralzwischenschichten behindert, womit Hypothese 6 bestätigt werden konnte. Die nach Hypothese 7 expandierende Wirkung von Ca^{2+} auf die Tonminerale konnte nicht eindeutig nachgewiesen werden. Tendenzuell war der Gehalt an spez. geb. NH_4^+ der Ca-

Variante zwar geringer als der der Kontrolle, aber dieser Unterschied war statistisch nicht signifikant.

In einem Versuch, bei dem $^{15}\text{NH}_4^+$ in 5 bzw. 50 cm Bodentiefe appliziert wurde, konnte nachgewiesen werden, dass dieses teilweise in Tonmineralzwischenschichten spezifisch gebunden wurde und somit gegebenenfalls vor Auswaschung bzw. mikrobieller Festlegung geschützt ist. Bei der Zufuhr von NO_3^- konnte ebenfalls ein Teil als spez. geb. NH_4^+ in den Tonmineralzwischenschichten gefunden werden. Das beweist, dass NO_3^- im Boden durch die dissimilatorische Nitratreduktion zu NH_4^+ reduziert werden kann. Diese Ergebnisse zur dissimilatorischen Nitratreduktion verifizieren Hypothese 8, dass NO_3^- nach Verlagerung in tiefere Bodenschichten zu NH_4^+ reduziert und in Tonmineralzwischenschichten spezifisch gebunden werden kann.

Die eigenen Ergebnisse bestätigen, dass das im Unterboden spez. geb. NH_4^+ eine bedeutende Rolle im Stickstoffkreislauf von landwirtschaftlich genutzten Böden spielt. Die Aufgabe des spez.-geb.- NH_4^+ -Pools ist nicht unbedingt die mengenmäßige Bereitstellung von N zur Ernährung der Pflanzen, sondern eher eine Puffer- und Speicherfunktion. Aus diesem Pool kann während einer Vegetationsperiode je nach Bedarf NH_4^+ mobilisiert werden und direkt von Pflanzen aufgenommen werden. Wird kein N mehr entzogen und wird organischer N mineralisiert, dann können die Tonmineralzwischenschichten wieder aufgefüllt werden. Für die Nutzung dieser Ressource müssen jedoch einige Voraussetzungen erfüllt sein: Zum einen sollte die Fruchtfolge so gestaltet sein, dass der Boden durch Vorfrüchte tief durchwurzelt wird, damit einerseits genügend Bioporen entstehen, in die die Nachfrucht anschließend einwachsen kann, um die im Unterboden vorhandenen Nährstoffquellen zu erschließen. Andererseits sollte der Regenwurmbesatz möglichst hoch sein, denn dadurch wird organische Substanz vom Oberboden in tiefere Bodenschichten transportiert, die dort mineralisiert werden kann, wodurch der Pool des spez. geb. NH_4^+ aufgefüllt wird.

Wenn während einer Vegetationsperiode möglichst viel spez. geb. NH_4^+ freigesetzt wird, dann stehen zu den Zeiten, in denen wenig bis kein N dem Boden entzogen wird, genügend Bindungsstellen für NH_4^+ zur Verfügung, um unter anderem dissimilatorisch reduziertes NO_3^- zu binden und es somit vor Auswaschung zu schützen.

