

Aus dem Institut für Pflanzenernährung und Bodenkunde
der Christian-Albrechts-Universität zu Kiel
Fachgebiet Pflanzenernährung

**Einfluß von N-Düngung und Bodenbearbeitung auf
Wurzelwachstumsdynamik, ^{14}C -Assimilatverteilung
und Rhizodeposition von Winterraps (*Brassica napus* L.)**

Dissertation
zur Erlangung des Doktorgrades
der Ernährungs- und Agrarwissenschaftlichen Fakultät
der Christian-Albrechts-Universität zu Kiel

vorgelegt von

Dipl.-Geogr. Johannes Max
aus
Frankfurt am Main

Kiel 2004

Dekan:
Erster Berichterstatter
Zweiter Berichterstatter

Prof. Dr. F. Taube
Prof. Dr. B. Sattelmacher
Prof. Dr. H. Kage

Tag der mündlichen Prüfung

29.04.2004

Inhaltsverzeichnis

	Seite
Tabellenverzeichnis	4
Abbildungsverzeichnis	6
verwendete Abkürzungen	11
Teil 1: Allgemeine Einführung - Material und Methoden	12
1. Einleitung	12
2. Material und Methoden	15
2.1. Versuchsstandort	15
2.1.1. Lage und naturräumliche Einordnung	15
2.1.2. Geologie und Relief	15
2.1.3. Klima	16
2.1.4. Boden	19
2.2. Versuchsanordnung, Bewirtschaftungsmaßnahmen und Beprobungsschemata	21
2.3. Bestimmungsmethoden – Schätzung des Netto-Wurzelwachstums	26
2.3.1. Probenahme und Auswaschen der Wurzeln	26
2.3.2. Schätzung der Wurzellänge (Intersektionsmethode)	28
2.3.3. Bestimmung der Wurzelrockenmasse	29
2.3.4. Berechnung von spezifischer Wurzellänge und Sproß/Wurzel-Verhältnis	29
2.4. ¹⁴ C-Pulsmarkierung	30
2.4.1. Versuchsaufbau	30
2.4.2. Vorgehensweise bei der ¹⁴ C-Pulsmarkierung	32
2.4.3. Probenahme, Aufbereitung der Proben und Bestimmung der ¹⁴ C-Aktivität	34
2.5. Statistische Auswertung	35
3. Literatur	36
Teil 2: Teil 2: Vergleich der Wurzelwachstumodynamik der Kulturarten Wintergerste, Winterweizen und Winterraps und ihrer Beeinflussung durch N-Düngung und Bodenbearbeitung	40
1. Einleitung	40
2. Witterungsverlauf	41
3. Ergebnisse	42
3.1. Wintergerste	42
3.2. Winterweizen	46
3.3. Winterraps	50
3.4. Unterschiede zwischen den Kulturarten	55
4. Diskussion	56
4.1. Tiefenverteilung der Wurzeln	57
4.2. Einfluß der Stickstoffdüngung	57
4.3. Einfluß der Bodenbearbeitung	60
4.4. Unterschiede zwischen den Kulturpflanzenarten	63
5. Literatur	65

Teil 3:	Einfluß von N-Düngung und Bodenbearbeitung auf die Durchwurzelungs- dynamik von Winterraps (<i>Brassica Napus</i> L.)	70
1.	Einleitung	70
2.	Witterungsverlauf	71
3.	Ergebnisse	71
3.1.	Versuchsjahr 1997	71
3.1.1.	Wurzelentwicklung	72
3.2.	Versuchsjahr 1998	80
3.2.1.	Wurzelentwicklung	80
3.2.2.	Sproßentwicklung	96
3.2.3.	Sproß/Wurzel-Verhältnis	98
3.3.	Versuchsjahr 1999	100
3.3.1.	Wurzelentwicklung	101
3.4.	Erträge (1997-1999)	106
4.	Diskussion	107
4.1.	Bestimmungsmethoden	107
4.2.	Wurzelentwicklung	109
4.2.1.	Tiefenverteilung der Wurzeln	109
4.2.2.	Quantität der Durchwurzelung	110
4.2.3.	Zeitlicher Verlauf der Wurzelentwicklung	124
4.3.	Sproß-Wurzel-Relationen	129
5.	Literatur	131
Teil 4:	Einfluß von N-Düngung und Bodenbearbeitung auf ¹⁴C-Assimilatverteilung, Wurzelumsatz und Rhizodeposition bei Winterraps (<i>Brassica napus</i> L.)	142
1.	Einleitung	142
2.	Ergebnisse und Diskussion	148
2.1.	Pflanzenentwicklung	148
2.2.	Verteilung der ¹⁴ C-markierten Assimilate	148
2.3.	Versuch 1: Einfluß der Zeitdauer nach ¹⁴ C-Pulsmarkierung	150
2.3.1.	Einfluß der Zeitdauer nach ¹⁴ C-Pulsmarkierung	150
2.4.	Versuch 2: Einfluß von N-Düngung und Bodenbearbeitung	160
2.4.1.	Einfluß der N-Düngung	160
2.4.2.	Einfluß der Bodenbearbeitung	168
2.5.	Versuch 3: ¹⁴ C in neu gebildeten Wurzeln	173
2.5.1.	Verteilung der ¹⁴ C-markierten Assimilate	174
2.5.2.	Transfer retranslozierter ¹⁴ C-Verbindungen in neu gebildete Wurzeln	186
2.6.	Berechnungen zur Schätzung von Wurzelumsatz und Rhizodeposition	177
3.	Literatur	184
	Zusammenfassung	190
	Summary	192

Tabellenverzeichnis

	Seite
Tabelle 1.1	Niederschläge und Temperaturen in Schleswig-Holstein (langjährige monatliche Mittelwerte, Normalperiode 1961-1990) 16
Tabelle 1.2	Witterungsverlauf im Untersuchungszeitraum..... 18
Tabelle 1.3	Bodentypen und Bodenarten der Versuchspartzen..... 19
Tabelle 1.4	Pseudogley-Parabraunerde (SS-LL): Profil und physikalisch- chemische Eigenschaften..... 20
Tabelle 1.5	Pseudogley Kolluvisol (SS-YK): Profil und physikalisch-chemische Eigenschaften 20
Tabelle 1.6	Übersicht über die ausgewählten Behandlungsvarianten 22
Tabelle 1.7	Bewirtschaftungsmaßnahmen auf Schlag 1 (1996/97 Winterraps, Sorte <i>Falcon</i>)..... 23
Tabelle 1.8	Bewirtschaftungsmaßnahmen auf Schlag 2 (1996/97 Winterweizen, Sorte <i>Orestis</i>)..... 24
Tabelle 1.9	Bewirtschaftungsmaßnahmen auf Schlag 3 (1996/97 Wintergerste, Sorte <i>Alpaca</i>)..... 24
Tabelle 1.10	Bewirtschaftungsmaßnahmen auf Schlag 5 (1997/98 Winterraps, Sorte <i>Falcon</i>)..... 25
Tabelle 1.11	Bewirtschaftungsmaßnahmen auf Schlag 2 (1998/99 Winterraps, Sorte <i>Falcon</i>)..... 25
Tabelle 1.12	Übersicht über die Beprobungstermine (Winterraps)..... 26
Tabelle 1.13	Übersicht über die Beprobungstermine (Wintergerste und Winterweizen) 26
Tabelle 1.14	Übersicht über die ausgewählten Behandlungsvarianten 30
Tabelle 4.1	Einfluß der N-Düngung auf die ¹⁴ C-Wiederfindungsraten im System Pflanze-Boden 3 bzw. 11 Wochen nach ¹⁴ C-Pulsmarkierung zum Beginn der Rapsblüte (5.5.1998)..... 161
Tabelle 4.2	Einfluß der N-Düngung auf die Verteilung ¹⁴ C-markierter Assimilate auf die Sproßorgane 3 bzw. 11 Wochen nach ¹⁴ C-Pulsmarkierung zum Beginn der Rapsblüte (5.5.1998)..... 163
Tabelle 4.3	Einfluß der N-Düngung auf die Verteilung der ins Wurzelsystem transferierten, ¹⁴ C-markierten Assimilate 3 bzw. 11 Wochen nach ¹⁴ C-Pulsmarkierung zum Beginn der Rapsblüte (5.5.1998)..... 165
Tabelle 4.4	Einfluß der Bodenbearbeitung auf die ¹⁴ C-Wiederfindungsraten im System Pflanze-Boden 3 bzw. 11 Wochen nach ¹⁴ C-Pulsmarkierung zum Beginn der Rapsblüte (5.5.1998)..... 168

Tabelle 4.5	Einfluß der Bodenbearbeitung auf die Verteilung ^{14}C -markierter Assimilate auf die Sproßorgane 3 bzw. 11 Wochen nach ^{14}C -Pulsmarkierung zum Beginn der Rapsblüte (5.5.1998).....	170
Tabelle 4.6	Einfluß der Bodenbearbeitung auf die Verteilung der ins Wurzelsystem transferierten ^{14}C -markierten Assimilate 3 bzw. 11 Wochen nach ^{14}C -Pulsmarkierung zum Beginn der Rapsblüte (5.5.1998)	171
Tabelle 4.7	^{14}C -Wiederfindungsraten im System Pflanze-Boden 3, 9 bzw. 13 Wochen nach ^{14}C -Pulsmarkierung zum Beginn der Rapsblüte (29.4.1999).....	174
Tabelle 4.8	^{14}C -Wiederfindungsraten in einzelnen Sproßorganen 3, 9 bzw. 13 Wochen nach ^{14}C -Pulsmarkierung zum Beginn der Rapsblüte (29.4.1999).....	175
Tabelle 4.9	^{14}C -Wiederfindungsraten in den Fraktionen unterhalb der Bodenoberfläche 3, 9 bzw. 13 Wochen nach ^{14}C -Pulsmarkierung zum Beginn der Rapsblüte (29.4.1999)	176
Tabelle 4.10	Transfer zum Beginn der Rapsblüte (29.4.1999) assimilierter ^{14}C -Verbindungen in neu gebildete Wurzeln bei zunehmendem zeitlichem Abstand zur ^{14}C -Pulsmarkierung	176
Tabelle 4.11	Differenz des ^{14}C -Gehaltes zwischen ^{14}C -Pulsmarkierung zur Blüte (5.5.1998) und Ernte (Δ_{AW}) und geschätzte „Mindest-“Rhizodeposition ($\text{RD}_{(\text{min.})}$) unter Winterraps in Abhängigkeit von N-Düngung und Bodenbearbeitung.....	178
Tabelle 4.12	Berechnete Werte für Wurzelumsatz (WU) und Rhizodeposition (RD) unter Winterraps in Abhängigkeit von N-Düngung und Bodenbearbeitung nach ^{14}C -Pulsmarkierung zur Blüte (5.5.1998)	180
Tabelle 4.13	Schätzung der Substanzeinträge in den Boden (0-30 cm) durch Rhizodeposition (RD) und wurzelbürtige Ernterückstände von Winterraps in Abhängigkeit von N-Düngung und Bodenbearbeitung im Zeitraum zwischen ^{14}C -Pulsmarkierung zur Blüte (5.5.1998) und Ernte	183

Verzeichnis der Abbildungen

	Seite
Abbildung 1.1	Übersicht über die Flächen des SFB-Hauptversuches..... 15
Abbildung 1.2	Monatssmittel der Lufttemperaturen in 2 m über GOF und Monatssummen des Niederschlages im Untersuchungszeitraum für die Klimastationen auf den SFB-Fächen und auf dem Rehberg..... 17
Abbildung 1.3	Schematische Übersicht über die Aufteilung der Schläge 1, 2 und 3..... 21
Abbildung 1.4	Schematische Übersicht Schlag 5 mit den Versuchspartzen 22
Abbildung 1.5	Schematische Darstellung der Frässohlensaar im System Horsch..... 23
Abbildung 1.6	Aufbruchhammer und Bohrgerät 27
Abbildung 1.7	Wurzelwaschanlage 28
Abbildung 1.8	Aufbau der Bodensäulen..... 31
Abbildung 1.9	Einbau der Ingrowth-Cores in die Bodenzylinder 32
Abbildung 1.10	Aufbau der Begasungsküvetten 33
Abbildung 1.11	Schematischer Aufbau des Unterdrucksystems 33
Abbildung 1.12	Beprobungsschema des Ingrowth-Cores-Versuches 34
Abbildung 2.1	Tagesmittel der Luft- und Bodentemperaturen sowie der Nieder- schlagsmenge 14 Tage vor, und während der Probenahme zur Blüte 41
Abbildung 2.2	Tagesmittel der Luft- und Bodentemperaturen sowie der Nieder- schlagsmenge 14 Tage vor, und während der Probenahme zur Ernte 41
Abbildung 2.3	Wurzellängendichten von Wintergerste zur Blüte 1997 bei unter- schiedlicher Bodenbearbeitung und N-Düngung in Abhängigkeit von der Bodentiefe..... 42
Abbildung 2.4	Wurzellängendichten von Wintergerste zur Ernte 1997 bei unter- schiedlicher Bodenbearbeitung und N-Düngung in Abhängigkeit von der Bodentiefe..... 43
Abbildung 2.5	Veränderung der Wurzellängendichte unter Wintergerste von der Blüte bis zur Ernte 1997 in Abhängigkeit von Bodenbearbeitung und N-Düngung differenziert nach Bodentiefen 44
Abbildung 2.6	mittlere Wurzellängendichte von Wintergerste (1997) in Abhän- gigkeit von der Stickstoffdüngung differenziert nach Bodentiefen..... 45
Abbildung 2.7	mittlere Wurzellängendichte von Wintergerste (1997) in Abhän- gigkeit von der Bodenbearbeitung differenziert nach Bodentiefen..... 45
Abbildung 2.8	Wurzellängendichten von Winterweizen zur Blüte 1997 bei unter- schiedlicher Bodenbearbeitung und N-Düngung in Abhängigkeit von der Bodentiefe..... 46
Abbildung 2.9	Wurzellängendichten von Winterweizen zur Ernte 1997 bei unter- schiedlicher Bodenbearbeitung und N-Düngung in Abhängigkeit von der Bodentiefe..... 47

Abbildung 2.10	Veränderung der WLD unter Winterweizen zwischen Blüte und Ernte 1997 in Abhängigkeit von Bodenbearbeitung und N-Düngung differenziert nach Bodentiefen	48
Abbildung 2.11	mittlere WLD von Winterweizen (1997) in Abhängigkeit von der Stickstoffdüngung (Pflugvariante) differenziert nach Bodentiefen.....	49
Abbildung 2.12	mittlere WLD von Winterweizen (1997) in Abhängigkeit von der Bodenbearbeitung (bei 0 kgN/ha*a) differenziert nach Bodentiefen	49
Abbildung 2.13	Wurzellängendichten von Winterraps zur Blüte 1997 bei unterschiedlicher Bodenbearbeitung und N-Düngung in Abhängigkeit von der Bodentiefe.....	50
Abbildung 2.14	Wurzellängendichten von Winterraps zur Ernte 1997 bei unterschiedlicher Bodenbearbeitung und N-Düngung in Abhängigkeit von der Bodentiefe.....	51
Abbildung 2.15	Veränderung der WLD unter Winterraps zwischen Blüte- und Erntetermin 1997 in Abhängigkeit von der N-Düngung differenziert nach Bodentiefen (Pflugvariante)	52
Abbildung 2.16	Veränderung der WLD unter Winterraps von der Blüte bis zur Ernte 1997 in Abhängigkeit von der N-Düngung differenziert nach Bodentiefen (Horschvariante).....	53
Abbildung 2.17	mittlere WLD von Winterraps (1997) in Abhängigkeit von der Stickstoffdüngung differenziert nach Bodenbearbeitungsverfahren und Bodentiefen.....	53
Abbildung 2.18	mittlere WLD von Winterraps (1997) in Abhängigkeit von der Bodenbearbeitung differenziert nach N-Niveau und Bodentiefen	54
Abbildung 2.19	Wurzellängen von Wintergerste, Winterweizen und Winterraps in Abhängigkeit von Bodenbearbeitung und Stickstoffdüngung differenziert nach Bodentiefen	55
Abbildung 3.1	Tagesmittel der Luft- und Bodentemperaturen sowie der Niederschlagsmenge auf dem Versuchsgut Hohenschulen im Untersuchungszeitraum (1997-1999)	71
Abbildung 3.2	Wurzellängendichten von Winterraps zur Blüte 1997 bei unterschiedlicher Bodenbearbeitung und N-Düngung in Abhängigkeit von der Bodentiefe.....	72
Abbildung 3.3	Morphologie der Raps-Pfahlwurzel unter unterschiedlicher Bodenbearbeitung	73
Abbildung 3.4	Wurzellängendichten von Winterraps zur Ernte 1997 bei unterschiedlicher Bodenbearbeitung und N-Düngung in Abhängigkeit von der Bodentiefe.....	74
Abbildung 3.5	Entwicklung der Wurzelsysteme von Winterraps im Verlauf der Vegetationsperiode 1997 in Abhängigkeit von der N-Düngung differenziert nach Bodentiefen und Bodenbearbeitungsverfahren	75
Abbildung 3.6	Entwicklung der Wurzelsysteme von Winterraps im Verlauf der Vegetationsperiode 1997 in Abhängigkeit von der Bodenbearbeitung differenziert nach Bodentiefen und N-Düngungsniveau	76

Abbildung 3.7	Wurzelmassendichten (ohne Pfahlwurzel, aschefrei) von Winter- raps zur Ernte 1997 bei unterschiedlicher Bodenbearbeitung und N-Düngung in Abhängigkeit von der Bodentiefe.....	77
Abbildung 3.8	spezifische Wurzellänge von Winterrapswurzeln zur Ernte 1997 bei unterschiedlicher Bodenbearbeitung und N-Düngung in Abhängigkeit von der Bodentiefe	79
Abbildung 3.9	Wurzellängendichten von Winterraps zum Auflaufen 1997 bei unterschiedlicher Bodenbearbeitung und N-Düngung in Abhängigkeit von der Bodentiefe	81
Abbildung 3.10	Wurzellängendichten von Winterraps im Februar 1998 bei unter- schiedlicher Bodenbearbeitung und N-Düngung in Abhängigkeit von der Bodentiefe.....	82
Abbildung 3.11	Wurzellängendichten von Winterraps im Rosettenstadium 1998 bei unterschiedlicher Bodenbearbeitung und N-Düngung in Abhängigkeit von der Bodentiefe	83
Abbildung 3.12	Wurzellängendichten von Winterraps zum Schossen 1998 bei un- terschiedlicher Bodenbearbeitung und N-Düngung in Abhängigkeit von der Bodentiefe	85
Abbildung 3.13	Wurzellängendichten von Winterraps zur Blüte 1998 bei unter- schiedlicher Bodenbearbeitung und N-Düngung in Abhängigkeit von der Bodentiefe.....	86
Abbildung 3.14	Wurzellängendichten von Winterraps während der Schoten- entwicklung 1998 bei unterschiedlicher Bodenbearbeitung und N-Düngung in Abhängigkeit von der Bodentiefe.....	87
Abbildung 3.15	Wurzellängendichten von Winterraps zur Ernte 1998 bei unter- schiedlicher Bodenbearbeitung und N-Düngung in Abhängigkeit von der Bodentiefe.....	89
Abbildung 3.16	zeitliche Dynamik der WLD in der Vegetationsperiode 1998 (Pflugvariante) in Abhängigkeit von der N-Düngung differenziert nach Bodentiefen	90
Abbildung 3.17	zeitliche Dynamik der WLD in der Vegetationsperiode 1998 (Horschvariante) in Abhängigkeit von der N-Düngung differenziert nach Bodentiefen	91
Abbildung 3.18	zeitliche Dynamik der WLD in der Vegetationsperiode 1998 (N-Niveau: 0 kg/ha*a) in Abhängigkeit von der Bodenbearbeitung differenziert nach Bodentiefen	93
Abbildung 3.19	zeitliche Dynamik der WLD in der Vegetationsperiode 1998 (N-Niveau: 120 kg/ha*a) in Abhängigkeit von der Bodenbearbeitung differenziert nach Bodentiefen	94
Abbildung 3.20	zeitliche Dynamik der WLD in der Vegetationsperiode 1998 (N-Niveau: 240 kg/ha*a) in Abhängigkeit von der Bodenbearbeitung differenziert nach Bodentiefen	95

Abbildung 3.21	zeitliche Dynamik der WLD in der Vegetationsperiode 1998 (N-Niveau: 400 kg/ha*a) in Abhängigkeit von der Bodenbearbeitung differenziert nach Bodentiefen	96
Abbildung 3.22	Entwicklung der Sproßtrockenmassen von Winterraps im Verlauf der Vegetationsperiode 1998 in Abhängigkeit von der N-Düngung differenziert nach Bodenbearbeitung.....	97
Abbildung 3.23	Entwicklung der Sproß/Wurzel-Verhältnisse von Winterraps im Verlauf der Vegetationsperiode 1998 in Abhängigkeit von der N-Düngung (Pflugvariante)	98
Abbildung 3.24	Entwicklung der Sproß/Wurzel-Verhältnisse von Winterraps im Verlauf der Vegetationsperiode 1998 in Abhängigkeit von der N-Düngung (Horschvariante)	99
Abbildung 3.25	Entwicklung der Sproß/Wurzel-Verhältnisse von Winterraps im Verlauf der Vegetationsperiode 1998 in Abhängigkeit von der Bodenbearbeitung differenziert nach N-Düngungsniveau	100
Abbildung 3.26	Wurzellängendichten von Winterraps zur Blüte 1999 bei unterschiedlicher Bodenbearbeitung und N-Düngung in Abhängigkeit von der Bodentiefe.....	101
Abbildung 3.27	Wurzellängendichten von Winterraps zur Schotenentwicklung 1999 bei unterschiedlicher Bodenbearbeitung und N-Düngung in Abhängigkeit von der Bodentiefe.....	102
Abbildung 3.28	Wurzellängendichten von Winterraps zur Ernte 1999 bei unterschiedlicher Bodenbearbeitung und N-Düngung in Abhängigkeit von der Bodentiefe.....	103
Abbildung 3.29	zeitliche Dynamik der WLD in der Vegetationsperiode 1999 in Abhängigkeit von der N-Düngung differenziert nach Bodenbearbeitung und Bodentiefen	104
Abbildung 3.30	zeitliche Dynamik der WLD in der Vegetationsperiode 1999 in Abhängigkeit von der Bodenbearbeitung differenziert nach N-Düngungsniveau und Bodentiefen	105
Abbildung 3.31	Erträge von Winterraps auf den untersuchten Varianten des SFB 192 im Beobachtungszeitraum	106
Abbildung 3.32	Wurzellängendichten von Winterraps zur Blüte und zur Ernte im Mittel über drei Jahre (1997-1999) in Abhängigkeit von der N-Düngung differenziert nach Bodenbearbeitungsverfahren und Bodentiefen.....	111
Abbildung 3.33	Wurzellängendichten von Winterraps zur Blüte und zur Ernte im Mittel über drei Jahre (1997-1999) in Abhängigkeit von der Bodenbearbeitung differenziert nach N-Düngungsstufe und Bodentiefe.....	118
Abbildung 3.34	Relative Wachstumsraten von Winterraps (Sproß und Wurzeln) in Abhängigkeit von der N-Düngung, differenziert nach Bodenbearbeitung und Bodentiefen.....	127

Abbildung 3.35	Relative Wachstumsraten von Winterraps (Sproß und Wurzeln) in Abhängigkeit von der Bodenbearbeitung, differenziert nach N-Niveau und Bodentiefen	128
Abbildung 4.1	^{14}C -Wiederfindungsraten im Sproß, unterhalb der Bodenoberfläche (bis 30 cm Bodentiefe) und im Gesamtsystem in Abhängigkeit von der Zeitdauer nach ^{14}C -Pulsmarkierung zum Beginn der Rapsblüte (5.5.1998).....	150
Abbildung 4.2	^{14}C -Wiederfindungsraten in Sproßorganen in Abhängigkeit von der Zeitdauer nach ^{14}C -Pulsmarkierung zum Beginn der Rapsblüte (5.5.1998).....	153
Abbildung 4.3	^{14}C -Wiederfindungsraten in den Fraktionen unterhalb der Bodenoberfläche (bis 30 cm Tiefe) in Abhängigkeit von der Zeitdauer nach ^{14}C -Pulsmarkierung zum Beginn der Rapsblüte (5.5.1998).....	155
Abbildung 4.4	^{14}C -Wiederfindungsraten in den Fraktionen unterhalb der Bodenoberfläche (bis 30 cm Tiefe) in Abhängigkeit von der Zeitdauer nach ^{14}C -Pulsmarkierung zum Beginn der Rapsblüte (5.5.1998).....	158
Abbildung 4.5	Einfluß der N-Düngung auf die Tiefenverteilung ins Wurzelsystem transferierter ^{14}C -markierter Assimilate 3 bzw. 11 Wochen nach ^{14}C -Pulsmarkierung zum Beginn der Rapsblüte (5.5.1998).....	166
Abbildung 4.6	Einfluß der N-Düngung auf den Anteil des aus dem Boden freigesetzten $^{14}\text{CO}_2$ („Boden-Wurzel-Atmung“, kumuliert) nach ^{14}C -Pulsmarkierung zum Beginn der Rapsblüte (5.5.1998).....	167
Abbildung 4.7	Einfluß der Bodenbearbeitung auf die Tiefenverteilung ins Wurzelsystem transferierter ^{14}C -markierter Assimilate 3 bzw. 11 Wochen nach ^{14}C -Pulsmarkierung zum Beginn der Rapsblüte (5.5.1998).....	172
Abbildung 4.8	Einfluß der Bodenbearbeitung auf den Anteil des aus dem Boden freigesetzten $^{14}\text{CO}_2$ („Boden-Wurzel-Atmung“, kumuliert) nach ^{14}C -Pulsmarkierung zum Beginn der Rapsblüte (5.5.1998).....	173

Verwendete Abkürzungen

(ohne allgemein gebräuchliche Abkürzungen, chemische Elementsymbole und SI-Einheiten)

a	anno (Jahr)	SFB	Sonderforschungsbereich
A _B	¹⁴ C-Aktivität im Bodenmaterial	SG	Sommergerste
af	aschefrei	SR	Sommerraps
A _w	¹⁴ C-Aktivität der Wurzeln (ohne Pfahlwurzel)	StrlSchV	Strahlenschutzverordnung
BB	Bodenbearbeitung	SW	Sommerweizen
BD	Bestandesdichte	TM	Trockenmasse
Bq	Becquerel (Zerfälle pro Sekunde)	TP	Teilprojekt
DWI	Durchwurzelungsintensität	Transf. _(uBOF)	Transfer (in Fraktionen) unterhalb der Bodenoberfläche
FK	Feldkapazität	TS	Trockensubstanz
FSS	Frässohlensaat	uBOF	unterhalb der Bodenoberfläche wurzelbürtige Ernterückstände
GLM	General linear model (SAS)	WER	(¹⁴C-)Wiederfindungsrate
GOF	Geländeoberfläche	WFR	Wintergerste
H	Frässohlensaat System Horsch	WG	Wurzellänge
ha	Hektar	WL	Wurzellängendichte
KAK	Kationen Austausch Kapazität	WLD	Wurzelmassendichte
KBq	Kilobecquerel (10 ³ Bq)	WMD	Wurzeltrockenmasse
KM	Kontinuierliche ¹⁴C-Markierung	WTM	Winterraps
LSC	Liquid Scintillation Counting (Flüssigkeitsszintillationszählung)	WR	Wurzelumsatz
LSMeans	Least squares Means	WU	Winterweizen
MBq	Megabecquerel (10 ⁶ Bq)	WW	
µg	Mikrogramm		
Mg	Megagramm		
nFK	nutzbare Feldkapazität		
N _{min}	mineralisches Boden-N		
n.s.	nicht signifikant		
P	Pflug		
PDS	Pflugdrillsaat		
Pfl.	Pflanze		
PM	¹⁴ C- Pulsmarkierung		
psi	pounds per square inch (Pfund pro Quadratzoll, 1psi = 6895Pa)		
PW	Pfahlwurzel		
RB	Respiration Bodenmikroorganismen		
RD	Rhizodeposition		
RS	Respiration Sproß		
RW	Respiration Wurzeln		
RWB	Respiration Wurzeln und Bodenmikroorganismen		
SD	Standard Deviation (Standardabweichung)		
SE	Standard Error (Standardfehler)		

Teil 1: Allgemeine Einführung – Material und Methoden

1. Einleitung

Durch Bodenbearbeitung und Düngung greift die Landwirtschaft massiv in den Stoffhaushalt von Agrarökosystemen ein und verändert die Wachstumsbedingungen der angebauten Pflanzen nachhaltig. Den positiven Effekten für Wachstum und Ertrag der landwirtschaftlichen Kulturen sind die potentiell negativen Auswirkungen auf die Umwelt gegenüberzustellen.

Die Lockerung der Krume war eine der ersten Techniken, die der Mensch entwickelte, um das Wachstum der Kulturpflanzen zu verbessern und somit den Ertrag zu steigern. Mit zunehmender Vergrößerung der Betriebe und Intensivierung der Produktion (Verkürzung der Bestellzeiten) werden immer häufiger pfluglose Bodenbearbeitungsverfahren als ökonomisch sinnvolle Alternativen der Saatbettbereitung vorgeschlagen (BAEUMER et al. 1971, CANNELL 1985, HORSCH 1990, SEYFARTH et al. 1999). Dies gilt insbesondere, da durch die Entwicklung immer wirksamerer Herbizide die Notwendigkeit des Pflügens zur Unkrautbekämpfung zunehmend an Bedeutung verliert (CANNELL 1985).

Während Energie- und Arbeitseinsatz und damit die Kosten (BAEUMER 1980, HORSCH 1990, RASMUSSEN 1999, SEYFARTH et al. 1999) sowie die Erosions- und Verdichtungsanfälligkeit (SEYFARTH et al. 1999, KARUNATILAKE 2000) durch eine Reduktion der Bodenbearbeitung gesenkt werden können, gehen die Aussagen über die Ertragswirkung reduzierter Bodenbearbeitungsverfahren z.T. weit auseinander. Berichten über mit abnehmender Intensität der Bodenbearbeitung sinkende Erträge (CANNELL 1985, BALL et al. 1994, BØRRESEN & NIØS, 1994 RASMUSSEN 1999) und/oder Qualitätseinbußen (CANNELL 1985) stehen solche gegenüber, in denen keine negativen Auswirkungen auf Ertrag und Qualität oder sogar Ertragssteigerungen festgestellt wurden (z.B. KUNDLER & SMUKALSKI 1988, COMIA et al. 1994, EKEBERG & RILEY 1997). Entscheidend beeinflusst werden die Resultate von Art und Sorte der angebauten Kulturpflanzen, den Standortbedingungen und nicht zuletzt von der eingesetzten Bodenbearbeitungstechnik. Als wichtigste Randparameter bei der Untersuchung und Beurteilung reduzierter Bodenbearbeitungsverfahren werden bei CANNELL (1985) Fruchtfolge, Umgang mit Ernterückständen und natürlich die Witterungsbedingungen genannt. Ökonomisch und ökologisch ist die Anwendung reduzierter Bodenbearbeitungssysteme nach SEYFARTH et al. (1999) jedoch auch bei gleichbleibenden oder leicht sinkenden Erträgen sinnvoll, da Betriebskosten und Umweltbelastungen durch eine Verminderung der Bearbeitungsintensität z.T. erheblich gesenkt werden können.

Fast immer stehen bei der Untersuchung reduzierter Bodenbearbeitungssysteme Ertragswirkungen im Vordergrund, während Auswirkungen auf die Wurzelsysteme nur selten Beachtung geschenkt wird. Zu diesem Aspekt sind dementsprechend nur vergleichsweise wenig Daten verfügbar.

Auch die Düngung – zunächst in organischer Form und seit dem Ende des 19. Jahrhunderts zunehmend mit mineralischen Düngemitteln – hatte eine herausragende Bedeutung für die Ertragssteigerung. Während sich die meisten Studien zu dieser Thematik auf die oberirdischen Pflanzenteile – insbesondere auf den Ernteertrag – konzentrieren, sind die Auswirkungen der Düngung auf die Wurzelentwicklung unter Feldbedingungen weniger intensiv untersucht (HANSSON et al. 1987, FORBES et al. 1997).

Ob und in welchem Umfang N-Düngung und Bodenbearbeitung zu Variationen hinsichtlich Ausdehnung und Größe der Wurzelsysteme von Winterweizen (WW), Wintergerste (WG) und Winterraps (WR) führen, wurde im Rahmen des Teilprojektes A8 des Sonderforschungsbereich (SFB) 192 in der vorliegenden Arbeit untersucht. Bewußt wurde dabei der Schwerpunkt der Untersuchungen auf den Winterraps gelegt: Von den im Hauptversuch des SFB angebaute Arten ist der Raps die am wenigsten erforschte Spezies, obwohl die wirtschaftliche Bedeutung des Rapsanbaus seit einigen Jahren kontinuierlich gestiegen ist.

Insgesamt hat der Anbau von Ölsaaten in den letzten Jahren in den Staaten der Europäischen Union deutlich zugenommen (VERHOOG 2002). Den bei weitem größten Anteil daran hat die Brassicaceae Raps (*Brassica Napus* L.), die in allererster Linie in ihrer Winterform angebaut wird. Vor allem der hohe Vorfruchtwert (TEUTEBERG 1980) und die verbesserte Wettbewerbsstellung (VERHOOG 2002) des Raps sind als Gründe für diese Entwicklung zu nennen. Die Bundesrepublik Deutschland ist seit einigen Jahren das Land mit dem größten Anteil an der europäischen Rapsproduktion. 1976 wurden in der alten Bundesrepublik auf ca. 94.800 ha (TEUTEBERG 1980) Raps angebaut, 1990 waren es inklusive der neuen Bundesländer bereits über 600.000 ha (LINKER 2000) und bis 2002 war die Anbaufläche auf 1,3 Mio. ha Raps angestiegen (UFOP 2004). Schätzungen für die Jahre 2003 und 2004 gehen von einer Rapsanbaufläche von ebenfalls ca. 1,3 Mio. ha. aus (UFOP 2004). Vor allem in den neuen Bundesländern hat der Rapsanbau stark zugenommen. Durch Züchtung und verbesserte Anbautechniken konnte das Ertragspotential von Raps in den letzten Jahren erheblich gesteigert werden. Der durchschnittliche Ertrag stieg nach LINKER (2000) in Deutschland von 23,4 dt/ha in 1996 auf 33,6 dt/ha im Jahre 2000 an. Mit der Züchtung von erucasäure- und glycosinolfreien (sog. 00-) Sorten gewann die Verwendung von Rapsöl als Nahrungsmittel zunehmend an Bedeutung. Rund zwei Drittel des erzeugten Rapsöls werden heute in der Lebensmittelproduktion verarbeitet, das übrige Drittel wird für technische Anwendungen und in zunehmendem Maße als nachwachsender Rohstoff (z.B. „Biodiesel“) verwandt (LINKER 2000). Auch als Blattfrucht (Futerraps) hat der Raps eine gewisse Bedeutung.

