Humboldt-Universität zu Berlin

Untersuchungen zur Erfassung der Nitratverlagerung und Stickstoffkonservierung während des Winters in Abhängigkeit von der Bodenbearbeitung, Bodenbedeckung und N-Düngung

Dissertation

zur Erlangung des akademischen Grades
doctor rerum agriculturarum
(Dr. rer. agr.)

eingereicht an der
Landwirtschaftlich-Gärtnerischen Fakultät
der Humboldt-Universität zu Berlin

von

Dipl.-Ing. agr. Martin Schumann
geboren am 21.11.1961 in Naila

Präsident der Humboldt-Universität zu Berlin:
Prof. Dr. J. Mlynek

Dekan der Landwirtschaftlich-Gärtnerischen Fakultät
Prof. Dr. U. J. Nagel

Gutachter: 1. Prof. Dr. H. Herzog
2. Prof. Dr. K. Richter

Tag der mündlichen Prüfung: 07.04.2005

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis
Tabellenverzeichnis
Verwendete Zeichen und Abkürzungen .....

1 Einleitung 1

1.1 Einführung und Problemstellung 1
1.2 Zielsetzung 5

2 Material und Methoden 7

2.1 Versuchsstandort und –beschreibung 7
2.2 Versuchsablauf und Untersuchungsprogramm 12
2.3 Angewandte Methoden 12
2.3.1 Boden 12
2.3.2 Pflanze 15
2.3.3 Klima 15
2.3.4 Modelle zum Wasserhaushalt und N-Austrag 16
2.3.5 Statistische Methoden 20

3 Ergebnisse 22

3.1 Beobachtungen während des Winterhalbjahres 1990/91 22
3.1.1 Wasserhaushalt und N-Austrag 22
3.1.2 Boden N_{min} 29
3.1.3 N-Entzug der Zwischenfrucht 32
3.2 Beobachtungen während des Winterhalbjahres 1991/92 34
3.2.1 Wasserhaushalt und N-Austrag 34
3.2.2 Boden N_{min} 51
3.2.3 N-Entzug der Zwischenfrucht 53
3.3 Beobachtungen während des Winterhalbjahres 1992/93 56
3.3.1 Nitrat-N-Gehalt in der Bodenlösung 56
3.3.2 Boden N_{min} 58
3.3.3 N-Entzug der Zwischenfrucht 60
3.4 Beobachtungen während des Winterhalbjahres 1993/94 62
3.4.1 Wasserhaushalt und N-Austrag 62
3.4.2 Boden N_{min} 75
3.4.3 N-Entzug der Zwischenfrucht 78
3.5 Beobachtungen während der Sommerhalbjahre 80
3.5.1 Boden N_{min} und N-Gehalt des Sommerweizens während der Vegetationsperiode .. 80
3.5.2 Ertrag und N-Entzug des Sommerweizens 83
3.5.3 Boden N_{min} nach der Weizenernte 86
3.6 Gegenüberstellung verschiedener Ansätze zur Abschätzung der Sickerwassermengen 89
3.6.1 Gegenüberstellung von Ansatz A und C 89
3.6.2 Gegenüberstellung von Ansatz B und C 91
3.6.3 Gegenüberstellung von Ansatz D und C 92

4 Diskussion 94

4.1 Winterliche Sickerung und N-Dynamik 94
4.2 Methodische Vorgehensweise 106
4.3 Nachwirkungen auf die Hauptfrucht 119
4.4 Schlussfolgerungen 121

5 Zusammenfassung 122

6 Summary 124

7 Literaturverzeichnis 126

8 Anhang 133

Danksagung 145

Abbildungsverzeichnis

		Seite
Abb. 1:	Niederschlagssummen und monatliche Temperaturmittel in den Versuchsjahren 1990/91 und 1991/92 und langjähriges Mittel am Standort Berlin-Dahlem	8
Abb. 2:	Niederschlagssummen und monatliche Temperaturmittel in den Versuchsjahren 1992/93 und 1993/94 und langjähriges Mittel am Standort Berlin-Dahlem	9
Abb. 3:	Fruchtabfolge auf den Versuchsflächen während des Versuchsablaufs	10
Abb. 4:	Bestandteile der Saugkerzen und Tensiometer	14
Abb. 5:	Verlauf des Bodenwasserpotentials in 30 cm Tiefe im Winterhalbjahr 1990/91 unter Brache und Zwischenfrucht bei unterschiedlicher N-Düngung und Bodenbearbeitung, mittlere Standardabweichung der Brache/Zwischenfrucht für fünf Zeiträume	23
Abb. 6:	Sickerung bzw. Aufwärtsbewegung aus 30 cm Tiefe unter Brache und Zwischenfrucht bei unterschiedlicher N-Düngung und Bodenbearbeitung in 14-tägigen Intervallen im Winterhalbjahr 1990/91	24
Abb. 7:	Mittlerer Nitrat-N-Gehalt in der Bodenlösung in 30 cm Tiefe unter Brache und Zwischenfrucht bei unterschiedlicher N-Düngung und Bodenbe-arbeitung für die 14-tägigen Berechnungsintervalle im Winterhalbjahr 1990/91	26
Abb. 8:	Verlauf des N-Austrages aus 30 cm Tiefe unter Brache und Zwischenfrucht bei unterschiedlicher N-Düngung und Bodenbearbeitung im Winterhalbjahr 1990/91	28
Abb. 9:	Sickerung bzw. Aufwärtsbewegung aus 30 cm Tiefe unter Brache und Zwischenfrucht bei unterschiedlicher N-Düngung und Bodenbearbeitung im Winterhalbjahr 1991/92	35
Abb. 10:	Mittlerer Nitrat-N-Gehalt in der Bodenlösung in 30 cm Tiefe unter Brache und Zwischenfrucht bei unterschiedlicher N-Düngung und Bodenbe-arbeitung für die 14-tägigen Berechnungsintervalle im Winterhalbjahr 1991/92	38
Abb. 11:	Mittlerer Nitrat-N-Gehalt in der Bodenlösung in 60 cm Tiefe unter Brache und Zwischenfrucht bei unterschiedlicher N-Düngung und Bodenbe-arbeitung für die 14-tägigen Berechnungsintervalle im Winterhalbjahr 1991/92	40
Abb. 12:	Mittlerer Nitrat-N-Gehalt in der Bodenlösung in 90 cm Tiefe unter Brache und Zwischenfrucht bei unterschiedlicher N-Düngung und Bodenbe-arbeitung für die 14-tägigen Berechnungsintervalle im Winterhalbjahr 1991/92	41

Abb. 13: Mittlerer Nitrat-N-Gehalt in der Bodenlösung in 120 cm Tiefe unter Brache und Zwischenfrucht bei unterschiedlicher N-Düngung und Bodenbe-arbeitung für die 14-tägigen Berechnungsintervalle im Winterhalbjahr 1991/92 43

Abb. 14: Verlauf des N-Austrages aus 30 cm Tiefe unter Brache und Zwischenfrucht bei unterschiedlicher N-Düngung und Bodenbearbeitung im Winterhalbjahr 1991/92 45

Abb. 15: Verlauf des N-Austrages aus 60 cm Tiefe unter Brache und Zwischenfrucht bei unterschiedlicher N-Düngung und Bodenbearbeitung im Winterhalbjahr 1991/92 46

Abb. 16: Verlauf des N-Austrages aus 90 cm Tiefe unter Brache und Zwischenfrucht bei unterschiedlicher N-Düngung und Bodenbearbeitung im Winterhalbjahr 1991/92 48

Abb. 17: Verlauf des N-Austrages aus 120 cm Tiefe unter Brache und Zwischen-frucht bei unterschiedlicher N-Düngung und Bodenbearbeitung im Winter-halbjahr 1991/92 49

Abb. 18: Sickerung bzw. Aufwärtsbewegung aus 30 cm Tiefe unter Brache und Zwischenfrucht in 14-tägigen Intervallen im Winterhalbjahr 1993/94 62

Abb. 19: Mittlerer Nitrat-N-Gehalt in der Bodenlösung in 30 cm Tiefe unter Brache und Zwischenfrucht bei unterschiedlicher N-Düngung und Bodenbe-arbeitung für die 14-tägigen Berechnungsintervalle im Winterhalbjahr 1993/94 65

Abb. 20: Mittlerer Nitrat-N-Gehalt in der Bodenlösung in 60 cm Tiefe unter Brache und Zwischenfrucht bei unterschiedlicher N-Düngung und Bodenbe-arbeitung für die 14-tägigen Berechnungsintervalle im Winterhalbjahr 1993/94 67

Abb. 21: Mittlerer Nitrat-N-Gehalt in der Bodenlösung in 90 cm Tiefe unter Brache und Zwischenfrucht bei unterschiedlicher N-Düngung und Bodenbe-arbeitung für die 14-tägigen Berechnungsintervalle im Winterhalbjahr 1993/94 69

Abb. 22: Mittlerer Nitrat-N-Gehalt in der Bodenlösung in 120 cm Tiefe unter Brache und Zwischenfrucht bei unterschiedlicher N-Düngung und Bodenbe-arbeitung für die 14-tägigen Berechnungsintervalle im Winterhalbjahr 1993/94 71

Abb. 23: Verlauf des N-Austrages aus 30 cm Tiefe unter Brache und Zwischenfrucht bei unterschiedlicher N-Düngung und Bodenbearbeitung im Winterhalbjahr 1993/94 73

Abb. 24: Kumulativer Verlauf der Sickerung in 120 cm Tiefe unter Brache während des Winterhalbjahres 1993/94 berechnet für drei Messparallelen 112

Tabellenverzeichnis

		Seite
Tab. 1:	Aufbau des mehrjährigen Feldversuchs	10
Tab. 2:	Erfasste Witterungsparameter, Messmethode und Bestimmungshöhen	16
Tab. 3:	Gesättigte Wasserleitfähigkeit typischer Horizonte der Versuchsflächen	20
Tab. 4:	Summe der Nettosickerung aus 30 cm Tiefe in Abhängigkeit von der Bodenbearbeitung, Bodenbedeckung und N-Düngung für den Zeitraum 13.11.90 bis 18.2.91	25
Tab. 5:	Summe des N-Austrages aus 30 cm Tiefe in Abhängigkeit von der Bodenbearbeitung, Bodenbedeckung und N-Düngung für den Zeitraum 13.11.90 bis 18.2.91	29
Tab. 6:	N_{min}-Gehalt vor Versuchsanlage (15.8.90) in drei Bodentiefen der späteren Parzellen	30
Tab. 7:	N_{min}-Gehalt zum 15.11.90 in drei Bodentiefen in Abhängigkeit von der Bodenbearbeitung, Bodenbedeckung und N-Düngung in drei Bodentiefen	31
Tab. 8:	N_{min}-Gehalt zum 15.3.91 in drei Bodentiefen in Abhängigkeit von der Bodenbearbeitung, Bodenbedeckung und N-Düngung	32
Tab. 9:	Einfluss von Bodenbearbeitung und N-Düngung auf die Frisch- und Trockenmasse, den N-Gehalt und N-Entzug der Zwischenfrucht zum 5.11.90	33
Tab. 10:	Summen der Nettosickerung aus vier verschiedenen Bodentiefen in Abhängigkeit von der Bodenbearbeitung, Bodenbedeckung und N-Düngung für den Zeitraum 9.12.91 bis 1.3.92	36
Tab. 11:	Summen des N-Austrages aus vier verschiedenen Bodentiefen in Abhängigkeit von der Bodenbearbeitung, Bodenbedeckung und N-Düngung für den Zeitraum 9.12.91 bis 1.3.92	50
Tab. 12:	N_{min}-Gehalt zum 18.10.91 in drei Bodentiefen in Abhängigkeit von der Bodenbearbeitung, Bodenbedeckung und N-Düngung	52
Tab. 13:	N_{min}-Gehalt zum 9.3.92 in drei Bodentiefen in Abhängigkeit von Bodenbearbeitung, Bodenbedeckung und N-Düngung	53
Tab. 14:	Einfluss von Bodenbearbeitung und N-Düngung auf die Frisch- und Trockenmasse, den N-Gehalt und N-Entzug der Zwischenfrucht zum 14.11.91	54

Tab. 15:	Einfluss von Bodenbearbeitung und N-Düngung auf die Frisch- und Trockenmasse, den N-Gehalt und N-Entzug der Zwischenfrucht zum 18.3.92	55
Tab. 16:	Nitrat-N-Gehalt der Bodenlösung zum 4.12.92 in vier Bodentiefen in Abhängigkeit von Bodenbearbeitung, Bodenbedeckung und N-Düngung	56
Tab. 17:	Nitrat-N-Gehalt der Bodenlösung zum 17.3.93 in vier Bodentiefen in Abhängigkeit von Bodenbearbeitung, Bodenbedeckung und N-Düngung	58
Tab. 18:	N_{min}-Gehalt zum 25/26.11.92 in drei Bodentiefen in Abhängigkeit von Bodenbearbeitung, Bodenbedeckung und N-Düngung	59
Tab. 19:	N_{min}-Gehalt zum 16.3.93 in drei Bodentiefen in Abhängigkeit von Bodenbearbeitung, Bodenbedeckung und N-Düngung	60
Tab. 20:	Einfluss von Bodenbearbeitung und N-Düngung auf die Frisch- und Trockenmasse, den N-Gehalt und N-Entzug der Zwischenfrucht zum 10.3.93	61
Tab. 21:	Summen der Nettosickerung aus vier verschiedenen Bodentiefen in Abhängigkeit von der Bodenbearbeitung, Bodenbedeckung und N-Düngung für den Zeitraum 3.11.93 bis 8.3.94	63
Tab. 22:	Summen des N-Austrages aus vier verschiedenen Bodentiefen in Abhängigkeit von der Bodenbearbeitung, Bodenbedeckung und N-Düngung für den Zeitraum 3.11.93 bis 8.3.94	74
Tab. 23:	N_{min}-Gehalt zum 18.10.93 in drei Bodentiefen in Abhängigkeit von Bodenbearbeitung, Bodenbedeckung und N-Düngung	76
Tab. 24:	N_{min}-Gehalt zum 28.12.93 in drei Bodentiefen in Abhängigkeit von Bodenbearbeitung, Bodenbedeckung und N-Düngung	77
Tab. 25:	N_{min}-Gehalt zum 28.3.94 in drei Bodentiefen in Abhängigkeit von Bodenbearbeitung, Bodenbedeckung und N-Düngung	78
Tab. 26:	Einfluss von Bodenbearbeitung und N-Düngung auf die Frisch- und Trockenmasse, den N-Gehalt und N-Entzug der Zwischenfrucht zum 17.12.93	79
Tab. 27:	N_{min}-Gehalt zum 15.5.91 in drei Bodentiefen in Abhängigkeit von Bodenbearbeitung, Bodenbedeckung und N-Düngung während des Winterhalbjahres	80
Tab. 28:	N_{min}-Gehalt zum 25.6.92 in drei Bodentiefen in Abhängigkeit von Bodenbearbeitung, Bodenbedeckung und N-Düngung während des Winterhalbjahres	81

Tab. 29: N_{min}-Gehalt zum 10.6.93 in drei Bodentiefen in Abhängigkeit von Bodenbearbeitung, Bodenbedeckung und N-Düngung während des Wintehalbjahres 82

Tab. 30: N_{min}-Gehalt zum 23./27.6.94 in drei Bodentiefen in Abhängigkeit von Bodenbearbeitung, Bodenbedeckung und N-Düngung während des Winterhalbjahres 82

Tab. 31: Nachwirkungen von Bodenbearbeitung, Bodenbedeckung und N-Düngung im Winterhalbjahr auf den Stickstoffgehalt des Sommerweizens während der Vegetationsperiode zum 21./22.6.93 und 21.6.94 83

Tab. 32: Nachwirkungen von Bodenbearbeitung, Bodenbedeckung und N-Düngung im Winterhalbjahr auf den Stickstoffgehalt zur Ernte im Korn des Sommerweizens der vier Versuchsjahre 84

Tab. 33: Nachwirkungen von Bodenbearbeitung, Bodenbedeckung und N-Düngung im Winterhalbjahr auf den Kornertrag des Sommerweizens der vier Versuchsjahre 85

Tab. 34: Nachwirkungen von Bodenbearbeitung, Bodenbedeckung und N-Düngung im Winterhalbjahr auf den N-Entzug durch Korn und Stroh des Sommerweizens der Versuchsjahre 1991, 1993 und 1994 86

Tab. 35: N_{min}-Gehalt zum 13./14.8.91 in drei Bodentiefen in Abhängigkeit von Bodenbearbeitung, Bodenbedeckung und N-Düngung während des Winterhalbjahres 87

Tab. 36: N_{min}-Gehalt zum 23./24.8.93 in drei Bodentiefen in Abhängigkeit von Bodenbearbeitung, Bodenbedeckung und N-Düngung während des Winterhalbjahres 87

Tab. 37: N_{min}-Gehalt zum 8./15.8.94 in drei Bodentiefen in Abhängigkeit von Bodenbearbeitung, Bodenbedeckung und N-Düngung während des Winterhalbjahres 88

Tab. 38: Summen der Sickerung unter Brache und Zwischenfrucht für den Zeitraum 9.12.91 bis 1.3.92 berechnet nach Ansatz A und deren Differenzen zu Ansatz C in vier verschiedenen Bodentiefen 89

Tab. 39: Summen der Sickerung unter Brache und Zwischenfrucht für den Zeitraum 3.11.93 bis 8.3.94 berechnet nach Ansatz A und deren Differenzen zu Ansatz C in vier verschiedenen Bodentiefen 90

Tab. 40: Summen der Sickerung unter der Zwischenfrucht für den Zeitraum 9.12.91 bis 1.3.92 berechnet nach Ansatz B und deren Differenzen zu Ansatz C in vier verschiedenen Bodentiefen 92

Tab. 41: Summen der Sickerung unter der Zwischenfrucht für den Zeitraum 3.11.93 bis 8.3.94 berechnet nach Ansatz B und deren Differenzen zu Ansatz C in vier verschiedenen Bodentiefen 92

Tab. 42: Summen der Sickerung unter der Zwischenfrucht für die Zeiträume 9.12.91 bis 1.3.92 und 3.11.93 bis 8.3.94 berechnet nach Ansatz D und Ansatz C in der Bodentiefe von 90 cm (B_t-Horizont) 93

Tab. 43: N_{min}-Gehalt zur Versuchsanlage sowie vor Beginn der Sickerperiode (Oktober/November) in drei Bodentiefen unter den Winterrübsen in Abhängigkeit der N-Düngung und der Versuchsjahre 98

Tab. 44: N_{min}-Gehalt zur Versuchsanlage sowie vor Beginn der Sickerperiode (Oktober/November) in drei Bodentiefen unter der Brache in Abhängigkeit der N-Düngung und der Versuchsjahre 99

Tab. 45: Vorwinterlicher N-Entzug der Winterrübsen in Abhängigkeit der N-Düngung und der Versuchsjahre 100

Tab. 46: Winterlicher N-Austrag unter der Brache aus 30 cm Tiefe in Abhängigkeit von der Bodenbearbeitung und N-Düngung für drei Versuchsjahre 102

Tab. 47: Winterlicher N-Austrag aus 90 cm Tiefe in Abhängigkeit von der Boden-bearbeitung, Bodenbedeckung und N-Düngung für zwei Versuchsjahre 102

Tab. 48: Gegenüberstellung von vorwinterlichem Boden-N_{min}, der Differenz aus vor- und nachwinterlichem Boden-N_{min}, und des berechnetem N-Austrag für drei Bodentiefen und zwei Versuchsjahre im Mittel der einzelnen Varianten 104

Tab. 49: Einfluss der unterschiedlichen Sickerwassermengen nach Ansatz A und Ansatz C auf die N-Austräge aus vier Bodentiefen unter der Brache in Abhängigkeit von der Düngungsintensität für den Zeitraum 9.12.91 bis 1.3.92 109

Verwendete Zeichen und Abkürzungen

Geografische Angaben:

NN	normal Null
N	nördliche Breite
E	östliche Länge

Klimatische Parameter:

a	HAUDE-Faktor
e	Dampfdruck
e_s	Sättigungsdampfdruck
ETP	Evapotranspiration
N	Niederschlag

Bodenparameter:

K	Wasserleitfähigkeit
K_s	gesättigte Wasserleitfähigkeit
N_{min}	mineralischer Stickstoff
Q	Wasserfluss
S	Sickerungsrate
W	Bodenwasservorrat
z	Bodentiefe
α, a, n, m	VAN GENUCHTEN-Parameter
ψ_m	Matrixpotential
ψ_z	Gravitationspotential
θ	volumetrischer Wassergehalt
θ_s	Wassergehalt bei Sättigung
θ_r	Restwassergehalt

Versuchsbeschreibung:

P	Konventionelle Bodenbearbeitung (Pflug)
F	Reduzierte Bodenbearbeitung (Fräse)
B	Brache
Z	Zwischenfrucht
0	N-Düngung: 0 kg
1	N-Düngung: 50 kg
2	N-Düngung: 100 kg

Angaben zur Statistik:

A	Faktor: Bodenbearbeitung
B	Faktor: Bodenbedeckung
C	Faktor: N-Düngung im Herbst
n	Anzahl
n.s.	nicht signifikant
*/sign.	signifikant
P	Irrtumswahrscheinlichkeit (F-Test und Wilcoxen-Wilcox-Test)
s	Standardabweichung
α	Irrtumswahrscheinlichkeit (Tukey-Test und Vorzeichentest)
$\varnothing$	Durchschnitt

Sonstige:

N_t	Gesamtstickstoff
TDR	Time-Domaine-Reflektrometry
TS	Trockensubstanz

1 Einleitung

1.1 Einführung und Problemstellung

Mit der Nitratauswaschung aus landwirtschaftlich genutzten Böden ist stets auch die Gefahr der Belastung des Grundwassers verbunden und hat mögliche Probleme bei der Trinkwasserversorgung in der geforderten Qualität zur Folge. Diese ist hinsichtlich des Nitratgehaltes EU-weit geregelt, die einen Grenzwert von 50 mg/l vorschreibt. Die Wasserversorger traten dem Problem in der Vergangenheit mit dem Bau von Tiefbrunnen, der Erweiterung von Schutzgebieten und der Einleitung von Sanierungsmaßnahmen in bestehenden Schutzgebieten entgegen (MAIDL & BRUNNER, 1995), aber auch die Schließung einzelner Wasserwerke war erforderlich (DIEREND & SPETHMANN, 1994). Darüber hinaus entstanden zahlreiche Kooperationsmodelle zwischen Wasser- und Landwirtschaft (BACH & FREDE, 1995).

Seitens des Gesetzgebers wurde der Problematik auf Bundesebene mit der Einführung der ‚Verordnung über die gute fachliche Praxis beim Düngen', die 1996 in Kraft getreten ist, begegnet. Zusätzliche Maßnahmen wurden von den Ländern ergriffen, wie beispielsweise die seit 1988 gültige, und 2001 überarbeitete ‚Schutzgebiets- und Ausgleichs-Verordnung' (SchALVO) in Baden-Württemberg belegt. In beiden Verordnungen sind Grenzwerte für bestimmte Parameter enthalten, die mit der Nitratauswaschung verknüpft sind. Bei der ‚Verordnung über die gute fachliche Praxis beim Düngen' ist dies der im Nährstoffvergleich ausgewiesene N-Überschuss und bei der ‚SchALVO' der vorwinterliche N_{min}-Gehalt im Boden.

Das Kriterium des N-Überschusses wird auch in wissenschaftlichen Arbeiten herangezogen. Insbesondere dann, wenn die Form der landwirtschaftlichen Nutzung im Hinblick auf die Nitratproblematik auf regionaler und nationaler Ebene bewertet werden soll. Wie BACH (1987) aber zu recht betont, schätzt das Ergebnis der Bilanzierung nur die ‚potentielle Nitratbelastung des Grundwassers' ab und stellt somit eine rein hypothetische Größe dar.

Der vorwinterliche N_{min}-Gehalt im Boden wird ebenfalls in einigen Arbeiten zur Abschätzung der Auswaschungsgefahr herangezogen. Dieser wird dann in der Regel dem nachwinterlichen Gehalt an mineralischem Stickstoff im Boden gegenübergestellt (BERGER &

KRETSCHMER, 1991; DIEREND & SPETHMANN, 1994; SOERENSEN, 1992), oder ist Bestandteil von Simulationsmodellen (KÖHLER et al., 1999; SIMON et al., 1988). Ein Zusammenhang zwischen dem N_{min}-Gehalt im Boden im Herbst und dem N-Austrag während des Winters wird von VAN DER PLOEG & HUWE (1988), jedoch nur in loser Form, bestätigt.

Exaktere Ergebnisse zur Beurteilung von acker- und pflanzenbaulicher Maßnahmen hinsichtlich der Nitratauswaschung liefern Lysimeterversuche. Mit ihrer Hilfe ist es möglich sowohl die anfallenden Sickerwassermengen, als auch deren Nitratkonzentration zu bestimmen, um quantitative Aussagen bezüglich des Sticksoffaustrages zu erhalten. Der Nachteil dieser Anlagen besteht in den hohen Installations- bzw. Präparationskosten, sowie ihrer begrenzten Anzahl und Verbreitung. Daher können die zahlreichen im Zusammenhang mit der Nährstoffauswaschung auftretenden Fragestellungen nur in beschränktem Umfang und an wenigen Standorten bearbeitet werden (TIMMERMANN et al., 1975). Ähnliches gilt aufgrund der begrenzten Anzahl an möglichen Varianten für die Versuchsdurchführung auf Dränflächen.

Eine weitere methodische Vorgehensweise zur Quantifizierung des N-Austrages besteht in der getrennten Bestimmung der Nitratkonzentration in der Bodenlösung einerseits und der Sickerwassermenge andererseits (STREBEL et al., 1973). Die Gewinnung der Proben von Bodenwasser erfolgt dabei relativ einfach anhand von Saugkerzen (Unterdrucklysimeter), die von CZERATZKI (1971) vorgestellt und im weiteren Verlauf weiterentwickelt wurden (GROSSMANN et al., 1987).

Eine entscheidende Bedeutung kommt der Bestimmung der Sickerwassermengen zu. Eine Abschätzung der Sickerwassermengen ist mit Hilfe der vereinfachten Wasserhaushaltsgleichung, bei der ausschließlich auf meteorologische Parameter zurückgegriffen wird (klimatische Wasserbilanz), nach RENGER et al. (1974) möglich. Dieses Verfahren wurde im Rahmen von pflanzenbaulichen Untersuchungen vielfach angewandt (BENKE et al., 1991; SCHMIDT et al. 2000). Teilweise wird diese vereinfachte Wasserhaushaltsgleichung durch Messungen der Bodenfeuchte ergänzt, und die reale Evaporation in Abhängigkeit von der nutzbaren Feldkapazität abgeschätzt (TIMMERMANN et al., 1975; TEIWES et al., 1996). Von der Erfassung der Sickerwassermengen auf separaten und drainierten Parzellen wird aus Schweden berichtet (STENBERG et al., 1999).

Seitens der Bodenkunde sind verschiedene Ansätze zur Kalkulation der abwärts gerichteten Wasserflüsse (RENGER et al., 1975; VAN DER PLOEG & BENECKE, 1981; HENNIG, 1992) und dem Transport der darin gelösten Nährstoffe (BENECKE et al., 1975; BARRACLOUGH, 1989) erarbeitet worden. Die praktische Anwendbarkeit der zum Teil komplexen Wasserhaushaltsgleichungen des Bodens ist eng mit der zuverlässigen Bestimmbarkeit der erforderlichen Bodenparameter verknüpft. Durch den Fortschritt in der Messtechnik wie beispielsweise der ‚Time-Domaine-Reflektrometry' wurden zudem die Voraussetzungen geschaffen, einzelne Komponenten dieser Gleichungen wie den volumetrischen Wassergehalt des Bodens in der erforderlichen zeitlichen und räumlichen Auflösung zu erfassen.

Aus Sicht des Pflanzenbaus kommt dem Anbau von Winterzwischenfrüchten hinsichtlich der größtenteils während der Winterhalbjahre stattfindenden Stickstoffauswaschung eine übergeordnete Bedeutung zu, da sie in der Lage sind den nach der Ernte der Hauptfrucht verbleibenden mineralischen Stickstoff im Boden in Form von pflanzlicher Biomasse zu binden und so vor einer Verlagerung zu schützen. Gegenüber brachliegenden Flächen führt der Anbau von Zwischenfrüchten zu einer deutlichen Reduzierung des vorwinterlichen N_{min}-Vorrats im Boden (BERENDONK, 1984; SOERENSEN, 1992) sowie zu einer Absenkung des Nitratgehaltes in der Bodenlösung während der Auswaschungsperiode (BERENDONK, 1988).

Darüber hinaus gibt es Unterschiede zwischen einzelnen Arten von Zwischenfrüchten bezüglich ihrer Wirksamkeit der winterlichen Stickstoffkonservierung. Dabei übt die Winterhärte der Zwischenfrüchte einen erheblichen Einfluss auf die Verringerung der Auswaschungsgefahr aus. Untersuchungen von BERGER et al. (1996) zufolge können bei abfrierenden Zwischenfrüchten (Ölrettich, Phacelia und Senf) während des Zeitraumes Vegetationsende bis Vegetationsbeginn bis zu 60 % der vor dem Winter gespeicherten N-Menge wieder freigesetzt werden, die dann im Folgenden einer möglichen Verlagerung in tiefere Bodenschichten unterliegt. Dieses Risiko kann mit dem Anbau von überwinternden Zwischenfrüchten wie Winterraps und –rübsen vermieden werden. SCHMALER et al. (1994) berichten von einem starken Anstieg der N_{min}-Gehalte im Boden und der Nitrat-Gehalte im Bodenwasser bis in 90 cm Tiefe nach Wintereintritt unter abgefrorenem Ölrettich, während die entsprechenden Werte unter Winterrübsen im Wesentlichen auf dem niedrigen Niveau des Vorwinters verblieben.

Aufgrund der begrenzten Wachstumszeit, die den Zwischenfrüchten bis zum Vegetationsende verbleibt, wirkt sich ein früher Saatzeitpunkt positiv auf die N-Retention aus (SOERENSEN, 1992). Ebenso fördern optimale Wachstumsbedingungen die N-Aufnahme, so dass neben dem nicht beeinflussbaren Witterungsverlauf einer mineralischen Startdüngung zur Saat große Bedeutung zukommt. SCHNÜBBE (1992) empfiehlt in jedem Fall eine Startdüngung von 20 bis 60 kg N pro Hektar, wobei schnell zur Verfügung stehender Ammonnitratdünger bevorzugt werden sollte. BERGER et al. (1996) beurteilen die Düngung zur Zwischenfrucht differenziert in Abhängigkeit der jeweiligen Winterhärte. Da bei abfrierenden Arten ein großer Anteil der aufgenommenen N-Menge wieder freigesetzt wird und zudem diese Mineralisierung durch die Verringerung des C/N-Verhältnisses infolge einer Düngung gefördert wird, sollte im Hinblick auf eine Verringerung des Austragsrisikos auf eine zusätzliche N-Gabe verzichtet werden. Bei Winterraps und –rübsen kann bei gut entwickelten Beständen mit Entzügen von etwa 100 kg/ha gerechnet werden. Daran sollte sich die Startdüngung zur Zwischenfrucht unter Berücksichtigung des mineralischen N-Gehaltes im Boden und der zu erwartenden Netto-Mineralisationsrate orientieren.

Die Bedeutung der Art der Bodenbearbeitung nach der Ernte der Hauptfrucht wird unterschiedlich bewertet. Häufig wird von einer höheren N-Mineralisation bei der Bearbeitung mit dem Pflug gegenüber der Direktsaat berichtet (ARNOTT & CLEMENT, 1966; DOWDELL & CANELL, 1975; POWLSON, 1980; NYBORG & MAHLI, 1989), wobei die von ARNOTT & CLEMENT (1966) sowie von POWLSON (1980) beobachteten Unterschiede nur geringfügig waren. Nach konventioneller Bearbeitung werden im Vergleich zur reduzierten Bodenbearbeitung sowohl höhere N-Austräge (HARRIS & COLBOURNE, 1986; GOSS et al., 1988), als auch geringere (TYLER & THOMAS, 1977) nachgewiesen. Bei anderen Untersuchungen ergab diese Gegenüberstellung keine signifikanten Unterschiede (GROFFMAN et al., 1987; ANGLE, 1990).

Neben der Verringerung der Nitratauswaschung infolge der winterlichen N-Konservierung stellt die darauf folgende Nährstofffreisetzung zur nach dem Umbruch angebauten Hauptfrucht einen weiteren Aspekt des Zwischenfruchtanbaus dar. Unabhängig von der Art der Zwischenfrucht konnten bei der Hauptfrucht (Gerste) Mehrerträge nachgewiesen werden (BERENDONK, 1984), wobei sich dieser Effekt bei Reduzierung des Düngeraufwands verstärkte. Besonders vorteilhaft wirkte sich dabei der Anbau von legumen Zwischenfrüchten aus, was von MÖLLER & REENTS (1999) sowohl bei nachfolgender Kartoffel, als auch bei

Weizen bestätigt wurde. Anhand von Untersuchungen mit markiertem ^{15}N-Stickstoff (MERBACH & WURBS, 1997) ließ sich mehr als 30 % der von Winterrübsen über Winter gespeicherten N-Menge in der Folgefrucht Mais nachweisen, der etwa 11 % seines N-Bedarfs aus dieser Quelle deckte.

1.2 Zielsetzung

Das Ziel dieser Arbeit bestand darin, im Rahmen eines mehrjährigen Feldversuches, anhand von Erhebungen zum Nitratgehalt in der Bodenlösung und unterschiedlichen Ansätzen zur Bestimmung der Sickerwassermenge, Einflussmöglichkeiten durch verschiedene acker- und pflanzenbauliche Maßnahmen im Hinblick auf den Stickstoffaustrag während der Winterhalbjahre zu erfassen.

Neben der klimatischen Wasserbilanz wurden weitere bodenkundliche Ansätze verwendet, die es erlaubten die Sickerwassermengen parzellenbezogen zu bestimmen, um damit einerseits zu statistisch auswertbaren Daten bezüglich der Sickerung und des N-Austrages in Abhängigkeit der einzelnen Maßnahmen zu gelangen. Andererseits sollten Erkenntnisse darüber erlangt werden, welche Praktikabilität und Schwachstellen die verschiedenen Modelle bei der Anwendung im Rahmen eines variantenreichen Feldversuches aufweisen, wobei die bei den gewählten Faktoren und Faktorstufen zu erwartenden Unterschiede zum N-Austrag realistisch widergespiegelt werden sollten.

Es war zu klären, in wieweit der Anbau einer Winterzwischenfrucht (Winterrübsen) gegenüber der Brache die Nitratauswaschung infolge von N-Aufnahme und Verringerung der Sickerwassermengen reduziert. Des weiteren zielte eine zusätzliche N-Düngung im Herbst darauf ab, durch Stimulation der anfänglichen Biomasseproduktion der Winterrübsen die N-Konservierung über die Düngermenge hinaus zu erhöhen.

Zu prüfen war zusätzlich der Einfluss der Art der Bodenbearbeitung im Herbst nach der Hauptfrucht. Es sollte geklärt werden, ob gegenüber der Bearbeitung mit dem Pflug die Auswaschung bei pflugloser, nicht wendender Bodenbearbeitung, bei der weniger Material intensiv durchlüftet wird und sich die verstärkte biologische Aktivität auf einen flachen Horizont beschränkt, verringern lässt.

Über die Effekte dieser Maßnahmen während der Winterhalbjahre hinaus sollten schließlich die Nachwirkungen der N-Konservierung bezüglich N-Verfügbarkeit im Boden sowie N-Aufnahme der Hauptfrucht (Sommerweizen) in den nachfolgenden Sommerhalbjahren erfasst werden.

2 Material und Methoden

2.1 Versuchsstandort und –beschreibung

Das dieser Arbeit zugrunde liegende Datenmaterial wurde in den Jahren 1990 bis 1994 am Versuchsstandort Dahlem (51 m über NN; Breite = 52° 28‘N; Länge = 13° 18‘E) der Humboldt-Universität zu Berlin erhoben.

Klima / Witterung

Der Versuchsstandort liegt im Übergangsbereich zwischen dem stärker maritim beeinflussten norddeutschen Flachland und dem kontinentalen osteuropäischen Festland. Das Klima Berlins kann nach der Klassifizierung von KÖPPEN (1931) als Cfb gekennzeichnet werden. Die jährlichen Niederschläge betragen im langjährigen Mittel (1961-1990) 549 mm bei einem Schwankungsbereich von 356 bis 736 mm. Das langjährige Temperaturmittel liegt bei 9,2 °C und schwankt von 7,7 bis 10,5 °C. Der kälteste Monat ist mit –0,1 °C der Januar, während die Durchschnittstemperatur im Monat Juli mit 18,6 °C den höchsten Wert erreicht. Abweichend von den langjährigen Mittelwerten, können folgende Beobachtungen hervorgehoben werden.

Das Versuchsjahr 1990/91 (Abb. 1) fiel durch einen sehr kalten Februar mit einem Monatsmittel von –2,1 °C und eine spät einsetzende Erwärmung auf. Ein warmer Juli kompensierte dann jedoch den Vegetationsrückstand der im Juni noch 2-3 Wochen betrug. Die Niederschlagssumme des Zeitraumes September bis Ende Februar lag mit 214,4 mm mit etwa 20 mm unter der des langjährigen Mittels, wobei die Niederschläge insbesondere im Monat Oktober mit lediglich 8,1 mm außergewöhnlich niedrig waren. Ein milder Witterungsverlauf kennzeichnete das Winterhalbjahr des Versuchsjahres 1991/92. Auffallend hoch war die Niederschlagsmenge im Monat März, die mit 81,6 mm mehr als das Doppelte des langjährigen Mittels betrug.

Im Hinblick auf die Niederschlagssumme des Zeitraumes Anfang September bis Ende Februar, die mit 214,4 (1990/91) bzw. 208,4 mm (1991/92) in den beiden vorangegangenen Versuchsjahren unter dem langjährigen Mittel (235,7 mm) lag, waren die Jahre 1992/93 sowie 1993/94 (Abb. 2) durch eine überdurchschnittlich hohe Niederschlagsmenge von 268,0 bzw. 287,4 mm während dieser Monate gekennzeichnet. Außergewöhnlich im Versuchsjahr

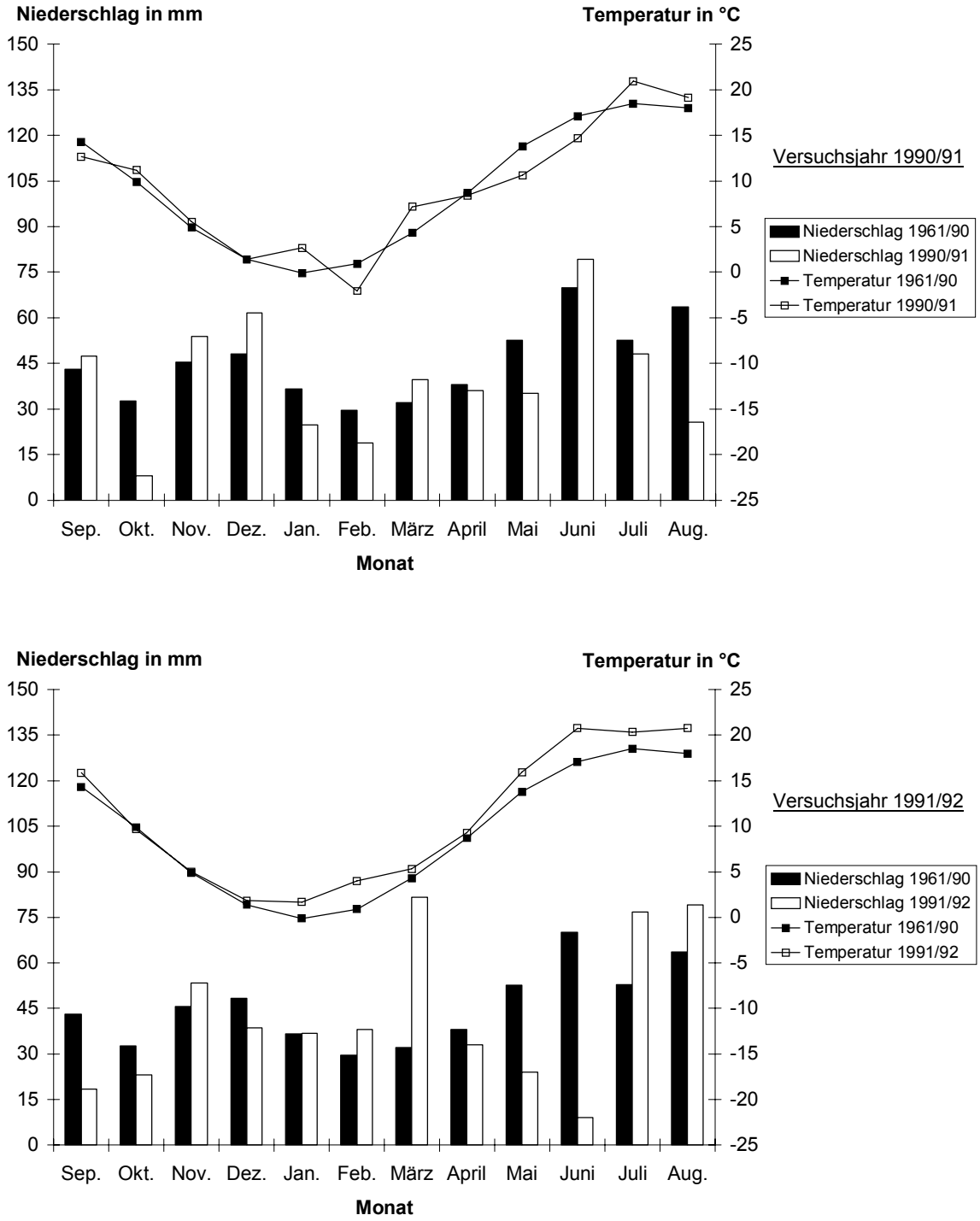


Abb. 1: Niederschlagssummen und monatliche Temperaturmittel in den Versuchsjahren 1990/91 und 1991/92 und langjähriges Mittel am Standort Berlin-Dahlem

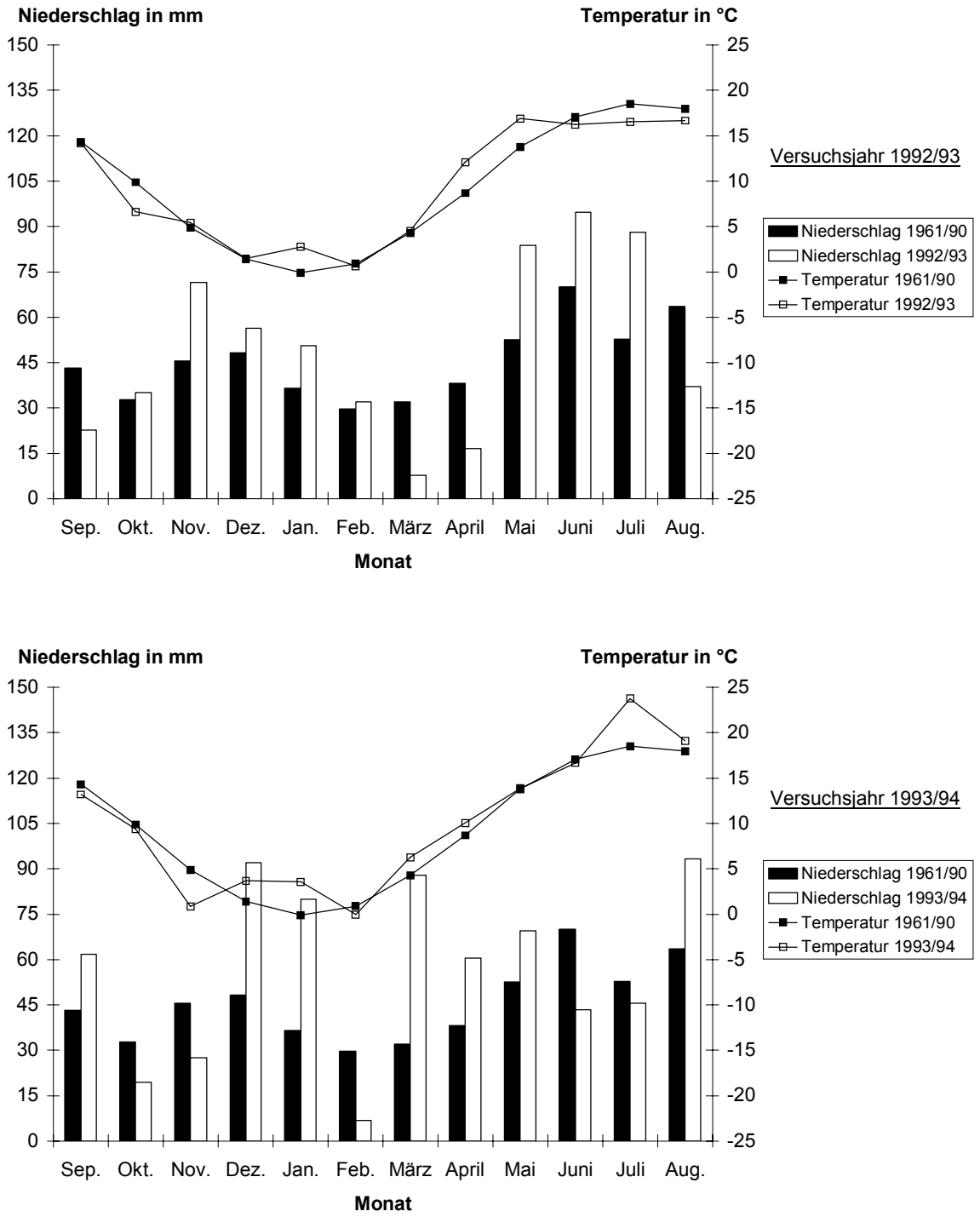


Abb. 2: Niederschlagssummen und monatliche Temperaturmittel in den Versuchsjahren 1992/93 und 1993/94 und langjähriges Mittel am Standort Berlin-Dahlem

1992/93 waren das Monatsmittel der Lufttemperatur von 2,8 °C für den Monat Januar gegenüber dem langjährigen Durchschnittswert von –0,1 °C und die früh einsetzende Erwärmung in den Monaten April und Mai. Bemerkenswert für das Versuchsjahr 1993/94 war der frühe Kälteeinbruch mit ersten Frosttagen in der zweiten Novemberhälfte. Darauf folgten ein milder Dezember und Januar mit Monatsmitteln von 3,7 °C bzw. 3,6 °C, die deutlich von den langjährigen Werten abwichen.

Boden

Der Boden hat sich auf einer Grundmoränenhochfläche aus Geschiebemergel weichseleiszeitlicher Ablagerungen, die mit Geschiebedeck- und Flugsanden überlagert wurde, gebildet. Es handelt sich um Parabraunerden-Sandkeilbraunerden mit teilweisen Übergängen zur Fahlerde. Die typische Horizontfolge ist A_p – A_l - A_l/IIB_t - IIC_v (FIA, 1992). Der Horizont IIC_v lag jedoch unterhalb des betrachteten Bodenkompartiments bis zu einer Tiefe von 120 cm.

Versuchsbeschreibung

Die Feldversuche über den Stickstoffaustrag wurden vierjährig alternierend auf zwei Flächen der Versuchsstation durchgeführt (Abb. 3). Die Anlage des Versuches erfolgte jeweils im Spätsommer nach der Ernte der Vorfrucht. In den Versuchsjahren 1990/1991 und 1991/1992 war dies Wintergerste in den beiden darauf folgenden Jahren Kartoffel. Als nachfolgende Hauptfrucht wurde im Frühjahr in allen vier Versuchsjahren Sommerweizen angebaut, bei der die Nachwirkungen der N-Konservierung erfasst wurden.

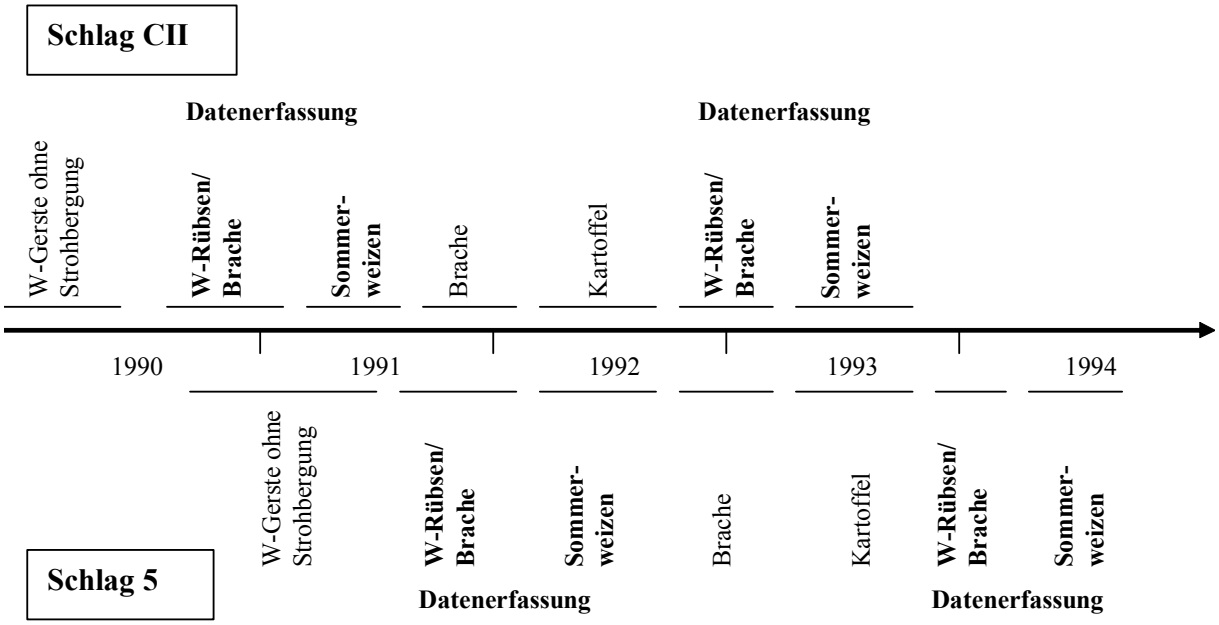


Abb. 3: Fruchtabfolge auf den Versuchsflächen während des Versuchsablaufs

Innerhalb der einzelnen Versuche (Tab. 1) wurde die Wirkung der Bodenbearbeitung (konventionell: 25 cm Pflugtiefe; reduziert: 10 cm Frästiefe), des Zwischenfruchtanbaus (gegenüber Brache) und der N-Düngung (0 kg N/ha; 50 kg N/ha) im Hinblick auf den N-Austrag während des Winterhalbjahres überprüft. Bei der Bodenbedeckung ‚Zwischenfrucht'

Tab. 1: Aufbau des mehrjährigen Feldversuchs

Faktor			**Faktorstufen**		**Symbol ***
A	Bodenbearbeitung		Konventionell	1	**P**
			Reduziert	2	**F**
B	Bodenbedeckung		Brache	1	**B**
			Zwischenfrucht	2	**Z**
C	N-Düngung im Herbst (kg * ha^{-1})		0	1	**0**
			50	2	**1**
	+ 2 Zusatzvarianten	**PZ / FZ**	100	3	**2**
Zahl der Prüfglieder: 2 * 2 * 2 + 2 = 10					
Anzahl der Wiederholungen:		6			
Zahl der Teilstücke:		60			
Größe der Teilstücke:		5 m * 5 m = 25 m^2			
Versuchsanlage:		Spaltanlage			
Versuchsfrucht und Sorte:		Winterrübsen *Titan* Sommerweizen *Syros*			

wurde eine dritte Faktorstufe der N-Düngung von 100 kg N/ha zusätzlich mit aufgenommen. Die in der rechten Spalte (*) angegebenen Symbole zur Abkürzung der Faktoren und Faktorstufen werden nachfolgend zur Kennzeichnung der Prüfglieder verwendet.

2.2 Versuchsablauf und Untersuchungsprogramm

Nach der Ernte der Vorfrucht wurde der Versuchsschlag für die nachfolgende Boden–bearbeitung eingemessen. Im Anschluss an die Einsaat der Zwischenfrucht wurden die ersten Bodenproben genommen. Darauf folgte die Installation von insgesamt 480 Saugkerzen, 336 Tensiometern und 126 TDR-Sonden, wobei im ersten Versuchsjahr 1990/91 die verschiedenen Sonden noch nicht im vollen Umfang im Eigenbau hergestellt bzw. geliefert waren. In der Regel waren diese Arbeiten Mitte Oktober abgeschlossen, so dass die Datenerhebung zum Wasserhaushalt des Bodens und die Probenahme von Bodenwasser zur weiteren Analyse beginnen konnten. Vor dem Umbruch und der Einsaat des darauf folgenden Sommerweizens Ende März wurden sämtliche Untersuchungsgeräte geräumt. Eine erneute Installation der Geräte erfolgte in geringeren Umfang nach der Saat der Nachfrucht Sommerweizen, um eventuelle Nachwirkungen zu erfassen. Darüber hinaus wurde im Rahmen einer Diplomkartierung auf dem Schlag 5 eine Feinkartierung aller Parzellen durchgeführt (ARZT & KÜBLER, 1996). Die allgemeinen Angaben zum Ablauf der vier Versuchsjahre sowie die zeitliche Auflösung des an Boden und Pflanze durchgeführten Untersuchungsprogramms finden sich im Anhang (Tab. A1-A4).

2.3 Angewandte Methoden

2.3.1 Boden

Beginnend mit der Versuchsanlage bis hin zur Ernte der nachfolgenden Hauptfrucht wurden zu mehreren Terminen Bodenproben entnommen. Dabei wurden jeweils zwei Bohrstockeinschläge pro Parzelle vorgenommen und das Material getrennt nach den drei Bodentiefen 0-30, 30-60 sowie 60-90 cm zu einer Mischprobe vereinigt. Die Proben wurden umgehend bei einer Temperatur von 105 °C getrocknet, vor der Analyse gemörsert und gesiebt. Die Bestimmung des Nitratgehalts der Proben erfolgte nach Aufschluss mit $CaCl_2$

photometrisch. Zur Umrechnung der Analysenwerte in Kilogramm bezogen auf den Hektar wurde für die Lagerungsdichte der Wert von 1,8 g/cm^3 zugrunde gelegt (FIA, 1992).

Zur Erfassung des mineralisierten Stickstoffgehalts in der Bodenlösung wurden nach Versuchsanlage auf allen 60 Parzellen Saugkerzen in den Tiefen 30, 60, 90 und 120 cm mit je zwei Parallelen installiert und durch ein Schlauchsystem sowie Druckausgleichsgefäßen mit einer Vakuumpumpe verbunden. Ein Unterdruck von 300-500 hPa in dem gesamten System über einen Zeitraum von 2-3 Tagen ermöglichte die darauf folgende Entnahme von Bodenwasser in den entsprechenden Tiefen. Nach STREBEL et al. (1973) übt der angelegte Unterdruck in diesem Bereich keinen Einfluss auf die gemessene Nitratkonzentration aus. Die Proben wurden umgehend gekühlt und in den darauf folgenden Tagen ebenfalls photometrisch analysiert. Die ersten Analysen zeigten, dass das Verhältnis von NH_4-N und NO_2-N zu NO_3-N weniger als 1 % bzw. 0,1 % betrug. Aus diesem Grund wurden im weiteren Verlauf die Analysen der Bodenwasserproben auf den Nitratgehalt beschränkt.

Die Saugkerzen wurden, in leicht modifizierter Form nach BAAR & WESTING (1984), im Eigenbau hergestellt. Am unteren Ende von PVC-Röhren wurden Keramikkerzen (SKA 100F der Firma Haldenwanger, Berlin) mit Hilfe von Zwischenstücken, die den unterschiedlichen Innendurchmessern von Rohr und Kerze angepasst waren, befestigt (Abb. 4). Als geeigneter Klebstoff erwies sich der transparente Kraftkleber von PATEX. Das obere Ende der Saugkerzen wurde mit einem konischen Gummipfropfen verschlossen, in den zwei dünne Röhren unterschiedlicher Länge eingebracht wurden. Die kürzere Röhre diente der Anlegung des Unterdrucks und war mit dem Schlauchsystem verbunden. Mit der längeren Röhre, die bis in die Keramikkerze reichte, wurde die gewonnene Bodenlösung abgesaugt. Vor Gebrauch wurden die Kerzen mit 0,1 N HCl gereinigt und auf ihre Dichtheit hin überprüft.

Für die Beschreibung des Wasserhaushalts wurden das Bodenwasserpotential und der volumetrische Wassergehalt im Boden erfasst. Der erstgenannte Parameter wurde anhand von Einstich-Tensiometern bestimmt, die im ersten Versuchsjahr auf allen Parzellen in den Tiefen 30, 60 und 90 cm installiert wurden. In den drei weiteren Versuchsjahren wurde der Beprobungsumfang auf 48 Parzellen vermindert, um mit sieben Tensiometern pro Parzelle in den Bodentiefen 10, 30, 50, 70, 90, 110 und 130 cm die tiefenbezogene Auflösung zu erhöhen. Unbeprobt blieben jeweils 3 Wiederholungen der insgesamt 4 Brachevarianten, da

angenommen werden konnte, dass der Faktor ‚N-Düngung' (0 kg N/ha; 50 kg N/ha) keinen Einfluss auf den Wasserhaushalt ausübt.

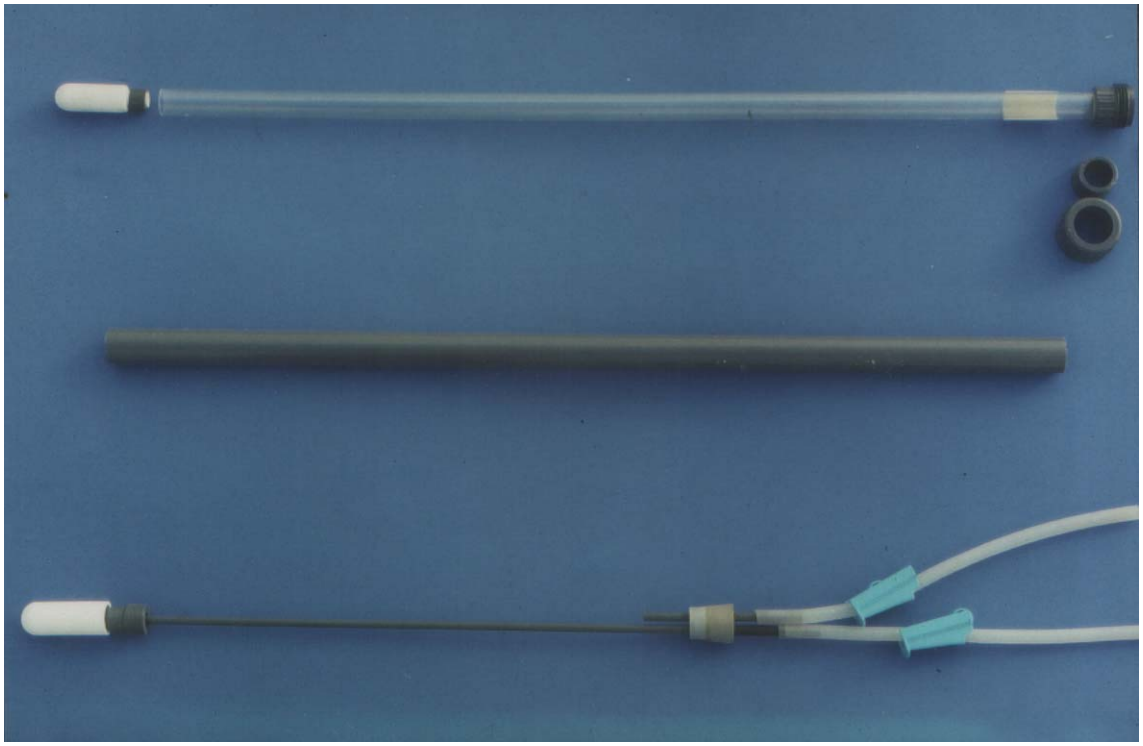


Abb. 4: **Bestandteile der Saugkerzen und Tensiometer**

Die Tensiometer wurden, in Anlehnung an FREDE et al. (1984), ebenfalls selbst hergestellt (Abb. 4). Dabei wurde durchsichtiges PVC-Rohr verwendet, um stets den Wasserstand im Inneren ablesen zu können. Die eingeklebten Kerzen bestanden aus P-80 Keramik und wurden von der königlichen Porzellan Manufaktur bezogen. Am oberen Ende der Rohre wurden verschraubbare PVC-Fittings angebracht, in denen passende Silikonscheiben für Luftabschluss und Einstichmöglichkeit des Druckaufnehmers sorgten. Die Befüllung der Tensiometerrohre erfolgte mit gasfreiem (abgekochten) Wasser. Bei der Messung mit dem Einstich-Druckaufnehmer zur Ermittlung des Matrixpotentials ψ_m wurde vom absoluten Messwert die Höhe der Wassersäule im Röhreninneren abgezogen.