7. Literaturverzeichnis

- ADELT, G. (1986): Einfluss einer Gülledüngung auf organische und anorganische N-Fractionen des Bodens und deren Veränderungen bei erschöpfender Beanspruchung durch *Lolium multiflorum*. – Diplomarbeit, Agrikulturchemisches Institut, Rheinische Friedrich-Wilhelms-Universität Bonn.
- AHRENS, G. (1995): Untersuchungen zur Freisetzung des spezifisch gebundenen Ammoniums in der Rhizosphäre sowie zur Umsetzung organischer N-Verbindungen im Einflussbereich der Pflanzenwurzeln. – *Dissertation, Universität Bonn*.
- ALLISON, F.E., ROLLER, E.M. & DOETSCH, J.H. (1953a): Ammonium fixation and availability in vermiculite. – *Soil Science*, 75/3: 173–180.
- ALLISON, F.E., DOETSCH, J.H. & ROLLER, E.M. (1953b): Availability of fixed ammonium in soils containing different clay minerals. – *Soil Science*, 75/5: 373–381.
- ATHMANN, M., KAUTZ, T., PUDE, R. & KÖPKE, U. (2013): Root growth in biopores—evaluation with in situ endoscopy. – *Plant and Soil*, 371/1-2: 179–190.
- BAEUMER, K. (1992): Allgemeiner Pflanzenbau. – Stuttgart (Ulmer).
- BARSHAD, I. (1951): Cation exchange in soils. – *Soil Science*, 72/5: 361–372.
- BEARE, M.H., COLEMAN, D.C., CROSSLEY, D.A., HENDRIX, P.F. & ODUM, E.P. (1995): A hierarchical approach to evaluating the significance of soil biodiversity to biogeochemical cycling. – In: COLLINS, H.P., ROBERTSON, G.P. & KLUG, M.J. (eds): The significance and regulation of soil biodiversity. – pp. 5–22, Dordrecht (Springer Netherlands).
- BEAUCHAMP, E.G. & DRURY, C.F. (1991): Ammonium fixation, release, nitrification, and immobilization in high- and low-fixing soils. – *Soil Science Society of America Journal*, 55/1: 125–129.
- BEUTERS, P. & SCHERER, H.W. (2012): Modification of the standard method for determination of non-exchangeable $\text{NH}_4\text{-N}$ in soil. – *Plant, Soil and Environment*, 58: 557–560.
- BLACK, A. & WARING, S. (1972): Ammonium fixation and availability in some cereal producing soils in Queensland. – *Australian Journal of Soil Research*, 10/2: 197–207.
- BLASL, S. (1983): Mineralisch gebundener NH_4^+ -Stickstoff - Beziehungen zu Bodenkenndaten und zur Qualität von Zuckerrüben. – *Die Bodenkultur*, 34: 125–131.
- BÖHM, W. & KÖPKE, U. (1977): Comparative root investigations with two profile wall methods. – *Zeitschrift für Acker- und Pflanzenbau*, 144: 297–303.
- BREMNER, J.M. (1959): Determination of fixed ammonium in soil. – *Journal of Agricultural Science*, 52: 147–160.
- BUJNOVSKY, R. (1993): Possibilities of root system creation and nutrient uptake in subsoil of major soil groups of Slovakia. – *Rostlinna Vyroba-UZPI*, 39: 657–668.
- CAMBARDELLA, C.A., MOORMAN, T.B., JAYNES, D.B., HATFIELD, J.L., PARKIN, T.B., SIMPKINS, W.W. & KARLEN, D.L. (1999): Water Quality in Walnut Creek Watershed: Nitrate-Nitrogen in Soils, Subsurface Drainage Water, and Shallow Groundwater. – *Journal of Environment Quality*, 28/1: 25–34.
- CHEN, C.C., TURNER, F.T. & DIXON, J.B. (1989): Ammonium fixation by highcharge smectite in selected Texas Gulf Coast soils. – *Soil Science Society of America Journal*, 53: 1035–1040.

- COLE, J.A. & BROWN, C.M. (1980): Nitrite reduction to ammonia by fermentative bacteria: A short circuit in the biological nitrogen cycle. – *FEMS Microbiology Letters*, 7/2: 65–72.
- DEVLIEGHER, W. & VERSTRAETE, W. (1997): Microorganisms and soil physico-chemical conditions in the drilosphere of *Lumbricus terrestris*. – *Soil Biology and Biochemistry*, 29/11-12: 1721–1729.
- DÖHLER, H. (2009): Faustzahlen für die Landwirtschaft. - Darmstadt, (Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft, KTBL).
- DORAM, D.R. & EVANS, L.J. (1983): Native fixed ammonium and fixation of added ammonium in relation to clay mineralogy in some Ontario soils. – *Canadian Journal of Soil Science*, 63: 631–639.
- DOU, H. & STEFFENS, D. (1995): Recovery of ^{15}N labelled urea as affected by fixation of ammonium by clay minerals. – *Zeitschrift für Pflanzenernährung und Bodenkunde*, 158/4: 351–354.
- DRESSLER, A. & MENGEL, K. (1985): Bedeutung des peripheren spezifisch gebundenen NH_4^+ von Löß- und Alluvialböden für die N-Düngerbedarfsermittlung. – *VDLUFA-Schriftenreihe*, 16: 137–146.
- DRURY, C.F., BEAUCHAMP, E.G. & EVANS, L.J. (1989): Fixation and immobilization of recently added $^{15}\text{NH}_4^+$ in selected Ontario and Quebec soils. – *Canadian Journal of Soil Science*, 69/2: 391–400.
- ELMACI, Ö., SEÇER, M., ERDEMİR, O. & IQBAL, N. (2002): Ammonium fixation properties of some arable soils from the Aegean region of Turkey. – *European Journal of Agronomy*, 17/3: 199–208.
- ERNST, G., FELTEN, D., VOHLAND, M. & EMMERLING, C. (2009): Impact of ecologically different earthworm species on soil water characteristics. – *European Journal of Soil Biology*, 45/3: 207–213.
- FLEIGE, H., MEYER, B. & SCHOLZ, H. (1971): Bilanz und Umverteilung der Bindungsformen von Boden- und Dünger-Stickstoff in einer Acker-Parabraunerde aus Löß. – *Göttinger. Bodenkundliche Berichte*, 18: 39–86.
- FRYE, W.W. & HUTCHESON, T.B. (1981): Release of NH_4^+ in Soils by Oven Drying 1. – *Soil Science Society of America Journal*, 45/5: 889–892.
- GÖTTLEIN, A., HELL, U. & BLASEK, R. (1996): A system for microscale tensiometry and lysimetry. – *Geoderma*, 69/1-2: 147–156.
- GOUVEIA, G.A. & EUDOXIE, G.D. (2007): Distribution of fertiliser N among fixed ammonium fractions as affected by moisture and fertiliser source and rate. – *Biology and Fertility of Soils*, 44/1: 9–18.
- GRAFF, O. (1967): Über die Verlagerung von Nährelementen in den Unterboden durch Regenwurmtätigkeit. – *Landwirtschaftliche Forschung*, 20: 117–127.
- GRAFF, O. (1971): Stickstoff, Phosphor und Kalium in der Regenwurmlosung auf der Wiesenversuchsfläche des Sollingprojektes. – *Annals of Zoology*, 4: 503–512.
- GREEN, C.J., BLACKMER, A.M. & YANG, N.C. (1994): Release of fixed ammonium during nitrification in soils. – *Soil Science Society of America Journal*, 58/5: 1411–1415.
- GREENAN, C.M., MOORMAN, T.B., KASPAR, T.C., PARKIN, T.B. & JAYNES, D.B. (2006): Comparing carbon substrates for denitrification of subsurface drainage water. – *Journal of Environment Quality*, 35/3: 824–829.
- GUO, P.-C., BOHRING, J. & SCHERER, H.W. (1983): Verhalten von Dünger- NH_4 in Böden unterschiedlicher tonmineralischer Zusammensetzung im Inkubationsversuch. – *Zeitschrift für Pflanzenernährung und Bodenkunde*, 146/6: 752–759.
- HEIM, D. (1990): Tone und Tonminerale: Grundlagen der Sedimentologie und Mineralogie. F. Enke.