Wenngleich mit der zunehmenden wirtschaftlichen Bedeutung ein wachsendes wissenschaftliches Interesse am Raps zu beobachten ist (z.B. HABEKOTTÉ 1993^a, 1993^b, 1993^c, HOCKING et al. 1997, DRECCER et al. 2000), bleiben Studien, die sich explizit mit dem Wurzelsystem von Raps beschäftigen (z.B. BARRACLOUGH 1989, SHEPHERD & DAVIES 1993, BONARI et al. 1995) die Ausnahme. Ein Grund hierfür ist sicherlich in der – verglichen mit den oberirdischen Pflanzenteilen – erheblich schwereren Zugänglichkeit der Wurzeln zu sehen (THOMS 1992). Dies gilt insbesondere für Versuche, die im Freiland unter Feldbedingungen durchgeführt werden. Ein wesentliches Anliegen des Teilprojektes A8 war es dementsprechend, zu

einer verbesserten Datenlage und v.a. einem besseren Verständnis der Einflüsse der Versuchsfaktoren N-Düngung und Bodenbearbeitung hinsichtlich der unterhalb der Bodenoberfläche versteckten Pflanzenteile beizutragen. An diesen Zielen orientierten sich die der vorliegenden Arbeit zugrunde liegenden Untersuchungen, die in drei Teilbereiche mit unterschiedlichen inhaltlichen Schwerpunkten – z.T. verbunden mit dem Einsatz verschiedener methodischer Ansätze – aufgeteilt sind. Es bot sich an, die Ergebnisse der verschiedenen Untersuchungen zu den jeweiligen Teilaspekten in separaten Kapiteln abzuhandeln und zu diskutieren, woraus sich eine Aufteilung in vier Teile ergab:

In **Teil 1** sind neben dieser allgemeinen Einführung die Darstellung der Lage und Standortbedingungen der Versuchsflächen sowie die methodische Vorgehensweise bei den Untersuchungen enthalten.

Teil 2 beschäftigt sich mit einem Vergleich der drei Kulturarten in der für Schleswig-Holstein typischen Fruchtfolge Winterweizen – Wintergerste – Winterraps hinsichtlich der Nettoentwicklung der Wurzelsysteme und deren Beeinflussung durch die Versuchsfaktoren N-Düngung und Bodenbearbeitung.

In **Teil 3** wird das Nettowurzelwachstum unter Winterraps, dessen räumliche und zeitliche Dynamik und die Beeinflussung dieser Parameter durch N-Düngung und Bodenbearbeitung über drei Versuchsjahre 1997, 1998 und 1999 dargestellt und diskutiert.

Teil 4 schließlich enthält die Auswertung mehrerer ^{14}C -Pulsmarkierungsexperimente mit Rapspflanzen zur Blüte. Die Verteilung der ^{14}C -markierten Assimilate über Sproß und Wurzelsystem und ihre Veränderung mit zunehmendem zeitlichen Abstand zur ^{14}C -Pulsmarkierung wird aufgezeigt. Darüber hinaus wird der Einbau retranslozierter ^{14}C -Verbindungen in neu wachsende Wurzeln im Zeitraum zwischen ^{14}C -Pulsmarkierung und Ernte untersucht. Aus den gewonnenen Daten werden relativer Wurzelumsatz und Rhizodeposition geschätzt. Wiederum erfolgt eine Beurteilung und Einordnung der Befunde hinsichtlich der Effekte von N-Düngung und Bodenbearbeitung.

2. Material und Methoden

2.1. Versuchsstandort

2.1.1. Lage und naturräumliche Einordnung

Der Hauptfeldversuch des Sonderforschungsbereiches (SFB) 192 wurde im Herbst 1990 auf dem Gelände des Versuchsgutes Hohenschulen der Christian-Albrechts-Universität zu Kiel angelegt. Hohenschulen ($54^{\circ} 16' N$, $9^{\circ} 53' E$) gehört zur Gemarkung der Gemeinde Achterwehr, die ca. 15 km westlich von Kiel im Randbereich des Östlichen Hügellandes Schleswig-Holsteins liegt. In der naturräumlichen Gliederung Schleswig-Holsteins ist das Gebiet der Einheit „702a Ostholsteinisches Hügel- und Seenland (NW)“ zugeordnet (MEYNEN & SCHMIDTHÜSEN 1962).

Die Versuchsflächen des SFB 192 waren am nördlichen Rand des Versuchsgutes zwischen der Bundesautobahn A210 im Südwesten und der Eisenbahnlinie Kiel-Rendsburg im Nordosten angesiedelt. Insgesamt bewirtschaftete der SFB eine Fläche von 32 ha. Die Untersuchungen des Teilprojektes A8, in dessen Rahmen die vorliegende Arbeit eingebettet war, fanden auf den Schlägen 1, 2, 3 und 5 statt, deren Lage in Abbildung 1.1 dargestellt ist:

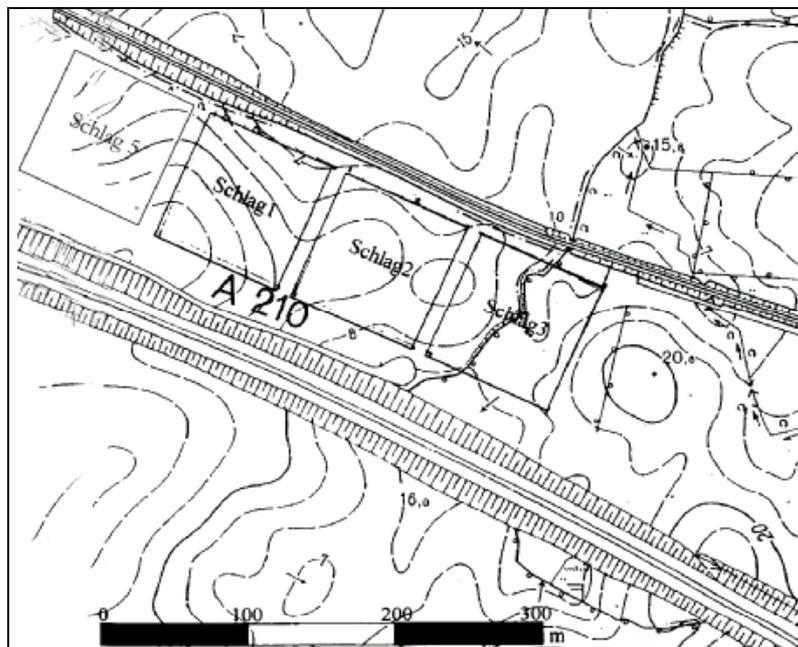


Abbildung 1.1: Übersicht über die Flächen des SFB-Hauptversuches

2.1.2. Geologie und Relief

An der Landoberfläche Schleswig-Holsteins stehen flächendeckend Sedimente des Quartärs an. Das Östliche Hügelland ist aus Grund- und Endmoranen der letzten Eiszeit des Pleistozäns, der Weichselvereisung, aufgebaut. Das Untersuchungsgebiet selbst wurde nach

FRÄNZLE (1993^a) im Weichsel-Hochglazial von den Gletschervorstößen des Brandenburger-, Frankfurter- und Pommerschen Stadiums überfahren, wurde jedoch vom Fehmarn-Vorstöß, dem letzten Eisvorstoß des Spätglazials, nicht mehr erreicht (STEPHAN 1971 zitiert nach TIGGES 2000). Als Ausgangsgestein stehen auf den Versuchsflächen demnach ausschließlich jungpleistozäne Geschiebemergel an, die im Holozän schließlich durch die Prozesse der Erosion und Bodenbildung bis hin zu ihrer heutigen Ausprägung überformt wurden. Eine ausführliche Beschreibung der geologisch-geomorphologischen Verhältnisse des Versuchsgutes Hohenschulen findet sich bei ZIOGAS (1995).

Das SFB-Gelände liegt im Unterhangbereich der Nordostseite der Grundmoränenkuppe des Rehmberges und fällt mit Hangneigungen um 5% von maximal 22,5 m im Südosten auf etwa 10 m ü. NN im Nordwesten ab. Am Hangfuß schließt sich der von einer Hecke gesäumte Bahndamm an, wodurch für die Parzellen am unteren Ackerrand eine geländeklimatisch ungünstige Situation besteht (Kaltluftstau bei Strahlungswetterlagen, Beschattung morgens und abends). Im östlichen Teil ist der Hang bei ostnordöstlicher Exposition leicht konvex gewölbt und geht nach Westen in einen konkaven Hang mit nord- bzw. nordöstlichen Expositionen über. Die Hauptwölbungslinie (Übergang von höherem zu geringerem Erosionspotential [konvex] bzw. zu Akkumulation [konkav]) befindet sich jeweils etwa in der Mitte der Versuchsfelder. Das gesamte Areal ist von dem, für Grundmoränenlandschaften typischen unruhigen hügelig-welligen Relief mit sehr kleinräumigen Wechseln von Hangneigung, Wölbung und Exposition geprägt.

2.1.3. Klima

Schleswig-Holstein gehört zur gemäßigten Klimazone Mitteleuropas, deren temperiert-humides Klima mit wechselhafter Witterung maßgeblich von planetarischer Frontalzone und Golfstrom beeinflusst wird. Durch die Lage zwischen Nord- und Ostsee weist das Klima des nördlichsten deutschen Bundeslandes mit mildem Winter und kühlem, feuchtem Sommer eine ausgeprägt ozeanische Tönung auf. Im langjährigen Mittel (Normalperiode 1961-1990) beträgt die durchschnittliche Temperatur im Januar 0,3°C, im Juli 16,2°C (Tabelle 1.1).

Tabelle 1.1: Niederschläge und Temperaturen in Schleswig-Holstein (langjährige monatliche Mittelwerte, Normalperiode 1961-1990)

	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
mm	64	41	51	49	52	67	78	72	75	74	84	72
°C	0,3	0,7	3,1	6,5	11,3	14,8	16,2	16,1	13,2	9,5	5,1	1,9

Daten aus FRÄNZLE 1993^b, Quelle: Wetteramt Schleswig

Die Jahresmitteltemperatur liegt bei 8,2°C, im Mittel fallen 779 mm Niederschlag pro Jahr (FRÄNZLE 1993^b). Die klimatische Wasserbilanz ist im Jahresmittel positiv (ZIOGAS 1995). Im Winterhalbjahr weht der Wind überwiegend aus südwestlichen Richtungen, im Sommer dominieren Nord- und Nordwestwinde (FRÄNZLE 1993^b).

Auf dem Versuchsgut Hohenschulden wird eine agrarmeteorologische Meßstation auf dem Rehmburg betrieben von der für den gesamten Untersuchungszeitraum Meßdaten zur Verfügung stehen. Bis Juli 1999 wurden zusätzlich Klimadaten mit einer Station direkt auf Schlag 1 des SFB 192 (vgl. Abbildung 1.1) erhoben.

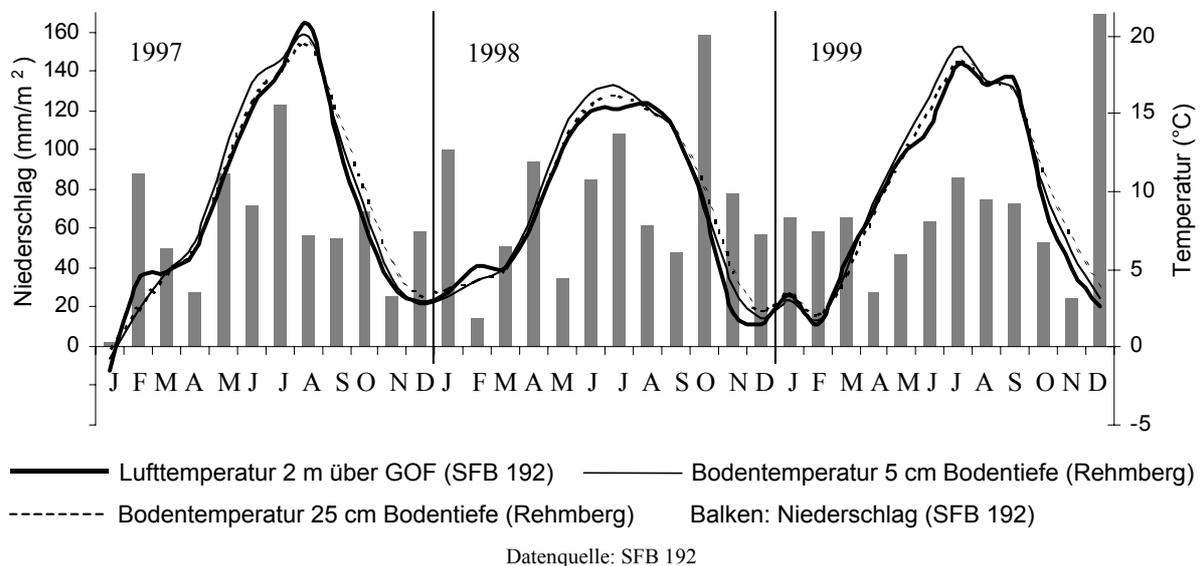


Abbildung 1.2: Monatsmittel der Lufttemperaturen in 2 m über GOF und Monatssummen des Niederschlages im Untersuchungszeitraum für die Klimastationen auf den SFB-Flächen und auf dem Rehmburg

Wie aus Abbildung 1.2 hervorgeht, war der Temperaturverlauf an beiden Meßstationen nahezu identisch. In den Wintern sowie im Sommer 1998 lagen die Monatsmittel am Rehmburg geringfügig unter denen auf den SFB-Flächen, was aus der stärkeren Windexposition resultiert, die auch in den Windgeschwindigkeiten zum Ausdruck kommt (Tabelle 1.2). Demgegenüber wurden auf den SFB-Flächen durchgehend geringere Niederschlagsmengen registriert als auf dem Rehmburg. Bei Südwest- und vor allem bei Westlagen, die in Mitteleuropa dominieren und zudem (vom Atlantik kommend) häufig ergiebige Niederschläge bringen, liegen die SFB-Flächen im „Regenschatten“ des Rehmburges, was zu den unterschiedlichen Niederschlagsmengen führt. Die Abweichungen – insbesondere der Lufttemperaturen – sind geringfügig, so daß die Bodentemperaturen, die nur an der Station Rehmburg gemessen wurden, ohne weiteres auf die Schläge des SFB übertragbar sind.

Mit Jahresmitteln von $8,9^{\circ}\text{C}$ (1997/98) bzw. $9,6^{\circ}\text{C}$ (1999) waren die drei Versuchsjahre überdurchschnittlich warme Jahre. In den Jahren 1998 und 99 fallen vor allem die ausgesprochen milden Winter (Januarmittel $3,6$ resp. $3,5^{\circ}\text{C}$), 1997 der ungewöhnlich warme Sommer auf. Die Niederschläge liegen ebenfalls in allen drei Jahren deutlich über dem langjährigen Mittel in Schleswig-Holstein. Demgegenüber entsprachen die Niederschlagssummen und Temperaturmittel der Vegetationsperioden 1997 und 1999 eher dem Durchschnittsjahr. In der Wachstumsphase der Kulturpflanzen war es 1998 vergleichsweise kühl und feucht. Die Verteilung der Niederschläge war 1999 mit Maxima im Winterhalbjahr (Befahrbarkeit der Böden, Über-

sättigung der Profile zu Beginn der Vegetationsperiode, starke Auswaschungsverluste im Winter) und geringen Niederschlägen während der Vegetationsperiode (Wassermangel zum Ende des Sommers) aus agrarmeteorologischer Sicht eher ungünstig.

Tabelle 1.2: Witterungsverlauf im Untersuchungszeitraum

Monat/ Jahr	Nieder- schlag [mm/m ²] Σ	mittlere Lufttemperatur [°C]		mittlere Bodentemperatur [°C]			mittlere Relative Luftfeuchtigkeit [%]		mittlere Wind- geschw. [m/s]	Mittlere Strahlungs- intensität [W/m ²]
		2 m ü GOF	0 m ü GOF	5 cm	10 cm	25 cm	2 m ü GOF	0 m ü GOF		
Jan 97	2,4	-1,5	-1,8	-0,7	-0,5	-0,1	89,8	91,5	2,7	25,8
Feb 97	88	4,3	4,0	2,4	2,4	2,3	83,1	91,6	5,1	38,2
Mär 97	50,5	4,9	4,9	4,8	4,8	4,7	81,3	86,6	4,0	93,7
Apr 97	27,1	6,3	6,5	6,8	6,7	6,4	73,2	77,4	3,7	151,6
Mai 97	88,3	10,8	11,3	12,3	12,1	11,4	80,4	86,0	2,7	166,7
Jun 97	71,4	15,4	16,1	17,0	16,7	15,8	74,6	79,4	2,8	199,9
Jul 97	123	17,7	18,0	18,4	18,2	17,8	77,0	84,4	2,0	182,8
Aug 97	56,2	20,7	20,6	20,0	19,8	19,4	72,6	80,8	2,2	176,8
Sep 97	55	13,5	13,1	14,1	14,3	14,8	79,5	91,6	2,8	103,1
Okt 97	68,1	8,2	7,7	9,2	9,5	10,1	82,7	94,8	3,3	59,8
Nov 97	25,6	4,1	3,8	4,4	4,7	5,3	86,2	94,6	3,6	24,4
Dez 97	58,3	2,9	2,8	2,8	3,0	3,4	88,1	94,4	3,8	9,7
Jahr 97	714	8,9	8,9	9,3	9,3	9,3	80,7	87,8	3,2	102,7
Veg.-P.	366,1	14,2	14,5	14,9	14,7	14,2	75,6	81,6	2,7	175,6
Jan 98	103,7	3,6	4,9	3,3	3,5	3,8	80,1	93,3	3,7	22,4
Feb 98	14,8	5,2	8,1	4,4	4,4	4,3	77,7	k.A.	5,9	30,9
Mär 98	51,1	5,1	6,0	5,2	5,2	5,1	72,0	75,0	4,1	104,7
Apr 98	94,6	8,1	8,3	8,8	8,7	8,4	74,5	86,2	3,0	105,1
Mai 98	34,9	12,7	12,9	13,7	13,5	13,0	72,6	78,2	2,7	214,2
Jun 98	84,8	15,1	15,5	16,4	16,1	15,5	75,7	80,3	2,7	186,4
Jul 98	109	15,2	16,0	16,7	16,6	16,3	73,5	79,0	3,2	171,2
Aug 98	61,1	15,7	16,1	15,4	15,4	15,4	71,2	75,2	3,1	159,2
Sep 98	47,7	13,8	13,9	13,7	13,7	13,8	80,0	84,6	2,7	78,8
Okt 98	158,5	9,0	8,8	9,4	9,7	10,1	77,3	91,9	4,5	47,4
Nov 98	77,4	2,2	2,1	3,9	4,2	4,8	84,7	94,6	2,7	29,8
Dez 98	57	1,4	1,2	1,8	2,0	2,3	84,2	93,7	4,1	18,5
Jahr 98	937	8,9	9,5	9,4	9,4	9,4	77,0	84,7	3,5	97,4
Veg.-P.	374,1	11,3	11,8	12,2	12,0	12,0	73,1	79,7	3,1	156,3
Jan 99	65,2	3,5	3,2	3,0	3,2	3,4	62,4	95,4	3,9	20,3
Feb 99	58,3	1,4	1,3	1,7	1,9	2,0	62,8	95,5	4,0	41,7
Mär 99	65,8	5,6	5,5	5,0	5,0	4,7	73,8	90,8	3,2	85,7
Apr 99	27,5	8,7	8,9	9,2	9,1	8,6	72,7	86,3	3,4	153,5
Mai 99	46,7	12,3	12,4	12,8	12,6	12,1	68,9	81,6	2,6	207,5
Jun 99	63,7	14,2	14,2	16,1	15,8	15,3	73,7	84,7	2,1	197,8
Jul 99	85,7	18,1	20,6	19,3	18,9	18,4	68,0	k.A.	2,9	234,6
Aug 99	74,5	16,9	19,3	17,2	17,1	17,1	68,4	k.A.	3,2	170,7
Sep 99	72,9	17,1	18,5	16,5	16,4	16,4	71,3	k.A.	3,0	134,1
Okt 99	53,3	9,5	11,9	10,4	16,2	11,0	79,2	k.A.	3,9	68,9
Nov 99	24,2	5,1	8,1	6,1	16,1	6,9	83,1	k.A.	3,3	29,1
Dez 99	168,5	2,6	7,0	3,2	16,1	3,9	85,4	k.A.	4,7	18,0
Jahr 99	865,7	9,6	10,9	10,0	12,4	10,0	72,5	k.A.	3,4	113,5
Veg.-P.	298,1	14,0	15,1	14,9	14,7	14,3	70,32	k.A.	3,1	166,7

Datenquelle: SFB 192, *fehlende Daten an der Station des SFB (12.1. - 8.3.98, ab 16.07.99) sowie die Daten für die Bodentemperaturen wurden durch Meßwerte von der Station *Rehberg* ergänzt und sind *kursiv gesetzt*

2.1.4. Boden

Ausgangssubstrat der holozänen Bodenbildung im Untersuchungsgebiet ist flächendeckend weichselzeitlicher Geschiebemergel. Die Bodenarten Lehm und Sand dominieren in diesem basenreichen Lockersediment. Charakteristisch für glazigene Sedimente ist eine ungeordnete und unsortierte Ablagerung. Durch die auflagernden Eismassen und deren Bewegung wurde das Material mehrfach umgelagert und unterschiedlich stark verdichtet. Zusammen führt dies sowohl horizontal als auch vertikal zu starken Inhomogenitäten in der Substratbeschaffenheit insbesondere im Hinblick auf Korngrößenverteilung und Vorverdichtung. Auch Hangneigung, Exposition, Wölbung, Geländehöhe und – damit gekoppelt – der Grundwasserflurabstand sind starken kleinräumigen Variationen unterworfen, so daß auf engstem Raum Erosion und Akkumulation, Auftreten oder Fehlen von Grund- bzw. Stauwassereinfluß sowie ständig wechselnde geländeklimatische Bedingungen nebeneinander vorkommen. Dementsprechend variabel ist die Verteilung der Böden im Untersuchungsgebiet (Tabelle 1.3):

Tabelle 1.3: Bodentypen und Bodenarten der Versuchspartellen:

Variante	Jahr	Schlag	Frucht	Bodentyp	Bodenarten i. d. Bodenschicht		
					0-30 cm	30-60 cm	60-90 cm
P0	1997	3	WG	BB	Sl3	Ls3	Lt2
P200	1997	3	WG	YK	Sl4	Sl3	Sl3
H240	1997	3	WG	YK	Sl4	Ls3	Ls2
P0	1997	2	WW	LL	Sl4	Ls3	Ls3
P120 (a)	1997	2	WW	LL-SS	Sl4	Sl4	Ls3
P120 (b)	1997	2	WW	LL	Sl4	Ls3	Ls3
P240 (a)	1997	2	WW	LL	Sl4	Ls3	Ls3
P240 (b)	1997	2	WW	SS-LL	Sl4	Sl2	Ls2
P320	1997	2	WW	LL	Sl4	Ls3	Ls3
H0	1997	2	WW	LL-SS	Sl4	Ls2	Ls2
P0	1997	1	WR	YK-GG	Sl3	Sl3	Sl3
P120	1997	1	WR	SS-YK	Sl4	Ls4	Ls4
P240	1997	1	WR	SS-BB	Ls3	Ls3	Ls3
P400	1997	1	WR	BB-SS	Ls3	Ls3	Ls3
H0	1997	1	WR	SS-YK	Ls3	Ls3	Ls3
H120	1997	1	WR	YK-LL	Sl4	Ls3	Ls3
H240	1997	1	WR	SS	Ls4	Ls3	Ls3
H400	1997	1	WR	BB-YK	Ls4	Ls4	Ls2
P0	1998	5	WR	SS-YK	k.A.	k.A.	k.A.
P120	1998	5	WR	SS	k.A.	k.A.	k.A.
P240	1998	5	WR	GG-YK	k.A.	k.A.	k.A.
P400	1998	5	WR	GG-YK	k.A.	k.A.	k.A.
H0	1998	5	WR	SS-YK	k.A.	k.A.	k.A.
H120	1998	5	WR	SS-YK	k.A.	k.A.	k.A.
H240	1998	5	WR	GG-SS-YK	k.A.	k.A.	k.A.
H400	1998	5	WR	SS-YK	k.A.	k.A.	k.A.
P0	1999	2	WR	LL	Sl4	Ls3	Ls3
P120	1999	2	WR	LL-SS	Sl4	Ls3	Ls3
P240	1999	2	WR	SS-LL	Sl4	Sl2	Ls2
P400	1999	2	WR	SS-yK	Sl4	Sl4	Ls3
H0	1999	2	WR	SS	Sl4	Ls2/Ls3	Ls2/Ls3
H120	1999	2	WR	LL-SS	Sl4	Ls4/Ls3	Ls3/ls4
H240	1999	2	WR	LL	Sl4	Ls3	Ls3
H400	1999	2	WR	LL	Sl4	Ls3	Ls3

Quelle: SFB 192, Universität Kiel, ergänzt durch eigene Erhebung. Bezeichnungen nach AG Boden (1996).

In Kuppenlagen und in Oberhangbereichen sind auf Geschiebemergel mit überwiegend lehmigem Substrat zumeist Parabraunerden ausgebildet, die in den meisten Fällen erodiert sind. Auf sandigem Substrat haben sich in diesen Geländebereichen Braunerden entwickelt. Die Parabraunerden unterliegen häufig dem Einfluß von Stauwasser und weisen dann hydromorphe Merkmale auf. Übergänge zu Pseudogley-Parabraunerden, Parabraunerde-Pseudogleyen bis hin zu typischen Pseudogleyen sind nicht selten. Am Hangfuß, sowie in flacheren Hangpartien, Mulden und Senken wurde das von den Hängen abgospülte Bodenmaterial wieder abgelagert. Hier sind dementsprechend mehr oder weniger mächtige Kolluvien ausgebildet, die häufig grund- oder stauwasserbeeinflusst sind. Auf diesen Flächen sind Kolluvisole mit Übergangsformen zu Gleyen bzw. Pseudogleyen entstanden. Am Unterhang sind unter ganzjährig hydromorphen Bedingungen bei niedrigem Grundwasserflurabstand typische Gleye entwickelt. Die Ackerzahlen liegen nach HORN et al. (1993) auf der Betriebsfläche Hohenschulen zwischen 45 und 60.

Alles in allem ist das Versuchsgelände durch eine starke Variabilität der Bodentypen und -arten gekennzeichnet (HORN et al. 1993). Selbst innerhalb einer einzigen Versuchsparzelle können mehrere Bodentypen nebeneinander auftreten.

Die größte Verbreitung haben auf den Flächen des SFB 192 erodierte Parabraunerden und Kolluvisole. In den folgenden Tabellen 1.4 und 1.5 ist für diese Bodentypen je eine repräsentative Profilbeschreibung mit einigen wichtigen physikalisch-chemischen Kenngrößen wiedergegeben:

Tabelle 1.4: Pseudogley-Parabraunerde (SS-LL): Profil und physikalisch-chemische Eigenschaften

Tiefe [cm]	Horizont	Bodenart, (Skelett)	pH (CaCl ₂)	Kalkgehalt [%]	C _{org.} [%]	N _t [%]	C/N	nFk [mm]	KAK
0-30	Ap	Sl4, (x2)	6,9	0,0	0,89	0,08	11,1	51,0	17,6
30-47	Al	Ls4 (x2)	6,7	0,0	0,29	0,03	9,7	25,7	25,8
47-80	SdBt	Ls3 (x2)	6,8	0,0	0,17	0,02	8,5	44,6	17,7
80-100	BtSd	Sl4, (x2)	6,8	0,0	0,09	0,02	5,3	31,4	12,6
>100	CcSd	Sl4 (g2x2)	7,4	15,4	0,00	0,00	0		16,7

Daten aus: HORN et al. (1993), Bezeichnungen nach AG BODEN (1996)

Tabelle 1.5: Pseudogley Kolluvisol (SS-YK): Profil und physikalisch chemische Eigenschaften

Tiefe [cm]	Horizont	Bodenart, (Skelett)	pH (CaCl ₂)	Kalkgehalt [%]	C _{org.} [%]	N _t [%]	C/N	nFk [mm]	KAK
0-30	Ap	Sl4, (x2)	6,4	0,0	1,62	0,14	12	68,1	19,0
30-81	Al	Sl4, (x2)	6,5	0,0	1,28	0,13	10	108,6	17,1
81-108	SdBt	Sl3, (x2)	6,5	0,0	0,21	0,02	11	50,0	11,3
108-150	BtSd	Sl4, (x2)	6,6	0,0	0,16	0,02	8	68,9	17,1

Daten aus: HORN et al. (1993), Bezeichnungen nach AG BODEN (1996)

2.2. Versuchsanordnung, Bewirtschaftungsmaßnahmen und Beprobungsschemata

Auf den Schlägen des Hauptversuchs des SFB wurde die für Schleswig-Holstein typische Fruchtfolge Wintergerste-Winterraps-Winterweizen angebaut. Die Fruchtfolge war auf den Schlägen 1, 2 und 3 jeweils um ein Jahr versetzt, so daß jede der drei untersuchten Kulturen jedes Jahr zur Verfügung stand. Die Abfolge der Feldfrüchte auf Schlag 5 verlief parallel zu Schlag 3. Die Untersuchungen für die vorliegende Arbeit wurden auf den Schlägen 1, 2, 3 und auf Schlag 5 durchgeführt (s. Abbildung 1.1). Jeder Schlag ist jeweils in zwei gleich große Bodenbearbeitungsblöcke (Pflugdrillsaat „P“ und Frässohlensaat, System Horsch „H“), jeder Bodenbearbeitungsblock in vier isohypsenparallele Längsstreifen mit unterschiedlicher Schweinegülle-Applikation, unterteilt. Auf den Schlägen 1 bis 3 sind diese Streifen nochmals in je 4 Längsreihen aufgeteilt. Quer zur Hangneigung erfolgt eine weitere Gliederung in 9 Zeilen, so daß insgesamt pro Schlag 288 36 m² große Einzelparzellen entstehen, die mit insgesamt neun mineralischen N-Düngungs- und acht Fungizidbehandlungsvarianten bewirtschaftet werden (Abbildung 1.3). Im Süden und im Norden der Schläge schließen sich jeweils drei weitere Reihen ohne Gülledüngung an, in denen weitere Fungizidbehandlungen getestet wurden. Die Fungizidvarianten spielten für die vorliegende Arbeit keine Rolle. Es wurden jeweils Parzellen mit übereinstimmenden, praxisüblichen Pflanzenschutzmaßnahmen ausgewählt.

R0/0/0	0/0/0	0/0/0	80/80/80	80/80/80	0/0/0	0/0/0	80/80/80	80/80/80	Gülle
80/80/80	80/80/80	80/80/80	40/40/40	40/40/40	40/40/40	40/40/40	0/0/0	0/0/0	
40/40/40	40/40/40	40/40/40	0/0/0	0/0/0	80/80/80	80/80/80	40/40/40	40/40/40	
40/40/40	80/80/80	80/80/80	40/40/40	0/0/0	40/40/80	80/80/40	40/80/80	40/40/40	Herbst
40/40/40	80/80/80	W80/80/80	40/40/40	0/0/0	80/40/80	80/80/40	80/40/40	80/80/80	
40/40/40	80/80/80	80/80/80	40/40/40	0/0/0	80/40/80	80/80/40	80/40/40	80/80/80	
G40/40/40	80/80/80	80/80/80	40/40/40	0/0/0	40/40/80	80/80/40	40/80/80	40/40/40	Herbst Frühj.
40/40/40	R80/80/80	80/80/80	40/40/40	0/0/0	40/40/80	80/80/40	40/80/80	40/40/40	
40/40/40	80/80/80	80/80/80	40/40/40	0/0/0	80/40/80	80/80/40	80/40/40	80/80/80	
40/40/40	80/80/80	80/80/80	40/40/40	0/0/0	80/40/80	80/80/40	80/40/40	80/80/80	Frühj.
40/40/40	80/80/80	80/80/80	40/40/40	0/0/0	40/40/80	80/80/40	40/80/80	40/40/40	
40/40/40	80/80/80	80/80/80	40/40/40	0/0/0	40/40/80	80/80/40	40/80/80	40/40/40	
40/40/40	80/80/80	80/80/80	40/40/40	0/0/0	80/40/80	80/80/40	80/40/40	80/80/80	Gülle-Kont.
40/40/40	80/80/80	80/80/80	40/40/40	0/0/0	80/40/80	80/80/40	80/40/40	80/80/80	
40/40/40	80/80/80	80/80/80	40/40/40	0/0/0	80/40/80	80/80/40	80/40/40	80/80/80	
R40/40/40	R80/80/80	W80/80/80	W40/40/40	GW0/0/0	40/40/80	80/80/40	40/80/80	W40/40/40	Gülle-Kont.
40/40/40	W80/80/80	80/80/80	40/40/40	R0/0/0	80/40/80	80/80/40	80/40/40	80/80/80	
40/40/40	R80/80/80	80/80/80	40/40/40	40/40/40	80/40/80	80/80/40	80/40/40	80/80/80	
R40/40/40	80/80/80	80/80/80	40/40/40	40/40/40	40/40/80	80/80/40	40/80/80	40/40/40	Frühj.
40/40/40	80/80/80	80/80/80	40/40/40	40/40/40	40/40/80	80/80/40	40/80/80	40/40/40	
40/40/40	80/80/80	80/80/80	40/40/40	0/0/0	40/40/80	80/80/40	40/80/80	40/40/40	
40/40/40	80/80/80	80/80/80	40/40/40	0/0/0	80/40/80	80/80/40	80/40/40	80/80/80	Herbst Frühj.
40/40/40	80/80/80	80/80/80	40/40/40	0/0/0	80/40/80	80/80/40	80/40/40	80/80/80	
40/40/40	80/80/80	80/80/80	40/40/40	0/0/0	40/40/80	80/80/40	40/80/80	40/40/40	
40/40/40	80/80/80	80/80/80	40/40/40	0/0/0	40/40/80	80/80/40	40/80/80	40/40/40	Herbst
40/40/40	80/80/80	80/80/80	40/40/40	0/0/0	80/40/80	80/80/40	80/40/40	80/80/80	
40/40/40	80/80/80	80/80/80	40/40/40	0/0/0	80/40/80	80/80/40	80/40/40	80/80/80	
80/80/80	80/80/80	80/80/80	40/40/40	40/40/40	40/40/40	40/40/40	80/80/80	80/80/80	kgN/ha
0/0/0	0/0/0	0/0/0	R0/0/0	0/0/0	80/80/80	80/80/80	0/0/0	0/0/0	
40/40/40	40/40/40	40/40/40	80/80/80	80/80/80	0/0/0	0/0/0	40/40/40	40/40/40	

R: Raps, Beprobung: 1997 auf Schlag 1, 1999 auf Schlag 2, ¹⁴C-Pulsmarkierung 1999 auf Schlag 2
 G: Gerste: Beprobung 1997 auf Schlag 3, W: Weizen, Beprobung 1997 auf Schlag 2

Abbildung 1.3: Schematische Übersicht über die Aufteilung der Schläge 1, 2 und 3 (auf Schlag 2: Spalten in umgekehrter Reihenfolge)

Schlag 5 weist eine etwas andere Aufteilung mit nur 3 Querstreifen mit – jeweils durchgehender – variiertes mineralischer Stickstoffdüngung und keine weitere Unterteilung der Reihen auf, so daß hier 24 Einzelparzellen von 288 m² Größe zur Verfügung stehen (Abbildung 1.4).