Die <u>volumetrische Wassergehaltsbestimmung</u> erfolgte mit Hilfe der ‚Time Domain Reflektometry'. Diese nutzt die Dielektrizitätskonstante eines Mediums, um Aussagen über dessen Feuchtigkeitsgehalt zu treffen. Die Methode beruht auf der Bestimmung der Laufzeit einer elektromagnetischen Welle durch eine Sonde hin und zurück. Die elektromagnetische Verweildauer nimmt dabei mit dem Wassergehalt des Bodens zu. Probemessungen im ersten

Versuchsjahr zeigten, dass entgegen den Erwartungen der Entwickler (TU-Berlin, Fachgebiet Bodenkunde) und Hersteller (EASY-Test, Lublin) eine standortspezifische Eichkurve notwendig ist, die dann nachträglich in das Messgerät installiert wurde. In den drei darauf folgenden Jahren wurden die TDR-Sonden auf 18 ausgewählten Parzellen in den Bodentiefen 20, 30, 50, 70, 90, 110 und 130 cm installiert. Um Störungen der vertikalen Wasserflüsse durch die Messsonden zu vermeiden, wurden diese in einem Winkel von 45° zur Geländeoberfläche in den Boden eingebracht. Darüber hinaus wurden mit Hilfe einer Handsonde kontinuierlich Daten über den Wassergehalt in der Bodenschicht 0-10 cm erhoben.

2.3.2 Pflanze

Zur Bestimmung des Trockenmassertrages und des N-Entzuges der Zwischenfrucht wurden den Parzellen Pflanzen aus einer Reihe von 3 m Länge entnommen. Nach Aufnahme der Frischmasse wurden die Proben bei 75 °C bis zur Gewichtskonstanz getrocknet, um den Gehalt an Trockensubstanz zu bestimmen. Die Analyse der Pflanzenproben im Hinblick auf den Gehalt an Gesamtstickstoff erfolgte nach dem Kjeldahl-Verfahren. In den beiden letzten Versuchsjahren wurden diese Erhebungen auch beim Sommerweizen während der Vegetation durchgeführt. Zusätzlich wurden beim Sommerweizen die Parzellenerträge (ohne Randstreifen) für Stroh und Korn ermittelt.

2.3.3 Klima

Die Wetterdaten für den Versuchszeitraum sowie für die zurückliegenden drei Jahrzehnte wurden im Rahmen der routinemäßigen Ermittlung von der agrarmeteorologischen Station am Versuchsstandort Dahlem erhoben. Die in dieser Arbeit Verwendung findenden Parameter, deren Meßmethode sowie deren Bestimmungshöhen sind in Tabelle 2 wiedergegeben.

Tab. 2: Erfasste Witterungsparameter, Messmethode und Bestimmungshöhen

Parameter	Messwertgeber	Bemerkung
Niederschlag	Niederschlagssammler nach HELLMANN	Höhe: 1 m
Sättigungsdampfdruck und Dampfdruck (berechnet aus trockener und feuchter Luft-temperatur)	Aspirationspsychrometer	Höhe: 2 m

2.3.4 Modelle zum Wasserhaushalt und N-Austrag

Ansatz A: Die Klimatische Wasserbilanz

Bei der Abschätzung der Sickerung anhand der klimatischen Wasserbilanz entspricht diese dem Niederschlag (in mm) abzüglich der Evapotranspiration (in mm). Es wird von einem ebenen Standort ausgegangen, d.h. Oberflächenabfluss und laterale Wasserbewegungen im Boden können vernachlässigt werden (RENGER et al., 1974).

$$S = N - ETP \qquad (1)$$

Die Abschätzung der täglichen Evapotranspiration und Evaporation (in mm) erfolgt mit Hilfe des Ansatzes von HAUDE:

$$ETP = a\,(e_s - e)_{14} \qquad (2)$$

mit
e_s = Sättigungsdampfdruck um 14 Uhr
e = Dampfdruck um 14 Uhr
a = empirischer monatlicher Pflanzenfaktor.

Dabei wird unterstellt, dass sich die potentielle und aktuelle Evapotranspiration entsprechen, wovon im Winter in unseren Breiten ausgegangen werden kann (VAN EIMERN & HÄCKEL, 1979). Nach Untersuchungen von RENGER et al. (1974) gilt dies bei einem Wassergehalt von 100 bis 70 % der nutzbaren Feldkapazität. Dieser Feuchtezustand des Bodens war während der Sickerungsperioden stets gegeben. Bei der Berechnung der potentiellen Evapotranspiration der Winterrübsen werden für den Faktor a die Monatswerte von Winterraps mit 0,18 für die Monate September bis Februar bzw. 0,20 (März) verwendet

(LÖPMEIER, 1994). Der Berechnung der potentiellen Evaporation der Brache liegen die Faktoren 0,15 (September) und 0,11 (Oktober - März) zugrunde (VDI, 1993).

Ansatz B: Die Klimatische Wasserbilanz unter Berücksichtigung der Veränderungen des Bodenwasservorrats anhand von TDR-Messungen

Ansatz A geht bei der Berechnung der Sickerung von der Annahme konstanter Bodenwasservoräte aus. Bei dem Ansatz B werden die Vorgänge der Aufsättigung bzw. Austrocknung des Bodens mit erfasst (RENGER et al., 1974). Durch direkt ermittelte volumetrische Wassergehalte mit Hilfe von TDR-Sonden in den verschiedenen Bodentiefen bis 130 cm können diese Prozesse berücksichtigt werden. Die Formel (1) wird somit wie folgt erweitert:

$$S_z = N - ETP - \Delta W_{0\text{-}z}, \qquad (3)$$

wobei bezogen auf den betrachteten Zeitraum S_z die Sickerung (in mm) in der Bodentiefe z, N der Niederschlag (in mm), ETP die Evapotranspiration (in mm) und $\Delta W_{0\text{-}z}$ die Boden–wasservorratsveränderung (in mm) in der Bodenschicht 0-z cm Tiefe kennzeichnen.

Ansatz C: Die Klimatische Wasserbilanz unter Berücksichtigung der Veränderungen des Bodenwasservorrats anhand von Messungen des Bodenwasserpotentials

Dieser Ansatz basiert ebenfalls auf der Formel (3). Die Berechnung der Wasservorratsverän–derungen in den einzelnen Bodenschichten erfolgt jedoch indirekt anhand der Daten des Bodenwasserpotentials. Diese Werte werden mit Hilfe des in situ bestimmten Zusammen-hangs von Bodenwasserpotential (ψ_m) und Wassergehalt (θ) und der Kenntnis über die Bodenhorizontabfolge und –mächtigkeit aus der Feinkartierung in volumetrische Wasser–gehaltsveränderungen im Boden transformiert.

Für die Umrechnung von im Felde gemessenen Saugspannungen in volumetrische Wassergehalte gibt es eine Vielzahl von Ansätzen, z.B. exponentielle oder geometrische Funktionen (SAXTON et al:, 1986) oder Polynome (ZEPP, 1987). Dabei sind vor allem Polynome höherer Grade wegen ihrer Wendepunkte problematisch (HENNIG, 1992). Basierend auf den ψ_m-θ-Wertepaaren, die während des gesamten Versuchszeitraumes auf 18

ausgewählten Parzellen mit paralleler Bodenwasserpotentials- und Bodenwasser–gehaltsmessung erhoben wurden, wird der Mualem-van-Genuchten- Parameteransatz (VAN GENUCHTEN, 1980) verwendet. Danach besteht zwischen den beiden Parametern ψ_m und θ folgender Zusammenhang:

$$\Theta(|\psi_m|) = \Theta_r + \frac{(\Theta_s - \Theta_r)}{\left[1 + (\alpha * |\psi_m|)^n\right]^m} \qquad (4)$$

mit

ψ_m = Matrixpotential
θ = Wassergehalt (Vol%)
θ_s = Wassergehalt bei Sättigung
θ_r = Restwassergehalt bei pF 7

Die Werte für den Wassergehalt bei Sättigung der am Standort vorkommenden Horizonte wurden von dem Fachbereich Bodenkunde der TU-Berlin im Rahmen eines interdisziplinären Forschungsprojekts bestimmt (FIA, 1992). Für den Restwassergehalt wird der Wert 0 angenommen. Die optimale Anpassung der Kurve an die Messpunkte zur Bestimmung der frei wählbaren Parameter α, n und m (m = 1-1/n) erfolgte iterativ mit Hilfe der Methode der kleinsten Summe der quadratischen Abweichungen. Die auf diese Weise berechneten Beziehungen von θ und ψ_m für die bis 130 cm Tiefe vorkommenden Horizonte A_p (gepflügt), A_p (gefräst), A_l, A_l/IIB_t und IIB_t finden sich im Anhang (Abb. A1-A5). Für die 12 Bracheparzellen, bei denen keine Messungen erfolgen konnten, wurde der Sickerungsverlauf von Bracheparzellen mit identischer Horizontabfolge und –mächtigkeit zugrunde gelegt.

Dieser Ansatz bildet die Grundlage der in dieser Arbeit durchgeführten Beschreibungen zum Bodenwasserhaushalt und N-Austrag während der Winterhalbjahre (Kap.3.1, 3.2 und 3.4).

Ansatz D: Die Bestimmung der Sickerung anhand der Wasserleitfähigkeitsfunktion

Die Erfassung der Wasserflüsse kann auch anhand der stationären Fließgleichung nach DARCY (5) erfolgen. Wird die Sickerung pro Zeit- und Flächeneinheit als eindimensionaler Fluss Q (cm^3/cm^2 d) an der Unterkante eines betrachteten Bodenprofils definiert, ergibt sich für den Wasserfluss Q:

$$Q = K * d\psi / dz \qquad (5)$$

Das Ausmaß der Wasserbewegung ist abhängig von dem antreibenden Potentialgefälle und der Durchlässigkeit oder Wasserleitfähigkeit des Bodens. Q ist die gesamte Wassermenge, die

während einer Zeiteinheit eine definierte Fläche perkoliert, und K bezeichnet die Wasserleitfähigkeit des Bodens. Die treibende Kraft ist das Potential $d\psi$ im Verlaufe der Fließstrecke dz. Bei der Betrachtung von Wasserbewegungen wird für die Bestimmung des Potentialgradienten üblicherweise das hydraulische Potential verwendet. Dieses setzt sich aus den Teilpotentialen Matrixpotential ψ_m und dem Gravitationspotential ψ_z zusammen:

$$\frac{d\psi}{dz} = \frac{\Delta\psi_m + \Delta\psi_z}{\Delta z} \tag{6}$$

Wird die Geländeoberkante als Null-Bezugspunkt definiert und werden zwei unterschiedliche Tensiometerebenen z_{oben} und z_{unten} betrachtet, so ergibt sich der Potentialgradient:

$$\frac{d\psi}{dz} = \frac{|\psi_{m(oben)}| - |\psi_{m(unten)}|}{|z_{oben}| - |z_{unten}|} + 1 \tag{7}$$

Bei positivem Vorzeichen des Potentialgradienten liegt ein abwärts gerichteter Wasserfluss vor, bei negativem Vorzeichen ist der Wasserfluss nach oben gerichtet. Nimmt der hydraulische Gradient den Wert 0 an, findet keine Wasserbewegung statt.

Die Wasserleitfähigkeit K ist eine Funktion des Bodenmatrixpotentials, dessen Beziehung VAN GENUCHTEN (1980) durch Kombination der Funktion (4) und MUALEM'S Modell der hydraulischen Leitfähigkeit wie folgt beschreibt:

$$K(|\psi_m|) = K_s\left[1 + (\alpha|\psi_m|)^n\right]^{-am} * \left\{1 - (\alpha|\psi_m|)^{\frac{m}{1-m}}\left[1 + (\alpha|\psi_m|)^n\right]^{-m}\right\}^2 \tag{8}$$

Die frei wählbaren Parameter α, n und m werden bei der Anpassung der Funktion (4) an die erhobenen ψ_m-θ-Wertepaare ermittelt. Für den dimensionslosen Parameter a wird der Wert 0,5 eingesetzt, der nach MUALEM (1976) auf eine Vielzahl von Böden übertragbar ist. Die gesättigten Wasserleitfähigkeiten K_s für alle vorkommenden Bodenhorizonte wurden von dem Fachbereich Bodenkunde der TU-Berlin mit Hilfe eines Haubenpermeameters bestimmt (Tab. 3).

Tab. 3: Gesättigte Wasserleitfähigkeit (Ks) typischer Horizonte der Versuchsflächen (FIA, 1992)

Horizont	K_s in cm/d
A_p	39,0
A_l	198,0
A_l/IIB_t	37,7
IIB_t	1,6
IIC_v	7,0

Der N-Austrag wird bei allen oben beschriebenen vier Modellen durch Multiplikation der Sickerwassermenge und der Nitrat-N-Konzentration im Bodenwasser berechnet (RENGER und WESSOLEK, 1992). Dabei wurde vereinfachend davon ausgegangen, dass der Transport des Nitratanions im Wesentlichen durch Massenfluss erfolgt. Dies trifft nach Untersuchungen von STREBEL & RENGER (1976) unterhalb des Wurzelraumes weitgehend zu. Aufgrund dieser Einschränkung dürften die Berechnungen für die Zwischenfruchtvarianten in den oberen Messtiefen tendenziell zu hohe N-Austräge ausweisen.

2.3.5 Statistische Methoden

Die statistische Auswertung erfolgte mit Hilfe der Programme SPSS 10.0 und Excel 97. Zur Verrechnung der Datensätze war zunächst eine Teilung in zwei orthogonale Kerne erforderlich, da nur bei der Zwischenfrucht eine dritte zusätzliche Faktorstufe der N-Düngung von 100 kg N/ha geprüft wurde. In der **ersten Serie ‚ABC'** wurden alle drei Faktoren mit jeweils zwei Faktorstufen einbezogen, die bei der N-Düngung die Stufen 0 und 50 kg N/ha umfassten. In der **zweiten Serie ‚AC'** wurden nur die sechs Varianten der Zwischenfrucht mit den zwei Faktoren ‚Bodenbearbeitung' (2 Stufen) und ‚N-Düngung' (3 Stufen) betrachtet. Diese Datensätze wurden zunächst in Bezug auf Normalität mit dem Kolmogoroff-Smirnoff-Test und auf Varianzhomogenität nach dem Levene-Test geprüft. Von insgesamt 239 Datensätzen erfüllten 139 diese Voraussetzungen zur Varianzanlyse. Bei 52 Datensätzen konnte mit Hilfe der Transformationsfunktionen Logarithmus zur Basis 10, dritte Wurzel und Kehrwert Varianzhomogenität erzielt werden. Die Auswertung erfolgte dann anhand des F-Tests. Neben dem F-Test wurde bei den Datensätzen der Serie ‚AC' für den Prüffaktor Düngung ein PostHoc-Test (TUKEY-Test) durchgeführt. Die Blöcke gingen bei beiden Serien als Zufallsfaktor in die Berechnung ein. Bei den restlichen 48 Datensätzen

konnte auch durch Transformation keine Varianzhomogenität erreicht werden, so dass auf nichtparametrische Testverfahren ausgewichen werden musste. Neben dem Friedman-Test als Rangvarianzanalyse kam im Anschluss daran der Wilcoxen-Wilcox-Test zur Anwendung. Da in der Standard-Statistik-Software kein multipler Anschlusstest angeboten wird, wurde in EXCEL ein entsprechendes Tabellenblatt erstellt, das die Auswertung der Datensätze anhand des Wilcoxon-Wilcox-Test erlaubte. Dabei wurden im ersten Schritt den Zahlenwerten der einzelnen Varianten innerhalb der Blöcke mit der EXCEL-Funktion RANG Ränge zugeordnet und im Anschluss die Rangsummen über alle Blöcke gebildet. Im zweiten Schritt wurden die absoluten Differenzen der Rangsummen für alle paarweisen Vergleiche berechnet. Mit Hilfe der Funktion WENN/DANN wurden im dritten Schritt die ermittelten Rangsummendifferenzen mit der kritischen Differenz des Wilcoxon-Wilcox-Tests (KÖHLER et al., 1995) des Signifikanzniveaus von 5 % verglichen. Bei Überschreitung der kritischen Differenz wurde der entsprechenden Zelle des paarweisen Vergleiches „sign“ zugeordnet. Neben dem Vergleich der einzelnen Prüfglieder wurde darüber hinaus auch der Vergleich der einzelnen Blöcke in gleicher Weise durchgeführt.

Da der Wilcoxon-Wilcox-Test keine Informationen über die Hauptwirkung der einzelnen Faktoren liefern kann, wurde bei den bedeutenden Datensätzen zur Sickerung und zum N-Austrag zusätzlich der Vorzeichentest (KREYSZIG, 1968) durchgeführt, sofern keine Varianzanalyse angewandt werden konnte. Bei diesem ebenfalls parameterfreiem Verfahren wurden für jedes verbundene Wertepaar die Differenz berechnet. Die Anzahl der Wertepaare betrug bei der Prüfung des Faktors ‚Bodenbearbeitung’ (A) 30. Der Faktor ‚Bodenbedeckung’ (B) wurde anhand der Varianten B0 und Z0 sowie B1 und Z1 beider Bodenbearbeitungsarten geprüft (n=24). Die Wirkung der N-Düngung (Faktor C). zeigte sich beim Vergleich der Varianten beider Bodenbearbeitungsarten B0 zu B1, Z0 zu Z1, Z0 zu Z2 sowie Z1 zu Z2 für die einzelnen Faktorstufen (jeweils n=12). Im Anschluss daran wurde geprüft, ob ein signifikanter Unterschied in der Anzahl positiver und negativer Differenzen bestand, wobei 0-Werte im Test ignoriert wurden. Die Nullhypothese besagt, dass die Wahrscheinlichkeiten für das Auftreten positiver und negativer Differenzen gleich groß (p=0,5) ist. Überwogen positive bzw. negative Vorzeichen wurde für die entsprechende Anzahl unter den gegebenen Werten anhand der Binomialverteilung die Hypothese auf dem Signifikanzniveau von 5 % geprüft.

3 Ergebnisse

3.1 Beobachtungen während des Winterhalbjahres 1990/91

3.1.1 Wasserhaushalt und N-Austrag

Grundlage der Berechnungen der Sickerwassermengen nach dem Ansatz C (vrgl. Kap 2.3.4) bilden neben den klimatischen Eingangsparametern die Erhebungen zum Bodenwasserpotential. Aufgrund der groben tiefenbezogenen Auflösung der Messungen (vrgl. Kap. 2.3.1) beschränken sich die weiteren Ausführungen auf den obersten Bodenhorizont. Der zeitliche Verlauf des Bodenwasserpotentials in 30 cm Tiefe während des ersten Versuchsjahres lässt sich in drei Abschnitte unterteilen.

Zu Beginn des Beobachtungszeitraumes Mitte September liegen die Werte aller Varianten bei etwa –50 hPa (Abb. 5). Aufgrund geringer Niederschläge im Monat Oktober und in der ersten Novemberhälfte von insgesamt 12,4 mm ist im weiteren Verlauf ein leichtes Absinken der Werte bis ca. –120 hPa unter der Brache zu beobachten, während das Bodenwasserpotential unter der Zwischenfrucht durch deren zusätzlichen Wasserentzug in stärkerem Umfang absinkt. Anfang November sind die Tiefstwerte erreicht. Sie liegen zwischen –400 und –500 hPa bei konventioneller Bodenbearbeitung bzw. innerhalb einer Spanne von –350 und –450 hPa bei reduzierter Bodenbearbeitung. Im Hinblick auf die Wirkung der N-Düngung ergeben sich unabhängig von der Bodenbearbeitung keine nennenswerten Veränderungen auf den Bracheparzellen, jedoch tendenzielle Absenkungen des Bodenwasserpotentials unter der Zwischenfrucht bei den N-Gaben von 50 bzw. 100 kg/ha gegenüber den ungedüngten Varianten.

In der zweiten Novemberhälfte mit einer Niederschlagssumme von 49,6 mm ist zunächst bei den Varianten der Brache ein Anstieg des Bodenwasserpotentials auf über –50 hPa zu beobachten. Mit einer deutlichen Verzögerung von 10 bzw. 14 Tagen erreichen die ungedüngten bzw. die gedüngten Zwischenfruchtvarianten wiederum unabhängig von der Bodenbearbeitung dieses Niveau, das sich dann bis zum Ende der Messperiode für alle Varianten nicht wesentlich verändert.

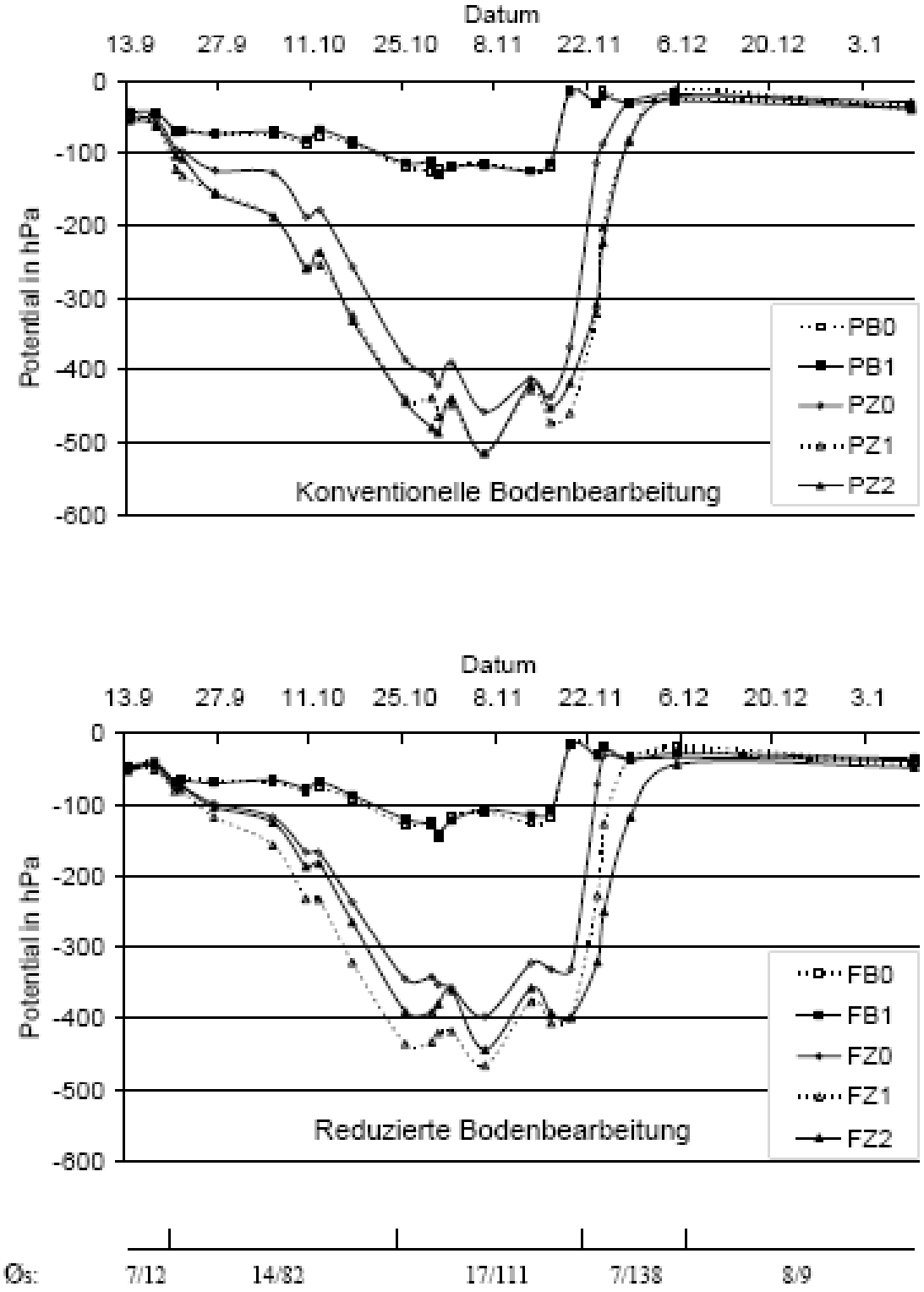
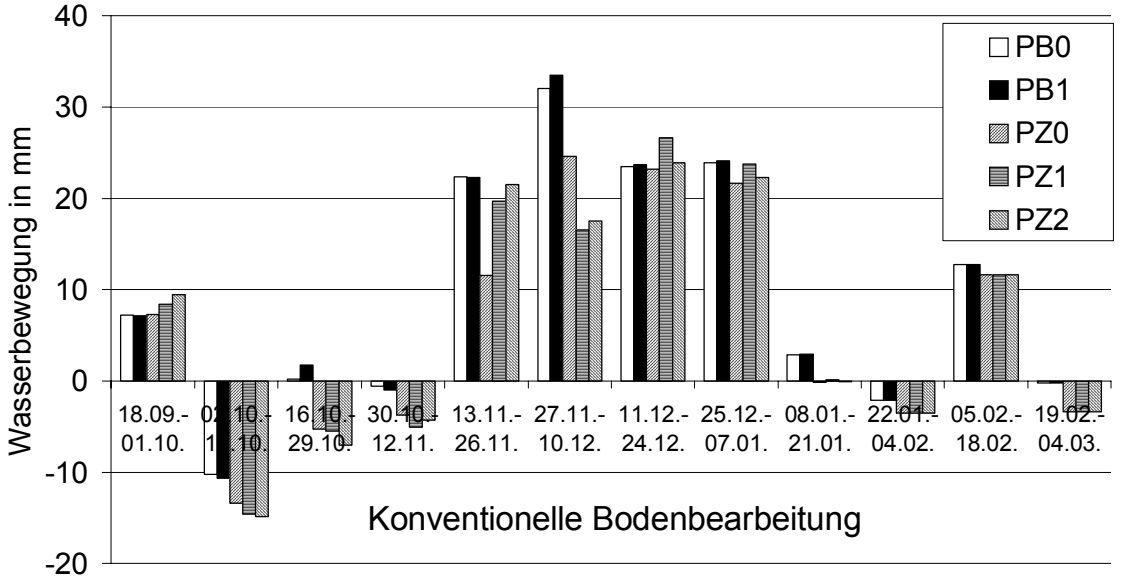


Abb. 5: Verlauf des Bodenwasserpotentials in 30 cm Tiefe im Winterhalbjahr 1990/91 unter Brache und Zwischenfrucht bei unterschiedlicher N-Düngung und Bodenbearbeitung (n=6), mittlere Standardabweichung der Brache/Zwischenfrucht für fünf Zeiträume

Resultierend aus den oben beschriebenen Verhältnissen der Witterung und des beobachteten Verlaufs der Bodenwasserpotentiale setzt eine nennenswerte abwärts gerichtete

Wasserbewegung, berechnet nach dem Ansatz C, erst in der zweiten Novemberhälfte ein (Abb. 6). Diese unterscheidet sich mengenmäßig insbesondere während der zwei 14-tägigen



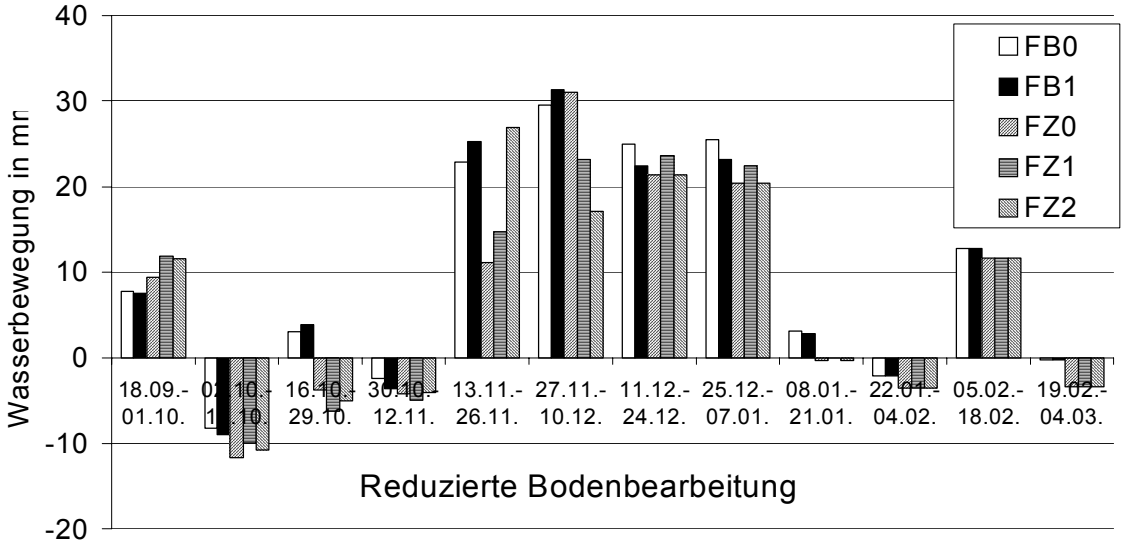


Abb. 6: Sickerung (+) bzw. Aufwärtsbewegung (-) aus 30 cm Tiefe unter Brache und Zwischenfrucht bei unterschiedlicher N-Düngung und Bodenbearbeitung in 14-tägigen Intervallen im Winterhalbjahr 1990/91 (n=6), berechnet nach Ansatz C (vrgl. Kap. 2.3.4)

P: gepflügt **B:** Brache **0:** 0 kg N/ha **1:** 50 kg N/ha **2:** 100 kg N/ha
F: gefräst **Z:** Zwischenfrucht

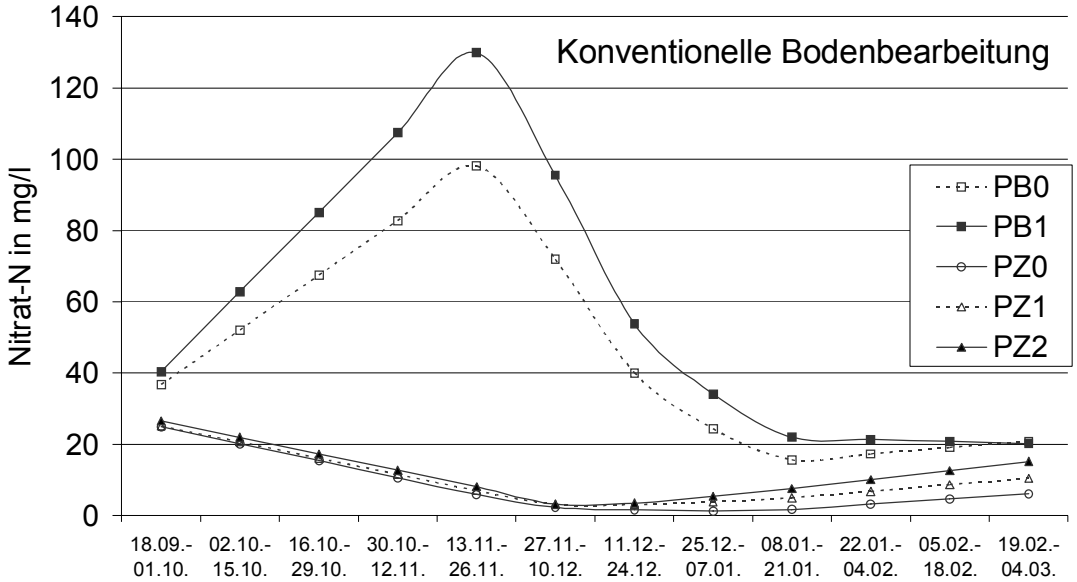
Intervalle zwischen dem 13.11. und 10.12.90 zwischen den Varianten der Brache und denen der Zwischenfrucht. In den drei Intervallen davor ist eine stärkere Aufwärtsbewegung bei den Zwischenfruchtvarianten im Vergleich zu denen der Brache zu erkennen; danach sind nur geringfügige Unterschiede erkennbar, jedoch deuten sich tendenziell stärkere Aufwärts- und schwächere Abwärtsbewegungen in den letzten vier spätwinterlichen Intervallen bei den Zwischenfruchtvarianten gegenüber der Brache an.

Die Summe der Sickerung ab dem 13.11.90 bis zum 18.2.91 beträgt für die Varianten ohne Bodenbedeckung (PB0, PB1, FB0 und FB1) etwa 116,2 mm mit sehr geringen Abweichungen. Bei den Varianten der Zwischenfrucht liegen die Sickerwassermengen während des entsprechenden Zeitraums bei etwa 92 mm, wobei die Werte der ungedüngten Varianten leicht unter denen der gedüngten liegen. Signifikant ist die Wirkung des Faktors Bodenbedeckung innerhalb der Serie ABC.

Tab. 4: Summe der Nettosickerung (mm) aus 30 cm Tiefe in Abhängigkeit von der Bodenbearbeitung (A), Bodenbedeckung (B) und N-Düngung (C) für den Zeitraum 13.11.90 bis 18.2.91 (n=6), berechnet nach Ansatz C (vrgl. Kap. 2.3.4)

Variante									
PBO	**PB1**	**PZ0**	**PZ1**	**PZ2**	**FB0**	**FB1**	**FZ0**	**FZ1**	**FZ2**
115,4	**117,2**	**89,0**	**94,8**	**93,3**	**116,5**	**115,7**	**91,6**	**92,0**	**93,6**
ABC	F-Test: A=n.s., B=sign., C=n.s. (P=0,05)								
AC	Varianzinhomogen;								
		PB0*			PZ0*		PB1*		
		PB1*			PZ2*		PB0*		
*Wilcoxen-Wilcox-Test: Signifikant bei P = 0,05									

Der Verlauf der Konzentration von Nitratstickstoff in der Bodenlösung in 30 cm Tiefe (Abb. 7) lässt zwischen den Varianten mit bzw. ohne Bodenbedeckung eine unterschiedliche Dynamik erkennen. Bereits zu Beginn der Beobachtung Mitte September liegen die Werte unter den Bracheparzellen generell mit 40 mg/l etwas über den entsprechenden der Zwischenfrucht. Im weiteren Verlauf steigen die Konzentrationen unter der Brache in Abhängigkeit von der N-Düngung und der Bodenbearbeitung bis in die zweite Novemberhälfte stark an. Die Maxima der gedüngten Varianten liegen bei über 120 mg/l (konventionelle Bodenbearbeitung) bzw. um 100 mg/l (reduzierte Bodenbearbeitung). Bei den ungedüngten Varianten zeigt sich ein paralleler Verlauf auf niedrigerem Niveau.



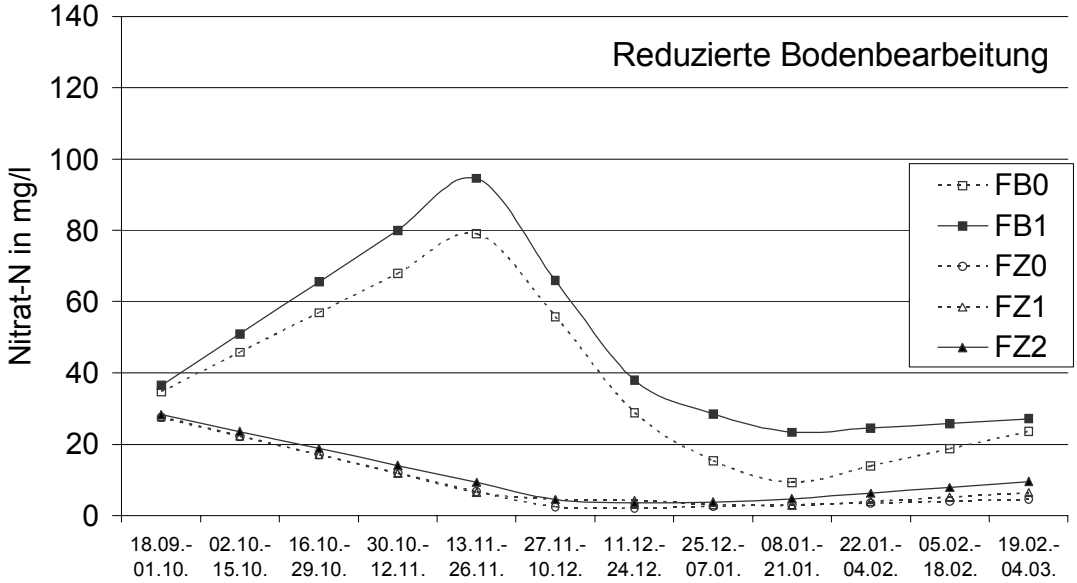


Abb. 7: Mittlerer Nitrat-N-Gehalt in der Bodenlösung in 30 cm Tiefe unter Brache und Zwischenfrucht bei unterschiedlicher N-Düngung und Bodenbearbeitung für die 14-tägigen Berechnungsintervalle im Winterhalbjahr 1990/91 (n=6)

P: gepflügt **B:** Brache **0:** 0 kg N/ha **1:** 50 kg N/ha **2:** 100 kg N/ha
F: gefräst **Z:** Zwischenfrucht

Die Maxima liegen Mitte November bei 100 mg/l (konventionelle Bodenbearbeitung) bzw. um 80 mg/l (reduzierte Bodenbearbeitung). Aufgrund zu großer Streuung der Einzelwerte sind diese Unterschiede jedoch nur tendenzieller Art. Im weiteren Verlauf sinken die Werte bis Anfang März bei allen Brachevarianten auf etwa 20 mg/l.

Dem gegenüber liegen die Ausgangswerte unter der Zwischenfrucht bei etwa 30 mg/l. Die Nitrat-N-Konzentration in der Bodenlösung nimmt im weiteren Verlauf kontinuierlich ab und liegt Ende November unterhalb von 10 mg/l. Zum Ende des Winterhalbjahres sind ein leichter Anstieg sowie eine geringfügige Differenzierung aufgrund der N-Düngung erkennbar, wobei die gedüngten Varianten höhere Konzentrationen aufweisen als die ungedüngten. Darüber hinaus liegen die Werte bei konventioneller Bodenbearbeitung zum Ende des Beobachtungszeitraumes tendenziell über denen der gefrästen Varianten.

Aus den Sickerwassermengen und dem Nitrat-N-Gehalt in der Bodenlösung berechnet sich der N-Austrag (Abb. 8). Im Winterhalbjahr 1990/91 findet eine Stickstoffverlagerung aus der oberen Ackerkrume (0-30 cm) in nennenswertem Umfang nur unter den Varianten ohne Bodenbedeckung statt und beschränkt sich im Wesentlichen auf die 8 Wochen von Mitte November bis Anfang Januar. Zu Beginn dieses Zeitraumes ist der für die 2-wöchigen Intervalle berechnete N-Austrag bei allen vier Brachevarianten (PB0, PB1, FB0 und FB1) am höchsten und verringert sich bis Anfang Januar kontinuierlich. Die Wirkungen der Düngung sowie der Bodenbearbeitung sind wie schon bei dem Verlauf der Nitrat-N-Konzentration deutlich erkennbar. Die Werte der gedüngten Brachevarianten liegen mit etwa 7-8 kg/ha N-Austrag während der 14-tägigen Intervalle im November, danach zum Jahreswechsel auf zusätzliche 2-3 kg/ha abnehmend, über denen der ungedüngten Parzellen. Annähernd gleiche zusätzliche N-Austräge bewirkt die konventionelle gegenüber der reduzierten Bodenbearbeitung während dieser vier Zeitintervalle.

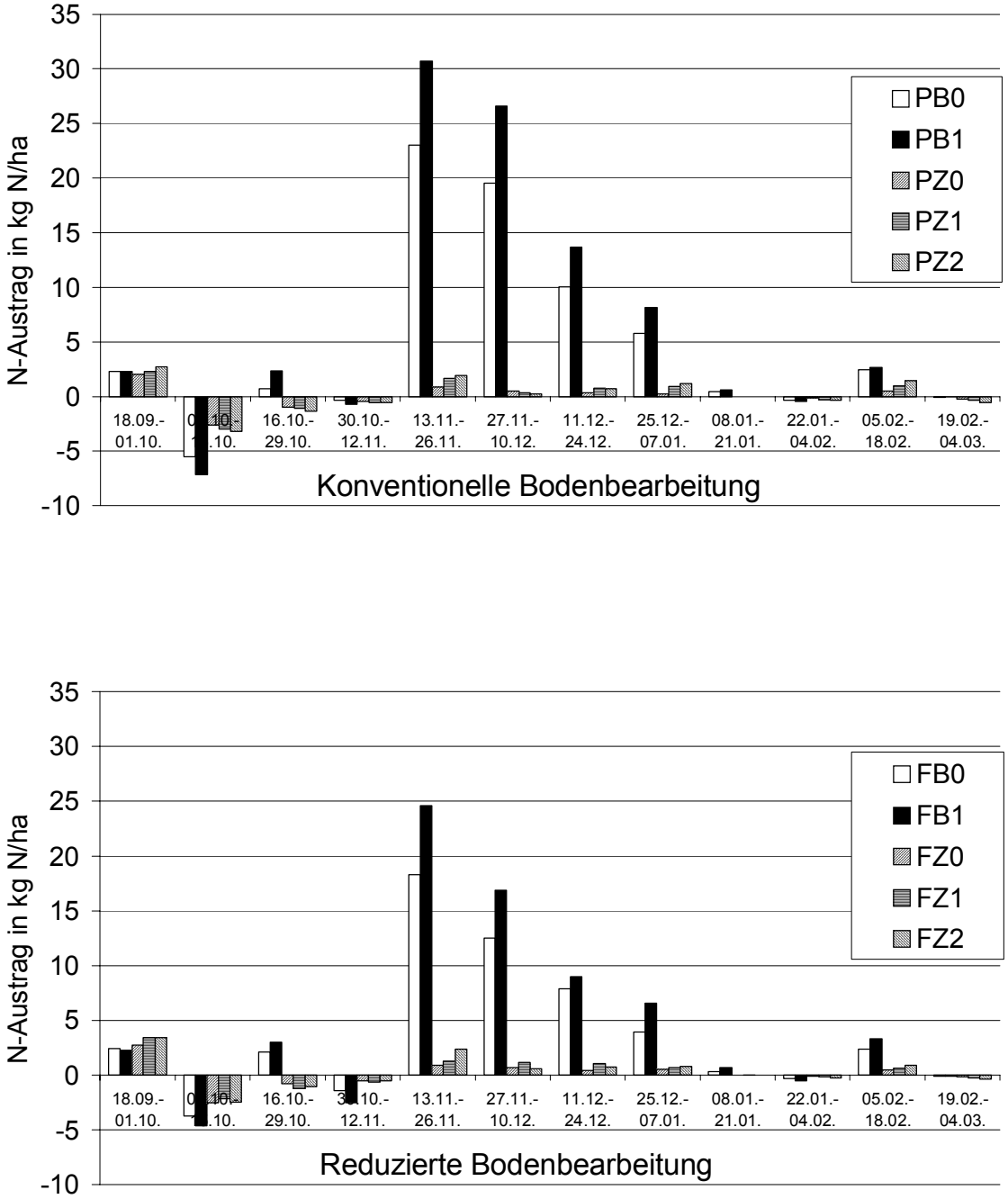


Abb. 8: Verlauf des N-Austrages aus 30 cm Tiefe unter Brache und Zwischenfrucht bei unterschiedlicher N-Düngung und Bodenbearbeitung im Winterhalbjahr 1990/91 (n=6)

P: gepflügt **B:** Brache **0:** 0 kg N/ha **1:** 50 kg N/ha **2:** 100 kg N/ha
F: gefräst **Z:** Zwischenfrucht

Für den Zeitraum vom 13.11.90 bis 18.2.91 (Tab. 5) liegt der berechnete N-Austrag für die beiden Brachevarianten nach konventioneller Bodenbearbeitung bei 60,9 kg N/ha (PB0) bzw. 82,0 kg N/ha (PB1). Die N-Verluste sind bei der reduzierten Bodenbearbeitung unter der Brache mit 45,0 kg N/ha (FB0) bzw. 60,5 kg N/ha (FB1) geringer, jedoch nicht signifikant. Unabhängig von der Art der Bodenbearbeitung steigt die N-Auswaschung unter der Brache bei zusätzlicher N-Düngung signifikant von durchschnittlich 52,9 kg (B0) um 18,3 auf 71,2 kg /ha. Der N-Austrag unter der Zwischenfrucht innerhalb dieses Zeitraumes ist nur geringfügig und beträgt zwischen 2,4 und 5,2 kg N/ha, wobei ein tendenzieller Anstieg bei zunehmender N-Düngungsintensität zu beobachten ist. Signifikant sind lediglich die Unterschiede zwischen den ungedüngten (Z0) zu den gedüngten Varianten Z1 bzw. Z2.

Tab. 5: Summe des N-Austrages (kg/ha) aus 30 cm Tiefe in Abhängigkeit von der Bodenbearbeitung (A), Bodenbedeckung (B) und N-Düngung (C) für den Zeitraum 13.11.90 bis 18.2.91 (n=6)

Variante									
PBO	**PB1**	**PZ0**	**PZ1**	**PZ2**	**FB0**	**FB1**	**FZ0**	**FZ1**	**FZ2**
60,9	**82,0**	**2,4**	**4,5**	**5,2**	**45,0**	**60,5**	**2,9**	**4,6**	**5,2**
ABC/AC	Varianzinhomogen; Vorzeichentest: A=n.s., B=sign., C: Signifikante Stufen B0-B1; Z0-Z1; Z0-Z2								
		PB0*	PB1*			PZ0*	PB0*	PB1*	
		PB1*					PB1*		
							FB1*		

*Wilcoxen-Wilcox-Test: Signifikant bei P = 0,05
Vorzeichentest für Faktoren oder Stufen bei α=0,05

3.1.2 Boden N_{min}

Zu Versuchsbeginn am 15.8.90 vor der variantenbezogen N-Düngung betrug der durchschnittliche N_{min}-Gehalt für die Bodenschicht 0-30 cm 51,8 kg NO_3-N/ha, für die Bodenschicht 30-60 cm 15,8 kg NO_3-N/ha sowie 7,3 kg NO_3-N/ha für die Bodenschicht 60-90 cm (Tab. 6). Signifikante Unterschiede zwischen den Parzellen der 10 Varianten in der Ausgangslage lagen nicht vor.

Tab. 6: N_{min}-Gehalt (kg/ha) vor Versuchsanlage (15.8.90) in drei Bodentiefen der späteren Parzellen (n=6)

Tiefe in cm	Variante										
	PBO	**PB1**	**PZ0**	**PZ1**	**PZ2**	**FB0**	**FB1**	**FZ0**	**FZ1**	**FZ2**	**∅**
0-30	**51,5**	**50,5**	**50,7**	**50,4**	**50,9**	**48,8**	**55,8**	**60,8**	**46,8**	**52,0**	**51,8**
ABC	F-Test: A=n.s., B=n.s., C=n.s. (P=0,05)										
AC	F-Test: A=n.s., C=n.s. (P=0,05)										
30-60	**10,4**	**16,0**	**12,7**	**20,5**	**16,8**	**16,1**	**15,2**	**20,1**	**13,8**	**16,0**	**15,8**
ABC	F-Test: A=n.s., B=n.s., C=n.s. (P=0,05)										
AC	F-Test: A=n.s., C=n.s. (P=0,05)										
60-90	**6,7**	**6,0**	**7,7**	**6,2**	**7,8**	**5,2**	**10,7**	**8,2**	**6,3**	**8,0**	**7,3**
ABC	F-Test: A=n.s., B=n.s., C=n.s. (P=0,05)										
AC	F-Test: A=n.s., C=n.s. (P=0,05)										

Bis Mitte November (Tab. 7) liegen die Werte für die oberste Bodenschicht der Varianten PB0 und FB0 auf nahezu unverändertem Niveau, während bei den gedüngten Brachevarianten eine Erhöhung des N_{min}-Gehaltes um ca. 15 kg N/ha erkennbar ist. Bei den Varianten der Zwischenfrucht ist sowohl bei konventioneller, als auch bei reduzierter Bodenbearbeitung, eine deutliche Abnahme um mehr als 30 kg N/ha des NO_3-N-Gehaltes im Oberboden zu beobachten, wobei zwischen gedüngten und ungedüngten Varianten keine signifikanten Unterschiede bestehen.

Für die Bodenschicht 30-60 cm weisen die Ergebnisse bei den Varianten ohne Bodenbedeckung eine Zunahme des Gehaltes an NO_3-Stickstoff gegenüber den Ausgangswerten von 25,9 (PB0) bzw. 11,2 kg/ha (FB0) aus, die bei den gedüngten Varianten noch ausgeprägter ist (33,5 bzw. 23,8 kg/ha). Dies deutet auf bereits statt gefundene Verlagerungs- und/oder Mineralisierungsprozesse in der obersten Bodenschicht hin. Eine leichte Abnahme der NO_3-N-Gehalte von 5-10 kg/ha ist bei allen Varianten der Zwischenfrucht zu erkennen.

Im Unterboden (60-90 cm) ist nur unter der Brache, nicht jedoch bei der Zwischenfrucht, ein geringfügiger Anstieg von ca. 5 kg/ha festzustellen.

Tab. 7: N_{min}-Gehalt (kg/ha) zum 15.11.90 in drei Bodentiefen in Abhängigkeit von der Bodenbearbeitung (A), Bodenbedeckung (B) und N-Düngung (C) in drei Bodentiefen (n=6)

Tiefe in cm	Variante									
	PBO	**PB1**	**PZ0**	**PZ1**	**PZ2**	**FB0**	**FB1**	**FZ0**	**FZ1**	**FZ2**
0-30	**49,0**	**64,0**	**23,6**	**17,6**	**15,0**	**54,3**	**68,2**	**18,1**	**16,8**	**18,4**
ABC/AC		Varianzinhomogen;								
				PB1*	PB1*	PZ2*	PZ1* PZ2*		PB1*	PB1*
30-60	**36,3**	**49,5**	**10,2**	**10,1**	**9,7**	**27,3**	**39,0**	**9,2**	**6,9**	**8,3**
ABC/AC		Varianzinhomogen;								
					PB1*				PB0* PB1*	PB0* PB1*
60-90	**11,4**	**17,2**	**7,5**	**8,9**	**7,3**	**10,8**	**11,2**	**9,6**	**8,5**	**7,0**
ABC/AC		Varianzinhomogen;								
					PB1*					

* Wilcoxen-Wilcox-Test: Signifikant bei P = 0,05

Im Vergleich zu den Ausgangswerten im August (Tab. 6) liegen die N_{min}-Werte für die oberste Bodenschicht (0-30 cm) Mitte März (Tab. 8) generell um rund 20 kg/ha niedriger. In Relation zum November (Tab. 7) beträgt die Abnahme auf den ungedüngten Bracheparzellen (PB0 und FB0) 13 bzw. 16 kg/ha und auf den gedüngten (PB1 und FB1) etwa 30 kg /ha. Im Gegensatz dazu ist bei den Zwischenfruchtvarianten im Vergleich zum November eine Zunahme der N_{min}-Werte zu beobachten. Diese beträgt bei den ungedüngten Varianten (PZ0 und FZ0) 8 bzw. 13 kg/ha, bei den gedüngten (PZ1 und FZ1) ca. 13 sowie 23 (PZ2) und 19 kg/ha (FZ2). Ungeachtet von der Art der Bodenbearbeitung und N-Düngung liegen die N_{min}-Werte der Bracheparzellen signifikant über den Werten der beiden ersten Düngungsstufen (0 bzw. 50 kg N/ha) der Zwischenfrucht (Serie ABC). Innerhalb der Varianten der Zwischenfrucht (Serie AC) zeigen sich signifikante Unterschiede zwischen den beiden niedrigeren und der höchsten N-Düngungsintensität (100 kg/ha), deren Werte etwa 7 kg/ha darüber liegen.

In der Bodenschicht (30-60 cm) zeigen sich im Vergleich zu den Werten im November sehr ähnliche Veränderungen. Unter der Brache verringert sich der N_{min}-Gehalt um 26,6 bzw. 13,4 kg/ha bei den ungedüngten Varianten PB0 und FB0; bei den gedüngten Varianten PB1 und FB1 beträgt die Abnahme 33,1 bzw. 25 kg/ha. Dem gegenüber liegen die Werte unter der Zwischenfrucht über denen des Novembers, wenngleich die Zunahmen mit durchschnittlich

Tab. 8: N_{min}-Gehalt (kg/ha) zum 15.3.91 in drei Bodentiefen in Abhängigkeit von der Bodenbearbeitung (A), Bodenbedeckung (B) und N-Düngung (C) (n=6)

Tiefe in cm	Variante									
	PBO	**PB1**	**PZ0**	**PZ1**	**PZ2**	**FB0**	**FB1**	**FZ0**	**FZ1**	**FZ2**
0-30	**36,5**	**34,4**	**31,4[a]**	**31,2[a]**	**38,0[b]**	**38,6**	**34,9**	**31,2[a]**	**29,6[a]**	**37,8[b]**
ABC	F-Test: A=n.s., B=sign., C=n.s. (P=0,05)									
AC	F-Test: A=n.s., C=sign. (P=0,05)									
30-60	**19,7**	**16,4**	**12,7**	**11,8**	**15,1**	**13,9**	**14,0**	**9,3**	**10,5**	**10,1**
ABC	F-Test: A=sign., B=sign., C=n.s. (P=0,05)									
AC	F-Test: A=sign., C=n.s. (P=0,05)									
60-90	**9,4**	**6,5**	**2,8**	**2,9**	**3,6**	**8,7**	**7,2**	**4,1**	**2,4**	**4,1**
ABC/AC	Varianzinhomogen;									
						PZ0*		FB0*	PB0* FB0* FB1*	

* Wilcoxen-Wilcox-Test: Signifikant bei P = 0,05
a, b, c: Mittelwerte der Faktorstufen (C) mit gleichen Buchstaben unterscheiden sich nicht signifikant (Tukey-HSD mit α=0,05)

2,5 kg/ha geringer sind als in der obersten Bodenschicht. Trotz dieser Angleichung liegen die N_{min}-Werte unter den Brachevarianten (PB0, PB1, FB0 und FB1) signifikant um mehr als 4 kg/ha über denen der Zwischenfrucht (PZ0, PZ1, FZ0 und FZ1). Darüber hinaus sind in beiden Serien (ABC und AC) signifikant höhere N_{min}-Werte bei den Varianten mit konventioneller im Vergleich zu denen mit reduzierter Bodenbearbeitung zu erkennen.

Im Unterboden (60-90 cm) verringerte sich der N_{min}-Gehalt im Vergleich zur Beprobung im November bei allen Prüfgliedern. Bei den Brachevarianten beträgt die Abnahme 2 (PB0 und FB0) bzw. 11 und 4 kg/ha (PB1 und FB1). Bei den Varianten der Zwischenfrucht verringerten sich die N_{min}-Werte um 3 bis 6 kg/ha.

3.1.3 N-Entzug der Zwischenfrucht

Im Hinblick auf die gebildete Frisch- und Trockenmasse, den Trockensubstanz- und Stickstoffgehalt sowie den N-Entzug des Sprosses ist die Wirkungen des Faktors N-Düngung signifikant (Tab. 9). Dabei steigt die gebildete Frischmasse bei konventioneller Bodenbearbeitung von 192,6 (0 kg N/ha) auf 284,1 (50 kg N/ha) bzw. 385,9 dt/ha (100 kg

N/ha). Bei den Varianten der reduzierten Bodenbearbeitung liegen die Erträge auf einem signifikant niedrigerem Niveau von jeweils 161,4 (0 kg N/ha), 233,5 (50 kg N/ha) bzw. 360,5 dt/ha (100 kg N/ha).

Der Gehalt an Trockensubstanz sinkt signifikant mit steigendem N-Angebot von zunächst 17.6 (PZ0) bzw. 17,4 % (FZ0) auf 14,2 (PZ1) bzw. 15,4 % (FZ1), und liegt bei der höchsten N-Stufe unabhängig von der Art der Bodenbearbeitung schließlich bei 12,9 % (PZ2 und FZ2). Die oberirdisch gebildete Trockenmasse steigt von 30 dt/ha ohne zusätzliche N-Düngung signifikant um ca. 7 dt/ha bei der ersten Düngungsstufe und nochmals signifikant um etwa 11 dt/ha an, wobei die erzielten Erträge der Trockenmasse bei reduzierter Bodenbearbeitung stets um 4-6 dt/ha unter denen der konventionellen Bodenbearbeitung liegen.

Die N-Wirkung ist bezüglich des N-Gehaltes ganz analog, so dass für die N-Aufnahme der Zwischenfrüchte die gleiche Wirkung in verstärkter Form resultierte. Bemerkenswert ist, dass sich von der zusätzlich zugeführten N-Menge von 50 bzw. 100 kg/ha bilanzmäßig ca. 27 bzw. 62 kg/ha in der mehr gebildeten Biomasse wieder findet.