- HINMAN, W.C. (1966): Ammonium fixation in relation to exchangeable K and organic matter content in two Saskatchewan soils. – *Canadian Journal of Soil Science*, 46: 223–225.
- HODGE, A. (2004): The plastic plant: root responses to heterogeneous supplies of nutrients. – *New Phytologist*, 162/1: 9–24.
- JASSOGNE, L., HETTIARACHCHI, G., CHITTLEBOROUGH, D. & MCNEILL, A. (2009): Distribution and Speciation of nutrient elements around micropores. – *Soil Science Society of America Journal*, 73/4: 1319–1326.
- JONES, D.L., HODGE, A. & KUZYAKOV, Y. (2004): Plant and mycorrhizal regulation of rhizodeposition. – *New Phytologist*, 163/3: 459–480.
- JORGENSEN, K.S. (1989): Annual pattern of denitrification and nitrate ammonification in Estuarine sediment. – *Applied and Environmental Microbiology*, 55: 1841–1847.
- KAUTZ, T. (2010): Variantenplan des CeFiT, – unveröffentlicht.
- KAUTZ, T., AMELUNG, W., EWERT, F., GAISER, T., HORN, R., JAHN, R., JAVAUX, M., KEMNA, A., KUZYAKOV, Y., MUNCH, J.-C., PÄTZOLD, S., PETH, S., SCHERER, H.W., SCHLOTER, M., SCHNEIDER, H., VANDERBORGHT, J., VETTERLEIN, D., WALTER, A., WIESENBERG, G.L.B. & KÖPKE, U. (2013): Nutrient acquisition from arable subsoils in temperate climates: A review. – *Soil Biology and Biochemistry*, 57: 1003–1022.
- KEPPNER, L., ROHRMOSER, W., WENDANG, J. & FISCHER, D. (2012): Nitratbericht 2012. – In: pp. 1–94, Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit und Bundesministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Verbraucherschutz.
- KERSCHBERGER, M. & SCHILLING, G. (2000): Pflanzenernährung und Düngung: 164 Tabellen. – Stuttgart (Ulmer).
- KNAUT, M. (2010): Landwirtschaftliche Fakultät Universität Bonn. – *Klima Campus Klein-Altendorf*. zuletzt aufgerufen am 17.01.2014, http://www.cka.uni-bonn.de/standort/copy_of_klima.
- KÖPKE, U. (1981): A comparison of methods for measuring root growth of field crops. – *Journal of Agronomy and Crop Science*, 150: 39–49.
- KOWALENKO, C.G. & CAMERON, D.R. (1976): Nitrogen transformations in an incubated soil as affected by combinations of moisture content and temperature and adsorption-fixation of ammonium. – *Canadian Journal of Soil Science*, 56/2: 63–70.
- KOWALENKO, C.G. & ROSS, G.J. (1980): Studies on dynamics of recently clay fixed NH_4^+ using ^{15}N . – *Canadian Journal of Soil Science*, 60: 61–70.
- KUDEYAROV, V.N. (1981): Mobility of fixed ammonium in soil. In: Clark FE, Rosswall T (eds) Terrestrial nitrogen cycles. – *Ecological Buletins (Stockholm)*, 33: 281–290.
- KÜPPER, P.M. (2011): Nährstoffentzüge diverser Nutzpflanzen, CeFiT. – mündliche Mitteilung.
- KUTSCHERA, L. & LICHTENEGGER, E. (2010): Wurzelatlas mitteleuropäischer Ackerunkräuter und Kulturpflanzen. – Frankfurt, M. (DLG-Verlag).
- LI, C., FAN, X. & MENGEL, K. (1990a): Turnover of interlayer ammonium in loess-derived soil grown with winter wheat in the Shaanxi Province of China. – *Biology and Fertility of Soils*, 9: 211–214.