0/0/0 kgN/ha*Jahr	40/40/40 kgN/ha*Jahr	80/80/80 kgN/ha*Jahr	Gülle
			Herbst
			Herbst Frühj.
		..... Variante P400	Früh-jahr
			Gülle-Kont.
..... Variante P0	..... Variante P120	..... Variante P240	Gülle-Kont.
..... Variante H0	..... Variante H120	..... Variante H240	Früh-jahr
			Herbst Frühj.
	Probenahme-fläche (Bohrkernmethode)	..... Variante H400	Herbst
		..... Fläche für die ¹⁴ C-Pulsmarkierung	Herbst

Abbildung 1.4: Schematische Übersicht Schlag 5 mit den Versuchspartzellen

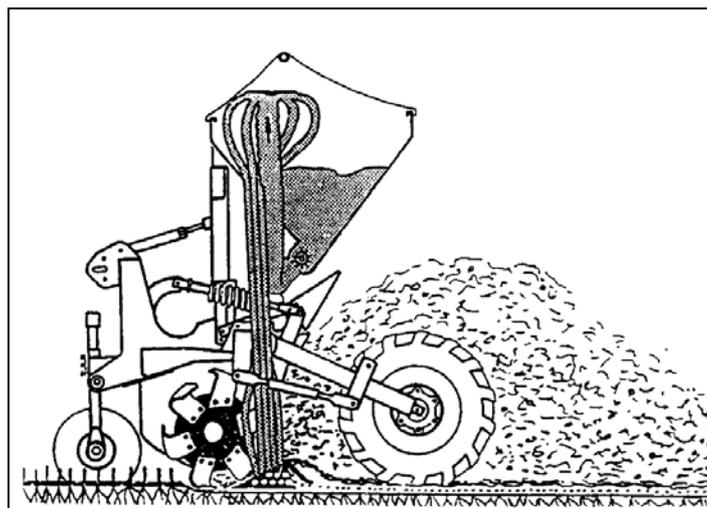
Zur Charakterisierung der Nettowurzelentwicklung wurden Wurzellängen und Wurzel-trockenmassen mittels Bohrkernmethode (vgl. BÖHM 1979) bestimmt. Da diese Untersuchungen mit großem Zeit- und Arbeitsaufwand verbunden sind, wurden aus den im SFB-Versuch zur Verfügung stehenden Behandlungen acht Varianten ausgewählt (Tabelle 1.6), anhand derer eine Prüfung der Einflüsse der variierten Versuchsfaktoren hinsichtlich ihrer Wirkung auf die Durchwurzelungsdynamik möglichst optimal gewährleistet ist:

Tabelle 1.6: Übersicht über die ausgewählten Behandlungsvarianten:

Pflugdrillsaat	Frässlensaat Horsch
0 kgN/ha*a („P0“)	0 kgN/ha*a („H0“)
120 (40/40/40) kgN/ha*a („P120“)	120 (40/40/40) kgN/ha*a („H120“)
240 (80/80/80) kgN/ha*a („P240“)	240 (80/80/80) kgN/ha*a („H240“)
240 (80/80/80) kgN/ha*a + Gülle (Herbst und Frühjahr) („P400“)	240 (80/80/80) kgN/ha*a + Gülle (Herbst und Frühjahr) („H400“)

Die mineralischen N-Düngergaben wurden in drei gleichen Teilgaben (40/40/40 bzw. 80/80/80 kgN/ha*a) verabreicht. Bei der konventionellen Bodenbearbeitung mit dem Pflug (Pflugdrillsaat „P“) werden Ernterückstände und Stoppeln im Herbst zerkleinert und mit dem Grubber eingearbeitet. Anschließend wird der Boden auf 30 cm Tiefe gepflügt und mit dem

Packer verdichtet. Die Aussaat erfolgt mit Hilfe einer Drillmaschine. Demgegenüber verzichtet das reduzierte Bodenbearbeitungsverfahren der Frässohlensaart nach dem System Horsch (HORSCH, 1994) auf das Pflügen und Grubbern. Hier wird die oberste Bodenschicht etwa 10 cm tief gefräst, das Saatgut im Breitsaatverfahren direkt auf den unbearbeiteten Boden abgelegt und mit dem abgefrästen Bodenmaterial sowie den zerkleinerten Ernterückständen und Stoppelresten bedeckt (Abbildung 1.5). Bei diesem Verfahren verbleibt ein großer Teil der Ernterückstände wie eine Mulchschicht auf der Bodenoberfläche und vermindert so im Winterhalbjahr die Erosionsgefahr.



(aus: HORSCH, 1994)

Abbildung 1.5: Schematische Darstellung der Frässohlensaart im System Horsch

Art und Termine der Bodenbearbeitung, der N-Applikation und aller weiteren Bewirtschaftungsmaßnahmen sind den folgenden Tabellen (1.7 - 1.11) zu entnehmen:

Tabelle 1.7: Bewirtschaftungsmaßnahmen auf Schlag 1 (1996/97 Winterraps, Sorte *Falcon*)

Datum	Maßnahme
05.08.96	Ernte Vorfrucht (Wintergerste „Alpaca“)
14.08.96	Stoppelbearbeitung Grubber
19.08.96	Grunddüngung: 140 kg K ₂ O (40% K ₂ O, 6% MgO), 90 Kg P ₂ O ₅ (46% Triple-Phosphat), 15dt Kalk (75% CaCO ₃)
22.08.96	Stoppelbearbeitung Scheibenegge
26.08.96	Gülleausbringung*, Bodenbearbeitung mit Scheibenegge
27.08.96	Pflügen (Pflugvariante), Fräsen (Horschvariante) Aussaat: <i>Falcon</i> (75 K/m ²)
03.09.96	Pflanzenschutz: Butisan Star 2,0 l/ha
11.09.96	Pflanzenschutz: Fusilade 0,5 l/ha (nur Horschvariante)
23.09.96	Pflanzenschutz: Fusilade 1,0 l/ha
15.09.96	Pflanzenschutz: Folicur 0,5 l/ha
06.03.97	1. N-Gabe (KAS)
02.04.97	2. N-Gabe (KAS)
03.04.97	Gülleausbringung*
08.04.97	Kieserit 200 kg/ha (25% MgO, 20% S)
25.04.97	3.N-Gabe
30.04.97	Pflanzenschutz: Folicur 0,75 l/ha
20.05.97	Blütenspritzung: Konker R 1,25 l/ha
05.08.97	Ernte

*Schweinegülle durchschnittlicher Nährstoffgehalt je Einzelgabe und ha: N: 79 kg, P: 69 kg, K: 54 kg, Mg: 24 kg, Ca: 68 kg
(Datenquelle: SFB 192, R. STRÖH pers. Mittlg.)

Tabelle 1.8: Bewirtschaftungsmaßnahmen auf Schlag 2 (1996/97 Winterweizen, Sorte *Orestis*)

Datum	Maßnahme
14.08.96	Ernte Vorfrucht (Winterraps „Falcon“)
26.08.96	Stoppelbearbeitung Scheibenegge
28.08.96	Grunddüngung: 120 kg K ₂ O (40% K ₂ O, 6% MgO), 90 Kg P ₂ O ₅ (46% Triple-Phosphat)
03.09.96	Gülleausbringung*, Bodenbearbeitung mit Scheibenegge
10.09.96	Kalk 15dt/ha (75% CaO)
19.09.96	Pflügen (nur Pflugvariante)
20.09.96	Fräsen (Horschvariante) Aussaat Winterweizen Sorte <i>Orestis</i> (280 K/m ²)
08.10.96	Pflanzenschutz: Stomp SI 2,0 l/ha, IPU-500-Stefes 1,0 l/ha
06.03.97	1. N-Gabe (KAS)
09.04.97	Düngung: Kieserit 100 kg/ha (10% Mg, 20% S)
10.04.97	Gülleausbringung*
28.04.97	2. N-Gabe (KAS)
30.04.97	Pflanzenschutz: Staraul 0,7 l/ha, CCC 1,2 l/ha, Düngung: Bittersalz (17% Mg), Mangansulfat (24% Mn)
09.05.97	Pflanzenschutz: Sportak 1,0 l/ha
12.05.97	Pflanzenschutz: CCC 0,75 l/ha
16.05.97	Blattspritzung: Opus Top 1,0 l/ha
28.05.97	Halmverkürzung: Terpal C 0,75 l/ha
09.06.97	3.N-Gabe
18.06.97	Ährenbehandlung: Opus Top 1,25 l/ha
12.08.97	Ernte

*Schweinegülle durchschnittlicher Nährstoffgehalt je Einzelgabe und ha: N: 79 kg, P: 69 kg, K: 54 kg, Mg: 24 kg, Ca: 68 kg
(Datenquelle: SFB 192, R. STRÖH pers. Mittlg.)

Tabelle 1.9: Bewirtschaftungsmaßnahmen auf Schlag 3 (1996/97 Wintergerste, Sorte *Alpaca*)

Datum	Maßnahme
14.08.96	Ernte Vorfrucht (Winterweizen „Orestis“)
26.08.96	Stoppelbearbeitung Grubber
28.08.96	Grunddüngung: 120 kg K ₂ O (40% K ₂ O, 6% MgO), 90 Kg P ₂ O ₅ (46% Triple-Phosphat), 12 dt/ha Kalk (75%CaCO ₃)
03.09.96	Gülleausbringung*: Bodenbearbeitung mit Scheibenegge
12.09.96	Pflügen (nur Pflugvariante)
18.09.96	Fräsen (Horschvariante) Aussaat Winterweizen Sorte <i>Orestis</i> (280 K/m ²)
02.10.96	Pflanzenschutz: Stomp SI 2,0 l/ha, IPU-500-Stefes 1,0 l/ha
07.03.97	1. N-Gabe (KAS)
13.03.97	Düngung: Bittersalz (17% Mg), Mangansulfat (24% Mn)
09.04.97	Düngung: Kieserit 100 kg/ha (10% Mg, 20% S)
10.04.97	Gülleausbringung*
25.04.97	2. N-Gabe (KAS)
09.05.97	Blattspritzung: Opus Top 1,0 l/ha
12.05.97	Halmverkürzung: Terpal C 0,75 l/ha
23.05.97	3.N-Gabe
30.05.97	Ährenbehandlung: Opus Top 1,0 l/ha
24.07.97	Ernte

*Schweinegülle durchschnittlicher Nährstoffgehalt je Einzelgabe und ha: N: 79 kg, P: 69 kg, K: 54 kg, Mg: 24 kg, Ca: 68 kg
(Datenquelle: SFB 192, R. STRÖH pers. Mittlg.)

Tabelle 1.10: Bewirtschaftungsmaßnahmen auf Schlag 5 (1997/98 Winterraps, Sorte *Falcon*)

Datum	Maßnahme
24.07.97	Ernte Vorfrucht (Wintergerste „Alpaca“)
28.07.97	Stoppelbearbeitung Spatenrollegge
04.08.97	Stoppelbearbeitung Spatenrollegge
12.08.97	Grunddüngung: 140 kg K ₂ O (40% K ₂ O, 6% MgO), 90 Kg P ₂ O ₅ (46% Triple-Phosphat)
21.08.97	Gülleausbringung*, Bodenbearbeitung mit Spatenrollegge Pflügen (Pflugvariante)
22.08.97	Fräsen (Horschvariante) Aussaat: <i>Falcon</i> (70 K/m ²)
01.09.97	Pflanzenschutz: Butisan Top 2,0 l/ha, Quinmerac 250 g/ha
03.09.97	Pflanzenschutz: Fusilade 1,0 l/ha
07.10.97	Pflanzenschutz: Folicur 0,5 l/ha
26.02.98	1. N-Gabe (KAS)
24.03.98	Düngung: Kieserit 200 kg/ha (25% MgO, 20% S)
25.03.98	Gülleausbringung*
26.03.98	2. N-Gabe (KAS)
01.04.98	Pflanzenschutz: Folicur 0,75 l/ha
15.04.98	3. N-Gabe
08.05.98	Blütenspritzung: Konker R 1,25 l/ha
03.08.98	Ernte

*Schweinegülle durchschnittlicher Nährstoffgehalt je Einzelgabe und ha: N: 79 kg, P: 69 kg, K: 54 kg, Mg: 24 kg, Ca: 68 kg
(Datenquelle: SFB 192, R. STRÖH pers. Mittlg.)

Tabelle 1.11: Bewirtschaftungsmaßnahmen auf Schlag 2 (1998/99 Winterraps, Sorte *Falcon*)

Datum	Maßnahme
21.07.98	Ernte Vorfrucht (Wintergerste „Alpaca“)
07.08.98	Stoppelbearbeitung Grubber
14.08.98	Grunddüngung: 140 kg K ₂ O (40% K ₂ O, 6% MgO), 90 Kg P ₂ O ₅ (46% Triple-Phosphat)
18.08.98	Kalk: 15dt kohlenaurer Kalk (85% CaCO ₃)
20.08.98	Gülleausbringung*, Bodenbearbeitung mit Grubber
31.08.98	Pflügen (Pflugvariante)
01.09.98	Bodenbearbeitung mit Federzinkenegge (ges. Fläche) Fräsen (Horschvariante) Aussaat: <i>Falcon</i> (75 K/m ²) Pflugvariante mit Cambridgewalze gewalzt
02.09.98	Pflanzenschutz: Nimbus 3,0 l/ha
02.11.98	Pflanzenschutz: Fusilade 1,0 l/ha, Focus Ultra 0,5 l/ha, Nutribor 2 kg/ha
10.03.99	1. N-Gabe (KAS)
15.03.99	Pflanzenschutz: Quinmerac gegen Klette (nur Horschvariante)
31.03.99	2. N-Gabe (KAS)
01.04.99	Gülleausbringung*, Düngung: Kieserit 200 kg/ha (25% MgO, 20% S)
08.04.99	Pflanzenschutz: Folicur 0,75 l/ha
15.04.99	3. N-Gabe
08.05.99	Blütenspritzung: Konker R 1,25 l/ha
03.08.99	Ernte

*Schweinegülle durchschnittlicher Nährstoffgehalt je Einzelgabe und ha: N: 79 kg, P: 69 kg, K: 54 kg, Mg: 24 kg, Ca: 68 kg
(Datenquelle: SFB 192, R. STRÖH pers. Mittlg.)

Die Untersuchungen der vorliegenden Arbeit konzentrieren sich im wesentlichen auf den Winterraps. 1997 stand der Raps auf Schlag 1, 1998 auf den Schlägen 3 und 5 und 1999 auf Schlag 2. Als Versuchspflanze wurde auf den SFB-Flächen die Sorte *Falcon* angebaut. Die Aussaatstärke betrug im Herbst 1996 (für Versuchs- und Erntejahr 1997), 1997 95 Pfl./m² und 1998 90 Pfl./m². Die Wurzelsysteme des Winterrapsbestandes wurden 1997 an zwei, 1998 an sieben und 1999 nochmals an drei Terminen beprobt (Tabelle 1.12):

Tabelle 1.12: Übersicht über die Beprobungstermine (Winterraps)

Versuchsjahr 1997 (Schlag 1):	Blüte (BBCH-Code 65, 26. - 28. Mai 1997)
	Ernte (BBCH-Code 99, 5./6. Aug. 1997)
Versuchsjahr 1998 (Schlag 5):	Rosettenstadium (BBCH-Code 14, 2./3. November 1997)
	Rosettenstadium (BBCH-Code 18, 3. Februar 1998)
	Rosettenstadium (BBCH-Code 32, 23. - 25. März 1998)
	Schossen (BBCH-Code 55, 16. - 18. April 1998)
	Blüte (BBCH-Code 65, 18. - 20. Mai 1998)
	Schotenbildung (BBCH-Code 75, 18./19. Juni 1998)
	Ernte (BBCH-Code 99, 28./29. Juli 1998)
Versuchsjahr 1999 (Schlag 2):	Blüte (BBCH-Code 65, 18. - 20. Mai 1999)
	Schotenbildung (BBCH-Code 75, 22. - 24. Juni 1999)
	Ernte (BBCH-Code 99, 28./29. Juli 1999)

Zusätzlich wurden 1997 zu je zwei Terminen (Blüte/Ernte) Boden-/Wurzelproben in vierfacher Wiederholung von Winterweizen (Sorte: *Orestis*, Schlag 2) und Wintergerste (*Alpaca*, Schlag 3) entnommen (Tabelle 1.13). Die Aussaatstärke für Weizen und Gerste betrug im Herbst 1996 (Vegetationsperiode 1997) 280 Pflanzen/m².

Tabelle 1.13: Übersicht über die Beprobungstermine (Wintergerste und Winterweizen)

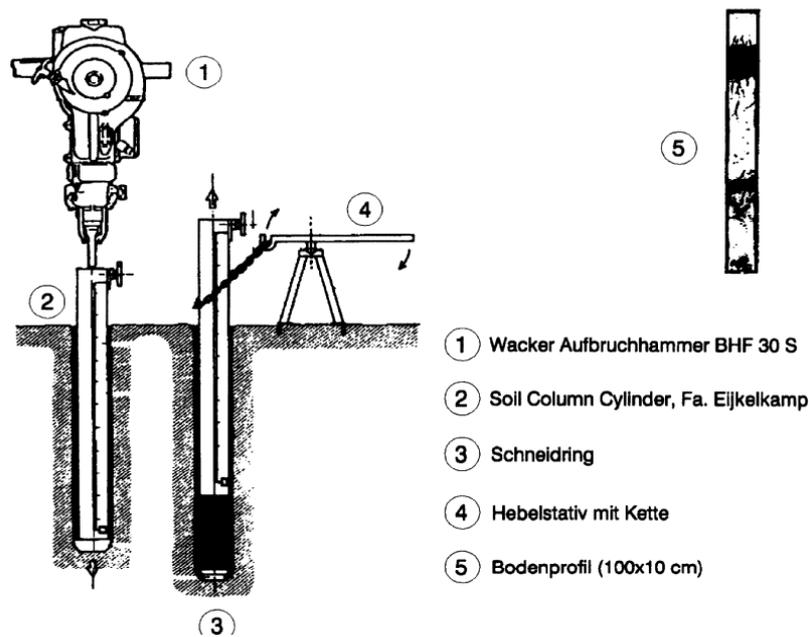
Wintergerste (Schlag 3):	Blüte (BBCH-Code 65, 24. April 1997)
	Ernte (BBCH-Code 99, 31. Juli 1997)
Winterweizen (Schlag 2):	Blüte (BBCH-Code 65, 29. April 1997)
	Ernte (BBCH-Code 99, 13. Aug. 1997)

Alle Versuchspartellen unterlagen im Zeitraum von 1990 bis 1999 kontinuierlich gleichbleibender Bodenbearbeitung und Stickstoffdüngung. Zu Versuchsbeginn unterlagen die Partellen damit bereits einer über sechs Jahre identischen Behandlung. Insbesondere für die Varianten mit reduzierter Bodenbearbeitung und N-Mangel bedeutet dies, daß die Differenzierung gegenüber den konventionell gepflügten und gedüngten Böden gut etabliert sein dürfte.

2.3. Bestimmungsmethoden – Schätzung des Netto-Wurzelwachstums

2.3.1. Probenahme und Auswaschen der Wurzeln

Als Bohrgerät zur Entnahme der Boden/Wurzelproben wurde ein Bodensäulenzylinder (Soil Column Cylinder, Fa. Eijkelkamp Agriresearch Equipment, Niederlande) mit einem Innendurchmesser von 8,5 cm verwandt (Abbildung 1.6).



Aus: METTE, 1994

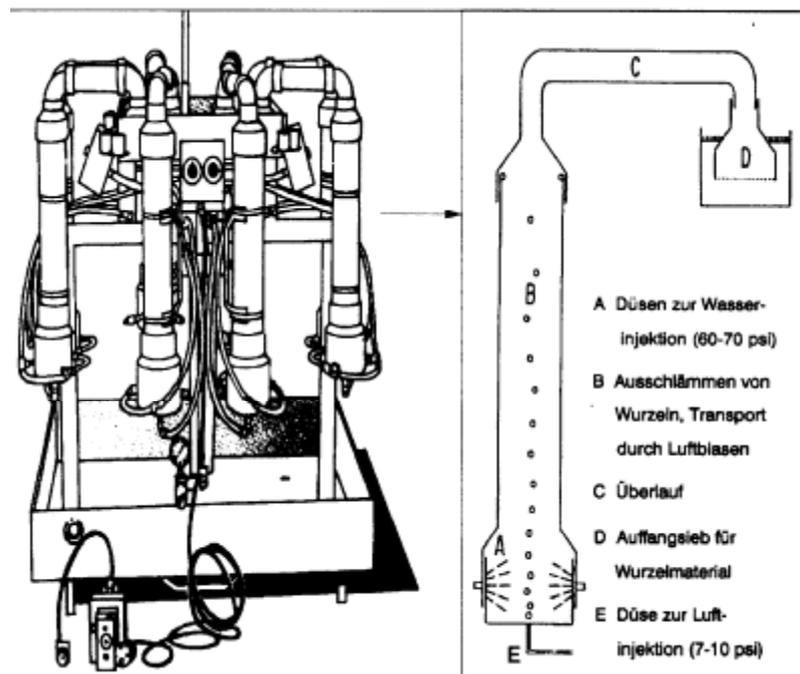
Abbildung 1.6: Aufbruchhammer und Bohrgerät

Zeitpunkt und Ort der Probenahme wurden mit dem Teilprojekt „A1“ des SFB abgestimmt. Die oberirdischen Pflanzenteile wurden auf zwei verschiedenen Teilflächen von zusammen 0,5 m² durch TP A1 geerntet. Direkt im Anschluß an die Sproßernte wurden je Teilfläche zwei bzw. drei Bohrungen durchgeführt. Das Bohrgerät wurde so angesetzt, daß sich die Stengelbasis im Zentrum des Zylinders befand und schließlich mit einem Benzinaufbruchhammer (BHF 30 S, Fa. Wacker, s. Abbildung 1.6) bis zur gewünschten Tiefe in den Boden getrieben. Der auf diese Weise gewonnene Bohrkern wurde in vier Tiefenabschnitte (0-10 cm, 10-30 cm, 30-60 cm, 60-100 cm) segmentiert, die Proben in Kunststoffbeutel verpackt und bei -20° C gelagert. Pro Versuchsvariante und Termin wurden je fünf Bohrungen durchgeführt. Insgesamt wurden mit 532 Bohrkernen über 2000 Einzelproben entnommen.

Die Trennung der Wurzeln von der Bodenmatrix erfolgte durch Auswaschen mit Hilfe einer Wurzelwaschanlage (Hydropneumatic Elutriation System, Fa. Gillison's Variety Fabrication, Inc., Benzonia MI, USA, Abbildung 1.7). Vor dem eigentlichen Auswaschvorgang wurden die noch tiefgefrorenen Bodenproben unter Wasser aufgetaut. Dadurch lösten sich die am Rand befindlichen, bereits aufgetauten Bodenpartikel vom inneren, noch gefrorenen Kern der Bodensäule und gingen direkt in die Bodensuspension über. Auf diese Weise wurde eine Lockerung oder Auflösung der Bodenaggregate erreicht und der Erosionsprozeß in der Wurzelwaschanlage insbesondere bei tonreichen Unterbodenproben erheblich beschleunigt.

Nach dem Auftauen wurde die Bodensuspension je nach Probenvolumen auf vier bis acht Röhren der Wurzelwaschanlage verteilt. Unter konstantem Druck von 60-90 psi wurde über drei Düsen Wasser seitlich in den unteren Teil der Röhren eingespritzt. Zusätzlich wurde durch eine Düse am unteren Röhreneende Druckluft mit 9-10 psi in den Wasserstrom injiziert. Im Wasser/Druckluftstrom wurden die Boden/Wurzelproben in den Kunststoffröhren der Anlage erodiert. Wasserdruck und Durchflußgeschwindigkeit waren so eingestellt, daß Ton

und Schluffteilchen mit dem Wasserstrom aus den Röhren abtransportiert und über einen Überlauf in Analysesiebe (530 μ) überführt wurden. Diese Korngrößenfraktionen konnten die Maschen der Analysesiebe passieren und wurden so von der Probe getrennt. Steine, Skelettanteile und Sand blieben in den Röhren zurück. Wurzeln und andere organische Bodenbestandteile (Strohreste, Bodenmakro- und Mesofauna usw.) wurden aufgrund ihres gegenüber dem Bodenmaterial geringeren spezifischen Gewichtes ebenfalls mit dem Wasserstrom in die Analysesiebe überführt und dort aufgefangen. Die in der Wassersäule aufsteigenden Luftblasen binden die spezifisch leichteren organischen Partikel und unterstützen so die Trennung und den Abtransport von Wurzeln und organischen Partikeln. Abhängig von Probenvolumen und Tongehalt wurden die Proben 4 bis 10 Minuten ausgewaschen.



Aus: METTE, 1994

Abbildung 1.7: Wurzelwaschanlage

Anschließend wurde das ausgewaschene Material aus den Analysesieben in eine weiße Kunststoffschüssel überführt. Durch mehrfaches Dekantieren wurden die Wurzeln von mineralischen und gröberen organischen Verunreinigungen getrennt und die auf diese Weise vorgereinigten Proben in Polystyrol Dosen bei -20°C gelagert.

2.3.2. Schätzung der Wurzellänge (Intersektionsmethode)

Die Wurzellängen wurden mit der Intersektionsmethode (NEWMAN 1966, TENNANT 1975) ermittelt. Die gesamte Länge der in einer Bodenprobe enthaltenen Wurzeln war für die Intersektionszählung zu groß. Daher wurden zunächst Verdünnungsreihen in Wasser hergestellt. Zu diesem Zweck wurden die Wurzeln in ca. 1 cm lange Stücke zerschnitten, in 1-L-PP-Bechergläser überführt und mit Wasser versetzt. Zusammenhängende Wurzelstücke wurden mit Pinzetten vorsichtig voneinander getrennt und das Becherglas mit Wasser auf genau 1 L

aufgefüllt. Durch mehrmaliges Hin- und Hergießen zwischen zwei 1-L-Bechergläsern wurde das Gemisch so lange bewegt, bis die Wurzelbruchstücke gleichmäßig im Wasser verteilt waren. Das so homogenisierte Gemisch wurde jetzt rasch auf beide Bechergläser zu gleichen Teilen verteilt, so daß nun in beiden Bechergläsern jeweils ein halber Liter Wasser mit jeweils der Hälfte der ursprünglichen Menge an Wurzelbruchstücken enthalten war. Diese Prozedur wurde mit je einer Teilmenge so oft wiederholt, bis eine für die anschließende Intersektionszählung geeignete Verdünnung erreicht war. Das auf diese Weise gewonnene Aliquot wurde in eine flache Glasschale (\varnothing 40 cm) überführt und diese auf ein quadratisches 2 cm Raster aufgebracht. Alle Schnittpunkte von Wurzelsegmenten mit den Linien des Rasters wurden gezählt. Durch Multiplikation mit einem statistisch ermittelten Faktor (TENNANT 1995) wurde aus der Anzahl der Schnittpunkte und dem Verdünnungsfaktor die Wurzellänge errechnet. Die Ergebnisse werden als Wurzellänge [km Wurzeln/ m^2 Bodenoberfläche] oder als Wurzellängendichte (WLD [cm Wurzeln/ cm^3 Boden]) angegeben.

2.3.3. Bestimmung der Wurzelrockenmasse

Die Aliquote der Wurzelproben des Erntetermins 1998 wurden nach der Zählung weitestgehend von organischen Verunreinigungen und mineralischen Rückständen gereinigt, bei 105°C bis zur Gewichtskonstanz getrocknet und gewogen. Anschließend wurden die aschefreie Trockensubstanz durch Verglühen bei 550°C und Subtraktion des Aschegewichtes ermittelt. Diese Daten wurden in Wurzelmasseindichten (WMD [mg Wurzeln/ cm^3 Boden]) umgerechnet. Da die für eine exakte Bestimmung der Wurzelrockenmasse erforderliche vollständige Reinigung der Wurzelproben extrem zeitaufwendig ist, wurden diese Daten nur für einen Termin ermittelt.

2.3.4. Berechnung von spezifischer Wurzellänge und Sproß/Wurzel-Verhältnis

Aus den ermittelten Wurzellängen und den Wurzelrockenmassen wird die spezifische (relative) Wurzellänge [mg/cm] berechnet. Je höher die Werte der relativen Wurzellänge, desto geringer sind die mittleren Wurzeldurchmesser. Das Sproß/Wurzel-Verhältnis wurde in Anlehnung an BARRACLOUGH (1984) aus Sproßrockenmassen und Wurzellängen berechnet. Aus dem Sproß/Wurzel-Verhältnis läßt sich eine Einschätzung der relativen Assimilatinvestition der Pflanze ins Wurzelsystem ableiten. Je enger das Sproß/Wurzel-Verhältnis, desto höher sind die Aufwendungen der Pflanze für das Wurzelsystem im Verhältnis zum Sproß.

2.4. ¹⁴C-Pulsmarkierung

Zur Schätzung von Wurzelumsatz und Rhizodeposition wurde eine ¹⁴C-Kohlenstoffbilanzierung nach ¹⁴C-Pulsmarkierung durchgeführt. Durch eine einmalige, vierstündige (Puls-) Be-gasung der Sprosse mit je 3,0 (bzw. 1,5) MBq ¹⁴C-CO₂ wurden Sproß und Wurzeln von ins-gesamt 54 Rapspflanzen mit ¹⁴C markiert und die ¹⁴C-Aktivität in Sproß, Wurzeln, Boden und Bodenluft nach definierten Allokationsperioden bestimmt.

2.4.1. Versuchsaufbau

Um sowohl Einflüsse der Stickstoffdüngung als auch der Bodenbearbeitung auf die Parameter Rhizodeposition und Wurzelumsatz zu überprüfen, wurden für die ¹⁴C-Pulsmarkierung vier Varianten aus dem Hauptversuch des SFB ausgewählt, durch die beide Behandlungen abge-deckt sind (Tabelle 1.14):

Tabelle 1.14: Übersicht über die ausgewählten Behandlungsvarianten:

Pflugdrillsaat	Frässlensaat System "Horsch"
0 kgN/ha*a („P0“)	0 kgN/ha*a („H0“)
240 kgN/ha*a („P240“)	240 kgN/ha*a („H240“)

Zum Beginn der Vegetationsperiode 1998 wurden in jeder Versuchsparzelle 12 durchschnittlich entwickelte Pflanzen ausgewählt. Um jede der Pflanzen wurde ein 40 cm langes Edel-stahlrohr (Wandstärke 1,9 mm) mit Hilfe des Benzinaufbruchhammers (vgl. Abbildung 1.6) 30 cm tief in den Boden getrieben. Die Pflanze befand sich dabei genau im Zentrum der Bo-densäule. Der Innendurchmesser der Rohre war mit 16,8 cm so gewählt, daß jeder Pflanze eine der mittleren Bestandesdichte entsprechende Bodenoberfläche zur Verfügung stand. In den aus dem Boden herausragenden Teil der Röhren wurden PVC-Flansche mit einem zwei-ten inneren Rohr (Ø 8,5 cm) eingebaut, so daß zwischen äußerem und innerem Rohr ein ge-schlossener Hohlraum mit freier Bodenoberfläche entstand (Abbildung 1.8). Die Kontakt-fläche zwischen Flansch und äußerem Rohr wurde mit einer Dichtmasse auf Silikonkaut-schukbasis („Dirko-Transparent“, Fa. Etring-Klinger GmbH, Dettingen/Erms) abgedichtet. Die freie Bodenoberfläche im inneren Rohr wurde mit Siliconabformmasse (Silastic 3481 + Härter Silastic 81F, Fa. Dow Corning, Wiesbaden) gasdicht versiegelt (vgl. SWINNEN et al. 1994). Zur späteren Installation von Anschlüssen zum Absaugen des aus dem Boden entwei-chenden ¹⁴CO₂ (Respirations-CO₂ von Wurzeln und Mikroorganismen „Boden-Wurzelat-mung“), sowie zur Belüftung, Bewässerung und Düngerapplikation war das äußere Rohr mit drei Bohrungen mit Innengewinde versehen.

Nach der ¹⁴C-Markierung wurde die Luft aus dem Hohlraum kontinuierlich über Gaswasch-flaschen abgesaugt. In die Gaswaschflaschen waren 50 ml 0,5M Natronlauge zur Absorption des aus dem Boden entweichenden CO₂ vorgelegt. Die zur Belüftung des Systems nachströ-mende Außenluft wurde über 5M Natronlauge von CO₂ gereinigt. Wasser- und Nährstoffver-

sorgung erfolgten über die Anschlüsse am äußeren Rohr entsprechend der Regenmenge bzw. der N-Düngungsvariante.

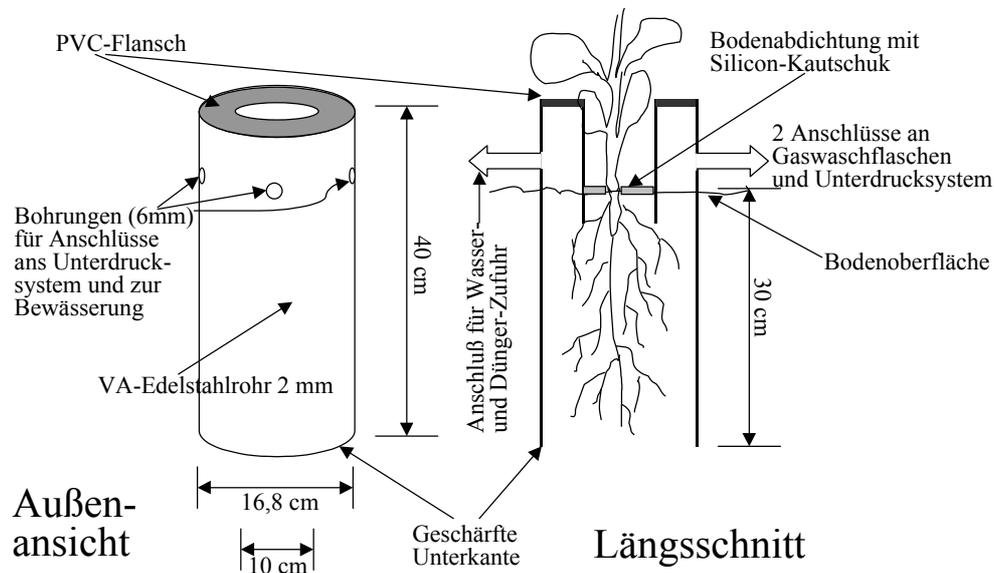


Abbildung 1.8: Aufbau der Bodensäulen

1999 wurde in der Variante P240 ein ergänzender Versuch mit neun Pflanzen durchgeführt. In sechs Bodenzylindern wurden hier zusätzlich zum oben beschriebenen Aufbau drei bzw. zwei mit wurzelfreiem Boden gefüllte Netzschläuche (Ingrowth-Cores, \varnothing 4 cm, Länge 30 cm) (vgl. STEINGROBE 2000) eingebaut. Auf die Installation eines inneren Rohres in die Bodensäulen mußte dabei aus Platzgründen verzichtet werden, so daß die „Boden-Wurzelatmung“ 1999 nicht bestimmt werden konnte. Parallel zu den Bodensäulen waren im freien Boden der Versuchsparzelle Ingrowth-Cores in vierfacher Wiederholung eingebaut (Abbildung 1.9).