Tab. 9: Einfluss von Bodenbearbeitung (A) und N-Düngung (C) auf die Frisch- und Trockenmasse, den N-Gehalt und N-Entzug der Zwischenfrucht zum 5.11.90 (n=6)

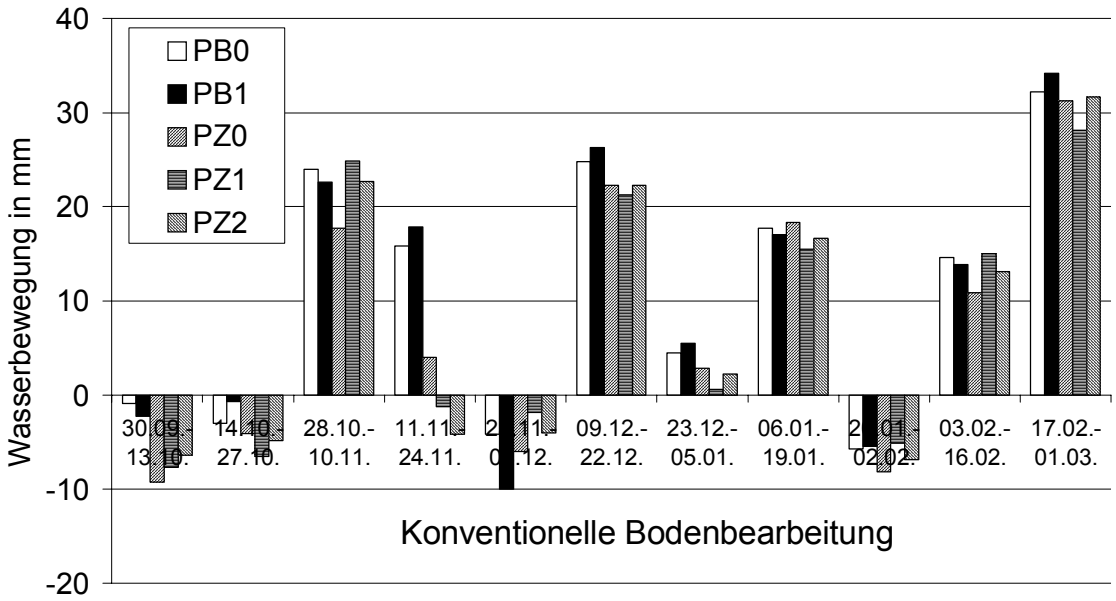
	Variante					
	PZ0	**PZ1**	**PZ2**	**FZ0**	**FZ1**	**FZ2**
Frischmasse in dt/ha	**192,6[a]**	**284,1[b]**	**385,9[c]**	**161,4[a]**	**233,5[b]**	**360,5[c]**
AC	F-Test: A=sign., C=sign. (P=0,05)					
%TS	**17,6[a]**	**14,2[b]**	**12,9[c]**	**17,4[a]**	**15,4[b]**	**12,9[c]**
AC	F-Test: A=n.s., C=sign. (P=0,05)					
Trockennmasse in dt/ha	**33,2[a]**	**39,9[b]**	**50,1[c]**	**27,3[a]**	**35,8[b]**	**46,2[c]**
AC	F-Test: A=sign., C=sign. (P=0,05)					
N_t in mg/g	**17,8[a]**	**22,5[b]**	**26,0[c]**	**18,6[a]**	**20,3[b]**	**24,8[c]**
AC	F-Test: A=n.s., C=sign. (P=0,05)					
N-Entzug in kg/ha	**59,1[a]**	**90,2[b]**	**129,9[c]**	**50,9[a]**	**73,3[b]**	**115,2[c]**
AC	F-Test: A=sign., C=sign. (P=0,05)					
	a, b, c: Mittelwerte der Faktorstufen (C) mit gleichen Buchstaben unterscheiden sich nicht signifikant (Tukey-HSD mit α=0,05)					

3.2 Beobachtungen während des Winterhalbjahres 1991/92

3.2.1 Wasserhaushalt und N-Austrag

Im zweiten Versuchsjahr beginnt die abwärts gerichtete Wasserbewegung aus den oberen 30 cm des Bodens bereits Ende Oktober (Abb. 9). Wie im Vorjahr weisen die Berechnungen während der Aufsättigung des Bodens für die Brache höhere Sickerwassermengen aus als unter der Zwischenfrucht. Innerhalb der drei 14-tägigen Intervalle beginnend mit dem 28. Oktober bis zum 8. Dezember beträgt die Sickerungsrate unter den Brachevarianten durch–schnittlich 35 mm, während unter der Zwischenfrucht nur 15 mm die oberste Bodenschicht abwärts gerichtet verlassen.

Ab dem 9. Dezember liegen nur noch bei den konventionell bearbeiteten Varianten tendenzielle Unterschiede hinsichtlich der Wasserbewegung zwischen Brache und Zwischenfrucht vor, die sich dann im weiteren Verlauf angleichen. Erst in den beiden letzten Intervallen zeichnen sich wieder Unterschiede in Abhängigkeit der Bodenbedeckung ab. In der zweiten Februarhälfte liegen die Sickerungsraten bei den gepflügten Varianten unter der Brache um ca. 10 mm und bei der Zwischenfrucht um etwa 15 mm über denen der gefrästen Parzellen.



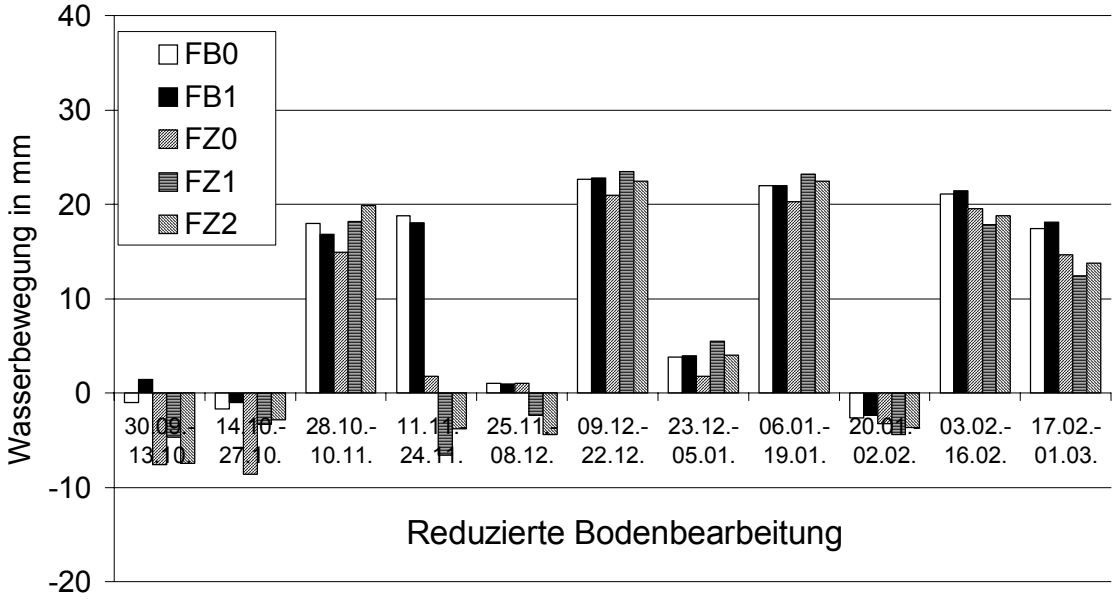


Abb. 9: Sickerung (+) bzw. Aufwärtsbewegung (-) aus 30 cm Tiefe unter Brache und Zwischenfrucht bei unterschiedlicher N-Düngung und Bodenbearbeitung im Winterhalbjahr 1991/92 (n=6) berechnet nach Ansatz C (vrgl. Kap. 2.3.4)

P: gepflügt **B:** Brache **0:** 0 kg N/ha **1:** 50 kg N/ha **2:** 100 kg N/ha
F: gefräst **Z:** Zwischenfrucht

Für den Zeitraum vom 28.10.91 bis 1.3.92 liegen die Werte für die gesamte Sicker–wassermenge aus der obersten Bodenschicht bei den einzelnen Varianten etwa 10 mm über denen des Vorjahres. Die Summen der Sickerung in 30 cm Tiefe betragen unter der Brache etwa 135 mm, bei den Varianten mit Bodenbedeckung 100 mm.

Da mit der Probenahme von Bodenwasser erst Ende November nach der Installation der umfangreichen Messgeräte begonnen werden konnte, beziehen sich die folgenden Ausführungen zum Wasserhaushalt und N-Austrag auf den Zeitraum vom 9. Dezember bis 1. März. Während dieses Zeitraumes betragen die Summen der Sickerung in 30 cm Tiefe unter der Brache nach konventioneller Bodenbearbeitung (PB0 und PB1) ca. 90 mm bzw. 85 mm bei reduzierter Bodenbearbeitung (Tab. 10). Bei den Varianten der Zwischenfrucht liegen die Werte unabhängig von der Bodenbearbeitung und der N-Düngung in einem Bereich zwischen 74 und 79 mm.

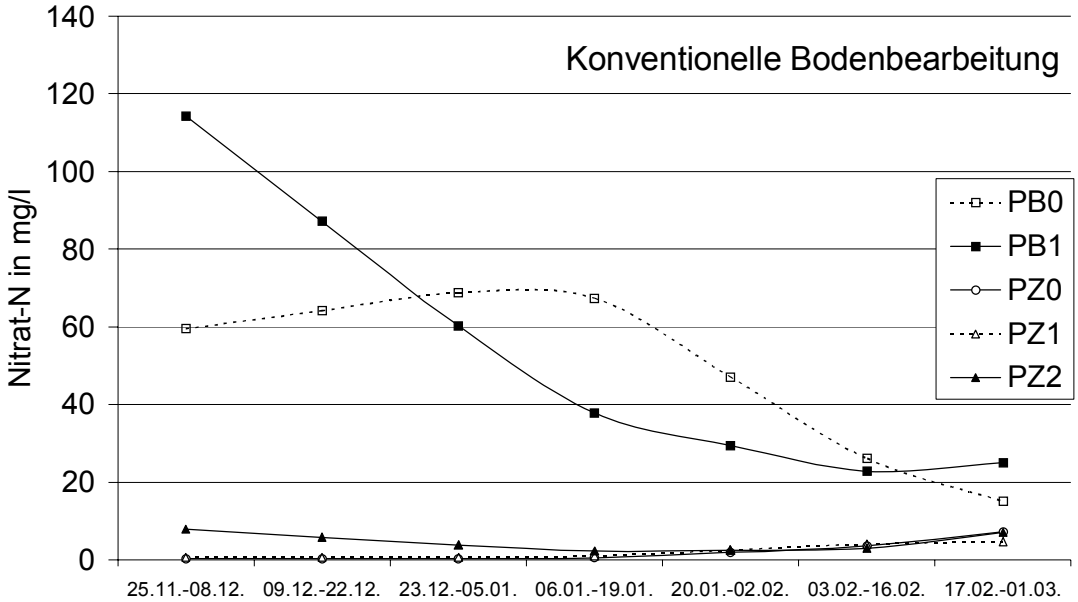
Tab. 10: Summen der Nettosickerung (mm) aus vier verschiedenen Bodentiefen in Abhängigkeit von der Bodenbearbeitung (A), Bodenbedeckung (B) und N-Düngung (C) für den Zeitraum 9.12.91 bis 1.3.92 (n=6) berechnet nach Ansatz C (vrgl. Kap. 2.3.4)

	Variante									
Sickerung (mm)	**PBO**	**PB1**	**PZ0**	**PZ1**	**PZ2**	**FB0**	**FB1**	**FZ0**	**FZ1**	**FZ2**
in 30 cm Tiefe	**88,1**	**91,5**	**77,4**	**75,5**	**79,1**	**84,4**	**86,0**	**74,1**	**78,0**	**78,0**
ABC/AC	Varianzinhomogen; Vorzeichentest: A=n.s., B=sign., C: keine signifikanten Stufen									
								PB0*		
								FB1*		
in 60 cm Tiefe	**78,0**	**79,3**	**62,3**	**64,7**	**62,7**	**75,4**	**77,6**	**63,0**	**61,8**	**66,4**
ABC/AC	Varianzinhomogen; Vorzeichentest: A=n.s., B=sign., C: keine signifikanten Stufen									
	n.s Wilcoxen-Wilcox-Test									
in 90 cm Tiefe	**66,2**	**61,4**	**38,6**	**47,0**	**35,9**	**64,9**	**65,2**	**49,1**	**40,7**	**48,5**
ABC/AC	Varianzinhomogen; Vorzeichentest: A=n.s., B=sign., C: keine signifikanten Stufen									
			PB0*			PZ0*	PZ0*		FB1*	
in 120 cm Tiefe	**53,1**	**45,7**	**14,3**	**26,9**	**11,3**	**51,2**	**47,5**	**32,8**	**20,7**	**29,6**
ABC	F-Test: A=n.s., B=sign., C=n.s. (P=0,05)									
AC	F-Test: A=n.s., C=n.s., A*C=sign. (P=0,05)									
	* Wilcoxen-Wilcox-Test: Signifikant bei P = 0,05									
	Vorzeichentest für Faktoren oder Stufen bei α=0,05									

In 60 cm Tiefe verringert sich die Durchflussmenge um durchschnittlich etwa 10 mm bei den Brache- bzw. 13,5 mm bei den Zwischenfruchtvarianten. In den beiden darunter liegenden Bodentiefen verringern sich die Durchflussmengen weiterhin, wobei dies unter der Zwischenfrucht wesentlich deutlicher ausgeprägt ist als unter den Varianten ohne

Bodenbedeckung. In 120 cm Tiefe liegt die Sickerwassermenge unter der Brache mit 53,1 bzw. 45,7 mm (PB0 und PB1) und 51,2 bzw.47,5 mm (FB0 und FB1) signifikant über dem Niveau der Zwischenfruchtparzellen, bei denen die berechneten Sickerwassermengen in einem Bereich von 11 bis 33 mm schwanken.

Hinsichtlich der Konzentration von Nitratstickstoff in der Bodenlösung von 30 cm Tiefe (Abb. 10) sind bereits zu Beginn des Erfassungszeitraumes differenzierte Unterschiede bei den Brachevarianten in Abhängigkeit der N-Düngung und der Bodenbearbeitung erkennbar. Bei den Varianten nach konventioneller Bodenbearbeitung liegen die Ausgangswerte bei 60 (PB0) bzw. nahezu 120 mg/l (PB1), während bei den gefrästen die Konzentrationen mit ca. 30 (FB0) und knapp 60 mg/l (FB1) nur halb so hoch liegen. Im weiteren Verlauf sinken die Werte unter der Brache mit Ausnahme der Variante PB0, bei der die Konzentration bis zum Jahreswechsel noch auf 70 mg/l ansteigt und sich erst danach verringert. Zum Ende des Beobachtungszeitraumes liegen die Werte auf einem dem Vorjahr entsprechendem Niveau von etwa 20 mg/l. Die Endwerte für die konventionell bearbeiteten Varianten liegen dabei mit etwa 15 (PB0) und 25 mg/l (PB1) über denen, der gefrästen Varianten mit Konzentrationen von 10 (FB0) bzw. ca. 20 mg/l (FB1). Annähernd konstant auf einem Niveau von unter 10 mg/l verläuft die Nitrat-N-Konzentration unter der Zwischenfrucht, wobei die Varianten der höchsten Düngungsstufe (100 kg N/ha) im Vergleich zu den beiden ersten (0 und 50 kg N/ha) unabhängig von der Bodenbearbeitung während der gesamten Auswaschungsperiode tendenziell erhöhte Werte aufweisen.



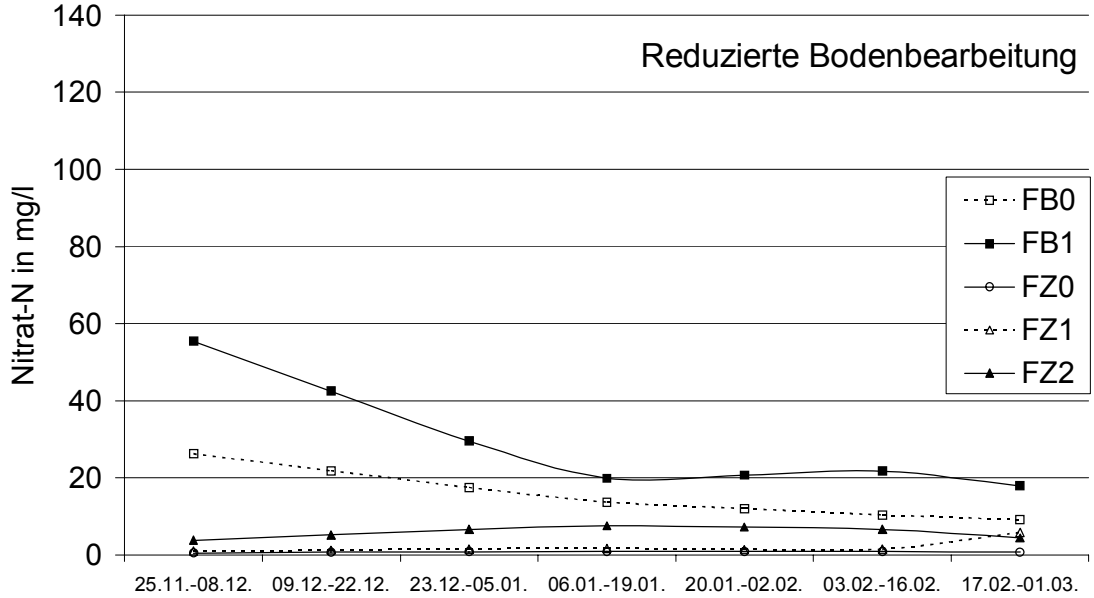
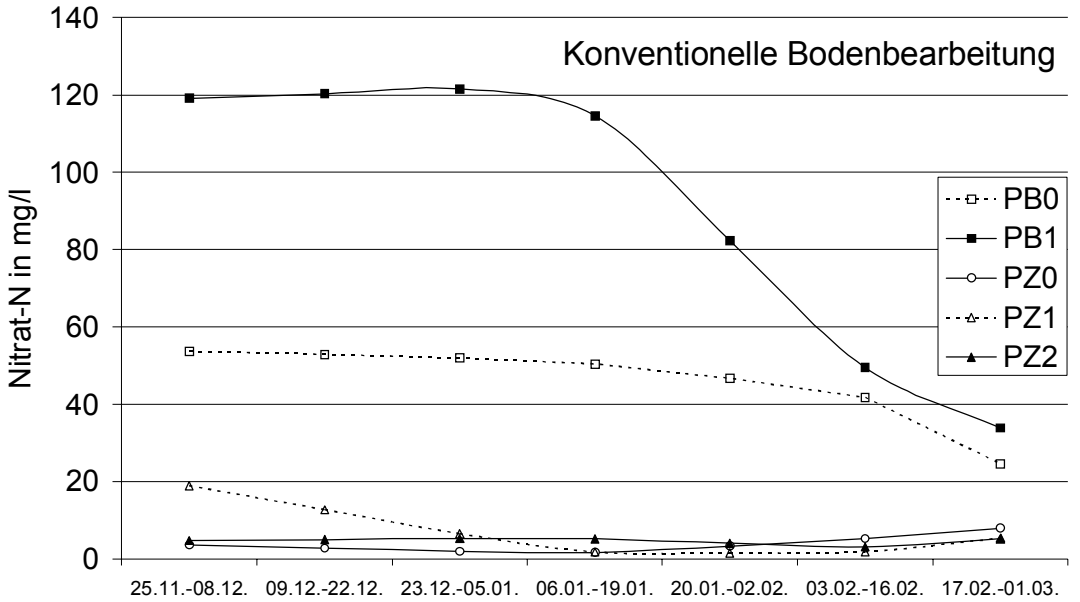


Abb. 10: Mittlerer Nitrat-N-Gehalt in der Bodenlösung in 30 cm Tiefe unter Brache und Zwischenfrucht bei unterschiedlicher N-Düngung und Bodenbearbeitung für die 14-tägigen Berechnungsintervalle im Winterhalbjahr 1991/92 (n=6)

P: gepflügt **B:** Brache **0:** 0 kg N/ha **1:** 50 kg N/ha **2:** 100 kg N/ha
F: gefräst **Z:** Zwischenfrucht

In 60 cm Tiefe entsprechen die Konzentrationen für Nitratstickstoff zu Beginn des Beobachtungszeitraumes unter den Brachevarianten annähernd denen, der in 30 cm Tiefe erhobenen (Abb. 11). Bei den gedüngten Varianten liegen die Werte nach konventioneller Bodenbearbeitung (PB1) wiederum mit 120 mg/l etwa doppelt so hoch als nach der reduzierten Bearbeitung mit der Fräse (FB1). Die Ausgangskonzentrationen bei den ungedüngten Varianten (PB0 und FB0) liegen bei etwa 50 mg/l deutlich unterhalb der gedüngten, wobei der Unterschied in Abhängigkeit von der Bodenbearbeitung nur tendenziell zu erkennen ist. Bis zum Jahreswechsel verändern sich die Werte bei den Varianten PB0, PB1 und FB0 nur unwesentlich; bei der Variante FB1 steigt die Konzentration bis zu diesem Zeitpunkt noch auf über 80 mg/l an. Danach sinken die Werte aller vier Varianten. Zum Ende der Datenerhebung liegen die Konzentrationen der konventionell bearbeiteten Brachevarianten wie während des gesamten Verlaufes mit etwa 25 (PB0) und 34 mg/l (PB1) über denen, der gefrästen Varianten FB0 mit 16 und FB1 mit 27 mg/l. Nur geringe Konzentrationen unterhalb von 10 mg NO_3-N/l finden sich unter den Varianten der Zwischenfrucht. Ausnahmen bilden die Varianten PZ1, deren Ausgangswert bei etwa 20 mg/l liegt, und die Variante FZ2, deren Konzentration kontinuierlich ansteigt und in der ersten Februarhälfte einen Höchstwert von knapp 16 mg/l erreicht.



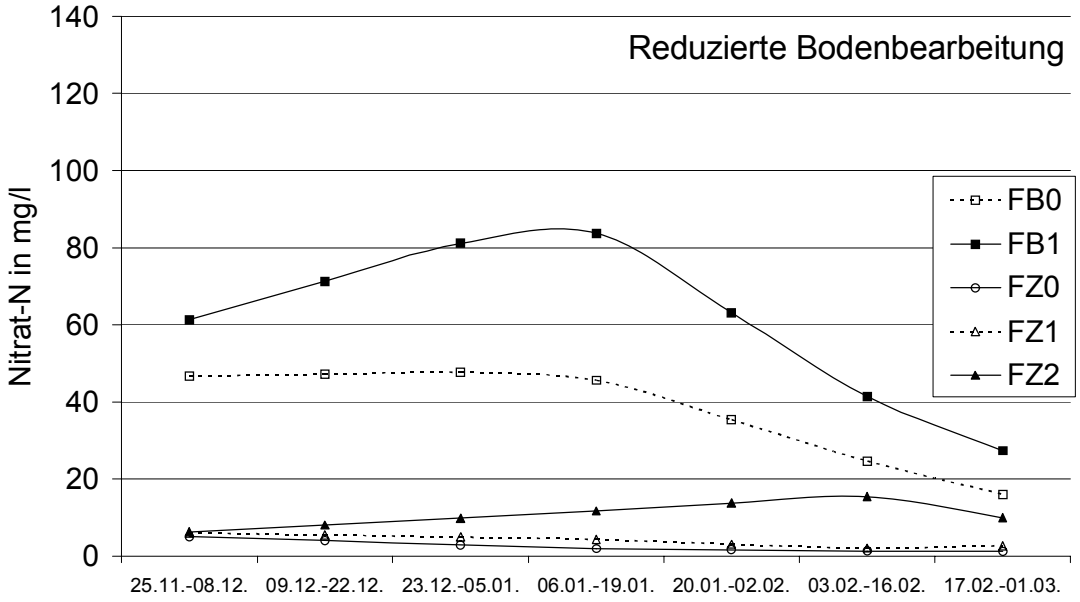
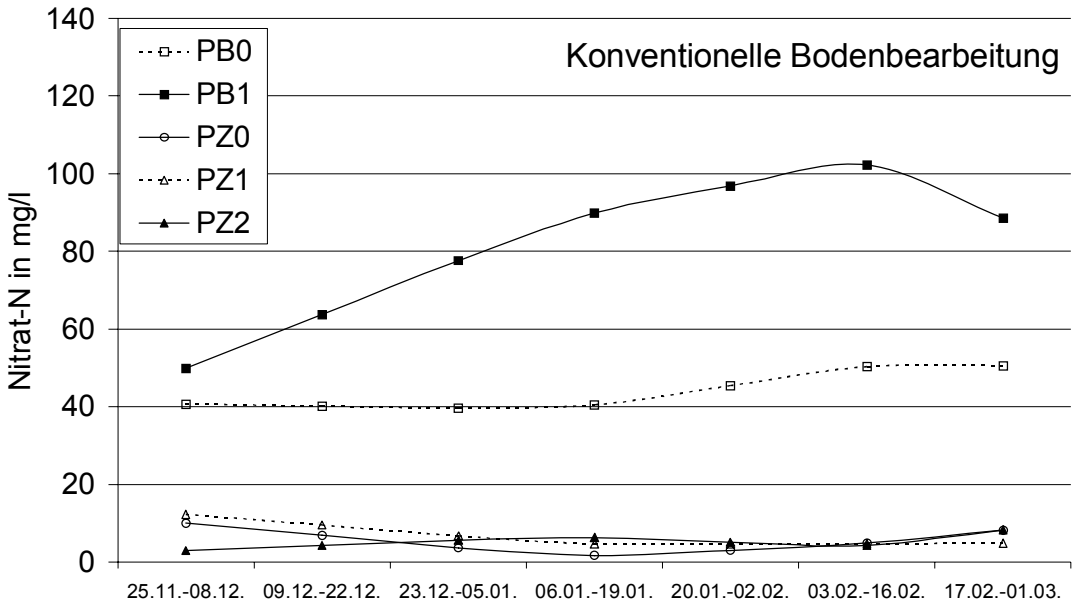


Abb. 11: Mittlerer Nitrat-N-Gehalt in der Bodenlösung in 60 cm Tiefe unter Brache und Zwischenfrucht bei unterschiedlicher N-Düngung und Bodenbearbeitung für die 14-tägigen Berechnungsintervalle im Winterhalbjahr 1991/92 (n=6)

P: gepflügt **B:** Brache **0:** 0 kg N/ha **1:** 50 kg N/ha **2:** 100 kg N/ha
F: gefräst **Z:** Zwischenfrucht



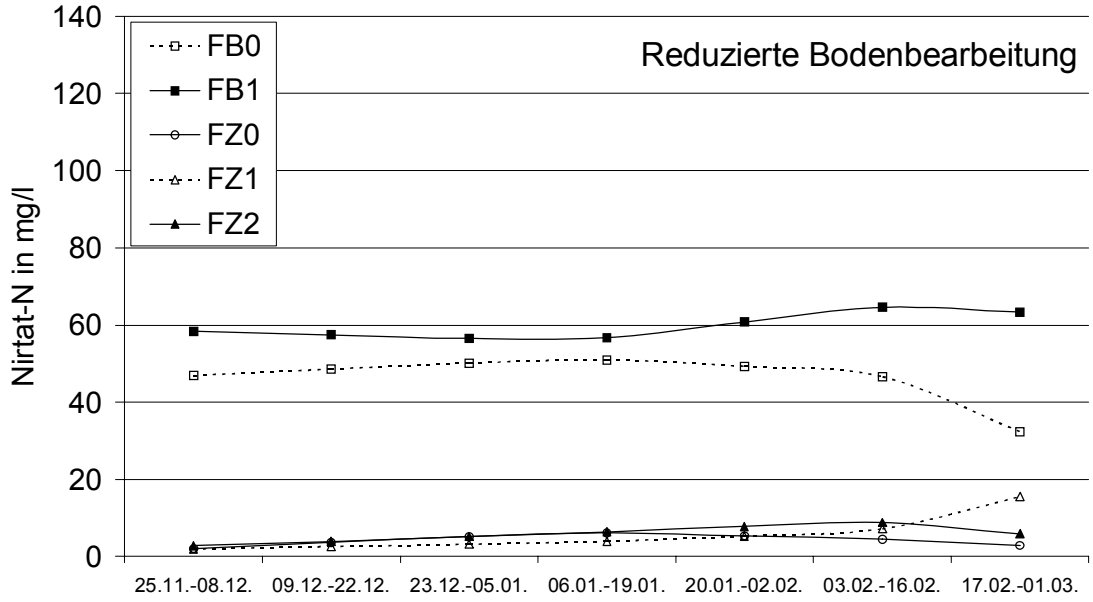
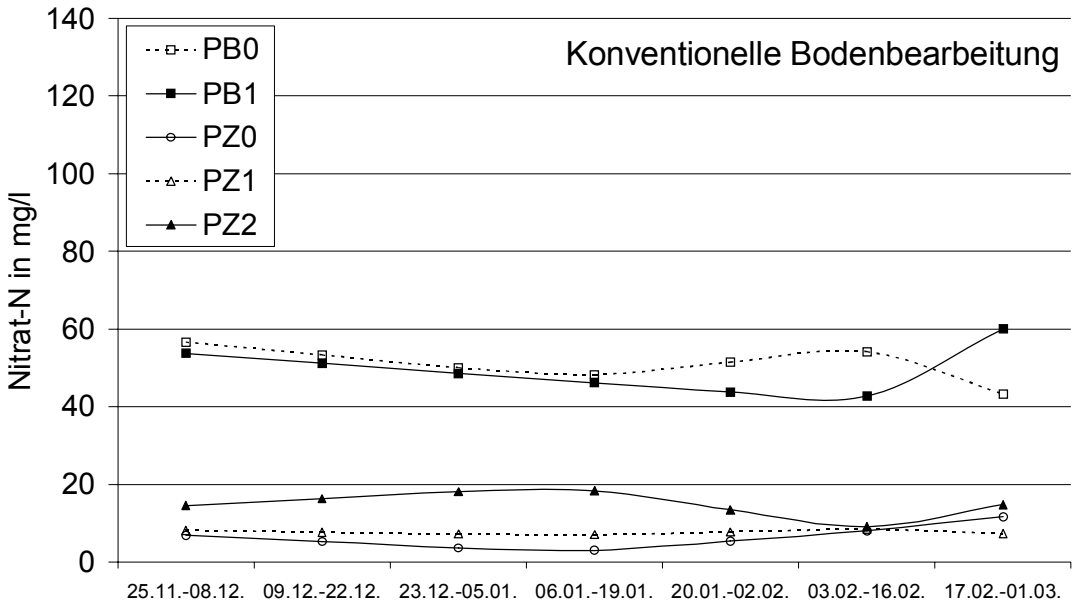


Abb. 12: Mittlerer Nitrat-N-Gehalt in der Bodenlösung in 90 cm Tiefe unter Brache und Zwischenfrucht bei unterschiedlicher N-Düngung und Bodenbearbeitung für die 14-tägigen Berechnungsintervalle im Winterhalbjahr 1991/92 (n=6)

P: gepflügt **B:** Brache **0:** 0 kg N/ha **1:** 50 kg N/ha **2:** 100 kg N/ha
F: gefräst **Z:** Zwischenfrucht

Die Ausgangswerte in 90 cm Tiefe (Abb. 12) liegen unter der Brache in einer Spanne von 40-60 mg/l, wobei die Werte der gedüngten Varianten im Vergleich zu den ungedüngten um etwa 10 mg/l übersteigen. Im Hinblick auf die Art der Bodenbearbeitung zeigen sich zu Beginn der Datenerhebung höhere Konzentrationen bei den gefrästen Varianten gegenüber den konventionell bearbeiteten. Im weiteren Verlauf steigt die Konzentration der gepflügten Variante PB1 auf über 100 mg/l an, während bei der entsprechenden Variante FB1 die Nitrat-N-Konzentration nahezu konstant ca. 60 mg/l beträgt. Bei den ungedüngten Brachevarianten liegen die Werte der gefrästen Parzellen (FB0) bis in die erste Januarhälfte mit 50 mg/l um etwa 10 mg/l über denen, der gepflügten Varianten (PB0). Danach steigt die Konzentration bei der Variante PB0 bis Anfang März auf 50 mg/l an, während diese bei der Variante FB0 auf etwa 30 mg/l sinkt. Bei den Varianten der Zwischenfrucht sind keine nennenswerte Unterschiede festzustellen. Die Nitrat-N-Konzentrationen liegen im Bereich von 5-15 mg/l. Lediglich bei der Variante FZ1 sind zum Ende des Winterhalbjahres im Vergleich zu den restlichen Varianten ein leicht erhöhter Wert von knapp 20 mg/l zu beobachten.

In der untersten Beprobungstiefe von 120 cm liegen die Nitrat-N-Konzentrationen in der Bodenlösung unter der Brache Ende November unabhängig von der Art der Boden–bearbeitung und der Düngungsintensität zwischen 50 und 60 mg/l. Bis Mitte Januar sinken die Werte bei den konventionell bearbeiteten Varianten auf knapp unter 50 mg/l; bei den gefrästen Varianten sogar auf 40 (FB1) bzw. 30 mg/l (FB0). Danach steigen die Werte bis Anfang März bei den gedüngten Varianten auf 60 (PB1) bzw. 50 mg/l (FB1) an. Bei den ungedüngten Varianten ist nur bei der konventionell bearbeiteten (PB0) ein Anstieg bis Mitte Februar auf über 50 mg/l zu beobachten, wobei sich die Nitrat-N-Konzentration im weiteren Verlauf auf knapp 40 mg/l verringert. Bei der gefrästen Variante FB0 dagegen bleiben die Werte während des Zeitraumes von Mitte Januar bis Anfang März nahezu konstant. Unter der Zwischenfrucht liegen die Konzentrationen während der gesamten Auswaschungsperiode innerhalb einer Spanne von etwa 5-10 mg/l bei den beiden ersten Düngungsstufen (0 bzw. 50 kg N/ha). Bei den beiden Varianten der höchsten Düngungsintensität (PZ2 und FZ2) steigen die Werte von anfänglich etwa 15 mg/l auf 20 mg/l Mitte Januar an und liegen auch zum Ende des Beobachtungszeitraumes mit ca. 15 mg/l tendenziell über denen, der Zwischen–fruchtvarianten PZ0, PZ1, FZ0 und FZ1.



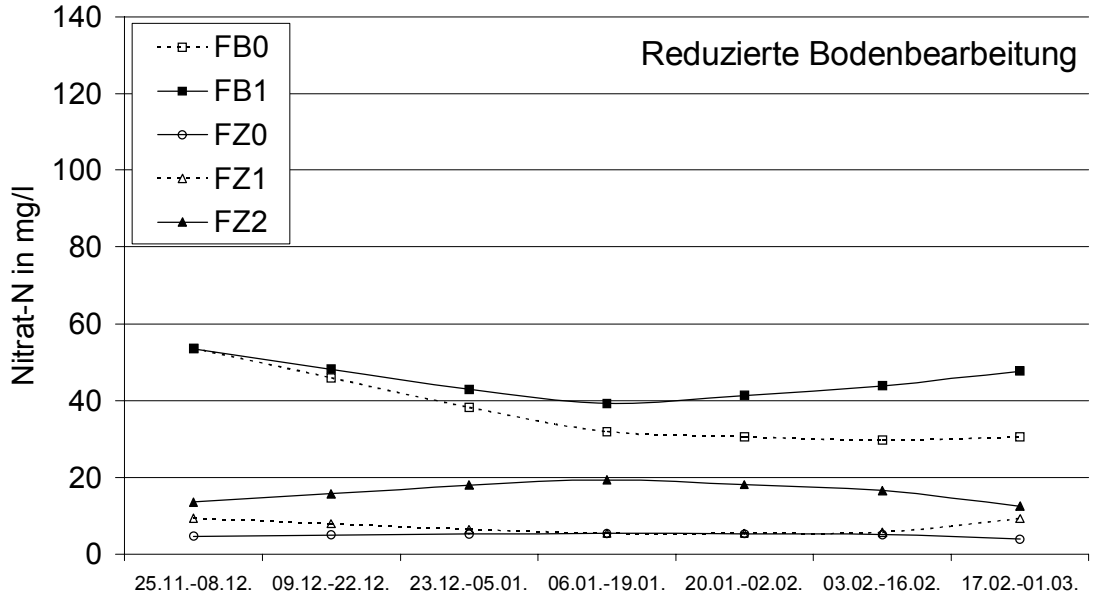
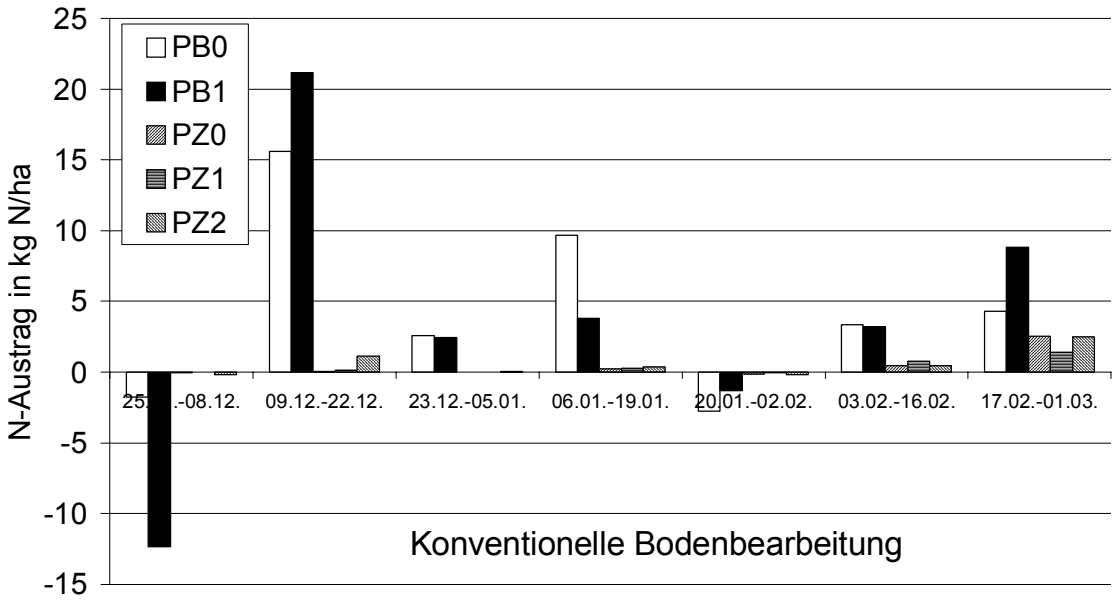


Abb. 13: Mittlerer Nitrat-N-Gehalt in der Bodenlösung in 120 cm Tiefe unter Brache und Zwischenfrucht bei unterschiedlicher N-Düngung und Bodenbearbeitung für die 14-tägigen Berechnungsintervalle im Winterhalbjahr 1991/92 (n=6)

P: gepflügt **B:** Brache **0:** 0 kg N/ha **1:** 50 kg N/ha **2:** 100 kg N/ha
F: gefräst **Z:** Zwischenfrucht

Wie im vorangegangenen Versuchsjahr findet auch 1991/92 eine nennenswerte N-Verlagerung aus der obersten Bodenschicht (0-30 cm) nur unter der Brache statt (Abb. 14). Die größten Auswaschungsverluste werden für das 14-tägige Intervall vom 9. bis 22. Dezember ausgewiesen. Diese betragen für die konventionell bearbeiteten Varianten PB0 und PB1 etwa 16 bzw. 22 kg N/ha, während bei den gefrästen Varianten (FB0 und FB1) mit etwa 5 und 8 kg N/ha weniger als die Hälfte ausgetragen werden. Tendenziell liegen auch während des weiteren Verlaufs die N-Verluste bei den gepflügten Varianten über denen der gefrästen. Unabhängig von der Art der Bodenbearbeitung sind die N-Austräge über die gesamte Auswaschungsperiode betrachtet bei den gedüngten Varianten (PB1 und FB1) deutlich höher als bei den ungedüngten (PB0 und FB0). Unter der Zwischenfrucht sind bei den gefrästen Varianten geringfügig höhere N-Verluste bei den mit 100 kg N/ha gedüngten Parzellen (FZ2) gegenüber denen der beiden ersten Düngungsstufen (FZ0 und FZ1) zu erkennen. Bei den gepflügten Zwischenfruchtvarianten ist dieser Unterschied nicht so stark ausgeprägt, da zum Ende der Auswaschungsperiode (17.2. bis 1.3.) unabhängig von der Düngungsintensität bei allen drei Varianten (PZ0, PZ1 und PZ2) Verluste von 2-3 kg N/ha festzustellen sind.

Ähnlich verläuft die Nitratverlagerung in der Bodentiefe von 60 cm (Abb. 15). Auch hier treten Verluste in größerem Umfang nur unter der Brache auf, wobei diese nach konventioneller Bodenbearbeitung wie in der obersten Bodenschicht höher sind als nach der Bearbeitung mit der Fräse. Unabhängig von der Bodenbearbeitung führt die zusätzliche N-Düngung bei den Varianten PB1 und FB1 zu deutlich höheren N-Austrägen im Vergleich zu den ungedüngten Parzellen von PB0 und FB0. Die größten Verluste finden dabei ebenfalls in dem Intervall vom 9. bis 22. Dezember statt. Die Auswaschungsraten nach dem Jahreswechsel sind jedoch deutlich höher als in 30 cm Tiefe. Auch der Verlauf unter der Zwischenfrucht ähnelt dem in der obersten Bodenschicht. Bei den Varianten der reduzierten Bodenbearbeitung sind die Verluste bei der höchsten Düngungsintensität (FZ2) tendenziell höher als bei den beiden Varianten FZ0 und FZ1. Dieser Unterschied zeigt sich wie in 30 cm Tiefe bei den gepflügten Varianten nicht.



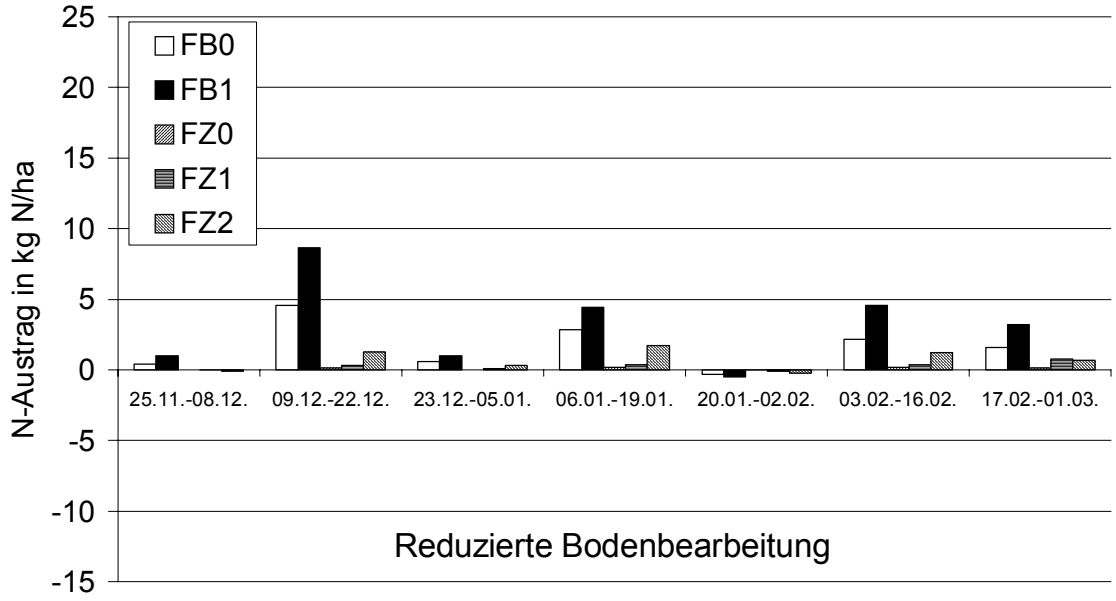
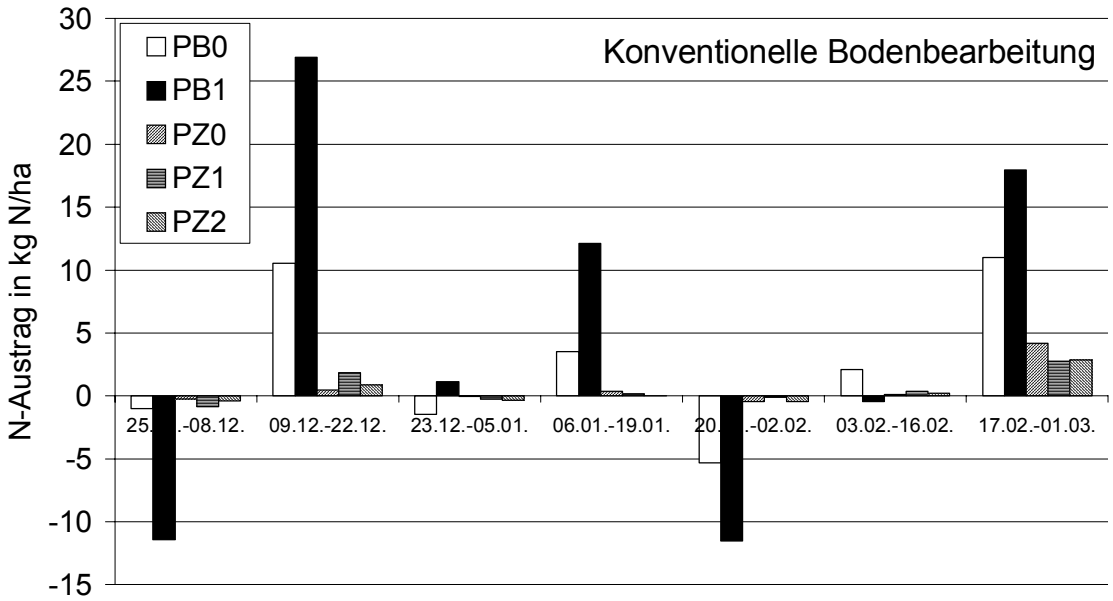


Abb. 14: Verlauf des N-Austrages aus 30 cm Tiefe unter Brache und Zwischenfrucht bei unterschiedlicher N-Düngung und Bodenbearbeitung im Winterhalbjahr 1991/92 (n=6)

P: gepflügt **B:** Brache **0:** 0 kg N/ha **1:** 50 kg N/ha **2:** 100 kg N/ha
F: gefräst **Z:** Zwischenfrucht



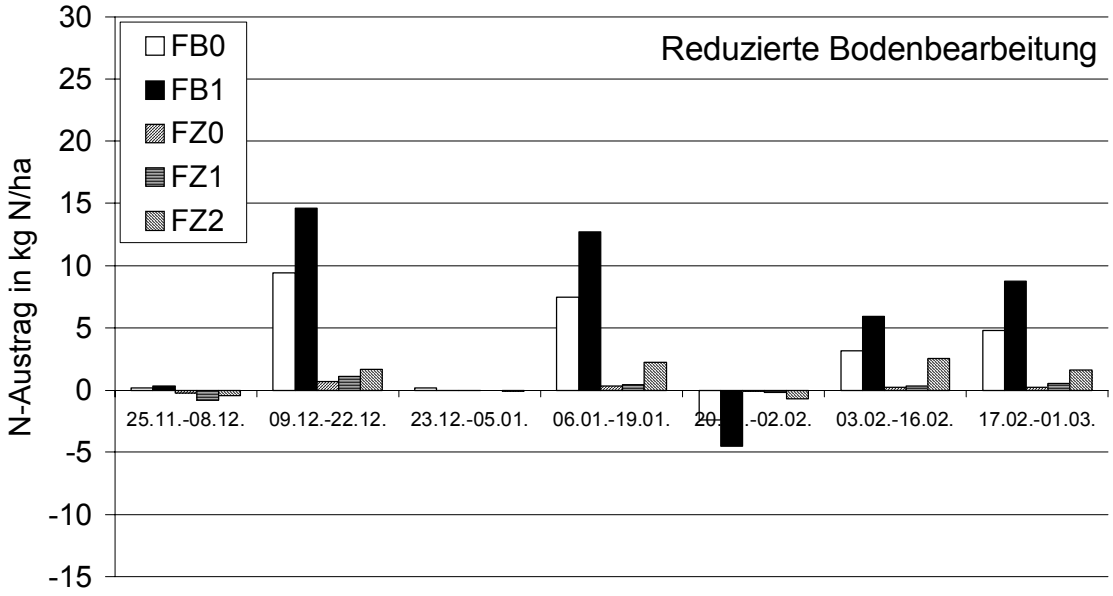
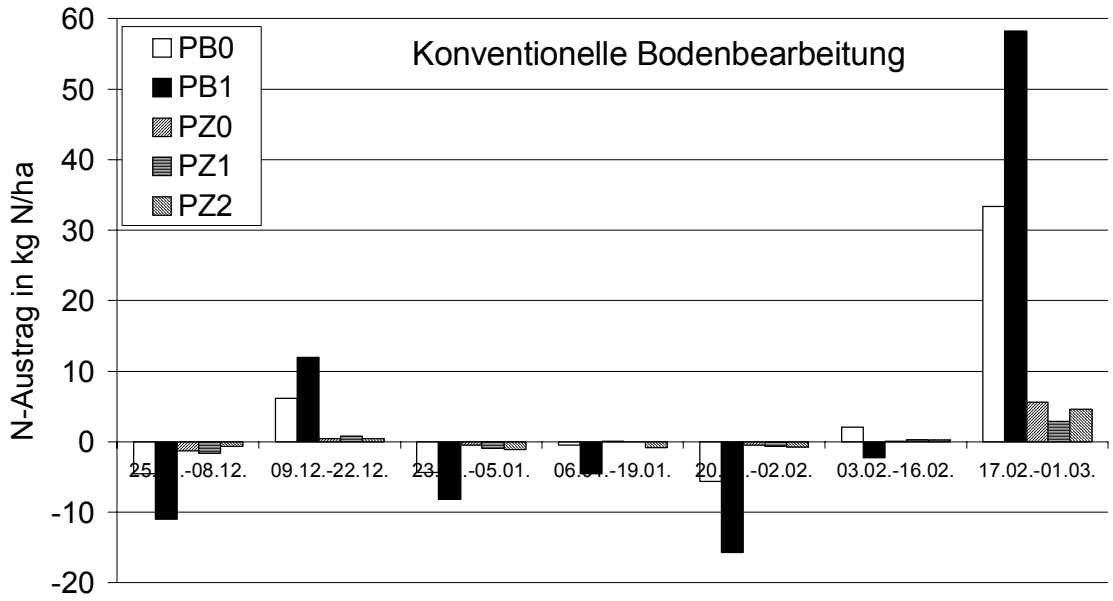


Abb. 15: Verlauf des N-Austrages aus 60 cm Tiefe unter Brache und Zwischenfrucht bei unterschiedlicher N-Düngung und Bodenbearbeitung im Winterhalbjahr 1991/92 (n=6)

P: gepflügt **B:** Brache **0:** 0 kg N/ha **1:** 50 kg N/ha **2:** 100 kg N/ha
F: gefräst **Z:** Zwischenfrucht

In 90 cm Tiefe beginnt die abwärtsgerichtete N-Verlagerung ebenfalls mit dem Zeitintervall 9. bis 22. Dezember (Abb. 16). Sie findet jedoch nur unter der Brache statt und liegt mit etwa 10 kg N/ha deutlich unter den Werten, die in den beiden oberen Bodenschichten erreicht werden. Entscheidend für die gesamten Verluste ist aber erst die zweite Februarhälfte, in der zwischen 13 (FB0) und knapp 60 kg N/ha (PB1) ausgewaschen werden. Bei den Brachevarianten zeigen sich wie in den oberen Tiefen höhere Auswaschungsraten bei den gepflügten (PB0 und PB1) gegenüber den gefrästen Parzellen (FB0 und FB1) sowie beim Vergleich der gedüngten (PB1 und FB1) mit den ungedüngten Varianten PB0 und FB0. Unter der Zwischenfrucht sind die Verlagerungsprozesse zum Ende der Beobachtungsperiode ebenfalls am größten, liegen aber mit maximal 5 kg N/ha weit unterhalb des Niveaus der Brache.

Ganz entsprechend wenngleich in etwas abgeschwächter Form verläuft die Auswaschung in 120 cm Tiefe (Abb. 17). Während des 14-tägigen Intervalls Mitte Dezember liegen die Auswaschungsraten selbst unter der Brache unterhalb von 10 kg N/ha. In der zweiten Februarhälfte zeigen sich bei den Brachevarianten die gleichen Auswirkungen von Bodenbearbeitung und N-Düngung auf die N-Verluste wie in 90 cm Tiefe. Bei den mit 50 kg N/ha gedüngten Varianten liegen die Werte mit etwa 50 (PB1) und knapp 30 kg N/ha (FB1) z.T. deutlich unterhalb der in 90 cm Tiefe beobachteten Auswaschungsraten.



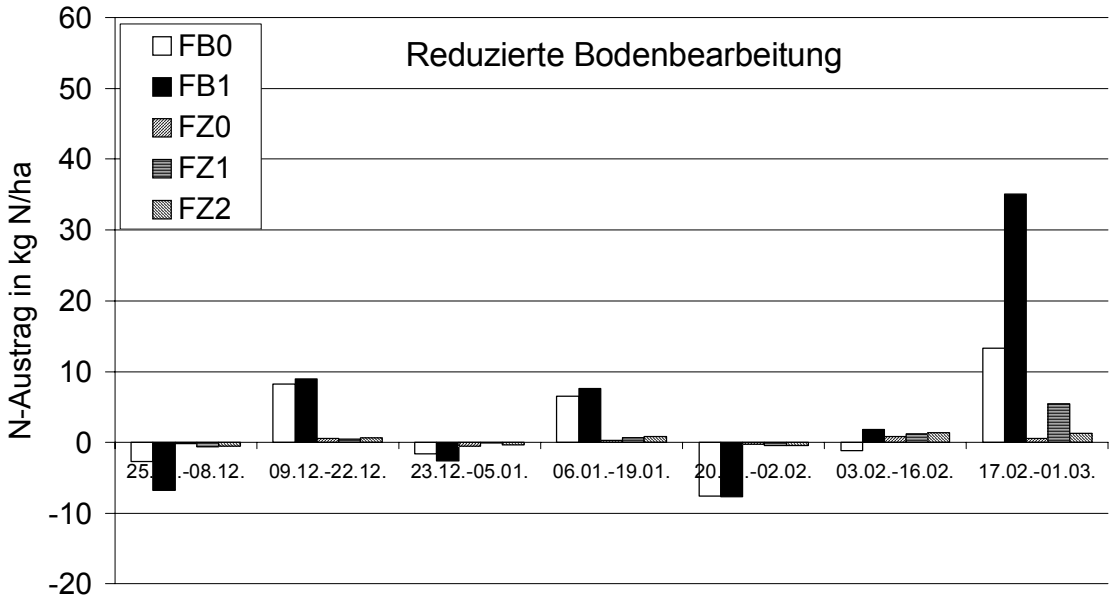
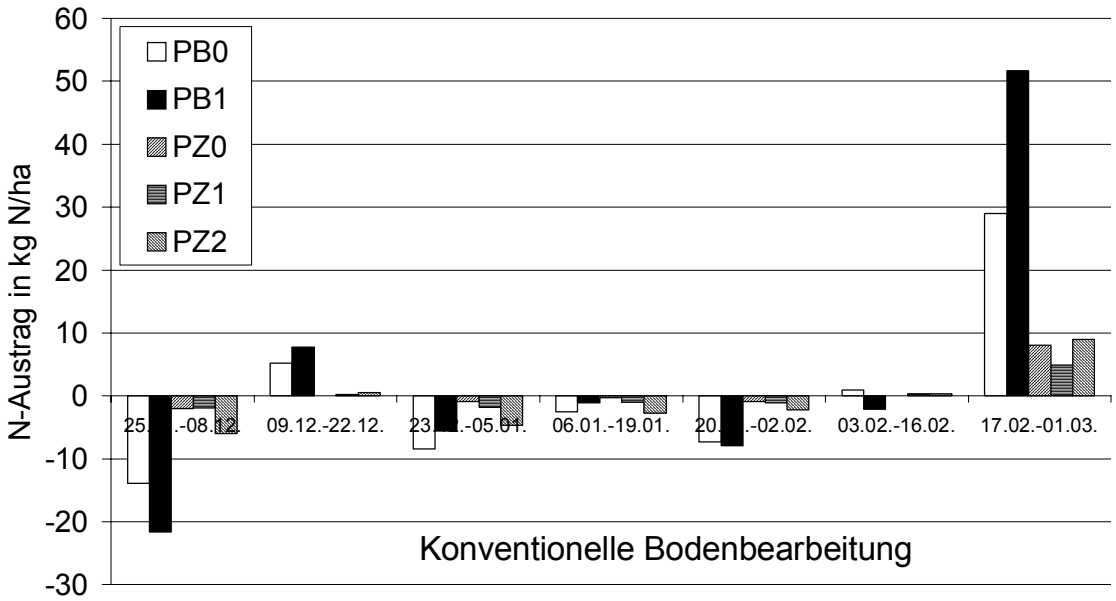


Abb. 16: Verlauf des N-Austrages aus 90 cm Tiefe unter Brache und Zwischenfrucht bei unterschiedlicher N-Düngung und Bodenbearbeitung im Winterhalbjahr 1991/92 (n=6)

P: gepflügt **B:** Brache **0:** 0 kg N/ha **1:** 50 kg N/ha **2:** 100 kg N/ha
F: gefräst **Z:** Zwischenfrucht



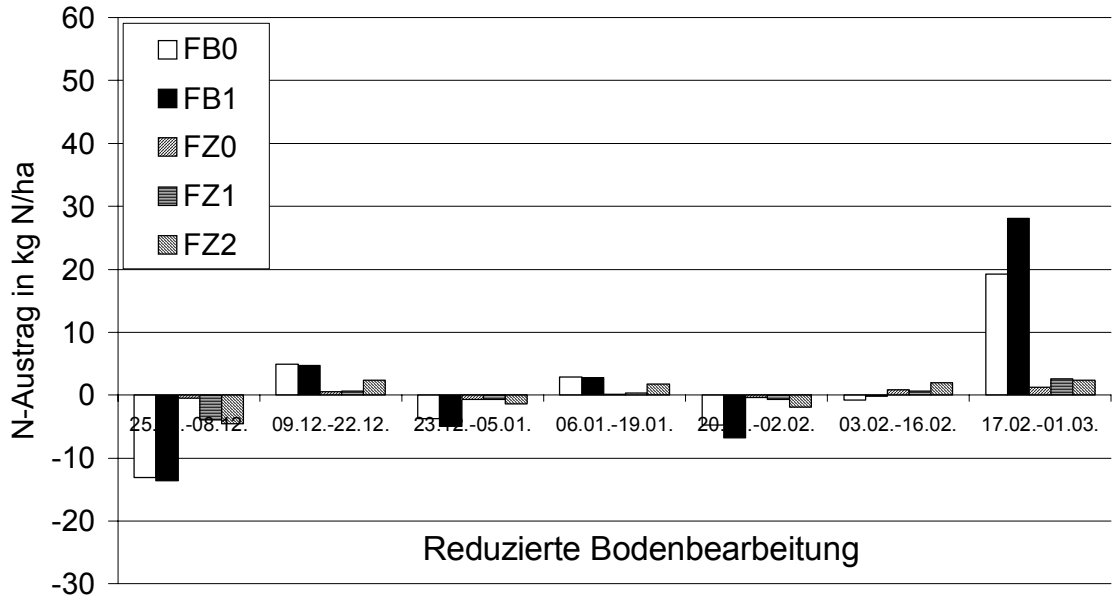


Abb. 17: Verlauf des N-Austrages aus 120 cm Tiefe unter Brache und Zwischenfrucht bei unterschiedlicher N-Düngung und Bodenbearbeitung im Winterhalbjahr 1991/92 (n=6)

P: gepflügt **B:** Brache **0:** 0 kg N/ha **1:** 50 kg N/ha **2:** 100 kg N/ha
F: gefräst **Z:** Zwischenfrucht

Beim Vergleich der gesamten N-Verluste in 30 cm Tiefe während des Beobachtungs–zeitraumes vom 9. Dezember bis zum 1. März der Varianten der Serie ABC zeigen sich signifikante Wirkungen der Faktoren ‚Bodenbearbeitung' und ‚Bodenbedeckung'. Sowohl unter der Brache als auch unter der Zwischenfrucht sind die N-Austräge mit 32,8 (PB0), 38,1 (PB1), 3,1 (PZ0) und 2,6 kg/ha (PZ1) bei der Bodenvorbereitung mit dem Pflug deutlich höher als bei den entsprechenden Prüfgliedern FB0 (11,4), FB1 (21,4), FZ0 (0,6) und FZ1 (1,8) mit reduzierter Bodenbearbeitung. Noch größer sind die Unterschiede im Hinblick auf die Art der Bodenbedeckung. Unabhängig von der Bodenbearbeitung und N-Düngung betragen die Verluste unter der Brache durchschnittlich ca. 26 kg N/ha, während unter der Zwischenfrucht nur 2 kg/ha ausgewaschen werden. Beim Vergleich der Serie AC (PZ0, PZ1, PZ2 und FZ0, FZ1, FZ2) sind keine signifikanten Unterschiede festzustellen, wenngleich bei den gefrästen Varianten die Austräge mit zunehmender Düngungsintensität in der Tendenz von 0,6 (FZ0) über 1,8 (FZ1) auf 5,0 kg N/ha (FZ2) ansteigen.