- LI, C., FAN, X. & MENGEL, K. (1990b): Turnover of interlayer ammonium in loess-derived soil grown with winter wheat in loess-derived soil grown with winter wheat in the Shaanxi province of China. – *Biology and Fertility of Soils*, 9: 141–155.
- LIMA, J.E., KOJIMA, S., TAKAHASHI, H. & VON WIREN, N. (2010): Ammonium triggers lateral root branching in arabidopsis in an Ammonium transporter 1;3-dependent manner. – *The Plant Cell Online*, 22/11: 3621–3633.
- LOGSDON, S.D. & LINDEN, D.R. (1992): Interactions of earthworms with soil physical conditions influencing plant growth. – *Soil Science*, 154/4: 330–337.
- LU, C.Y., ZHANG, X.D., CHEN, X., SHI, Y., MA, J. & ZHAO, M.Q. (2010): Fixation of labelled ($^{15}\text{NH}_4$) $_2\text{SO}_4$ and its subsequent release in black soil of Northeast China over consecutive crop cultivation. – *Soil Tillage Research*, 106: 329–334.
- LYNCH, J.P. (2007): Turner review No. 14. Roots of the second green revolution. – *Australian Journal of Botany*, 55/5: 493–512.
- MARSCHNER, H. & MARSCHNER, P. (2012): Marschner's mineral nutrition of higher plants. 3rd ed. – 651 pp. London; Waltham, MA (Elsevier/Academic Press).
- MATERECHERA, S.A., ALSTON, A.M., KIRBY, J.M. & DEXTER, A.R. (1993): Field evaluation of laboratory techniques for predicting the ability of roots to penetrate strong soil and of the influence of roots on water sorptivity. – *Plant and Soil*, 149/2: 149–158.
- MCBETH, I.G. (1917): Fixation of ammonium in soils. – *Journal of Agricultural Research*, 9: 141–155.
- MCCARTY, G.W. & BREMNER, J.M. (1992): Availability of organic carbon for denitrification of nitrate in subsoils. – *Biology and Fertility of Soils*, 14/3: 219–222.
- MENGEL, K. (1984): Ernährung und Stoffwechsel der Pflanze. – Jena (Gustav Fischer Verlag).
- MENGEL, K., HORN, D. & TRIBUTH, H. (1990): Availability of interlayer ammonium as related to root vicinity and mineral type. – *Soil Science*, 149: 131–137.
- MENGEL, K. & SCHERER, H.W. (1981): Release of non-exchangeable (fixed) soil ammonium under field conditions during the growing season. – *Soil Science*, 131/4: 226–232.
- MOGILEVKINA, I.A. (1964): Fixation of ammonium in the soil and method of determining it. *Soviet Soil Science*, 2: 186–196.
- MORTIMER, C.E. & MÜLLER, U. (2003): Chemie: Das Basiswissen der Chemie. – Stuttgart (Thieme).
- NETTE, T. & RESCH, H.N. (1992): Spezifisch gebundenes NH_4^+ in landwirtschaftlich genutzten Böden des Trierer Raumes. – *Agrarbiological Research*, 45: 266–275.
- NEWMAN, A.C.D. (1969): Cation exchange properties of micas. 1. The relation between the mica composition and potassium exchange in solution of different pH. – *Soil Science*, 20: 377–373.
- NIEDER, R., BENBI, D.K. & SCHERER, H.W. (2010): Fixation and defixation of ammonium in soils: a review. – *Biology and Fertility of Soils*, 47/1: 1–14.
- NIEDER, R., WILLENBOCKEL, A., NEUGEBAUER, E., WIDMER, P. & RICHTER, J. (1995): Die Rolle der mikrobiellen Biomasse und des mineralisch fixierten Ammoniums bei den Stickstoff-Transformationen in niedersächsischen Löß-Ackerböden unter Winter-Weizen. II. Umsetzung von ^{15}N -markiertem Stickstoff. – *Zeitschrift für Pflanzenernährung und Bodenkunde*, 158/5: 477–484.