Um einen möglichst optimalen Kontakt zwischen Parzellenboden und Netz zu erreichen und evtl. Schädigungen des Wurzelsystems zu minimieren, wurden alle Ingrowth-Cores zu Beginn der Vegetationsperiode gesetzt. Dazu wurden zunächst mit einem Bohrstock Löcher mit einem Winkel von 45° vorgebohrt. Anschließend wurden die noch leeren Netzschläuche, die auf ein PVC-Rohr aufgezogen waren, vorsichtig in die vorgebohrten Löcher eingeführt. Mit Beginn des Versuches wurde der erste Satz Ingrowth-Cores mit Boden gefüllt und das PVC-Rohr entfernt. Die Bodenmenge in den Schläuchen war so bemessen, daß nach vorsichtigem Verdichten etwa die mittlere Lagerungsdichte des umgebenden Bodens erreicht war. Das verwandte Bodenmaterial war der Versuchsparzelle entnommen worden. Die Bodenoberfläche (ca. 1 m^2) eines Teils der Parzelle war dazu mehrere Monate mit einer Plane abgedeckt und vegetationsfrei gehalten worden, um möglichst wurzelfreien Boden zu gewinnen. Das Material wurde anschließend an der Luft getrocknet und auf zwei cm gesiebt. Zwei Wochen nach dem Öffnen der Schläuche wurden die Ingrowth-Cores gezogen und gleichzeitig die nächste Serie befüllt und zur Bewurzelung geöffnet. Parallel zum Wechsel der Ingrowth-Cores wurden Bohrkernproben (30 cm Tiefe) zwischen den Pflanzen entnommen, um die Netto-Wurzelentwicklung im Bestand zu erfassen.

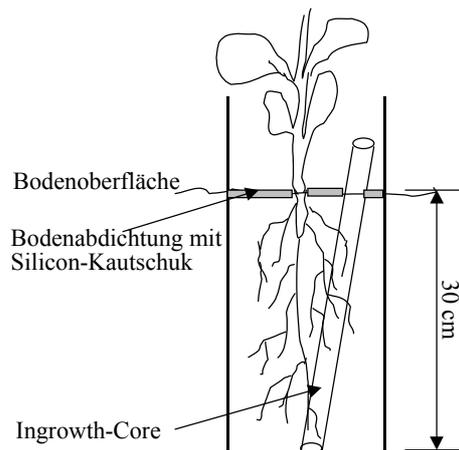


Abbildung 1.9: Einbau der Ingrowth-Cores in die Bodenzylinder

Die Entwicklung der Pflanzen in den Bodenzylindern verlief in beiden Versuchsjahren ohne erkennbaren Unterschied zu den übrigen Pflanzen der jeweiligen Parzelle. Ein zunächst vorgesehener Versuchsaufbau mit 100 cm langen Stahlrohren erwies sich auf dem Versuchstandort als ungeeignet. Durch die hohen Niederschläge im Winter 1999/98 und stauenden Schichten im Unterboden war die Bodenoberfläche in diesen Röhren lange Zeit überstaut, was zu starken Schädigungen der Pflanzen bis hin zu deren vollständigem Absterben führte.

2.4.2. Vorgehensweise bei der ^{14}C -Pulsmarkierung

Die Pulsmarkierung erfolgte in beiden Versuchsjahren Anfang Mai (BBCH-Code 63) zwischen 12.00 und 16.00 Uhr bei wolkenlosem Himmel. Auf die Oberfläche der Flansche wurden Reaktionsgefäße rutschfest angebracht und mit einer Vorlage von 3 ml ^{14}C - NaHCO_3 -Lösung mit einer spezifischen Aktivität von 1000 kBq/ml beschickt. Acrylglasshauben (Länge 150 cm, \varnothing 19 cm) wurden auf die Stahlrohre aufgesetzt und mit Moosgummimanschetten gasdicht mit ihnen verbunden.

Über einen Anschluß an der Begasungshaube wurde nun im Überschuß 10%ige Salzsäure in die Vorlage eingeleitet und $^{14}\text{CO}_2$ in die Markierungskammer freigesetzt. Nach zwei Stunden wurde $^{12}\text{CO}_2$ auf gleiche Weise nachgeliefert, um eine möglichst vollständige ^{14}C -Aufnahme durch die Pflanzen zu gewährleisten. Begasungszeit und Kohlendioxidmenge wurden so bemessen, daß der Kompensationspunkt für C_3 -Pflanzen zu keinem Zeitpunkt unterschritten wurde und nahezu die gesamte angebotene $^{14}\text{CO}_2$ -Menge von der Pflanze assimiliert werden konnte.

Nach insgesamt vier Stunden wurde die Haubenluft über Gaswaschflaschen abgesaugt und nicht assimilierte $^{14}\text{CO}_2$ -Reste in 0,5 m Natronlauge absorbiert. Nach der Pulsmarkierung wurden die Küvetten abgenommen und die Anschlüsse für das Unterdrucksystem sowie Bewässerungs und Düngemittelzufuhr an den äußeren Rohren angebracht. Die Restaktivitäten in vorgelegter Lösung und Haubenluft wurden mittels Flüssigkeitsszintillationszählung (Liquid scintillation counting, LSC) bestimmt.

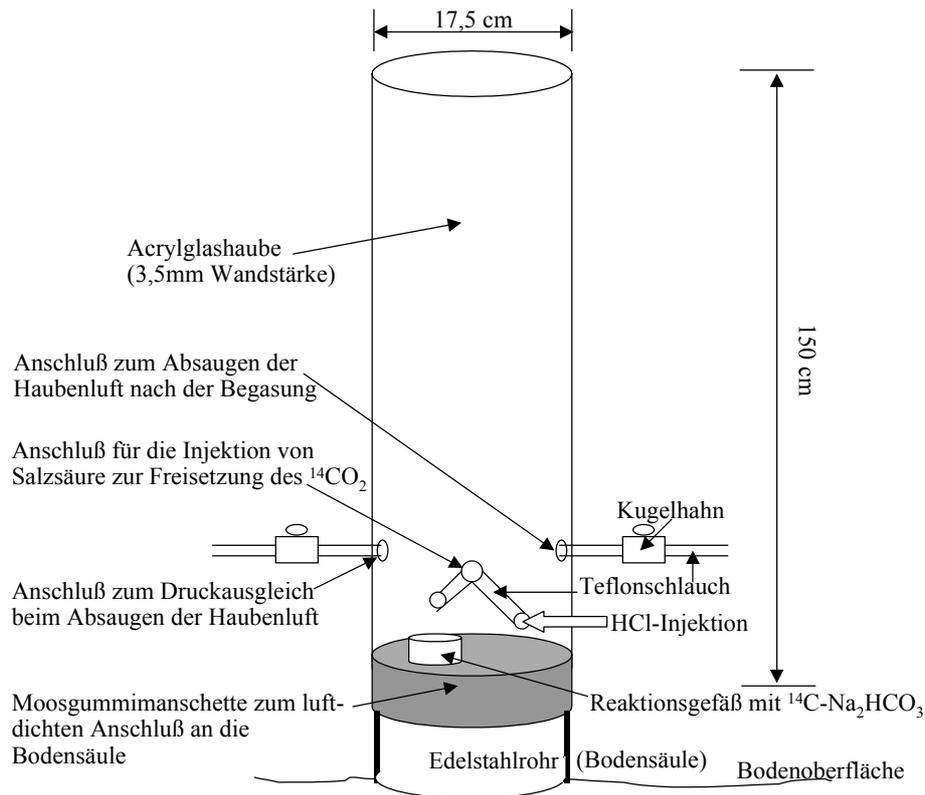


Abbildung 1.10: Aufbau der Begasungsküvetten

Direkt im Anschluß an die Pulsmarkierung wurden die Röhren an die Gaswaschflaschen angeschlossen und leichter Unterdruck angelegt. Zu diesem Zweck waren am Rand des Schlages zwei Vakuumpumpen mit Druckausgleichsgefäßen und Kontaktmanometern installiert, die den Unterdruck konstant zwischen -0,5 und -0,9 bar hielten.

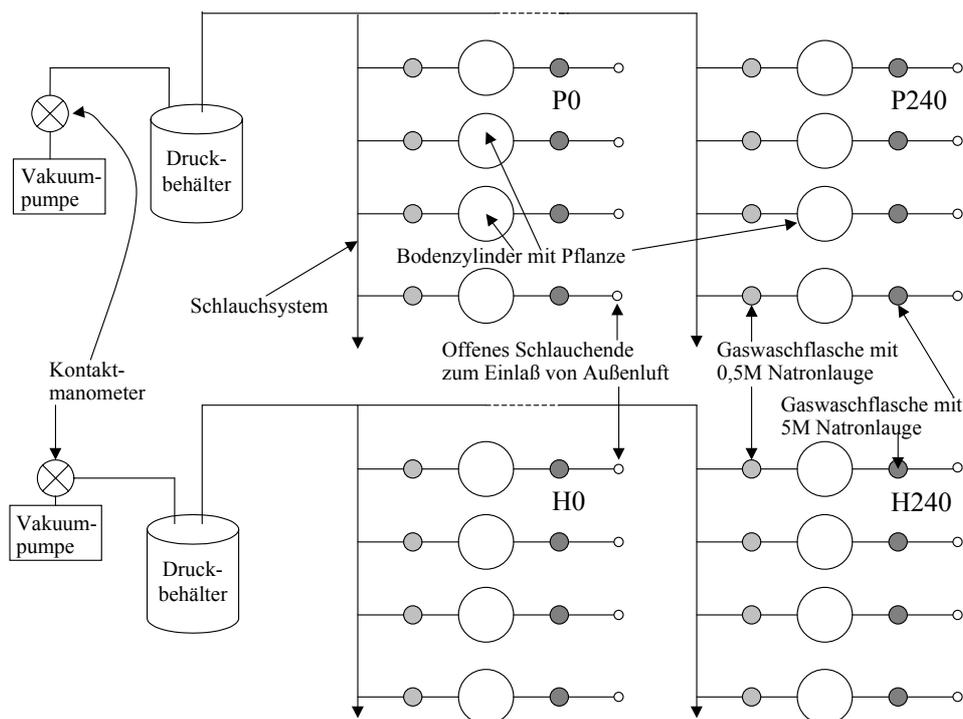


Abbildung 1.11: schematischer Aufbau des Unterdrucksystems

2.4.3. Probenahme, Aufbereitung der Proben und Bestimmung der ^{14}C -Aktivität

Die NaOH-Lösung mit dem absorbierten CO_2 aus der Boden-Wurzel-Atmung wurde abwechselnd nach drei bzw. vier Tagen beprobt. Dazu wurden die Gaswaschflaschen gegen Flaschen mit frischer Natronlauge ausgetauscht. Aus der Absorberlösung wurden im Isotopenlabor 0,5 ml-Aliquote in dreifacher Wiederholung entnommen, in Szintillationsvials überführt, mit 10 ml Szintillationscocktail (Lumagel SB, Fa. Baker) versetzt und die ^{14}C -Aktivität an einem Flüssigkeitszintillationsspektrometer (TriCarb 2100 TR, Fa. Packard Instruments) mittels LSC bestimmt.

Drei Wochen nach der Pulsmarkierung wurden in jeder Versuchsvariante drei Pflanzen geerntet und die dazugehörigen Bodensäulen mit Hilfe einer Hebelvorrichtung entnommen. In der Versuchsvariante P240 wurden zusätzlich nach einer bzw. zwei Wochen je drei Pflanzen geerntet, anhand derer die Allokationsdauer und die Stabilisierung der Assimilatverteilung überprüft wurde. Zur Ernte wurden alle verbliebenen Röhren und Pflanzen entnommen.

Die Entnahme von je drei Pflanzen und Bodensäulen des Zusatzversuches 1999 erfolgte drei, bzw. neun Wochen nach der Pulsmarkierung sowie zur Ernte nach 13 Wochen. Drei Wochen nach der Begasung wurde der erste Satz Ingrowth-Cores mit Boden befüllt und geöffnet. Im Abstand von jeweils zwei Wochen Bewurzelungsdauer wurden die Cores aus den Röhren entnommen und gleichzeitig die nächste Serie zur Bewurzelung geöffnet.

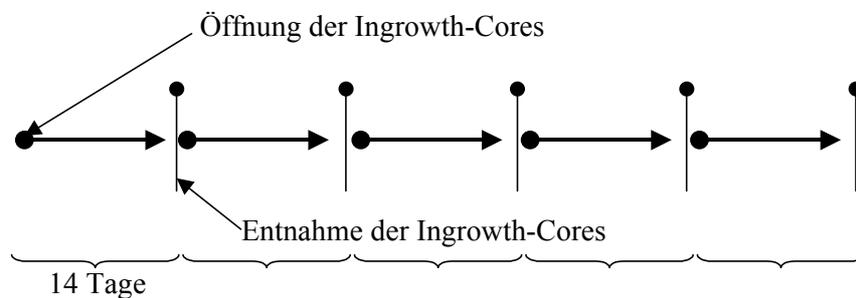


Abbildung 1.12: Beprobungsschema des Ingrowth-Cores-Versuches

Die oberirdischen Pflanzenteile wurden in ihre Sproßorgane zerlegt, die Bodensäulen in drei Schichten à 10 cm aufgeteilt, gewogen, getrocknet (105°C) und nochmals gewogen. Anschließend wurden die Wurzeln schichtweise von Hand ausgewaschen (0,5 mm-Sieb). Die Pfahlwurzel wurde von allen Seitenwurzeln getrennt und als separate Einzelprobe weiterverarbeitet. Die Bodensuspension wurde aufgefangen und homogenisiert. Unter ständigem Rühren wurde eine Unterprobe von 1 Liter aus der Bodensuspension entnommen. Sproß-, Wurzel- und Bodenproben wurden getrocknet (80° bzw. 105°C), gewogen und gemahlen. Zur Bestimmung der ^{14}C -Aktivität wurden in dreifacher Wiederholung jeweils zwischen 100 und 300 mg der Sproß- bzw. Wurzelproben in Verbrennungshütchen aus Zellstoff eingewogen. Diese wurden verschlossen, gepreßt und in einem Verbrennungsofen („Biological Oxidizer“, Fa. Packard) bei 900°C im Sauerstoffstrom oxidiert. Das entstandene ^{14}C - CO_2 wurde in einem Gemisch aus einer Absorberlösung (Carbosorb, Fa. Packard) und einem Szintillationscocktail (Permaflour, Fa. Packard) aufgefangen und die ^{14}C -Aktivität mittels LSC bestimmt. Den

Bodenproben wurden 1 bis 2 g entnommen und mit Zellulosepulver vermengt, um eine möglichst vollständige Oxidation der Kohlenstoffverbindungen zu erreichen. Das Gemisch wurde fein gemörsert und anschließend im Biological Oxidizer verbrannt. Absorption des entstehenden CO₂ und Bestimmung der ¹⁴C-Aktivität erfolgten in der für die Pflanzenproben beschriebenen Vorgehensweise. Die ¹⁴C-Aktivitäten in Wurzeln und Boden aus den Ingrowth-Cores wurden mit denselben Verfahren bestimmt.

Die Ergebnisse der drei Laborparallelen wurden gemittelt. Bei Abweichung eines Einzelwertes >2% vom Mittelwert wurde die Probe erneut homogenisiert und die Analyse wiederholt. Vor jeder Meßreihe wurden die Wirkungsgrade von Oxidation und Messung durch Verbrennung und Messung von Blindproben und Standards ermittelt.

Sämtliche Arbeiten mit radioaktivem Material wurden im Isotopenlabor des Instituts für Meereskunde der Christian-Albrechts-Universität zu Kiel durchgeführt. Die Feldarbeiten mit dem Radionuklid ¹⁴C erfolgten mit Genehmigung Nr. F 100 - 9.2/1 - RS (§ 3 der StrlSchV) des Ministeriums für Arbeit, Gesundheit und Soziales des Landes Schleswig-Holstein vom 02.03.1998.

2.5. Statistische Auswertung

Die Verarbeitung der Daten, Berechnung von Mittelwerten, Standardabweichung usw. erfolgte mit Microsoft-Excel.

Zur statistischen Auswertung wurde SAS (SAS Institute Inc., Cary N.C., USA, 1993) verwendet. Die SFB-Versuchsflächen sind als Spaltanlage mit der Großversuchseinheit Bodenbearbeitung und der Kleinversuchseinheit N-Niveau angelegt. Die WLD-Daten von Winterripps wurden über eine „Mixed-Model“-Analyse mit der Prozedur „mixed“ nach BONFERRONI varianzanalytisch verrechnet. Dabei gingen die Mittelwerte aus fünf Bohrungen je Parzelle als Einzelwerte und die Versuchsjahre als Wiederholungen in die Berechnung ein. Versuchsjahr und Interaktion Versuchsjahr*Bodenbearbeitung wurden als „Random-Faktoren“ an das Modell übergeben. Aufgrund des Versuchsdesigns des SFB konnte der Prüffaktor „Bodenbearbeitung“ nur mit lediglich zwei Freiheitsgraden getestet werden.

Für Wintergerste und Winterweizen wurden Daten nur in einem Versuchsjahr ermittelt. Hier erfolgte die Varianzanalyse nach BONFERRONI mit der Prozedur GLM, wobei die einzelnen Bohrungen wie „Microplots“ behandelt wurden.

Die Varianzanalyse (BONFERRONI) für die Daten aus den ¹⁴C-Pulsmarkierungsversuchen wurden ebenfalls mit der Prozedur GLM durchgeführt. Die Überprüfung der Normalverteilung erfolgte mit der Prozedur UNIVARIATE. Statistisch signifikante Unterschiede ($P \leq 0,05$) sind mit unterschiedlichen Buchstaben gekennzeichnet.

3. Literatur

- AG BODEN (1996): Bodenkundliche Kartieranleitung, 4. Auflage, Nachdruck 1996, Hannover.
- BAEUMER, K., W. EHLERS & G. PAPE (1971): Erste Erfahrungen im Anbau ohne Bodenbearbeitung in Göttingen. In: Landw. Forsch., Sonderheft 26, S. 264-272.
- BALL, B. C., R. W. LANG, E. A. G. ROBERTSON & M.F. FRANKLIN (1994): Crop performance and soil conditions on imperfectly drained loams after 20-25 years of conventional tillage or direct drilling. In: Soil & Tillage Research 31, S. 97-118.
- BARRACLOUGH, P. B. (1984): The growth and activity of winter wheat roots in the field: root growth of high yielding crops in relation to shoot growth. In: Journal of Agricultural Science Cambridge 103, S. 439-442.
- BARRACLOUGH, P. B. (1989): Root growth, macro-nutrient uptake dynamics and soil fertility requirements of a high-yielding winter oilseed rape crop. In: Plant and Soil 119, S. 59-70.
- BIOLOGISCHE BUNDESANSTALT FÜR LAND- UND FORSTWIRTSCHAFT (Hrsg.) (1997): Growth Stages of Plants/Entwicklungsstadien von Pflanzen. BBCH-Monograph. Blackwell Wissenschaftsverlag Berlin, Wien, Oxford, Edinburgh, Boston, London, Melbourne, Paris, Tokio.
- BLUME, H.-P. & H. FINNERN (1993): Landschaften Schleswig-Holsteins, 3. Böden und Bodengesellschaften. In: Mitteilungen der Deutschen Bodenkundlichen Gesellschaft 70, Exkursionsführer Jahrestagung 1993 Kiel, S. 21-25.
- BÖHM, W. (1979): Methods of studying root systems. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, New York.
- BONARI, E., M. MAZZONCINI & A. PERUZZI (1995): Effects of conventional and minimum tillage on winter oil seed rape (*Brassica napus* L.) in a sandy soil. In: Soil & Tillage Research 33, S. 91-108.
- BØRRESEN, T. & A. NIØS (1994): The effect of ploughing depth and seedbed preparation on crop yield, weed infestation and soil properties from 1940 to 1990 on a loam soil in south eastern Norway. In: Soil and Tillage Research 32, S. 21-39.
- CANNELL, R. Q. (1985): Reduced tillage in North-West Europe – a review. In: Soil & Tillage Research 5, S. 129-177.
- COMIA R. A., M. STENBERG, P. NELSON, T. RYDBERG & I. HAKANSSON (1994): Soil and crop responses to different tillage systems. In: Soil & Tillage Research 29, S. 335-355.
- DRECCER, M. F., A. H. C. M. SCHAPENDONK, G. A. SLAFER & R. RABBINGE (2000): Comparative response of wheat and oilseed rape to nitrogen supply: absorption and utilisation efficiency of radiation and nitrogen during the reproductive stages determining yield. In: Plant and Soil 220, S. 189-205.

- EKEBERG, E. & H. C. F. RILEY (1997): Tillage intensity on soil properties and crop yield in a long-term trial on morainic loam soil in southeast Norway. In: *Soil & Tillage Research* 42, S. 277-293.
- FORBES, P. J., K. E. BLACK & J. E. HOOKER (1997): Temperature-induced alteration to root longevity in *Lolium perenne*. In: *Plant and Soil* 190, S. 87-90.
- FRÄNZLE, O. (1993^a): Landschaften Schleswig-Holsteins, 1. Geomorphogenese und Substratverteilung. In: *Mitteilungen der Deutschen Bodenkundlichen Gesellschaft* 70, Exkursionsführer Jahrestagung 1993 Kiel, S. 9-15.
- FRÄNZLE, O. (1993^b): Landschaften Schleswig-Holsteins, 2. Klima. In: *Mitteilungen der Deutschen Bodenkundlichen Gesellschaft* 70, Exkursionsführer Jahrestagung 1993 Kiel, S. 17-19.
- FREY, D. (1998): Eignung des Systems Horsch als reduzierte Bodenbearbeitung zur Förderung der Bodenfruchtbarkeit auf Böden des Östlichen Hügellandes in Schleswig-Holstein. Dissertation. In: BLUME, H.-P., A. FINCK, R. HORN, B. SATTELMACHER (Hrsg.): *Schriftenreihe Institut für Pflanzenernährung und Bodenkunde Universität Kiel* 43.
- HABEKOTTÉ, B. (1993^a): Identification of strong and weak yield determining components of winter oilseed rape compared with winter wheat. In: *Eur. J. Agron.* 7, S. 315-321.
- HABEKOTTÉ, B. (1993^b): Options for increasing yield of winter oilseed rape (*Brassica napus* L.): a simulation study. In: *Field Crops Res.* 54, S. 109-126.
- HABEKOTTÉ, B. (1993^c): Quantitative analysis of pod formation, seed set and seed filling in winter oilseed rape (*Brassica napus* L.) under field conditions. In: *Field crops Res.* 35, S. 21-33.
- HANSSON, A.-C., R. PETERSSON & K. PAUSTIAN (1987): Shoot and Root Production and Nitrogen Uptake in Barley, with and without Nitrogen Fertilization. In: *J. Agronomy & Crop Science* 158, S. 163-171.
- HOCKING, P. J., P. J. RANDALL & D. DEMARCO (1997): The response of dryland canola to nitrogen fertilizer: partitioning and mobilization of dry matter and nitrogen and nitrogen effects on yield components. In: *Field Crops Res.* 49, S. 201-220.
- HORN, R., T. BAUMGARTL, T. ROWECK & C. KÖBBEMANN (1993): Versuchsgut Hohenschulen – Bodenkundliche Untersuchungen im Rahmen des Sonderforschungsbereiches 192. In: *Mitteilungen der deutschen Bodenkundlichen Gesellschaft* 70, Exkursionsführer Jahrestagung 1993 Kiel, S. 275-286.
- HORSCH, D. (1994): Reduzierte Bodenbearbeitung, angepasste Saattechnik und Unkrautbekämpfung nach dem System Horsch. In: DIERCKS, R. & R. HEITFUSS (Hrsg.): *Integrierter Landbau*. BLV-Verlagsgesellschaft, München, Wien, Zürich, S. 293-281.
- KARUNATILAKE, U., H. M. VAN ES & R. R. SCHINDELBECK (2000): Soil and maize response to plow and no-tillage after alfalfa-to-maize conversion on a clay loam soil in New York. In: *Soil & Tillage Research* 55, S. 31-42.

- KUNDLER, P. & M. SMUKALSKI (1988): Ertragswirkung von Beregnung, Bodenbearbeitung, N-Düngung und organischer Düngung auf lehmigen Sandböden in einem 8jährigen Feldversuch. In: Arch. Acker- und Pflanzenbau Bodenkd. 32/3, S. 161-169.
- LINKER, S. (2000): Raps: Hoher Bedarf schafft feste Preise. In: Internetseite des Hessischen Dienstleistungszentrums für Landwirtschaft, Gartenbau und Naturschutz (www.HTRL.de, Stand: 04/2000).
- METTE, R. (1994): Ertragsstruktur und Mineralstoffaufnahme von Mais und Hafer im Einflußbereich von Wallhecken. Auswirkungen auf den Mineralstoff- und Wasserhaushalt unter besonderer Berücksichtigung der Wurzelökologie von Kulturpflanzen und Knickvegetation. Dissertation Universität Kiel. Verlag Ulrich E. Grauer, Stuttgart.
- MEYNEN, E. & J. SCHMIDTHÜSEN (1962): Handbuch der naturräumlichen Gliederung Deutschlands. Bonn-Bad Godesberg.
- NEWMAN, E. J. (1966): A method of estimating the total length of root in a sample. J. appl. Ecol. 3, S. 139-145.
- RASMUSSEN, K. J. (1999): Impact of ploughless soil tillage on yield and soil quality: A Scandinavian review. In: Soil & Tillage Research 53, S. 3-14.
- SEYFARTH, W., M. JOSCHKO, J. ROGASIK, W. HÖHN, J. AUGUSTIN, S. SCHROETTER (Hrsg.) (1999): Bodenökologische und pflanzenbauliche Effekte konservierender Bodenbearbeitung auf sandigen Böden. ZALF-Bericht 39, Müncheberg.
- SHEPHERD, T. & H. V. DAVIES (1993): Carbon Loss from the Roots of Forage Rape (*Brassica napus* L.) Seedlings Following Pulse-labelling with $^{14}\text{CO}_2$. In: Annals of Botany 72, S. 155-163.
- STEINGROBE, B., H. SCHMID & N. CLAASEN (2000): The use of the ingrowth core method for measuring root production of arable crops – influence of soil conditions inside the ingrowth core on root growth. In: J. Plant Nutr. Soil Sci. 163, S. 459-465.
- SWINNEN, J., J. A. VAN VEEN & R. MERCKX (1994): ^{14}C -pulse-labelling of field-grown spring wheat: an evaluation of its use in rhizosphere carbon budget estimations. In: Soil Biology and Biochemistry 26, 161-190.
- TENNANT, D. (1975): A test of a modified line intersect method of estimating root length. In: The Journal of Ecology 63, S. 995-1001.
- TEUTEBERG, W. (1980): Der Anbau von Raps unter besonderer Berücksichtigung der Düngung. In: Kali-Briefe 15, S. 297-303.
- THOMS, K. (1992): Einfluß eines plazierten Mineralstoffangebotes auf die Morphologie und Physiologie des seminalen Wurzelsystems von Mais (*Zea mays* L.), Dissertation, Kiel.
- TIGGES, U. (2000): Untersuchungen zum mehrdimensionalen Wassertransport unter besonderer Berücksichtigung der Anisotropie der hydraulischen Leitfähigkeit. Dissertation. In: BLUME, H.-P., R. HORN, J. LAMP, B. SATTELMACHER (Hrsg.): Schriftenreihe Institut für Pflanzenernährung und Bodenkunde Universität Kiel 19.

- UFOP (2004): Internetseite der Union zur Förderung von Öl- und Proteinpflanzen e.V. (www.ufop.de, Stand: 02/2004)
- VERHOOG, A. D. (2002): Ölsaatenanbau in der EU. In: EUROSTAT (Hrsg.):, Statistik kurz gefaßt – Thema 5: Landwirtschaft und Fischerei. S. 1-7.
- ZIOGAS, G. (1995): Geologie und Böden der Versuchsbetriebe Lindhof und Hohenschulen der Christian-Albrechts-Universität zu Kiel. Quartärgeologische und bodenkundliche Kartierung, Genese, Vergesellschaftung, Ökologie, Funktionen. Dissertation, Universität Kiel.

Teil 2: Vergleich der Wurzelwachstumsdynamik der Kulturarten Wintergerste, Winterweizen und Winterraps und ihrer Beeinflussung durch N-Düngung und Bodenbearbeitung

1. Einleitung

Die Getreidearten Weizen und Gerste besitzen als Gräser ein homorhizes Wurzelsystem. Der Kreuzblütler Raps hingegen bildet ein allorhizes Wurzelsystem aus (KUTSCHERA, 1960). Im Gegensatz zu den Poaceae sind die Wurzeln von Raps nicht mycorrhiziert. Hinsichtlich der Zuteilung von Assimilaten zum Wurzelsystem und deren Nutzung werden immer wieder prinzipielle Unterschiede zwischen monocotyledonen und dicotyldonen Spezies vermutet (z.B. WHIPPS 1987). Aufgrund dieser strukturellen Unterschiede liegt die Vermutung nahe, daß die artspezifischen Reaktionen hinsichtlich der Wurzelentwicklung auf variierte Bodenbearbeitung und N-Düngung verschieden ausfallen. Besonderes Augenmerk galt daher im ersten Versuchsjahr (1997) der Frage, ob die genannten Kulturen in vergleichbarer Weise auf die ackerbaulichen Maßnahmen (Bodenbearbeitung und N-Düngung) reagierten oder ob hinsichtlich der Wurzelentwicklung artspezifische Unterschiede festzustellen waren. Dazu werden im Folgenden zunächst die Ergebnisse der Wurzellängenuntersuchungen aufgeschlüsselt nach Kulturart, Entwicklungsstadium und Bodentiefe vorgestellt. Anschließend werden die spezifischen Unterschiede zwischen den untersuchten Kulturpflanzenarten herausgearbeitet und diskutiert.

Die Beurteilung der Auswirkungen der Versuchsfaktoren, insbesondere der Bodenbearbeitung, auf die Wurzelentwicklung von Winterweizen und Wintergerste war z.T. erheblich eingeschränkt, da für die Getreidearten – aufgrund des Platzbedarfes anderer Teilprojekte des SFB 192 – nur eine eingeschränkte Anzahl an Versuchspartellen zur Verfügung stand. Eine detaillierte Darstellung der Versuchsflächen, der Bewirtschaftung, der unterschiedlichen Versuchsvarianten sowie der Untersuchungsmethoden wird in Teil 1, Kap. 2 vorgenommen.

2. Witterungsverlauf

Bodenwassergehalt (CANNELL 1985, HARRACH & VORDERBRÜGGE 1991) und Bodentemperatur (BOWEN 1991, FORBES et al. 1997) sind wichtige Steuergrößen für das Wurzelwachstum. Die folgenden Abbildungen zeigen die Tagesmittel der Luft- und Bodentemperaturen sowie die Niederschlagsmengen jeweils ab vierzehn Tage vor dem Beginn der jeweiligen Probenahme:

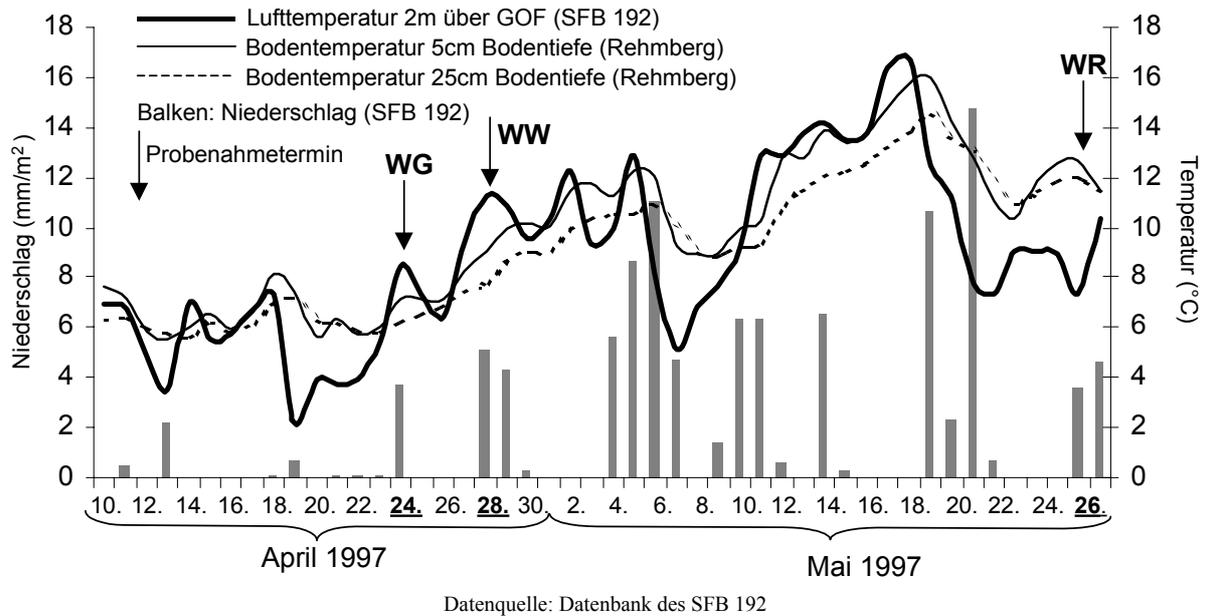


Abbildung 2.1: Tagesmittel der Luft- und Bodentemperaturen sowie der Niederschlagsmenge 14 Tage vor, und während der Probenahme zur Blüte (Pfeile kennzeichnen Probenahmetermineine, WG = Wintergerste, WW = Winterweizen, WR = Wintertraps)

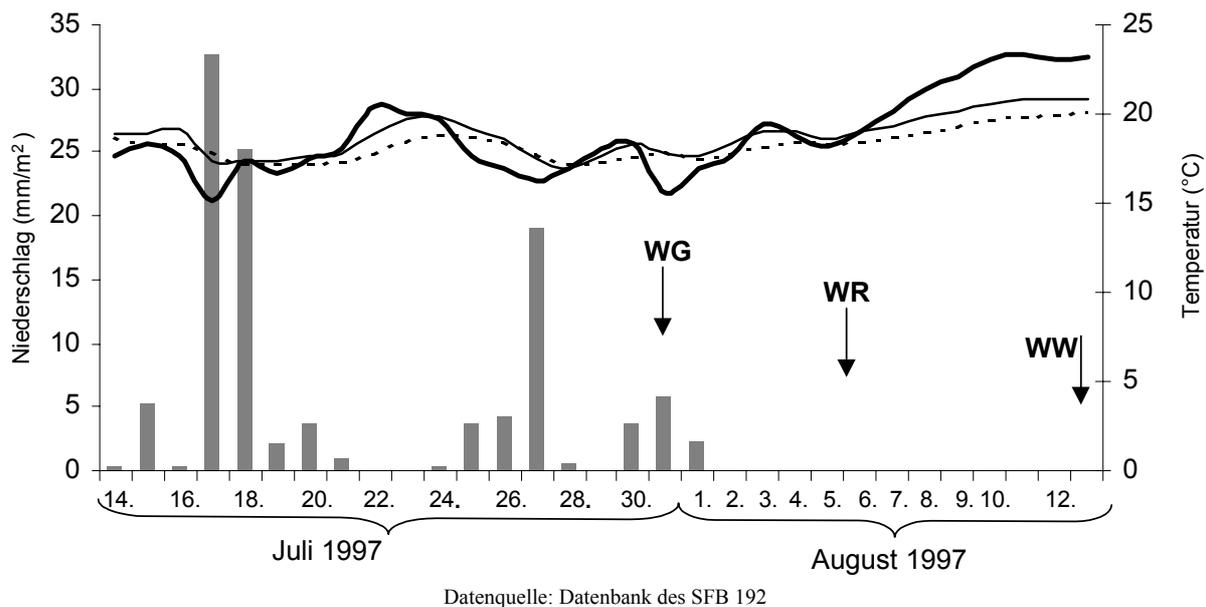


Abbildung 2.2: Tagesmittel der Luft- und Bodentemperaturen sowie der Niederschlagsmenge 14 Tage vor, und während der Probenahme zur Ernte, Zeichenerklärung siehe Abbildung 2.1.