Tab. 11: Summen des N-Austrages (kg/ha) aus vier verschiedenen Bodentiefen in Abhängigkeit von der Bodenbearbeitung (A), Bodenbedeckung (B) und N-Düngung (C) für den Zeitraum 9.12.91 bis 1.3.92 (n=6)

N-Austrag (kg/ha)	Variante									
	PBO	**PB1**	**PZ0**	**PZ1**	**PZ2**	**FB0**	**FB1**	**FZ0**	**FZ1**	**FZ2**
in 30 cm Tiefe	**32,8**	**38,1**	**3,1**	**2,6**	**4,3**	**11,4**	**21,4**	**0,6**	**1,8**	**5,0**
ABC	F-Test: A=sign., B=sign., C=n.s. (P=0,05)									
AC	F-Test: A=n.s., C=n.s. (P=0,05)									
in 60 cm Tiefe	**20,4**	**46,2**	**4,6**	**4,8**	**3,1**	**22,6**	**37,4**	**1,3**	**2,1**	**7,3**
ABC	F-Test: A=n.s., B=sign., C=sign., A*B=sign. (P=0,05)									
AC	F-Test: A=n.s., C=n.s. (P=0,05)									
in 90 cm Tiefe	**31,0**	**39,4**	**5,3**	**2,2**	**2,7**	**17,5**	**43,2**	**1,4**	**7,0**	**3,2**
ABC	Varianzinhomogen; Vorzeichentest: A=n.s., B=sign., C: Signifikante Stufen B0-B1									
								PB0*		
								FB1*		
AC	F-Test: A=n.s., C=n.s. (P=0,05)									
in 120 cm Tiefe	**16,9**	**42,8**	**6,0**	**1,6**	**0,2**	**17,8**	**23,7**	**1,7**	**2,6**	**5,3**
ABC/AC	Varianzinhomogen; Vorzeichentest: A=n.s., B=sign., C: keine signifikanten Stufen									
	n.s Wilcoxen-Wilcox-Test									
	* Wilcoxen-Wilcox-Test: Signifikant bei P = 0,05									
	Vorzeichentest für Faktoren oder Stufen bei α=0,05									

In 60 cm Tiefe liegen die Verluste unter der Brache in einem Bereich von 20,4 (PB0) und 46,2 (PB1) und zwischen 1,3 (FZ0) und 4,8 kg N/ha (PZ1) unter der Zwischenfrucht. Damit übt die Art der Bodenbedeckung auch hier eine signifikante Wirkung auf die Höhe der Auswaschung aus. Bei zusätzlicher Düngung von 50 kg N/ha steigen die Verluste signifikant von 20,4 (PB0) auf 46,2 (PB1), bzw. 22,6 (FB0) auf 37,4 kg N/ha (FB1) unter der Brache und von 4,6 (PZ0) auf 4,8 (PZ1) sowie von 1,3 (FZ0) auf 2,1 kg/ha (FZ1) unter der Zwischenfrucht an. Zwischen den einzelnen Prüfgliedern mit Zwischenfruchtbewuchs (Serie AC) können keine signifikanten Unterschiede hinsichtlich der Nitratverlagerung nachgewiesen werden.

Für die beiden unteren Bodenhorizonte zeigen sich ähnliche Unterschiede zwischen den Varianten der Brache und der Zwischenfrucht. In 90 cm Tiefe schwanken die N-Austräge unter der Brache zwischen 24,3 (B0) und 41,3 kg/ha (B1) und liegen damit deutlich über den Werten der Zwischenfrucht, die in einem Bereich von 1,4 (FZ0) und 7,0 kg/ha (FZ1) liegen. In 120 cm Tiefe beträgt die durchschnittliche Auswaschung 25,3 kg N/ha unter der Brache und knapp 3 kg N/ha unter der Zwischenfrucht. In allen Bodentiefen ist zu beobachten, dass die Erhöhung der N-Düngung von 0 auf 50 kg/ha unter der Brache stets auch zu einer Erhöhung der N-Verluste führt. Bei den Varianten der Zwischenfrucht dagegen ist dieser Trend nicht eindeutig zu erkennen.

3.2.2 Boden N_{min}

Der Gehalt an Nitratstickstoff im Boden lag zur Versuchsanlage Anfang September für die Bodenschicht 0-30 cm mit durchschnittlich 45,7 kg NO_3-N/ha etwas unter dem Ausgangswert des Vorjahres von 51,8 kg/ha. In den beiden anderen Bodenhorizonten waren mit 26,4 (30-60 cm) bzw. 31,6 kg NO_3-N/ha (60-90 cm) höhere Werte gegenüber dem Vorjahr (15,8 bzw. 7,3 kg/ha) zu beobachten. Die Veränderungen bis zur zweiten Oktoberhälfte (Tab. 12) lassen unter der Brache bei den ungedüngten Varianten eine leichte Abnahme der Gehalte in der obersten Bodenschicht erkennen, während bei den gedüngten Varianten ein Anstieg der Werte um bis zu 20 kg NO_3-N/ha festzustellen ist. Unter der Zwischenfrucht ist eine deutliche Abnahme des Gehaltes an NO_3-Stickstoffs von bis zu 40 kg im Oberboden zu beobachten. Der Einfluss der Art der Bodenbedeckung auf die Zu- bzw. Abnahme des Nitratgehalts ist bei den Prüfgliedern der Serie ABC signifikant. Darüber hinaus liegen die Werte für die Varianten mit reduzierter Bodenbearbeitung auf einem signifikant höheren Niveau im

Vergleich zu den gepflügten Varianten. Unabhängig von der Art der Bodenbearbeitung und der Bodenbedeckung hat die zusätzliche Düngung von 50 kg N/ha ebenfalls signifikant höhere N_{min}-Werte zur Folge. Bei der Gegenüberstellung der Zwischenfruchtvarianten (Serie AC) ist ein signifikanter Unterschied zwischen den mit der Fräse bearbeiteten Varianten, bei denen der Gehalt an Nitratstickstoff durchschnittlich 18,2 kg/ha beträgt, zu den konventionell bearbeiteten (7 kg/ha) festzustellen.

Tab. 12: N_{min}-Gehalt (kg/ha) zum 18.10.91 in drei Bodentiefen in Abhängigkeit von der Bodenbearbeitung (A), Bodenbedeckung (B) und N-Düngung (C) (n=6)

Tiefe in cm	Variante									
	PBO	**PB1**	**PZ0**	**PZ1**	**PZ2**	**FB0**	**FB1**	**FZ0**	**FZ1**	**FZ2**
0-30	**40,2**	**56,5**	**4,5**	**5,7**	**10,7**	**38,5**	**67,9**	**8,1**	**26,5**	**20,0**
ABC	F-Test: A=sign., B=sign., C=sign., (P=0,05)									
AC	F-Test: A=sign., C=n.s. (P=0,05)									
30-60	**8,5**	**9,4**	**8,7**	**10,8**	**14,7**	**11,5**	**7,5**	**8,0**	**9,8**	**9,8**
ABC	Varianzinhomogen; n.s Wilcoxen-Wilcox-Test									
AC	F-Test: A=n.s., C=n.s. (P=0,05)									
60-90	**8,8**	**9,4**	**9,3^{ab}**	**7,7^{a}**	**12,5^{b}**	**8,8**	**9,3**	**7,4^{ab}**	**8,0^{a}**	**9,9^{b}**
ABC	F-Test: A=n.s., B=n.s., C=n.s. (P=0,05)									
AC	F-Test: A=n.s., C=sign. (P=0,05)									
	* Wilcoxen-Wilcox-Test: Signifikant bei P = 0,05									
	a, b, c: Mittelwerte der Faktorstufen (C) mit gleichen Buchstaben unterscheiden sich nicht signifikant (Tukey-HSD mit α=0,05)									

In den beiden unteren Horizonten verringern sich die durchschnittlichen Gehalte gegenüber den Ausgangswerten vom September um etwa 16 kg auf ca. 10 kg NO_3-N/ha in der Bodenschicht 30 bis 60 cm bzw. um 23 kg auf 9 kg NO_3-N/ha (60 – 90 cm). Bei den Varianten mit Zwischenfruchtbewuchs lassen sich in beiden Bodenschichten mit steigender Düngungsintensität höhere Gehalte erkennen, statistisch abgesichert ist dieser Zusammenhang jedoch nur in der untersten Bodenschicht unabhängig von der Art der Bodenbearbeitung zwischen der ungedüngten und der mit 100 kg N/ha gedüngten Zwischenfrucht.

Anfang März liegen die N_{min}-Werte im Oberboden (0 bis 30 cm) aller Varianten unterhalb von 8 kg /ha (Tab. 13). Im Vergleich zur Probennahme Mitte Oktober zeigen sich insbesondere unter der Brache drastische Abnahmen von bis zu 62 kg (FB1). Unter der Zwischenfrucht verringern sich die Gehalte um 0,7 (PZ0) bis 21,8 kg/ha (FZ1). Dieser Trend setzt sich auch in der Bodenschicht von 30 bis 60 cm fort, wobei aber die Abnahmen aufgrund

geringerer Bezugswerte im Oktober geringer sind. Im Gegensatz zu den Veränderungen im Oberboden verringern sich hier die Vorräte an Nitratstickstoff unter der Zwischenfrucht mit bis zu 11,6 kg (PZ2) stärker als unter der Brache. Im Unterboden (60 bis 90 cm) erhöhen sich Gehalte um 0,6 bis 8,1 kg unter der Brache gegenüber der Analyse im Spätherbst und liegen mit 9,4 bis 17,4 kg deutlich über den Werten der Zwischenfruchtvarianten, bei denen eine moderate Abnahme zu beobachten ist.

Tab. 13: N_{min}-Gehalt (kg/ha) zum 9.3.92 in drei Bodentiefen in Abhängigkeit von Bodenbearbeitung (A), Bodenbedeckung (B) und N-Düngung (C) (n=6)

Tiefe in cm	Variante									
	PBO	**PB1**	**PZ0**	**PZ1**	**PZ2**	**FB0**	**FB1**	**FZ0**	**FZ1**	**FZ2**
0-30	**7,7**	**6,5**	**3,8**	**4,6**	**3,8**	**5,5**	**6,0**	**3,5**	**4,7**	**4,1**
ABC	F-Test: A=n.s., B=sign., C=n.s. (P=0,05)									
AC	F-Test: A=n.s., C=n.s. (P=0,05)									
30-60	**7,0**	**8,2**	**2,8**	**3,3**	**3,1**	**8,2**	**8,3**	**3,1**	**3,2**	**3,5**
ABC	F-Test: A=n.s., B=sign., C=n.s. (P=0,05)									
AC	F-Test: A=n.s., C=n.s. (P=0,05)									
60-90	**10,5**	**15,7**	**9,3**	**6,1**	**9,8**	**9,4**	**17,4**	**5,6**	**6,1**	**9,6**
ABC	Varianzinhomogen; n.s Wilcoxen-Wilcox-Test bei P = 0,05									
AC	F-Test: A=n.s., C=n.s. (P=0,05)									

3.2.3 N-Entzug der Zwischenfrucht

Bis zur ersten Probenahme Mitte November (Tab. 14) erhöht sich die gebildete Frischmasse mit zunehmender N-Düngung nach konventioneller Bodenbearbeitung von 106,9 (PZ0) auf 257,9 (PZ1) und 403,0 dt/ha (PZ2). Bei reduzierter Bodenbearbeitung steigt sie ebenfalls von 15,1,6 ohne zusätzliche Düngung (FZ0) auf 272,3 bei einer Düngergabe von 50 kg N/ha (FZ1) und 409,3 dt/ha bei der höchsten Düngungsstufe von 100 kg (FZ2). Die Wirkung der Düngung ist dabei signifikant und es bestehen signifikante Unterschiede zwischen den einzelnen Düngungsstufen. Im Gegensatz zum Vorjahr wirkt sich der Faktor ‚Bodenbearbeitung' nicht signifikant auf die Erträge aus. Tendenziell übt die reduzierte Bodenbearbeitung einen positiven Einfluss auf die gebildete Frischmasse aus.

Der Anteil der Trockensubstanz sinkt bei zunehmender Düngungsintensität von 19,2 % (PZ0) auf 14,1 % (PZ1) und 11,7 % (PZ2) bei den gepflügten bzw. von 17,5 % (FZ0) auf 12,5 %

(FZ1) und 10,8 % (FZ2) bei den gefrästen Varianten. Die gebildeten Trockenmassen liegen mit etwa 23 dt bei den ungedüngten Varianten, 35 dt bei der ersten und 45,5 dt/ha bei der oberen Düngungsstufe etwas unter den Werten des Vorjahres.

Tab. 14: Einfluss von Bodenbearbeitung (A) und N-Düngung (C) auf die Frisch- und Trockenmasse, den N-Gehalt und N-Entzug der Zwischenfrucht zum 14.11.91 (n=6)

	Variante					
	PZ0	**PZ1**	**PZ2**	**FZ0**	**FZ1**	**FZ2**
Frischmasse in dt/ha	**106,9[a]**	**257,9[b]**	**403,0[c]**	**151,6[a]**	**272,3[b]**	**409,3[c]**
AC	F-Test: A=sign., C=sign. (P=0,05)					
%TS	**19,2[a]**	**14,1[b]**	**11,7[c]**	**17,5[a]**	**12,5[b]**	**10,8[c]**
AC	F-Test: A=sign., C=sign. (P=0,05)					
Trockenmasse in dt/ha	**20,3[a]**	**36,1[b]**	**46,6[c]**	**26,0[a]**	**33,9[b]**	**44,4[c]**
AC	F-Test: A=sign., C=sign. (P=0,05)					
N_t in mg/g	**11,3**	**15,9**	**22,6**	**17,5**	**19,0**	**22,2**
AC	Varianzinhomogen; Vorzeichentest: A=n.s., C: Signifikante Stufen Z0-Z1, Z0-Z2, Z1-Z2					
N-Entzug in kg/ha	**23,1**	**56,5**	**102,0**	**47,7**	**64,3**	**99,9**
AC	Varianzinhomogen; Vorzeichentest: A=n.s., C: allen Stufen (Z0, Z1 und Z2)					
	a, b, c: Mittelwerte der Faktorstufen (C) mit gleichen Buchstaben unterscheiden sich nicht signifikant (Tukey-HSD mit α=0,05)					
	Vorzeichentest für Faktoren oder Stufen bei α=0,05					

Mit steigendem Stickstoffangebot steigt der N-Gehalt der Zwischenfrucht. Bei den gepflügten Varianten verdoppelt er sich von 11,3 (PZ0) auf 22,6 mg/g (PZ2). Dem gegenüber liegen die Konzentrationen bei den gefrästen Varianten in einer engeren Spanne von 17,5 (FZ0) und 22,2 mg/g (FZ2). Die Entzüge sind unabhängig von der Düngung und Bodenbearbeitung etwas geringer als im Vorjahr zu einem vergleichbaren Zeitpunkt der Beprobung. Sie betragen 23,1 (PZ0), bzw. 56,5 (PZ1) und 102,0 kg/ha (PZ2) bei den gepflügten sowie 47,7 (FZ0), bzw. 64,3 (FZ1) und 99,9 kg/ha (FZ2) bei den gefrästen Varianten.

Kurz vor Umbruch der Zwischenfrucht liegen die Werte für die gebildete Frischmasse in den Bereichen von 136,3 bis 368,4 dt/ha bei den gepflügten und zwischen 236,2 und 449,1 dt/ha bei den gefrästen Varianten (Tab. 15). Dabei sind die Wirkungen sowohl der

Bodenbearbeitung als auch der N-Düngung signifikant. Im Vergleich zu Mitte November verringert sich der Trockensubstanzgehalt bei den ungedüngten Varianten von 19,2 auf 18,1 % (PZ0) bzw. von 17,5 auf 15,8 % (FZ0). Dem gegenüber liegen bei den gedüngten Varianten mit 16,4 (PZ1), 12,2 (PZ2), 14,0 (FZ1) und 12,7 (FZ2) höhere Gehalte vor. Eine deutliche Zunahme bei der Stickstoffkonzentration um durchschnittlich 5 mg/g gegenüber der Probennahme im November ist bei allen Varianten zu beobachten. Signifikante Unterschiede zeigen sich zwischen den einzelnen Düngungsstufen und zwischen den Varianten unterschiedlicher Bodenvorbereitung. Auch bei den N-Entzügen liegen die Werte für die Varianten mit reduzierter Bodenbearbeitung mit 77,2 (FZ0) bzw. 106,7 (FZ1) und 160,9 kg/ha (FZ2) signifikant über den konventionell bearbeiteten PZ0 (42,9), PZ1 (79,9) und PZ2 (125,9).

Tab. 15: Einfluss von Bodenbearbeitung (A) und N-Düngung (C) auf die Frisch- und Trockenmasse, den N-Gehalt und N-Entzug der Zwischenfrucht zum 18.3.92 (n=6)

	Variante					
	PZ0	**PZ1**	**PZ2**	**FZ0**	**FZ1**	**FZ2**
Frischmasse in dt/ha	**136,3^{a}**	**239,0^{b}**	**368,4^{c}**	**236,2^{a}**	**324,5^{b}**	**449,1^{c}**
AC	F-Test: A=sign., C=sign. (P=0,05)					
%TS	**18,1**	**16,4**	**12,2**	**15,8**	**14,0**	**12,7**
AC	Varianzinhomogen; Vorzeichentest: A=n.s., C: allen Stufen (Z0, Z1 und Z2)					
Trockenmasse in dt/ha	**24,6^{a}**	**38,6^{ab}**	**44,7^{b}**	**37,5^{a}**	**44,4^{ab}**	**57,0^{b}**
AC	F-Test: A=sign., C=sign. (P=0,05)					
N_t in mg/g	**17,6^{a}**	**20,7^{b}**	**28,3^{c}**	**20,8^{a}**	**24,0^{b}**	**28,2^{c}**
AC	F-Test: A=sign., C=sign. (P=0,05)					
N-Entzug in kg/ha	**42,9^{a}**	**79,9^{b}**	**125,9^{c}**	**77,2^{a}**	**106,7^{b}**	**160,9^{c}**
AC	F-Test: A=sign., C=sign. (P=0,05)					

a, b, c: Mittelwerte der Faktorstufen (C) mit gleichen Buchstaben unterscheiden sich nicht signifikant (Tukey-HSD mit α=0,05)
Vorzeichentest für Faktoren oder Stufen bei α=0,05

3.3 Beobachtungen während des Winterhalbjahres 1992/93

3.3.1 Nitrat-N-Gehalt in der Bodenlösung

Aufgrund personeller Engpässe konnte im Winterhalbjahr 1992/93 mit der Beprobung erst relativ spät begonnen werden. Darüber hinaus führten technische Probleme mit der zentralen Vakuumpumpe dazu, dass die Erfassung des Nitratgehaltes in der Bodenlösung nur in einer unzureichenden zeitlichen Auflösung erfolgen konnte. Aus diesen Gründen können für dieses Versuchshalbjahr keine Aussagen über den N-Austrag getroffen werden.

Die Analysen der Bodenlösung hinsichtlich des Gehaltes an Nitratstickstoff Anfang Dezember weisen für die Brachevarianten (B0 und B1) im Vergleich zu den entsprechenden Zwischenfruchtvarianten (Z0 und Z1) in den obersten drei Beprobungstiefen signifikant höhere Konzentrationen aus (Tab. 16). In 30 cm Tiefe liegen die Werte unabhängig von der Art der Bodenbearbeitung und Düngungsintensität unter der Brache mit durchschnittlich 39,3 mg/l mehr als doppelt so hoch als unter der Zwischenfrucht (16,1). Tendenziell steigen die Konzentrationen unter der Brache bei beiden Bodenbearbeitungsarten bei zusätzlicher N-Düngung. Bei der Zwischenfrucht liegen die Werte der Varianten mit der höchsten Düngungsintensität (Z2) mit 85,4 mg/l signifikant über denen, der beiden ersten Düngungsstufen Z0 (11,4) und Z1 (20,9), sowie deutlich über dem Niveau der beiden ersten Winterhalbjahre.

Tab. 16: Nitrat-N-Gehalt (mg/l) der Bodenlösung zum 4.12.92 in vier Bodentiefen in Abhängigkeit von Bodenbearbeitung (A), Bodenbedeckung (B) und N-Düngung (C) (n=6)

Tiefe in cm	Variante									
	PBO	**PB1**	**PZ0**	**PZ1**	**PZ2**	**FB0**	**FB1**	**FZ0**	**FZ1**	**FZ2**
30	**33,8**	**39,8**	**8,3**	**29,6**	**86,1**	**41,2**	**42,3**	**14,5**	**12,1**	**84,7**
	Vorzeichentest: A=n.s., B=sign., C: Signifikante Stufen Z1-Z2, Z0-Z2									
60	**103,9**	**144,2**	**26,8**	**87,4**	**132,4**	**99,9**	**170,8**	**45,2**	**59,4**	**96,4**
	Vorzeichentest: A=n.s., B=sign., C: keine signifikante Stufen									
90	**117,9**	**149,6**	**74,6**	**75,0**	**122,9**	**72,9**	**142,0**	**107,8**	**92,0**	**108,4**
	Vorzeichentest: A=n.s., B=sign., C: Signifikante Stufe B0-B1									
120	**76,7**	**103,4**	**61,6**	**69,0**	**90,2**	**66,9**	**73,6**	**83,5**	**65,7**	**62,4**
	Vorzeichentest: A=n.s., B=n.s., C: keine signifikante Stufen									

In der Tiefe von 60 cm steigen die Konzentrationen an Nitratstickstoff in der Bodenlösung bei allen Varianten deutlich an. Unter der Brache (B0 und B1) werden im Mittel 129,7 mg/l erreicht. Bei den vergleichbaren Zwischenfruchtvarianten (Z0 und Z1) beträgt der Durchschnittswert 54,7 mg. Unabhängig von der Art der Bodenbearbeitung steigen die Konzentrationen in Abhängigkeit von der N-Düngung sowohl unter der Brache, als auch unter den Winterrübsen. Bei den Varianten ohne Bodenbedeckung erhöht sich der Nitrat-N-Gehalt von 101,9 (B0) um etwa die Hälfte auf 157,5 mg/l (B1). Bei den Zwischenfrüchten liegen die Mittelwerte der einzelnen Düngungsstufen bei 36,0 (Z0), 73,4 (Z1) bzw. 114,4 mg/l bei der höchsten Düngungsintensität (Z2).

Auch in 90 cm Tiefe liegt die durchschnittliche Konzentration unter den Brachen (B0 und B1) mit 120,6 mg/l signifikant über der, der Zwischenfruchtvarianten Z0 und Z1 (87,4). Während bei den Brachevarianten, unabhängig von der Art der Bodenbearbeitung, ein signifikanter Einfluss der Düngung nachweisbar ist, verringern sich die Unterschiede zwischen den einzelnen Stufen der N-Düngung bei den Zwischenfrüchten. Dieser Trend setzt sich in 120 cm Tiefe weiter fort, wobei die Differenz zwischen den Brachen (81,3 mg/l) und den entsprechenden Zwischenfruchtvarianten (70,0 mg/l) ebenfalls abnimmt.

Im Vergleich zu dem Beprobungstermin Anfang Dezember ist bei den Analysewerten zum Ende der Auswaschungsperiode Mitte März mit wenigen Ausnahmen bei allen Varianten und in allen Tiefen eine Abnahme der Nitratstickstoffkonzentration in der Bodenlösung zu erkennen (Tab. 17). Generell steigen die Konzentrationen mit zunehmender Tiefe. Es zeigt sich ein signifikanter Einfluss der Art der Bodenbedeckung in allen vier Bodenhorizonten. Die Unterschiede zwischen den Brachen B0 und B1 zu den Zwischenfruchtvarianten der beiden ersten Düngungsstufen (Z0 und Z1) betragen in den beiden oberen Tiefen 12,9 (30 cm) und 22,3 mg N/l (60 cm) bzw. 29,4 (90 cm) und 12,6 mg N/l (120 cm) in den beiden unteren Horizonten. Abgesicherte Unterschiede in Abhängigkeit von der N-Düngung sind nur in den beiden unteren Bodenschichten zwischen ungedüngten (Z0) und den mit der höchsten N-Gabe gedüngten Zwischenfrüchten (Z2) nachweisbar.

Tab. 17: Nitrat-N-Gehalt (mg/l) der Bodenlösung zum 17.3.93 in vier Bodentiefen in Abhängigkeit von Bodenbearbeitung (A), Bodenbedeckung (B) und N-Düngung (C) (n=6)

Tiefe in cm	Variante									
	PBO	**PB1**	**PZ0**	**PZ1**	**PZ2**	**FB0**	**FB1**	**FZ0**	**FZ1**	**FZ2**
30	**35,7**	**26,6**	**13,0**	**16,1**	**24,8**	**29,9**	**25,6**	**21,7**	**15,8**	**29,0**
	Vorzeichentest: A=n.s., B=sign., C: keine signifikante Stufen									
60	**57,4**	**36,8**	**10,9**	**26,2**	**32,9**	**46,3**	**36,5**	**25,6**	**25,3**	**42,6**
	Vorzeichentest: A=n.s., B=sign., C: keine signifikante Stufen									
90	**68,4**	**66,9**	**21,0**	**25,0**	**58,0**	**54,1**	**58,3**	**37,4**	**46,7**	**81,2**
	Vorzeichentest: A=n.s., B=sign., C: Signifikante Stufe Z0-Z2									
120	**47,9**	**87,9**	**34,5**	**91,0**	**84,3**	**65,1**	**75,5**	**44,7**	**57,0**	**76,2**
	Vorzeichentest: A=n.s., B=sign., C: Signifikante Stufe Z0-Z2									

3.3.2 Boden N_{min}

Mit durchschnittlich 81,4 (0-30 cm) und 34,8 kg N/ha (30-60 cm) liegen die Werte für den Gehalt an Nitratstickstoff in den oberen beiden Bodenschichten zum Zeitpunkt der Versuchsanlage Mitte September über denen der übrigen drei Winterhalbjahre. Für das unterste Kompartiment (60-90 cm) werden 17,6 kg/ha ausgewiesen. Bis Ende November (Tab. 18) steigen in der obersten Bodenschicht (0-30 cm) die Gehalte unabhängig von der Art der Bodenbearbeitung bei den gedüngten Brachevarianten (B1) geringfügig sowie deutlich bei den Zwischenfrüchten mit der höchsten Düngungsintensität (Z2). Bei den anderen Varianten verringert sich gegenüber der Ausgangslage die Menge an pflanzenverfügbaren Stickstoff, wobei die größten Abnahmen von etwa 30 kg bei den ungedüngten Zwischenfruchtvarianten (Z0) zu verzeichnen sind. Im Mittel liegen die N_{min}-Werte bei den Brachen (79,9) um annähernd 20 kg N/ha über denen der entsprechenden Zwischenfruchtvarianten Z0 und Z1 (60,2). Innerhalb der Serie ABC erhöht sich tendenziell das N-Angebot bei einer zusätzlichen N-Gabe sowohl unter den Brachen, als auch bei den Zwischenfrüchten. Signifikant ist der Düngungseinfluss innerhalb der Serie AC beim Vergleich der Varianten der beiden ersten Düngungsstufen mit den Zwischenfrüchten mit der höchsten Düngungsintensität.

In den beiden unteren Bodenschichten liegen die Werte generell über den Ausgangswerten mit Ausnahme der Variante PZ0 (30-60 cm Tiefe). Unberücksichtigt von der Art der Bodenbearbeitung befinden sich unter den Brachen in beiden Tiefenabschnitten mit

durchschnittlich 62,4 (30-60 cm) und 29,3 kg/ha (60-90 cm) signifikant größere Mengen an auswaschungsgefährdetem Nitratstickstoff als unter den vergleichbaren Zwischenfrüchten mit 37,5 (30-60 cm) bzw. 21,4 kg/ha (60-90 cm).

Tab. 18: N_{min}-Gehalt (kg/ha) zum 25/26.11.92 in drei Bodentiefen in Abhängigkeit von Bodenbearbeitung (A), Bodenbedeckung (B) und N-Düngung (C) (n=6)

Tiefe in cm	Variante									
	PBO	**PB1**	**PZ0**	**PZ1**	**PZ2**	**FB0**	**FB1**	**FZ0**	**FZ1**	**FZ2**
0-30	**67,1**	**85,4**	**45,1[a]**	**66,6[a]**	**132,1[b]**	**75,8**	**91,3**	**60,4[a]**	**68,8[a]**	**157,8[b]**
ABC	F-Test: A=n.s., B=n.s., C=n.s. (P=0,05)									
AC	F-Test: A=n.s., C=sign. (P=0,05)									
30-60	**51,7**	**69,8**	**32,0**	**38,2**	**45,5**	**53,9**	**74,3**	**41,8**	**37,9**	**43,4**
ABC	F-Test: A=n.s., B=sign., C=n.s. (P=0,05)									
AC	F-Test: A=n.s., C=n.s. (P=0,05)									
60-90	**25,5**	**28,8**	**20,0**	**22,5**	**22,3**	**28,7**	**34,1**	**24,9**	**18,1**	**23,4**
ABC	F-Test: A=n.s., B=sign., C=n.s. (P=0,05)									
AC	F-Test: A=n.s., C=n.s. (P=0,05)									
	a, b, c: Mittelwerte der Faktorstufen (C) mit gleichen Buchstaben unterscheiden sich nicht signifikant (Tukey-HSD mit α=0,05)									

Gegenüber der Beprobung Ende November sind zum Ende der Auswaschungsperiode Mitte März in allen Tiefen und bei allen Varianten z.T. große Abnahmen bezüglich des mineralischen N-Gehaltes festzustellen (Tab. 19). Im Oberboden ergeben sich die größten Veränderungen mit annähernd 130 kg/ha für die beiden Zwischenfruchtvarianten mit der zusätzlichen N-Gabe von 100 kg/ha (Z2). Unter den Brachen ist von den 71,5 (B0) bzw. 88,4 kg (B1) im Spätherbst nur ein Anteil von etwa 13 kg zur Märzmitte nachweisbar. Geringer sind diese Unterschiede bei den Zwischenfruchtvarianten der beiden ersten Düngungsstufen Z0 (43,1) und Z1 (56,8).

Dieser Trend setzt sich auch in den beiden unteren Bodenschichten in sich abschwächender Form fort. In der mittleren Bodenschicht von 30 bis 60 cm Tiefe liegen die Gehalte an mineralischem Stickstoff zum Ende des Winters unter den Brachen mit etwa 11 kg/ha im Durchschnitt der beiden Bodenbearbeitungsarten um 52,8 (B0) bzw. 72,1 kg (B1) unter den Novemberwerten. Bei den Zwischenfrüchten betragen diese Differenzen 29,5 (Z0), 28,5 (Z1) und 32,1 kg (Z2). Geringer sind die Veränderungen im Unterboden (60-90 cm). Es ergeben sich Unterschiede von 12,6 (B0) und 17,7 kg (B1) für die Brachen bzw. von 12,9 (Z0), 9,1 (Z1) und 5,7 kg (Z2) für die Varianten der Zwischenfrüchte.

Tab. 19: N_{min}-Gehalt (kg/ha) zum 16.3.93 in drei Bodentiefen in Abhängigkeit von Bodenbearbeitung (A), Bodenbedeckung (B) und N-Düngung (C) (n=6)

Tiefe in cm	Variante									
	PBO	**PB1**	**PZ0**	**PZ1**	**PZ2**	**FB0**	**FB1**	**FZ0**	**FZ1**	**FZ2**
0-30	**13,2**	**13,0**	**10,0**	**12,1**	**16,7**	**12,7**	**13,3**	**9,4**	**9,7**	**12,5**
ABC	Varianzinhomogen; n.s Wilcoxen-Wilcox-Test									
AC	Varianzinhomogen; n.s Wilcoxen-Wilcox-Test									
30-60	**12,3**	**12,3**	**7,2[a]**	**10,3[b]**	**12,3[b]**	**9,9**	**11,4**	**7,6[a]**	**8,8[b]**	**12,4[b]**
ABC	F-Test: A=n.s., B=sign., C=sign. (P=0,05)									
AC	F-Test: A=n.s., C=sign. (P=0,05)									
60-90	**17,0**	**11,5**	**8,3[a]**	**12,7[ab]**	**18,3[b]**	**12,0**	**16,0**	**10,8[a]**	**9,7[ab]**	**16,0[b]**
ABC	F-Test: A=n.s., B=sign., C=n.s. (P=0,05)									
AC	F-Test: A=n.s., C=sign. (P=0,05)									
	Wilcoxen-Wilcox-Test: Signifikant bei P = 0,05									
	a, b, c: Mittelwerte der Faktorstufen (C) mit gleichen Buchstaben unterscheiden sich nicht signifikant (Tukey-HSD mit α=0,05)									

3.3.3 N-Entzug der Zwischenfrucht

Geringere Mengen an gebildeter Frischmasse gegenüber den beiden vorangegangenen Versuchsjahren finden sich bei den Winterrübsen kurz vor dem Umbruch Mitte März (Tab. 20). Signifikante Unterschiede bestehen in Abhängigkeit von der Art der Bodenbearbeitung sowie der Düngung zwischen den Stufen der ungedüngten (Z0) und gedüngten Varianten (Z1 und Z2). Der oberirdische Aufwuchs liegt bei den gepflügten mit durchschnittlich 228 dt deutlich über dem der gefrästen Varianten (171 dt/ha). Die zu erwartende ertragserhöhende Wirkung der Düngung zeigt sich jedoch nur bei der reduzierten Bodenbearbeitung mit Zunahmen von ca. 55 (FZ1) bzw. 116 dt/ha (FZ2) gegenüber den ungedüngten Parzellen (FZ0). Bei den Varianten mit wendender Bodenvorbereitung sinkt die gebildete Frischmasse mit den zusätzlichen N-Gaben von 236 (PZ0) auf 229 (PZ1) bzw. 219 dt/ha (PZ2).

Der Gehalt an Trockensubstanz in den Winterrübsen liegt bei allen Prüfgliedern deutlich über den Analyseergebnissen der beiden Vorjahre. Die dort beobachtete Abnahme des Trockensubstanzgehaltes mit steigender Düngungsintensität deutet sich hier nur tendenziell bei den gefrästen Varianten an. Unabhängig von der Menge des zugeführten Düngers sinkt der Gehalt von 22,2 auf 20,0 %. Bei den gepflügten Varianten steigen dagegen die Gehalte bei jeder Stufe um etwa 1 % von 18,5 (PZ0) auf 19,6 (PZ1) und 20,5 % (PZ2).

Tab. 20: Einfluss von Bodenbearbeitung (A) und N-Düngung (C) auf die Frisch- und Trockenmasse, den N-Gehalt und N-Entzug der Zwischenfrucht zum 10.3.93 (n=6)

	Variante					
	PZ0	**PZ1**	**PZ2**	**FZ0**	**FZ1**	**FZ2**
Frischmasse in dt/ha	**236,2[a]**	**228,5[b]**	**219,3[b]**	**124,9[a]**	**179,2[b]**	**209,0[b]**
AC	F-Test: A=sign., C=sign., A*C=sign. (P=0,05)					
%TS	**18,5**	**19,6**	**20,5**	**22,2**	**20,0**	**20,0**
AC	F-Test: A=sign., C=n.s., A*C=sign. (P=0,05)					
Trockenmasse in dt/ha	**32,7[a]**	**33,6[b]**	**33,3[b]**	**20,8[a]**	**26,6[b]**	**31,4[b]**
AC	F-Test: A=sign., C=sign., A*C=sign. (P=0,05)					
N_t in mg/g	**31,3[a]**	**35,2[b]**	**34,7[b]**	**21,1[a]**	**27,2[b]**	**30,3[b]**
AC	F-Test: A=sign., C=sign. (P=0,05)					
N-Entzug in kg/ha	**102,9[a]**	**118,4[b]**	**115,3[b]**	**43,4[a]**	**73,1[b]**	**94,8[b]**
AC	F-Test: A=sign., C=sign., A*C=sign. (P=0,05)					
	a, b, c: Mittelwerte der Faktorstufen (C) mit gleichen Buchstaben unterscheiden sich nicht signifikant (Tukey-HSD mit α=0,05)					

Die gebildete Trockenmasse nimmt in Abhängigkeit von der N-Düngung bei den reduziert bearbeiteten Parzellen deutlich von 20,8 (FZ0) um 5,8 (FZ1) bzw. 10,6 dt/ha (FZ2) zu. Bei den gepflügten Varianten steigt sie auf signifikant höherem Niveau bei zusätzlichem N-Einsatz von 32,7 dt um knapp 1 dt/ha. Wie bei der Frisch- und Trockenmasse liegen unabhängig von der N-Zufuhr die N-Gehalte der Winterrübsen der mit dem Pflug bearbeiteten Parzellen mit durchschnittlich 33,7 mg/g deutlich über dem Wert der gefrästen Varianten (26,2). Im Hinblick auf die N-Düngung unterscheiden sich die Stufen Z0 zu den gedüngten Varianten (Z1 und Z2) signifikant. Bemerkenswert ist, dass der N-Gehalt der ungedüngten Variante nach wendender Bodenvorbereitung (PZ0) von 31,3 mg/g sogar über den Werten derer mit der höchsten Düngungsintensität (PZ2 und FZ2) der beiden Vorjahre liegt.

Ganz analog wirken sich die N-Düngung und die Art der Bodenbearbeitung auf den N-Entzug aus. Mit 43,4 (FZ0), 73,1 (FZ1) und 94,8 kg/ha (FZ2) liegen diese bei den gefrästen Varianten unterhalb der Entzüge der vorangegangenen Versuchsjahre, während mit durchschnittlich 112,2 kg N/ha bei den gepflügten Parzellen ein deutlich höheres Niveau erreicht wird.

3.4 Beobachtungen während des Winterhalbjahres 1993/94

3.4.1 Wasserhaushalt und N-Austrag

Den Berechnungen und der Darstellung zum Wasserhaushalt des Versuchshalbjahres 1993/94 hinsichtlich der obersten 30 cm (Abb. 18) liegt der Ansatz A (klimatische Wasserbilanz) zugrunde, da früh einsetzender Bodenfrost in der zweiten Novemberhälfte eine Räumung der Tensiometer, die in 10 und 30 cm Tiefe installiert waren, notwendig machte. Die letzten Messungen im Oberboden zum 2. November weisen für die Bracheparzellen einen Durchschnittswert von –87 sowie knapp -120 hPa unter den Zwischenfrüchten aus. Dies entspricht einem zusätzlichen Wasseraufnahmevermögen dieser Bodenschicht von etwa 12 bzw. 14 mm, so dass die Aufsättigung während der ersten Novemberhälfte abgeschlossen worden sein dürfte. Der weitere Verlauf ist gekennzeichnet durch hohe Niederschlags–summen in den Monaten Dezember und Januar, die deutlich über dem langjährigen Mittel und den beiden ersten Versuchsjahren liegen (Abb. 1 und 2). Dem entsprechend ergeben sich die Sickerungsraten für die Monate Dezember mit 86,9 mm unter der Brache sowie 83,7 mm

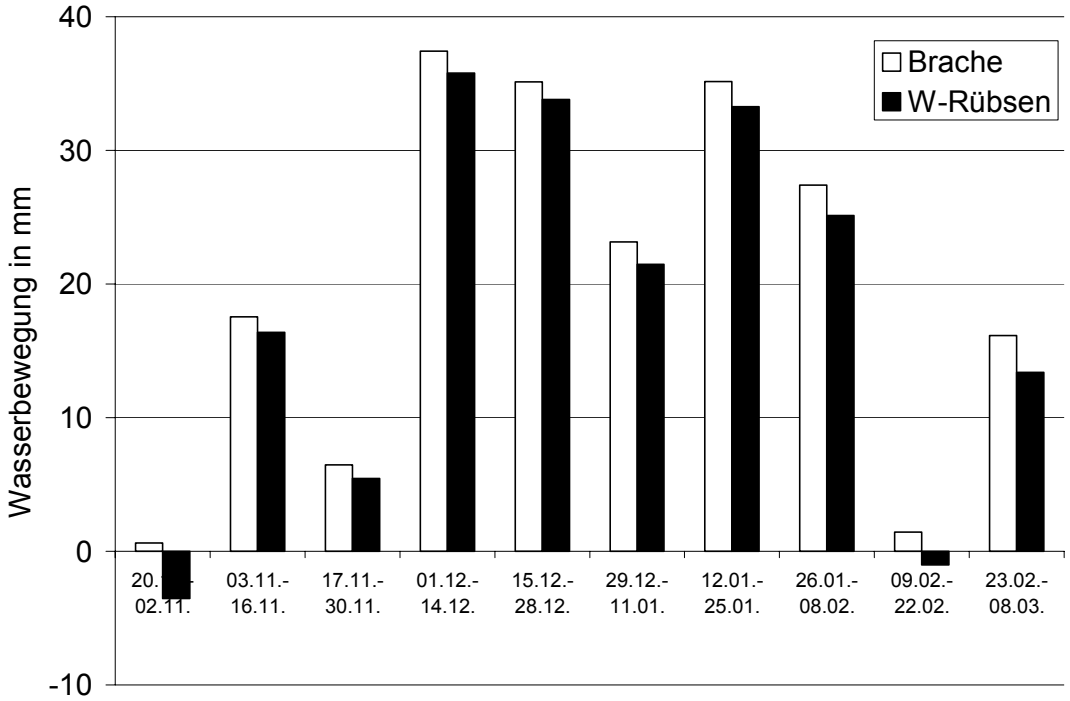


Abb. 18: Sickerung (+) bzw. Aufwärtsbewegung (-) aus 30 cm Tiefe unter Brache und Zwischenfrucht in 14-tägigen Intervallen im Winterhalbjahr 1993/94, berechnet nach Ansatz A (vrgl. Kap. 2.3.4)

unter der Zwischenfrucht und Januar mit 73,4 (Brache) bzw. 69,3 mm (Zwischenfrucht).

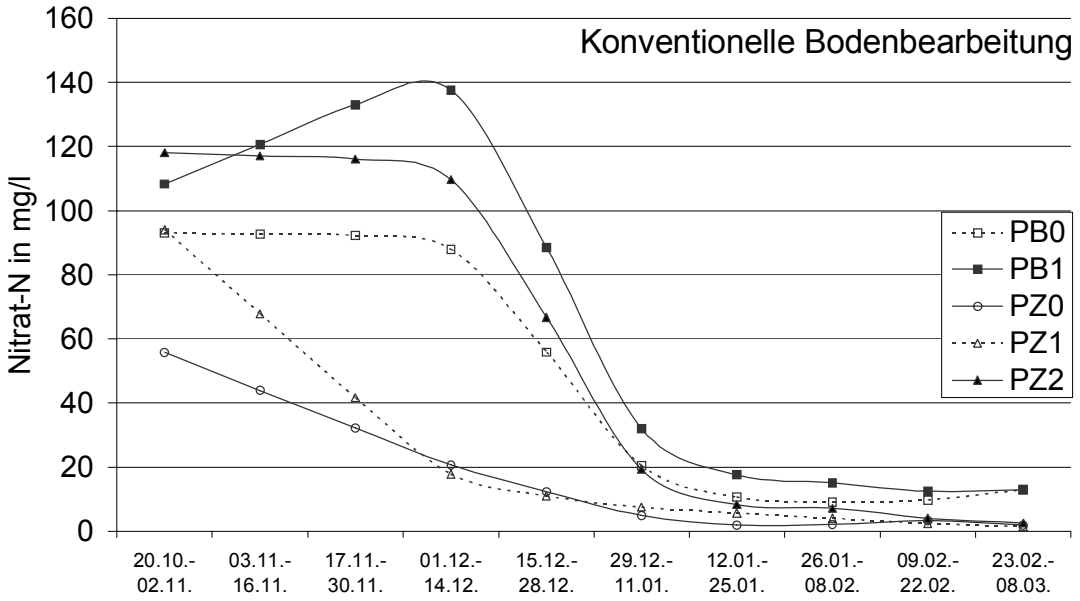
Die Summen der Sickerwassermengen für den Zeitraum 3. November bis 8. März in 30 cm Tiefe betragen für die Brache 199,8 mm und für die Zwischenfruchtvarianten 183,6 mm (Tab. 16). In den darunter liegenden Bodenschichten wird die Durchflussmenge unter der Brache nur schwach gebremst. Die Schicht in 120 cm Tiefe passieren unter der Zwischenfrucht durchschnittlich 155 mm (Brache: 178,5 mm).

Tab. 21: Summen der Nettosickerung (mm) aus vier verschiedenen Bodentiefen in Abhängigkeit von der Bodenbearbeitung (A), Bodenbedeckung (B) und N-Düngung (C) für den Zeitraum 3.11.93 bis 8.3.94 (n=6) berechnet nach Ansatz C (vrgl. Kap. 3.2.4)

	Variante									
Sickerung (mm)	**PBO**	**PB1**	**PZ0**	**PZ1**	**PZ2**	**FB0**	**FB1**	**FZ0**	**FZ1**	**FZ2**
in 30 cm Tiefe	**199,8**	**199,8**	**183,6**	**183,6**	**183,6**	**199,8**	**199,8**	**183,6**	**183,6**	**183,6**
	nicht normalverteilt									
in 60 cm Tiefe	**189,4**	**191,3**	**179,3**	**171,2**	**175,5**	**196,5**	**196,1**	**166,5**	**171,7**	**175,4**
ABC/AC	Varianzinhomogen; Vorzeichentest: A=n.s., B=sign., C: keine signifikanten Stufen									
	n.s Wilcoxen-Wilcox-Test									
in 90 cm Tiefe	**174,1**	**187,9**	**167,2**	**158,4**	**169,5**	**188,2**	**185,7**	**153,5**	**162,8**	**163,5**
ABC	F-Test: A=n.s., B=sign., C=n.s. (P=0,05)									
AC	F-Test: A=n.s., C=n.s. (P=0,05)									
in 120 cm Tiefe	**167,4**	**180,6**	**164,3**	**147,1**	**166,5**	**183,9**	**181,8**	**145,4**	**153,6**	**152,5**
ABC	Varianzinhomogen; Vorzeichentest: A=n.s., B=sign., C: keine signifikanten Stufen									
	n.s Wilcoxen-Wilcox-Test									
AC	F-Test: A=n.s., C=n.s. (P=0,05)									
	* Wilcoxen-Wilcox-Test: Signifikant bei P = 0,05									
	Vorzeichentest für Faktoren oder Stufen bei α=0,05									

Anfang November liegen die Nitrat-N-Konzentrationen in 30 cm Tiefe in Bereichen von 60 bis 120 mg/l bei den konventionell bearbeiteten und zwischen 70 und 100 mg/l bei den reduziert bearbeiteten Varianten (Abb. 19). Im weiteren Verlauf steigen die Konzentrationen unter den gedüngten Brachevarianten bis auf 140 (PB1) bzw. 130 mg/l (FB1) in der ersten Dezemberhälfte an. Danach verringern sich die Gehalte stark und unterschreiten Mitte Januar den Wert von 20 mg/l. Bei den ungedüngten Brachevarianten ist der Verlauf zu Beginn nahezu konstant bei etwa 90 (PB0) und 80 mg /l (FB0). Die Konzentrationen sinken dann auch hier während des Zeitraumes Mitte Dezember bis Ende Januar auf Werte unterhalb von 20 mg/l.

Unter der Zwischenfrucht der beiden ersten Düngungsstufen (Z0 und Z1) sind unabhängig von der Art der Bodenbearbeitung bereits mit Beginn des Erfassungszeitraumes abnehmende Gehalte zu beobachten. Die Ausgangswerte bei den ungedüngten Varianten liegen nach reduzierter Bodenbearbeitung (FZ0) mit ca. 70 mg/l über dem der konventionell bearbeiteten PZ0 mit Gehalten unterhalb von 60 mg/l. Mit Werten von knapp 95 mg/l zu Beginn der Datenerhebung bei den Zwischenfruchtvarianten der ersten Düngungsstufe (PZ1 und FZ1) sind die Unterschiede in Abhängigkeit von der Bodenbearbeitung nur geringfügig. Früher als unter der Brache sinken die Konzentrationen bei der Zwischenfrucht der beiden unteren Düngungsstufen bereits während der ersten Dezemberhälfte (nach konventioneller Bodenbearbeitung) bzw. der zweiten Dezemberhälfte (nach reduzierter Bodenbearbeitung) unterhalb von 20 mg/l. Auf hohem Niveau von knapp 120 mg /l (PZ2) bzw. von 80 auf 100 mg/l (FZ2) ansteigend verläuft die Nitrat-N-Konzentration bei den Varianten der höchsten Düngungsstufe von Ende Oktober an bis Mitte Dezember. Dann verringern sich die Gehalte auch hier und sinken zum Jahreswechsel unterhalb von 20 mg/l. Anfang März liegen die Konzentrationen unabhängig von der Düngungsintensität und Bodenbearbeitung bei der Zwischenfrucht deutlich unter denen der Brachevarianten.



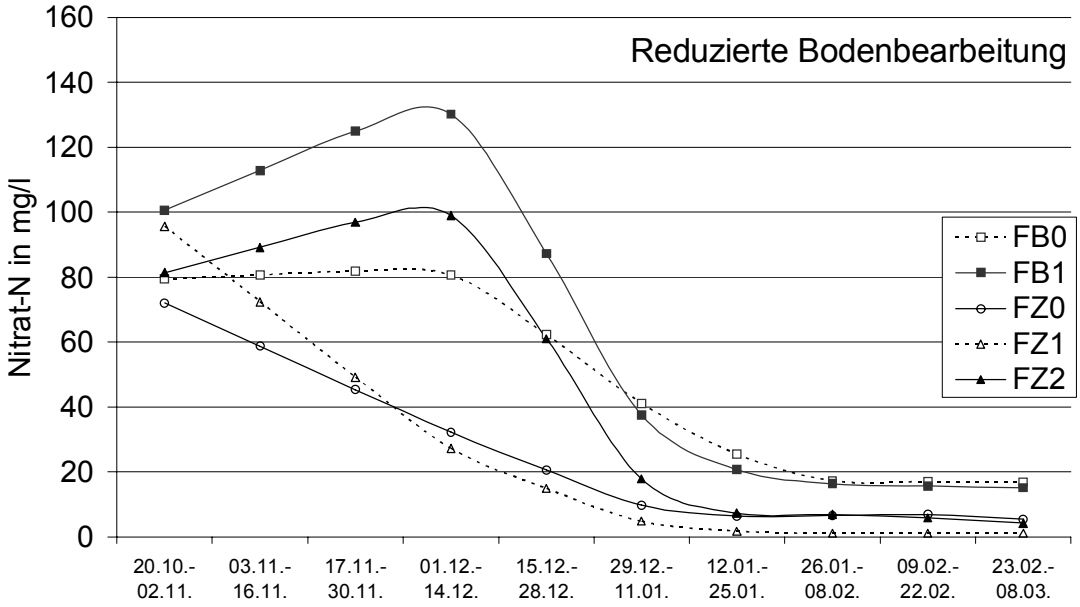


Abb. 19: Mittlerer Nitrat-N-Gehalt in der Bodenlösung in 30 cm Tiefe unter Brache und Zwischenfrucht bei unterschiedlicher N-Düngung und Bodenbearbeitung für die 14-tägigen Berechnungsintervalle im Winterhalbjahr 1993/94 (n=6)

P: gepflügt **B:** Brache **0:** 0 kg N/ha **1:** 50 kg N/ha **2:** 100 kg N/ha
F: gefräst **Z:** Zwischenfrucht

In der Beprobungstiefe von 60 cm (Abb. 20) liegen die Ausgangskonzentrationen aller Varianten in einem Bereich zwischen 60 und 90 mg NO_3-N/l, wobei ein einheitlicher Trend im Hinblick auf die Bodenbedeckung nicht zu erkennen ist. Hohe Werte sind insbesondere für die Varianten PZ1, FZ2 und FZ0 festzustellen. Bis in die erste Dezemberhälfte verändern sich die Gehalte größtenteils nur unwesentlich. Ausnahmen bilden die beiden Zwischenfruchtvarianten der mittleren Düngungsstufe (PZ1 und FZ1), bei denen eine stete Verringerung, und die Brache PB1, bei der ein leichter Anstieg, erkennbar ist. Danach sinken bei allen Varianten die Konzentrationen, abgesehen von der Brache FB1, bei der dies erst Anfang Januar eintritt. Die Wirkung der N-Düngung zeigt sich unter der Brache nur bei den konventionell bearbeiteten Varianten mit z.T. 20 mg höheren Gehalten von PB1 zu PB0 deutlich. Unter der Zwischenfrucht liegen unabhängig von der Art der Bodenbearbeitung bis auf den oben erwähnten Anfangszeitraum bei PZ1 die Konzentrationen der höchsten Düngungsstufe (Z2) über denen der Nullvariante (Z0) und diese wiederum über den Werten der Varianten mit einer zusätzlichen Düngung von 50 kg N/ha (Z1). Ab der zweiten Januarhälfte sinken die Gehalte aller Zwischenfruchtvarianten unter die Werte der Brache und betragen zum Ende des Untersuchungszeitraumes mit maximal 10 mg/l weniger als die Hälfte der unbedeckten Varianten (18 bis 30 mg/l). Im Vergleich zu den Endwerten in 30 cm Tiefe sind Anfang März in dieser Tiefe für alle Varianten höhere Nitrat-N-Konzentrationen festzustellen.

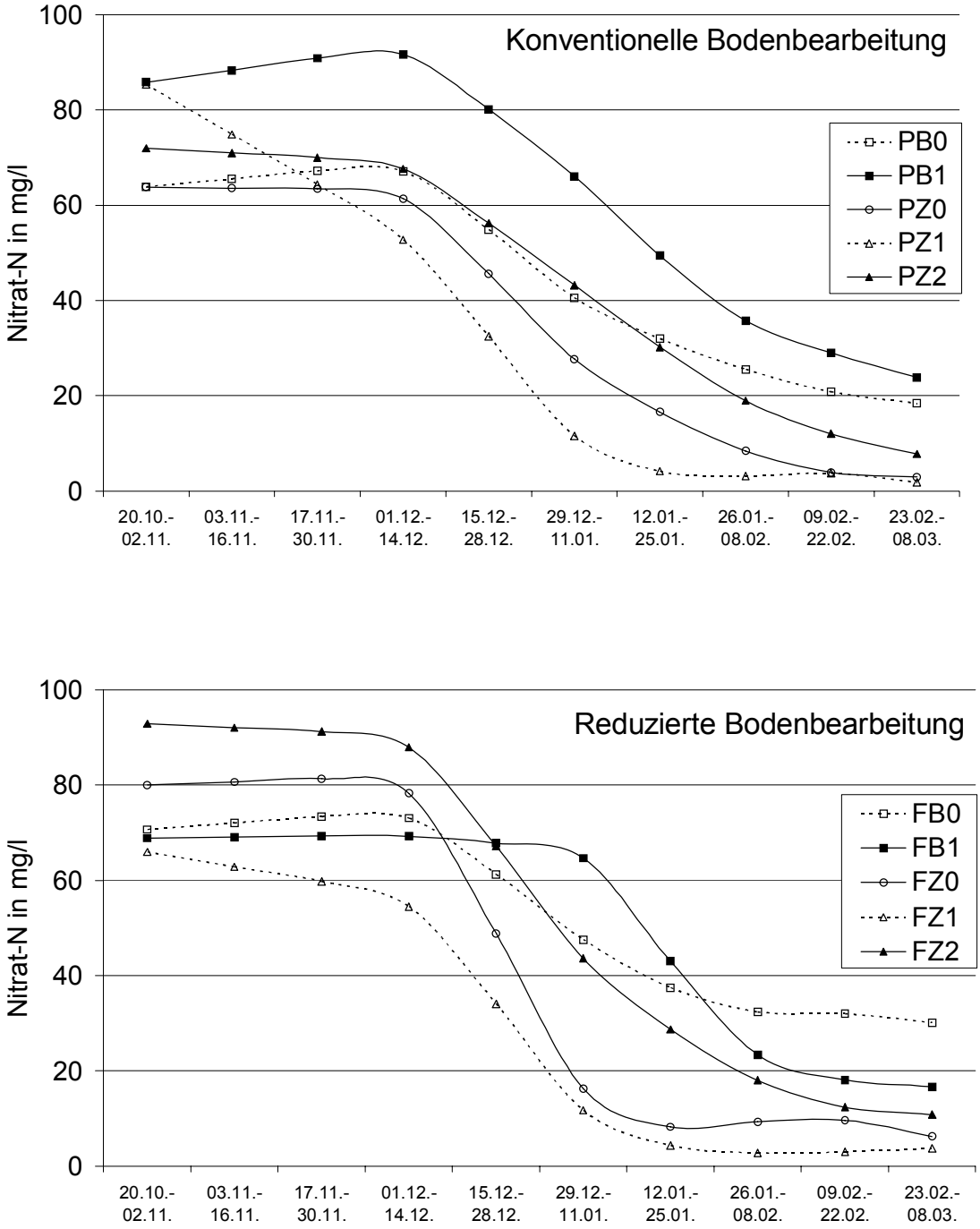


Abb. 20: Mittlerer Nitrat-N-Gehalt in der Bodenlösung in 60 cm Tiefe unter Brache und Zwischenfrucht bei unterschiedlicher N-Düngung und Bodenbearbeitung für die 14-tägigen Berechnungsintervalle im Winterhalbjahr 1993/94 (n=6)

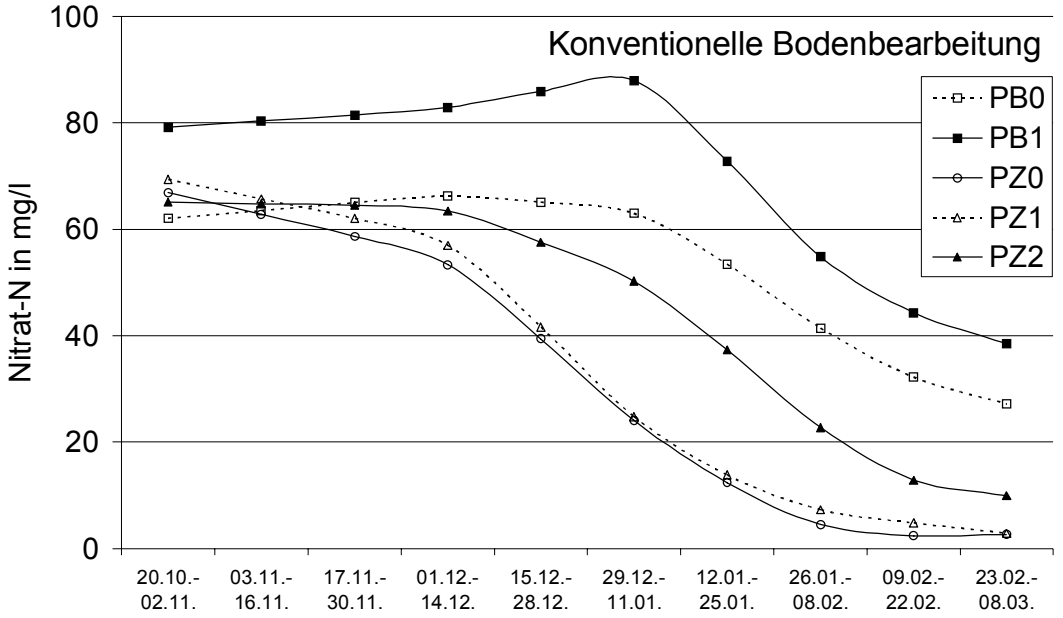
P: gepflügt **B:** Brache **0:** 0 kg N/ha **1:** 50 kg N/ha **2:** 100 kg N/ha
F: gefräst **Z:** Zwischenfrucht

Die Ausgangslage in der Bodentiefe von 90 cm (Abb. 21) ist mit den vorangegangenen Beobachtungen in 60 cm vergleichbar. Abgesehen von der konventionell bearbeiteten und gedüngten Brache PB1 (80 mg/l) sowie der gefrästen Zwischenfruchtvariante FZ2 (90 mg/l) liegen die Werte aller übrigen Prüfglieder in einem engen Bereich von 60-70 mg NO_3-N/l.