- NIEDERBUDE, E.A. (1983): Das Tonmineral-NH₄⁺, seine Stellung zu anderen N-Bindungsformen sowie seine Bewertung für N-Immobilisierung und -Mobilisierung in Böden. – *Kali Briefe*, 16: 365–378.
- NOMMIK, H. (1957): Fixation and defixation of ammonium in soils. – *Acta Agriculturae Scandinavica*, 7/4: 395–436.
- NOMMIK, H. (1967): Distribution of forms of nitrogen in a podsolc soil profile from Garpenberg, Central Sweden. – *Journal of Soil Science*, 18: 301–308.
- NOMMIK, H. (1981): Fixation and biological availability of ammonium in soil clay minerals. – *Ecological Bulletin (Stockholm)*, 33: 273–279.
- NOMMIK, H. & VAHTRAS, K. (1982): Retention and fixation of ammonium and ammonia in soils. In: Stevenson FJ (ed.) *Nitrogen in agricultural soils*. – *Agronomy*, 22: 123–171.
- OPUWARIBO, E. & ODU, C.T.I. (1974): Fixed ammonium in Nigerian soils I. Selection of a method and amounts of native fixed ammonium. – *Journal of Soil Science*, 25: 256–264.
- ORTAS, I. & ROWELL, D.L. (2004): Effect of ammonium and nitrate on indigenous mycorrhizal infection, rhizosphere pH change, and phosphorus uptake by sorghum. – *Communications in Soil Science and Plant Nutrition*, 35: 1923–1944.
- OSBORNE, G. (1976a): The extraction and definition of non-exchangeable or fixed ammonium in some soils from southern New South Wales. – *Australian Journal of Soil Research*, 14/3: 373.
- OSBORNE, G. (1976b): The significance of intercalary ammonium in representative surface and subsoils from southern New South Wales. – *Australian Journal of Soil Research*, 14/3: 381–388.
- PANKHURST, C.E., PIERRET, A., HAWKE, B.G. & KIRBY, J.M. (2002): Microbiological and chemical properties of soil associated with macropores at different depths in a red-duplex soil in NSW Australia. – *Plant and soil*, 238/1: 11–20.
- PARKIN, T.B. & BERRY, E.C. (1999): Microbial nitrogen transformations in earthworm burrows. – *Soil Biology and Biochemistry*, 31/13: 1765–1771.
- PÄTZOLD, S., VETTERLEIN, D. & JAHN, R. (2010): Bodeneigenschaften des Referenzprofils. – unveröffentlicht.
- PERKONS, U. (2011): Wurzellängendichten und Feinwurzelanteil unter Raps und Gerste im CeFiT. – mündliche Mitteilung.
- PIERRET, A., MORAN, C.J. & PANKHURST, C.E. (1999): Differentiation of soil properties related to the spatial association of wheat roots and soil macropores. – *Plant and Soil*, 211/1: 51–58.
- PRESTON, C.M. (1982): The availability of residual fertilizer nitrogen immobilized as clay-fixed ammonium and organic nitrogen. – *Canadian Journal of Soil Science*, 62: 479–486.
- RAW, F. (1962): Studies of earthworm populations in orchards.: I. Leaf burial in apple orchards. – *Annals of Applied Biology*, 50/3: 389–404.
- REICHENBACH, H. VON (1972): Factors in mica transformation. – In: *Potassium in Soil. International Potash Institute, Bern (Switzerland)*: 33–42.
- RICHARDS, J.E. & WEBSTER, C.P. (1999): Denitrification in the subsoil of the Broadbalk Continuous Wheat Experiment. – *Soil Biology and Biochemistry*, 31/5: 747–755.