3. Ergebnisse

3.1. Wintergerste

Bei der Betrachtung der Durchwurzelungsintensitäten unter Wintergerste (WG) zur Blüte (BBCH-Code 65) 1997 (Abbildung 2.3) fällt in allen Behandlungsvarianten zunächst eine starke Abnahme der Wurzellängendichte (WLD) mit zunehmender Bodentiefe auf. In den oberen Bodenschichten war der Rückgang der Bewurzelung mit der Tiefe am stärksten ausgeprägt und schwächte sich in tieferen Lagen immer mehr ab. Mit sehr guter Näherung lassen sich diese Beobachtungen mit exponentiellen Funktionen beschreiben. Erwartungsgemäß war bei allen Kulturen zu jedem Zeitpunkt eine enge Beziehung zwischen der Bodentiefe und der Durchwurzelungsintensität (Gerste, Termin Blüte: $r^2 = 0,83 - 0,86$) festzustellen.

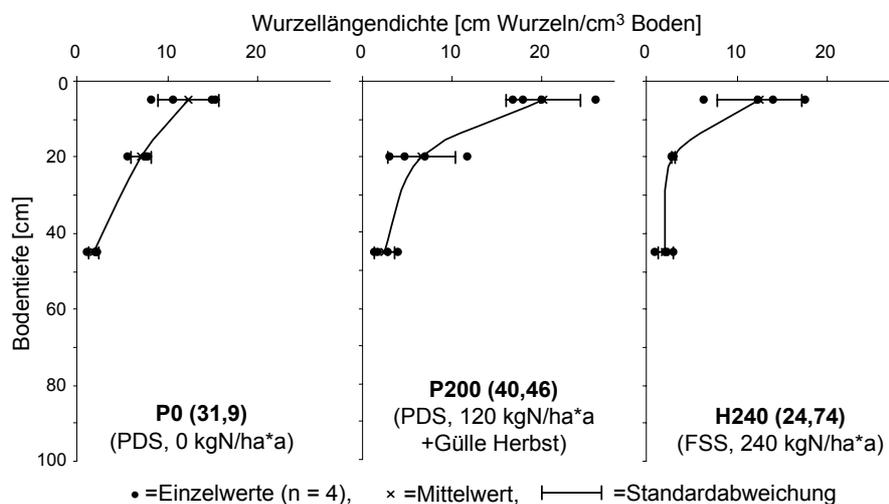


Abbildung 2.3: Wurzellängendichten von Wintergerste zur Blüte 1997 bei unterschiedlicher Bodenbearbeitung und N-Düngung in Abhängigkeit von der Bodentiefe. PDS = Pflugdrillsaat, FSS = Frässlensaat System Horsch; Zahlen in Klammern: Gesamt-Wurzellänge ($WL_{(0-100)}$ [km/m^2])

Der Einfluß der **N-Düngung** ist bei einem Vergleich der Varianten P0 und P200 gut zu erkennen. Gegenüber P200 war die Durchwurzelung des Gesamtprofils ($WL_{(0-60)}$) in der gepflügten N-Mangelvariante P0 deutlich geringer. Hier hatten die Pflanzen zur Blüte bis in 60 cm Bodentiefe ein Wurzelsystem mit einer mittleren Länge von $31,9 \text{ km}/\text{m}^2$ etabliert, während unter guter N-Versorgung bereits über $40 \text{ km}/\text{m}^2$ Wurzeln vorzufinden waren. Insbesondere in der Oberkrume bewirkte Stickstoffdüngung eine stark intensivierete Durchwurzelung: Die $WL_{(0-10)}$ der Variante P200 übertraf die der P0 um fast das Doppelte.

Zur Charakterisierung der Effekte der **Bodenbearbeitung** standen für WG nur die Varianten P200 und H240 zur Verfügung. Die Unterschiede hinsichtlich des N-Niveaus dieser beiden Varianten ergaben sich aufgrund des Platzbedarfes anderer Teilprojekte des SFB 192 und sind nur sehr geringfügig, so daß hinsichtlich der Bodenbearbeitungseffekte von einer guten Vergleichbarkeit dieser Varianten auszugehen ist. Die reduzierte Bodenbearbeitung des Systems Horsch hatte im Vergleich zu den gepflügten Varianten eine stark abweichende WLD-Tiefen-

verteilung zur Folge. In der Oberkrume lag die WLD nur etwa auf dem Niveau der Variante P0, aber deutlich unter dem der Variante P200. In der Unterkrume blieb die WLD mit 3 cm/cm^3 so weit hinter beiden Pflugvarianten (P0: $7,1 \text{ cm/cm}^3$, P200: $6,6 \text{ cm/cm}^3$) zurück, daß die Gesamtwurzellänge mit nur $24,7 \text{ km/m}^2$ nicht einmal den Wert der N-Mangelvariante P0 erreichte.

Das oben beschriebene Muster der Wurzel-Tiefenverteilung, gekennzeichnet durch eine annähernd exponentielle Abnahme der WLD mit der Bodentiefe ($r^2 = 0,76 - 0,87$), wurde auch bei der Beprobung zum Erntetermin (BBCH-Code 99, Abbildung 2.4) vorgefunden:

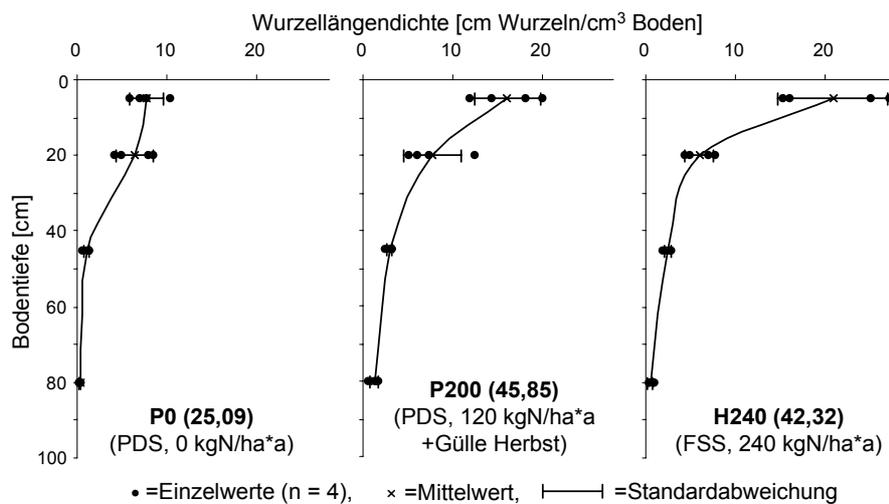


Abbildung 2.4: Wurzellängendichten von Wintergerste zur Ernte 1997 bei unterschiedlicher Bodenbearbeitung und N-Düngung in Abhängigkeit von der Bodentiefe. PDS = Pflugdrillsaat, FSS = Frässlensaat System Horsch; Zahlen in Klammern: Gesamtwurzellänge ($WL_{(0-100)}$ [km/m^2])

Die Unterschiede zwischen den **N-Düngungsniveaus** waren am Ende der Vegetationsperiode stärker ausgeprägt als zur Blüte. Mit steigender Stickstoffversorgung war zu diesem Zeitpunkt eine intensivere Durchwurzelung des Bodens festzustellen. Unter N-Mangel hatte die Gerste im Mittel eine $WL_{(0-60)}$ von $23,7 \text{ km/m}^2$ ausgebildet. Im Boden der Variante P200 war zum gleichen Zeitpunkt ein Wurzelsystem mit fast der doppelten Länge ($40,7 \text{ km/m}^2$) vorzufinden. Eine weitere Steigerung der N-Zufuhr in Kombination mit Frässlensaat (H240) führte in der Oberkrume, die ähnlich den Pflugvarianten auch unter Horsch intensiv gelockert wird, zu einer nochmals gesteigerten Durchwurzelungsintensität (DWI).

Der Effekt der Horsch-**Bodenbearbeitung** zeigt sich bei einem Vergleich der Varianten P200 und H240, die hinsichtlich des N-Düngungsniveaus als vergleichbar anzusehen sind: Mit 6 cm/cm^3 lag die $WLD_{(10-30)}$ der Horschvariante auch zur Ernte noch leicht unter der Variante P200 ($7,8 \text{ cm/cm}^3$) und war damit – gegen den Trend steigender Wurzellängen mit höherem N-Niveau – im Mittel sogar etwas geringer als in der N-Mangelvariante P0 ($6,4 \text{ cm/cm}^3$). Die $WL_{(0-60)}$ der H240 blieb mit $40,1 \text{ km/m}^2$ nur geringfügig hinter der Variante P200 zurück.

Deutlich unterschieden sich die drei Varianten auch hinsichtlich der Entwicklung der Wurzelsysteme zwischen Blüte- und Erntetermin:

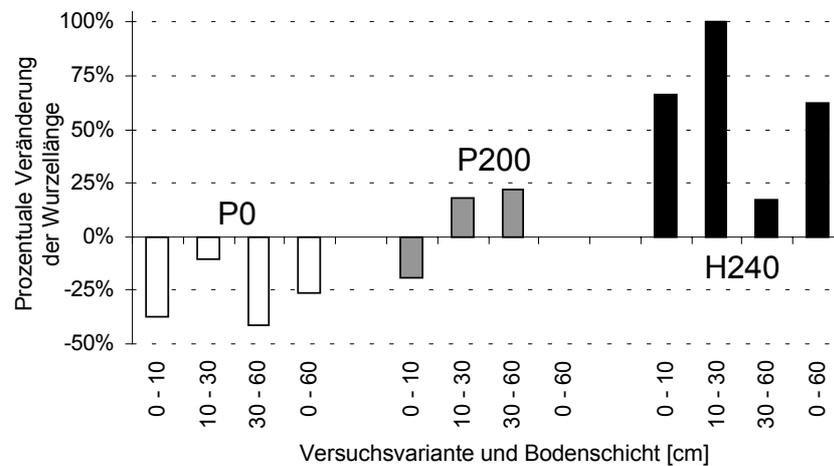
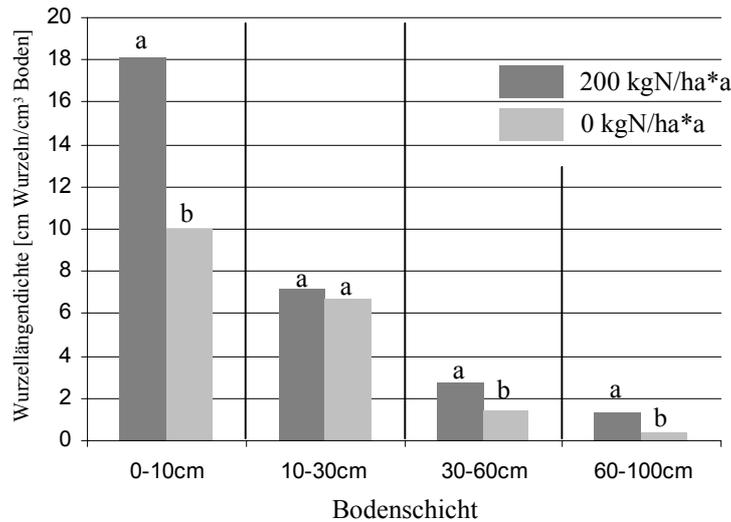


Abbildung 2.5: Veränderung der Wurzellängendichte unter Wintergerste von der Blüte bis zur Ernte 1997 in Abhängigkeit von Bodenbearbeitung und N-Düngung differenziert nach Bodentiefen (P = Pflugdrillsaat, H = Frässlensaat System Horsch, 0/200/240 = Höhe der N-Düngung [kg/ha*a])

Aus Abbildung 2.5 geht hervor, daß die WLD unter Wintergerste in der Versuchsvariante P0 von der Blüte bis zum Erntezeitpunkt in allen Bodentiefen, besonders ausgeprägt in der Oberkrume, abnahm. Demgegenüber war in der Variante H240 ein Schwerpunkt des Wurzelwachstums zwischen Blüte und Ernte zu erkennen. Hier hatte sich die $WL_{(0-60)}$ in diesem Zeitraum fast verdoppelt! Die Gesamtlänge des Wurzelsystems der Variante P200 hatte sich im gleichen Zeitraum kaum verändert. In der Oberkrume dieser Variante war ein Rückgang der Wurzellänge um knapp 20%, in den unteren Profilabschnitten hingegen Zuwächse um etwa 20% zu verzeichnen. In dieser Variante ist demnach eine Verlagerung der Aufwände für das Wurzelwachstum von der oberen in tiefere Bodenschichten zu konstatieren.

Insgesamt zeigte sich, daß sowohl die N-Düngung (Abbildung 2.6) als auch die Bodenbearbeitung (Abbildung 2.7) starken Einfluß auf die Wurzelentwicklung von WG ausübten.

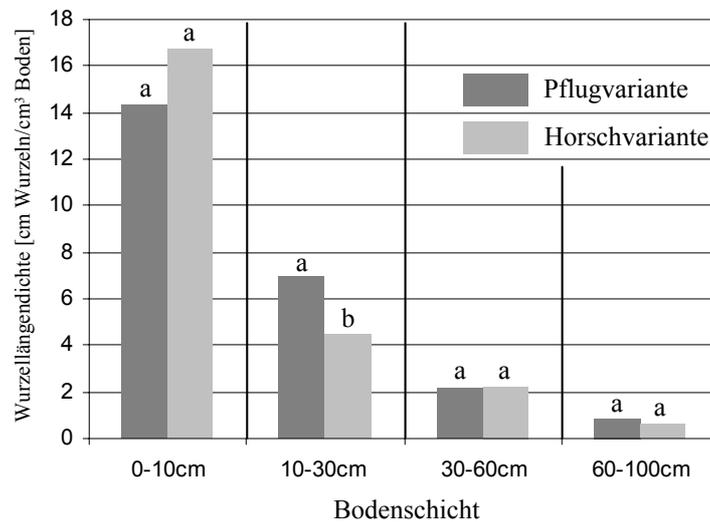
Über beide Termine gesehen, bewirkte eine **N-Düngung** von 200 kg/ha gegenüber der ungedüngten Variante eine hochsignifikante Erhöhung der DWI im gesamten Bodenprofil (Bodenschicht 0-100 cm). Insbesondere die Krumendurchwurzelung war durch die N-Zufuhr stark intensiviert, wobei der Schwerpunkt der Durchwurzelung eindeutig in den obersten 10 cm des Bodenprofils lag. Hier war die DWI durch die künstliche N-Zufuhr über das gesamte Jahr gesehen fast verdoppelt. Auch die Unterbodenhorizonte waren in den gedüngten Varianten hochsignifikant intensiver durchwurzelt.



Mittelwerte über beide Untersuchungstermine
 verschiedene Buchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede (GLM (BONFERRONI), P < 0,05)

Abbildung 2.6: mittlere Wurzellängendichte von Wintergerste (1997) in Abhängigkeit von der Stickstoffdüngung differenziert nach Bodentiefen

Die Durchwurzelung des Gesamtprofils wurde durch die reduzierte **Bodenbearbeitung** nicht signifikant verändert. In der Oberkrume, also der Schicht, die auch durch die Fräse intensiv gelockert wird, war eine leichte (unter Gerste nicht signifikante) Intensivierung der Durchwurzelung zu beobachten. In der Unterkrume, der Bodenschicht unterhalb der Fräsohle hingegen konnte eine signifikante Verminderung der DWI nachgewiesen werden. Ein Einfluß der Bodenbearbeitung war in den Unterbodenhorizonten nicht festzustellen (Abbildung 2.7).



Mittelwerte über beide Düngungsvarianten und Untersuchungstermine
 verschiedene Buchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede (GLM (BONFERRONI), P < 0,05)

Abbildung 2.7: mittlere Wurzellängendichte von Wintergerste (1997) in Abhängigkeit von der Bodenbearbeitung differenziert nach Bodentiefen

3.2. Winterweizen

Die Tiefenverteilung der Winterweizenwurzeln zur Blüte 1997 (BBCH-Code 65, Abbildung 2.8) war ebenso wie unter Gerste von einer Abnahme der Durchwurzelungsintensitäten mit der Bodentiefe gekennzeichnet, die wiederum mit guter Näherung ($r^2 = 0,69-0,85$) mit exponentiellen Funktionen zu beschreiben waren. Die Verteilung der Weizenwurzeln auf Ober- und Unterkrume war im gepflügten Boden im Vergleich zur Gerste etwas homogener, die Durchwurzelung der Unterkrume (Bodenschicht 10-30 cm) intensiver.

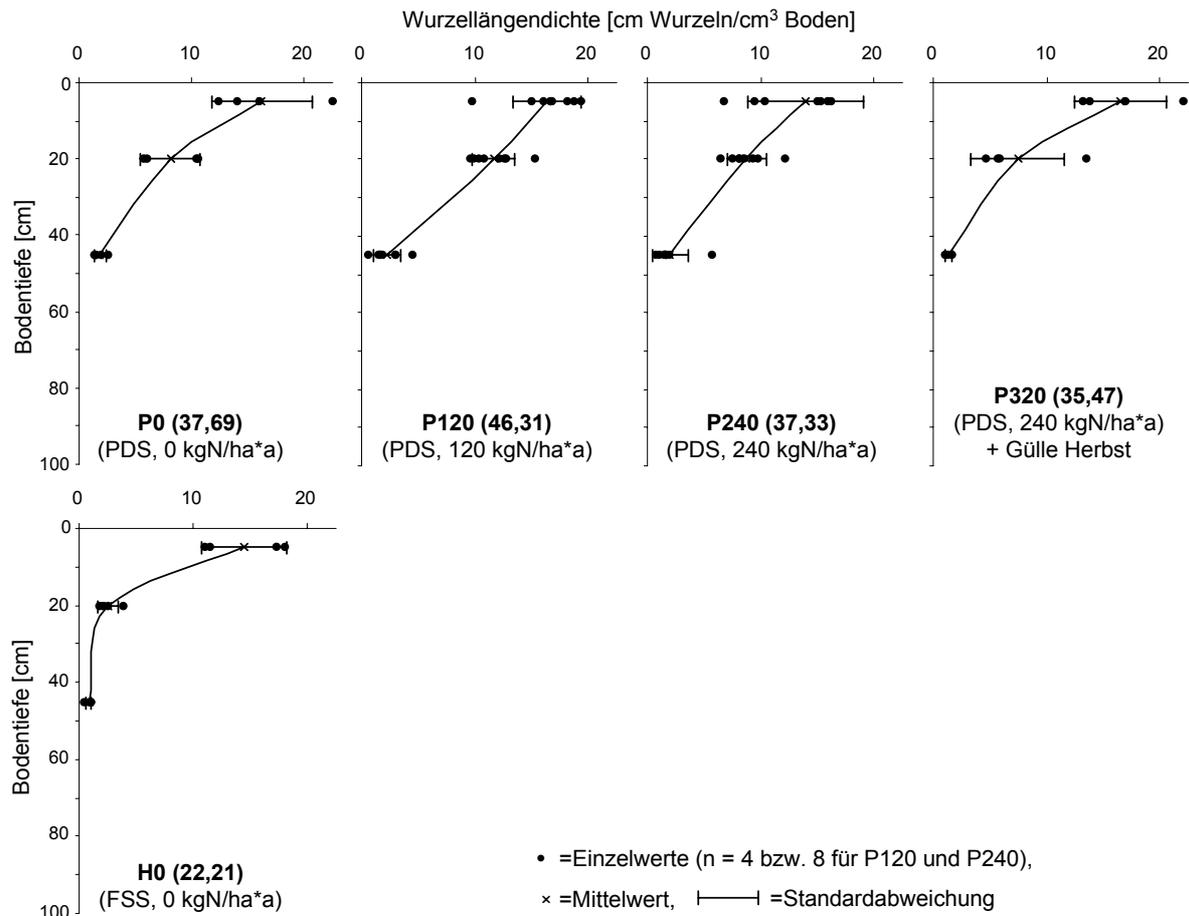


Abbildung 2.8: Wurzellängendichten von Winterweizen zur Blüte 1997 bei unterschiedlicher Bodenbearbeitung und N-Düngung in Abhängigkeit von der Bodentiefe. PDS = Pflugdrillsaat, FSS = Frässlensaat System Horsch; Zahlen in Klammern: Gesamt-Wurzellänge ($WL_{(0-100)}$ [km/m²])

Der Einfluß der **N-Düngung** war unter Winterweizen zur Blüte weniger stark ausgeprägt als unter Gerste. In der Variante P120 wurde mit 46,31 km/m² die größte $WL_{(0-60)}$ ermittelt. Die $WL_{(0-60)}$ der Varianten P240 (37,33 km/m²) und P320 (35,47 km/m²) lagen deutlich geringer und zeigten keine Unterschiede zur N-Mangelvariante P0 (37,96 km/m²).

Die Effekte der **Bodenbearbeitung** konnten bei WW nur unter fehlender N-Düngung untersucht werden. Mit nur 22,2 km/m² wurde in der Variante H0 die kleinste $WL_{(0-60)}$ unter Getreide zur Blüte ermittelt. Demgegenüber wies das Wurzelsystem in der Variante P0 fast die

doppelte Länge auf. Besonders gravierend wirkte sich die Einschränkung, vergleichbar zu den Beobachtungen unter Gerste, in der nicht gelockerten Bodenschicht 10-30 cm aus, in der die $WLD_{(10-30)}$ mit nur $2,6 \text{ cm/cm}^3$ um mehr als das dreifache (!) hinter der Variante P0 ($8,1 \text{ cm/cm}^3$) zurückblieb.

Die Entwicklung der Wurzelsysteme der Weizenpflanzen zwischen Blüte- und Ernte (BBCH-Code 99) verlief ähnlich der unter Gerste beobachteten Dynamik. Mit der Bodentiefe nahm die DWI wiederum annähernd exponentiell ab ($r^2 = 0,66-0,88$).

Die Effekte der **N-Düngung** waren zum Erntetermin ausgeprägter: Innerhalb der Pflugvarianten zeigte sich gleichmäßig in allen Bodentiefen ein eindeutiger Trend zu intensiverer Durchwurzelung mit steigender mineralischer N-Düngung (Abbildung 2.9). Die zusätzliche Applikation von Schweinegülle hatte indes gegenüber rein mineralischer Düngung geringere Wurzellängen zur Folge.

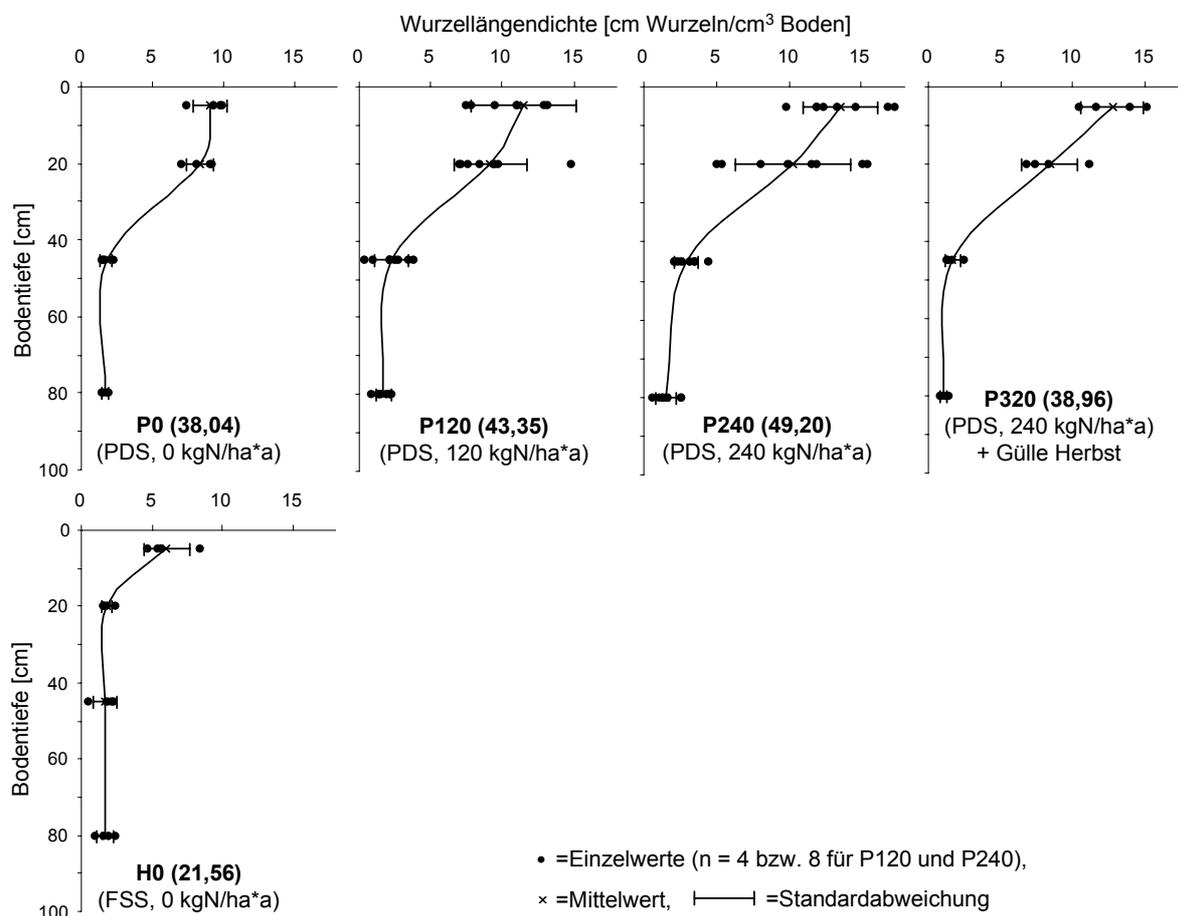


Abbildung 2.9: Wurzellängendichten von Winterweizen zur Ernte 1997 bei unterschiedlicher Bodenbearbeitung und N-Düngung in Abhängigkeit von der Bodentiefe. PDS = Pflugdrillsaat, FSS = Frässohlensaat System Horsch; Zahlen in Klammern: Gesamt-Wurzellänge ($WL_{(0-100)}$ [km/m^2])

Die Auswirkungen der reduzierten **Bodenbearbeitung** zeigten sich zum Ende der Vegetationsperiode in aller Deutlichkeit: Die $WL_{(0-60)}$ unter Frässohlensaat hatte im Zeitraum zwi-

schen den beiden Probenahmen nochmals drastisch abgenommen und lag am Ende der Vegetationsperiode mit nur noch $14,83 \text{ km/m}^2$ um 50% unter der gepflügten Parallelvariante P0. Besonders betroffen war erneut die Bodenschicht 10-30 cm. Gegenüber der P0 ($8,3 \text{ cm/cm}^3$) war die $WLD_{(10-30)}$ der H0 ($1,8 \text{ cm/cm}^3$) um mehr als das vierfache (!) verringert.

Zwischen Blüte und Erntetermin hatte die WLD ähnlich der Gerste in beiden Nullvarianten stark abgenommen. Besonders stark ausgeprägt war dieser Rückgang in der Oberkrume (vgl. Abbildung 2.10). Auch bei mittlerem N-Niveau (P120) war in diesem Zeitraum eine Verkleinerung des Wurzelsystems zu beobachten, die sich auf die gesamte Krume erstreckte. Demgegenüber war bei hoher N-Versorgung zwischen Blüte und Ernte ein Netto-Wurzelzuwachs zu verzeichnen. Zwar war die $WLD_{(0-10)}$ auch in den Varianten P240 und P320 leicht zurückgegangen, in den Unterbodenhorizonten war jedoch ein kräftiger Zuwachs festzustellen.

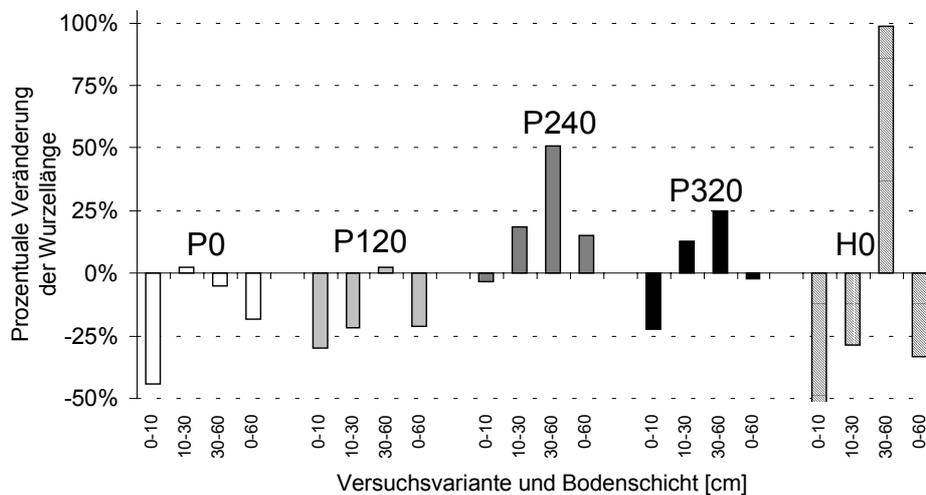
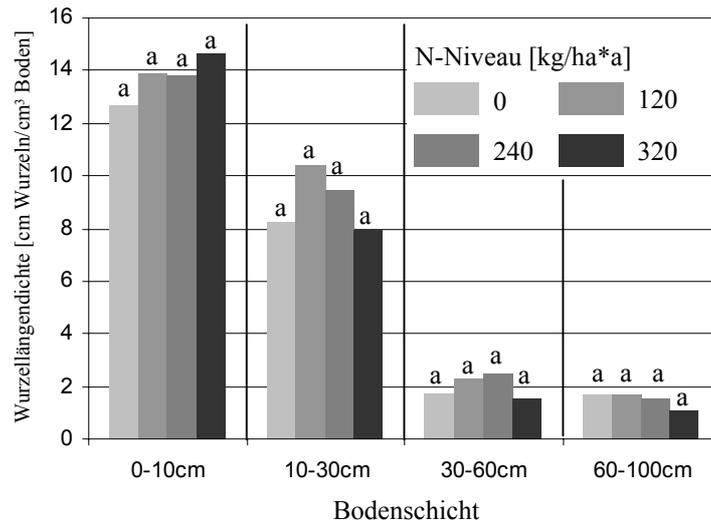


Abbildung 2.10: Veränderung der WLD unter Winterweizen zwischen Blüte und Ernte 1997 in Abhängigkeit von Bodenbearbeitung und N-Düngung differenziert nach Bodentiefen (P = Pflugdrillsaat, H = Frässlensaat System Horsch, 0/120/240/320 = Höhe der N-Düngung [kg/ha*a])

Die Horschvariante H0 nahm hinsichtlich der Durchwurzelung des Unterbodens insofern eine Sonderstellung ein, als im Gegensatz zur gepflügten Mangelvariante eine Verdopplung der Wurzellänge in der Bodenschicht 30-60 cm zu verzeichnen war. Dies könnte mit der, bedingt durch die Geländedeposition der Nullvarianten, unterschiedlichen Wasserversorgung der Pflanzen zusammenhängen. Vor der letzten Probenahme im Winterweizen waren über zehn Tage keine Niederschläge mehr gefallen und die Tagesmitteltemperaturen lagen bei wolkenfreiem Himmel durchgehend über 20°C (vgl. Abbildung 2.2). Die starken Wurzelzuwächse im Unterboden der Variante H0 könnten als Maßnahme zur verstärkten Erschließung der Wasserreserven des Unterbodens zu verstehen sein. Auf einen solchen Zusammenhang deuten auch die im Vergleich zur Gerste (vgl. Abbildung 2.5) höheren Zuwachsraten der Unterboden-DWI in den hochgedüngten WW-Varianten hin. Die Gerste wurde 12 Tage vor dem Weizen und somit vor dem Beginn der niederschlagsfreien Periode im August (vgl. Abbildung 2.2) geerntet.

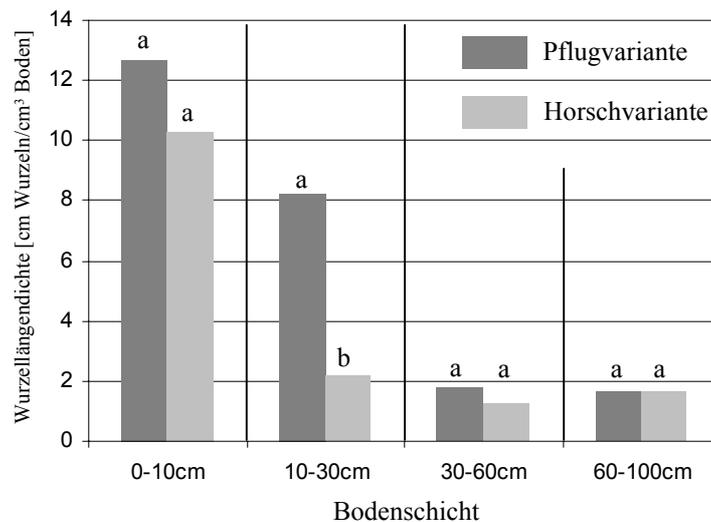
Bereits bei der separaten Betrachtung der beiden Termine zeigte sich, daß die Wurzelentwicklung unter Winterweizen im Versuchsjahr 1997 weniger stark von der **N-Düngung** beeinflußt wurde als dies unter Wintergerste der Fall war. Die Tendenz zu höheren Wurzellängendichten mit steigender mineralischer N-Zufuhr war statistisch nicht abzusichern (Abbildung 2.11). Die Unterschiede zwischen der N0- und den mineralisch gedüngten Varianten lagen jedoch jeweils nur sehr knapp über der Grenzdifferenz, so daß von einem sehr klaren Trend auszugehen ist. Zwischen den mineralisch gedüngten Varianten waren keinerlei signifikante Unterschiede festzustellen.



Mittelwerte über beide Untersuchungstermine
verschiedene Buchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede (GLM (BONFERRONI), P < 0,05)

Abbildung 2.11: mittlere WLD von Winterweizen (1997) in Abhängigkeit von der Stickstoffdüngung (Pflugvariante) differenziert nach Bodentiefen

Die Wirkung der reduzierten **Bodenbearbeitung** auf das Wurzelwachstum von Winterweizen konnte nur unter fehlender N-Düngung untersucht werden (Abbildung 2.12).



Mittelwerte über beide Untersuchungstermine
verschiedene Buchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede (GLM (BONFERRONI), P < 0,05)

Abbildung 2.12: mittlere WLD von Winterweizen (1997) in Abhängigkeit von der Bodenbearbeitung (bei 0 kgN/ha*a) differenziert nach Bodentiefen

Die Anwendung der Frässohlensaat hatte eine signifikante Verringerung der $WLD_{(0-100)}$ zur Folge, von der insbesondere die Krume betroffen war. In der nicht gelockerten Bodenschicht 10-30 cm war, wie in Abbildung 2.12 deutlich zu erkennen ist, hochsignifikant eine extreme Einschränkung der Durchwurzelung festzustellen.

3.3. Winterraps

Aus Abbildung 2.13 geht hervor, daß sich der Einfluß der **N-Düngung** auf die Wurzelwachstumsgeschwindigkeit des Winterrapses gänzlich anders auswirkte, als auf die der Getreidearten. Im Gegensatz zu Gerste und Weizen war beim Raps eine Ausweitung der Wurzelsysteme bei Stickstoffmangel und eine z.T. erhebliche Zunahme der WLD zwischen Blüte- und Erntetermin zu beobachten.