Unter der Brache ist während des gesamten Beobachtungszeitraumes unabhängig von der Art der Bodenbearbeitung die Wirkung der N-Düngung deutlich zu erkennen. Die maximalen Gehaltsunterschiede zwischen den gedüngten und ungedüngten Varianten betragen Anfang Januar etwa 20 mg. Zu diesem Zeitpunkt werden bei den B1-Varianten auch die absoluten Höchstwerte von 90 (PB1) bzw. 80 mg/l (FB1) erreicht. Im späteren Verlauf verringern sich diese Konzentrationsunterschiede zwischen gedüngter und ungedüngter Brache bis auf etwa 10 (konventionelle Bodenbearbeitung) bzw. 5 mg bei den gefrästen Varianten. Tendenziell ist das Konzentrationsniveau nach konventioneller Bodenbearbeitung höher als nach der reduzierten.

Bei der konventionell bearbeiteten Zwischenfrucht sinken die Werte für die beiden ersten Düngungsstufen (PZ0 und PZ1) von Beginn an, während die Gehalte der Variante PZ2 zunächst bis Anfang Dezember konstant bleiben und danach in moderaterer Form abnehmen. Die erhöhende Wirkung der N-Düngung auf den Gehalt in der Bodenlösung ist während der gesamten Auswaschungsperiode zwischen PZ2 und den beiden Varianten der unteren Düngungsstufen deutlich, und zwischen der mit 50 kg gedüngten Variante (PZ1) und der ungedüngten (PZ0) in der Tendenz zu erkennen. Dies trifft auch bei den reduziert bearbeiteten Zwischenfruchtvarianten zu. Auffallend hierbei ist jedoch die sehr hohe Konzentration bei der höchsten Düngungsintensität (FZ2) von über 90 mg/l Ende Oktober, die bis zum Jahreswechsel nur auf etwa 75 mg sinkt, sich bis zum Ende des Erfassungszeitraumes aber den Werten der beiden anderen Varianten angleicht.

Im Vergleich zu den Ergebnissen in der darüber liegenden Bodentiefe (60 cm) entsprechen die Endwerte der gedüngten Brache unabhängig von der Art der Bodenbearbeitung von 40 mg/l etwa dem Doppelten. Mit etwa 30 mg liegen auch bei der ungedüngten Brache etwas höhere als in 60 cm Tiefe (25 mg) vor. Unter der Zwischenfrucht zeigt ein tiefenbezogener Vergleich keine nennenswerten Unterschiede.



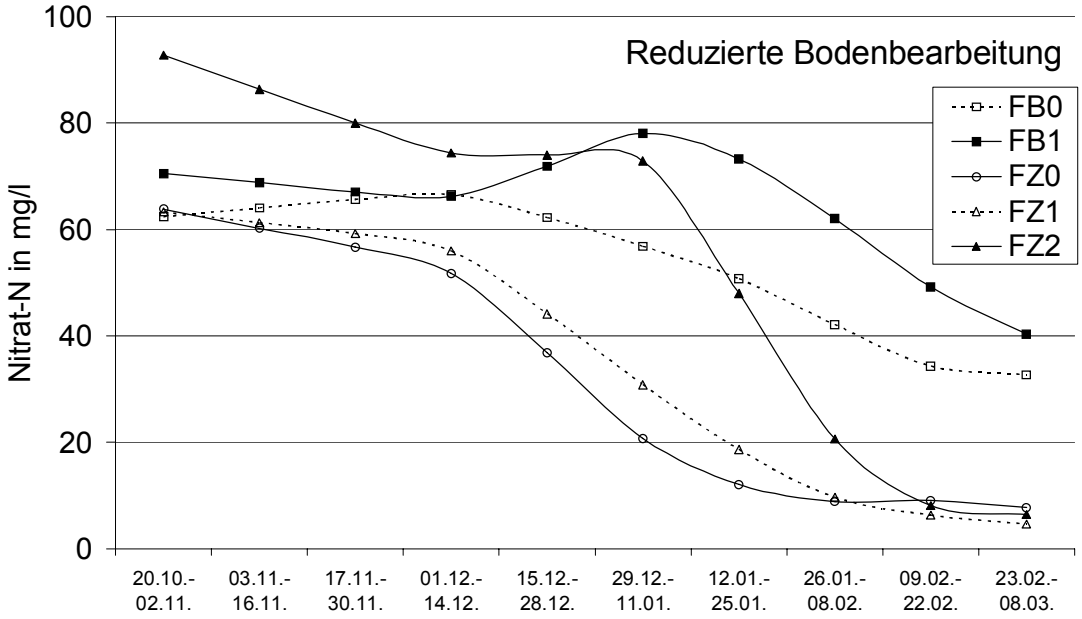


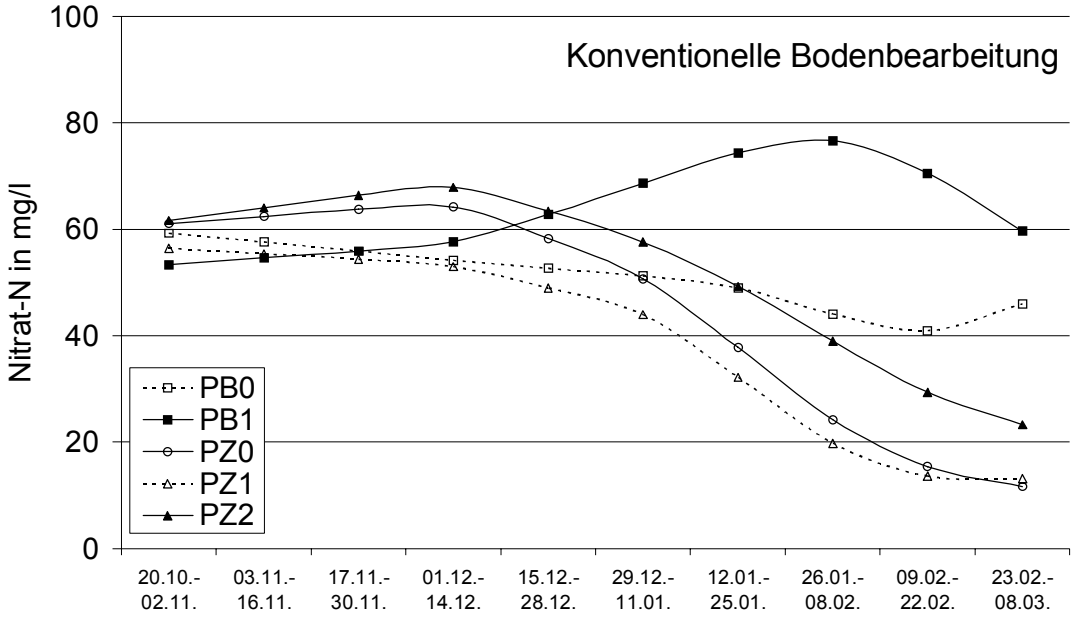
Abb. 21: Mittlerer Nitrat-N-Gehalt in der Bodenlösung in 90 cm Tiefe unter Brache und Zwischenfrucht bei unterschiedlicher N-Düngung und Bodenbearbeitung für die 14-tägigen Berechnungsintervalle im Winterhalbjahr 1993/94 (n=6)

P: gepflügt **B:** Brache **0:** 0 kg N/ha **1:** 50 kg N/ha **2:** 100 kg N/ha
F: gefräst **Z:** Zwischenfrucht

Im Unterboden in 120 cm Tiefe finden sich Ende Oktober die geringsten Ausgangskonzentrationen für alle Varianten im Vergleich zu den oberen Beprobungstiefen (Abb. 22). Die Unterschiede zwischen den einzelnen Varianten sind mit Ausnahme der gefrästen sowie ungedüngten Brache (FB0), deren N-Gehalt zu Beginn der Analysen unter 50 mg/l liegen, gering und liegen in einem engen Bereich um 60 mg. Die höchsten Werte in Abhängigkeit von der Bodenbearbeitung werden bis Mitte Dezember jeweils für die Zwischenfrucht der höchsten Düngungsstufe (P/FZ2) ausgewiesen. In der zweiten Dezemberhälfte erreichen und übersteigen zunächst die gedüngten Brachen (PB1 und FB1) und in der zweiten Januarhälfte auch die ungedüngten Brachen (PB0 und FB0) deren Konzentrationen.

Der Verlauf unter den gedüngten Brachevarianten ist von Beginn an steigend und erreicht den Höchstwert Anfang Februar (PB1), 4 Wochen später als in 90 cm Tiefe, bei knapp 80 mg/l. Bei der gefrästen Variante (FB1) wird dieser Wert sogar erst vor dem Umbruch erreicht. Bei den ungedüngten Brachen sinken die Gehalte tendenziell, so dass Unterschiede von bis zu 30 mg bei beiden Bodenbearbeitungsarten in Abhängigkeit der N-Düngung auftreten.

Unter der Zwischenfrucht steigen die Konzentrationen bis in die erste Dezemberhälfte entweder leicht an (PZ2, PZ0 sowie FZ1) oder verringern sich in geringem Maße. Danach verstärken sich die Abnahmen bis Anfang März bei allen Varianten. Trotzdem liegen die Endwerte unter der Zwischenfrucht mit etwa 10 (PZ0 und PZ1) bis 30 mg/l (FZ2) mehr als doppelt so hoch im Vergleich zu allen anderen Bodentiefen.



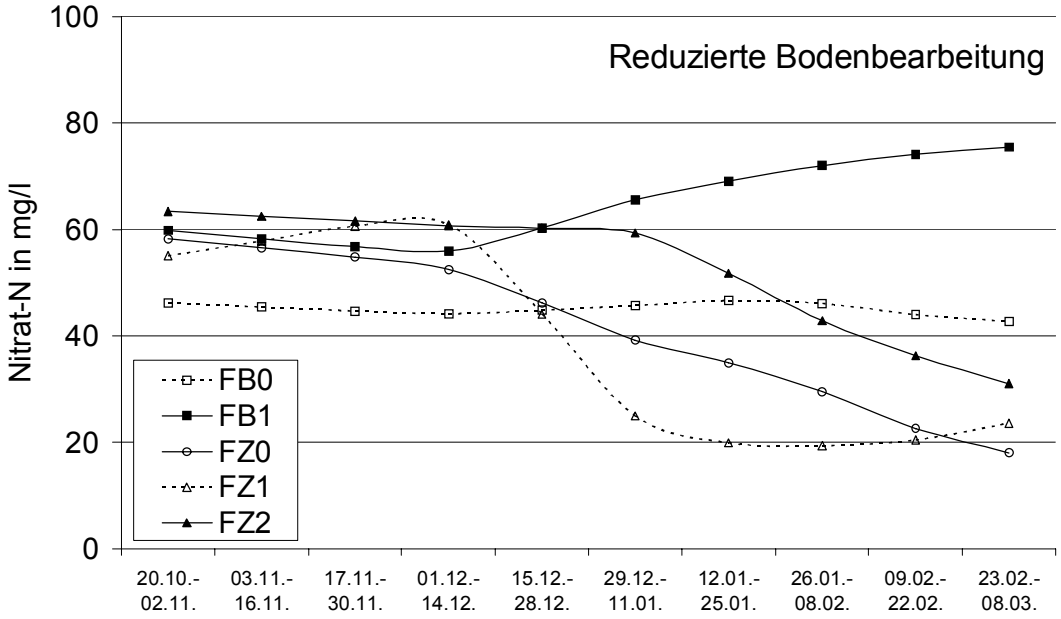


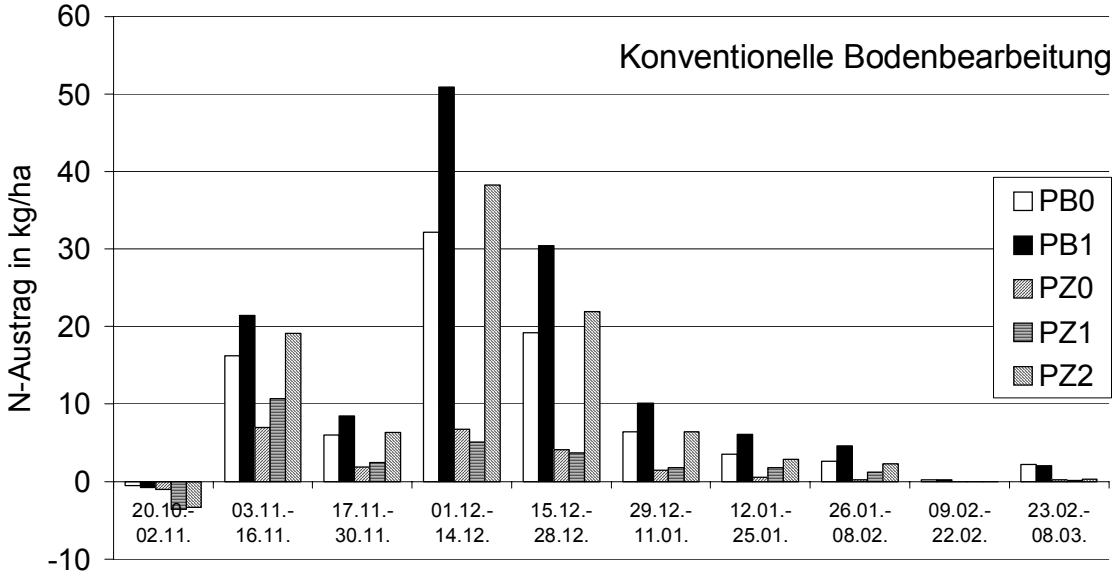
Abb. 22: Mittlerer Nitrat-N-Gehalt in der Bodenlösung in 120 cm Tiefe unter Brache und Zwischenfrucht bei unterschiedlicher N-Düngung und Bodenbearbeitung für die 14-tägigen Berechnungsintervalle im Winterhalbjahr 1993/94 (n=6)

P: gepflügt **B:** Brache **0:** 0 kg N/ha **1:** 50 kg N/ha **2:** 100 kg N/ha
F: gefräst **Z:** Zwischenfrucht

Die N-Verlagerung aus der obersten Bodenschicht beginnt im Versuchsjahr 1993/94 Anfang November (Abb. 23) mit Auswaschungsraten von etwa 20 (PB1 und FB1) bzw. 15 kg/ha (PB0 und FB0) innerhalb von 14 Tagen unter der Brache. Im Gegensatz zu den beiden ersten Versuchsjahren sind z.T. erhebliche Auswaschungsverluste auch unter der Zwischenfrucht nachweisbar. Diese liegen für die Varianten der höchsten Düngungsintensität (PZ2 und FZ2) in etwa auf dem Niveau der ungedüngten Brache. Mit ca. 10 kg N/ha sind die Austräge unter den Zwischenfruchtvarianten der beiden ersten Düngungsstufen deutlich geringer. In der zweiten Novemberhälfte nehmen die Auswaschungsraten generell ab und sinken selbst unter der Brache unter den Wert von 10 kg.

Die größten Verlagerungsprozesse während des Winters finden im Dezember statt, in dem hohe Niederschlagsmengen (Abb. 2) und die höchsten Nitratkonzentrationen in der Bodenlösung (Abb. 19) zusammenfallen. In den beiden ersten Wochen werden unter der Brache etwa 50 kg bei den gedüngten (PB1 und FB1) bzw. 30 kg N/ha bei den ungedüngten Varianten (PB0 und FB0) aus dem Oberboden ausgewaschen. Die Verluste bei der mit 100 kg Stickstoff gedüngten Zwischenfrucht übersteigen mit über 35 kg die der ungedüngten Brache. Vergleichsweise gering sind die Austräge der anderen Zwischenfruchtvarianten, die bei 10 nach gefräster Bodenvorbereitung und etwa 5 kg/ha (konventionelle Bodenbearbeitung) liegen. In der zweiten Dezemberhälfte verringern sich die N-Verluste unter der Brache auf 30 (gedüngte Brache) bzw. 20 kg bezogen auf den Hektar bei den ungedüngten Varianten. Auch hier erreicht die Zwischenfrucht der höchsten Düngungsintensität das Niveau der ungedüngten Brache.

Bis Anfang Januar sinken die N-Austräge weiterhin für alle Varianten. Für den Zeitraum vom 29. Dezember bis 11. Januar werden nur noch für die Brachen PB1, FB0 und FB1 Werte um die 10 kg/ha ausgewiesen. Im weiteren Verlauf bis Anfang März reduzieren sich die Verluste kontinuierlich bis auf Raten unter 5 kg für die 14-tägigen Berechnungsintervalle. In den unteren Bodenschichten verläuft die N-Verlagerung mit zunehmender Tiefe tendenziell ausgeglichener (Abb. A6-A8), wobei stets eine deutliche Wirkung der Bodenbedeckung auf die Höhe der Verluste erkennbar ist.



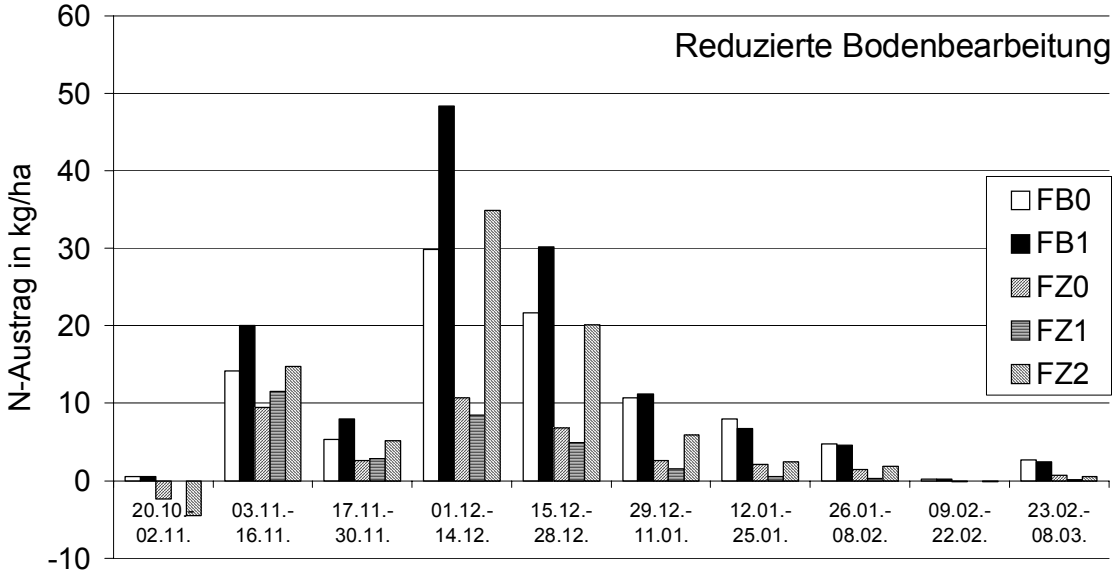


Abb. 23: Verlauf des N-Austrages aus 30 cm Tiefe unter Brache und Zwischenfrucht bei unterschiedlicher N-Düngung und Bodenbearbeitung im Winterhalbjahr 1993/94 (n=6)

P: gepflügt **B:** Brache **0:** 0 kg N/ha **1:** 50 kg N/ha **2:** 100 kg N/ha
F: gefräst **Z:** Zwischenfrucht

Unabhängig von der Art der Bodenbearbeitung führt die Bodenbedeckung mit Winterrübsen im Vergleich zur Brache zu einer drastischen Reduzierung der gesamten Nitratauswaschung für den Zeitraum vom 3. November bis 8. März im Oberboden (Tab. 22). Die unteren beiden Düngungsstufen betrachtet wirkt sich eine zusätzliche N-Gabe nur bei der Brache erhöhend auf den N-Austrag aus. So betragen die Verluste bei den ungedüngten Brachevarianten (B0) durchschnittlich 93 kg und bei den entsprechenden Zwischenfrüchten (Z0) 29,2 kg N/ha. Die Düngung von 50 kg N finden sich bei den Brachen (B1) größtenteils in den auf 133 kg angestiegenen Verlusten wieder. Bei den Zwischenfrüchten (Z1) sinken die N-Austräge infolge der Düngung tendenziell sogar leicht um 3 kg auf 26,2 kg/ha. Eine Erhöhung der Düngungsintensität auf 100 kg steigert im Gegensatz zu den beiden ersten Versuchsjahren auch bei den Zwischenfrüchten (Z2) die Verluste signifikant auf knapp 92 kg/ha. Eine eindeutige Wirkung der Bodenbearbeitung ist nicht zu erkennen.

Tab. 22: Summen des N-Austrages (kg/ha) aus vier verschiedenen Bodentiefen in Abhängigkeit von der Bodenbearbeitung (A), Bodenbedeckung (B) und N-Düngung (C) für den Zeitraum 3.11.93 bis 8.3.94 (n=6)

N-Austrag (kg/ha)	Variante									
	PBO	**PB1**	**PZ0**	**PZ1**	**PZ2**	**FB0**	**FB1**	**FZ0**	**FZ1**	**FZ2**
in 30 cm Tiefe	**88,6**	**134,3**	**22,0**	**26,8**	**97,4**	**97,3**	**131,7**	**36,4**	**30,3**	**85,7**
ABC/AC	Varianzinhomogen; Vorzeichentest: A=n.s., B=sign., C: Signifikante Stufen B0-B1, Z0-Z2; Z1-Z2									
			PB1*	PB1*			PZ0* PZ1*	PB1*	PB1* FB1*	
in 60 cm Tiefe	**87,1**	**125,0**	**61,9^{ab}**	**45,7^{a}**	**78,5^{b}**	**101,8**	**103,3**	**61,3^{ab}**	**43,7^{a}**	**91,1^{b}**
ABC	F-Test: A=n.s., B=sign., C=n.s., A*C=sign. (P=0,05)									
AC	F-Test: A=n.s., C=sign. (P=0,05)									
in 90 cm Tiefe	**99,1**	**138,8**	**49,5^{a}**	**50,2^{ab}**	**78,4^{b}**	**100,6**	**121,6**	**40,7^{a}**	**52,7^{ab}**	**89,8^{b}**
ABC	F-Test: A=n.s., B=sign., C=sign. (P=0,05)									
AC	F-Test: A=n.s., C=sign. (P=0,05)									
in 120 cm Tiefe	**87,2**	**118,2**	**71,4^{ab}**	**51,8^{a}**	**89,1^{b}**	**81,5**	**116,9**	**55,3^{ab}**	**53,6^{a}**	**78,9^{b}**
ABC	F-Test: A=n.s., B=sign., C=n.s., A*C=sign. (P=0,05)									
AC	F-Test: A=n.s., C=sign. (P=0,05)									
	* Wilcoxen-Wilcox-Test: Signifikant bei P = 0,05 Vorzeichentest für Faktoren oder Stufen bei α=0,05 a, b, c: Mittelwerte der Faktorstufen (C) mit gleichen Buchstaben unterscheiden sich nicht signifikant (Tukey-HSD mit α=0,05)									

Zu ähnlichen Ergebnissen führen die Berechnungen in den darunter liegenden Bodenschichten. In 60 cm Tiefe liegen die Summen des Stickstoffaustrages unter der Brache mit 87, 1 (PB0) bzw. 125 kg (PB1) nach konventioneller und 101,8 (FB0) bzw. 103,3 kg (FB1) nach reduzierter Bodenbearbeitung signifikant über dem Niveau der Zwischenfrucht, bei der durchschnittlich 61,6 (Z0) und 44,7 kg (Z1) ausgewaschen werden. Beim Vergleich der Zwischenfrüchte untereinander liegen die Verluste der höchsten Düngungsstufe mit 78,5 (PZ2) bzw. 91,1 kg (FZ2) signifikant über den Varianten, zu denen 50 kg N/ha (Z1) zugegeben wurden.

Ganz entsprechend verringert die Bodenbedeckung durch die Zwischenfrüchte die N-Austräge gegenüber der Brache auch in den unteren beiden Bodenschichten. In 90 cm Tiefe liegen bei den Zwischenfrüchten die Auswaschungsraten der ungedüngten Varianten mit durchschnittlich 45,1 (Z0) etwas unterhalb der mittleren Düngungsstufe (Z1) mit 51,5 kg/ha. In 120 cm Tiefe verringert dagegen die zusätzliche N-Düngung von 50 kg/ha tendenziell die Verluste von 63,4 (Z0) auf 52,7 kg (Z1). Unter der Zwischenfrucht der höchsten Düngungsstufe betragen die Austräge durchschnittlich 84,1 (90 cm) bzw. 84,0 kg N/ha (120).

3.4.2 Boden N_{min}

Gegenüber der Ausgangslage Mitte September mit N_{min}-Werten von durchschnittlich 37,6 (0-30 cm), 32,2 (30-60 cm) und 36,0 kg/ha (60-90 cm) sind etwa einen Monat später insbesondere in der obersten Bodenschicht von 0 bis 30 cm deutliche Veränderungen (Tab. 23) in Abhängigkeit der durchgeführten Maßnahmen zu erkennen. Beim Vergleich der acht Prüfglieder der ‚Serie ABC' (B0, B1, Z0 und Z1) liegt der Gehalt an mineralischen Stickstoff unter der Brache mit durchschnittlich 42,2 (B0) und 73,5 kg/ha (B1) signifikant über den Werten der entsprechenden Zwischenfruchtvarianten Z0 (28,9) und Z1 (41,0). Die Wirkung der Düngung zeigt sich unabhängig von der Bodenbedeckung in einer signifikanten Erhöhung des N_{min}-Gehaltes von durchschnittlich 35,6 der ungedüngten um ca. 20 kg auf 57,3 kg/ha bei den gedüngten Varianten, wobei diese Steigerung unter der Brache stärker ausgeprägt ist. Auch beim Vergleich der Zwischenfruchtvarianten untereinander (Serie AC) steigen die Vorräte an Nitratstickstoff im Oberboden unabhängig von der Bodenbearbeitung infolge der Düngung von 28,9 (Z0) auf 41,0 (Z1) und 80,5 kg/ha (Z2) mit signifikanten Unterschieden zwischen den einzelnen Düngungsstufen an.

Tab. 23: N_{min}-Gehalt (kg/ha) zum 18.10.93 in drei Bodentiefen in Abhängigkeit von Bodenbearbeitung (A), Bodenbedeckung (B) und N-Düngung (C) (n=6)

Tiefe in cm	Variante									
	PBO	**PB1**	**PZ0**	**PZ1**	**PZ2**	**FB0**	**FB1**	**FZ0**	**FZ1**	**FZ2**
0-30	**39,6**	**76,2**	**21,6[a]**	**40,6[b]**	**72,8[c]**	**44,7**	**70,8**	**36,1[a]**	**41,4[b]**	**88,1[c]**
ABC	F-Test: A=n.s., B=sign., C=sign., A*C=sign. (P=0,05)									
AC	F-Test: A=n.s., C=sign. (P=0,05)									
30-60	**36,8**	**36,3**	**30,9**	**33,0**	**39,2**	**31,5**	**32,4**	**37,4**	**32,6**	**37,2**
ABC	F-Test: A=n.s., B=n.s., C=n.s. (P=0,05)									
AC	F-Test: A=n.s., C=n.s. (P=0,05)									
60-90	**33,0**	**39,0**	**36,1**	**33,1**	**35,4**	**34,3**	**43,2**	**34,8**	**39,5**	**52,8**
ABC	F-Test: A=n.s., B=n.s., C=n.s. (P=0,05)									
AC	F-Test: A=n.s., C=n.s. (P=0,05)									
	a, b, c: Mittelwerteder Faktorstufen (C) mit gleichen Buchstaben unterscheiden sich nicht signifikant (Tukey-HSD mit α=0,05)									

In den beiden unteren Bodenschichten liegen die Werte mit 34,7 (30-60 cm) bzw. 38,1 (60-90 cm) um durchschnittlich 2 kg über den Ausgangswerten des Vormonats. Eindeutige Wirkungen der drei Faktoren sind dabei nicht zu erkennen. Auffallend sind jedoch leicht erhöhte Gehalte bei den Varianten FZ2 (in 30-60 und 60-90 cm), PZ2 und FZ0 (30-60 cm) sowie bei FB1 (60-90 cm).

Ende Dezember liegen die Werte für den N_{min}-Gehalt im Oberboden bei allen Varianten unterhalb von 10 kg/ha (Tab. 24). Im Vergleich zum Beprobungstermin im Oktober verringerte sich der Gehalt an mineralischen Stickstoff um 37 (B0) bzw. knapp 70 kg (B1) unter der Brache und um 25 (Z0), 46 (Z1) bzw. 72 kg (Z2) unter der Zwischenfrucht. In der mittleren Bodenschicht sind die Abnahmen bezogen auf die Werte, die im Oktober ermittelt wurden, nicht ganz so drastisch und betragen für die Brachen 25 und 26 kg für die Zwischenfruchtvarianten.

Im Unterboden verringerte sich der N_{min}-Gehalt während des 10-wöchigen Intervalls nur bei den Zwischenfruchtvarianten der beiden ersten Düngungsstufen um durchschnittlich 11.5 (Z0) bzw. 4,1 kg/ha (Z1). Bei den Brachevarianten erhöhte sich der Gehalt um 8,8 (B0) bzw. 17,8 kg (B1) ebenso wie bei der Zwischenfrucht mit der höchsten Düngungsintensität (4,6 kg). Unabhängig von der Art der Bodenbearbeitung liegen die Gehalte unter der Brache mit 42,5 (B0) bzw. 59,3 kg (B1) signifikant über dem Niveau der entsprechenden

Zwischenfruchtvarianten Z0 (24,0) und Z1 (32,2). Die höheren Werte infolge der Düngung sind ebenfalls statistisch abgesichert. Tendenziell steigt auch unter der Zwischenfrucht der N_{min}-Gehalt mit zunehmender Düngungsmenge, signifikant ist jedoch nur der Unterschied zwischen den beiden ersten zur höchsten Stufe.

Tab. 24: N_{min}-Gehalt (kg/ha) zum 28.12.93 in drei Bodentiefen in Abhängigkeit von Bodenbearbeitung (A), Bodenbedeckung (B) und N-Düngung (C) (n=6)

Tiefe in cm	Variante									
	PBO	**PB1**	**PZ0**	**PZ1**	**PZ2**	**FB0**	**FB1**	**FZ0**	**FZ1**	**FZ2**
0-30	**3,6**	**3,9**	**4,2[a]**	**5,1[ab]**	**8,4[b]**	**6,3**	**4,1**	**3,3[a]**	**5,7[ab]**	**9,0[b]**
ABC	Varianzinhomogen; n.s Wilcoxen-Wilcox-Test									
AC	F-Test: A=n.s., C=sign. (P=0,05)									
30-60	**7,0**	**9,2**	**10,1**	**3,4**	**6,3**	**13,1**	**9,6**	**10,1**	**14,7**	**14,3**
ABC	F-Test: A=n.s., B=n.s., C=n.s. (P=0,05)									
AC	F-Test: A=n.s., C=n.s. (P=0,05)									
60-90	**44,6**	**54,1**	**17,5[a]**	**30,2[a]**	**38,4[b]**	**40,3**	**64,5**	**30,5[a]**	**34,2[a]**	**58,9[b]**
ABC	F-Test: A=n.s., B=sign., C=sign., (P=0,05)									
AC	F-Test: A=n.s., C=sign. (P=0,05)									
	* Wilcoxen-Wilcox-Test: Signifikant bei P = 0,05									
	a, b, c: Mittelwerteder Faktorstufen (C) mit gleichen Buchstaben unterscheiden sich nicht signifikant (Tukey-HSD mit α=0,05)									

Im Vergleich zu den Werten des Dezembers sanken die N_{min}-Gehalte bis Ende März (Tab. 25) in den zwei obersten Bodenschichten im Durchschnitt aller Varianten geringfügig auf 4,9 (5,4) bzw. 6,3 kg/ha. (9,8). In beiden Schichten liegen signifikante Unterschiede zwischen den Brachen mit 5,5 (0-30 cm) bzw. 9,1 kg/ha (30-60 cm) und den Zwischenfrüchten der beiden ersten Düngungsstufen mit 4,1 kg/ha (0-30 und 30-60 cm) vor. In der untersten Bodenschicht (60-90 cm) beträgt der Unterschied zwischen den Brachen (10,6) und den Zwischenfrüchten (4,0) 6,6 kg/ha. Hier sind auch die mengenmäßig größten Veränderungen gegenüber den Werten zum Jahreswechsel festzustellen. Unabhängig von der Art der Bodenbearbeitung verringerten sich die Vorräte an mineralischem Stickstoff unter der Brache um 30,3 (B0) bzw. 50,2 kg (B1) auf 12,2 und 9,1 kg/ha. Bei den Varianten der Zwischenfrucht betragen die Differenzen in Abhängigkeit der Düngungsintensität 20,2 (Z0), 27,9 (Z1) sowie 43,5 kg/ha (Z2).

Tab. 25: N_{min}-Gehalt (kg/ha) zum 28.3.94 in drei Bodentiefen in Abhängigkeit von Bodenbearbeitung (A), Bodenbedeckung (B) und N-Düngung (C) (n=6)

Tiefe in cm	Variante									
	PBO	**PB1**	**PZ0**	**PZ1**	**PZ2**	**FB0**	**FB1**	**FZ0**	**FZ1**	**FZ2**
0-30	**4,8**	**5,3**	**4,4**	**4,0**	**5,9**	**5,4**	**6,6**	**3,5**	**4,5**	**4,6**
ABC	F-Test: A=n.s., B=sign., C=n.s., (P=0,05)									
AC	F-Test: A=n.s., C=n.s. (P=0,05)									
30-60	**9,3**	**7,7**	**2,8[a]**	**3,8[ab]**	**6,3[b]**	**10,3**	**9,0**	**5,2[a]**	**4,5[ab]**	**4,4[b]**
ABC	F-Test: A=sign., B=sign., C=n.s., (P=0,05)									
AC	F-Test: A=n.s., C=sign., A*C=sign. (P=0,05)									
60-90	**12,0**	**8,9**	**3,4**	**3,4**	**4,8**	**12,3**	**9,2**	**4,2**	**5,1**	**5,5**
ABC	F-Test: A=n.s., B=sign., C=n.s., (P=0,05)									
AC	F-Test: A=n.s., C=n.s. (P=0,05)									
	a, b, c: Mittelwerte der Faktorstufen (C) mit gleichen Buchstaben unterscheiden sich nicht signifikant (Tukey-HSD mit α=0,05)									

3.4.3 N-Entzug der Zwischenfrucht

Die gebildete Frischmasse der Winterrübsen liegt mit Werten von 62,0 (Z0), 131,2 (Z1) und 201,2 dt/ha (Z2) niedriger als in den Vorjahren (Tab. 26). Die Wirkung der Düngung ist zwischen den einzelnen Stufen signifikant. Mit steigendem Stickstoffangebot sinken die Gehalte an Trockensubstanz ebenfalls signifikant von 17,3 (Z0) auf 15,0 (Z1) und 13,0 % (Z2). Dabei weisen die Varianten mit reduzierter Bodenvorbereitung mit durchschnittlich 15,7 % um 1,2 % höhere Gehalte auf als die konventionell bearbeiteten (14,5 %). Die oberirdisch gebildete Trockenmasse verdoppelt sich bei einer zusätzlichen N-Gabe von 50 kg/ha von 10,3 (Z0) auf 19,4 dt/ha (Z1) und steigt nochmals signifikant bei der höchsten Düngungsintensität (Z2) auf 25,5 dt/ha. Deutlich höher als in den vorangegangenen Versuchsjahren liegen die Stickstoffgehalte in der Biomasse mit durchschnittlich 30,7, 32,4 und 36,7 mg/g in Abhängigkeit der Düngungsstufen Z0, Z1 und Z2 mit einem signifikanten Unterschied zwischen den Varianten der ersten beiden Düngungsstufen zu Z2. Die N-Entzüge steigen infolge der Düngung von 31,9 (Z0) um jeweils etwa 30 kg auf 62,5 (Z1) und 92,7 kg (Z2) signifikant an.

Tab. 26: Einfluss von Bodenbearbeitung (A) und N-Düngung (C) auf die Frisch- und Trockenmasse, den N-Gehalt und N-Entzug der Zwischenfrucht zum 17.12.93 (n=6)

	Variante					
	PZ0	**PZ1**	**PZ2**	**FZ0**	**FZ1**	**FZ2**
Frischmasse in dt/ha	**63,9[a]**	**127,5[b]**	**222,4[c]**	**60,1[a]**	**134,9[b]**	**179,9[c]**
AC	F-Test: A=n.s., C=sign. (P=0,05)					
%TS	**16,0[a]**	**15,2[b]**	**12,3[c]**	**18,6[a]**	**14,8[b]**	**13,6[c]**
AC	F-Test: A=sign., C=sign. (P=0,05)					
Trockenmasse in dt/ha	**9,9[a]**	**19,1[b]**	**26,9[c]**	**10,7[a]**	**19,6[b]**	**24,1[c]**
AC	F-Test: A=n.s., C=sign. (P=0,05)					
N_t in mg/g	**33,4[a]**	**32,7[a]**	**36,9[b]**	**28,0[a]**	**32,0[a]**	**36,4[b]**
AC	F-Test: A=n.s., C=sign. (P=0,05)					
N-Entzug in kg/ha	**32,9[a]**	**62,6[b]**	**97,8[c]**	**30,9[a]**	**62,4[b]**	**87,5[c]**
AC	F-Test: A=n.s., C=sign. (P=0,05)					

a, b, c: Mittelwerte der Faktorstufen (C) mit gleichen Buchstaben unterscheiden sich nicht signifikant (Tukey-HSD mit α=0,05)

3.5 Beobachtungen während der Sommerhalbjahre

3.5.1 Boden N_{min} und N-Gehalt des Sommerweizens während der Vegetationsperiode

Die Bodenuntersuchungen während den nachfolgenden Vegetationsperioden zeigen im ersten Versuchsjahr eine hochsignifikante Nachwirkung des Faktors ‚Bodenbedeckung' im Oberboden (Tab. 27). Unabhängig von der Art der Bodenbearbeitung liegen die N_{min}-Werte bei den im Winterhalbjahr unbedeckten Varianten mit durchschnittlich 14,6 (B0) bzw.14,2 kg/N um bis zu 10 kg unter denen der entsprechenden Zwischenfruchtvarianten Z0 (19,9) und Z1 (25,9). Beim Vergleich der Varianten der Serie ‚AC' steigen die Gehalte mit zunehmender Düngungsintensität von 19,9 kg (Z0) um 6 (Z1) bzw. 14 kg/ha (Z2) mit starker Tendenz (P=0,078) an. In der mittleren Bodenschicht (30-60 cm) ist keine signifikante Wirkung des Faktors ‚Bodenbedeckung' auf den mineralischen Stickstoffvorrat im Boden nachweisbar. Gegenüber dem Oberboden liegen im Unterboden (60-90 cm) hinsichtlich der Nachwirkung der Bodenbedeckung umgekehrte Verhältnisse vor. Hier werden für die Brachevarianten B0 (8,5) und B1 (8,7) signifikant höhere N_{min}-Gehalte ausgewiesen als für die entsprechenden Zwischenfruchtvarianten mit durchschnittlich 5,2 (Z0) bzw. 5,8 kg N/ha (Z1).

Tab. 27: N_{min}-Gehalt (kg/ha) zum 15.5.91 in drei Bodentiefen in Abhängigkeit von Bodenbearbeitung (A), Bodenbedeckung (B) und N-Düngung (C) während des Winterhalbjahres (n=5)

Tiefe in cm	Variante									
	PBO	**PB1**	**PZ0**	**PZ1**	**PZ2**	**FB0**	**FB1**	**FZ0**	**FZ1**	**FZ2**
0-30	**14,4**	**15,0**	**21,4**	**24,6**	**35,9**	**14,8**	**13,4**	**18,3**	**27,2**	**32,1**
ABC	F-Test: A=n.s., B=sign., C=n.s. (P=0,05)									
AC	F-Test: A=n.s., C=n.s. (P=0,05)									
30-60	**16,2**	**15,8**	**11,8**	**21,4**	**25,7**	**16,3**	**14,8**	**18,6**	**20,9**	**19,8**
ABC	F-Test: A=n.s., B=n.s., C=n.s., A*C=sign. (P=0,05)									
AC	F-Test: A=n.s., C=n.s. (P=0,05)									
60-90	**8,8**	**9,5**	**5,3**	**6,8**	**6,8**	**8,2**	**7,9**	**5,1**	**4,8**	**6,4**
ABC	F-Test: A=n.s., B=sign., C=n.s. (P=0,05)									
AC	F-Test: A=n.s., C=n.s. (P=0,05)									

Im zweiten Versuchsjahr wirkt sich die Art der Bodenbedeckung im Winterhalbjahr ähnlich auf den Vorrat an pflanzenverfügbaren Stickstoff während der darauf folgenden Vegetationsperiode aus (Tab. 28). Im Oberboden beträgt er bei den Bracheparzellen

durchschnittlich 10,5 kg/ha, was etwa der Hälfte der mineralischen Stickstoffmengen der entsprechenden Zwischenfruchtvarianten Z0 und Z1 (20,3) entspricht. Unabhängig von der Art der Bodenbearbeitung steigt die Verfügbarkeit bei den Zwischenfruchtvarianten (Serie ‚AC') mit steigender Düngungsintensität signifikant von 16,4 (Z0) auf 24,3 (Z1) und 42,8 kg N/ha (Z2) an. In den beiden unteren Bodenschichten liegen die N_{min}-Werte der Brachevarianten mit durchschnittlich 7,1 (30-60 cm) und 11,8 kg N/ha (60-90 cm) über denen der entsprechenden Zwischenfruchtvarianten (Z0 und Z1) mit 5,9 (30-60 cm) bzw. 5,7 kg N/ha (60-90 cm).

Tab. 28: N_{min}-Gehalt (kg/ha) zum 25.6.92 in drei Bodentiefen in Abhängigkeit von Bodenbearbeitung (A), Bodenbedeckung (B) und N-Düngung (C) während des Winterhalbjahres (n=3)

Tiefe in cm	Variante									
	PBO	**PB1**	**PZ0**	**PZ1**	**PZ2**	**FB0**	**FB1**	**FZ0**	**FZ1**	**FZ2**
0-30	**7,4**	**13,4**	**18,2**	**22,4**	**37,4**	**12,2**	**9,0**	**14,5**	**26,2**	**48,1**
ABC/AC	Varianzinhomogen; Vorzeichentest: A=n.s., B=sign., C: Signifikante Stufen Z0-Z1; Z0-Z2, Z1-Z2									
30-60	**6,1**	**7,6**	**5,4**	**6,4**	**5,5**	**8,2**	**6,5**	**6,0**	**5,7**	**6,5**
	Varianzinhomogen; Vorzeichentest A=n.s., B=n.s., C: keine signifikante Stufen									
60-90	**11,1**	**10,9**	**5,8**	**6,2**	**5,7**	**10,6**	**14,4**	**5,3**	**5,3**	**6,3**
	Varianzinhomogen; Vorzeichentest: A=n.s., B=sign., C: keine signifikante Stufen									
	Vorzeichentest für Faktoren oder Stufen bei α=0,05									

Auch im dritten Versuchsjahr ist eine positive Nachwirkung des Zwischenfruchtanbaues auf den mineralischen Stickstoffgehalt im Oberboden zu erkennen (Tab. 29). Der Unterschied zwischen Brachevarianten (8,2) und den entsprechenden Zwischenfruchtvarianten (13,6) von 5,4 kg N/ha ist signifikant. In den beiden unteren Schichten sind dagegen keinerlei Auswirkungen in Abhängigkeit der Bodenbedeckung nachweisbar. Innerhalb der Zwischenfruchtvarianten steigen die N_{min}-Werte in diesen Schichten unabhängig von der Art der Bodenbearbeitung von durchschnittlich 6,7 (Z0) auf 9,1 (Z1) und 10,3 (Z2) in der Tiefe 30 bis 60 cm bzw. von 7,5 (Z0) auf 9,0 (Z1) und 12,4 (Z2) im Unterboden (60-90 cm) mit zunehmender N-Düngung tendenziell an.

Tab. 29: N_{min}-Gehalt (kg/ha) zum 10.6.93 in drei Bodentiefen in Abhängigkeit von Bodenbearbeitung (A), Bodenbedeckung (B) und N-Düngung (C) während des Winterhalbjahres (n=6)

Tiefe in cm	Variante									
	PBO	**PB1**	**PZ0**	**PZ1**	**PZ2**	**FB0**	**FB1**	**FZ0**	**FZ1**	**FZ2**
0-30	**8,8**	**7,0**	**12,8**	**20,0**	**14,0**	**10,1**	**7,0**	**10,3**	**11,2**	**13,9**
ABC	F-Test: A=n.s., B=sign., C=n.s. (P=0,05)									
AC	F-Test: A=n.s., C=n.s. (P=0,05)									
30-60	**8,6**	**7,0**	**7,5**	**10,9**	**12,2**	**7,5**	**7,0**	**5,8**	**7,3**	**9,7**
ABC	F-Test: A=n.s., B=n.s., C=n.s. (P=0,05)									
AC	F-Test: A=n.s., C=n.s. (P=0,05)									
60-90	**13,4**	**6,8**	**6,3**	**7,7**	**8,7**	**9,7**	**8,6**	**8,6**	**10,3**	**16,0**
ABC	F-Test: A=n.s., B=n.s., C=n.s. (P=0,05)									
AC	F-Test: A=n.s., C=n.s. (P=0,05)									

Die niedrigsten mineralischen N-Gehalte im Oberboden aller vier Versuchsjahre werden für das letzte Jahr ausgewiesen (Tab. 30). Die Werte betragen für die Brachevarianten unabhängig von der Art der Bodenbearbeitung 3,6 (B0) bzw. 4,0 kg N/ha (B1). Mit durchschnittlich 4,6 (Z0) und 5,6 kg N/ha (Z1) liegen bei den Zwischenfruchtvarianten etwas höhere Gehalte vor, wobei diese Unterschiede statistisch nicht abgesichert sind (P=0,054).

Tab. 30: N_{min}-Gehalt (kg/ha) zum 23./27.6.94 in drei Bodentiefen in Abhängigkeit von Bodenbearbeitung (A), Bodenbedeckung (B) und N-Düngung (C) während des Winterhalbjahres (n=6)

Tiefe in cm	Variante									
	PBO	**PB1**	**PZ0**	**PZ1**	**PZ2**	**FB0**	**FB1**	**FZ0**	**FZ1**	**FZ2**
0-30	**4,2**	**3,9**	**4,5**	**5,5**	**6,4**	**3,0**	**4,1**	**4,4**	**5,7**	**8,9**
ABC	F-Test: A=n.s., B=n.s., C=n.s. (P=0,05)									
AC	F-Test: A=n.s., C=n.s. (P=0,05)									
30-60	**7,2**	**7,1**	**8,4**	**5,5**	**9,3**	**6,4**	**9,5**	**5,9**	**6,1**	**9,9**
ABC	F-Test: A=n.s., B=n.s., C=n.s. (P=0,05)									
AC	F-Test: A=n.s., C=n.s. (P=0,05)									
60-90	**9,0**	**8,3**	**6,3**	**3,7**	**6,6**	**9,7**	**15,4**	**8,3**	**6,2**	**8,7**
	Varianzinhomogen;									
				PB0*			PZ1*			
* Wilcoxen-Wilcox-Test: Signifikant bei P = 0,05										

Tendenziell steigen bei den Zwischenfruchtvarianten die Werte mit der Düngungsintensität sowohl bei den gepflügten, als auch bei den gefrästen Parzellen leicht an. In der mittleren Bodenschicht ist dagegen kein einheitlicher Trend zu erkennen. Im Unterboden liegt der N_{min}-Gehalt bei den im Winterhalbjahr unbedeckten Parzellen (B0 und B1) wie in den ersten beiden Versuchsjahren mit durchschnittlich 10,6 kg/ha über dem, der Varianten Z0 und Z1 (6,1).

Parallel zu den Bodenuntersuchungen während der Vegetationsperiode wurden in den beiden letzten Versuchsjahren Analysen des Sommerweizens hinsichtlich des N-Gehalts vorgenommen (Tab. 31). Für beide Jahre zeigt sich eine positive Nachwirkung des Zwischenfruchtanbaues auf die N-Aufnahme des Sommerweizens. Der N-Gehalt der Zwischenfruchtvarianten der beiden ersten Düngungsstufen (Z0 und Z1) liegt mit durchschnittlich 23,1 (1993) bzw. 16,8 mg/g (1994) signifikant über den Werten von 20,6 (1993) und 14,7 mg/g (1994) der während des Winterhalbjahres brach liegenden Parzellen. Darüber hinaus steigt im letzten Versuchsjahr der N-Gehalt bei den Zwischenfruchtvarianten unabhängig von der Art der Bodenbearbeitung mit steigender Düngungsintensität von 16,6 (Z0) auf 17,1 (Z1) und 19,0 mg/g (Z2) an.

Tab. 31: Nachwirkungen von Bodenbearbeitung (A), Bodenbedeckung (B) und N-Düngung (C) im Winterhalbjahr auf den Stickstoffgehalt (mg/g) des Sommerweizens während der Vegetationsperiode zum 21./22.6.93 (n=6) und 21.6.94 (n=6)

	Variante									
Jahr	**PBO**	**PB1**	**PZ0**	**PZ1**	**PZ2**	**FB0**	**FB1**	**FZ0**	**FZ1**	**FZ2**
1993	**22,1**	**19,6**	**23,6**	**24,3**	**21,9**	**21,0**	**19,5**	**22,2**	**22,4**	**24,1**
ABC	F-Test: A=n.s., B=sign., C=n.s. (P=0,05)									
AC	F-Test: A=n.s., C=n.s. (P=0,05)									
1994	**15,1**	**14,3**	**16,7[a]**	**17,4[ab]**	**18,8[b]**	**14,2**	**15,3**	**16,4[a]**	**16,8[ab]**	**19,2[b]**
ABC	F-Test: A=n.s., B=sign., C=n.s. (P=0,05)									
AC	F-Test: A=n.s., C=sign. (P=0,05)									
	a, b, c: Mittelwerte der Faktorstufen (C) mit gleichen Buchstaben unterscheiden sich nicht signifikant (Tukey-HSD mit α=0,05)									

3.5.2 Ertrag und N-Entzug des Sommerweizens

Die Analysen des geernteten Korns zeigen für alle vier Versuchsjahre eine positive Nachwirkung des Zwischenfruchtanbaues auf den Stickstoffgehalt des Sommerweizens (Tab.

32). Im Durchschnitt der vier Jahre liegen die Werte der Zwischenfruchtvarianten Z0 und Z1 mit 26,9 mg/g um 3 mg über dem der Brachevarianten (23,8). Dieser Unterschied ist für die ersten drei Versuchsjahre statistisch abgesichert und im letzten in der Tendenz erkennbar. Höhere N-Gehalte der gepflügten gegenüber den gefrästen Varianten werden für die Erntejahre 1991 (Serie ‚ABC') und 1993 (Serien ‚ABC' und ‚AC') ausgewiesen. Mit steigernder Düngungsintensität zur Zwischenfrucht erhöht sich der Stickstoffgehalt des Sommerweizens im Schnitt der vier Jahre von 26,4 (Z0) auf 27,4 (Z1) und 28,5 mg/g (Z2).

Tab. 32: Nachwirkungen von Bodenbearbeitung (A), Bodenbedeckung (B) und N-Düngung (C) im Winterhalbjahr auf den Stickstoffgehalt zur Ernte im Korn (mg/g) des Sommerweizens der vier Versuchsjahre (n=6)

	Variante									
Jahr	**PBO**	**PB1**	**PZ0**	**PZ1**	**PZ2**	**FB0**	**FB1**	**FZ0**	**FZ1**	**FZ2**
1991	26,0	27,0	29,1[a]	29,9[b]	31,3[c]	25,6	25,5	28,3[a]	30,0[b]	31,2[c]
ABC	F-Test: A=sign., B=sign., C=sign. (P=0,05)									
AC	F-Test: A=n.s., C=sign. (P=0,05)									
1992	25,6	27,5	29,9[a]	30,7[ab]	31,0[b]	26,9	25,6	28,4[a]	29,3[ab]	31,0[b]
ABC	F-Test: A=n.s., B=sign., C=n.s. (P=0,05)									
AC	F-Test: A=n.s., C=sign. (P=0,05)									
1993	22,2	22,5	26,3	26,7	26,7	21,4	21,2	24,0	24,2	24,7
ABC	F-Test: A=sign., B=sign., C=n.s., A*B=sign. (P=0,05)									
AC	F-Test: A=sign., C=n.s. (P=0,05)									
1994	20,5	20,3	23,0	25,9	25,9	20,7	21,1	22,0	22,1	26,2
	Varianzinhomogen;									
				PB1*	PB1* PB0*					PB1* PB0* FB0* FB1*
AC	F-Test: A=sign., C=sign. (P=0,05)									
∅	**23,6**	**24,3**	**27,1**	**28,3**	**28,7**	**23,7**	**23,4**	**25,7**	**26,4**	**28,3**

Bei den Erträgen sind keine deutlichen Effekte der während des Winterhalbjahres durchgeführten ackerbaulichen Maßnahmen Bodenbearbeitung, Bodenbedeckung und N-Düngung zu erkennen (Tab. 33). Abweichend von den Erntejahren 1991, 1993 und 1994 mit einem Ertragsmittel von 33,1 dt/ha liegt der Ertrag 1992 bei nur 17,1 dt, was auf erhebliche Ertragseinbußen durch Vogelfraß zurückzuführen ist. Aus diesem Grund findet dieses Versuchsjahr bei den Ausführungen zum N-Entzug keine weitere Berücksichtigung.

Tab. 33: Nachwirkungen von Bodenbearbeitung (A), Bodenbedeckung (B) und N-Düngung (C) im Winterhalbjahr auf den Kornertrag (dt/ha) des Sommerweizens der vier Versuchsjahre (n=6)

	Variante									
Jahr	**PBO**	**PB1**	**PZ0**	**PZ1**	**PZ2**	**FB0**	**FB1**	**FZ0**	**FZ1**	**FZ2**
1991	34,7	34,2	34,5	32,1	30,9	31,7	33,0	30,7	32,4	29,7
ABC	F-Test: A=n.s., B=n.s., C=n.s. (P=0,05)									
AC	Varianzinhomogen; n.s Wilcoxen-Wilcox-Test									
1992	19,3	15,5	14,3	13,2	16,2	17,4	18,2	21,0	19,5	16,5
ABC	F-Test: A=sign., B=n.s., C=n.s. (P=0,05)									
AC	F-Test: A=sign., C=n.s. (P=0,05)									
1993	35,9	35,4	36,3	35,3	37,1	34,3	36,6	37,1	35,5	36,1
ABC	Varianzinhomogen; n.s Wilcoxen-Wilcox-Test									
AC	F-Test: A=n.s., C=n.s. (P=0,05)									
1994	31,3	29,1	30,3	29,5	31,2	30,1	31,2	33,7	32,1	31,7
ABC	F-Test: A=sign., B=n.s., C=n.s. (P=0,05)									
AC	Varianzinhomogen; n.s Wilcoxen-Wilcox-Test									
∅	**30,3**	**28,6**	**28,9**	**27,5**	**28,9**	**28,4**	**29,8**	**30,6**	**29,9**	**28,5**

Bei allen drei betrachteten Jahren liegt eine signifikante Nachwirkung der Bodenbedeckung auf den gesamten N-Entzug durch Korn und Stroh vor (Tab. 34). Das Mittel der drei Jahre beträgt unabhängig von der Art der Bodenbearbeitung für die Brachevarianten 77,4 und für die Zwischenfruchtvarianten der beiden ersten Düngungsstufen 89,1 kg N/ha. Zudem liegen die Entzüge der konventionell bearbeiteten Parzellen in den Jahren 1991 und 1993 signifikant über denen der reduziert bearbeiteten sowohl beim Vergleich innerhalb der Serie ‚ABC', als auch beim Vergleich der Zwischenfruchtvarianten untereinander (Serie ‚AC'). Eine nachhaltige Wirkung der N-Düngung zu den Zwischenfrüchten auf die Entzüge ist für die einzelnen Jahre nicht nachweisbar. Beim Dreijahresmittel ist jedoch ein steigender Trend bei beiden Bodenbearbeitungsarten zu erkennen. Die Entzüge steigen von 91,5 (PZ0) auf 92,4 (PZ1) und 96,0 kg (PZ2) bei den konventionell bearbeiteten Varianten sowie von 85,4 (FZ0) auf 87,1 (FZ1) und 92,3 kg (FZ2) bei den reduziert bearbeiteten.

Tab. 34: Nachwirkungen von Bodenbearbeitung (A), Bodenbedeckung (B) und N-Düngung (C) im Winterhalbjahr auf den N-Entzug durch Korn und Stroh (kg/ha) des Sommerweizens der Versuchsjahre 1991, 1993 und 1994 (n=6)

	Variante									
Jahr	**PBO**	**PB1**	**PZ0**	**PZ1**	**PZ2**	**FB0**	**FB1**	**FZ0**	**FZ1**	**FZ2**
1991	93,5	98,1	107,6	105,6	104,8	83,6	87,0	92,8	101,3	101,1
ABC	F-Test: A=sign., B=sign., C=n.s. (P=0,05)									
AC	F-Test: A=sign., C=n.s. (P=0,05)									
1993	82,7	82,3	98,3	95,1	101,2	74,7	77,5	91,1	87,8	91,6
ABC	F-Test: A=sign., B=sign., C=n.s. (P=0,05)									
AC	F-Test: A=sign., C=n.s. (P=0,05)									
1994	63,0	58,8	68,6[a]	76,4[ab]	82,0[b]	61,0	66,2	72,2[a]	72,2[ab]	84,1[b]
ABC	F-Test: A=n.s., B=sign., C=n.s. (P=0,05)									
AC	F-Test: A=n.s., C=sign. (P=0,05)									
∅	**79,7**	**79,7**	**91,5**	**92,4**	**96,0**	**73,1**	**76,9**	**85,4**	**87,1**	**92,3**
	a, b, c: Mittelwerte der Faktorstufen (C) mit gleichen Buchstaben unterscheiden sich nicht signifikant (Tukey-HSD mit α=0,05)									

3.5.3 Boden N_{min} nach der Weizenernte

Die Ergebnisse der jeweils nach der Weizenernte durchgeführten abschließenden Bodenuntersuchungen hinsichtlich des N_{min}-Gehaltes zeigen die nachhaltige Wirkung insbesondere des Faktors ‚Bodenbedeckung' (Tab. 35). Mit durchschnittlich 26,4 kg N/ha im Oberboden liegen die Werte der ehemals mit Zwischenfrüchten bedeckten Parzellen (Z0 und Z1) signifikant über dem Niveau der vier Brachevarianten (13,8). Innerhalb der Serie ‚ABC' wirkt darüber hinaus die konventionelle Bodenbearbeitung positiv auf die N-Verfügbarkeit nach. Tendenziell gilt dies auch beim Vergleich der sechs Zwischenfruchtvarianten (bei P=0,055). Bei diesen (Serie ‚AC') erhöhen sich die mineralischen Stickstoffvorräte in Abhängigkeit von der N-Düngung zu den Winterrübsen von 20,1 (Z0) auf 32,0 (Z1) und 36,3 kg/ha (Z2). In der mittleren Bodenschicht befinden sich die Werte aller Varianten in einem engen Bereich von 4,4 bis 7,9 kg N/ha ohne statistisch abgesicherte Unterschiede. Fast doppelt so hohe N-Gehalte finden sich bei den Brachevarianten (5,9 kg/ha) gegenüber den Zwischenfruchtvarianten (3,0 kg/ha) im Unterboden. Innerhalb der Serie ‚AC' steigen die Werte in Abhängigkeit der Düngung bei beiden Bodenbearbeitungsarten von 2,8 auf 3,2 und 4,1 kg bei den gepflügten bzw. von 2,7 auf 3,3 und 3,6 kg bei den gefrästen Varianten an.