- RIDER, D., ZASOSKI, R.J. & CLAASSEN, V.P. (2005): Ammonium fixation in sub-grade decomposed granite substrates. – *Plant and Soil*, 277/1-2: 73–84.
- RIDER, D.E., O'DELL, R.E. & CLAASSEN, V.P. (2007): Release of non-exchangeable $^{15}\text{NH}_4^+$ from subgrade, decomposed granite substrates and uptake by non-mycorrhizal and mycorrhizal California native annual grass, *Vulpia microstachys*. – *Plant and Soil*, 300/1-2: 83–94.
- RODRIGUES, G. (1954): Fixed ammonia in tropical soils. – *Journal of Soil Science*, 5/2: 264–274.
- RUSSOW, R. & GOETZ, A. (1998): Automatic simultaneous determination of total carbon and ^{13}C as well as total nitrogen and ^{15}N in isotopically enriched samples of soil and plant material using a quadrupole mass spectrometer coupled to an elemental analyser. – *Archives of Agronomy and Soil Science*, 43/5: 349–359.
- SAHA, D. & MUKHOPADHYAY, A.K. (1986): Availability of residual fixed ammonium to crops. – *Biology and Fertility of Soils*, 2/2.: 83-86.
- SAHRAWAT, K.L. (1979): Ammonium fixation in some tropical rice soils. – *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 10/7: 1015–1023.
- SANDER, T. & GERKE, H.H. (2009): Modelling field-data of preferential flow in paddy soil induced by earthworm burrows. – *Journal of Contaminant Hydrology*, 104/1-4: 126–136.
- SCHACHTSCHABEL, P. (1961): Bestimmung des fixierten Ammoniaks im Boden. – *Zeitschrift für Pflanzenernährung, Düngung und Bodenkunde*, 93: 125–136.
- SCHAEFFER, F., SCHACHTSCHABEL, P. & BLUME, H.-P. (2010): Lehrbuch der Bodenkunde. – Heidelberg; Berlin (Spektrum, Akademischer Verlag).
- SCHERER, H.W. (1984): Beziehung zwischen dem Stickstoffentzug der Pflanzen und der Abnahme von spezifisch gebundenem $\text{NH}_4\text{-N}$ im Boden. – *Zeitschrift für Pflanzenernährung und Bodenkunde*, 147/1: 29–36.
- SCHERER, H.W. (1985): The influence of potassium on the fixation of NH_4^+ and the mobilization of nonexchangeable NH_4^+ . – *Plant Research and Development*, 23: 78–90.
- SCHERER, H.W. (1986): Dynamik und Pflanzenverfügbarkeit von Zwischenschicht-Ammonium der Tonminerale in landwirtschaftlich genutzten Böden. – *Habilitation thesis, University of Gießen, Germany*.
- SCHERER, H.W. (1987): Zur Verfügbarkeit von Zwischenschicht-Ammonium der Tonminerale. – *Landwirtschaftliche Forschung*, 40: 259–276.
- SCHERER, H.W. (1987): Einfluß von Bewuchs auf die Mobilisierung von spezifisch gebundenem NH_4^+ im Boden. – *Journal of Agronomy and Crop Science*, 158/2: 114–120.
- SCHERER, H.W. (1993): Dynamics and availability of the non-exchangeable $\text{NH}_4^+\text{-N}$ —a review. – *European Journal of Agronomy*, 2: 149–160.
- SCHERER, H.W. & AHRENS, G. (1995): Untersuchungen zum Stickstoffumsatz in der Rhizosphäre. – In: MERBACH, W. (ed.): *Mikroökologische Prozesse im System Pflanze-Boden*. – pp. 127–131, Wiesbaden (Vieweg + Teubner Verlag).
- SCHERER, H.W. & AHRENS, G. (1996): Depletion of non-exchangeable $\text{NH}_4\text{-N}$ in the soil—root interface in relation to clay mineral composition and plant species. – *European Journal of Agronomy*, 5/1-2: 1–7.