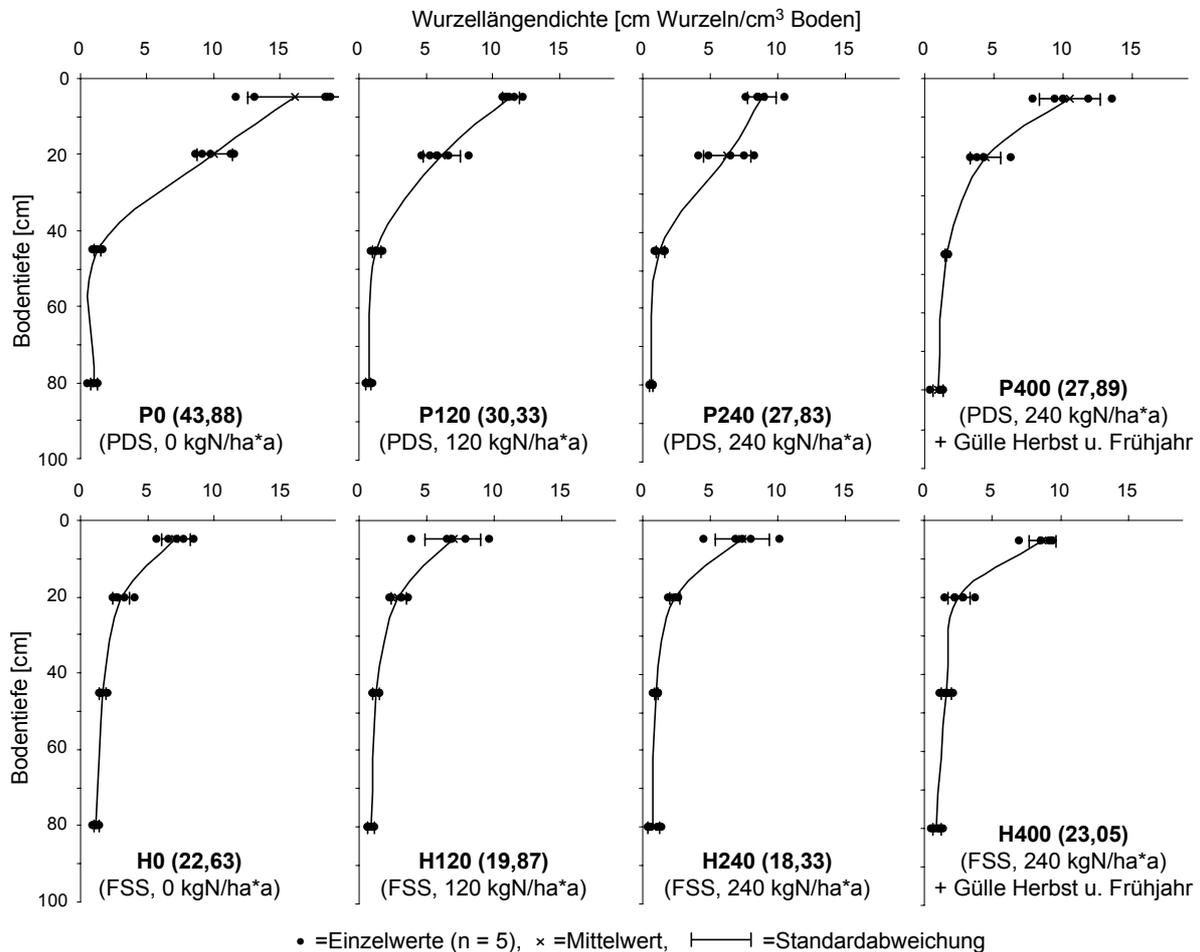


Abbildung 2.13: Wurzellängendichten von Winterraps zur Blüte 1997 bei unterschiedlicher Bodenbearbeitung und N-Düngung in Abhängigkeit von der Bodentiefe. PDS = Pflugdrillsaat, FSS = Frässohlensaat System Horsch; Zahlen in Klammern: Gesamt-Wurzellänge ($WL_{(0-100)}$ [km/m^2])

Bis zur Blüte 1997 (BBCH-Code 65) hatte der Rapsbestand in der Variante P0 mit knapp $44 km/m^2$ ein Wurzelsystem etabliert, daß die $WL_{(0-100)}$ der Variante P240 ($28 km/m^2$) fast um

das Doppelte übertraf. Insbesondere die Bodenschicht 10-30 cm war hier bereits zur Blüte weit intensiver durchwurzelt als in allen Varianten, die N-Düngung erhielten. Im Unterboden wirkte sich der Einfluß der N-Düngung demgegenüber nicht erkennbar aus. Ähnlich stellten sich die Verhältnisse in den Horschvarianten dar: Auch hier war eine Abnahme der $WL_{(0-100)}$ mit steigender mineralischer N-Zufuhr festzustellen, wenngleich die Unterschiede erheblich schwächer ausgeprägt waren als in den Pflugvarianten.

Reduzierte **Bodenbearbeitung** wirkte sich auf die Durchwurzelungsdynamik des Winterrapses sehr ähnlich aus wie auf die Getreidesorten. Auch beim Raps war eine eindrucksvolle Verkleinerung der Wurzelsysteme festzustellen, die wiederum in der Unterkrume am stärksten zu Tage trat. In dieser Bodenschicht war die WLD – gegenüber den entsprechenden Bodentiefen unter Pflug – um das zwei bis dreifache verringert. Auch die $WLD_{(0-10)}$ war unter Pflug zu diesem Zeitpunkt regelmäßig deutlich größer. Eine annähernd exponentielle Abnahme der DWI mit der Bodentiefe ($r^2 = 0,83-0,95$) war auch beim Winterraps zur Blüte festzustellen (Abbildung 2.13).

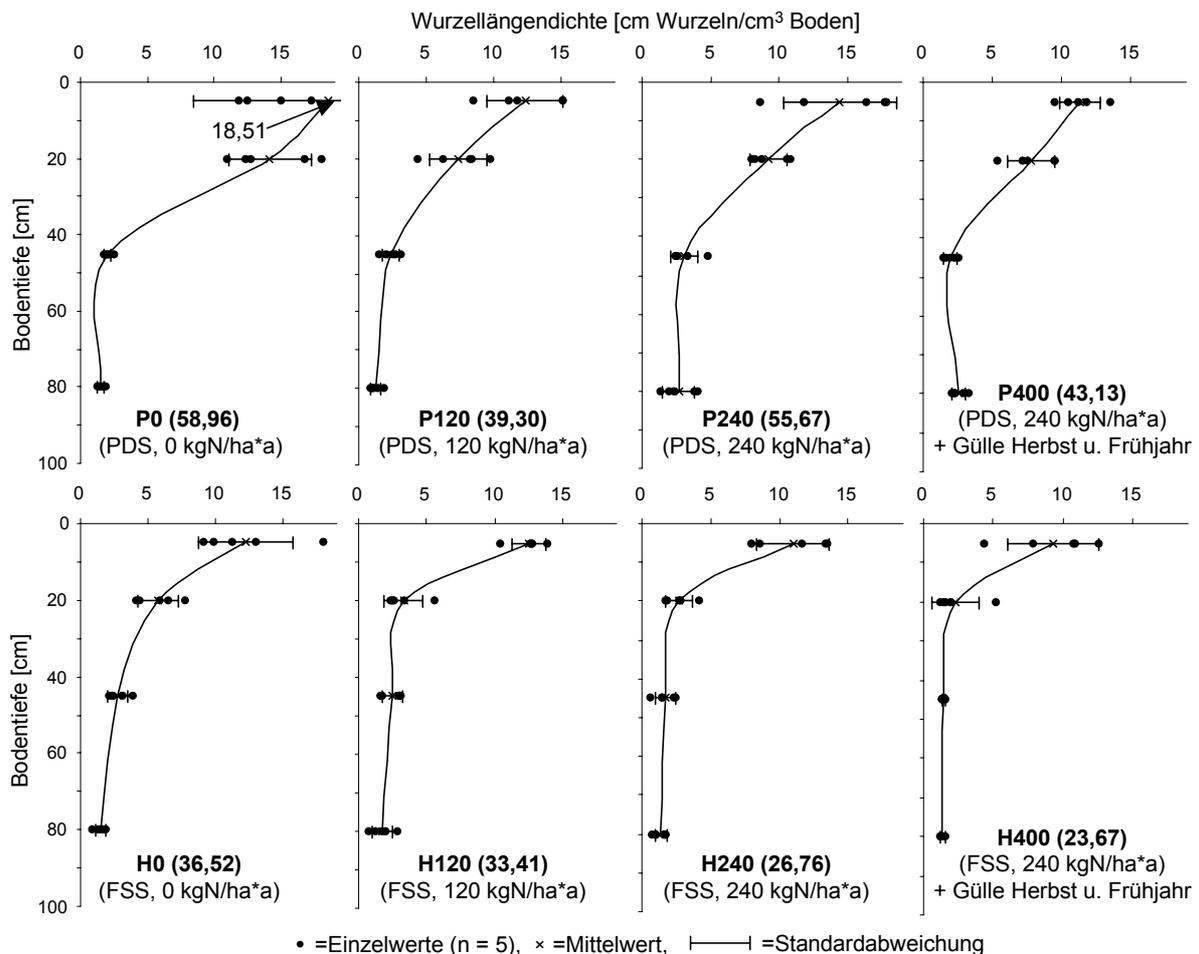


Abbildung 2.14: Wurzellängendichten von Winterraps zur Ernte 1997 bei unterschiedlicher Bodenbearbeitung und N-Düngung in Abhängigkeit von der Bodentiefe. PDS = Pflugdrillsaat, FSS = Frässlensaat System Horsch; Zahlen in Klammern: Gesamt-Wurzellänge ($WL_{(0-100)}$ [km/m²])

Ähnliche Muster der WLD-Tiefenverteilung fanden sich am Ende der Vegetationsperiode ($r^2 = 0,68-0,86$) (Abbildung 2.14).

Die Effekte der **N-Düngung** waren zum Erntetermin (BBCH-Code 99) weniger stark ausgeprägt, allerdings wurde auch zu diesem Zeitpunkt die größte $WL_{(0-100)}$ in beiden Bodenbearbeitungsvarianten unter Stickstoffmangel ermittelt. Unter Frässohlensaar ging mit jeder Steigerung der N-Zufuhr eine Verkleinerung des Wurzelsystems einher. Innerhalb der Pflugvarianten war das Bild uneinheitlich: Die mit Abstand größte $WL_{(0-100)}$ wurde in der N-Mangelvariante P0, das kleinste Wurzelsystem bei mittlerem Düngungsniveau (P120) ermittelt.

In der mineralisch hoch gedüngten Variante P240, sowie abgeschwächt bei zusätzlicher Gülleapplikation (P400), war vom Blüte- bis zum Erntetermin ein starker Netto-Wurzelzuwachs zu verzeichnen. Insbesondere in den unteren Bodenschichten der Variante P240 waren zwischen den Probenahmen hohe relative Wurzelneubildungsraten zu beobachten.

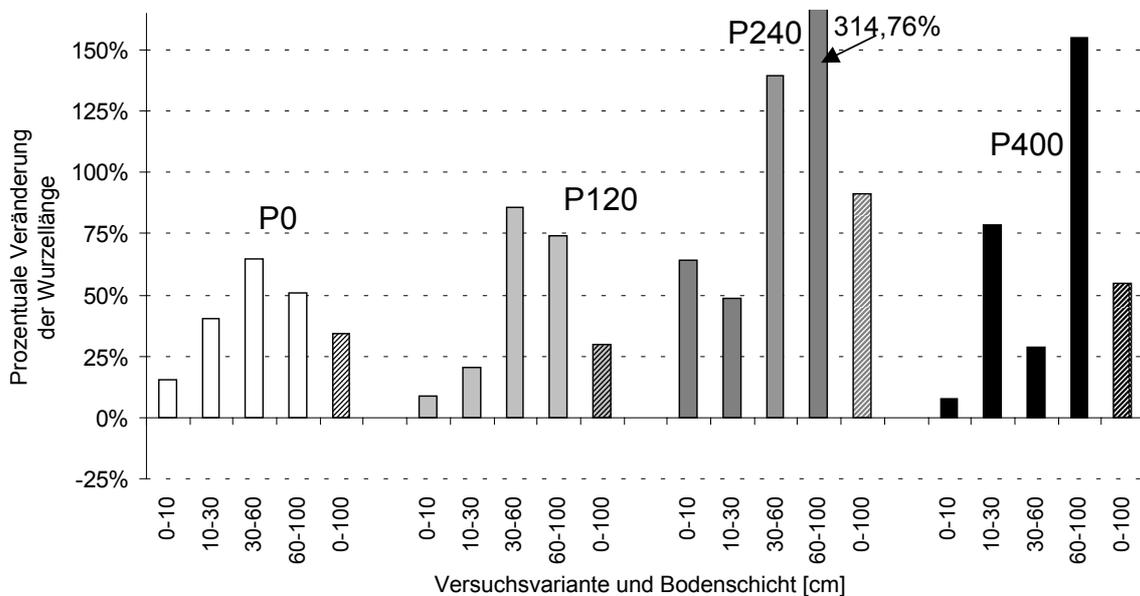


Abbildung 2.15: Veränderung der WLD unter Winterraps zwischen Blüte- und Erntetermin 1997 in Abhängigkeit von der N-Düngung differenziert nach Bodentiefen (Pflugvariante, 0/120/240/400 = Höhe der N-Düngung [kg/ha*a])

Unter Pflugbodenbearbeitung (Abbildung 2.15) war die Zunahme der Wurzellängendichte von der Blüte bis zur Ernte um so stärker ausgeprägt, je höher das mineralische N-Düngungsniveau lag. Besonders im Unterboden waren starke Zuwächse zu verzeichnen, in der tiefsten der untersuchten Bodenschichten hatte die Wurzellänge in der mineralisch hochgedüngten Variante P240 in diesem Zeitraum um mehr als 300% zugenommen. In der kombiniert mineralisch/organisch gedüngten Variante (P400) fielen die Zuwächse etwas geringer aus.

Unter Horschbodenbearbeitung (Abbildung 2.16) wurden hingegen mit steigender N-Zufuhr geringere Wurzelzuwachsrate ermittelt. Anders als unter Pflug war – besonders bei N-Mangel – auch in der Krume erhebliche Wurzelneubildung zu beobachten. Mit zunehmender N-

Düngung waren auch unter Horsch hohe Zuwachsraten im Unterboden festzustellen. Unter N-Mangel und niedrigerem N-Niveau (H120) lagen die Zuwachsraten wesentlich höher, in den hoch gedüngten Varianten H240 und H400 hingegen deutlich niedriger als in den Pflugvarianten parallelen N-Niveaus. In den mittleren Bodentiefen der kombiniert mineralisch/organisch gedüngten Variante H400 war sogar ein leichter Rückgang der WLD zu verzeichnen.

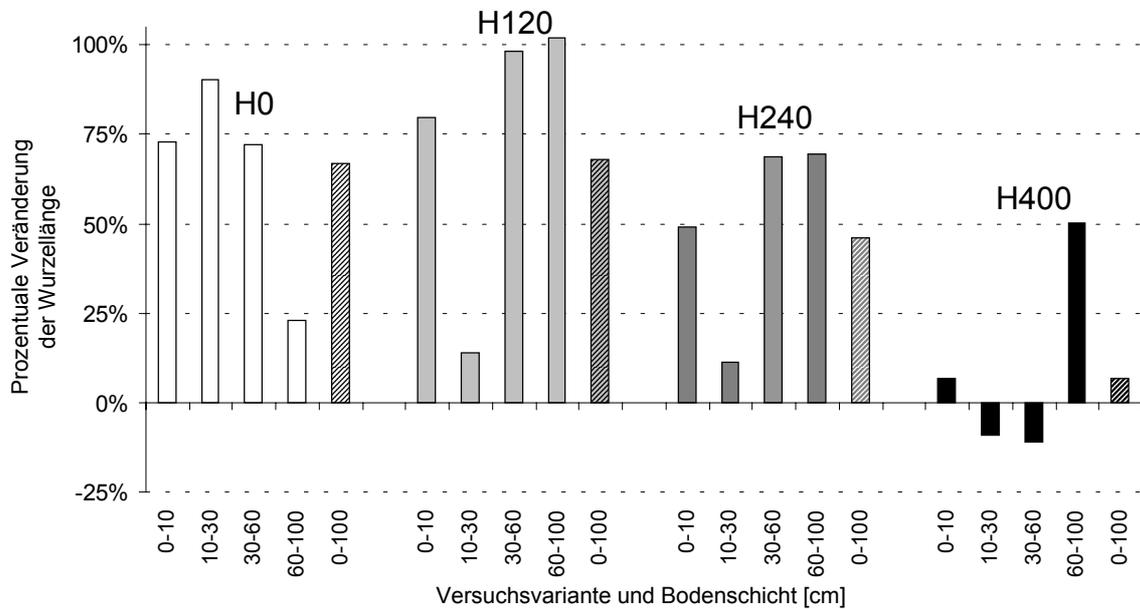


Abbildung 2.16: Veränderung der WLD unter Winterraps von der Blüte bis zur Ernte 1997 in Abhängigkeit von der N-Düngung differenziert nach Bodentiefen (Horschvariante, 0/120/240/320 = Höhe der N-Düngung [kg/ha*a])

Beide Haupteffekte, Bodenbearbeitung (Abbildung 2.18) und N-Düngung (Abbildung 2.17) haben einen signifikanten Einfluß auf die Durchwurzelungsintensität (Gesamtprofil) unter Winterraps.

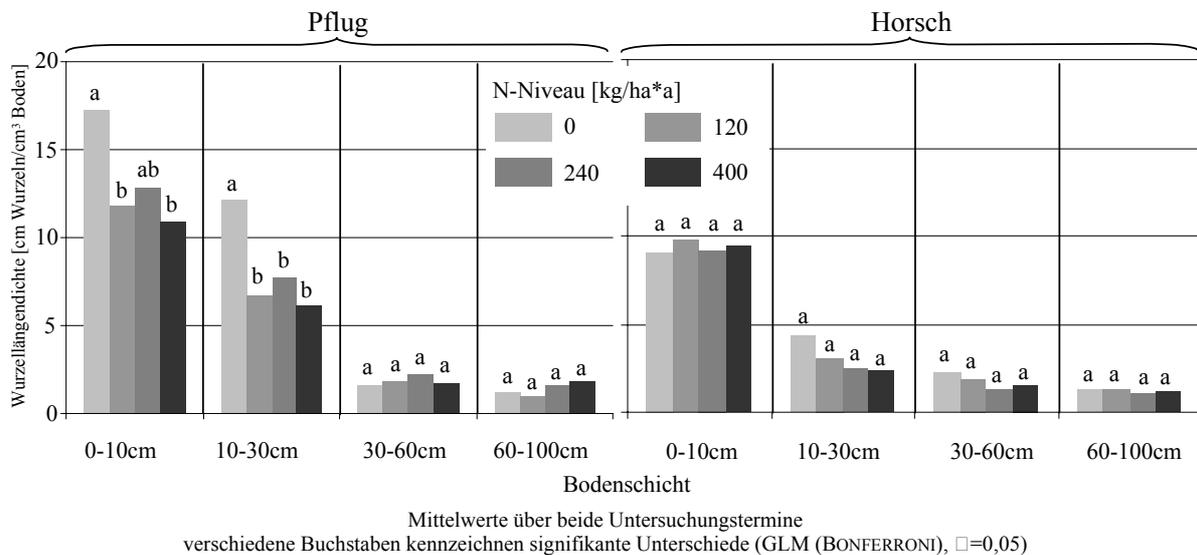


Abbildung 2.17: mittlere WLD von Winterraps (1997) in Abhängigkeit von der Stickstoffdüngung differenziert nach Bodenbearbeitungsverfahren und Bodentiefen

Da sowohl über die gesamte Tiefe als auch in den einzelnen Bodenschichten signifikante Interaktionen zwischen Bodenbearbeitung und N-Niveau festzustellen waren, werden die Ergebnisse im folgenden getrennt nach Bodenbearbeitungsverfahren respektive N-Düngungsniveau dargestellt.

Aus Abbildung 2.17 geht hervor, daß die Durchwurzelungsintensität in der Krume (Bodenschichten 0-10 + 10-30) in beiden Bodenbearbeitungsblöcken im Jahresmittel 1997 jeweils unter N-Mangel am höchsten lag. Unter Pflugbodenbearbeitung ist dieser Befund hochsignifikant, nicht jedoch bei Anwendung der Frässhensaat. Im Unterboden wirkt sich die Stickstoffdüngung nicht mehr signifikant auf das Wurzelwachstum aus.

Reduzierte Bodenbearbeitung führte in allen N-Varianten zu einer hochsignifikanten Abnahme der Wurzellängendichten in der Unterkrume (Abbildung 2.18). Auch die Durchwurzelung der Oberkrume ist in den Horschvarianten regelmäßig vermindert. Am stärksten betrifft dies die Variante ohne N-Düngung, in der dieser Effekt hochsignifikant war. In den Unterbodenhorizonten war kein eindeutiger Einfluß der Bodenbearbeitung mehr festzustellen.

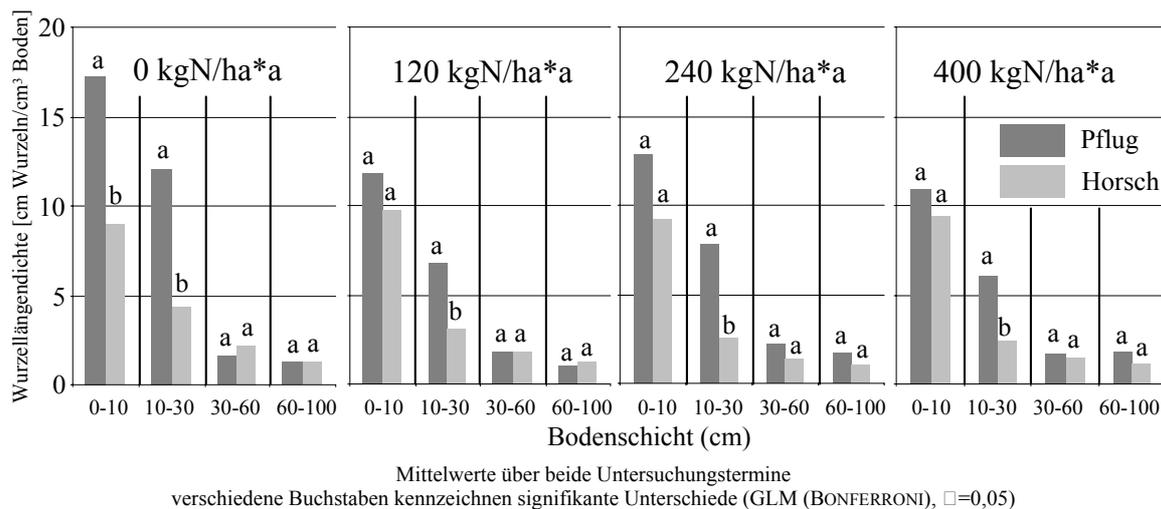


Abbildung 2.18: mittlere WLD von Winterraps (1997) in Abhängigkeit von der Bodenbearbeitung differenziert nach N-Niveau und Bodentiefen

3.4. Unterschiede zwischen den Kulturarten

Gegenüber Wintergerste und Winterweizen zeigte der Raps hinsichtlich der Reaktionen auf das N-Angebot stark abweichende Wurzelwachstums-Muster.

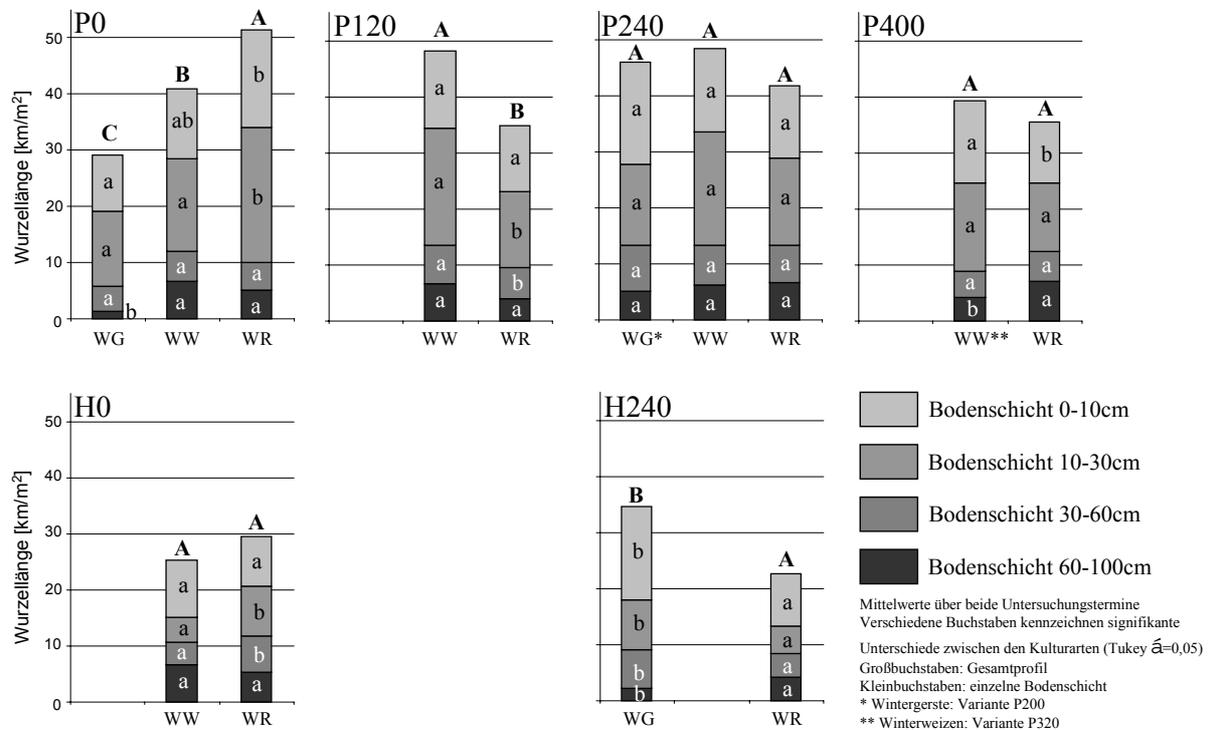


Abbildung 2.19: Wurzellängen von Wintergerste, Winterweizen und Winterraps in Abhängigkeit von Bodenbearbeitung und Stickstoffdüngung differenziert nach Bodentiefen (P = Pflugdrillsaat, H = Frässlensaat System Horsch, 0/120/240/320 = Höhe der N-Düngung [kg/ha*a])

Unter N-Mangel hatte der Raps jeweils größere Wurzelsysteme ausgebildet als WG und WW. Unter Pflug war dies signifikant. In allen Varianten mit N-Düngung hingegen lagen die Wurzellängen unter Getreide (z.T. signifikant) höher (Abbildung 2.19). Winterweizen hatte stets größere Wurzelsysteme als Gerste und (außer unter N-Mangel) Raps.

In der tiefsten beprobten Bodenschicht 60-100 cm wies die Wintergerste durchgängig die geringsten Wurzellängendichten unter den drei untersuchten Arten auf. In zwei von drei Varianten in denen WG zur Verfügung stand (P0 und H240) war dies signifikant.

4. Diskussion

Die Faktoren Stickstoffdüngung (GEISLER & MAARUFI 1975, FRANKEN & FAYED 1983, HANNSON et al. 1987, WEBER & DAY 1996 u.a.) und Bodenbearbeitung (z.B. GLIEMEROTH et al. 1968, CANNELL 1985, HELAL & SAUERBECK 1986, KUNDLER & SMUKALSKI 1988, HELAL 1991, HARRACH & VORDERBRÜGGE 1991, RILEY 1997, ARSHAD & GILL 1997, BØRRESEN 1999, SEYFARTH et al. 1999) beeinflussen maßgeblich die Wachstumsbedingungen für Kulturpflanzen und deren Wurzelsysteme. Variierte Stickstoffdüngung und Bodenbearbeitung bewirkten bei allen drei in der vorliegenden Arbeit untersuchten Kulturen Wintergerste, Winterweizen und Winterraps – z.T. erhebliche – Veränderungen der Durchwurzelungsintensität und Wurzelwachstumsdynamik. Darüber hinaus waren deutliche Unterschiede zwischen den Getreidearten auf der einen und dem Winterraps auf der anderen Seite festzustellen.

Einschränkungen ergaben sich regelmäßig bei der Interpretation der Ergebnisse für die kombiniert mineralisch/organisch gedüngten Varianten beider Bodenbearbeitungsblöcke (P320, P400 u. H400) durch deren Geländepositionen: Die Parzellen dieser Varianten lagen jeweils am oberen (Fräsohlsaart) bzw. unteren Rand (Pflugdrillsaat) der Ackerschläge und wiesen dadurch untereinander und auch von den rein mineralisch gedüngten bzw. ungedüngten Varianten abweichende pedologische und hydrologische Verhältnisse auf. Im Oberhangbereich der Schläge sind erodierte Parabraunerden entwickelt, während am Unterhang kolluvial überlagerte Parabraunerden und typische Kolluvisole anzutreffen sind, die im unteren Profilbereich zeitweise grundwasserbeeinflusst sind. Somit ist von erheblichen Standortunterschieden hinsichtlich der Bodenstruktur und insbesondere der Wasserversorgung auszugehen. HARRACH & VORDERBRÜGGE (1991) wiesen – unter in der vorliegenden Arbeit vergleichbaren Bodenverhältnissen – erheblich höhere WLD und deutlich erhöhtes Wurzel-Tiefenwachstum in einem Kolluvisol ohne Grundwassereinfluß gegenüber einem Gley-Kolluvisol nach. Ein Einfluß auf das Pflanzenwachstum und die Wurzelentwicklung ist sehr wahrscheinlich, wurde aber in der vorliegenden Arbeit nicht eingehender untersucht. Da alle anderen Varianten in einem schmalen Streifen im Mittelhangbereich liegen, ist für diese von ähnlichen Standortbedingungen und guter Vergleichbarkeit der Ergebnisse auszugehen.

Die ermittelten Wurzellängen lagen jeweils etwa im Mittelfeld der Wertebereiche die – bei entsprechenden Entwicklungsstadien – der Literatur für Winterweizen (BÖHM 1978, FRANKEN & FAYED 1983, BARRACLOUGH & LEIGH 1984, STEINGROBE et al. 2001^b), Wintergerste (KUNDLER & SMUKALSKI 1988, STEINGROBE et al. 2001^a) und Winterraps (METTE 1987, BARRACLOUGH 1989, POMIKALCO 1992, KJELLSTRÖM & KIRCHMANN 1994, BONARI et al. 1995, DRECCER et al. 2000) zu entnehmen sind.

4.1. Tiefenverteilung der Wurzeln

Eng korreliert ist die Durchwurzelungsintensität der drei untersuchten Arten mit der Bodentiefe. In allen Versuchsvarianten und zu allen Terminen war eine annähernd exponentielle Abnahme der DWI mit der Tiefe zu beobachten. Dies wird sowohl für WW (u.a. GLIEMEROTH et al. 1968, BAEUMER et al. 1971, BÖHM 1978, FRANKEN & FAYED 1983, BARRACLOUGH & LEIGH 1984, HARRACH & VORDERBRÜGGE 1991), Sommergerste (GLIEMEROTH et al. 1968, BAEUMER et al. 1971, HANSSON et al. 1987), WR (METTE 1987, BARRACLOUGH 1989, POMIKALKO 1992, STEINGROBE 1998), als auch für andere einjährige, krautige Kulturpflanzen, z.B. Roggen (POMIKALKO 1992), Hafer (BAEUMER et al. 1971, BÖHM & KÖPKE 1977, HARRACH & VORDERBRÜGGE 1991, METTE 1994), Mais (POMIKALKO 1992, METTE 1994), Zuckerrüben (HARRACH & VORDERBRÜGGE 1991, TENHOLTERN & HARRACH 1992), Erbsen (POMIKALKO 1992), Perlhirse (BRÜCK 1998) sowie Klee gras (POMIKALKO 1992), Luzerne (HANSSON et al. 1991) und natürliche Grasvegetation (GASS & OERTLI 1980, WEBER & DAY 1996) übereinstimmend festgestellt. Unter Bäumen und Sträuchern wurden z.T. abweichende Tiefenverteilungen beobachtet (z.B. GLATZEL 1983, METTE 1994).

4.2. Einfluß der Stickstoffdüngung

Stickstoffdüngung führte bei WW und WG gegenüber den ungedüngten Varianten durchgehend zu (bei WG signifikant) größeren Wurzellängendichten. Bei WG bewirkte jede weitere Steigerung der mineralischen N-Zufuhr an beiden Probenahmeterminen eine Vergrößerung des Wurzelsystems. Das gleiche Muster war bei WW zur Blüte als Tendenz zu erkennen und hatte sich zum Erntetermin zu einem eindeutigen Trend gefestigt. Zu gleichlautenden Ergebnissen kamen u.a. FRANKEN & FAYED (1983), die im Freilandversuch bei vergleichbaren Bodenbedingungen für WW steigende Wurzelanzahlen mit höherer N-Düngung ermittelten und ANDERSON (1988), der unter Mais ebenfalls eine Zunahme der WLD mit gesteigerter N-Düngung feststellte. HANSSON et al. (1987) fanden unter Sommergerste nach zwei Vegetationsperioden ohne N-Düngung geringere Wurzelbiomassen als bei gedüngten Pflanzen (120 kgN/ha) vor.

In der vorliegenden Arbeit wurden die kleinsten absoluten Wurzellängendichten unter Getreide regelmäßig in den Varianten ohne N-Düngung gefunden. WG und WW zeigten insgesamt recht ähnliche Reaktionsmuster hinsichtlich der Auswirkungen des Stickstoffangebotes: Extremer Stickstoffmangel, wie er in den Nullvarianten des SFB-Versuches aufgrund der langen Versuchsdauer, in der die N₀-Varianten bereits im siebten Jahr ohne N-Düngung waren, vorliegt, führte zu geringerer DWI und einem Abbau der Wurzelsysteme zum Ende der Vegetationsperiode. Auch bei wildwachsenden Gräsern wurden zunehmende Wurzellängendichten (WEBER & DAY 1996) bzw. Wurzelbiomassen (TILMAN & WEDIN 1991) mit steigender N-Versorgung im Freiland und auch in Gefäßversuchen (SCHUURMAN & KNOT 1974) beobachtet.

Insgesamt ist eine erhöhte Biomasseproduktion bei N-Düngung zu konstatieren, die im Wurzelbereich jedoch weit hinter den durch N-Zufuhr ausgelösten Biomassen-Zuwächsen (SFB-192 1990-1999) der Sprosse zurückbleibt. Diese Ergebnisse decken sich mit der allgemein anerkannten Erkenntnis, daß innerhalb weiter Grenzen eine Erhöhung der N-Versorgung zu starken Biomassenzuwächsen führt, wobei das Sproßwachstum deutlich stärker stimuliert wird als das Wurzelwachstum (SATTELMACHER et al. 1990). HANSSON et al. (1987) konnten darüber hinaus zeigen, daß die relative Verteilung des Stickstoffs auf Sproß und Wurzeln von Sommergerste unabhängig von der N-Düngung etwa im Verhältnis 2/3 zu 1/3 des gesamten aufgenommenen N gleich blieb.