Tab. 35: N_{min}-Gehalt (kg/ha) zum 13./14.8.91 in drei Bodentiefen in Abhängigkeit von Bodenbearbeitung (A), Bodenbedeckung (B) und N-Düngung (C) während des Winterhalbjahres (n=6)

Tiefe in cm	Variante									
	PBO	**PB1**	**PZ0**	**PZ1**	**PZ2**	**FB0**	**FB1**	**FZ0**	**FZ1**	**FZ2**
0-30	**14,9**	**13,9**	**23,9[a]**	**36,8[b]**	**38,2[b]**	**10,7**	**15,8**	**17,6[a]**	**27,2[b]**	**35,7[b]**
ABC	F-Test: A=sign., B=sign., C=sign. (P=0,05)									
AC	F-Test: A=n.s., C=sign. (P=0,05)									
30-60	**5,4**	**5,1**	**6,2**	**5,8**	**7,9**	**4,6**	**4,4**	**4,6**	**5,4**	**5,8**
ABC/AC	Varianzinhomogen; n.s Wilcoxen-Wilcox-Test									
60-90	**7,4**	**6,7**	**2,8**	**3,2**	**4,1**	**5,3**	**4,2**	**2,7**	**3,3**	**3,6**
ABC	F-Test: A=n.s., B=sign., C=n.s. (P=0,05)									
AC	F-Test: A=n.s., C=n.s. (P=0,05)									
	a, b, c: Mittelwerte der Faktorstufen (C) mit gleichen Buchstaben unterscheiden sich nicht signifikant (Tukey-HSD mit α=0,05)									

Ähnliche Verhältnisse liegen auch nach dem Abschluss des dritten Versuchsjahres vor (Tab. 36), wenngleich die Unterschiede zwischen den Brachevarianten (18,6 kg) und den entsprechenden Zwischenfruchtvarianten (27,6 kg) hinsichtlich des mineralischen N-Gehaltes im Oberboden etwas geringer sind als bei den Untersuchungen zum Ende des ersten

Tab. 36: N_{min}-Gehalt (kg/ha) zum 23./24.8.93 in drei Bodentiefen in Abhängigkeit von Bodenbearbeitung (A), Bodenbedeckung (B) und N-Düngung (C) während des Winterhalbjahres (n=6)

Tiefe in cm	Variante									
	PBO	**PB1**	**PZ0**	**PZ1**	**PZ2**	**FB0**	**FB1**	**FZ0**	**FZ1**	**FZ2**
0-30	**19,4**	**19,1**	**30,8**	**30,6**	**27,0**	**18,2**	**17,7**	**22,2**	**26,8**	**25,3**
ABC	F-Test: A=sign., B=sign., C=n.s., A*B=sign. (P=0,05)									
AC	F-Test: A=sign., C=n.s., (P=0,05)									
30-60	**9,1**	**9,9**	**10,3**	**12,4**	**13,6**	**5,6**	**7,5**	**8,1**	**8,0**	**7,7**
ABC	F-Test: A=sign., B=sign., C=n.s., (P=0,05)									
AC	F-Test: A=sign., C=n.s., (P=0,05)									
60-90	**10,7**	**7,8**	**5,6[ab]**	**6,0[a]**	**8,3[b]**	**12,2**	**10,4**	**9,2[ab]**	**6,0[a]**	**10,0[b]**
ABC	F-Test: A=n.s., B=sign., C=n.s., (P=0,05)									
AC	F-Test: A=n.s., C=sign., (P=0,05)									
	a, b, c: Mittelwerte der Faktorstufen (C) mit gleichen Buchstaben unterscheiden sich nicht signifikant (Tukey-HSD mit α=0,05)									

Versuchsjahres. Darüber hinaus liegen die Werte der gepflügten Varianten auf einem signifikant höheren Niveau gegenüber denen, die mit der Fräse bearbeitet wurden. Dies gilt sowohl für den Vergleich innerhalb der Serie ‚ABC', als auch für den der Serie ‚AC'.

Diese Nachwirkungen der Faktoren Bodenbedeckung und Bodenbearbeitung setzen sich in gleicher Weise in der mittleren Bodenschicht fort. In der untersten Bodenschicht finden sich die größeren mineralischen Stickstoffmengen unter den ehemaligen Brachen (10,3 kg) im Vergleich zu den Zwischenfruchtvarianten Z0 und Z1 (6,7 kg).

Auch nach dem letzten Versuchsjahr (Tab. 37) liegen die N_{min}-Werte der obersten Schicht bei den Brachevarianten mit durchschnittlich 12,7 kg/ha unter dem Wert der Zwischenfruchtparzellen von Z0 und Z1 (14,8). Signifikante Unterschiede beim Vergleich dieser acht Varianten der Serie ‚ABC' ergeben sich jedoch nur in der untersten Bodenschicht. Hier werden, wie in den vorangegangenen Jahren, für die Brachevarianten unabhängig von der Art der Bodenbearbeitung und der N-Düngung mit 7,0 kg/ha um 3 kg höhere N_{min}-Mengen ausgewiesen als für die entsprechenden Zwischenfruchtvarianten (4,0 kg).

Tab. 37: N_{min}-Gehalt (kg/ha) zum 8./15.8.94 in drei Bodentiefen in Abhängigkeit von Bodenbearbeitung (A), Bodenbedeckung (B) und N-Düngung (C) während des Winterhalbjahres (n=6)

Tiefe in cm	Variante									
	PBO	**PB1**	**PZ0**	**PZ1**	**PZ2**	**FB0**	**FB1**	**FZ0**	**FZ1**	**FZ2**
0-30	**13,3**	**12,8**	**15,1**	**12,3**	**19,0**	**13,3**	**11,5**	**17,4**	**14,1**	**14,6**
ABC	F-Test: A=n.s., B=n.s., C=n.s. (P=0,05)									
AC	F-Test: A=n.s., C=n.s. (P=0,05)									
30-60	**6,7**	**5,2**	**5,7**	**4,2**	**6,0**	**5,6**	**6,8**	**4,8**	**6,0**	**6,8**
ABC	F-Test: A=n.s., B=n.s., C=n.s. (P=0,05)									
AC	F-Test: A=n.s., C=n.s. (P=0,05)									
60-90	**6,0**	**6,3**	**4,8**	**3,3**	**5,1**	**5,4**	**10,1**	**4,3**	**3,7**	**5,2**
ABC	F-Test: A=n.s., B=sign., C=n.s., B*C=sign. (P=0,05)									
AC	Varianzinhomogen;									
							PZ1*		FB1*	
	* Wilcoxen-Wilcox-Test: Signifikant bei P = 0,05									

3.6 Gegenüberstellung verschiedener Ansätze zur Abschätzung der Sickerwassermengen

3.6.1 Gegenüberstellung von Ansatz A und C

Beim Ansatz A werden die Sickerungsraten vereinfacht anhand der klimatischen Wasserbilanz abgeschätzt. Der Ansatz C berücksichtigt zusätzlich die Veränderungen der Bodenwasservorräte und war Grundlage der Messungen und Berechnungen von Sickerung und N-Austrag in den Kapiteln 3.1, 3.2 und 3.4. Dies geschieht durch Transformation der gemessenen Saugspannungen in volumetrische Wassergehaltsveränderungen. Für die Sickerungsperiode 1991/92 beträgt die Differenz aus Niederschlag und Evapotranspiration (Ansatz A) 95,8 (Brache) bzw. 84,8 mm bei den Winterrübsen (Tab. 38). In 30 cm Tiefe wird für die 24 Bracheparzellen nach Ansatz C eine durchschnittliche Sickermenge von 87,5 mm berechnet. Dies entspricht einer Differenz von 8,3 mm zu Ansatz A. Bei den Zwischenfrüchten beträgt diese 7,8 mm. Mit zunehmender Bestimmungstiefe der Sickerung

Tab. 38: Summen der Sickerung (mm) unter Brache und Zwischenfrucht für den Zeitraum 9.12.91 bis 1.3.92 berechnet nach Ansatz A (vrgl. Kap. 2.3.4) und deren Differenzen zu Ansatz C in vier verschiedenen Bodentiefen (vrgl. Tab. 10)

	Bodenbedeckung		
	Brache	Zwischenfrucht	Differenz Brache/Zwischenfrucht
Sickerung (mm) nach Ansatz A	**95,8**	**84,8**	**11,0**
Sickerung (mm) nach Ansatz C in 30 cm Tiefe	87,5 (n = 24)	77,0 (n = 36)	10,5
Differenz Ansatz A-C (30 cm)	**8,3**	**7,8**	
Sickerung (mm) nach Ansatz C in 60 cm Tiefe	77,6 (n = 24)	63,5 (n = 36)	14,1
Differenz Ansatz A-C (60 cm)	**18,2**	**21,3**	
Sickerung (mm) nach Ansatz C in 90 cm Tiefe	64,4 (n = 24)	43,3 (n = 36)	21,1
Differenz Ansatz A-C (90 cm)	**31,4**	**41,5**	
Sickerung (mm) nach Ansatz C in 120 cm Tiefe	49,4 (n = 24)	22,6 (n = 36)	26,8
Differenz Ansatz A-C (120 cm)	**46,4**	**62,2**	

vergrößert sich der Unterschied zwischen beiden Ansätzen auf 18,2 (60 cm) und 31,4 mm (90 cm) unter der Brache bzw. 21,3 (60 cm) und 41,5 mm (90 cm) unter der Zwischenfrucht. In der untersten Bodentiefe von 120 cm entspricht die nach Ansatz C berechnete Sickerung von 49,4 mm unter der Brache nahezu der Hälfte der klimatischen Wasserbilanz für den Zeitraum Anfang Dezember bis Anfang März. Unter den Zwischenfrüchten durchfließen nach Ansatz C nur 22,6 mm die Tiefe von 120 cm. Der restliche Anteil von 62,2 mm wirkt sich erhöhend auf den Bodenwasservorrat des gesamten Bodenprofils bis zur Tiefe von 120 cm aus.

Für die Sickerperiode 1993/94 (Tab. 39) decken sich die Ergebnisse für die oberste Tiefe (30 cm) beider Ansätze aufgrund fehlender Veränderungen der Bodenwasservorräte im Oberboden (nach Ansatz C). Die klimatische Wasserbilanz weist für die Brache 199,8 und für die Winterrübsen 183,6 mm aus. Damit betragen die Infiltrationsmengen im Vergleich zum Versuchsjahr 1991/92 mehr als das Doppelte. Für die Tiefe von 60 cm ergeben die Berechnungen Unterschiede zwischen den beiden Ansätzen in Höhe von 6,5 (Brache) bzw. 10,3 mm bei der Zwischenfrucht. Diese vergrößern sich mit zunehmender Tiefe bei den Bracheparzellen auf 15,8 (90 cm) und 21,4 mm (120 cm) sowie auf 21,1 (90 cm) bzw. 28,7 mm (120 cm) bei den mit Winterrübsen bedeckten Teilflächen.

Tab. 39: Summen der Sickerung (mm) unter Brache und Zwischenfrucht für den Zeitraum 3.11.93 bis 8.3.94 berechnet nach Ansatz A (vrgl. Kap. 2.3.4) und deren Differenzen zu Ansatz C in vier verschiedenen Bodentiefen (vrgl. Tab. 20)

	Bodenbedeckung		
	Brache	Zwischenfrucht	Differenz Brache/Zwischenfrucht
Sickerung (mm) nach Ansatz A	**199,8**	**183,6**	**16,2**
Sickerung (mm) nach Ansatz C in 30 cm Tiefe	199,8 (n = 24)	183,6 (n = 36)	16,2
Differenz Ansatz A-C (30 cm)	**0,0**	**0,0**	
Sickerung (mm) nach Ansatz C in 60 cm Tiefe	193,3 (n = 24)	173,3 (n = 36)	20,0
Differenz Ansatz A-C (60 cm)	**6,5**	**10,3**	
Sickerung (mm) nach Ansatz C in 90 cm Tiefe	184,0 (n = 24)	162,5 (n = 36)	21,5
Differenz Ansatz A-C (90 cm)	**15,8**	**21,1**	
Sickerung (mm) nach Ansatz C in 120 cm Tiefe	178,4 (n = 24)	154,9 (n = 36)	23,5
Differenz Ansatz A-C (120 cm)	**21,4**	**28,7**	

Ein Vergleich der durchschnittlichen Sickerung unter der Brache und der Zwischenfrucht zeigt für beide Versuchsjahre eine mit der Bodentiefe zunehmende Diskrepanz. Im Winterhalbjahr 1991/92 beträgt der Unterschied zwischen den Brachen und den Zwischenfrüchten in 30 cm Tiefe 9,5 mm und steigt auf 14,1 (60 cm), 21,1 mm (90 cm) bzw. 27,2 mm in der untersten Bodenschicht von 120 cm. Im Winterhalbjahr 1993/94 erhöht sich die Differenz von 16 mm im Oberboden (30 cm) auf bis zu 23,5 mm in der Tiefe von 120 cm. Der Grund hierfür liegt in dem Fehler bei der Abschätzung der Evaporation (Brache) bzw. Evapotranspiration (Zwischenfrucht) nach HAUDE.

3.6.2 Gegenüberstellung von Ansatz B und C

Diese beiden Ansätze unterscheiden sich hinsichtlich der methodischen Vorgehensweise nicht. Sowohl Ansatz B, als auch Ansatz C gehen von der klimatischen Wasserbilanz aus und berücksichtigen darüber hinaus die Veränderungen des Bodenwasservorrats. Die Berechnung dieser erfolgt auf unterschiedliche Weise. Bei Ansatz B werden die Veränderungen anhand der Daten der direkt gemessenen volumetrischen Wassergehalte mittels der TDR-Sonden kalkuliert. Bei Ansatz C werden die erhobenen Daten des Bodenwasserpotentials anhand des bestimmten Zusammenhangs von Bodenwasserpotential und Wassergehalt sowie der Kenntnis über die Horizontabfolge und –mächtigkeit in volumetrische Wassergehalte umgerechnet.

Die Gegenüberstellung der Ergebnisse für zehn Zwischenfruchtparzellen während des Winterhalbjahres 1991/92 zeigt eine gute Übereinstimmung der beiden Ansätze (Tab. 40). Die Tiefe von 30 cm perkolieren nach Ansatz B 79,0 mm bzw. 76,7 mm (Ansatz C). Mit zunehmender Tiefe verringern sich bei beiden Ansätzen die Durchflussmengen auf 63,4 (60 cm), 33,5 (90 cm) und 8,2 mm in 120 cm Tiefe (Ansatz B) bzw. 62,6 (60 cm), 42,2 (90 cm) und 19,3 mm im untersten Bodenhorizont (Ansatz C). Die Unterschiede zwischen beiden Ansätzen sind mit 2,3 (30 cm) und 0,8 mm (60 cm) in den oberen Tiefen gering. Sie vergrößern sich in den beiden unteren Horizonten auf knapp 9 (90 cm) bzw. 11 mm (120 cm). Signifikante Unterschiede zwischen den Ergebnissen der beiden Ansätze bestehen jedoch nicht.

Tab. 40: Summen der Sickerung (mm) unter der Zwischenfrucht (n=10) für den Zeitraum 9.12.91 bis 1.3.92 berechnet nach Ansatz B (vrgl. Kap. 2.3.4) und deren Differenzen zu Ansatz C in vier verschiedenen Bodentiefen

	Ansatz B	Ansatz C	Differenz Ansatz B-C	
Sickerung (mm) in 30 cm	79,0	76,7	2,3	n.s.
Sickerung (mm) in 60 cm	63,4	62,6	0,8	n.s.
Sickerung (mm) in 90 cm	33,5	42,2	-8,7	n.s.
Sickerung (mm) in 120 cm	8,2	19,3	-11,0	n.s.

n.s.: nicht signifikant bei α=0,05, Vorzeichentest

Während des niederschlagsreichen Winterhalbjahres 1993/94 durchfließen nach Ansatz B 161,3 mm die Tiefe von 30 cm, während Ansatz C 183,6 mm ausweist (Tab. 41). Dieser Unterschied von über 20 mm setzt sich auch in den unteren Tiefen mit steigendem Trend fort. In der Tiefe von 120 cm liegt die Summe der Sickerung nach Ansatz B mit 126,2 mm um 30 mm niedriger als das Ergebnis nach Ansatz C (156,6). In allen vier Tiefen werden mit dem Ansatz C signifikant höhere Durchflussmengen und mit Ansatz B signifikant höhere Veränderungen des Bodenwasservorrats berechnet.

Tab. 41: Summen der Sickerung (mm) unter der Zwischenfrucht (n=10) für den Zeitraum 3.11.93 bis 8.3.94 berechnet nach Ansatz B (vrgl. Kap. 2.3.4) und deren Differenzen zu Ansatz C in vier verschiedenen Bodentiefen

	Ansatz B	Ansatz C	Differenz Ansatz B-C
Sickerung (mm) in 30 cm	161,3	183,6	-22,3*
Sickerung (mm) in 60 cm	147,6	171,1	-23,5*
Sickerung (mm) in 90 cm	135,0	161,6	-26,6*
Sickerung (mm) in 120 cm	126,2	156,6	-30,4*

*: signifikant bei α=0,05, Vorzeichentest

3.6.3 Gegenüberstellung von Ansatz D und C

In die Berechnung der Sickerung nach dem Ansatz D gehen ausschließlich Parameter des Bodens ein. Abgeleitet von der Beziehung zwischen Bodenwasserpotential und volumetrischen Wassergehalt ist dies die ungesättigte Wasserleitfähigkeit, in deren Funktion der konstante Wert der gesättigten Leitfähigkeit und die aktuellen Werte des Bodenwasserpotentials eingehen. Diese aktuellen Werte gehen darüber hinaus in die Berechnung des Potentialgradienten ein.

Wie die Ergebnisse zeigten, führen die Berechnungen nur für den IIB_t-Horizont, der die geringste Wasserleitfähigkeit aufweist, zu realistischen Sickerwassermengen. Für die Parzellen, bei denen in 90 cm ein A_l bzw. A_l/IIB_t vorliegt, liegen die Ergebnisse für diese Horizonte um ein bis drei Zehnerpotenzen über den gefallenen Niederschlagssummen (A_l: 2808 mm bei n=6 bzw. A_l/IIB_t: 20056 mm bei n=11 unter der Zwischenfrucht während der Sickerperiode 1991/92).

Die für 19 Zwischenfruchtparzellen berechneten Durchflussmengen in der Tiefe von 90 cm betragen nach Ansatz D für das Winterhalbjahr 1991/92 52,9 mm und 172,6 mm für das Winterhalbjahr 1993/94 (Tab. 42). Die nach Ansatz C kalkulierten Summen der Sickerung liegen bei 41,0 (1991/92) bzw. 163,4 mm (1993/94). Die Einzelwerte weichen beim Ansatz D wesentlich stärker vom Durchschnittswert ab als dies beim Ansatz C der Fall ist. Es muss jedoch darauf hingewiesen werden, dass die Daten zum Bodenwasserpotential für eine exakte Berechnung der Durchflussmengen nach dem Ansatz D sicherlich nicht in der erforderlichen zeitlichen Auflösung erhoben werden konnten. Darüber hinaus führt die kleinräumige Variabilität der Bodeneigenschaften (K_s und ψ_m) zu zusätzlichen Abweichungen.

Tab. 42: Summen der Sickerung (mm) unter der Zwischenfrucht (n=19) für die Zeiträume 9.12.91 bis 1.3.92 und 3.11.93 bis 8.3.94 berechnet nach Ansatz D (vrgl. Kap. 2.3.4) und Ansatz C in der Bodentiefe von 90 cm (IIB_t-Horizont)

	Ansatz D		Ansatz C	
Winterhalbjahr	Sickerung	s	Sickerung	s
1991/92	52,9	65,0	41,0	15,7
1993/94	172,6	190,9	163,4	19,0

s: Standardabweichung

4 Diskussion

4.1 Winterliche Sickerung und N-Dynamik

Das Ausmaß des Nährstoffaustrags mit dem Sickerwasser ist abhängig von der Sickerwassermenge und der Elementkonzentration (SCHEFFER und SCHACHTSCHABEL, 1992), wobei die Stoffverluste aus dem Wurzelraum sowohl standortbedingte als auch nutzungsbedingte und damit beeinflussbare Ursachen haben (STREBEL et al., 1986). Zu den wichtigsten Einflussgrößen zählen beim Klima die Niederschlagsmengen, der Niederschlagsverlauf, sowie die Höhe der Verdunstung. Beim Boden sind die Lage im Gelände, die nutzbare Feldkapazität, die Bodenart, der N-Vorrat und die N-Nachlieferung sowie der Grundwasserflurabstand entscheidend. Beeinflussbare Faktoren auf die N-Verlagerung sind im Wesentlichen die Nutzung in Abhängigkeit von der Pflanzenart, die Häufigkeit und Intensität der Bodenbearbeitung sowie N-Zufuhr durch die Düngung (RENGER & WESSOLEK 1992).

Die Niederschlagsmengen während der fünf Monate von Anfang September bis Ende Februar lagen für die ersten beiden Versuchsjahre mit 214 (1990/91) bzw. 208 mm (1992/93) unter dem langjährigem Durchschnittswert von 236 mm, in den beiden letzten Winterhalbjahren 1992/93 (268 mm) und 1993/94 (287 mm) deutlich darüber. Hinsichtlich des Niederschlagsverlaufs stach vor allem der mit 8,1 mm ungewöhnlich trockene Monat Oktober im ersten Versuchsjahr hervor. Ein Teil der gefallenen Niederschläge gelangte durch Verdunstung wieder in die Atmosphäre. In Abhängigkeit von der Art der Bodenbedeckung betrugen die nach HAUDE kalkulierten Verdunstungsmengen für diesen fünfmonatigen Zeitraum während der ersten drei Versuchsjahre bei den brachliegenden Flächen 79 (1990/91), 104 (1991/92) und 83 mm (1992/93) bzw. 116, 146 und 118 mm bei den mit Winterrübsen bewachsenen Parzellen. Im letzten und niederschlagsreichsten Jahr (1993/94) war die Verdunstung mit 68 mm (Brache) bzw. 100 mm (Zwischenfrucht) am geringsten. Unter Berücksichtigung der Wasseraufnahme des Bodens setzte die abwärtsgerichtete Wasserbewegung im ersten Versuchsjahr (1990/91) aufgrund des niederschlagsarmen Monats Oktober erst in der zweiten Novemberhälfte ein. In den beiden anderen Jahren (1991/92 und 1993/94), für die diese Berechnungen durchgeführt wurden, begann die Sickerperiode bereits Anfang November. In allen drei Winterhalbjahren war ein deutlicher Effekt des Zwischenfruchtanbaus hinsichtlich der Verringerung der Sickerwassermengen erkennbar, der nur zum Teil durch die geringeren Infiltrationsraten zu erklären ist. Der Unterschied bezüglich

des effektiven Niederschlags betrug im ersten Versuchsjahr während der Sickerperiode zwischen der Brache (133 mm) und den bewachsenen Parzellen (121 mm) 12 mm. Die Durchflussmengen in der Bodentiefe von 30 cm differierten dagegen um 24 mm zwischen den Brachen (116 mm) und den Zwischenfrüchten (92 mm). Im zweiten Versuchsjahr vergrößerte sich der Unterschied in Abhängigkeit von der Art der Bodenbedeckung dem entsprechend zwischen den jeweiligen Infiltrationsraten (17 mm) und Perkolationsraten in 30 cm Tiefe (35 mm) um 18 mm bezogen auf die gesamte Sickerperiode. Lediglich im letzten Versuchsjahr entsprachen sich die Unterschiede zwischen effektivem Niederschlag und Durchflussmenge im Oberboden zwischen Brache und Zwischenfrucht bei den Berechnungen, da witterungsbedingt keine Messungen zum Wasserhaushalt in dieser Tiefe durchgeführt werden konnten. In den Versuchsjahren 1991/92 und 1993/94 konnte darüber hinaus festgestellt werden, dass mit zunehmender Tiefe die Sickerung unter der Zwischenfrucht stärker abnahm als bei den Brachen, was auf einen höheren Wasserverbrauch der Zwischenfrüchte während des Zeitraumes vor Beginn der Sickerung zurückzuführen sein dürfte. Die Art der Bodenbearbeitung übte keinen Einfluss auf das Ausmaß der Sickerung aus. Entgegen den Erwartungen konnte bei den Zwischenfrüchten mit zunehmender N-Düngung und der damit verbundenen höheren Biomasseproduktion keine Verringerung der Sickerwassermengen nachgewiesen werden.

Die Verläufe der Nitrat-N-Konzentration in der Bodenlösung während der beiden ersten Versuchsjahre zeigten, dass mit dem Anbau der Winterrübsen gegenüber der Brache die Verfügbarkeit des Nitratanions und damit dessen Auswaschungsgefahr deutlich verringert werden konnte. In beiden Jahren lag der nitratbürtige N-Gehalt im Bodenwasser in 30 cm Tiefe fast während der gesamten Sickerperiode bei den Zwischenfrüchten unterhalb von 10 mg/l und damit unterhalb des Grenzwertes für Nitrat der Trinkwasserverordnung von 50 mg/l. Die zusätzliche Stickstoffdüngung zur Zwischenfrucht führte nur tendenziell zu geringfügig höheren Werten. Dem gegenüber stiegen die Nitrat-N-Konzentrationen bei den Varianten der Brachen im ersten Versuchsjahr bis Beginn der Sickerung stetig an und erreichten ihren Höchstwert von durchschnittlich 100 mg/l in der zweiten Novemberhälfte, bei einem deutlichen Effekt der N-Düngung. Im weiteren Verlauf der Sickerperiode sanken die Konzentrationen auf etwa 20 mg/l zum Ende des Erfassungszeitraumes. Im zweiten Versuchshalbjahr sanken die Konzentrationen im Oberboden unter den Brachen überwiegend bereits ab der ersten Beprobung Ende November. Da während des davor liegenden Zeitraumes ab Ende Oktober unter den Brachen Sickerwassermengen von etwa 40 mm

berechnet wurden, dürfte möglicherweise eine wesentliche Phase der N-Dynamik in dieser Bodenschicht nicht erfasst worden sein. In den darunter liegenden Bodenschichten konnte ein ‚Nitratpeak' in abgeschwächter Form in der ersten Januarhälfte (in 60 cm Tiefe) bzw. Anfang Februar (in 90 cm Tiefe) nachgewiesen werden. Die reduzierte Bodenbearbeitung führte in beiden Jahren und in allen Tiefen bei den Varianten der Brache zu geringeren Nitratkonzentrationen in der Bodenlösung. Dies spricht für eine geringere Mineralisationsrate gegenüber den konventionell bearbeiteten Parzellen. Bei den Zwischenfruchtvarianten übte die Bodenbearbeitung keinen Einfluss auf den N-Gehalt in der Bodenlösung aus. Im ersten Versuchsjahr deuteten jedoch signifikant höhere N-Entzüge bei den gepflügten Varianten auf eine bessere N-Verfügbarkeit hin, was sich aber im zweiten Winterhalbjahr nicht bestätigte.

In den beiden letzten Versuchsjahren waren auch unter der Zwischenfrucht beträchtliche Mengen an Nitrat im Bodenwasser gelöst, wobei die Konzentrationen bei den Varianten mit der höchsten Düngungsintensität unabhängig von der Art der Bodenbearbeitung (Z2) im Bereich der Brachen lagen. Bemerkenswert hoch war das Niveau bereits zu Beginn der Sickerperiode des letzten Versuchsjahres in der untersten Bodenschicht (Abb. 22). In 120 cm Tiefe lagen zu diesem Zeitpunkt die Nitrat-N-Konzentrationen unabhängig von den einzelnen Faktoren mit etwa 60 mg/l sogar über dem Niveau der Brachen zu Beginn des Winterhalbjahres 1991/92 in der entsprechenden Tiefe (Abb. 13). Diese generell hohen Konzentrationen in der untersten Beprobungstiefe zu diesem frühen Zeitpunkt legen die Vermutung nahe, dass die Ursachen hierfür, zeitlich bezogen, vor der Datenerhebung bzw. vor der Versuchsanlage zu suchen sind. Möglicherweise ist das unterschiedliche Niveau der Nitratkonzentrationen während der beiden ersten und der zwei letzten Versuchsjahre auf die Nachwirkungen der vorangegangenen Hauptfrüchte zurück zu führen. Dies waren Wintergerste ohne Strohbergung vor den beiden ersten bzw. Kartoffel vor den beiden letzten Winterhalbjahren. Höhere Restmengen an Stickstoff in den Ernterückständen bei günstigerem C/N-Verhältnis nach Kartoffel (≈40) gegenüber dem Getreide (≈100) (MAIDL und BRUNNER, 1995), bei dem während der Umsetzung des Strohs auch eine vorübergehende biologische N-Immobilisierung durch Mikroorganismen in Betracht kommt, könnten Ursachen für die höheren Nitratkonzentrationen in der Bodenlösung sein. Darüber hinaus wurden vor dem Anbau der Kartoffel erhebliche Mengen an Stallmist auf die Flächen ausgebracht, die sichtbar nur zum Teil während der Standzeit der Kartoffeln mineralisiert und von diesen entzogen wurden, so dass auch höhere Mineralisationsraten nach der Ernte, während der die oberste Bodenschicht zudem stark gelockert wurde, die Unterschiede

hinsichtlich des Niveaus der Nitratkonzentration erklären könnten. Die Höhe der N-Mineralisierung im Oberboden während des Winters (Mitte November bis Mitte März) lag bei Untersuchungen von RÜCK (1993) für Mineralböden in einer Größenordnung von 1 – 69 kg N/ha, bei relativ höherer N-Nachlieferung nach Hackfrüchten.

Die oben angeführten Vermutungen werden bestärkt durch die Ergebnisse der Bodenanalysen zur Versuchsanlage und insbesondere zum Beginn der Sickerperioden. Zur Versuchsanlage lag die Stickstoffverfügbarkeit im Boden bis in 90 cm Tiefe im dritten Versuchsjahr mit insgesamt 134 kg N/ha deutlich über jener, der beiden ersten Jahre von etwa 75 (1990/91) bzw. 104 kg (1991/92). Im letzten Versuchsjahr betrug der durchschnittliche N_{min}-Gehalt für diesen Bodenhorizont 106 kg N/ha, wobei darauf hinzuweisen ist, dass die zu den Kartoffeln ausgebrachte Stallmistmenge vor dem vierten Versuchsjahr mit 250 dt/ha geringer war als vor dem dritten (370 dt/ha) (Tab. A3 und A4). Bis zur Probenahme im Oktober/November sank der mineralische Stickstoffgehalt (in der Schicht von 0-90 cm) im Mittel der Varianten in den beiden ersten Winterhalbjahren auf 65 (1990/91) bzw. 47 kg N/ha (1991/92), während in den beiden letzten Beobachtungszeiträumen die Werte auf 159 (1992/93) bzw. 126 kg (1993/94) anstiegen.

In den beiden ersten Versuchsjahren verringerte der Zwischenfruchtanbau den Gehalt an mineralischem Stickstoff bis zum Beginn der Sickerung insbesondere in den beiden obersten Bodenschichten (1990/91) bzw. bis in 90 cm Tiefe (1991/92) deutlich (Tab. 43). Wie bei den Nitrat-Konzentrationen in der Bodenlösung wirkten sich dabei die, durch die Düngung zusätzlich zugeführten, N-Mengen nur unwesentlich auf den N_{min}-Gehalt bis zu der Tiefe von 90 cm aus. Dieser lag im Mittel dieser Varianten bei etwa 35 im ersten und 32 kg/ha im zweiten Versuchsjahr, wobei die Düngung im ersten Jahr, mit den geringsten Ausgangswerten zur Versuchsanlage, den Nitratgehalt tendenziell sogar verringerte. Dieses Niveau entspricht dem geforderten Grenzwert hinsichtlich des N_{min}-Gehaltes im Boden zum Vegetationsende für die Mark Brandenburg von 35 kg/ha (BERGER et al., 1996). In den beiden letzten Versuchsjahren konnte der Zwischenfruchtanbau nicht verhindern, dass vor dem Einsetzen der Sickerung erhebliche Mengen an Stickstoff in einem Bereich von 100 bis 200 kg/ha im Boden (0 – 90 cm) in wasserlöslicher Form vorlagen. Signifikant höhere Restmengen bei zunehmender Düngungsintensität in der obersten Bodenschicht (0 – 30 cm) und deutlich höhere Werte in den beiden darunter liegenden Schichten im Vergleich zu den beiden ersten Versuchsjahren lassen auf eine höhere N-Nachlieferung des Bodens schließen. Dafür spricht

auch, dass selbst die Zwischenfruchtvarianten, bei denen auf eine zusätzliche Startgabe verzichtet wurde (Z0), den N_{min}-Gehalt in den oberen 90 cm nicht wesentlich verringern konnten. Bei den Varianten der höchsten Düngungsintensität lagen die Werte, entsprechend den Ergebnissen hinsichtlich des Nitratgehaltes in der Bodenlösung, in dem Bereich der gedüngten Brachevarianten.

Tab. 43: N_{min}-Gehalt (kg/ha) zur Versuchsanlage sowie vor Beginn der Sickerperiode (Oktober/November) in drei Bodentiefen unter den Winterrübsen in Abhängigkeit der N-Düngung (C) und der Versuchsjahre (n=12)

Versuchs-jahr	Tiefe in cm	Mittel zur Versuchsanlage	Vor Sickerungsbeginn **Varianten**		
			Z0	**Z1**	**Z2**
1990/91	0-30	**51,8**	**20,9**	**17,2**	**16,7**
	30-60	**15,8**	**9,7**	**8,5**	**9,0**
	60-90	**7,3**	**8,6**	**8,7**	**7,2**
	0-90	**74,9**	**39,2**	**34,4**	**32,9**
1991/92	0-30	**45,7**	**6,3**	**16,1**	**15,4**
	30-60	**26,4**	**8,4**	**10,3**	**12,3**
	60-90	**31,6**	**8,4**	**7,9**	**11,2**
	0-90	**103,7**	**23,1**	**34,3**	**38,9**
1992/93	0-30	**81,4**	**52,8[a]**	**67,7[a]**	**145,0[b]**
	30-60	**34,8**	**36,9**	**38,1**	**44,5**
	60-90	**17,6**	**22,5**	**20,3**	**22,9**
	0-90	**133,8**	**112,2**	**126,1**	**212,4**
1993/94	0-30	**37,6**	**28,9[a]**	**41,0[b]**	**80,5[c]**
	30-60	**32,2**	**34,2**	**32,8**	**38,2**
	60-90	**36,0**	**35,5**	**36,3**	**44,1**
	0-90	**105,8**	**98,6**	**110,1**	**162,8**

F-Test: C=sign. (P=0,05)
a, b, c: Mittelwerte der Faktorstufen (C) mit gleichen Buchstaben unterscheiden sich nicht signifikant (Tukey-HSD mit α=0,05)

Bei den Brachen stieg in drei der vier Versuchsjahre der Gehalt an Nitratstickstoff in der Bodenschicht bis zur Tiefe von 90 cm bis zum Sickerungsbeginn auf über 100 kg/ha an (Tab. 44). Im zweiten Versuchsjahr verringerte sich der mineralische Stickstoffgehalt gegenüber den Ausgangswerten zur Versuchsanlage selbst bei den gedüngten Brachen. Bereits stattgefundene Verlagerungsprozesse in den beiden unteren Bodenschichten, Verluste durch Denitrifikation und Festlegung von Stickstoff bei der Strohzersetzung könnten Ursachen

hierfür sein. Letzteres könnte auch erklären, dass die Unterschiede bezüglich der N_{min}-Gehalte im Bodenprofil bis 90 cm zwischen ungedüngter und gedüngter Brache der beiden ersten Jahre mit 30 (1990/91) bzw. 23 kg (1991/92) geringer sind als bei den zwei abschließenden Versuchsjahren, bei den die zusätzliche Gabe von 50 kg N/ha jeweils zu einem Anstieg der Gehalte um etwa 40 kg führte.

Tab. 44: N_{min}-Gehalt (kg/ha) zur Versuchsanlage sowie vor Beginn der Sickerperiode (Oktober/November) in drei Bodentiefen unter der Brache in Abhängigkeit der N-Düngung (C) und der Versuchsjahre (n=12)

Versuchs-jahr	Tiefe in cm	Mittel zur Versuchsanlage	Vor Sickerungsbeginn **Varianten**	
			B0	**B1**
1990/91	0-30	**51,8**	**51,7***	**66,1***
	30-60	**15,8**	**31,8**	**44,3**
	60-90	**7,3**	**11,1**	**14,2**
	0-90	**74,9**	**94,6**	**124,6**
1991/92	0-30	**45,7**	**39,4***	**62,2***
	30-60	**26,4**	**10,0**	**9,6**
	60-90	**31,6**	**8,8**	**9,4**
	0-90	**103,7**	**58,2***	**81,2***
1992/93	0-30	**81,4**	**71,5***	**88,4***
	30-60	**34,8**	**52,8**	**72,1**
	60-90	**17,6**	**27,1**	**31,5**
	0-90	**133,8**	**151,4***	**192,0***
1993/94	0-30	**37,6**	**42,2***	**73,5***
	30-60	**32,2**	**34,2**	**34,4**
	60-90	**36,0**	**33,7**	**41,1**
	0-90	**105,8**	**110,1***	**149,0***

*Vorzeichentest: Signifikante Unterschiede der Faktorstufen bei α=0,05

Von diesen zum Teil beträchtlichen vorwinterlichen mineralischen Stickstoffmengen fand sich in allen vier Versuchsjahren nur ein geringer Rest zur Probennahme vor dem Umbruch Mitte März wieder. Unabhängig von den einzelnen Versuchsjahren und Varianten variierten die Werte für die beiden unteren Bodenschichten (30 – 90 cm) in einem engen Bereich zwischen 15 und 25 kg N/ha. Dabei wurden bei den Brachen signifikant höhere N_{min}-Mengen für die Schicht von 30 bis 60 cm nach den beiden ersten Versuchsjahren sowie für die Tiefe von 30 bis 90 cm in den beiden letzten Jahren im Vergleich zu den mit Winterrübsen bedeckten Parzellen ausgewiesen. In dem obersten Bodenkompartiment (0 – 30 cm)

schwankte der Gehalt im Mittel der Varianten stärker zwischen 5 und knapp 35 kg N/ha im ersten Versuchsjahr, was witterungsbedingt auf unterschiedliche Mineralisationsbedingungen zurückzuführen sein dürfte. Auch hier konnten für drei der vier Versuchsjahre signifikant höhere N_{min}-Gehalte bei den Brachen gegenüber den Zwischenfrüchten festgestellt werden. Diese Unterschiede lassen sich durch die wieder einsetzende N-Aufnahme der Winterrübsen erklären. Nach Untersuchungen von BERGER et al. (1996) sind Winterrübsen aufgrund ihrer Winterhärte in der Lage, die N-Verluste infolge des Abfrierens einzelner Blätter während des Winters bis zum Umbruch Mitte März wieder auszugleichen und darüber hinaus zusätzliche N-Mengen in Höhe von bis zu 50 % des Vorwinterwertes aufzunehmen. Dies bestätigen auch die Ergebnisse hinsichtlich des N-Entzugs der Winterrübsen im Winterhalbjahr 1991/92, bei dem neben der Probennahme Mitte November (Tab. 14) auch eine vor dem Umbruch (Tab. 15) erfolgte.

Die von den Winterrübsen bis zum Winter aufgenommenen N-Mengen unterschieden sich zwischen den einzelnen Versuchsjahren weit weniger als die N_{min}-Gehalte im Boden zu diesem Zeitpunkt (Tab. 45). Die deutlich höhere N-Verfügbarkeit im letzten Versuchsjahr im Vergleich zu den beiden ersten Jahren führte nicht zu einer höheren N-Aufnahme der Zwischenfrüchte. Sie wirkte sich lediglich steigernd auf den Stickstoffgehalt der Winterrübsen aus. Ein wesentlicher Grund hierfür dürfte der frühe Kälteeinbruch in diesem Winterhalbjahr gewesen sein. Der N-Entzug stieg erwartungsgemäß mit der N-Düngung. Die zusätzliche N-Gabe von 50 kg führte zu einer Erhöhung von 25 bis knapp 31 kg im Vergleich zu den ungedüngten Varianten. Bei der höchsten Düngungsintensität (100 kg N) fanden sich

Tab. 45: Vorwinterlicher N-Entzug der Winterrübsen in Abhängigkeit der N-Düngung (C) und der Versuchsjahre (n=12)

Versuchsjahr	**Varianten**		
	Z0	**Z1**	**Z2**
1990/91	**55,0[a]**	**81,8[b]**	**122,6[c]**
1991/92	**35,4***	**60,4***	**101,0***
1993/94	**31,9[a]**	**62,5[b]**	**92,7[c]**

F-Test: C=sign. (P=0,05); a, b, c: Mittelwerte der Faktorstufen (C) mit gleichen Buchstaben unterscheiden sich nicht signifikant (Tukey-HSD mit α=0,05)
*Vorzeichentest: Signifikante Unterschiede zwischen den einzelnen Faktorstufen bei α=0,05

rechnerisch durchschnittlich etwa 65 kg im Aufwuchs der Rübsen wieder. MERBACH und WURBS (1997) untersuchten die N-Konservierung von Winterrübsen anhand von ^{15}N-markiertem Dünger. Bei einer N-Gabe von 50 kg/ha und einer oberirdischen Gesamt-N-Menge von 65 kg im Spätherbst (November), die gut mit den vergleichbaren Varianten Z1 übereinstimmt, betrug dabei der düngerbürtige Anteil 33 % (16,5 kg). Darüber hinaus dürften noch größere N-Mengen in den Wurzeln gebunden sein. Dies geht aus einem Vergleich verschiedener Zwischenfrüchte hervor, bei dem es sich zeigte, dass die Winterrübsen bis zum Eintritt des Winters einerseits die geringsten Stickstoffmengen im Aufwuchs enthielten, aber andererseits die geringsten Nitratmengen im Boden hinterließen (BERENDONK, 1984). Nachfolgende Untersuchungen wiesen für die Winterrübsen, bei einer zusätzlichen N-Gabe von 50 kg/ha, Stickstoffmengen in Höhe von etwa 77 kg im Aufwuchs und 29 kg in der Wurzelmasse bezogen auf einen Hektar aus (BERENDONK, 1987).

Analog zu den Ergebnissen hinsichtlich der Nitrat-N-Konzentrationen in der Bodenlösung und den vorwinterlichen N_{min}-Gehalten im Boden spiegeln die berechneten N-Austräge die Unterschiede zwischen den beiden ersten und den beiden letzten Versuchsjahren wider. Da sich die Berechnungen im ersten Versuchsjahr 1990/91 auf den obersten Bodenabschnitt beschränkten, ist ein Vergleich zwischen den drei Jahren, für die diese Kalkulation durchgeführt wurde, nur für die Brachevarianten möglich, da angenommen werden kann, dass die Winterrübsen einen Teil des gelösten Nitrates über die Wurzeln aufgenommen haben. Unabhängig von der Art der Bodenbearbeitung und der N-Düngung lagen die N-Verluste infolge der Auswaschung in den beiden ersten Winterhalbjahren mit durchschnittlich 62 (1990/91) bzw. 26 kg N/ha (1991/92) deutlich unterhalb des Austrages im letzten Versuchsjahr von 115 kg (Tab. 46). Dabei ist jedoch nochmals darauf hinzuweisen, dass im zweiten Versuchsjahr (1991/92) erst Ende November mit der Entnahme von Bodenwasser begonnen werden konnte und bei den Berechnungen zum N-Austrag der davor liegende Zeitraum ab Anfang November, bei dem Sickerungsraten von etwa 40 mm auftraten, nicht berücksichtigt werden konnte. Dies führt tendenziell zu einer Unterschätzung der tatsächlichen Nitratauswaschung in diesem Winterhalbjahr. Erwartungsgemäß waren die N-Verluste infolge der Auswaschung bei den gedüngten höher als bei den ungedüngten Varianten. Unabhängig von der Art der Bodenbearbeitung stieg der N-Austrag bei zusätzlicher Düngung durchschnittlich um etwa 18 (1990/91) bzw. 8 kg/ha (1991/92) und im letzten Versuchsjahr um 40 kg/ha. Der schwächer ausgeprägte Effekt der Düngung auf die

Tab. 46: Winterlicher N-Austrag (kg/ha) unter der Brache aus 30 cm Tiefe in Abhängigkeit von der Bodenbearbeitung (A) und N-Düngung (C) für drei Versuchsjahre (berechnet nach Ansatz C vrgl. Kap. 2.3.4) (n=6)

Versuchsjahr	Variante			
	PB0	**PB1**	**FB0**	**FB1**
1990/91	**60,9**	**82,0**	**45,0**	**60,5**
	Vorzeichentest: A=sign., C=sign.			
1991/92	**32,8**	**38,1**	**11,4**	**21,4**
	Vorzeichentest: A=sign., C=n.s.			
1993/94	**88,6**	**134,3**	**97,3**	**131,7**
	Vorzeichentest: A=n.s., C=sign.			
	Vorzeichentest: Signifikante Unterschiede zwischen den einzelnen Faktorstufen bei α=0,05			

Nitratauswaschung in den beiden ersten Versuchsjahren spricht für die Vermutung der biologischen N-Immobilisierung bei der Strohzersetzung. Demgegenüber ergaben sich Unterschiede zwischen den Stufen der Bodenbearbeitung im Wesentlichen nur während der beiden ersten Versuchsjahre. Statistisch abgesichert verringerte die reduzierte Bodenbearbeitung im Vergleich zur konventionellen den N-Austrag im Oberboden in beiden Jahren um knapp 20 kg/ha.

Durch den Anbau der Winterrübsen ließ sich der N-Austrag unabhängig von der Vorfrucht gegenüber der Brache signifikant verringern (Tab. 47). Wie bei den oben beschriebenen Parametern zeigten sich jedoch auch hier deutliche Unterschiede zwischen den einzelnen Versuchsjahren. Im Versuchsjahr 1991/92, in dem die Versuchsanlage nach Wintergerste

Tab. 47: Winterlicher N-Austrag (kg/ha) aus 90 cm Tiefe in Abhängigkeit von der Bodenbearbeitung (A), Bodenbedeckung (B) und N-Düngung (C) für zwei Versuchsjahre (berechnet nach Ansatz C vrgl. Kap. 2.3.4) (n=6)

Versuchsjahr	Variante									
	PB0	**PB1**	**PZ0**	**PZ1**	**PZ2**	**FB0**	**FB1**	**FZ0**	**FZ1**	**FZ2**
1991/92	**31,0**	**39,4**	**5,3**	**2,2**	**2,7**	**17,5**	**43,2**	**1,4**	**7,0**	**3,2**
ABC	Varianzinhomogen; Vorzeichentest: A=n.s., B=sign., C: Signifikante Stufen B0-B1									
AC	F-Test: A=n.s., C=n.s. (P=0,05)									
1993/94	**99,1**	**138,8**	**49,5[a]**	**50,2[ab]**	**78,4[b]**	**100,6**	**121,6**	**40,7[a]**	**52,7[ab]**	**89,8[b]**
ABC	F-Test: A=n.s., B=sign., C=sign. (P=0,05)									
AC	F-Test: A=n.s., C=sign. (P=0,05)									
	Vorzeichentest für Faktoren oder Stufen bei α=0,05									
	a, b, c: Mittelwerte der Faktorstufen (C) mit gleichen Buchstaben unterscheiden sich nicht signifikant (Tukey-HSD mit α=0,05)									

ohne Strohbergung erfolgte, betrug der N-Austrag aus 90 cm Tiefe im Durchschnitt der Zwischenfruchtvarianten etwa 4 kg/ha, wobei die Höhe der Stickstoffdüngung keinen Einfluss auf die Verluste ausübte. Im letzten Versuchsjahr (1993/94) konnte der Zwischenfruchtanbau eine Nitratverlagerung in nennenswertem Umfang nicht verhindern. Die kalkulierten Verluste lagen in einem Bereich von etwa 45 kg bei den ungedüngten Varianten (Z0) und 84 kg bei jenen, der höchsten Düngungsintensität (Z2). Der wesentliche Grund für diesen Unterschied zwischen den beiden Versuchsjahren dürfte die bereits erwähnte deutlich höhere N-Verfügbarkeit im letzten Versuchsjahr sein (Tab. 43). Darüber hinaus waren im letzten Versuchsjahr die Wachstumsbedingungen aufgrund von niedrigeren Temperaturen und Frost im November schlechter, was sich auch an den geringeren vorwinterlichen N-Entzügen der Winterrübsen zeigte (Tab. 45). Hinzu kamen deutlich höhere Niederschlagsmengen, die die Sickerungsraten um mehr als das Dreifache erhöhten und die Verlagerung begünstigten.

Ein abschließender Vergleich zwischen den berechneten N-Austrägen und den mineralischen Bodenvorrat zu Beginn der Sickerperiode sowie der Differenz aus vor- und nachwinterlichem Boden N_{min} zeigt deutlich, dass mit diesen beiden Bodenparametern alleine keinerlei Aussagen hinsichtlich der Nitratauswaschung gemacht werden können (Tab. 48). Im Winterhalbjahr 1991/92 lagen die vorwinterlichen N_{min}-Werte bei allen Varianten und für alle Tiefenabschnitte generell über den berechneten Austrägen und bestätigt gleichlautende Ergebnisse (GÖLZ-HUWE et al., 1989). Die Höhe der Überschätzung der N-Verluste infolge der Auswaschung anhand der N_{min}-Werte schwankt in Abhängigkeit der Bodentiefe bei den Brachevarianten im Durchschnitt zwischen 25 und 36 kg/ha. Bei den Zwischenfruchtvarianten ist der Vergleich zwischen diesen beiden Größen, aufgrund von einem anzunehmenden N-Entzug durch die Wurzeln, nur für die unterste Bodentiefe sinnvoll. Hier lagen die N_{min}-Werte etwa 30 kg/ha über den berechneten Austrägen. Die Differenzen aus vor- und nachwinterlichem Boden N_{min} lagen i.d.R. zwischen diesen beiden Größen.

Im letzten Versuchshalbjahr variierten die Unterschiede stärker in Abhängigkeit von der Bodenbedeckung und der Betrachtungsgrenze. Bei den Brachen unterschätzten die N_{min}-Werte für die beiden oberen Bodenschichten die N-Verlagerung um 55 (0-30 cm) bzw. 12 kg/ha (0-60 cm). Für die Tiefe von 90 cm wurden im Mittel dieser Varianten N-Verluste in Höhe von 115 kg/ha berechnet, die mit etwa 14 kg unter dem vorwinterlichen mineralischen N-Vorrat im Boden lagen. Die Bildung der Differenzen aus vor- und nachwinterlichen N_{min} führte in allen drei Fällen zu einer Verschlechterung der Abschätzung der Nitratauswaschung.

Tab. 48: Gegenüberstellung von vorwinterlichem Boden-N_{min} (N_{min}), der Differenz aus vor- und nachwinterlichem Boden-N_{min} (N_{min}-Diff.) und des berechnetem N-Austrag (nach Ansatz C) für drei Bodentiefen und zwei Versuchsjahre im Mittel der einzelnen Varianten in kg/ha (n=6)

			Variante									
Versuchsjahr	Tiefe	Größe	**PB0**	**PB1**	**PZ0**	**PZ1**	**PZ2**	**FB0**	**FB1**	**FZ0**	**FZ1**	**FZ2**
1991/92	0-30	N_{min}	**40,2**	**56,5**	**4,5**	**5,7**	**10,7**	**38,5**	**67,9**	**8,1**	**26,5**	**20,0**
		N_{min}-Diff.	**32,6**	**50,0**	**0,8**	**1,1**	**6,9**	**33,0**	**61,9**	**4,6**	**21,8**	**16,0**
		N-Austrag	**32,8**	**38,1**	**3,1**	**2,6**	**4,3**	**11,4**	**21,4**	**0,6**	**1,8**	**5,0**
	0-60	N_{min}	**48,7**	**65,9**	**13,2**	**16,5**	**25,4**	**50,0**	**75,4**	**16,1**	**36,3**	**29,8**
		N_{min}-Diff.	**34,1**	**51,2**	**6,7**	**8,6**	**18,4**	**36,2**	**61,2**	**9,5**	**28,4**	**22,3**
		N-Austrag	**20,4**	**46,2**	**4,6**	**4,8**	**3,1**	**22,6**	**37,4**	**1,3**	**2,1**	**7,3**
	0-90	N_{min}	**57,5**	**75,3**	**22,5**	**24,2**	**37,9**	**58,8**	**84,7**	**23,5**	**44,3**	**39,7**
		N_{min}-Diff.	**32,4**	**44,9**	**6,7**	**10,1**	**21,2**	**35,6**	**53,0**	**11,3**	**30,3**	**22,6**
		N-Austrag	**31,0**	**39,4**	**5,3**	**2,2**	**2,7**	**17,5**	**43,2**	**1,4**	**7,0**	**3,2**
1993/94	0-30	N_{min}	**39,6**	**76,2**	**21,6**	**40,6**	**72,8**	**44,7**	**70,8**	**36,1**	**41,4**	**88,1**
		N_{min}-Diff.	**34,8**	**70,9**	**17,2**	**36,7**	**66,9**	**39,3**	**64,2**	**32,6**	**36,9**	**83,6**
		N-Austrag	**88,6**	**134,3**	**22,0**	**26,8**	**97,4**	**97,3**	**131,7**	**36,4**	**30,3**	**85,7**
	0-60	N_{min}	**76,4**	**112,5**	**52,5**	**73,6**	**112,0**	**76,2**	**103,2**	**73,5**	**74,0**	**125,3**
		N_{min}-Diff.	**62,3**	**99,5**	**45,2**	**65,9**	**99,7**	**60,4**	**87,5**	**64,7**	**65,0**	**116,3**
		N-Austrag	**87,1**	**125,0**	**61,9**	**45,7**	**78,5**	**101,8**	**103,3**	**61,3**	**43,7**	**91,1**
	0-90	N_{min}	**109,4**	**151,5**	**88,6**	**106,7**	**147,4**	**110,5**	**146,4**	**108,3**	**113,5**	**178,1**
		N_{min}-Diff.	**83,4**	**129,6**	**77,9**	**95,6**	**130,3**	**82,4**	**121,5**	**95,4**	**99,3**	**163,6**
		N-Austrag	**99,1**	**138,8**	**49,5**	**50,2**	**78,4**	**100,6**	**121,6**	**40,7**	**52,7**	**89,8**

Bei den Zwischenfruchtparzellen wurden die Nitratfrachten in 90 cm Tiefe anhand der N_{min}-Werte um durchschnittlich 64 kg/ha überschätzt.

Bemerkenswert sind die unterschiedlichen Relationen von N_{min}-Wert und berechneter Nitratauswaschung in der obersten Bodenschicht der Brachen. Eine Erklärung hierfür könnte die bereits oben angeführte Vermutung sein, dass das nach der Ernte der Vorfrucht Wintergerste auf dem Feld verbliebene Stroh im Versuchsjahr 1991/92 einen Teil des mineralischen Stickstoffs vorübergehend durch Immobilisierung der Auswaschung entzog. Im Winterhalbjahr 1993/94 könnten die leichter mineralisierbaren Ernterückstände der Vorfrucht Kartoffel und Reste der organischen Düngung zu einer Nettomineralisation während der Auswaschungsperiode beigetragen haben. Eine N-Nachlieferung führt darüber hinaus auch dazu, dass sich das Ergebnis aus der Differenz aus vor- und nachwinterlichen N_{min} im Hinblick auf die Beurteilung der Nitratauswaschung verschlechtern muss. GÖLZ-HUWE et al. (1989) und TEIWES et al. (1996) sehen in den chemischen Umsetzungen (Immobilisierung, Mineralisation und Denitrifikation) die wesentlichen Ursachen für die Diskrepanz von N_{min}-Wert im Herbst und dem Nitrataustrag über Winter. Außerdem wird vermutet, dass der Einfluss des N_{min}-Wertes auf die Nitratauswaschung vom Sickerwassereinfluss überlagert wird (TEIWES et al., 1996). Trotz deutlicher Abweichung konnten GÖLZ-HUWE et al. (1989) eine Korrelation zwischen diesen beiden Größen feststellen, die anhand eigener Daten nur z.T. bestätigt werden kann (Tab. A5). Zu ähnlichen Ergebnissen gelangten TEIWES et al. (1996), die nur teilweise einen Bezug zwischen beiden Größen nachweisen konnten.

4.2 Methodische Vorgehensweise

Die Gewinnung von Bodenlösung mit Hilfe von Saugkerzen ist nicht unproblematisch. Grund hierfür ist die dreidimensionalen Struktur des Mineralbodens von Bodenfestphase, der Bodenluft und dem Bodenwasser, die in Raum und Zeit variabel ist SCHMIDT[a] (1992). BRAMM (1978) stellte eine wesentlich größere Streuung der **Nitratkonzentration in der Bodenlösung** (100-300 %) gegenüber der in Bodenproben (20-74 %) fest. Dies bestätigen auch die eigenen Daten, wobei die maximale Streuung innerhalb einzelner Varianten mit etwa 200 % im abgesaugten Perkolat etwas geringer ist. Eine Tendenz abnehmender Streuung mit der Tiefe konnte nicht festgestellt werden. Dagegen scheint die Art der Bodenbedeckung die Höhe der Variationskoeffizienten entscheidend zu beeinflussen. Mit maximal 100 % beträgt die Streuung bei den Varianten der Brachen nur die Hälfte dessen, der mit Winterrübsen bedeckten Parzellen. Es ist anzunehmen, dass der N-Entzug der Wurzeln eine zusätzliche Streuung hinsichtlich der NO_3-Konzentration im Bodenwasser hervorruft. Diese unterschiedliche Streuung in Abhängigkeit der Bodenbedeckung könnte auch die Probleme bei der statistischen Auswertung erklären, bei der oftmals aufgrund fehlender Varianzhomogenität keine Varianzanalyse durchgeführt werden konnte. Bei den N_{min}-Werten liegen die ermittelten Variationskoeffizienten in dem von BRAMM (1978) angegebenen Bereich, wobei kein Trend bezüglich der Bodenbedeckung erkennbar ist.