- SCHERER, H.W. & MENGEL, K. (1979): Der Gehalt an fixiertem Ammoniumstickstoff auf einigen repräsentativen hessischen Standorten. – *Landwirtschaftliche Forschung*, 32: 416–424.
- SCHERER, H.W. & MENGEL, K. (1986): Importance of soil type on the release of non-exchangeable NH_4^+ and availability of fertilizer NH_4^+ and fertilizer NO_3^- . – *Fertilizer Research*, 8/3: 249–258.
- SCHERER, H.W. & MENGEL, K. (1981): Einfluss von Bodenfeuchte auf die Freisetzung von nicht austauschbarem NH_4^+ und dessen Aufnahme durch die Pflanze. – *Mitteilungen der Deutschen Bodenkundlichen Gesellschaft*, 32: 429–438.
- SCHEU, S. (1991): Mucus excretion and carbon turnover of endogeic earthworms. – *Biology and Fertility of Soils*, 12/3: 217–220.
- SCHRÖDER, D. (1976): Kalium im Boden und Kalium-Ernährung der Pflanze. – *Kali Briefe*, 13: 1–13.
- SCHÜLLER, H. (1969): Die CAL-Methode, eine neue Methode zur Bestimmung des pflanzenverfügbaren Phosphates in Böden. – *Zeitschrift für Pflanzenernährung und Bodenkunde*, 123/1: 48–63.
- SILVA, J.A. & BREMNER, J.M. (1966): Determination and isotope-ratio analysis of different forms of nitrogen in soils: 5. Fixed ammonium. – *Soil Science Society of America Proc.*, 30: 587–593.
- SMITH, S.J., POWER, J.F. & KEMPER, W.D. (1994): Fixed ammonium and nitrogen availability indexes. – *Soil Science*, 158: 132–140.
- SOON, Y.K. (1998): Nitrogen cycling involving non-exchangeable ammonium in a gray luvisol. – *Biology and Fertility of Soils*, 27/4: 425–429.
- SORENSEN, J. (1978): Capacity for denitrification and reduction of nitrate to ammonia in a coastal marine sediment. – *Applied and Environmental Microbiology*, 35: 301–305.
- SOWDEN, F.J. (1976): Transformations of nitrogen added as ammonium and manure to soil with a high ammonium-fixing-capacity under laboratory conditions. – *Canadian Journal of Soil Science*, 56/4: 319–331.
- SPOTT, O. (2012): ^{15}N determination of ammonium-N in aqueous samples using nitrous oxide as the measuring gas for the SPINMAS approach. – *persönliche Mitteilung*.
- SSSA (1984): Glossary of soil science terms. – *Soil Science Society of America, Madison, Wisconsin*.
- STANFORD, G. & PIERRE, W.H. (1947): The relation of potassium fixation to ammonium fixation. – *Soil Science Society of America Proc.*, 11: 155–160.
- STANGE, F.C., SPOTT, O., APELT, B. & RUSSOW, R.W.B. (2007): Automated and rapid online determination of ^{15}N abundance and concentration of ammonium, nitrite, or nitrate in aqueous samples by the SPINMAS technique. – *Isotopes in Environmental and Health Studies*, 43/3: 227–236.
- STEFFENS, D. & SPARKS, D.L. (1997): Kinetics of nonexchangeable ammonium release from soils. – *Soil Science Society of America Journal*, 61: 455–462.
- STEFFENS, D. & SPARKS, D.L. (1999): Effect of residence time on the kinetics of non-exchangeable ammonium release from illite and vermiculite. – *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 162/6: 599–605.
- STEWART, J.B., MORAN, C.J. & WOOD, J.T. (1999): Macropore sheath: quantification of plant root and soil macropore association. – *Plant and Soil*, 211/1: 59–67.
- STURM, H. & JUNG, J. (1973): Nährstoffumsatz und Eiweißertrag bei Futtergetreide in Abhängigkeit von der Stickstoffdüngung. – *Landwirtschaftliche Forschung*, 28/2 SH: 264–272.

- SVEISTRUP, T.E., HARALDSEN, T.K. & ENGELSTAD, F. (1997): Earthworm channels in cultivated clayey and loamy Norwegian soils. – *Soil and Tillage Research*, 43/3-4: 251–262.
- TANG, Y., WANG, X.-Z., ZHAO, H.-T. & FENG, K. (2008): Effect of Potassium and C/N Ratios on Conversion of NH_4^+ in Soils. – *Pedosphere*, 18/4: 539–544.
- TEBRÜGGE, F. (1987): Reduzierte Bodenbearbeitung zu Zuckerrüben. – *Die Zuckerrübe*, 36: 204–210.
- TROLL, W. (1949): Über die Grundbegriffe der Wurzelmorphologie. – *Österreichische Botanische Zeitschrift*, 96/3-4: 444–452.
- VETTERLEIN, D. & JAHN, R. (2004): Combination of micro suction cups and time-domain reflectometry to measure osmotic potential gradients between bulk soil and rhizosphere at high resolution in time and space. – *European Journal of Soil Science*, 55/3: 497–504.
- VINTHER, F., EILAND, F., LIND, A.-M. & ELSGAARD, L. (1999): Microbial biomass and numbers of denitrifiers related to macropore channels in agricultural and forest soils. – *Soil Biology and Biochemistry*, 31/4: 603–611.
- VOLLMAR, N. & SCHERER, H.W. (1980): Der Mechanismus der spezifischen Bindung und Freisetzung von NH_4^+ - und K^+ -Ionen. – *Kali Briefe*, 15: 339–343.
- WATT, M. (2006): Rates of root and organism growth, soil conditions and temporal and spatial development of the rhizosphere. – *Annals of Botany*, 97/5: 839–855.
- WEIMAR, S. (1995): Untersuchungen zur Dynamik des spezifisch gebundenen Ammoniums begüllter Böden der Niederrheinischen Bucht. – *Dissertation, Universität Bonn*.
- WEIMAR, S., SCHERER, H.W. & VEERHOFF, M. (1993): Gehalte an nicht austauschbarem $\text{NH}_4\text{-N}$ auf repräsentativen landwirtschaftlich genutzten Standorten der Köln/Aachener Bucht. – *Agrarbiological Research*, 46: 331–339.
- WERNER, M.R. (1990): Earthworm Ecology and Sustaining Agriculture. – *Components*, 1/4: 12–18.
- WERNER, M.R. & DINDAL, D.L. (1990): Earthworm community dynamics in conventional and low-input agroecosystems. – *Revue D'Ecologie et de Biologie du Sol*, 26: 427–437.
- XIE, Y., LUO, W., REN, B. & LI, F. (2007): Morphological and physiological responses to sediment type and light availability in roots of the submerged plant *Myriophyllum spicatum*. – *Annals of Botany*, 100/7: 1517–1523.
- XIE, Y., REN, B. & LI, F. (2009): Increased nutrient supply facilitates acclimation to high-water level in the marsh plant *Deyeuxia angustifolia*. The response of root morphology. – *Aquatic Botany*, 91: 1–5.