Die Wurzelentwicklung der Getreidearten wurde im hier vorgestellten Versuch durch N-Zufuhr angeregt. Demgegenüber war bei Winterraps erstaunlicherweise eine Abnahme der Wurzellängendichte mit Erhöhung des N-Niveaus – bei gleichzeitig stark ansteigender Produktion an oberirdischer Biomasse (SFB 192 1990-1999) – festzustellen. Hinsichtlich der Nettogröße des Wurzelsystems war die Reaktion des Winterraps auf Stickstoffmangel also entgegengesetzt zu Mustern die unter den Getreidearten beobachtet wurden.

Zu einem anderen Ergebnis kam BARRACLOUGH (1989), der bei 240 kgN/ha gegenüber 0 kgN/ha sowohl höhere Wurzel-TM als auch Wurzellängen unter Winterraps (Sorte *jet neuf*) ermittelte. Auch STEINGROBE (2000) ermittelte für die Winterrapsorten *Lirajet* und *Bristol* unter N-Mangel zu den meisten Untersuchungsterminen geringere WLD als bei 240 kgN/ha. Gegenüber den o.g. Studien waren die in der vorliegenden Arbeit untersuchten Böden deutlich länger ohne N-Zufuhr. Der N-Mangel dürfte demnach erheblich stärker ausgeprägt und sämtliche von N-Mangel beeinflussten Faktoren besser etabliert gewesen sein als in den zitierten Arbeiten. Hierin dürfte die Hauptursache für die abweichenden Befunde zu sehen sein. Ob weiterhin Sortenunterschiede, Standort- oder Witterungsbedingungen für diese, zunächst widersprüchlich erscheinenden, Beobachtungen verantwortlich sind, muß vorerst offen bleiben. In Teil 3 dieser Arbeit, in dem Wurzelraten aus drei Jahren und acht Behandlungsvarianten ausgewertet werden, wird diese Frage eingehender behandelt werden.

Zwischen Blüte und Ernte nahm die WLD unter Winterraps in allen Varianten deutlich zu. Besonders stark ausgeprägt waren die Zuwächse in den Unterbodenhorizonten (30-60 cm und 60-100 cm) der hoch gedüngten Varianten unter Pflug. Demgegenüber berichtet BARRACLOUGH (1989) für die Winterrapsorte *Bienvenu* bei hohen N-Gaben (50/90/185 kg/ha im Aug./Feb./Mär.) von nach der Rapsblüte 1985 drastisch abnehmenden Wurzellängendichten in allen Bodenschichten bis 1 m Tiefe. Hierfür dürften vor allem die gegenüber dem SFB-Versuchsjahr 1997 wesentlich größeren Niederschläge im Zeitraum nach der Blüte verantwortlich sein.

Im Gegensatz zum Raps war bei Getreide unter N-Mangel – und in etwas geringerem Umfang auch bei geringem N-Düngungsniveau – ein starker Rückgang der WLD zwischen Blüte und Ernte zu beobachten. Dieser Befund, der mit den Ergebnissen von FRANKEN & FAYED (1983) sowie HANSSON et al. (1987) übereinstimmt, dürfte auf eine, durch den massiven Stickstoffmangel ausgelöste, Verkürzung des Vegetationszyklus der Getreidepflanzen zurückzuführen

sein, in deren Folge die Wurzelseneszenz zu einem früheren Zeitpunkt einsetzt und die Wurzellängen zum Ende der Vegetationsperiode entsprechend abnehmen. Anders als die Kulturpflanzen wies natürliche Grasvegetation auch bei Stickstoffmangel bis zum Ende der Vegetationsperiode steigende WLD auf (WEBER & DAY 1996).

In den hoch gedüngten Varianten verlief die Wurzelndynamik von WW und WG ähnlich dem Raps: Zwar nahm die WLD in der Oberkrume im Zeitraum zwischen Blüte und Ernte unter Getreide geringfügig ab, in den tieferen Bodenschichten war jedoch ein – z.T. starker – Netto-Wurzelzuwachs zu beobachten. FRANKEN & FAYED (1983) berichten für den gleichen Zeitraum bei WW von sinkenden Wurzelanzahlen im Oberboden (15 cm Bodentiefe) und wachsenden Wurzelsystemen in den Unterbodenhorizonten (45 und 75 cm), die um so stärker ausgeprägt waren, je besser die N-Versorgung der Pflanzen war und kommen damit in allen Punkten zu mit der vorliegenden Arbeit übereinstimmenden Ergebnissen. KÄTTERER et al. (1993) ermittelten ebenfalls zur Ernte geringere Wurzel-TM unter WW als im Mai, fanden zwischen diesen Terminen jedoch bis Mitte Juni steigende Wurzel-TM. Auch unter Sommergerste mit 120 kgN/ha (HANSSON et al. 1987) und natürlicher Grasvegetation mit künstlicher N-Applikation (WEBER & DAY 1996) wurden bis zum Ende der Vegetationsperiode steigende Wurzelbiomassen resp. Wurzellängen festgestellt. Von bei ausreichender Wasserversorgung zu-, unter Wassermangel jedoch abnehmender Wurzelmasse unter WW berichten BARRACLOUGH et al. (1989) und stellen weiterhin fest, daß die Durchwurzelungstiefe und die DWI in unteren Bodenschichten durch Wasserdefizit deutlich zunimmt.

Dieser – über alle untersuchten Arten übereinstimmende – Befund großer Zuwachsraten in den tiefen Profilabschnitten unter hoher N-Versorgung zeigt die Bedeutung der Erschließung des Unterbodens für die Wasserversorgung der Pflanzen zum Ende der Vegetationsperiode, wenn die Wasservorräte der Oberbodenhorizonte weitestgehend erschöpft sind. Mit zunehmend besserer N-Versorgung war die Sproßentwicklung begünstigt und der Wasserbedarf der Pflanzen erhöht, was die starken Wurzelneubildungen in den Unterböden der hoch gedüngten Varianten erklären dürfte.

Neben den kurzfristig relativ stabilen pedologischen Standortfaktoren kristallisierten sich für die Ausprägung der Wurzelsysteme demnach vor allem zwei Einflußgrößen heraus, die auch in kurzen Zeitintervallen großen Schwankungen unterworfen sein können: Auf der einen Seite das Angebot an pflanzenverfügbarem Stickstoff, auf der anderen Seite das Wasserangebot. In beide Richtungen reagierte der Raps in Mangelsituationen mit einer Ausdehnung des Wurzelsystems, jedoch waren die Schwerpunkte der Wurzelneubildung, je nachdem welcher Faktor limitierend wirkte, in anderen Bodenregionen angesiedelt. Bei geringer oder fehlender Stickstoffzufuhr waren die höchsten Zuwachsraten in der Krume zu beobachten, in den hohen und sehr hohen N-Versorgungsstufen war ein besonders starker Wurzelzuwachs in den Unterbodenhorizonten zu verzeichnen. Auf der einen Seite stellte sich das N-Angebot als Auslöser für die Vergrößerung der Wurzelsysteme dar, im anderen Fall der erhöhte Wasserbedarf, der bei guter N-Versorgung kräftiger entwickelten Sprosse, die mit größeren Blattflächen höhere Transpirationsraten verwirklichen können. Ab Mitte Juli fiel 1997 bei gleichzeitig überdurchschnittlich hohen Temperaturen bis zum Ende der Vegetationsperiode kaum noch Nieder-

schlag (vgl. Abbildung 2.2). In dieser Zeit ist von einer Ausschöpfung der Wasserreserven im Oberboden auszugehen, so daß die Zunahme der DWI im Unterboden zwischen Blüte- und Erntetermin plausibel erscheint, wenn sie in Übereinstimmung mit BARRACLOUGH et al. (1989) als Reaktion auf den Wassermangel in der Krume interpretiert wird.

Etwas anders lagen die Verhältnisse unter Getreide: Auf Stickstoffmangel folgte eine Verkleinerung, auf eine Verknappung des Wasserangebotes im Sommer eine Vergrößerung der Wurzelsysteme.

Insgesamt war bei allen Arten zum Ende der Vegetationsperiode eine leichte Verlagerung der Investitionen ins Wurzelsystem auf tiefere Bodenschichten festzustellen. Dies dürfte mit der – gegenüber der N-Aufnahme – relativ gestiegenen Bedeutung der Wasseraufnahme und evtl. mit einer Auswaschung leicht löslicher Stickstoffverbindungen in die unteren Profilabschnitte zusammenhängen.

4.3. Einfluß der Bodenbearbeitung

1997 unterlagen die Versuchsflächen bereits im siebten Jahr einer einheitlichen Bewirtschaftung. Die Böden der unter Anwendung der Frässohlensaat bestellten Parzellen wurden in diesem Zeitraum nicht mehr tiefgründig gelockert, so daß davon auszugehen ist, daß die Bodenbearbeitungseffekte gut etabliert waren.

Die reduzierte Bodenbearbeitung des Horsch-Systems bewirkte bei allen drei untersuchten Arten in sehr ähnlicher Weise eine starke Einschränkung der Durchwurzelung. Davon war regelmäßig die Bodenschicht 10-30 cm besonders stark betroffen, die um ein vielfaches schwächer durchwurzelt war als in den hinsichtlich des N-Düngungsniveaus entsprechenden Varianten unter Pflug. Im Jahresmittel war dieser Befund für alle drei Arten und jede N-Düngungsstufe hochsignifikant. Ebenfalls von einer, die Durchwurzelung einschränkender Wirkung reduzierter Bodenbearbeitung berichten u.a. METTE (1987) für Winterraps bei Anwendung der Fräse, BAEUMER et al. (1971) für im Scheibendrillverfahren angebauten Winterweizen sowie HAMBLIN et al. (1990) für Weizen auf unbearbeitetem Boden. COMIA et al. (1993) konnten in der Bodenschicht unterhalb der Bearbeitungsgrenze des reduzierten Bodenbearbeitungsverfahrens (13-25 cm) eine signifikante Reduktion der Wurzeldichte von Hafer gegenüber gepflügtem Boden nachweisen und auch in allen anderen Bodentiefen war ein deutlicher Trend zu eingeschränktem Wurzelwachstum zu erkennen. Ein Versuch mit Mais unter Pflug- bzw. ohne Bodenbearbeitung (KARUNATILAKE et al. 2000) erbrachte 45 Tage nach der Bodenbearbeitung noch keine Unterschiede hinsichtlich der Durchwurzelung, nach 85 Tagen jedoch übertraf die Wurzeldichte im gepflügten Boden die des nicht bearbeiteten um etwa das Doppelte. Auf sandigen Böden stellten SEYFARTH et al. (1999) in 0-10 cm Bodenschicht höhere Durchwurzelungsintensitäten bei der Anwendung konservierender Bodenbearbeitung unter WW und Triticale fest. In 10-20 cm Bodentiefe wurde unter Triticale größere und unter WW geringere Wurzellängendichten in der pfluglosen Variante ermittelt. Die Wurzeltrockenmasse lag bei beiden Kulturen in beiden Bodentiefen im ungepflügten Boden höher.

Ebenso berichten HARRACH & VORDERBRÜGGE (1991) von im gesamten Profil eines Sandbodens höherer WLD unter Zuckerrüben bei reduzierter gegenüber Pflugbodenbearbeitung während sie in einem Lehmboden größere DWI unter Pflug und verminderte Durchwurzelung bei reduzierten Bestellungsverfahren vorfanden.

Auch die Entwicklung der Wurzelsysteme zwischen Blüte- und Erntetermin verlief in der vorliegenden Studie unter Frässohlensaat nicht identisch zu den Pflugvarianten. Während in der Variante WG/P200 die $WL_{(0-60)}$ (bei leichten Zuwächsen in 0-10 cm und geringfügigen Verlusten in 10-30 und 30-60 cm Bodentiefe) unverändert blieb, waren unter Frässohlensaat bei entsprechender Düngung (H240) starke Wurzelzuwächse in allen Bodentiefen – insbesondere in 10-30 cm Tiefe – zu verzeichnen. Hier war der Schwerpunkt des Wurzelwachstums in die zweite Hälfte der Vegetationsperiode verschoben. Die Anwendung der Frässohlensaat scheint das Wurzelwachstum der Wintergerste demnach insbesondere in frühen Stadien der vegetativen Entwicklung zu verlangsamen. Für WW war keine entsprechende Variante mit Horschbodenbearbeitung und hoher N-Düngung verfügbar.

Die hinsichtlich der beiden Bodenbearbeitungsverfahren sehr ungleiche Dynamik der Wurzelentwicklung unter WR (vgl. Abbildung 2.15 u. 2.16) ist vermutlich mit Überlagerungen der Effekte von Bodenbearbeitung und N-Düngung zu erklären. Während die hoch gedüngten Varianten im Pflug-Block die höchsten Zuwachsraten aufweisen, sind es unter Horsch die gering bzw. nicht gedüngten. Auch unterschiedliche Nährstoffverteilungsmuster im Bodenprofil dürften hierbei eine Rolle spielen: Regelmäßiges Pflügen führt zu einer intensiveren Einarbeitung von Ernterückständen, organischer Substanz und Nährstoffen in tiefere Bodenschichten und damit zu einer mächtigeren Bodenschicht mit einigermaßen homogener Nährstoffverteilung. Durch den Pflug wird andererseits das natürliche Porensystem Jahr für Jahr zerstört und der kapillare Anschluß des Oberbodens an tiefere Bodenschichten gestört. Dadurch ist die Wassernachlieferung durch kapillaren Aufstieg behindert. Die enormen Wurzelzuwachsraten im Unterboden der gepflügten Varianten bei hoher N-Versorgung könnten als Folge dieser Zusammenhänge zu verstehen sein. Mit zunehmender N-Düngung waren auch unter Horsch hohe Zuwachsraten im Unterboden festzustellen, was wiederum im Zusammenhang mit erhöhtem Wasserbedarf der mit N besser versorgten Pflanzen zu sehen sein dürfte. Die geringe Bearbeitungstiefe in den Horsch-Varianten führt demgegenüber zu einer Akkumulation von organischer Substanz in der Oberkrume und hat höhere biologische Aktivitäten (FRAHM, 2000) während der Vegetationsperiode zur Folge. Dies läßt gesteigerte Netto-N-Mineralisationsraten in der Wachstumsphase der Pflanzen sowie – infolge höherer N-Festlegung in der mikrobiellen Biomasse und einer Anreicherung der organisch gebundenen N-Reserven im Oberboden (FREY, 1998) – geringere Auswaschungsverluste im Winterhalbjahr erwarten. Dies könnte die Tatsache erklären, daß in den Horsch-N-Nullvarianten anders als unter Pflug keine signifikante Erhöhung der WLD gegenüber den gedüngten Varianten festzustellen war.

Insgesamt war die DWI in den gepflügten Varianten unter allen Kulturen und zu beiden Terminen ohne Ausnahme größer als in den Horsch-Varianten gleichen N-Niveaus. Als Erklärung für diesen Befund ist in erster Linie ein sprunghafter Wechsel der Lagerungsdichte an

der Grenze von bearbeitetem zu unbearbeitetem Boden, der Frässohle, zu sehen. Mit steigender Lagerungsdichte nimmt der mechanische Bodenwiderstand in starkem Maße zu, das Porenvolumen, insbesondere die Anzahl größerer Poren, hingegen deutlich ab (HELAL 1991). Nach CANNELL (1985) führen vor allem eine Reduktion des Porenvolumens sowie des Makroporenanteils zu Restriktionen hinsichtlich des Wurzelwachstums, die er auf Einschränkungen der hydraulischen Leitfähigkeit, des Gasaustausches sowie auf die Verringerung der Anzahl an weiten kontinuierlichen Poren zurückführt, die als leicht zu durchdringende Wachstumskanäle bevorzugt von Pflanzenwurzeln durchwachsen werden (HELAL 1991).

In parallel zu der vorliegenden Arbeit auf den Flächen des SFB 192 durchgeführten Untersuchungen (TIGGES, pers. Mitteilung, 2000) wurde in 12 cm Bodentiefe unter Pflug (bei 120 kgN/ha + Gülle Herbst u. Frühjahr) eine Lagerungsdichte von 1,29 g/cm³, in der ansonsten gleich behandelten Horschvariante ein Wert von 1,47 g/cm³ ermittelt. Bereits in der vorangegangenen Antragsperiode wurden auf den SFB-Flächen (unter gleicher Bewirtschaftung) in den Oberkrumen der Horschvarianten stets geringere, in der Unterkrume jedoch regelmäßig deutlich höhere Lagerungsdichten vorgefunden (FREY, 1998). Entscheidend für die Einschränkung der Durchwurzelung ist dabei die Tatsache, daß der Dichte-Wechsel unterhalb der Bearbeitungsgrenze in der reduzierten Bodenbearbeitung erheblich stärker ausgeprägt ist und dazu bereits etwa 10 cm – gegenüber 30 cm unter Pflug – unterhalb der Geländeoberfläche auftritt. In diesem Zusammenhang weist FREY (1998) weiterhin auf gegenüber den gepflügten Varianten häufigeres Auftreten anaerober Bedingungen und durch die höhere Lagerungsdichte leicht verringerte nutzbare Feldkapazität in den Unterböden der Horschvarianten hin. Übereinstimmend beobachteten u.a. auch HAMMEL (1989), CARTER (1992), BALL et al. (1994) und COMIA et al. (1994) zunehmende Lagerungsdichten in den unbearbeiteten Profilabschnitten pfluglos bearbeiteter Böden.

Erhöhte Lagerungsdichten führten in einem Versuch von HELAL & SAUERBECK (1986) zu geringeren Wurzelanzahlen, Wurzellängen und größeren mittleren Wurzeldurchmessern bei Mais. Eine Verdichtung des Bodens von 1,2 auf 1,6 g/cm² hatte in den Versuchen der o.g. Autoren eine Abnahme der WL um 64% und eine Zunahme des mittleren Wurzeldurchmessers um 19% zur Folge. Auch der Verzweigungsgrad des Wurzelsystems nahm erheblich ab. GLIEMEROTH et al. (1968) berichten von stark erhöhten Wurzel trockenmassen im Unterboden nach Tieflockerung/Tiefpflügen. TENHOLTERN & HARRACH (1992) konnten zeigen, daß sowohl Durchwurzelungstiefe als auch die WLD nach Lockerung eines verdichteten Bodens zunahm. In diesem Zusammenhang stellen sie fest, daß die DWI einer Bodenschicht nicht nur von ihrer eigenen Lagerungsdichte abhängt, sondern auch von der darüberliegenden Schichten. Dichte-Wechsel, wie sie in den Böden der Horschvarianten ausgeprägt auftreten, behindern das Tiefenwachstum der Pflanzenwurzeln offensichtlich in starkem Maße. Dies bestätigen auch Untersuchungen von HARRACH & VORDERBRÜGGE (1991), die drastisch abnehmende WLD unterhalb von Schichten mit plötzlichem Übergang von gelockertem zu verdichtetem Boden feststellten.

Neben Lagerungsdichte und Eindringwiderstand spielen Ausbildung und Kontinuität des Porensystems eine wichtige Rolle bei der Erschließung eines Bodenprofils durch die Pflanzen-

wurzeln (HARRACH & VORDERBRÜGGE 1991). Durch die Bodenbearbeitung wird das Hohlraumssystem der bearbeiteten Bodenschicht regelmäßig stark verändert und der Anschluß an das Porensystem des Bodens unterhalb der Bearbeitungsgrenze zerstört. Dieser Wechsel erfolgt in den gepflügten Varianten in einer Bodentiefe von ca. 30 cm, unter Frässohlensaat jedoch bereits in einer Tiefe von etwa 10 cm. Dazu kommt, daß das Bödengefüge durch das Fräsen erheblich stärker gestört wird als durch den Pflug (FREY 1998). Zusammen mit dem abrupten Wechsel der Lagerungsdichte, zeitweiligem Sauerstoffmangel und geringerer nFK dürfte der unterbrochene Anschluß an das Porensystem des Unterbodens eine Hauptursache für die bei allen untersuchten Kulturarten stark verminderte Durchwurzelung der Bodenschichten unterhalb der Bearbeitungsgrenze sein.

Als weitere mögliche Ursache für die verminderte Durchwurzelung in verdichteten Böden führt HELAL (1991) erhöhte Ethylenanreicherungsraten in verdichteten und nassen Böden an. Ethylen wird von Pflanzenwurzeln und Bodenorganismen gebildet. Die Ethylenfreisetzung nimmt mit zunehmender Bodenfeuchte und -dichte zu. SARQUIS et al. (1991) stellten eine enge Korrelation zwischen zunehmendem Bodenwiderstand und erhöhter Ethylenproduktion von Maiswurzeln fest. Hohe Anreicherungsraten in feuchtem/dicht gelagertem Boden werden zusätzlich dadurch begünstigt, daß kompakter gelagerte Böden in aller Regel schlechter durchlüftet sind und somit das entstehende Ethylen langsamer an die Bodenoberfläche diffundiert. Nach SMITH & ROBERTSON (1971) reichen bereits geringe Ethylen-Partialdrücke im Boden aus, um das Wurzelwachstum zu reduzieren.

4.4. Unterschiede zwischen den Kulturpflanzenarten

Die im Jahresmittel größten Wurzelsysteme unter den drei untersuchten Kulturpflanzenarten bildete WW aus. Gegenüber WG und – abgesehen von der N-Mangelvariante – auch gegenüber Raps war die $WL_{(0-100)}$ unter Weizen stets am größten. Größere Wurzelsysteme unter WW gegenüber WG ermittelten auch KUNDLER & SMUKALSKI (1988) sowie STEINGROBE et al. (2001^a, 2001^b). In allen gedüngten Varianten wies der Raps die geringsten Wurzellängendichten auf. Übereinstimmend fanden DRECCER et al. (2000) bei einem Vergleich von WW (Sorte *Minaret*) und WR (*Aries*) bei fünf verschiedenen N-Düngungsstufen (ohne N0-Variante) jeweils signifikant höhere Wurzelbiomassen unter WW. Die geringste Tiefenentwicklung der Wurzeln war unter Gerste zu beobachten, deren Wurzeln die Bodenschicht 60-100 erheblich weniger dicht durchwurzelten als WR und WW. Auf einen unterschiedlichen zeitlichen Verlauf der vegetativen Entwicklung von Getreide und Raps deutet die Tatsache hin, daß die Gesamtwurzellängen unter WG und WW zur Blüte im Mittel noch deutlich höher, zur Ernte jedoch geringer liegen als unter WR.

Entgegengesetzt verliefen die Reaktionen von Raps und Getreide auf N-Mangel. Während die Getreidearten mit steigender N-Düngung größere Wurzelsysteme entwickelten, reagierte WR auf N-Mangel mit einer eklatanten Ausweitung des Wurzelsystems. Dementsprechend wies WR in den N0-Varianten im Jahresmittel erheblich (in der Pflugvariante signifikant) größere $WLD_{(0-100)}$ auf als die Getreidearten. Umgekehrt lag die $WL_{(0-100)}$ von WR in den gedüngten

Varianten stets (signifikant in P120 u. H240) unter der von WW und WG. N-Mangel führte bei beiden Getreidearten des weiteren zu einem Abbau der unterirdischer Biomasse nach der Blüte, während unter Raps auch nach der Blüte noch ein erheblicher Netto-WL-Zuwachs festzustellen war.

Als eine mögliche Ursache für die hinsichtlich des N-Mangels verschiedenen Reaktionsmuster kommt der relativ zu WG und WW höhere N-Bedarf (TEUTEBERG 1980) von Raps in Frage, der eine ausgeprägtere Reaktion auf N-Mangel plausibel erscheinen läßt. Eine Vergrößerung des Wurzelsystems als Adaption an geringe N-Verfügbarkeit im Boden ist bei Raps als um so wirkungsvollere Maßnahme einzuschätzen, als nach DRECCER et al. (2000) die spezifische N-Aufnahmerate der Wurzeln von Raps gegenüber WW hoch signifikant größer ist. Bei guter N-Versorgung reicht dem Raps ein kleineres Wurzelsystem für eine bedarfsgerechte N-Akquisition aus, unter N-Mangel war der Raps unter den gegebenen Versuchsbedingungen offensichtlich eher in der Lage, diesen durch eine Ausweitung des Wurzelsystems zu kompensieren.

Die Reduktion der Bodenbearbeitung hatte bei allen drei untersuchten Arten signifikant eine starke Verminderung der DWI in der Unterkrume und dadurch auch geringere $WL_{(0-100)}$ zur Folge (s. Abbildungen 2.7, 2.12, 2.18).

5. Literatur

- ANDERSON, E. L. (1988): Tillage and N fertilization effects on maize root growth and root:shoot ratio. In: *Plant and Soil* 108, S. 245-251.
- ARSHAD M. A. & K. S. GILL (1997): Barley, canola and wheat production under different tillage-fallow-green manure combinations on a clay soil in a cold, semiarid climate. In: *Soil & Tillage Research* 43, S. 263-275.
- BALL, B. C., R. W. LANG, E. A. G. ROBERTSON & M.F. FRANKLIN (1994): Crop performance and soil conditions on imperfectly drained loams after 20-25 years of conventional tillage or direct drilling. In: *Soil & Tillage Research* 31. S. 97-118.
- BAEUMER, K. (1980): Stickstoffdüngung zu Getreide bei reduzierter Bodenbearbeitung. In: *Kali Briefe* 15, S. 77-90.
- BAEUMER, K., W. EHLERS & G. PAPE (1971): Erste Erfahrungen im Anbau ohne Bodenbearbeitung in Göttingen. In: *Landw. Forsch., Sonderheft* 26, S. 264-272.
- BARRACLOUGH, P. B. (1989): Root growth, macro-nutrient uptake dynamics and soil fertility requirements of a high-yielding winter oilseed rape crop. In: *Plant and Soil* 119, S. 59-70.
- BARRACLOUGH, P. B., H. KUHLMANN & A. H. WEIR (1989): The Effects of Prolonged Drought and Nitrogen Fertilizer on Root and Shoot Growth and Water Uptake by Winter Wheat. In: *Journal of Agronomy and Crop Science* 163 (5), S. 352-360.
- BARRACLOUGH, P. B. & R.A. LEIGH (1984): The growth and activity of winter wheat roots in the field: the effect of sowing date and soil type on root growth of high-yielding crops. In: *J. agric. Sci., Camb.* 103, S. 59-74.
- BIOLOGISCHE BUNDESANSTALT FÜR LAND- UND FORSTWIRTSCHAFT (Hrsg.) (1997): Growth Stages of Plants/Entwicklungsstadien von Pflanzen. BBCH-Monograph. Blackwell Wissenschaftsverlag Berlin, Wien, Oxford, Edinburgh, Boston, London, Melbourne, Paris, Tokio.
- BÖHM, W. (1978): Untersuchungen zur Wurzelentwicklung bei Winterweizen. In: *Z. Acker- und Pflanzenbau* 147, S. 264-269.
- BÖHM, W. & U. KÖPKE (1977): Comparative root investigations with two profile wall methods. In: *Acker- und Pflanzenbau (J. Agronomy & Crop Science)* 144, S. 297-303.
- BONARI, E. MAZZONCINI & A. PERUZZI (1995): Effects of conventional and minimum tillage on winter oil seed rape (*Brassica napus* L.) in a sandy soil. In: *Soil & Tillage Research* 33, S. 91-108.
- BØRRESEN, T. & A. NIØS (1994): The effect of ploughing depth and seedbed preparation on crop yield, weed infestation and soil properties from 1940 to 1990 on a loam soil in south eastern Norway. In: *Soil and Tillage Research* 32, S. 21-39.

- BØRRESEN T. (1999): The effect of straw management and reduced tillage on soil properties and crop yields of spring-sown cereals on two loam soils in Norway. In: *Soil & Tillage Research* 51, S. 91-102.
- BOWEN, G. D. (1991): Soil Temperature, Root Growth, and Plant Function. In: WAISEL, Y., A ESHEL & U. KAFKAFI (Hrsg.): *Plant Roots. The Hidden Half*. Marcel Dekker, Inc. New York, Basel, Hong Kong, S. 309-330.
- BRÜCK, H. (1998): Varietal Differences in Yield, root size and water-use-efficiency in pearl millet (*pennisetum glaucum* L.). Dissertation. In: BLUME, H.-P., R. HORN, J. LAMP, B. SATTELMACHER (Hrsg.): *Schriftenreihe Institut für Pflanzenernährung und Bodenkunde Universität Kiel* 46.
- CANNELL, R. Q. (1985): Reduced tillage in North-West Europe – a review. In: *Soil & Tillage Research* 5, S. 129-177.
- CARTER, M. R. (1992): Characterizing the soil physical condition in reduced tillage system for winter wheat on a fine sany loam using small cores. In: *Canadian Journal of soil science* 72, S. 395-402.
- COMIA R. A., M. STENBERG, P. NELSON, T. RYDBERG & I. HAKANSSON (1994): Soil and crop responses to different tillage systems. In: *Soil & Tillage Research* 29, S. 335-355.
- DRECCER, M. F., A. H. C. M. SCHAPENDONK, G. A. SLAFER & R. RABBINGE (2000): Comparative response of wheat and oilseed rape to nitrogen supply: absorption and utilisation efficiency of radiation and nitrogen during the reproductive stages determining yield. In: *Plant and Soil* 220, S. 189-205.
- EKEBERG, E. & H. C. F. RILEY (1997): Tillage intensity on soil properties and crop yield in a long-term trial on morainic loam soil in southeast Norway. In: *Soil & Tillage Research* 42, S. 277-293.
- FORBES, P. J., K. E. BLACK & J. E. HOOKER (1997): Temperature-induced alteration to root longevity in *Lolium perenne*. In: *Plant and Soil* 190, S. 87-90.
- FRAHM, A.: Das Edaphon in Oberböden einer norddeutschen Jungmoränenlandschaft unter dem Einfluß verschiedener Bewirtschaftungsmaßnahmen. Dissertation. In: BLUME, H.-P., R. HORN, J. LAMP & B. SATTELMACHER (Hrsg.): *Schriftenreihe Institut für Pflanzenernährung und Bodenkunde Universität Kiel* 55.
- FRANKEN, H. & E. S. FAYED (1983): Zur Wurzelbildung bei Winterweizen in Abhängigkeit von Bodentiefe und N-Düngung. In *Wurzelökologie und ihre Nutzenanwendung/Root Ecology and its practical application*. Bundesanstalt Gumpenstein, S. 453-462.
- FREY, D. (1998): Eignung des Systems Horsch als reduzierte Bodenbearbeitung zur Förderung der Bodenfruchtbarkeit auf Böden des Östlichen Hügellandes in Schleswig-Holstein. Dissertation. In: BLUME, H.-P., A. FINCK, R. HORN, B. SATTELMACHER (Hrsg.): *Schriftenreihe Institut für Pflanzenernährung und Bodenkunde Universität Kiel* 43.
- GASS, P. & J. J. OERTLI (1980): Durchwurzelungsvergleich zwischen Fettwiese und angrenzender Brachwiese. In: *Zeitschrift für Pflanzenernährung und Bodenkunde* 143, S. 208-214.

- GEISLER, G. & D. MAARUFI (1975): Der Einfluß des Bodenwassergehaltes und der Stickstoffdüngung auf Pflanzenwachstum, Wurzelmorphologie, Transpiration und Stickstoffaufnahme. In: Z. Acker- und Pflanzenbau 141, S. 211-230.
- GLATZEL, G. (1983): Root distribution and soil water depletion in an oak-hornbeam stand (*Quercus petraea*, *Q. Robur*, *Carpinus betulus*) and spruce thicket (*Picea abies*). In: Wurzelökologie und ihre Nutzenanwendung/Root Ecology and its practical application. Bundesanstalt Gumpenstein, S. 453-462.
- GLIEMEROTH, G., G. KAHNT & N. SIDIRAS (1968): Einwirkungen von Unterbodenverdichtungen auf Wurzelwachstum und Nährstoffhaushalt. In: Landwirtschaftliche Forschung, Sonderheft 22, S. 70-77
- HAMBLIN, A., D. TENNANT & M. W. PERRY (1990): The cost of stress: Dry matter partitioning changes with seasonal supply of water and nitrogen to dryland wheat. In: Plant and Soil 122, S. 47-58.
- HAMMEL, J. E. (1989). Long Term Tillage and Crop Rotation Effects on Bulk Density and Soil Impedance in Northern Idaho. In: Soil Sci. Soc. Am. J. 53, S. 1515-1519.
- HANSSON, A.-C., O. ANDRÉN & E. STEEN (1991): Root production on four arable crops in Sweden and its effect on abundance of soil organisms. In: British ecological society special publication 10, Plant root growth: an ecological perspective, S. 247-265.
- HANSSON, A.-C., R. PETTERSSON & K. PAUSTIAN (1987): Shoot and Root Production and Nitrogen Uptake in Barley, with and without Nitrogen Fertilization. In: J. Agronomy & Crop Science 158, S. 163-171.
- HELAL, H. M. & D. SAUERBECK (1986): Entwicklung des Wurzelsystems in Abhängigkeit von der Bodendichte. In: VDLUFA-Schriftenreihe 20, Kongreßband 1986, S. 381-388.
- HELAL, H. M. (1991): Bodengefüge, Wurzelentwicklung und Wurzelfunktionen. In: Zeitschrift für Pflanzenernährung und Bodenkunde 154, S.403-407.
- HARRACH, T. & T. VORDERBRÜGGE (1991): Die Wurzelentwicklung von Kulturpflanzen in Beziehung zum Bodentyp und Bodengefüge. In: Berichte über Landwirtschaft 204, Sonderheft Bodennutzung und Bodenfruchtbarkeit Bd. 2: Bodengefüge, S. 69-82.
- HORSCH, D. (1990): Reduzierte Bodenbearbeitung, angepasste Technik und Unkrautbekämpfung nach dem System Horsch. In: DIERCKS, R. & R. HEITFUSS (Hrsg.): Integrierter Landbau. BLV-Verlagsgesellschaft, München, Wien, Zürich, S. 273-281.
- KÄTTERER, T., A. C. HANSSON & O. ANDRÉN (1993): Wheat root biomass and nitrogen dynamics – effects of daily irrigation and fertilization. In: Plant and Soil 151, S. 21-30.
- KARUNATILAKE, U., H. M. VAN ES & R. R. SCHINDELBECK (2000): Soil and maize response to plow and no-tillage after alfalfa-to-maize conversion on a clay loam soil in new york. In: Soil & Tillage Research 55, S. 31-42.
- KJELLSTRÖM, C. G. & H. KIRCHMANN (1994): Dry matter production of oilseed rape (*Brassica Napus*) with special reference to the root system. In: J. agric. Sci., Camb. 123, S. 327-332.