Die Gründe für die hohe Variabilität der Nitratkonzentration in der mit Saugkerzen gewonnenen Bodenlösung scheinen vielfältig zu sein. SCHMIDT[b] (1992) führt sie zum Teil auf heterogene Fließwege im Mikrobereich der Saugkerze zurück, die durch strukturelle Schäden beim Einbau und Betrieb entstehen und rechnet mit systematischen Fehlern, die sich auch durch erhöhte Anzahlen von Saugkerzen nicht kompensiert lassen. Dies bestätigen auch Untersuchungen unter Feldbedingungen von BÖTCHER et al. (1991) anhand einer großen Anzahl von Saugkerzen (n=51) bei geringem Sondenabstand (20 cm) in 120 cm Tiefe. Die geostatistische Analyse zeigte zwar zu Beginn der NO_3-Verlagerung eine deutliche räumliche Korrelation über einem Bereich von etwa 1,2 m. Im Bereich maximaler NO_3-Konzentrationen löste sich die räumliche Struktur dann jedoch völlig auf.

Ein weiterer Aspekt besteht darin, dass wie aus Untersuchungen von GÖTTLEIN (1995) hervorgeht, konventionelle Saugkerzen bevorzugt die Hauptfließregion der Bodensäule beproben. Dies bedeutet, dass Saugkerzen in geringerer Tiefe Lösungen auffangen, die im Wesentlichen von der Chemie der Niederschläge bestimmt werden. Das Verhältnis von

„Niederschlagswasser“ zu „Bodenmatrixwasser“ in der Saugkerzen-Lösung ist im Einzelfall unbekannt und variiert zudem ständig. Erst in größeren Tiefen stellen sich homogenere, von der Bodenmatrix bestimmte Konzentrationen in der Bodenlösung ein. Wie LISCHEID (1992) nachweisen konnte, verringerte sich die Streuung der Saugkerzenlösungen nach Verlegung der Beprobungstiefe von 80 cm in 300 cm Tiefe. Eine Verlegung der Beprobung in größere Tiefen führt jedoch zu einer zeitlichen Verzögerung der Erfassung der Nährstoffkonzentration in den Saugkerzenlösungen. Bei Untersuchungen von BRAMM (1978) konnte auf einem schwach lehmigen Sandboden das mit der Mineraldüngung zugeführte Nitrat erst 9 Monate später in der Bodenlösung in 2 m Tiefe nachgewiesen werden. Dies bedeutet, dass bei der praktischen Versuchsdurchführung nicht auf die Beprobung darüber liegender Tiefen verzichtet werden kann.

Neben dem Aspekt der räumlichen Variabilität der Nitratkonzentration im Bodenwasser verweisen STREBEL et al. (1973) auf die besondere Bedeutung der zeitlichen Dichte der Messungen zur Wasserfluss- und Konzentrationsbestimmung. Diese sollte sich an den zu erwartenden zeitlichen Schwankungen der Messgrößen in den Messtiefen orientieren. Was die Eingangsparameter zur Bestimmung der Wasserflüsse nach Ansatz A, B und C dürfte dem durch einen entsprechend hohen Aufwand Rechnung getragen worden sein. Bei der Kalkulation der Wasserflüsse nach Ansatz D sind die Ergebnisse bei gegebenen horizontspezifischen gesättigten Wasserleitfähigkeiten ausschließlich von den Werten der Bodenwasserpotentiale abhängig. Insbesondere im Bereich nahe Wassersättigung führen bereits kleine Veränderungen der Messwerte zu erheblichen Unterschieden bezüglich der berechneten Wasserflüsse. Aus diesem Grund stellt dieser Ansatz im Vergleich zu Ansatz C höhere Anforderungen an die zeitliche Auflösung der Messungen, die mit den eingesetzten Tensiometern nur bedingt erfüllt werden konnten. Hinsichtlich der Konzentrations–bestimmung mussten augrund der großen Anzahl von Saugkerzen (480) und des Arbeitsaufwandes bei der Gewinnung und Analyse der Bodenlösung Einschränkungen hingenommen werden. Wie die Ergebnisse zeigen, ist die Dynamik der Nitratkonzentration im Oberboden stärker ausgeprägt als in den unteren Bodenschichten, bei denen die zeitliche Messdichte wohl ausreichend gewesen sein dürfte. Wie bereits hingewiesen sind dies die für die N-Verlagerung entscheidenden Horizonte, da für die oberen Tiefen aufgrund von N-Entzug durch die Wurzeln für die mit Zwischenfrucht bewachsenen Parzellen keine zutreffenden Aussagen hinsichtlich der Nitratauswaschung gemacht werden können.

Bei der Berechnung der N-Verlagerung wurde vereinfachend davon ausgegangen, dass der Stofftransport im Wesentlichen durch Massenfluss erfolgt und mit dem Produkt aus Wasserfluss und Konzentration genügend genau bestimmt wird. Dies trifft nach Berechnungen der Chloridbilanz von STREBEL und RENGER (1976) unterhalb des Wurzelraumes weitgehend zu.

Die Bestimmung der Wasserflussmengen während der Winterhalbjahre erfolgte nach vier unterschiedlichen Ansätzen. Beim **Ansatz A** wird zur Abschätzung der Sickerung die klimatische Wasserbilanz nach HAUDE herangezogen. Der Vorteil dieser empirischen Methode der Verdunstungsermittlung liegt in der recht einfachen Bestimmung weniger Klimawerte, die zur Berechnung notwendig sind. Daneben existieren weitere Methoden, die ausführlich bei SPONAGEL (1980) und beim DVWK-FACHAUSSCHUSS „VERDUNSTUNG“ (1990) gegenübergestellt sind. Da es sich hierbei um die potentielle Verdunstung handelt, liegt sie erwartungsgemäß über der tatsächlichen, wie RENGER et al. (1975) in einem Verfahrensvergleich zur Bestimmung der Wasserhaushaltskomponenten von Böden zeigten, bei dem mit der Näherungsformel nach HAUDE die Evapotranspiration eines Zuckerrübenbestandes von Anfang Mai bis Mitte September um etwa 40 mm überschätzt wurde. Im verdunstungsärmeren Winterhalbjahr dürfte der Fehler jedoch relativ gering sein (ZEPP & ZAKOSEK, 1985). Im Versuchsjahr 1991/92 werden für den Zeitraum der Sickerung vom 9.12 bis 1.3. lediglich 17 mm (Brache) bzw. 28 mm (Zwischenfrucht) an potentieller Verdunstung ausgewiesen. Entscheidender ist die Wassermenge, die vom Boden während dieser Phase noch aufgenommen werden kann, wie der Vergleich mit dem Ansatz C (Tab. 37 und 38) zeigt. Dies gilt insbesondere dann, wenn eine Abschätzung der Wasserflüsse anhand der klimatischen Wasserbilanz für tiefere Bodenhorizonte erfolgen sollte. Für die oberste Bodenschicht hingegen ist es möglich, die Sickerung mit Hilfe der klimatischen Wasserbilanz annähernd zu erfassen, da der Bilanzüberschuss deutlich höher ist als die Wasseraufnahmefähigkeit dieser Schicht.

Um zu einer Einschätzung zu gelangen, welchen Einfluss die unterschiedlichen Sickerwassermengen auf die letztlich entscheidende Zielgröße „N-Austrag“ ausüben, ist es notwendig, diese mit den Nitratkonzentrationen in der Bodenlösung zu verrechnen. Exemplarisch wurden diese Berechnungen für das Winterhalbjahr 1991/92 durchgeführt, da hier die Differenzen der Sickerwassermengen in den vier Erfassungstiefen zwischen den Ansätzen A und C deutlicher ausgeprägt waren als im Versuchsjahr 1993/94. Bei den

Varianten der Zwischenfrucht wurden unabhängig von der Art der Bodenbearbeitung und der Höhe der N-Düngung, beide Faktoren wirkten sich nicht signifikant auf das Ausmaß der N-Verlagerung aus (Tab. 11), nach Ansatz C durchschnittliche N-Verluste in Höhe von 3 bis 4 kg/ha bezogen auf alle vier Bodentiefen berechnet. Die Abweichungen bei Verwendung der höheren Sickerwassermengen nach Ansatz A betrugen für die oberen drei Bodenschichten weniger als 1 kg. Lediglich für den untersten Berechnungshorizont führten die nach Ansatz A geschätzten Wassermengen, die mit 85 mm deutlich über den nach Ansatz C geschätzten (23 mm) lagen, zu einer nennenswerten Überschätzung des N-Austrages von durchschnittlich 5 kg/ha.

Bei den Brachen wirkten sich die unterschiedlichen Wasserflussmengen beider Ansätze absolut stärker auf die berechneten N-Austräge aus (Tab. 49). Die N-Verlagerung in 30 cm Tiefe wird mit der klimatischen Wasserbilanz unabhängig von der Art der Bodenbearbeitung bei den ungedüngten Varianten um knapp 10 kg bzw. um 5,5 kg bei den gedüngten Brachen überschätzt. Die größten Unterschiede finden sich bei den gedüngten Varianten für die Tiefen von 60 cm (33,5 kg) und 90 cm (28,6 kg) sowie bei den ungedüngten Varianten für den untersten Bodenhorizont (120 cm) mit einer Differenz zwischen beiden Ansätzen von 24,1 kg.

Tab. 49: Einfluss der unterschiedlichen Sickerwassermengen nach Ansatz A und Ansatz C auf die N-Austräge (kg/ha) aus vier Bodentiefen unter der Brache in Abhängigkeit von der Düngungsintensität für den Zeitraum 9.12.91 bis 1.3.92 (n=12)

N-Austrag (kg/ha) aus der Tiefe von	**Varianten**			
	B0		**B1**	
	Ansatz A	Ansatz C	Ansatz A	Ansatz C
30 cm	**31,7**	**22,1**	**35,3**	**29,8**
60 cm	**40,9**	**21,5**	**75,3**	**41,8**
90 cm	**44,1**	**24,3**	**69,9**	**41,3**
120 cm	**41,5**	**17,4**	**43,4**	**33,2**

Es lässt sich festhalten, dass trotz größerer Unterschiede bezüglich der Sickerwassermengen zwischen beiden Ansätzen bei den Zwischenfruchtvarianten gegenüber den Brachen die absoluten Abweichungen bei den Zwischenfruchtvarianten hinsichtlich der N-Verlagerung deutlich geringer sind und der Fehler vernachlässigbar erscheint. Zurückzuführen ist dies auf die geringen Nitratkonzentrationen in der Bodenlösung bei den Zwischenfrüchten, die sich im gesamten Verlauf während der Auswaschungsperiode z.T. deutlich unterhalb von 50 mg/l

bewegten. Unter diesen Voraussetzungen dürfte ein Verzicht auf die umfangreichen Messungen zur Ermittlung der Veränderungen des Bodenwasservorrats gerechtfertigt sein, um die N-Verlagerung anhand der klimatischen Wasserbilanz näherungsweise zu bestimmen.

Bei den Berechnungen der Sickerwassermengen nach **Ansatz B** finden die Veränderungen der Bodenwasservorräte Berücksichtigung. Der Vorteil dieser Methode liegt in der direkten und kontinuierlichen Messung der für die Berechnung der Wasserflüsse relevanten volumenbezogenen Wassergehalte, was durch den Einsatz der TDR-Messtechnik ermöglicht wurde. Die Genauigkeit der Messwerte wird dabei von verschiedenen Faktoren beeinflusst.

Als eine mögliche Fehlerquelle kommen Störungen beim Einbau der Sonden in Betracht. Insbesondere bei gröberen Sanden besteht nach WEGEHENKEL (1998) die Gefahr, dass im feuchten Zustand zu hohe Wassergehalte gemessen werden können, je gleichkörniger die Bodenmatrix ausgebildet ist, was auf eine Vergrößerung des Porenvolumens im Bereich der Sondenstäbe beim Einbau zurückzuführen ist. Bei Austrocknung wirken sich derartige Störungen mindernd auf die gemessenen Werte aus. Darüber hinaus nehmen die gemessenen Dielektrizitätskonstanten und die daraus abgeleiteten volumetrischen Wassergehalte mit zunehmender Temperatur ab und müssen dementsprechend korrigiert werden (WEGEHENKEL, 1998).

Das Prinzip der TDR-Messtechnik besteht in der Bestimmung der Verweilzeit eines elektromagnetischen Impulses. Aus dieser kann auf die dielektrische Konstante des Mediums geschlossen werden. Da Wasser eine deutlich höhere Dielektrizitätszahl als beispielsweise mineralische Bodensubstrate aufweist, kann anhand der Messung der volumetrische Wassergehalt abgeleitet werden. Dies geschieht mit Hilfe einer Eichfunktion, die die Beziehung zwischen der Dielektrizitätskonstanten und dem volumetrischen Wassergehalt beschreibt (PLAGGE et al., 1997). Die besondere Bedeutung dieser Eichbeziehung begründet sich darin, dass sie zwischen unterschiedlichen Böden stark variieren kann, da keine monokausale eindeutige Beziehung zwischen der Dielektrizitätskonstanten und dem Wassergehalt existiert (ROTH et al., 1992). Nach PLAGGE et al. (1997) können beim Einsatz der am meist verwendeten Eichfunktion von TOPP et al. (1980) die Fehler in Abhängigkeit des jeweiligen Bodens erheblich sein. Ein Vergleich verschiedener Eichfunktionen zeigte, dass diese empirische Eichfunktion mit 0,047 cm^3*cm^3 den größten absoluten Fehler aufweist, und daher am wenigsten dazu geeignet ist, Wassergehalte vorherzusagen (PLAGGE

et al., 1997). Untersuchungen von ROTH et al. (1992) führten zu zwei unterschiedlichen Eichfunktionen, deren Gültigkeit sich einerseits auf organische Böden sowie auf mineralische Böden andererseits bezieht. Es wird aber eingeräumt, dass bei hohen Anforderungen an die Messgenauigkeit mit einem Fehler von 0,01 cm^3*cm^3 individuelle Eichungen notwendig sein können. Individuelle Eichfunktionen werden von PLAGGE et al. (1997) kritisch beurteilt, da hierzu zusätzliche Eingangsparameter erhoben werden müssen, die ihrerseits insbesondere in kleinräumig stark heterogenen Böden erheblich variieren, was zur Folge hätte, dass diese an jeder Messstelle ermittelt werden müssten. Dies wäre jedoch erst nach Beendigung der Messungen möglich, da eine unmittelbare Probenahme zur Ermittlung der Eingangsgrößen die Messstelle zerstört. Individuelle Eichfunktionen wären dann kaum noch zu realisieren. Als eine wesentliche Bodeneigenschaft zur Verbesserung der Eichfunktionen gilt die Lagerungsdichte (HALM et al., 1997 und WEGEHENKEL, 1998). MALICKI et al. (1994) (zitiert in: PLAGGE et al. (1997)) erhalten unter Einbeziehung der Lagerungsdichte in die Eichfunktion eine Matrix-sensitive Eichfunktion, deren Messwerte im Vergleich mit thermogravimetrisch bestimmten Wassergehalten sehr hohe Übereinstimmung zeigten PLAGGE et al. (1997). Da nach Ergebnissen von PLAGGE et al. (1997) die Lagerungs–dichten eines Bodens nur wenig variieren und sich diese Streuung nur in einer geringfügigen Zunahme des Fehlers bei dieser Eichfunktion auswirkt, könnte bereits die Verwendung einer mittleren Lagerungsdichte eines untersuchten Bodens in der Eichfunktion ein entscheidender Schritt zur Verbesserung der Vorhersagegenauigkeit des Wassergehaltes darstellen. Die bedeutende Rolle der Eichfunktion zeigt sich auch daran, dass sie auch das Ergebnis der Sickerung mit Hilfe der Wasserbilanzierung bei der nur die Differenzen der Wassergehalte berücksichtigt werden beeinflusst, wie aus Untersuchungen von KOFALK (1997) hervorgeht, bei der zwei verschiedene Funktionen zur Anwendung kamen.

Zur Überprüfung der Reproduzierbarkeit der Berechnungen der Wasserflüsse mit Hilfe der volumetrischen Wassergehaltsmessungen wurden auf einer Bracheparzelle drei Messstationen mit einer Entfernung der entsprechenden Messpunkte von etwa 50 cm mit jeweils 7 TDR-Sonden in den Tiefen von 20 bis 120 cm installiert. Die Berechnungen hinsichtlich des Sickerungsverlaufes in den vier Bodenhorizonten (30, 60, 90 und 120 cm Tiefe) ergaben ein hohes Maß an Übereinstimmung der drei Messparallelen. Bemerkenswert ist dies vor allem hinsichtlich der untersten Betrachtungsebene aufgrund der großen Anzahl an einzelnen Messwerten, die sich für jeden Messpunkt aus 33 Messterminen und sieben Tiefen ergeben. Die Unterschiede der Parallelen bezüglich der gesamten Sickerwassermenge sind mit 176,7,

171,7 bzw. 171,9 mm, die für das letzte Versuchshalbjahr ausgewiesen werden, gering. Darüber hinaus weichen die Sickerungsraten im zeitlichen Ablauf an den drei Messpunkten nur leicht voneinander ab (Abb. 24). Anhand des Verlaufes des Nitrat-N-Gehaltes in dieser Tiefe ergeben sich unter Berücksichtigung der jeweiligen Wasserflüsse berechnete N-Verluste in Höhe von 83,3, 80,9 sowie 79,7 kg/ha.

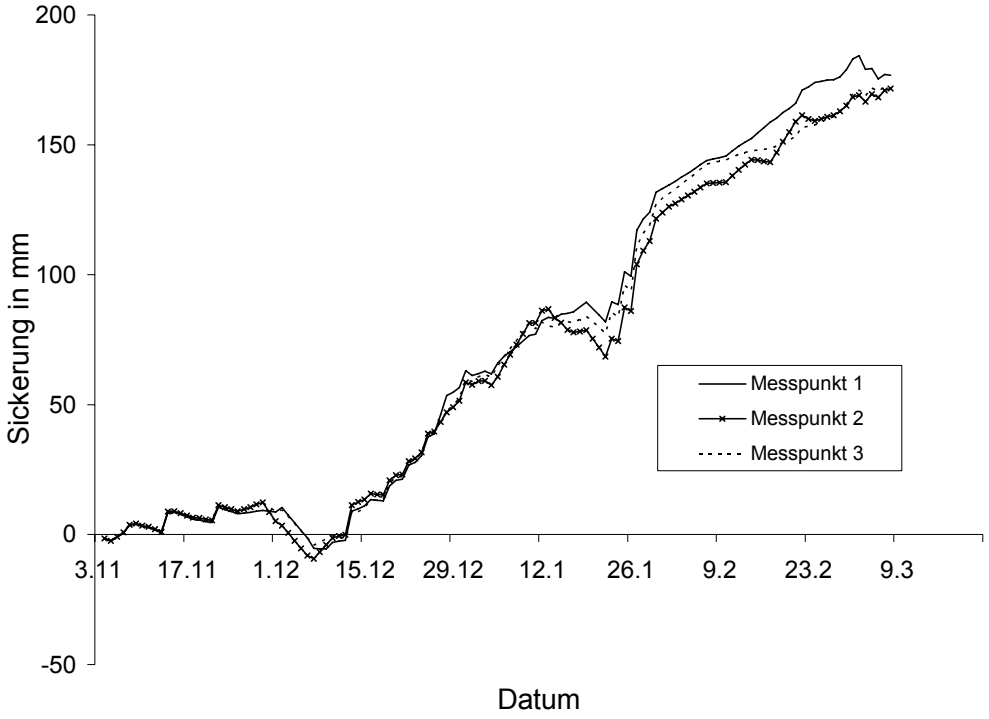


Abb. 24: Kumulativer Verlauf der Sickerung in 120 cm Tiefe unter Brache während des Winterhalbjahres 1993/94 berechnet für drei Messparallelen

Der **Ansatz C** unterscheidet sich gegenüber dem Ansatz B lediglich in dem methodischen Vorgehen hinsichtlich der Erfassung der Änderungen des Bodenwasservorrats. Diese wurden anhand der Messungen bezüglich der Bodenwasserspannung indirekt hergeleitet. Der Vorteil dieses Ansatzes liegt in dem wesentlich kostengünstigeren Messverfahren, was bei einer großen Anzahl an Varianten und Wiederholungen bei mehreren Messtiefen einen nicht zu vernachlässigenden Aspekt darstellt. Die Schwäche dieses Verfahrens liegt darin, dass kleinere Veränderungen der Bodenfeuchte vermutlich nicht angezeigt werden (AQUINO-MOSCOSO, 1993). Zudem besteht die Gefahr der systematischen Überschätzung der Bodenfeuchte, da es in der unmittelbaren Umgebung der Tensiometer feuchter ist als in der umgebenen Bodenmatrix (HEYDER, 1993).

Voraussetzung für die Berechnung der Wasserflüsse ist die Kenntnis der Beziehung von Wassergehalt (Θ) zu Wasserspannung (ψ). Da diese wesentlich von der Porengrößenverteilung und dem Porenvolumen beeinflusst wird, ist sie in den verschiedenen Bodenhorizonten unterschiedlich (SCHEFFER & SCHACHTSCHABEL, 1992), so dass zusätzlich die Kenntnis der Horizontabfolge und –mächtigkeit erforderlich ist. Die Ermittlung dieser Informationen und deren Übertragung in die Sickerwasserberechnungen bedeuten einen analytischen und rechnerischen Mehraufwand gegenüber der direkten Wassergehaltsmessung nach Ansatz B. Darüber hinaus birgt die Umrechnung der Wasserspannungswerte in Wassergehalte anhand der Beziehung von Θ zu ψ das Risiko von zusätzlichen Fehlern. Das grundsätzliche Problem dabei ist die Hysteresis der Wasserspannungskurve d.h. dem unterschiedlichen Verlauf bei Be- bzw. Entwässerung. Häufig wird diese Bodenwassercharakteristik im Labor im Drucktopfverfahren nach RICHARDS bestimmt. RENGER et al. (1970) weisen jedoch darauf hin, dass bei der Umrechnung von Wasserspannungen in Wassergehalte unter Verwendung von Desorptionskurven Vorsicht geboten ist und belegen, dass die Wassergehalte der Labormessungen deutlich über den im Gelände ermittelten Werten liegen. Aus diesem Grund werden bei dieser Vorgehensweise auch Korrekturen durch den Abzug eines Hysteresebetrages in Höhe von 13,5 % vorgenommen (TIMMERMANN et al., 1975). Aber auch ein Vergleich der Beziehung von Θ zu ψ im Verlauf der Entwässerung zeigen insbesondere im Bereich von 0 bis 50 hPa deutliche Abweichungen zwischen den im Feld und im Labor ermittelten Messwerten, was auf den geringeren Sättigungsgrad unter Feldbedingungen infolge von messbaren Luftinklusionen zurückzuführen ist (FÜHLER et al., 1976). Neben dieser Überschätzung der Wassergehaltsänderungen im für das Ausmaß der Wasserbewegung bedeutenden Bereich niedriger Saugspannungen weist die Labormethode nach HENNIG (1992) noch weitere mögliche Fehler auf, deren Ursachen in der mangelnden Ungestörtheit der Proben, fehlerhaften Werten bei Anwesenheit wasserbindender koprogener Humuskörperchen und der zeitlichen Inhomogenität infolge von Strukturveränderungen liegen können.

Durch die parallele Ermittlung von Wassergehalt und Wasserspannung im Felde und im Verlauf der relevanten Wassersorption dürfte der hysteresebedingte Fehler bei den Berechnungen nach dem Ansatz C minimiert worden sein, wenngleich Unsicherheiten bestehen, da die Aufsättigungsphase des Bodens zu Beginn der Sickerperioden keinen steten Prozess darstellen. Die große Anzahl an Wertepaaren, die den einzelnen Bodenhorizonten zugeordnet werden konnten, erlaubte eine sichere Anpassung an die häufig verwendete

Modellfunktion der Beziehung von Θ zu ψ nach VAN GENUCHTEN (1980). Diese Vorgehensweise ist eine von mehreren denkbaren Verfahren (BACHMANN & HARTGE, 1991) zur Bestimmung der Wasserspannungskurve. Fehler sind insbesondere im stärker strukturierten Oberboden zu erwarten, da das VAN GENUCHTEN-Modell von einem unimodalen Porensystem ausgeht und nicht in der Lage ist Grobporensysteme zu beschreiben (MONTENEGRO & HERRLING, 1992).

Die Gegenüberstellung der Sickerwasserberechnungen nach diesem Ansatz und Ansatz B zeigte für die Sickerperiode 1991/92 gute Übereinstimmung bei einer tendenziellen Überschätzung der Wasserflüsse in den beiden unteren Bodenhorizonten um etwa 10 mm (Tab. 40). Die für das wesentlich niederschlagsreichere und feuchtere Versuchshalbjahr 1993/94 durchgeführten Berechnungen wiesen dagegen deutlichere Abweichungen bei einer statistisch abgesicherten Überschätzung der Sickerwassermengen um 20 – 30 mm nach Ansatz C auf (Tab. 41). Möglicherweise konnten mit Hilfe der Tensiometer im Gegensatz zur volumetrischen Wassergehaltsmessung im Bereich nahe der Wassersättigung die Veränderungen der Bodenwasservorräte nicht mehr in vollem Umfang erfasst werden. Diese Unterschiede wirkten sich auf die Ergebnisse der Berechnungen zur N-Verlagerung aufgrund geringer Nitratkonzentrationen in der Bodenlösung der Zwischenfruchtparzellen im ersten der beiden Winterhalbjahre mit einer Überschätzung von etwa 2,5 kg/ha (in 90 und 120 cm Tiefe) nur geringfügig aus. Bedeutender differierten die kalkulierten N-Austräge für das letzte Winterhalbjahr. Die Verrechnung der Sickerraten mit den gegebenen Nitratkonzentrationen im Bodenwasser führte bei Ansatz C zu N-Austrägen, die mit durchschnittlich 20 (in 30 und 60 cm Tiefe) bis 25 kg/ha (in 90 und 120 cm Tiefe) deutlich über den nach Ansatz B berechneten lagen.

Beim **Ansatz D** werden zur Bestimmung des Wasserflusses der sich aus den Wasserspannungen zweier benachbarter Tiefen ergebende hydraulische Gradient sowie die Beziehung der Wasserleitfähigkeit (K) zu Wasserspannung (ψ) benötigt. Der Vorteil dieses Ansatzes liegt darin, dass sich der Messaufwand auf die Erhebung des zeitlichen Verlaufs der Wasserspannung in nur zwei Bodentiefen und die einmalige Bestimmung der Wasserleitfähigkeitsfunktionen in Abhängigkeit der in der unteren Tiefe vorkommenden Bodenhorizonte beschränkt. Die Erhebung von Parametern der darüber liegenden Bodenschichten sowie meteorologischer Daten ist nicht notwendig.

Die Bestimmung der Wasserleitfähigkeitsfunktion in Abhängigkeit von der Wasserspannung ist jedoch nicht ganz unproblematisch. Die oben dargestellten Ergebnisse basieren einerseits auf der Parametrisierung der Beziehung von Wassergehalt (Θ) zu Wasserspannung (ψ) nach dem Modell von VAN GENUCHTEN (1980) (vrgl. Formel (4)), um die Parameter m, n und α der Wasserleitfähigkeitsfunktion (Formel (8)) zu ermitteln. Die hysteresebedingten Unsicherheiten werden dabei aus der Bodenwassercharakteristik übernommen. Darüber hinaus ist die Bestimmung der gesättigten Wasserleitfähigkeit Ks notwendig. Die gesättigten Wasserleitfähigkeiten der vorkommenden Bodenhorizonte wurden im Rahmen eines interdisziplinären Forschungsprojektes bereits im Labor ermittelt (FIA, 1992). Auf die große Streubreite bei den Messungen der gesättigten Wasserleitfähigkeit von mehr als zwei Potenzen wurde bereits mehrfach hingewiesen (BAILLY, 1969; HARTGE, 1963; HARTGE, 1966; HARTGE & BAILLY, 1967). Diese kann im Wesentlichen auf die unterschiedliche Ausbildung der groben Sekundärporen zurückgeführt werden (HARTGE, 1971). Hinzu kommen dürften auch hier die oben erwähnten Probleme bei der Laborbestimmung der Saugspannungskurve wie mangelnde Ungestörtheit der Proben und zeitliche Inhomogenität aufgrund von Strukturveränderungen. Darüber hinaus können Verschmierungen der Schnittfläche zu einer Verringerung der gemessenen Wasserleitfähigkeit führen, wobei sich dieser mögliche Fehler mit dem Tongehalt erhöht (HASSAN, 1972). Die Übertragbarkeit der Werte auf einzelne Parzellen ist aus diesen Gründen und aufgrund der hohen kleinräumigen Variabilität dieser Bodeneigenschaft nicht unproblematisch (HARTGE, 1971).

Eine Alternative stellen Feldmethoden zur Bestimmung der gesättigten Wasserleitfähigkeit dar, die auf der Bestimmung der Versickerungsintensität basieren. Sie lösen einen Teil der Probleme des oben beschriebenen Verfahrens. Da der an das Bohrloch unmittelbar angrenzende Boden jedoch nicht vollständig mit Wasser gesättigt ist und diese Lufteinschlüsse den Fließquerschnitt und damit die Wasserleitfähigkeit verringern, können die ermittelten Werte um den Faktor 2 niedriger liegen als bei einem vollständig gesättigten Boden (GÄTH et al., 1990). Die Autoren geben allerdings zu berücksichtigen, dass auch unter Feldbedingungen der Boden nie vollständig gesättigt ist, so dass diese Methode möglicherweise die realen Verhältnisse besser widerspiegelt. Ein Vergleich dieser Methode mit der Labor-Stechzylinder-Methode zeigte darüber hinaus, dass bei grobaggredierten, grobporenreichen B_t-Horizonten aber auch deutlich höhere Wasserleitfähigkeiten ermittelt werden können, da dem im Felde ermittelten Wasserfluss sowohl vertikal als auch horizontal verlaufende Poren zur Verfügung stehen. Die Streuung der ermittelten Werte für die gesättigte

Wasserleitfähigkeit ist bei der Labormethode stärker ausgeprägt als bei der Bohrlochmethode (FERENCZ, 1995), was durch den sehr großen Einfluss der Makroporen im relativ kleinen Stechzylindervolumen und dem wesentlich größeren Bodenvolumen, das bei der Infiltrationsmessung mit einbezogen wird, erklärt werden kann. Die Untersuchungsergebnisse von FERENCZ (1995) zeigen aber auch, dass die verschiedenen existierenden Auswertungsmethoden bzw. Berechnungsgleichungen bei der Bohrlochmethode z.T. zu physikalisch nicht sinnvollen Resultaten führen und zudem die Wasserleitfähigkeit mit zunehmender Wasserstandshöhe steigt.

Möglicherweise beinhaltet die Herleitung der Beziehung von K zu ψ anhand einzelner Werte im ungesättigten Bereich geringere Fehler, da die groben Sekundärporen, deren unterschiedliche Ausbildung die großen Streuungen bei der gesättigten Wasserleitfähigkeit verursachen, schon bei geringen Wasserspannungen entleert werden. Als Folge verringern sich die Streubreiten bei der ungesättigten Wasserleitfähigkeit mit zunehmender Wasserspannung und betragen im Bereich von 100 hPa noch etwa eine Potenz, bei höheren Saugspannungen unter einer halben Potenz (HARTGE, 1971). Auch bei der Bestimmung der ungesättigten Wasserleitfähigkeit gibt es eine Vielzahl von Methoden, die im Rahmen dieser Arbeit nicht ausführlich diskutiert werden können. In der Regel müssen mehrere, der z.T. sehr aufwendigen Methoden, kombiniert werden, um den gesamten vorkommenden Saugspannungsbereich abzudecken (HENNIG, 1992). Die Übertragbarkeit der im Labor ermittelten Wasserdurchlässigkeiten auf das Feld scheint zudem, wie entsprechende Vergleiche zeigen (FÜHLER et al., 1976 und RENGER et al., 1970) nicht unproblematisch zu sein. Um Fehler möglichst klein zu halten sollten nach RENGER et al. (1975) die Labor- durch Geländewerte überprüft werden, und gegebenenfalls durch Parallelverschiebung den im Gelände gemessenen K:ψ-Werten angepasst werden.

Darüber hinaus ist die Beziehung zwischen Wasserspannung und Wasserleitfähigkeit durch eine starke Hysterese (RENGER et al., 1970 und STREBEL et al., 1973) gekennzeichnet d.h. eine uniforme Beziehung zwischen diesen beiden Größen besteht nicht. Abnehmende Wasserspannungen und Wassergehalte führen theoretisch zu einer Verringerung des Fließquerschnitts und damit zu abnehmender Wasserleitfähigkeit. Ergebnisse von PLAGGE et al. (1991) bestätigen dies für den Desorptionsverlauf, bei dem zuerst die großen Poren entwässert werden und als Folge davon sich die Wasserleitfähigkeit stark verringert. Beim Adsorptionsverlauf steigen die Wasserleitfähigkeiten der auf 600 hPa vorentwässerten Proben

demgegenüber zunächst sprunghaft an, wobei die Wasseraufnahme aufgrund des großen hydraulischen Gradienten rasch und im groben Porensystem erfolgt. In diesem Bereich liegen die ungesättigten Wasserleitfähigkeiten der Adsorptionskurve deshalb um ein bis zwei Zehnerpotenzen über den entsprechenden des Desorptionsverlaufes. Im weiteren Verlauf der Wasseraufnahme sinken die Wasserleitfähigkeiten zunächst und nähern sich nach Ausgleich der Lufteinschlüsse in den Feinporen den Werten des Desorptionsverlaufes an.

Neben diesen Unsicherheiten bezüglich der gesättigten Wasserleitfähigkeit und der Beziehung von K in Abhängigkeit von ψ sind zusätzliche Fehler hinsichtlich des hydraulischen Gradienten möglich, da dieser zwischen den zwei Messtiefen nicht notwendigerweise konstant ist. BORER (1978) wies darauf hin, dass insbesondere im Bereich von Horizontgrenzen sehr kleinräumige Abweichungen erheblicher Größenordnung auftreten. Darüber hinaus kommt bei diesem Ansatz der Erhebung der Wasserspannungsdaten eine wesentlich größere Bedeutung zu, da sie zum einen die Größe des hydraulischen Gradienten verändern und zum anderen insbesondere nahe der Wassersättigung die Wasserleitfähigkeit in hohem Maße bestimmen. Auf die messtechnisch bedingten Fehler der Tensiometer wurde bereits oben hingewiesen. Um zu einer Einschätzung zu gelangen, wie stark das Ergebnis der Wasserflussberechnung (Tab. 42) von den Werten der Matrixpotentiale abhängt, wurden die gemessenen Werte um 1 hPa verringert und die Berechnung erneut durchgeführt. Diese geringfügige Veränderung führte zu einer deutlichen Verringerung der Sickerwassermengen von durchschnittlich 52 auf 39 mm (1991/92) bzw. von 173 auf 122 mm (1993/94). Dies zeigt, wie wichtig es ist die Wasserspannungen in hoher zeitlicher Auflösung zu erfassen, was nur mit automatisch arbeitenden, hochauflösenden Geräten gewährleistet werden kann (MANDERSCHEID, 1996 und RENGER et al., 1975). Diesem Aspekt konnte mit den eingesetzten Tensiometern sicherlich nicht im erforderlichen Maße Rechnung getragen werden.

Sicherlich ließen sich damit Fehler vermeiden und die beobachtete erhebliche Streuung verringern. Zusätzliche Schwierigkeiten traten bei der Berechnung nach diesem Ansatz bei Vorliegen von A_l- bzw. A_l/IIB_t-Horizonten in der vorgegebenen Messtiefe auf. Die Ergebnisse der Wasserflussberechnungen lagen dann um ein mehrfaches über den Niederschlagsmengen. Eine mögliche Erklärung liegt darin, dass sich bei zeitweiliger Staunässe, die insbesondere an den Horizontübergängen zu erwarten ist, die Matrixpotentiale der oberen und der unteren Kante des betrachteten Bodenprofils bei nahe oder gleich Null

nicht unterscheiden, der Potentialgradient aufgrund des Gravitationspotentials aber einen abwärts gerichteten Wasserfluss ausweist. Die Wasserleitfähigkeit entspricht dann annähernd der gesättigten, die für diese Horizonte 1980 mm/d (A_l) bzw. 377 mm/d (A_l/IIB_t) beträgt (Tab. 3), was dazu führt, dass bereits ein Tag mit Staunässe genügt, um zu unrealistisch hohen Sickerwassermengen zu gelangen.

Zusammenfassend lässt sich festhalten, das die zentrale Zielsetzung dieser Arbeit, die Erfassung der Nitratverlagerung im Rahmen eines mehrfaktoriellen Feldversuches, von methodischen Unsicherheiten bei der Ermittlung der Ausgangsparameter „Nitratgehalt im Bodenwasser“ und „Wasserflüsse“ begleitet war. Der erste Parameter war durch eine hohe Variabilität gekennzeichnet, die unabhängig vom Verfahren der Wasserflussberechnung in die Berechnung der N-Austräge mit übernommen wurde. Die Ergebnisse anderer Untersuchungen zeigen, dass die Streuung dieser Bodeneigenschaft auch durch erhöhten Aufwand nur sehr begrenzt gemindert werden kann. Die Unsicherheiten bei der Bestimmung der Wasserflüsse sind differenziert nach dem jeweiligen Ansatz zu beurteilen. Diese sind beim Ansatz A offensichtlich, da die Differenz aus Niederschlag und potentieller Evapotranspiration den Vorgang der Wasseraufnahme des Bodens nicht berücksichtigt. Daher eignet sich dieser Ansatz nur für die Abschätzung der N-Verlagerung aus der obersten Bodenschicht. Auf tiefere Bodenschicht angewandt, ergeben sich mit diesem Ansatz deutliche Überschätzungen. Für eine ökologische Bewertung sind die Verlagerungsprozesse in den tieferen Bodenschichten jedoch von größerer Relevanz, da damit irreversible Vorgänge beschrieben werden, die echte Verluste darstellen. Der Vergleich der Ansätze B und C, die beide die Bodenwasservorratsveränderungen mit berücksichtigen zeigte, dass mit dem Ansatz C die Wasserflüsse und damit die N-Austräge tendenziell (1991/92) bzw. signifikant (1993/94) gegenüber den Ergebnissen nach Ansatz B überschätzt werden. Unsicherheiten bei den Messungen bestehen sowohl bei der volumetrischen Wassergehaltsmessung aufgrund möglicher Unzulänglichkeiten der Eichfunktion, als auch bei der Bestimmung des Matrixpotentials infolge systematischer Überschätzung und unzureichender Wahrnehmung kleiner Veränderungen der Bodenfeuchte. Zusätzliche Unsicherheiten bestehen beim Ansatz C bei der Transformation der Matrixpotentiale in volumetrische Wassergehalte, da diese beiden Parameter in keiner uniformen Beziehung stehen und dieser Zusammenhang selbst auf Modellvorstellungen basiert, die vereinfachende Annahmen voraussetzen. Das Ergebnis der Wasserflussberechnung nach Ansatz D ist im hohen Maße von den Werten der Matrixpotentiale abhängig. Entsprechend stark wirken sich wahrscheinliche Fehler auf die

Berechnungen aus, die auch bei höherer zeitlicher Auflösung der Messungen bestehen bleiben. Hinzu kommen erhebliche Unsicherheiten bei der Bestimmung der Wasserleitfähigkeit und deren Übertragbarkeit auf einzelne Parzellen. Aus diesen Gründen weist dieses Verfahren im Vergleich zu den Ansätzen B und C die geringste Praktikabilität zur Bestimmung der Sickerraten auf.

4.3 Nachwirkungen auf die Hauptfrucht

Der Zwischenfruchtanbau wirkte sich positiv auf die N-Verfügbarkeit im Oberboden und die N-Aufnahme des nachfolgenden Sommerweizens aus. Der Gehalt an mineralischen Stickstoff in der obersten Bodenschicht nach erfolgtem Zwischenfruchtanbau lag in drei der vier Versuchsjahre signifikant über dem der Varianten ohne Bodenbedeckung während der Winterhalbjahre. Bei den ungedüngten Varianten führte der Anbau von Winterrübsen zu einer Erhöhung des N_{min}-Angebotes während dieser drei Sommerhalbjahre zur Probenahme Mitte Mai/Mitte Juni um etwa 12 kg/ha gegenüber den Brachen. Die zusätzliche N-Düngung zu den Rübsen verbesserte die Verfügbarkeit im Oberboden in der Tendenz darüber hinaus. In der untersten Bodenschicht (60-90 cm) deuteten erhöhte N_{min}-Werte bei den Brachen gegenüber den während des Winters bedeckten Varianten auf Residuen der hier in größerem Umfang stattgefundenen N-Verlagerung hin. Die während der letzten beiden Standzeiten des Sommerweizens durchgeführten Pflanzenanalysen wiesen für die Prüfglieder der Zwischenfrucht im Vergleich zu denen der Brache konsequenterweise eine höhere N-Aufnahme aus. Ganz analog dazu waren die Effekte der unterschiedlichen Bodenbedeckung über Winter zum Erntezeitpunkt des Sommerweizens hinsichtlich des N-Gehaltes im Korn und des N-Entzuges durch Korn und Stroh, der nach erfolgtem Zwischenfruchtanbau um etwa 10 kg/ha über dem der Varianten ohne Bodenbedeckung lag.

Dennoch konnte eine positive Nachwirkung des Zwischenfruchtanbaus auf den Ertrag des nachfolgenden Sommerweizens nicht nachgewiesen werden, wobei auf die Unsicherheiten bei der Ertragserfassung, die sich aus der Stadtlage der Versuchsflächen ergaben, bereits hingewiesen wurde. Ein weiterer möglicher Grund für das Ausbleiben positiver Effekte der Gründüngung könnte sein, dass sich bei der zum Sommerweizen gegebenen N-Düngung (50-90 kg/ha) Standortgegebenheiten und nicht das N-Angebot limitierend auf den Ertrag auswirkte. Die nach den beiden ersten Versuchsjahren signifikant größeren Restmengen an

mineralischem Stickstoff im Oberboden nach der Ernte des Getreides der Zwischenfruchtparzellen gegenüber den Brachen könnten ein Indiz hierfür sein. Vergleichende Untersuchungen zur Ertragswirksamkeit des Zwischenfruchtanbaus auf die Folgekultur Sommergerste zeigten Mehrerträge nach Winterrübsen gegenüber Brache von etwa 2 dt/ha (BERENDONK, 1984). Deutlicher war dieser Effekt bei Halbierung der ortsüblichen N-Gabe zur Sommergerste mit einem Ertragsunterschied von 10 dt/ha zwischen Winterrübsen (54 dt) und Brache ohne Strohbergung (44 dt). Ein weiteres bemerkenswertes Ergebnis dieser Untersuchung lag darin, dass die Reduzierung der N-Düngung von 79 auf 40 kg zur Sommergerste nach erfolgtem Anbau von Winterrübsen im Vergleich zur Brache bei ortsüblicher Aufwandsmenge (79 kg N) zu keinerlei Ertragseinbuße führte. Der Nutzen zur Hauptfrucht beim Anbau von Winterrübsen als Zwischenfrucht über den Winter scheint gegenüber anderen Zwischenfrüchten insbesondere in diesem Einsparpotential zu liegen. Im Vergleich von Winterrübsen zu Senf und Ölrettich zeigten sich nach dieser Untersuchung keine Ertragsunterschiede bei ortsüblicher N-Gabe. Bei Halbierung der N-Zufuhr zeigte sich, dass die Erträge der Sommergerste nach dem Anbau von Winterrübsen um 4dt/ha über dem Niveau der mit Senf und Ölrettich bestellten Varianten lagen. Zu einer davon abweichenden Einschätzung hinsichtlich der Ertragswirksamkeit von Winterrübsen und Ölrettich auf die Folgekultur gelangten RICHTER und SCHMALER (1995). Obwohl im Aufwuchs der Winterrübsen nach dem Winter statistisch abgesichert deutlich größere Stickstoffmengen enthalten waren als beim Ölrettich, unterschieden sich die Erträge des darauf folgenden, in Mulchsaat bestellten, Silomais nur geringfügig in Abhängigkeit der Zwischenfruchtart. Tendenziell lagen diese nach erfolgtem Anbau von Winterrübsen sogar um 6 bis 7 % unter dem Niveau der mit Ölrettich bestellten Parzellen unabhängig von der Höhe und Verteilung der N-Düngung zum Silomais. Als mögliche Gründe für die geringeren Erträge nennen die Autoren den Verzicht auf eine intensive mechanische Einarbeitung bei der Winterrübsensubstanz, was zu ungleichmäßigeren Lageabständen und –tiefen führte und z.T. geringere Bestandesdichten zur Folge hatte und die verzögerte N-Freisetzung aus der Mulchschicht nach Winterrübsen. Darüber hinaus wird auf das Risiko einer schlechteren Jugendentwicklung der Maispflanzen bei frühsommerlicher Trockenheit hingewiesen, das sich aufgrund des höheren Wasserentzuges der Winterrübsen erhöht. SCHMID et al. (2004) bestätigen, dass der Effekt von Winterzwischenfrüchten auf den Ertrag der Folgefrucht nur gering ist, falls deren Vermengung auf die oberste Bodenschicht begrenzt bleibt und eine negative Ertragswirkung des Zwischenfruchtanbaus gegenüber der Brache bei geringen Jahresniederschlägen.

Schließlich hängt die Düngewirkung des Zwischenfruchtanbaus zur Folgekultur vom Verlauf und Intensität der N-Freisetzung ab. Die Mineralisierung im Boden ihrerseits wird entscheidend von klimatischen Faktoren wie Temperatur und Niederschlagsverteilung beeinflusst, und ist damit Schwankungen zwischen einzelnen Jahren unterworfen, was eine allgemeine Beurteilung der Ertragswirksamkeit des Zwischenfruchtanbaus erschwert. Dies zeigten Untersuchungen von GRÖBLINGHOFF et al. (1990) beispielhaft im Rahmen eines mehrjährigen Feldversuches. In zwei der drei Versuchsjahre konnte eine deutliche Düngewirkung nach dem Anbau von Winterzwischenfrüchten (Senf und Phacelia) in Höhe von 50 kg N gegenüber der Winterbrache auf den Ertrag und die Qualität der im folgenden angebauten Zuckerrüben nachgewiesen werden. Im dritten Versuchsjahr blieb dieser Zwischenfruchteffekt aufgrund einer generell höheren N-Verfügbarkeit im Boden während der Vegetationszeit aus.

4.4 Schlussfolgerungen

Mit dem Anbau von Winterrübsen kann gegenüber der Winterbrache die Nitratverlagerung generell deutlich reduziert werden. Eine Vermeidung der Auswaschung, aus wasserwirtschaftlicher Sicht, bedenklicher N-Mengen kann der Zwischenfruchtanbau jedoch nicht garantieren. Dies gilt insbesondere bei hohem Mineralisationspotential des Bodens und Verhältnissen, die die N-Freisetzung begünstigen. Aus diesem Grund kann eine Stickstoffdüngung zur Zwischenfrucht von 50 kg N/ha und mehr nicht empfohlen werden, wenngleich eine zusätzlich N-Gabe zur Förderung der anfänglichen Bestandsentwicklung nicht zwangsläufig zu einer Erhöhung der N-Frachten führen muss. Gegen eine N-Düngung in dieser Größenordnung spricht darüber hinaus, dass die Wirkung der durch die Zwischenfrüchte konservierten N-Mengen auf die folgende Hauptfrucht insbesondere von den Mineralisationsbedingungen abhängt und daher nicht steuerbar ist.

Geringere Nitratgehalte in der Bodenlösung sprechen für die reduzierte Bodenbearbeitung im Herbst im Vergleich zur pflügenden, obwohl in der Regel die Unterschiede bezüglich des N-Austrages nur in der Tendenz bestätigt werden konnten.

Die Nitratgehalte in der mit Saugkerzen gewonnenen Bodenlösung sind einer starken räumlichen und zeitlichen Streuung unterworfen. Dies kann zu Abstrichen bei der

statistischen Auswertung und zu Unsicherheiten führen. Für die Durchführung variantenreicher Versuche gibt es aber zu diesem Vorgehen keine Alternativen. Des weiteren erscheint die Erhebung der Nitratkonzentration in der Bodenlösung in Tiefen von 90 bzw. 120 cm, in denen die Dynamik weniger stark ausgeprägt ist, als in den darüber liegenden Schichten, ausreichend zu sein, um zu einer ökologischen Bewertung zu gelangen.

Unsicherheiten bestehen auch im Hinblick auf die Abschätzung der Sickerwassermengen. Die Gegenüberstellung der Schwachstellen und Fehlerquellen bei den Eingangsparametern der vier angewandten Ansätze lassen den Schluss zu, dass mit dem Ansatz B die beste Annäherung an die tatsächlichen Wasserflüsse im Boden gelingt. Die Berechnungen nach Ansatz C weichen davon nur geringfügig ab. Größere Schwächen zeigen sich jedoch bei niederschlagsreichen Sickerperioden. Mit dem Ansatz A können Aussagen bei geringem Fehler nur für die oberste Bodenschicht getroffen werden. Ansatz D weist die geringste Praktikabilität im Rahmen eines Feldversuches auf.

5 Zusammenfassung

Im Rahmen eines vierjährigen Feldversuches (1990-1994) wurden der Einfluss von Bodenbearbeitung, Bodenbedeckung und Stickstoffdüngung auf die N-Dynamik und N-Verlagerung während der Winterhalbjahre und deren Nachwirkungen auf die Hauptfrucht der nachfolgenden Vegetationsperiode untersucht. Es zeigte sich, dass sich neben den Prüffaktoren auch Unterschiede der Vorfrucht und des Witterungsverlaufes auf die Höhe der Nitratauswaschung über Winter auswirkten. Generell führte der Anbau von Winterrübsen gegenüber der Brache erwartungsgemäß zu einer Reduzierung des N-Austrages, was sowohl auf die geringeren Sickerwassermengen als auch auf die geringeren Nitratkonzentrationen in der Bodenlösung zurückzuführen war. In den beiden ersten Versuchsjahren nach der Vorfrucht Wintergerste ohne Strohbergung wirkte sich eine zusätzliche N-Düngung in Höhe von 50 bzw. 100 kg/ha bei den Winterrübsen nicht auf das Ausmaß der N-Verlagerung aus, das in beiden Jahren weniger als 5 kg/ha betrug. Bei den Brachen führte eine N-Gabe von 50 kg zwar zu einer Erhöhung der N-Fracht, die mit knapp 20 kg im ersten und etwa 8 kg im zweiten Versuchsjahr jedoch verhältnismäßig gering war. In den beiden letzten Versuchsjahren nach der Vorfrucht Kartoffel wurden ausnahmslos deutlich höhere Nitratkonzentrationen in der Bodenlösung gemessen als in den beiden vorangegangenen

Versuchsjahren. Mit dem Anbau der Winterrübsen verringerte sich zwar auch hier der N-Austrag gegenüber den Brachen signifikant, erreichte aber selbst bei den ungedüngten Varianten etwa 45 kg N/ha und erhöhte sich bei zusätzlicher N-Düngung auf 51,5 (50 kg N) bzw. 84,1 (100 kg N). Unter den Brachen fand sich gegenüber den beiden ersten Versuchsjahren ein größerer Anteil der zusätzlichen N-Zufuhr bei den N-Verlusten infolge der Auswaschung wieder, die von 100 (0 kg N) auf 130 kg /ha (50 kg) anstiegen. Die Wirkung der unterschiedlichen Formen der Bodenbearbeitung war gering ausgeprägt und nur während der beiden ersten Winterhalbjahre erkennbar. Im Vergleich zu den gepflügten Varianten verringerte die reduzierte Bearbeitung mit der Fräse die Auswaschungsraten von Nitrat bei den Brachen. Bei den Winterrübsen übte die Bodenbearbeitung keinen Einfluss auf die Höhe der N-Austräge aus.

Die N-Konservierung der Winterrübsen wirkte sich auf die folgende Hauptfrucht positiv hinsichtlich der Stickstoffverfügbarkeit im Oberboden und der N-Aufnahme des Sommerweizens während dessen Standzeit aus. Zur Ernte konnten höhere N-Gehalte im Korn sowie höhere N-Entzüge durch das Stroh und Korn nachgewiesen werden. Statistisch abgesicherte Unterschiede im Ertrag lagen jedoch nicht vor.

Der Schwerpunkt in der methodischen Vorgehensweise dieser Arbeit lag in der Erfassung der Sickerwassermengen zur Abschätzung der N-Verlagerung anhand der Daten der Nitratkonzentration in der Bodenlösung. Die Durchflussmengen im Boden wurden ausgehend von der klimatischen Wasserbilanz und unter Berücksichtigung der Veränderungen der Bodenwasservorräte bestimmt, die anhand von Messungen der Matrixpotentiale und der Kenntnis der Bodenwassercharakteristika im Profilverlauf des Bodens berechnet wurden. Dieser Ansatz (C) wurde drei weiteren Ansätzen gegenübergestellt. Diese sind die klimatische Wasserbilanz (Ansatz A), die klimatische Wasserbilanz unter Berücksichtigung der Veränderungen der Bodenwasservorräte anhand der volumetrischen Wassergehaltsmessung mit Hilfe der TDR-Messtechnik (Ansatz B) und die Bestimmung der Perkolation mittels Wasserleitfähigkeitsfunktionen und Potentialgradienten (Ansatz D). Der Vergleich zeigte eine gute Übereinstimmung des verwendeten Ansatzes (C) mit jenem, bei dem die Bodenwasservorratsveränderungen anhand der volumetrischen Wassergehaltsmessung bestimmt wurden (B). Die Abweichungen zur klimatischen Wasserbilanz (A) waren in der obersten Bodenschicht gering, nahmen jedoch mit der Tiefe zu. Die Bestimmung der Wasserflüsse mit Hilfe der Wasserleitfähigkeitsfunktion und Potentialgradienten (D) lieferte

Wasserflussraten, die im Vergleich zu jenen nach den Ansätzen B und C stark abweichen und variieren (mit Ausnahme vom IIB_t-Horizont). Mögliche Fehlerquellen der verschiedenen Ansätze wurden diskutiert und Schlussfolgerungen für die praktische Versuchsdurchführung gezogen.

6 Summary

The influence of different tillage managements, soil covering and different nitrogen applications on the N-dynamic and N-leaching during winter and their effects during the following vegetation period have been investigated within the scope of a field trial of several years (1990-1994). Beside these treatments, differences of the preceding crop type and climatic conditions showed also effects on the amount of nitrate leaching during winter. The cultivation of winter rape compared to fallow reduced the N-leaching in accordance with the expectations; generally this was the result of lower rates of water flow as well as lower nitrate concentrations in the soil solution. The supplementary N-application to winter rape amounting to 50 and 100 kg/ha did not affect the level of downward N-movement (less than 5 kg/ha) after preceding winter barley (straw incorporated into the soil) during the first both autumn-winter periods. Under fallow the additional N-application in the amount of 50 kg/ha increased the rate of N-leaching moderately about 20 kg in the first and 8 kg in the second year in comparison to the variants without fertilizer. During the last two years of the trial after preceding potato the measured nitrate concentrations in the soil solution were without exception clearly higher than in the first years of the trial. In these years the cultivation of winter rape reduced the N-leaching significantly in comparison to fallow, too. However, the N-leaching under the catch crop was much stronger amounting 45 kg/ha (without fertilization), 51,5 (50 kg N) and 84,1 (100 kg/ha) resp.. Under fallow the additional N-application increased the rate of N-leaching by 100 and 130 kg/ha, resp.. The effect of the different tillage managements was only small and only during the first two years perceptible. Reduced tillage on the fallow decreased N-leaching, but such effect was hardly detectable in combination with the catch crop.

During the successive vegetation periods the N-conservation by the catch crop led to higher nitrate contents in the soil, particularly in the upper layer, and to an increasing N-uptake of the fallowing spring wheat. Moreover, higher N-content in the harvested grain and N-uptake of

the wheat straw and grain were observed. However, the differences in grain yield were not significantly.

Focal point of the methodical proceeding of this study was the recording of the downward water movement to estimate the N-leaching in combination with the nitrate concentration in the soil solution. The calculation of the water movement in the soil based on the climatic water balance in consideration of the variation of the soil water content; the changes in the soil water were determined by data of the soil matrix potential and the knowledge of the moisture characteristics of the horizons, their positions and their wideness. This approach (C) was based to present the results, and was then compared with three other ones. These were the climatic water balance (approach A), the climatic water balance in consideration of the variation of the soil water content by data of the changes of the volumetric soil water content measured by 'time domain reflectrometry' (approach B) and the calculation of water flow with hydraulic conductivity functions and data of the hydraulic potentials (approach D). The mainly used method (C) corresponded well with the calculations, which based on measurements of the volumetric soil water content (B). The differences as to the climatic water balance (A) were low in the upper layer, but increased considerable with the depth. The calculation of water flow with hydraulic conductivity functions and data of the hydraulic potentials (D) produced data on the water fluxes, deviating strongly and displaying large variations compared to those by the approaches B and C (apart from the IIBt-horizon). Possible sources of error of the methods are discussed to draw conclusions for conducting field trials.