Danksagung

An dieser Stelle möchte ich mich bei all denjenigen bedanken, die zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen haben.

Herrn Prof. Dr. Heinrich Wilhelm Scherer danke ich sehr herzlich für die Überlassung des interessanten Themas, die freundliche und unermüdliche Betreuung, sowie die ständige und konstruktive Diskussionsbereitschaft.

Herrn Prof. Dr. Ulrich Köpke sei gedankt für die selbstverständliche Übernahme des Korreferates und der erstklassigen Leitung des Gesamtprojektes DFG FOR1320.

Für die Organisation und Betreuung des Gesamtprojektes bedanke ich mich ebenso bei Frau Dr. Miriam Athmann und Herrn Dr. Timo Kautz. Im besonderen Maße gilt mein Dank den technischen Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern vom Institut für Organischen Landbau (Wiesengut) für die Anlage und Pflege des Feldversuchs.

Frau Prof. Dr. Doris Vetterlein danke ich sehr für die gute Kooperation im Zusammenhang mit dem Versuch „Einfluss von Kalium und Calcium auf die Mobilisierung von spezifisch gebundenem Ammonium“. Mein besonders herzlicher Dank gilt ihr auch für die freundliche und ausgezeichnete Betreuung während meines Aufenthaltes am Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung, Department Bodenphysik, in Halle a.d. Saale danken. Mein Dank gilt auch den Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern des Departments Bodenphysik, insbesondere Frau Claudia Hoffmann-Jäniche und Herrn Dr. Oliver Spott.

Für die gute Zusammenarbeit beim Versuch „Gehalt an spez. geb. NH_4^+ in den Bioporen verschiedener Bodentiefen nach Ausbringung von ^{15}N -markiertem Pflanzenmaterial auf die Bodenoberfläche“ danke ich herzlich meinem Mitdoktoranden Paul Martin Küpper.

Frau Dr. Doreen Fischer vom Helmholtz-Zentrum für Gesundheit und Umwelt in München, Research Unit Environmental Genomics, danke ich für die Kooperation im Zusammenhang mit dem Versuch „Einfluss einer Ammonium- bzw. Nitratdüngung auf die spezifische Bindung von NH_4 -Ionen“.

Herrn Prof. Dr. Diedrich Steffens und Herrn Roland Pfanschilling vom Institut für Pflanzenernährung der Justus-Liebig-Universität Gießen bin ich sehr dankbar für die Einarbeitung in die Analyseverfahren zur Bestimmung des spezifisch gebundenen Ammoniums in Böden.

Mein ganz besonderer Dank gilt den Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern des Institutes für Nutzpflanzenwissenschaften und Ressourcenschutz, Abteilung Pflanzenernährung, für die stete Hilfsbereitschaft und Unterstützung während meiner Arbeit. Im Besonderen möchte ich Dank sagen: Herrn PD. Dr. Thomas Eichert für das konstruktive Korrekturlesen meiner Dissertation sowie für die unkomplizierte Hilfe bei Statistikfragen; Frau Waltraud Köhler für die unermüdliche Unterstützung in Sachen Pflanzenanzucht, Probenahmetechnik und Probenaufbereitung; Frau Deborah Rupprecht für die ^{15}N -Analysen am Massenspektrometer und Frau Angelika Glogau für N-Analysen am Elementaranalysegerät.

Meinen beiden studentischen Hilfskräften Daniel Fallaschinski und Étienne Jahns bin ich sehr dankbar für die tatkräftige Unterstützung bei der Entnahme und Vorbereitung unzähliger Bodenproben, sowie für die Hilfe im Labor.

Der Deutschen Forschungsgemeinschaft bin ich zu aufrichtigem Dank verpflichtet für die finanzielle Unterstützung meiner Arbeit.

Bei meinen Mitdoktorandinnen und Mitdoktoranden vom INRES Pflanzenernährung, vom IOL und von der Forschergruppe FOR1320 möchte ich mich auch herzlich für eine sehr schöne Zeit bedanken.

Ein ganz besonders herzlicher Dank gilt meinen Eltern, die mir stets den Rücken gestärkt und mich auf diesem Weg begleitet haben. Auch meinem Bruder Philip und meinen Freunden, besonders Carlos Pancho Yanza, danke ich von Herzen für die moralische Unterstützung.