7 Literaturverzeichnis

ANGLE, J.S. 1990: Nitrate leaching losses from soybeans (*Glycinee max* L. Merr.). Agric. Ecosyst. Environ. 31, 91-97

ARNOTT, R.A. & C.R. CLEMENT 1966: The use of herbicides in alternate husbandry as a Substitute for ploughing. Weed Res. 6, 142-157

ARZT, R. & S. KÜBLER 1996: Bodenfeinkartierung des Schlages 5 am Albrecht-Thear-Weg. Diplomkartierung, FU Berlin

AQUINO-MOSCOSO, O. 1993: Bodenwasserhaushalt unter Grünland in Oberschwaben. Hohenheimer Bodenkundliche Hefte, Heft 7

BAAR, W. & A. WESTING 1984: Eine neue Konstruktion von Saugsonden zur Bodenwasserentnahme. Landwirtschaftliche Forschung 37 (3/4), 223-226

BACH, M. 1987: Die potentielle Nitrat-Belastung des Sickerwassers durch die Landwirtschaft in der Bundesrepublik Deutschland. Göttinger Bodenkundliche Berichte 93, Göttingen

BACH, M. & H.-G. FREDE 1995: Wege zur Umsetzung gewässerschonender Landwirtschaft. In: Gewässerschutz durch Kooperation - Konzepte und Erfahrungen. Arbeitspapier, Hiltrup Nr. 18225, 11-17

BACHMANN J. & K.H. HARTGE 1991: Die Berechnung von Wasserspannungskurven aus Primärdaten – Ein Methodenvergleich. Z. Pflanzenernähr. Bodenk. 155, 109-114

BAILLY, F. 1969: Ein Vergleich der Häufigkeitsverteilung von Wasserleitfähigkeitswerten waagerecht und senkrecht entnommener Stechzylinderproben aus Lößböden unter Acker und Wald. Z. Pflanzenernähr. Bodenk. 122, 279-292

BARRACLOUGH, D. 1989: A usuable mechanistic model of nitrate leaching I. The model. J. of Soil Science, 40, 543-545

BENECKE, P., F. BEEWSE & R.R. VAN DER PLOEG 1975: Ein einfaches Modell für den Lösungstransport in ungesättigten Böden. Mitteilgn. Dtsch. Bodenkundl. Gesellsch. 22, 121-136

BENKE, M., A. KORNHER & F. TAUBE 1991: Einfluß von Nutzungsart (Weide/Schnitt) und Stickstoffdüngung auf die Nitratauswaschung unter Grünland. Mitt. Ges. Pflanzenbauwiss. 4, 139-142

BERENDONK, C. 1984: Einfluss von Zwischenfrüchten auf die Stickstoffverlagerung im Boden und den Ertrag der Nachfrucht. Arbeitsgemeinschaft Grünland und Futterbau d. Ges. Pflanzenbauwiss., Tagungsbericht Bad Hersfeld 45-58

BERENDONK, C. 1987: Leistungen verschiedener Zwischenfruchtarten im Hinblick auf Futtergewinnung, Gründüngung und Nitratverlagerung im Boden. Z. „Das wirtschaftseigene Futter“, 33 (3), 275-286

BERENDONK, C. 1988: Stickstoff- und Mineralstoffixierung in Sproß und Wurzel verschiedener Zwischenfruchtarten. Deutsche Landwirtschaftsgesellschaft, Ausschuss für Gräser, Klee und Zwischenfrüchte, Tagungsbericht 5-16

BERGER, G. & H. KRETSCHMER 1991: Zwischenfruchtanbau – immer eine Maßnahme zur Verringerung der Nitratauswaschung? Feldwirtschaft 32 (10), 462-464

BERGER, G. & K. SCHMALER 1995: Trockenmasseproduktion und N-Entzug von Silomais nach verschiedenen Zwischenfrüchten und differenzierter Stickstoffdüngung. Z. „Das wirtschaftseigene Futter“, 41 (2), 196-207

BERGER, G., K. SCHMALER & K. RICHTER 1996: N-Aufnahme verschiedener Zwischenfrüchte und ihr Einfluß auf die winterliche N_{min}-Dynamik sandiger Böden. Arch. Acker- Pfl. Boden. 40, 217-229

BÖTCHER, J., O. SRTEBEL & W.H.M. DUYNISVELD 1991:Variabilität der Nitratverlagerung und deren Erfassung mittels Saugsonden in einem Sandboden unter Feldbedingungen. Mitteilgn. Dtsch. Bodenkundl. Gesellsch. 66 (2), 915-918

BORER, F. 1978: Überlegungen zum Einfluß der bodenphysikalischen Parameter k(S) und i auf die Berechnung der Tiefensickerung und auf die Wasserbilanz. Mitteilgn. Dtsch. Bodenkundl. Gesellsch. 26, 133-142

BRAMM, A. 1978: Wechselwirkung zwischen neuzeitlichen Anbausystemen der landwirtschaftlichen Produktion und der Belastung von Sickerwasser durch anorganische und organische Substanzen. Landbauforsch. Völkenrode 28 (2), 79-94

CZERATZKI, W. 1971: Saugvorrichtung für kapillar gebundenes Bodenwasser. Landbauforschung Völkenrode 21 (1), 13-14

DIEREND, W. & W. SPETHMANN 1994: Der Mineralstickstoffgehalt in Böden von Baumschulen. II: N_{min}-Gehalte des Bodens im Herbst und Nitratauswaschung über Winter. Gartenbauwissenschaft 59 (2), 62-66

DOWDELL, R.J. & R.Q. CANELL 1975: Effect of ploughing and direct drilling on soil nitrate content. J. Soil Sci. 26, 53-61

DVWK-FACHAUSSCHUSS „VERDUNSTUNG“ 1990: Stand der Verdunstungsermittlung in der Bundesrepublik Deutschland. In: Grundlagen der Verdunstungsermittlung und Erosivität von Niederschlägen. DVWK Schriften 86, 1-77

FERENCZ, G. 1995: Methodische Untersuchungen zur Ermittlung der hydraulischen Eigenschaften ungesättigter Böden. Diss. Rostock

FIA Fachbereich Internationale Agrarentwicklung 1992: Einfluß von langjährig differenzierten Bewirtschaftungsmaßnahmen und Umweltbelastungen auf Bodenfruchtbarkeit und Ertragsleistung eines lehmigen Sandbodens. TU Berlin, Schriftenreihe des Fachbereichs Nr. 141

FREDE, H.-G., W. WEINZIERL & B. MEYER 1984: Ein tragbares elektronisches Einstich-tensiometer. Z. Pflanzenernähr. Bodenk. 147, 131-134

FÜHLER, H., P. GERMANN, F. RICHARD & J. LAUENBERGER 1976: Bestimmung von hydraulischen Parametern für die Wasserhaushaltsuntersuchungen im natürlich gelagerten Boden. Ein Vergleich von Feld- und Laboratoriumsmethoden. Z. Pflanzenernähr. Bodenk. 139, 329-342

GÄTH, S., H.-G. FREDE & B. MEYER 1990: Eine Infiltrationsmethode zur Messung der hydraulischen Leitfähigkeit im Felde. Z. Pflanzenernähr. Bodenk. 153, 1-4

GÖLZ-HUWE, H., W. SIMON, B. HUWE & R.R. VAN DER PLOEG 1989: Zum jahres-zeitlichen Nitratgehalt und zur Nitratauswaschung von landwirtschaftlich genutzten Böden in Baden-Württemberg. Z. Pflanzenernähr. Bodenk. 152, 273-280

GÖTTLEIN, A. 1995: Mikroskalige Variabilität der Bodenlösungschemie – Ergebnisse eines Laborversuchs zum Vergleich von Standard- und Mikro-Saugkerzen. Z. Pflanzenernähr. Bodenk. 158 (2), 205-206

GOSS, M.J., K.R. HOWSE, G.L. HARRIS & P. COLBOURN 1988: The leaching of nitrates after spring fertilizer application and the influence of tillage. In: Fertilazation and the Environment. Leuven University Press, Leuven, Belgium, 20-25

GRÖBLINGHOFF F.-F.; K.-H. BLOME & N. LÜTKE ENTRUP 1990: Einfluß des Zwischen-fruchtanbaus auf den N-Haushalt sowie Ertrag und Qualität einer Zuckerrüben-fruchtfolge. Mitt. Ges. Pflanzenbauwiss. 3, 15-18

GROFFMAN, P.M., P.F. HENDRIX & D.A. CROSSLEY 1987: Nitrogen dynamics in conventional and notillage agroecosystems with inorganic fertilizer or legume nitrogen inputs. Plant Soil 97, 315-332

GROSSMANN, J., K.-E. QUENTIN & P. UDLUFT 1987: Sickerwassergewinnung mittels Saugkerzen – eine Literaturstudie. Z. Pflanzenernähr. Bodenk. 150, 258-261

HALM, D., T. GAISER & K. STAHR 1997: Meßwertkorrektur und Kalibrierung von TDR-Sonden in Abhängigkeit von der Bodenart und der Lagerungsdichte. Mitteilgn. Dtsch. Bodenkundl. Gesellsch. 85/I, 93-96

HARRIS, G.L. & P. COLBOURNE 1986: Effect of cultivations on removal of rainfall and nitrate from a mole drained site. In: Effects of Land Use on Fresh Water: Agriculture, Forestry, Mineral Exploitation, Urbanisation. Ellis Horwood, Chichester, UK, 528-532

HARTGE, K.H. 1963: Bodenkundliche Auswertungsmöglichkeiten der Permeabilität bei Messungen an Stechzylinderproben. Z. Pflanzenernähr. Bodenk. 103, 197-209

HARTGE, K.H. 1966: Problematik und Fehlerquellen bei der Bestimmung der Durchlässigkeit an Stechzylinderproben. Wasser und Boden 18, 19-22

HARTGE, K.H. & F. BAILLY 1967: Beziehung zwischen Staunässemerkmalen, Wasserleitfähigkeit und Porenkontinuität in Löß-Parabraunerden im südlichen Niedersachsen. Z. Pflanzenernähr. Bodenk. 116, 10-25

HARTGE, K.H. 1971: Die physikalische Untersuchung von Böden; Ferdinand Enke Verlag, Stuttgart

HASSAN, A. (1972): Ein Berechnungsverfahren zur Bestimmung der ungesättigten Wasserleitfähigkeit aus bodenphysikalischen Daten. Z. f. Kulturtechnik und Flurbereinigung 14, 232-246

HENNIG, A. 1992: Vergleich verschiedener Methoden zur Berechnung und Simulation des Bodenwasserhaushaltes – dargestellt am Beispiel von Auenböden bei Hennef/Sieg. Bonner Bodenkundliche Abhandlungen Band 6

HEYDER, D. 1993: Nitratverlagerung, Wasserhaushalt und Denitrifikationspotential in mächtigen Lößdecken und einem Tonboden bei unterschiedlicher Bewirtschaftung. Bonner Bodenkundliche Abhandlungen Band 10

KÖHLER, K., W.H.M. DUIJNISVELD & J. BÖTCHER 1999: Auswirkung gestaffelter N-Düngungen auf die Nitratauswaschung auf vier Dauerversuchsflächen in Niedersachsen und Bewertung von N_{min}-Daten als Basis der Austragsberechnungen. Mitteilgn. Dtsch. Bodenkundl. Gesellsch. 91 (3), 1269-1272

KÖHLER, W., G. SCHACHTEL & P. VOLESKE 1995: Biostatistik. Springer-Verlag Berlin, Heidelberg

KÖPPEN, W. 1931: Grundriß der Klimakunde. Walter de Gruyter & Co. Berlin, Leipzig

KOFALK, S. 1997: Einfluss von Bodenvariabilität und Relief auf Wasserhaushalt und Stickstoffgehalte eines Grundmoränenstandorts. Diss. TU Berlin

KREYSZIG, E. 1968: Statistische Methoden und ihre Anwendung. Vandenhoeck und Ruprecht, Göttingen

LISCHEID, G. 1992: Kritische Anmerkungen zur Ermittlung von Stoffflüssen mittels Saugkerzen. Teil II: Elementgehalt in der Bodenlösung und im Vorfluter eines Einzugsgebietes. Mitteilgn. Dtsch. Bodenkundl. Gesellsch. 67, 91-94

LÖPMAIER, F.-J. 1994: Berechnung der Bodenfeuchte und Verdunstung mittels agrarmeteorologischer Modelle. Z. f. Bewässerungswirtschaft, 29, 2, 157-167

MAIDL, F.X. & H. BRUNNER 1995: Strategien zur gewässerschonenden Landbewirtschaftung in Bayern. Arbeitspapier, Hiltrup, Nr. 18252

MALICKI, M.A., R. PLAGGE & C.H. ROTH 1994: Reduction of matrix on TDR soil moisture readings and its elimination. Symposium on Time Domain Reflectrometry in Environmental, Infrastructure and Mining Applications, Evanston (Chicago) USA, United states Department of Interior Bureau of Mines, Special Publication, SP19-94, 105-114

MANDERSCHEID, B. 1996: Heterogenität und Bestimmungsfehler bei Wasserflüssen und Stoffkonzentrationen in Waldökosystemen und deren Auswirkung auf die Stoffbilanzierung. Mitteilgn. Dtsch. Bodenkundl. Gesellsch. 79 205-208

MERBACH, W. & A. WURBS 1997: Zeitweilige N-Konservierung durch Winterzwischenfrüchte und der Einfluß auf Folgefrüchte und N-Verlagerung. VDLUFA-Schriftenreihe, 46, 395-398

MÖLLER, K. & H.J. REENTS 1999: Einfluß verschiedener Zwischenfrüchte nach Körnererbsen auf die Nitratgehalte im Boden und das Wachstum der Folgefrucht (Kartoffeln, Weizen). In: Beiträge zur 5. Wissenschaftstagung zum Ökologischen Landbau „Vom Rand zur Mitte“, Humboldt-Universität, Berlin, 109-112

MONTENEGRO, H. & B. HERRLING 1992: Ermittlung bodenhydraulischer Parameter und Modellierung der Sickerwasserbewegung. IHW-Inst. F. Hydrologie und Wasserwirtschaft, Univ. Karlsruhe, Heft 41, 491-529

MUALEM, Y. 1976: A new model for predicting hydraulic conductivity in porous media. Water Resour. Res. 12, 513-522

NYBORG, M. & S.S. MAHLI 1989: Effect of zero and conventional tillage on barley yield and nitrate nitrogen content, moisture and temperature of soil in north-central Alberta, Soil Tillage Res. 15, 1-9

PLAGGE, R., C.H. ROTH & M. RENGER 1991: Hysteresis der ungesättigten Wasserleitfähigkeit und der pF-Kurve unter instationären Beedingungen. Mitteilgn. Dtsch. Bodenkundl. Gesellsch. 66, 201-204

PLAGGE, R., C.H. ROTH & M. RENGER 1997: Bestimmung des Wassergehaltes von Böden mit Hilfe der Time Domain Reflektrometry (TDR). Z. f. Kulturtechnik und Landentwicklung 38, 36-42

POWLSON, D.S. 1980: Effect of cultivation on the mineralization of nitrogen in soil. Plant Soil, 57, 151-153

RENGER, M., O. STREBEL & W. GIESEL 1974: Beurteilung bodenkundlicher, kulturtechnischer und hydrologischer Fragen mit Hilfe von klimatischer Wasserbilanz und bodenphysikalischen Kennwerten. Z. f. Kulturtechnik und Flurbereinigung, 15, 353-366

RENGER, M., O. STREBEL, W. GIESEL & J.v. HOYNINGEN-HUENE 1975: Bestimmung der Wasserhaushaltskomponenten von Böden (Verfahrensvergleich). Mitteilgn. Dtsch. Bodenkundl. Gesellsch. 22, 113-120

RENGER, M., O. STREBEL, W. GIESEL & S. LORCH 1970: Erste Ergebnisse zur quantitativen Erfassung der Wasserhaushaltskomponenten in der ungesättigten Bodenzone. Z. Pflanzenernähr. Bodenk. 126, 15-33

RENGER, M. & G. WESSOLEK 1992: Qualitative und quantitative Aspekte der Nitratverlagerung. Mitteilgn. Dtsch. Bodenkundl. Gesellsch. 68, 111-114

ROTH C.H., M.A. MALICKI & R. PLAGGE 1992: Empirical evaluation of the relationship between soil dielectric constant-water content as the basis for calibration of soil moisture measurements by TDR. J. Soil Sc. 43, 1-13

RÜCK, F. 1993: Standortspezifische Stickstoffmineralisierung, jahreszeitlicher Verlauf des Mineralstickstoffvorrates und der Nitratauswaschung in Böden des Wasserschutzgebietes Donauried. Hohenheimer Bodenkundliche Hefte, Heft 15

SAXTON, K.E., W.J. RAWLS, J.S. ROMBERGER & R.I. PAPENDICK 1986: Estimating soil-water characteristics from texture. Soil Sci. Amer. J. 50, 1031-1036

SCHEFFER, F. & P. SCHACHTSCHABEL 1992: Lehrbuch der Bodenkunde. 13. Aufl., 491 S., G. Enke Verlag, Stuttgart

SCHMALER, K., G. BERGER & K. RICHTER 1994: Stickstoffkonservierung durch Zwischenfrüchte. Wiss. Zeitschrift der Humboldt-Universität zu Berlin, Reihe Agrarwissenschaften, 47-52

SCHMID E., F. SINABELL & P. LIEBHARD 2004: Effects of Reduced Tillage Systems and Cover Crops on Sugar Beet Yield and Quality, Ground Water Recharge and Nitrogen Leaching in the Pannonie Region Marchfeld, Austria. Pflanzenbauwissenschaften 8 (1), 1-9

SCHMIDT[a], J.P. 1992: Kritische Anmerkungen zur Ermittlung von Stoffflüssen mittels Saugkerzen: Teil I: Theoretische Aspekte der Bodenlösungsgewinnung. Mitteilgn. Dtsch. Bodenkundl. Gesellsch. 67, 143-146

SCHMIDT, O., F. ELLMER & K. SCHMALER 2000: Stoffkonzentrationen in Bodenlösungen bei verschiedenen Fruchtfolgen auf einem sandigen Standort 2. Mitteilung: Nitratverlagerung. Arch.Acker- Pfl. Boden. 45, 35-49

SCHMIDT[b], S. 1992: Kritische Anmerkungen zur Ermittlung von Stoffflüssen mittels Saugkerzen: Teil III: Strukturanalyse von Konzentrationsverläufen in der Bodenlösung und im Gebietsabfluß. Mitteilgn. Dtsch. Bodenkundl. Gesellsch. 67, 151-154

SCHNÜBBE, W. 1992: Zwischenfrüchte: Benötigen sie eine Starhilfe? Neue Landwirtschaft 7, 53

SIMON, W., B. HUWE & R.R. VAN DER PLOEG 1988: Die Abschätzung von Nitratausträgen mit Hilfe von N_{min}-Daten. Z. Pflanzenernähr. Bodenk. 151, 289-294

SOERENSEN, J.N. 1992: Effect of catch crops on the content of soil mineral nitrogen before and after winter leaching. Z. Pflanzenernähr. Bodenk. 155, 61-66

SPONAGEL, H. 1980: Zur Bestimmung der realen Evapotranspiration landwirtschaftlicher Kulturpflanzen. Geolog. Jb., Reihe F, Heft 9, Hannover

STENBERG, M., H. ARONSSON, B. LINDÉN; T. RYDBERG & A. GUSTAFSON 1999: Soil mineral nitrogen and nitrate leaching losses in soil tillage systems combined with a catch crop. Soil Tillage Res. 50, 115-125

STREBEL, O. & M. RENGER 1976: Kapillarer Aufstieg und Stoffbilanzen unterhalb des Wurzelraumes. Mitteilgn. Dtsch. Bodenkundl. Gesellsch. 23, 89-94

STREBEL, O., M. RENGER & W. GIESEL 1973: Bestimmung des vertikalen Transports von löslichen Stoffen im wasserungesättigten Boden. Wasser und Boden 8, 251-253

STREBEL, O., W.H.M. DUYNISVELD & J. BÖTTCHER 1986: Vertikaler Stofftransport im Boden und Stoffverluste aus dem Wurzelraum ins Grundwasser. Kali-Briefe (Büntehof) 18(2)

TEIWES, K., T. LICKFETT & E. PRZEMECK 1996: Stickstoffverlagerung in abgestuft extensivierten Rapsfruchtfolgen. Agribiol. Res. 49, 4, 299-306

TIMMERMANN, F., U. FEGER & E. WELTE 1975: Sickerwasserberechnung und Nährstoffgehaltsmessungen in der abgesaugten Bodenlösung zur Bestimmung der Nährstoffauswaschung auf einem Lößlehmstandort. Mitteilgn. Dtsch. Bodenkundl. Gesellsch. 22, 251-270

TOPP, G.C., J.J. DAVIS & A.P. ANNAN 1980: Electromagnetic determination of soil water: Measurements in coaxial transmission lines. Water Resour. Res. 16, 579-582

TYLER, D.D. & O.W. THOMAS 1977: Lysimeter measurements of nitrate and chloride losses from soil under conventional and no-tillage corn. J. Environ. Qual. 6, 63-66

VAN DER PLOEG, R.R. & B. HUWE 1988: Die Bedeutung von herbstlichen N_{min}-Werten für die winterlichen Nitratausträge. Mitteilgn. Dtsch. Bodenkundl. Gesellsch. 57, 89-94

VAN DER PLOEG, R.R. & P. BENECKE 1981: Evaluation of one- and two dimensional water flow models and field validation of unsaturated water flow. In: Ed. By R. K. Iskandar, Wiley Interscience N.Y. 92-114

VAN EIMERN, J. & H. HÄCKEL 1979: Wetter- und Klimakunde. Verlag Eugen Ulmer, Stuttgart

VAN GENUCHTEN, M.T. 1979: A closed form equation for predicting hydraulic conductivity of unsatured soils. Soil Sci. Amer. J. 44, 892-898

VDI Verein Deutscher Ingenieure 1993: VDI-Richtlinien: Meteorologische Messungen. VDI 3786-Blatt 13; VDI-Handbuch Reinhaltung der Luft, Band 1

WEGEHENKEL, M. 1998: Zum Einsatz von TRIME-TDR zur Messung der Bodenfeuchte auf leichten Sandböden. Z. Pflanzenernähr. Bodenk. 161 (5), 577-582

ZEPP, H. 1987: Wasserhaushalt und Verlagerung wasserlöslicher Stoffe in Lößdecken des Main-Taunus-Vorlandes. Arb. Rhein. Landesk. 104, 47-54

ZEPP, H. & H. ZAKOSEK 1985: Untersuchungen zum Bodenwasserhaushalt und zur Versickerung in mächtigen Lößdecken des Main-Taunus-Vorlandes. Mitteilgn. Dtsch. Bodenkundl. Gesellsch. 43/I, 317-322

8 Anhang

Verzeichnis der Tabellen und Abbildungen:

Tabellen: Seite

Tab. A1: Allgemeine Angaben und durchgeführte Untersuchungen im Versuchsjahr 1990/91 134

Tab. A2: Allgemeine Angaben und durchgeführte Untersuchungen im Versuchsjahr 1991/92 135

Tab. A3: Allgemeine Angaben und durchgeführte Untersuchungen im Versuchsjahr 1992/93 136

Tab. A4: Allgemeine Angaben und durchgeführte Untersuchungen im Versuchsjahr 1993/94 137

Tab. A5: Korrelationskoeffizienten zwischen dem vorwinterlichen Boden-N_{min} und berechneten N-Austrag für zwei Versuchsjahre in Abhängigkeit von der Bodenbedeckung für verschiedene Bodentiefen 138

Tab. A6: Korrelationskoeffizienten zwischen der Differenz aus dem vor- und nachwinterlichen Boden-N_{min} und berechneten N-Austrag für zwei Versuchsjahre in Abhängigkeit von der Bodenbedeckung für verschiedene Bodentiefen 138

Abbildungen:

Abb. A1: Messwerte und berechnete Beziehung zwischen absolutem Matrixpotential und Wassergehalt für den Horizont A_p (gefräst) 139

Abb. A2: Messwerte und berechnete Beziehung zwischen absolutem Matrixpotential und Wassergehalt für den Horizont A_p (gepflügt) 139

Abb. A3: Messwerte und berechnete Beziehung zwischen absolutem Matrixpotential und Wassergehalt für den Horizont A_l 140

Abb. A4: Messwerte und berechnete Beziehung zwischen absolutem Matrixpotential und Wassergehalt für den Horizont A_l/IIB_t 140

Abb. A5: Messwerte und berechnete Beziehung zwischen absolutem Matrixpotential und Wassergehalt für den Horizont IIB_t 141

Abb. A6: Verlauf des N-Austrages aus 60 cm Tiefe unter Brache und Zwischenfrucht bei unterschiedlicher N-Düngung und Bodenbearbeitung im Winterhalbjahr 1993/94 142

Abb. A7: Verlauf des N-Austrages aus 90 cm Tiefe unter Brache und Zwischenfrucht bei unterschiedlicher N-Düngung und Bodenbearbeitung im Winterhalbjahr 1993/94 143

Abb. A8: Verlauf des N-Austrages aus 120 cm Tiefe unter Brache und Zwischenfrucht bei unterschiedlicher N-Düngung und Bodenbearbeitung im Winterhalbjahr 1993/94 144

Tab. A1: Allgemeine Angaben und durchgeführte Untersuchungen im Versuchsjahr 1990/91

Allgemeine Angaben:

Schlagbezeichnung:	CII
Vorvorfrucht:	Kartoffel
Vorfrucht:	Wintergerste ohne Strohbergung
15.08.1990	Grunddüngung 120 kg K_2O u. 60 kg P_2O_5
16.08.1990	Bodenbearbeitung u. variantenbezogene N-Düngung
17.08.1990	Aussaat der Zwischenfrucht
bis 12.09.1990	Installation der Meßsonden
18.03.1991	Umbruch der Zwischenfrucht
26.03.1991	Aussaat des Sommerweizens
17.04.1991	N-Düngung des Sommerweizens (50 kg ha^{-1})
28.05.1991	N-Düngung des Sommerweizens (20 kg ha^{-1})
27.06.1991	N-Düngung des Sommerweizens (20 kg ha^{-1})
13.08.1991	Ernte des Sommerweizens

Durchgeführte Untersuchungen:

Nitratgehalt im Boden:		15.08.1990 15.11.1990 15.03.1991 15.05.1991 13./14.08.1991
Nitratgehalt im Bodenwasser:		18.09.1990 28.11.1990 05.12.1990 09.01.1991 21.01.1991
Pflanzenproben:	Winterrübsen	05.11.1990
	Sommerweizen	13.08.1991
Messungen des Bodenwasserpotentials:		Im Winterhalbjahr: 24 Meßtermine (vom 13.09.1990 bis 10.01.1991) Im Sommerhalbjahr: 35 Meßtermine (vom 29.04.1991 bis 05.08.1991)
Messungen des volumetrischen Wassergehaltes des Bodens:		Im Winterhalbjahr: erste Testmessungen Im Sommerhalbjahr: 35 Meßtermine (vom 29.04.1991-05.08.1991)

Tab. A2: Allgemeine Angaben und durchgeführte Untersuchungen im Versuchsjahr 1991/92

Allgemeine Angaben:

Schlagbezeichnung:	5
Vorvorfrucht:	Winterackerbohnen und Hülsenfrüchte (Sortiment)
Vorfrucht:	Wintergerste ohne Strohbergung
22.08.1991	Grunddüngung 120 kg K_2O u. 60 kg P_2O_5
22.08.1991	Bodenbearbeitung
23.08.1991	Aussaat der Zwischenfrucht
30.08.1991	variantenbezogene N-Düngung
bis 27.09.1991	Installation der Meßsonden
20.03.1992	Umbruch der Zwischenfrucht
19.04.1992	Aussaat des Sommerweizens
07.04.1992	N-Düngung des Sommerweizens (50 kg ha^{-1})
10.08.1992	Ernte des Sommerweizens

Durchgeführte Untersuchungen:

Nitratgehalt im Boden:		04.09.1991 17./18..10.1991 09.03.1992 25.06.1992
Nitratgehalt im Bodenwasser:		19.11.1991 10.01.1992 12.02.1992 26.2.1992 13.03.1992
Pflanzenproben:	Winterrübsen	14.11.1991 18.03.1992
	Sommerweizen	10.08.1992
Messungen des Bodenwasserpotentials:		Im Winterhalbjahr: 20 Meßtermine (vom 30.09.1991 bis 06.03.1992) Im Sommerhalbjahr: 10 Meßtermine (vom 26.05.1992 bis 29.06.1992)
Messungen des volumetrischen Wassergehaltes des Bodens:		Im Winterhalbjahr: 43 Meßtermine (vom 10.10.1991 bis 16.03.1992) Im Sommerhalbjahr: 9 Meßtermine (vom 26.05.1992 bis 26.06.1992)

Tab. A3: Allgemeine Angaben und durchgeführte Untersuchungen im Versuchsjahr 1992/93

Allgemeine Angaben:

Schlagbezeichnung:	CII
Vorvorfrucht:	Sommerweizen
Vorfrucht:	Kartoffel (370 dt ha^{-1} Stallmist zum 05.11.1991)
31.08.1992	Grunddüngung 120 kg K_2O u. 120 kg P_2O_5
31.08.1992	Bodenbearbeitung
04.09.1992	Aussaat der Zwischenfrucht
10.09.1992	variantenbezogene N-Düngung
bis 13.11.1992	Installation der Meßsonden
25.03.1993	Umbruch der Zwischenfrucht
05.04.1993	N-Düngung des Sommerweizens (55 kg ha^{-1})
06.04.1993	Aussaat des Sommerweizens
19.08.1993	Ernte des Sommerweizens

Durchgeführte Untersuchungen:

Nitratgehalt im Boden:		10.09.1992 25./26.11.1992 16.03.1993 10.06.1993 23./24.08.1993
Nitratgehalt im Bodenwasser:		04.12.1992 10.12.1992 17.03.1993
Pflanzenproben:	Winterrübsen Sommerweizen	10.03.1993 21./22.06.1993 19.08.1993
Messungen des Bodenwasserpotentials:		Im Winterhalbjahr: 19 Meßtermine (vom 16.11.1992 bis 19.03.1993) Im Sommerhalbjahr: 20 Meßtermine (vom 07.05.1993 bis 17.08.1993)
Messungen des volumetrischen Wassergehaltes des Bodens:		Im Winterhalbjahr: 19 Meßtermine (vom 24.11.1992 bis 18.03.1993) Im Sommerhalbjahr: 18 Meßtermine (vom 14.05.1993 bis 16.08.1993)

Tab. A4: Allgemeine Angaben und durchgeführte Untersuchungen im Versuchsjahr 1993/94

Allgemeine Angaben:

Schlagbezeichnung:	5
Vorvorfrucht:	Sommerweizen
Vorfrucht:	Kartoffel (250 dt ha^{-1} Stallmist zum 03.11.1992)
26.08.1993	Bodenbearbeitung
27.08.1993	Grunddüngung 120 kg K_2O u. 60 kg P_2O_5
30.08.1993	Aussaat der Zwischenfrucht
07.09.1993	variantenbezogene N-Düngung
bis 15.10.1993	Installation der Meßsonden
07.04.1994	Umbruch der Zwischenfrucht
20.04.1994	Aussaat des Sommerweizens
20.04.1994	N-Düngung des Sommerweizens (50 kg ha^{-1})
03.08.1994	Ernte des Sommerweizens

Durchgeführte Untersuchungen:

Nitratgehalt im Boden:		13.09.1993 18.10.1993 28.12.1993 25./28.3.1994 23./27.06.1994 08./15.08.1994
Nitratgehalt im Bodenwasser:		20.10.1993 08.12.1993 07.01.1994 27.01.1994 10.02.1994 10.03.1994
Pflanzenproben:	Winterrübsen	17.12.1993
	Sommerweizen	21.06.1994 03.08.1994
Messungen des Bodenwasserpotentials:		Im Winterhalbjahr: 19 Meßtermine (vom 18.10.1993 bis 17.03.1994) Im Sommerhalbjahr: 15 Meßtermine (vom 27.05.1994 bis 29.07.1994)
Messungen des volumetrischen Wassergehaltes des Bodens:		Im Winterhalbjahr: 37 Meßtermine (vom 15.10.1993 bis 17.03.1994) Im Sommerhalbjahr: 16 Meßtermine (vom 27.05.1994 bis 02.08.1994)

Tab. A5: Korrelationskoeffizienten zwischen dem vorwinterlichen Boden-N_{min} und berechneten N-Austrag (Ansatz C vrgl. Kap. 2.3.4) für zwei Versuchsjahre in Abhängigkeit von der Bodenbedeckung für verschiedene Bodentiefen

Versuchsjahr	Bodentiefe	**Bodenbedeckung**	
		Brache (n=24)	**Winterrübsen** (n=36)
1991/92	0-30 cm	**0,18**	**0,18**
	0-60 cm	**0,28**	**0,19**
	0-90 cm	**0,13**	**0,54****
1993/94	0-30 cm	**0,68****	**0,64****
	0-60 cm	**0,24**	**0,09**
	0-90 cm	**0,03**	**0,49****

** Signifikant bei P = 1 %

Tab. A6: Korrelationskoeffizienten zwischen der Differenz aus dem vor- und nachwinterlichen Boden-N_{min} und berechneten N-Austrag (Ansatz C vrgl. Kap. 2.3.4) für zwei Versuchsjahre in Abhängigkeit von der Bodenbedeckung für verschiedene Bodentiefen

Versuchsjahr	Bodentiefe	**Bodenbedeckung**	
		Brache (n=24)	**Winterrübsen** (n=36)
1991/92	0-30 cm	**0,16**	**0,17**
	0-60 cm	**0,26**	**0,06**
	0-90 cm	**0,09**	**0,32**
1993/94	0-30 cm	**0,68****	**0,63****
	0-60 cm	**0,20**	**0,04**
	0-90 cm	**0,19**	**0,44****

** Signifikant bei P = 1 %

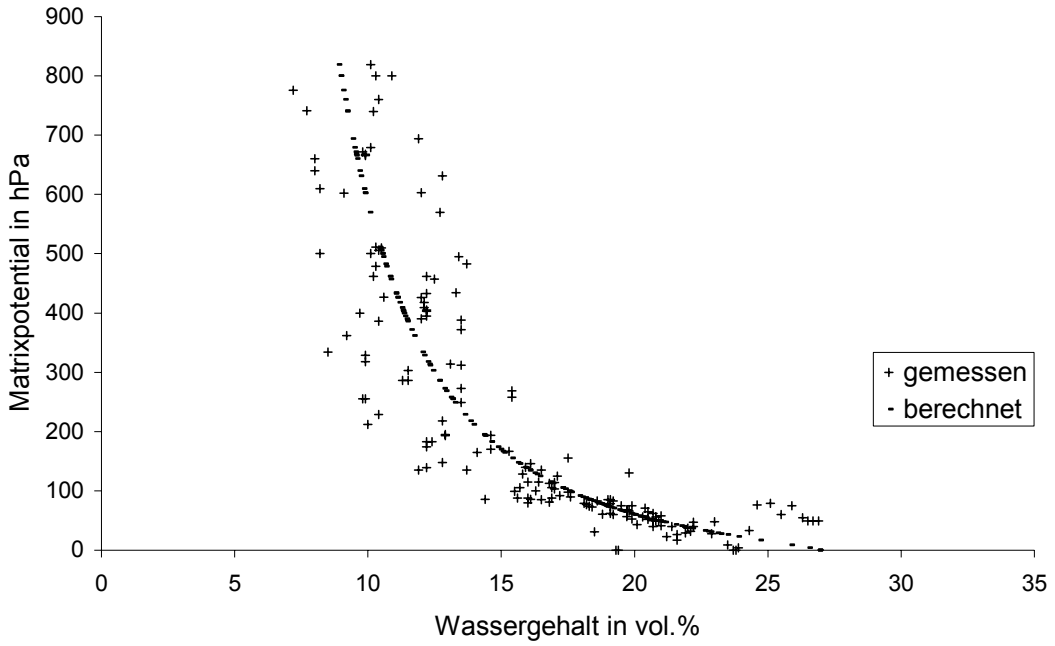


Abb. A1: Messwerte und berechnete Beziehung zwischen absolutem Matrixpotential und Wassergehalt für den Horizont A_p (gefräst) mit:

$R^2 = 0{,}889^{**}$	$\theta s = 26{,}9$	$n = 1{,}3472$
$N = 163$	$m = 0{,}2577$	$\alpha = 0{,}0296$

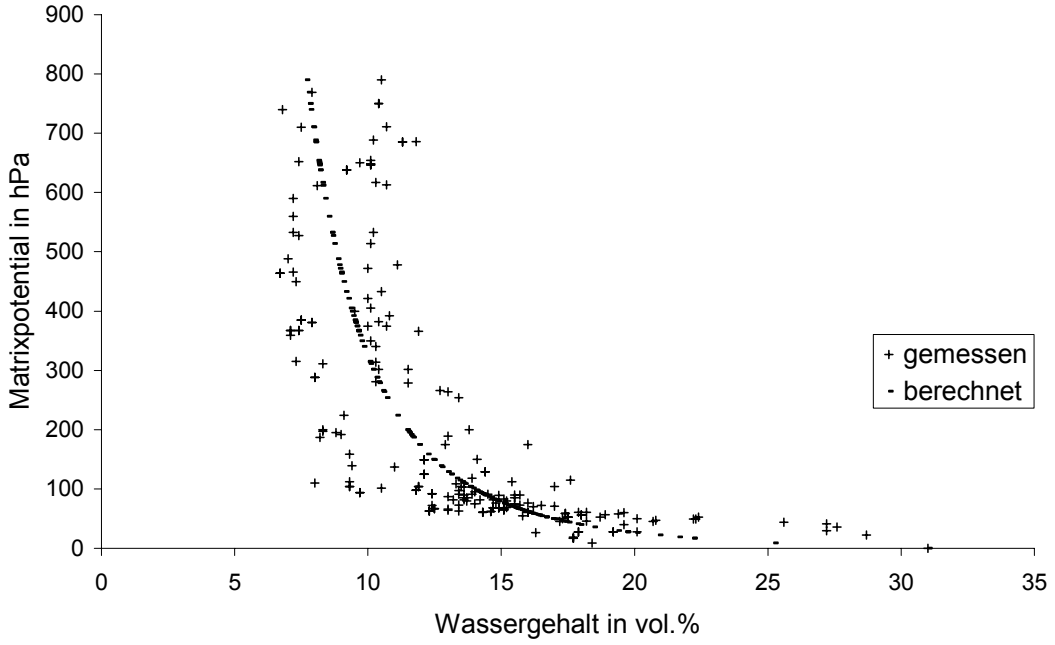


Abb. A2: Messwerte und berechnete Beziehung zwischen absolutem Matrixpotential und Wassergehalt für den Horizont A_p (gepflügt) mit:

$R^2 = 0{,}823^{**}$	$\theta s = 31{,}0$	$n = 1{,}2919$
$N = 198$	$m = 0{,}226$	$\alpha = 0{,}1513$

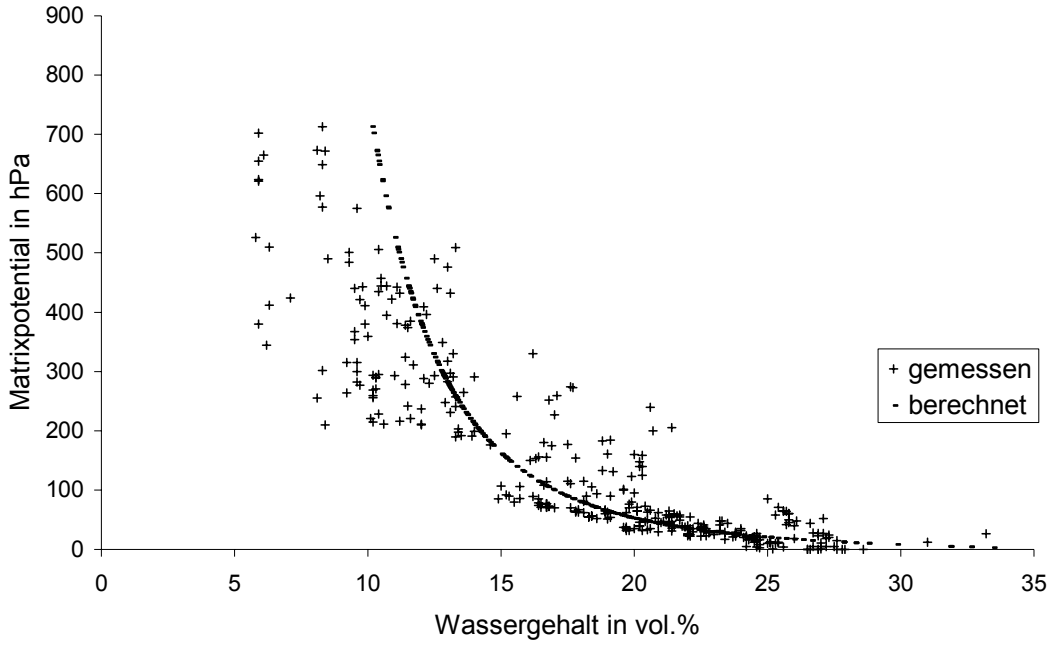


Abb. A3: Messwerte und berechnete Beziehung zwischen absolutem Matrixpotential und Wassergehalt für den Horizont A_l mit:

$R^2 = 0{,}861^{**}$	$\theta s = 34{,}0$	$n = 1{,}651$
$N = 334$	$m = 0{,}2095$	$\alpha = 0{,}1677$

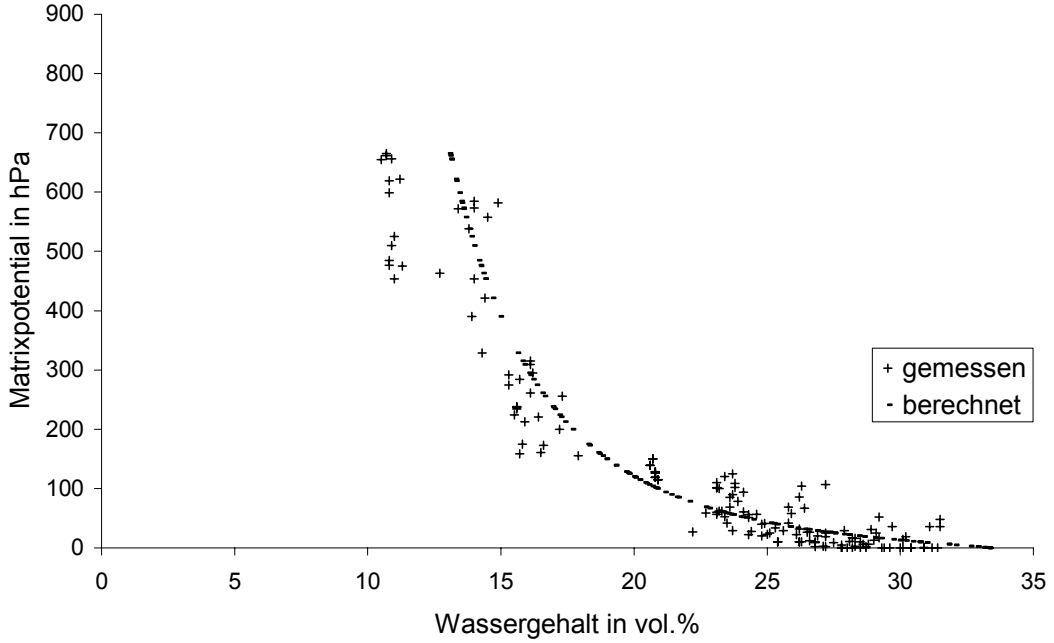


Abb. A4: Messwerte und berechnete Beziehung zwischen absolutem Matrixpotential und Wassergehalt für den Horizont A_l/IIB_t mit:

$R^2 = 0{,}912^{**}$	$\theta s = 33{,}3$	$n = 1{,}2577$
$N = 160$	$m = 0{,}2049$	$\alpha = 0{,}05669$

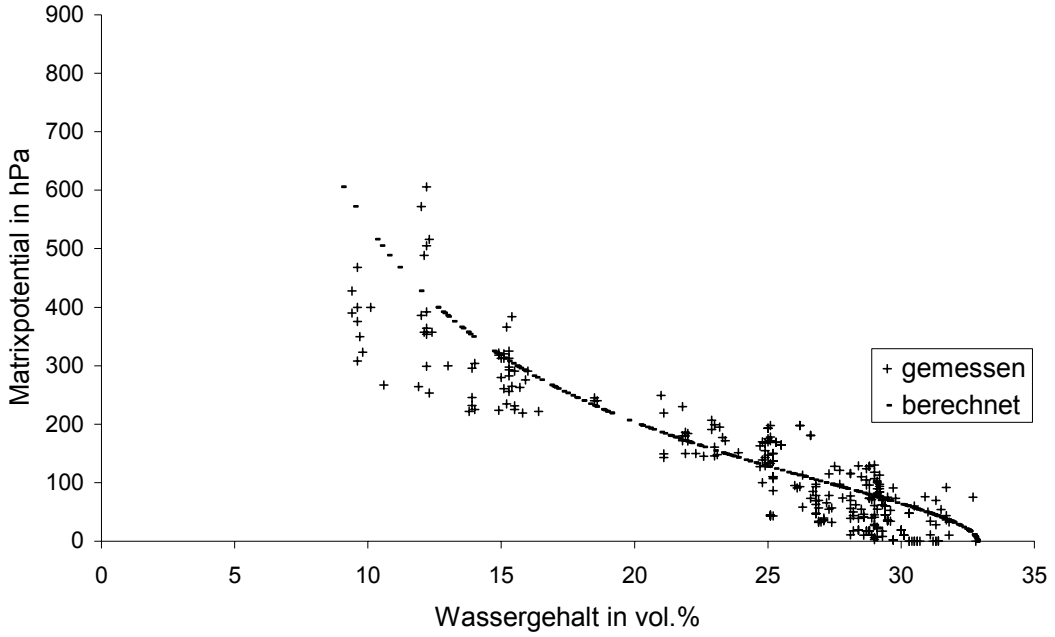
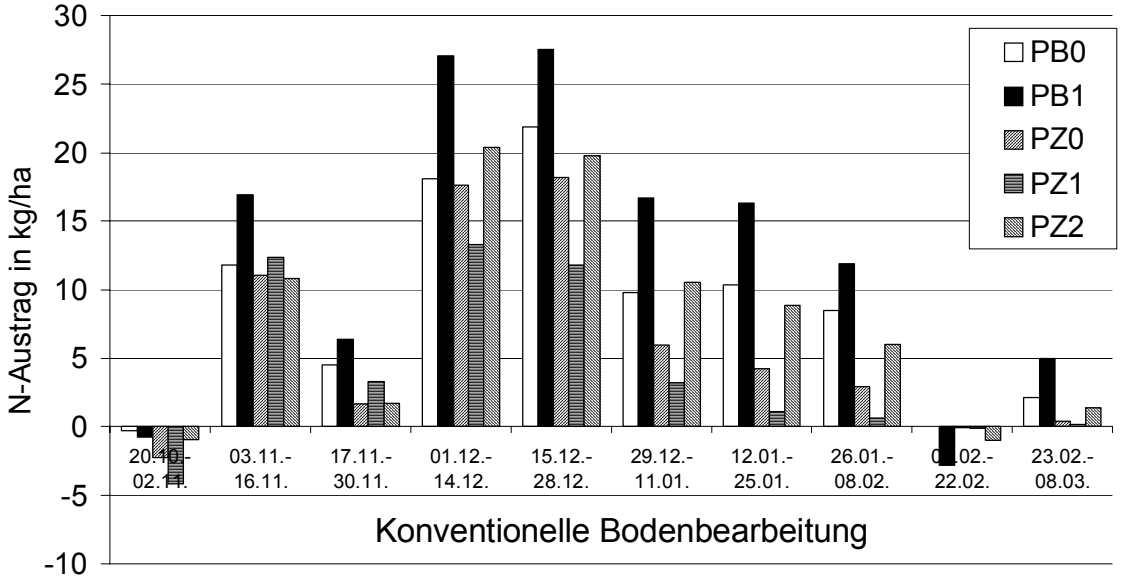


Abb. A5: Messwerte und berechnete Beziehung zwischen absolutem Matrixpotential und Wassergehalt für den Horizont IIB_t mit:

$R^2 = 0{,}919^{**}$	$\theta s = 32{,}8$	$n = 1{,}8793$
$N = 274$	$m = 0{,}4679$	$\alpha = 0{,}0069$



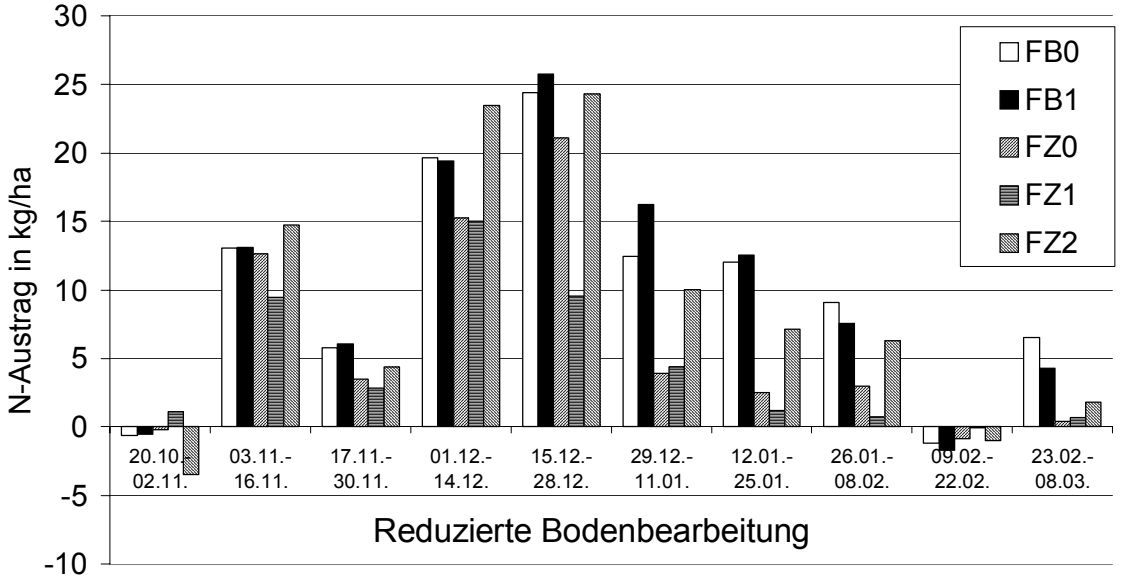
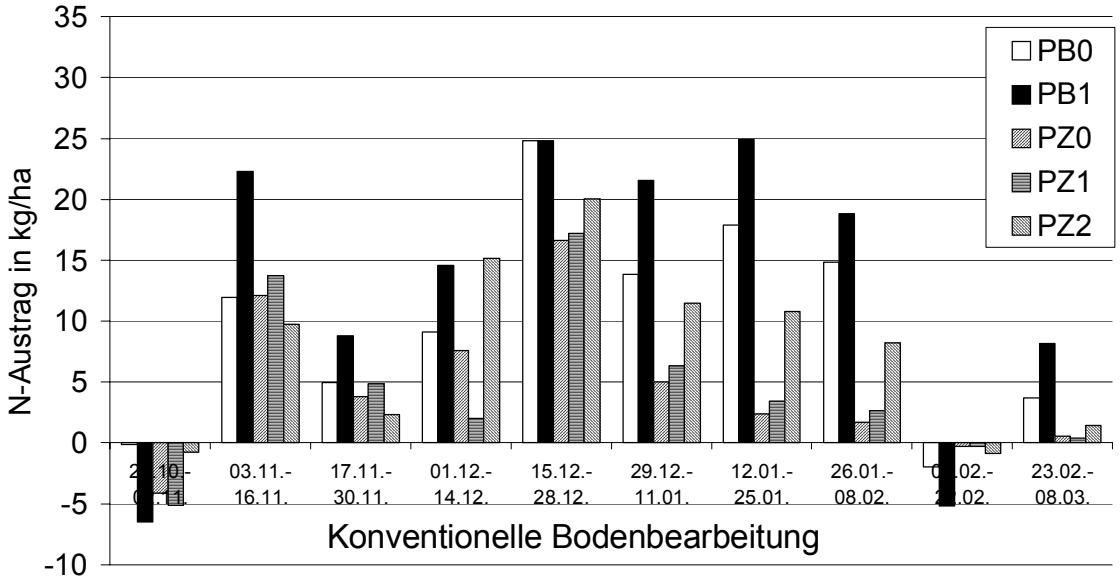


Abb. A6: Verlauf des N-Austrages aus 60 cm Tiefe unter Brache und Zwischenfrucht bei unterschiedlicher N-Düngung und Bodenbearbeitung im Winterhalbjahr 1993/94 (n=6)

P: gepflügt **B:** Brache **0:** 0 kg N/ha **1:** 50 kg N/ha **2:** 100 kg N/ha
F: gefräst **Z:** Zwischenfrucht



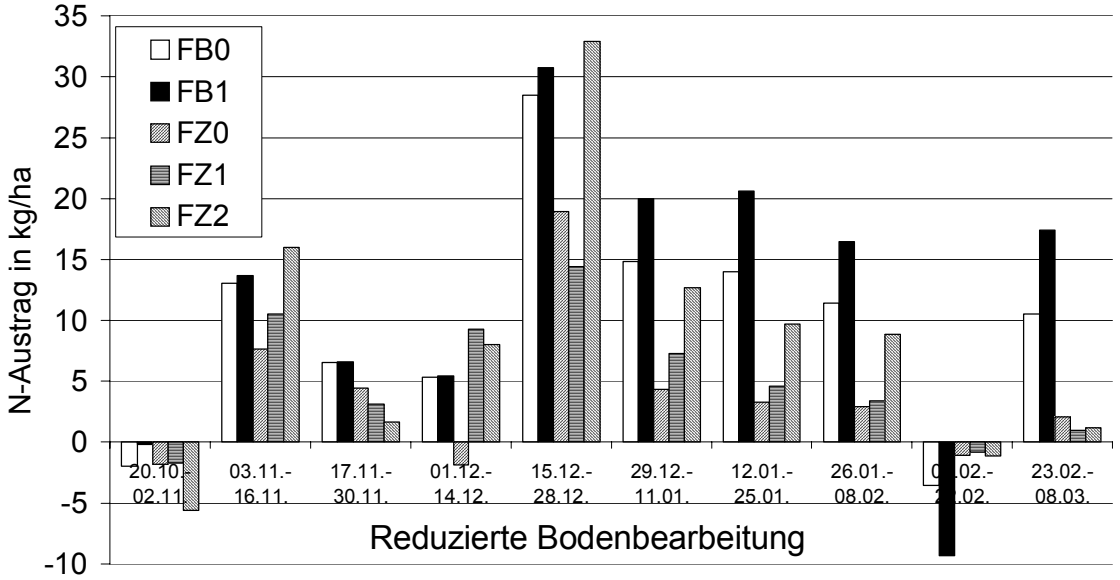
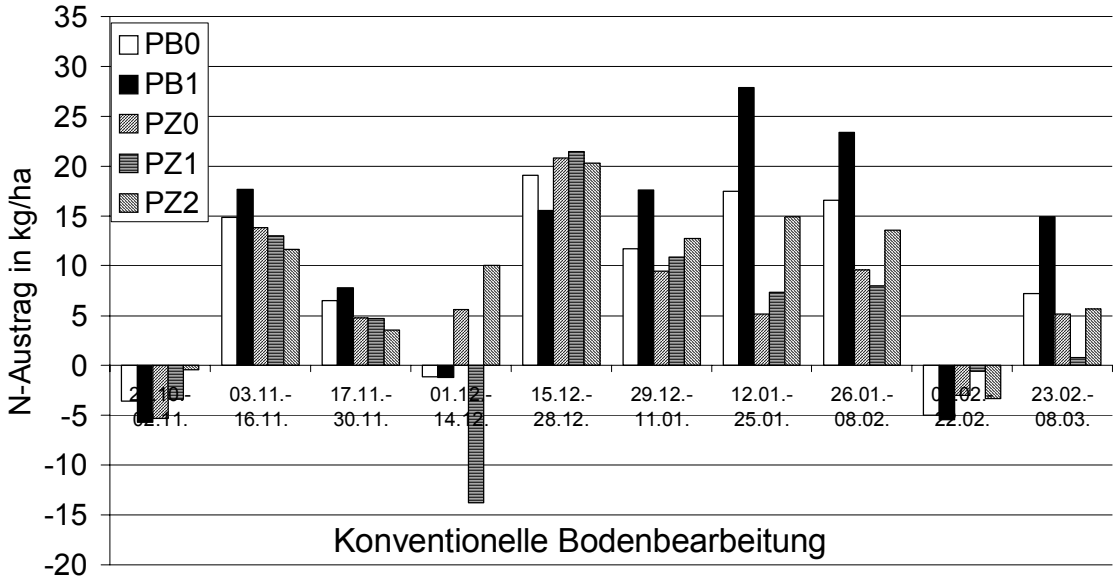


Abb. A7: Verlauf des N-Austrages aus 90 cm Tiefe unter Brache und Zwischenfrucht bei unterschiedlicher N-Düngung und Bodenbearbeitung im Winterhalbjahr 1993/94 (n=6)

P: gepflügt **B:** Brache **0:** 0 kg N/ha **1:** 50 kg N/ha **2:** 100 kg N/ha
F: gefräst **Z:** Zwischenfrucht



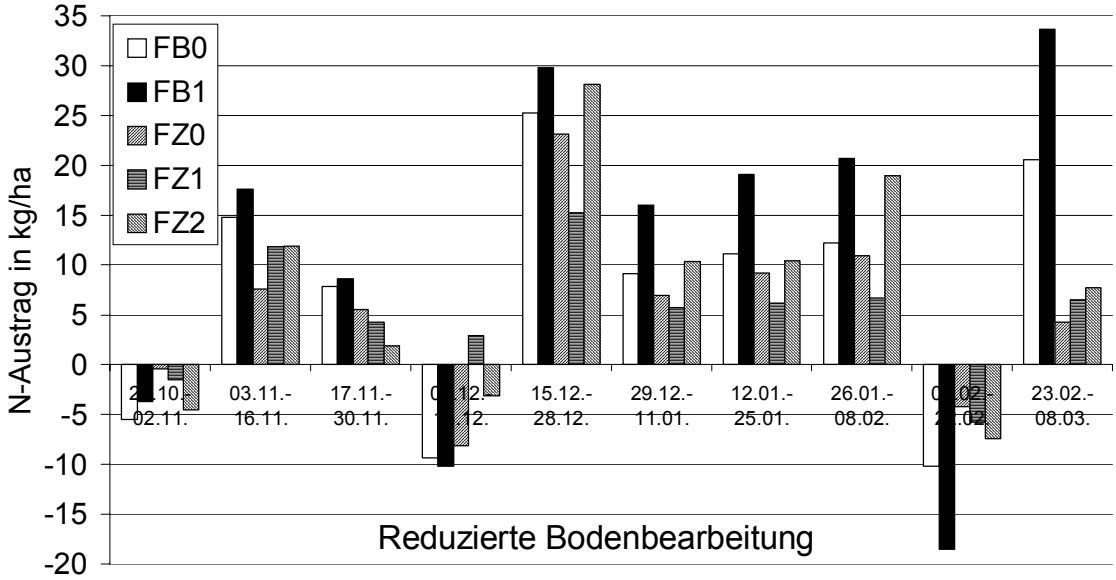


Abb. A8: Verlauf des N-Austrages aus 120 cm Tiefe unter Brache und Zwischenfrucht bei unterschiedlicher N-Düngung und Bodenbearbeitung im Winterhalbjahr 1993/94 (n=6)

P: gepflügt **B:** Brache **0:** 0 kg N/ha **1:** 50 kg N/ha **2:** 100 kg N/ha
F: gefräst **Z:** Zwischenfrucht

Danksagung

Ich danke Herrn Prof. Dr. H. Herzog für die Überlassung des interessanten Themas und die stets anregende und kritische Begleitung dieser Arbeit sowie für seine Geduld und sein Verständnis ganz herzlich. Herrn Dipl.-Ing. agr. R. Konrad danke ich für seine engagierte Vorbereitung des Projektes und die freundschaftliche Zusammenarbeit während der Durchführung. Für die kompetente Beratung bezüglich der bodenkundlichen Aspekte danke ich Herrn Dr. R. Plagge und Herrn Dr. C. Roth von der TU Berlin.

Weiterhin gilt mein Dank Frau W. Mierke und Frau R. Loepper für die verlässliche und tatkräftige Hilfe bei der Datenerhebung und der Analyse des umfangreichen Probenmaterials. Dem Koordinator der Versuchsstation Pflanzenbauwissenschaften Herrn Dr. W. Köhn, dem Leiter der Versuchsstation Dahlem Herrn J. Schmidt, sowie den Mitarbeitern Herrn U. Bösche und Herrn M. Wege danke ich für die reibungslose Zusammenarbeit im Rahmen der Durchführung der Feldversuche.

Herzlicher Dank gilt auch meinen ehemaligen Arbeitskollegen und Mitstreitern der Fachgebiete Pflanzenbau in den Tropen und Subtropen, Pflanzenbau und Obstbau sowie meinen Nachbarn und meiner Mutter für die vielfältige Unterstützung.

Der deutschen Forschungsgemeinschaft danke ich für die finanzielle Unterstützung der Untersuchungen.