- KUNDLER, P. & M. SMUKALSKI (1988): Ertragswirkung von Beregnung, Bodenbearbeitung, N-Düngung und organischer Düngung auf lehmigen Sandböden in einem 8jährigen Feldversuch. In: Arch. Acker- und Pflanzenbau Bodenkd. 32/3, S. 161-169.
- KUTSCHERA, L.(1960): Wurzelatlas mitteleuropäischer Ackerunkräuter und Kulturpflanzen. DLG-Verlag, Frankfurt/Main.
- METTE, R (1987): Einfluß einer Bodenbearbeitung durch Pflug oder Fräse auf das Wurzelsystem von Winterraps (*Brassica Napus* L.) Diplomarbeit/Stuttgart Hohenheim. Unveröffentlicht.
- METTE, R (1994): Ertragsstruktur und Mineralstoffaufnahme von Mais und Hafer im Einflußbereich von Wallhecken. Auswirkungen auf den Mineralstoff- und Wasserhaushalt unter besonderer Berücksichtigung der Wurzelökologie von Kulturpflanzen und Knickvegetation. Dissertation Universität Kiel. Verlag Ulrich E. Grauer, Stuttgart.
- POMIKALKO, A. (1992): Durchwurzelungsintensität zweier für Schleswig-Holstein typischer Böden unter konventionell und alternativ landwirtschaftlicher Nutzung mit besonderer Berücksichtigung methodischer Aspekte. Dissertation. In: BLUME, H.-P., A. FINCK, R. HORN, B. SATTELMACHER (Hrsg.): Schriftenreihe Institut für Pflanzenernährung und Bodenkunde Universität Kiel 19.
- RASMUSSEN, K. J. (1999): Impact of ploughless soil tillage on yield and soil quality: A Scandinavian review. In: Soil & Tillage Research 53, S. 3-14.
- RILEY, H. C. F. (1997): Soil mineral-N and N-fertilizer requirements of spring cereals in two long-term tillage trials on loam soil in southeast Norway. In: Soil & Tillage Research 48, S. 26-274.
- SARQUIS, J. I., W. R. JORDAN & P. W. MORGAN (1991): Ethylene Evolution from Maize (*Zea mays* L.) Seedling Roots and Shoots in response to mechanical impedance. In: Plant Physiol. 96, S. 1171-1177.
- SATTELMACHER, B., F. KLOTZ & H. MARSCHNER (1990): Influence of the nitrogen level on root growth and morphology of two potato varieties differing in nitrogen acquisition. In: Plant and Soil 123, S. 131-137.
- SCHUURMAN, J. J. & L. KNOT (1974): The effect of nitrogen on the root and shoot development of *Lolium multiflorum* var. *westerwoldicum*. In: Neth. J. Agric. Sci. 22, S. 82-88.
- SEYFARTH, W., M. JOSCHKO, J. ROGASIK, W. HÖHN, J. AUGUSTIN, S. SCHROETTER (Hrsg.) (1999): Bodenökologische und pflanzenbauliche Effekte konservierender Bodenbearbeitung auf sandigen Böden. ZALF-Bericht 39, Müncheberg.
- SMITH, K. A. & P. D. ROBERTSON (1971): Effect of ethylene on root extension of cereals. In: Nature 234, S. 148-149.
- STEINGROBE, B. (1998): Gross and net root growth of rape. Poster, Jahrestagung der Deutschen Gesellschaft für Pflanzenernährung, 11.-12. Juni 1998, Dülmen.

- STEINGROBE, B. (2000): Influence of nitrogen on root growth and root turnover of oilseed rape. Poster, IACR – Rothamsted Millennium Conference: Interactions in the root environment – an integrated approach. 10.-12. April 2000, Harpenden, UK.
- STEINGROBE, B., H. SCHMID & N. CLAASEN (2001^a): Root production and root mortality of winter barley and its implication with regard to phosphate acquisition. In: *Plant and Soil* 237, S. 239-248.
- STEINGROBE, B., H. SCHMID, R. GUTSER & N. CLAASEN (2001^b): Root production and root mortality of winter wheat grown on sandy and loamy soils in different farming systems, In: *Biol Fertil Soils* 33, S. 331-339.
- TENHOLTERN, R. & T. HARRACH (1992): Soil physical limitations of root growth in anthrosols and the effect of deep loosening. In: KUTSCHERA, L, E. HÜBL, E. LICHTENEGGER, H. PERSSON, M. SOBOTIK: *Wurzelökologie und ihre Nutzenanwendung/Root Ecology and its practical application* 2, 3. ISSR Symp. Verein für Wurzelforschung, Klagenfurt, S. 377-380.
- TEUTEBERG, W. (1980): Der Anbau von Raps unter besonderer Berücksichtigung der Düngung. In: *Kali-Briefe* 15, S. 297-303.
- TILMAN, D. & D. WEDIN (1991): Plant traits and resource reduction for five grasses growing on a nitrogen gradient. In: *Ecology* 72, S. 685-700.
- TIGGES, U (2000): Untersuchungen zum mehrdimensionalen Wassertransport unter besonderer Berücksichtigung der Anisotropie der hydraulischen Leitfähigkeit. Dissertation. In: BLUME, H.-P., R. HORN, J. LAMP, B. SATTELMACHER (Hrsg.): *Schriftenreihe Institut für Pflanzenernährung und Bodenkunde Universität Kiel* 19.
- WEBER, E. P. & F. P. DAY (1996): The effect of nitrogen fertilization on the phenology of roots in a barrier island sand dune community. In: *Plant and Soil* 182, S. 139-148.
- WHIPPS, J. M. (1987): Carbon loss from the roots of tomato and pea seedlings grown in soil. In: *Plant and Soil* 103, S. 95-100.

Teil 3: Einfluß von N-Düngung und Bodenbearbeitung auf die Wurzelwachstumsdynamik von Winterraps (*Brassica Napus* L.)

1. Einleitung

Wie in Teil 2 gezeigt werden konnte, weicht die Durchwurzelungsdynamik des Winterraps (WR), der im Gegensatz zur homorhizen Bewurzelung der Gräser ein allorhizes Wurzelsystem ausbildet, erheblich von jener der im ersten Versuchsjahr parallel untersuchten Getreidearten Winterweizen (WW) und Wintergerste (WG) ab. Konträr zu der für Getreide festgestellten Ausdehnung der Wurzelsysteme bei gesteigerter N-Zufuhr wurden beim Raps in beiden untersuchten Bodenbearbeitungssystemen die jeweils höchsten Wurzellängendichten (WLD) in den Versuchsvarianten ohne N-Düngung ermittelt. In den meisten Fällen führte eine Steigerung der mineralischen N-Zufuhr bei gleicher Bodenbearbeitung unter Raps zu geringerer WLD. Vor allem die Krumendurchwurzelung zeigte sich durch die N-Düngung häufig stark beeinflusst. Die Effekte der Bodenbearbeitung hingegen waren bei den untersuchten Arten ähnlich ausgeprägt. Die Anwendung der reduzierten Bodenbearbeitung Frässohlensaat im System Horsch (HORSCH 1990) führte sowohl bei Getreide als auch beim Raps einheitlich zu einer Verringerung der Durchwurzelungsintensität (DWI). Insbesondere die Durchwurzelung der Bodenschicht unterhalb der Frässohle (10-30 cm) war regelmäßig stark eingeschränkt.

Zu den Getreidearten findet sich in der Literatur eine Reihe vergleichbarer Untersuchungen (z.B. BAEUMER et al. 1971, BAEUMER 1980, FRANKEN & FAYED 1983, HANSSON et al. 1987, COMIA et al. 1994, SEYFARTH et al. 1999, KARUNATILAKE et al. 2000). Dabei ist eine sehr gute Übereinstimmung der qualitativen Aussagen anderer Autoren mit den im Rahmen dieses Projektes erzielten Ergebnissen festzustellen.

Demgegenüber ist über die Auswirkungen der Bewirtschaftungsfaktoren Bodenbearbeitung und Stickstoffdüngung auf das Wurzelsystem von Winterraps vergleichsweise wenig bekannt. Diese Lücke zu schließen und die Ergebnisse über einen Versuchszeitraum von drei Jahren abzusichern ist eines der Anliegen der vorliegenden Arbeit.

Im Folgenden werden die Ergebnisse der Durchwurzelungs-Inventur für Winterraps im Einzelnen vorgestellt. Die Wurzelsysteme wurden in drei aufeinanderfolgenden Vegetationsperioden 1997, 1998 und 1999 beprobt. Um die Wurzelentwicklung und ihre Dynamik im Verlauf einer Vegetationsperiode zeitlich möglichst hoch aufgelöst dokumentieren zu können, wurde die Länge der Wurzelsysteme im mittleren Versuchsjahr im vierwöchigen Turnus vom Auflaufen bis zu Ernte in jeweils vier Bodentiefen ermittelt. Zusätzlich zur WLD wurde zum Erntetermin 1997 die Trockenmasse (TM) der Wurzeln bestimmt. In jedem Bodenbearbeitungsblock wurden jeweils vier parallele N-Düngungsvarianten untersucht.

Untersuchungsgebiet, Behandlungsvarianten und Bestimmungsmethoden sind in Teil 1 (Kap. 2.1. u. 2.2. u.2.3.) detailliert dargestellt. Die Ergebnisse sind auf eine Raumeinheit bezogen

als WLD [$\text{cm Wurzeln}/\text{cm}^3 \text{ Boden}$] bzw. Wurzelmasseindichten (WMD [g/cm^3]) oder auf eine Flächeneinheit als Wurzellänge (WL [$\text{km Wurzeln}/\text{m}^2 \text{ Bodenoberfläche}$]) angegeben. Hervorgehoben sei an dieser Stelle nochmals der Charakter des Langzeitversuches. Zu Beginn der Wurzeluntersuchungen im Jahre 1997 unterlagen die einzelnen Versuchspartellen hinsichtlich Bodenbearbeitung und N-Düngung bereits im siebten Jahr einer konstanten Behandlung.

2. Witterungsverlauf

Einen entscheidenden Einfluß auf die Entwicklung von Pflanzen und deren Wurzelsystemen hat die Witterung. Auf die Wurzeln wirken insbesondere Bodenwassergehalt (CANNELL 1985, HARRACH & VORDERBRÜGGE 1991) und Bodentemperatur (BOWEN 1991, FORBES et al. 1997) direkt ein.

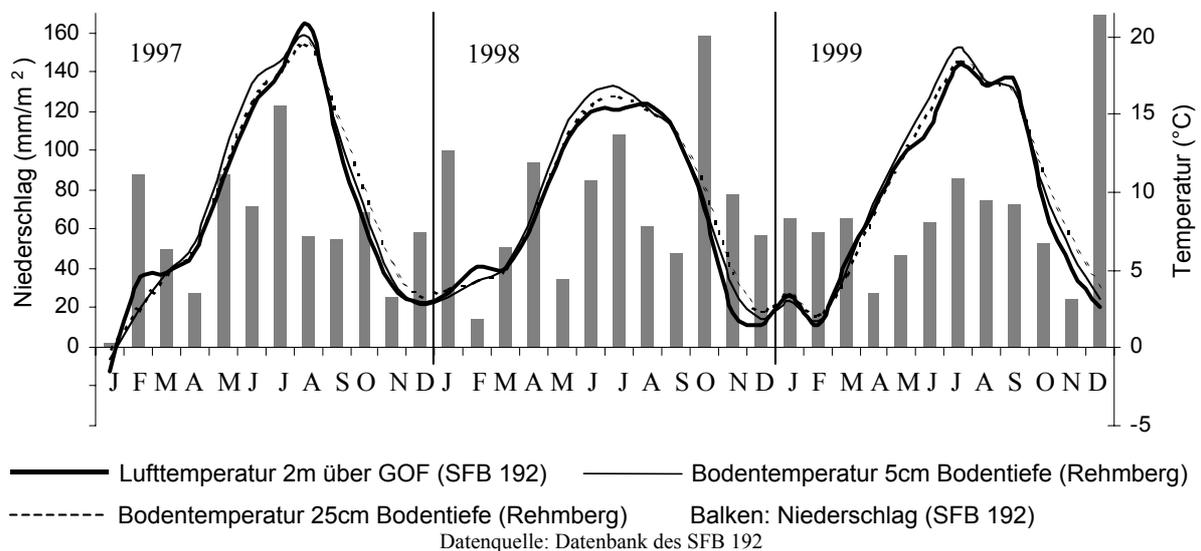


Abbildung 3.1: Tagesmittel der Luft- und Bodentemperaturen sowie der Niederschlagsmenge auf dem Versuchsgut Hohenschulen im Untersuchungszeitraum (1997-1999)

3. Ergebnisse

3.1. Versuchsjahr 1997

Die Untersuchungen für die vorliegende Arbeit wurden mit der ersten Probenahme zur Rapsblüte 1997 begonnen. Insgesamt wurde die DWI 1997 unter Raps an zwei Terminen, zu Blüte und Ernte, ermittelt.

Die Jahresmitteltemperatur lag 1997 mit $8,9^{\circ}\text{C}$ leicht über, die Niederschlagssumme von 714 mm etwas unter dem langjährigen Mittelwert. Insbesondere die letzten vier Wochen vor der Ernte waren durch hohe Temperaturen und geringe Niederschläge gekennzeichnet (vgl. Abbildung 3.1).

3.1.1. Wurzelentwicklung

Auf den ersten Blick fällt bei der Betrachtung der Abbildung 3.2, in der die WLD von Winter-
 raps zur Blüte 1997 dargestellt ist, zunächst eine stetige Abnahme der DWI mit zunehmender
 Bodentiefe auf, die in allen Behandlungsvarianten – unabhängig von N-Düngung und Boden-
 bearbeitung – ausgeprägt war. Der größte Teil der Wurzeln war stets auf die obersten Schich-
 ten des Bodenprofils konzentriert während die Unterbodenhorizonte nur noch vergleichsweise
 schwach durchwurzelt waren. Mit sehr guter Näherung ließ sich die beobachtete Abnahme der
 DWI mit der Tiefe mit exponentiellen Funktionen beschreiben. Ausnahmslos bestätigte sich
 dieses Tiefenverteilungsmuster unabhängig von der Behandlungsvariante an sämtlichen späte-
 ren Untersuchungsterminen.

Die Einflüsse der **N-Düngung** auf die Wurzelentwicklung der Winterrapspflanzen führten in
 Kombination mit Frässohlensaat (Abbildung 3.2, Grafiken in der unteren Reihe) offensicht-
 lich zu einer anderen Durchwurzelungsdynamik als in den gepflügten Varianten (Abbildung
 3.2, Grafiken in der oberen Reihe). Da sich in der Varianzanalyse häufig signifikante Inter-
 aktionen „Bodenbearbeitung*N-Düngung“ zeigten, werden die Ergebnisse im Folgenden ge-
 nerell differenziert nach den Haupteffekten Bodenbearbeitung und N-Düngung betrachtet.

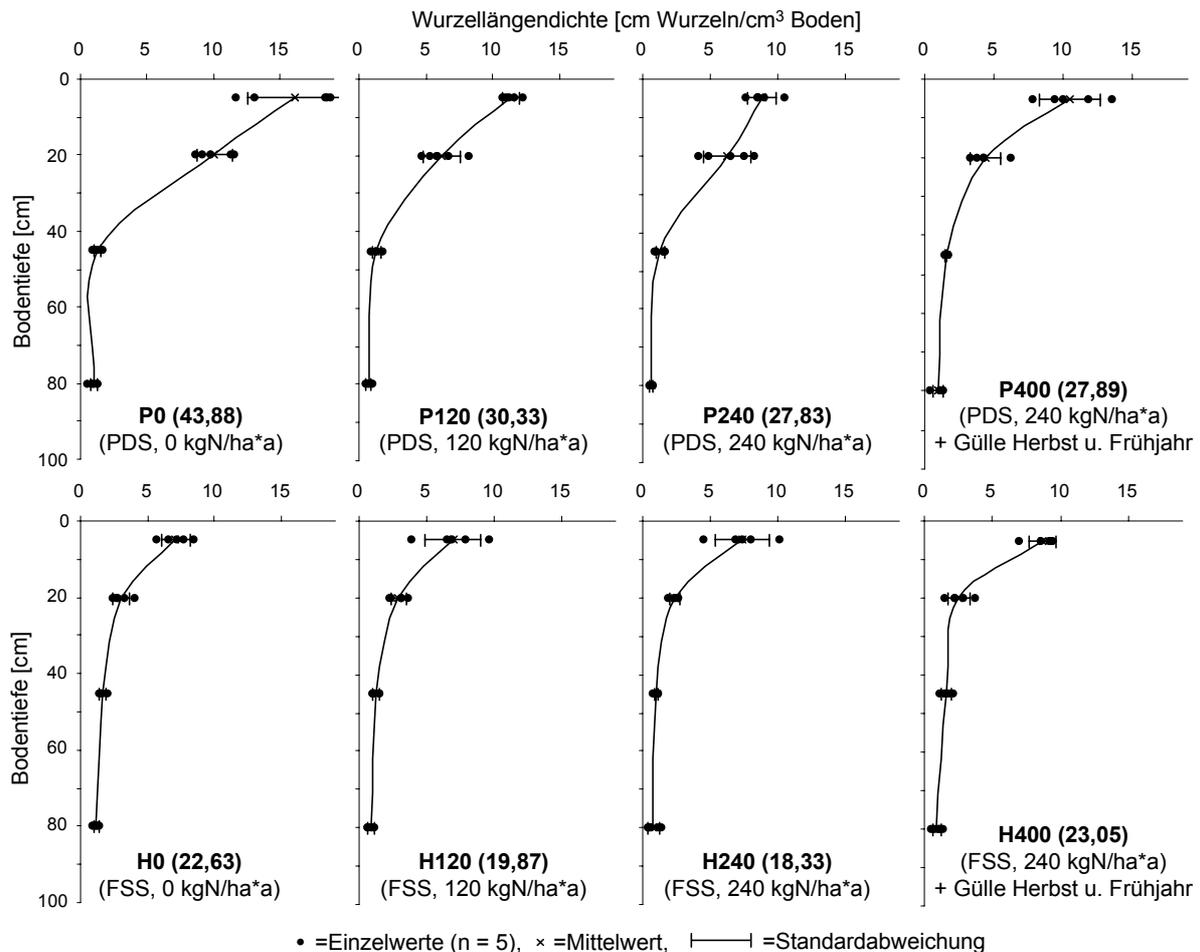


Abbildung 3.2: Wurzellängendichten von Winterrapspflanzen zur Blüte 1997 bei unterschiedlicher Bodenbearbeitung und N-Düngung in Abhängigkeit von der Bodentiefe (PDS = Pflugdrillsaat, FSS = Frässohlensaat System Horsch; Zahlen in Klammern: Gesamtwurzellänge (WL₍₀₋₁₀₀₎) [km/m²])

Die mit Abstand größte Gesamtwurzellänge ($WL_{(0-100)}$) innerhalb der Pflugvarianten hatten die Pflanzen unter N-Mangel ausgebildet. Mit jeder Steigerung der mineralischen N-Düngung war eine weitere Verkleinerung der $WL_{(0-100)}$ zu beobachten. Die zusätzliche Applikation von Schweinegülle (P400) hatte gegenüber der mineralisch hoch gedüngten P240 keinen sichtbaren Einfluß auf die $WL_{(0-100)}$, die Wurzel-Tiefenverteilung wich jedoch etwas ab: In der Oberkrume (Bodenschicht 0-10 cm) lag die DWI etwas über und in der Unterkrume (Bodenschicht 10-30 cm) leicht unter der Variante P240. Der Unterboden der Variante P400 war intensiver durchwurzelt als in den rein mineralisch gedüngten Varianten. Die Durchwurzlung des Unterbodens wurde ansonsten durch die Variation der mineralischen N-Zufuhr nicht wesentlich beeinflusst.

Gegenüber den Pflugvarianten fielen die Unterschiede zwischen den N-Düngungsstufen innerhalb des Horsch- Bodenbearbeitungsblockes vergleichsweise gering aus. Allerdings lag auch hier die $WL_{(0-100)}$ unter N-Mangel höher als in den mineralisch gedüngten Varianten H120 und H240. Die intensivste Durchwurzlung war hier in allen Bodentiefen in der kombiniert mineralisch/organisch gedüngten Variante festzustellen.

Die Effekte der **Bodenbearbeitung** werden bei einem Vergleich der Gesamtwurzellängen sofort augenfällig: In allen vier Variantenpaaren gleichen N-Niveaus lag die $WL_{(0-100)}$ in den mit Frässlensaat bestellten Flächen stets erheblich unter den gepflügten Varianten. Unter N-Mangel war dies besonders stark ausgeprägt: In P0 lag die $WL_{(0-100)}$ um das Doppelte über jener der H0. Besonders stark von der Reduktion der Bodenbearbeitung betroffen war die Unterkrume, die – im Gegensatz zu gepflügtem Boden – bei einem Einsatz der Frässlensaat nicht gelockert wird. Hier war die WLD im Vergleich zu den Pflugvarianten um das zwei- bis dreifache verringert.

Eindrucksvoll zeigte sich der das Eindringen der Wurzeln erschwerende Einfluß der Frässlensaat an der Morphologie der Raps-Pfahlwurzel.



Abbildung 3.3: Morphologie der Raps-Pfahlwurzel unter unterschiedlicher Bodenbearbeitung (je drei Exemplare, links Horsch, rechts Pflug)

Unbeeinflusst von der Höhe der N-Düngung war unter Horsch-Bodenbearbeitung regelmäßig ein „Abknicken“ der Pfahlwurzel oberhalb der Bearbeitungsgrenze zu beobachten, während die Pflanzen im gepflügtem Boden eine vertikal langgestreckte, bis über 30 cm Bodentiefe nachvollziehbare Pfahlwurzel ausbilden konnten (Abbildung 3.3). Dieses Erscheinungsbild der Pfahlwurzeln wurde unabhängig vom N-Düngungsniveau ausnahmslos an allen Untersuchungsterminen vorgefunden.

Die Effekte der **N-Düngung** fielen am Ende der Vegetationsperiode (Abbildung 3.4) ähnlich aus wie zum Blütetermin: Die größte $WL_{(0-100)}$ war wiederum in beiden Bodenbearbeitungsblöcken in den N-Mangelvarianten P0 bzw. H0 festzustellen. Unter Frässohlensaat ging mit jeder Steigerung der N-Zufuhr eine Verkleinerung des Wurzelsystems einher. Unter den gepflügten Varianten lag die $WL_{(0-100)}$ bei mittlerem N-Niveau (120 kgN/ha*a) am niedrigsten.

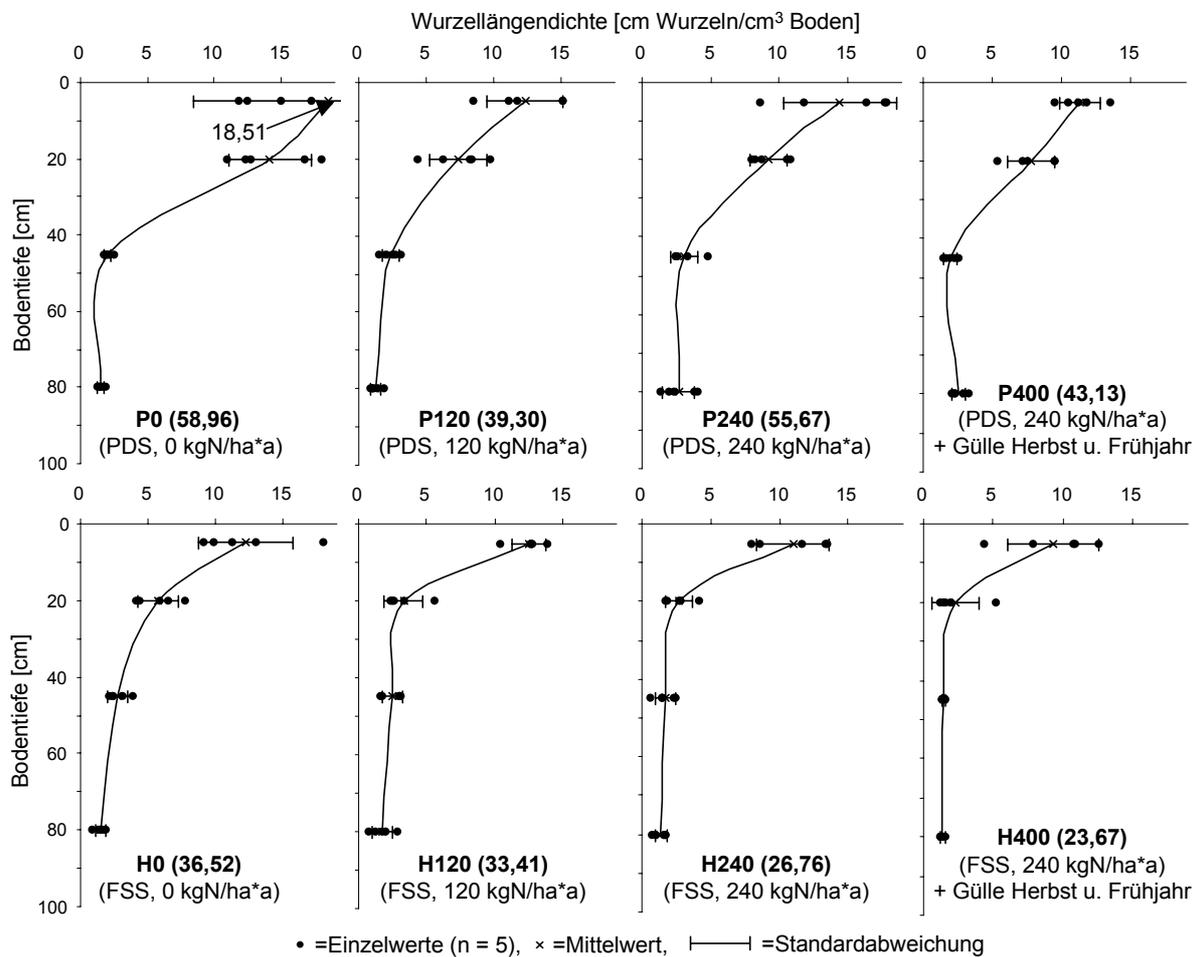


Abbildung 3.4: Wurzellängendichten von Winterraps zur Ernte 1997 bei unterschiedlicher Bodenbearbeitung und N-Düngung in Abhängigkeit von der Bodentiefe (PDS = Pflugdrillsaat, FSS = Frässohlensaat System Horsch; Zahlen in Klammern: Gesamtwurzellänge ($WL_{(0-100)}$) [km/m^2])

Der Einfluß der **Bodenbearbeitung** zeigte sich gegenüber dem Blütetermin unverändert in einer erheblichen Einschränkung der Durchwurzelung der Bodenschicht 10-30 cm als Folge der reduzierten Krumenlockerung bei Anwendung der Frässohlensaat. Dieser Effekt war so

stark ausgeprägt, daß dadurch auch die $WL_{(0-100)}$ der Horschvarianten regelmäßig hinter jener der Pflugvarianten gleichen N-Niveaus zurückblieb.

In allen Behandlungsvarianten war zwischen den Beobachtungsterminen zur Rapsblüte und zur Ernte eine Zunahme der Gesamtwurzellängendichten festzustellen (vgl. Abbildung 3.5). Dabei war eine klare Differenzierung zwischen den N-Düngungs- und Bodenbearbeitungsvarianten festzustellen.

Gesteigerte **N-Düngung** führte in den Pflugvarianten zu kräftigerem Nettowurzelzuwachs im Gesamtprofil. Besonders hohe Zuwachsraten waren bei hohem N-Düngungsniveau in den Unterbodenschichten festzustellen. In der tiefsten der untersuchten Bodenschicht hatte die Wurzellänge in der mineralisch hoch gedüngten Variante P240 zwischen Blüte und Ernte um mehr als 300% zugenommen. In der kombiniert mineralisch/organisch gedüngten Parzelle fielen die Zuwächse etwas geringer aus.

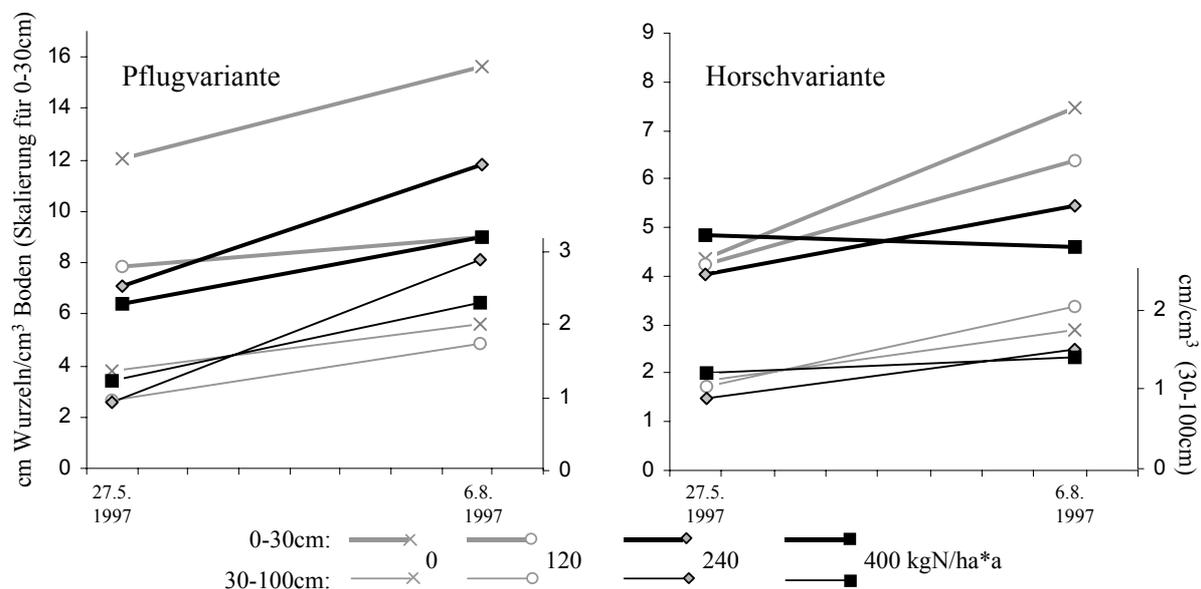


Abbildung 3.5: Entwicklung der Wurzelsysteme von Winterraps im Verlauf der Vegetationsperiode 1997 in Abhängigkeit von der N-Düngung differenziert nach Bodentiefen und Bodenbearbeitungsverfahren

Unter Horschbodenbearbeitung wurden mit steigender N-Zufuhr sowohl in der Krume als auch im Unterboden abnehmende Wurzelzuwachsrate ermittelt.

Der Einfluß der **Bodenbearbeitung** auf die Dynamik der Wurzelentwicklung wird in Abbildung 3.6 ersichtlich: Bei N-Mangel (H0) und insbesondere bei niedrigem N-Niveau (H120) hatten die Durchwurzelungsintensitäten in den Horschvarianten stärker zugenommen als unter Pflug. Bei hohem N-Niveau waren die höheren Zuwachsraten hingegen in den Pflugvarianten festzustellen. In der kombiniert mineralisch/organisch gedüngten Variante H400 war in der Krume sogar ein leichter Rückgang der DWI zu verzeichnen.

Sehr klar ist in Abbildung 3.6 zu erkennen, daß das Niveau der DWI in jeder der vier N-Stufen über den gesamten Beobachtungszeitraum jeweils in der gepflügten Variante wesentlich höher lag als unter Frässohlsaart.

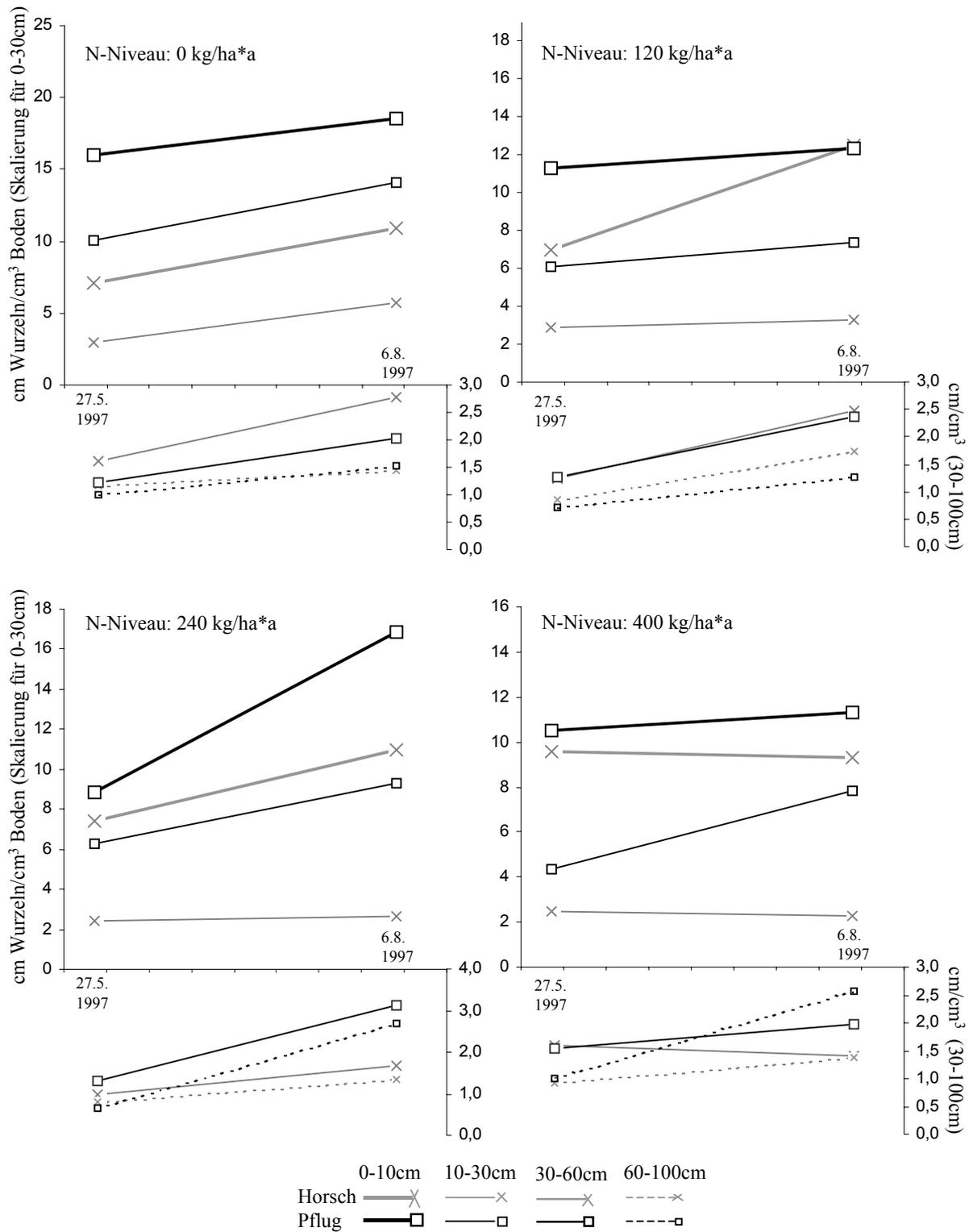


Abbildung 3.6: Entwicklung der Wurzelsysteme von Winterraps im Verlauf der Vegetationsperiode 1997 in Abhängigkeit von der Bodenbearbeitung differenziert nach Bodentiefen und N-Düngungsniveau

An dieser Stelle sei darauf hingewiesen, daß sich hinsichtlich der Vergleichbarkeit der Ergebnisse für die kombiniert mineralisch/organisch gedüngten Varianten beider Bodenbearbeitungsblöcke (P400 u. H400) Einschränkungen durch deren Geländedeposition ergeben könnten: Die Parzellen dieser Varianten lagen jeweils am oberen (Frässlensaat) bzw. unteren Rand (Pflugdrillsaat) der Ackerschläge und wiesen dadurch untereinander und auch von den rein mineralisch gedüngten bzw. ungedüngten Varianten abweichende pedologische und hydrologische Verhältnisse auf. Im Oberhangbereich der Schläge sind erodierte Parabraunerden entwickelt, während am Unterhang kolluvial überlagerte Parabraunerden und typische Kolluvisole anzutreffen sind, die im unteren Profildbereich zeitweise grundwasserbeeinflusst sind. Somit ist von erheblichen Standortunterschieden hinsichtlich der Bodenstruktur und insbesondere der Wasserversorgung auszugehen. Ein Einfluß auf das Pflanzenwachstum und die Wurzelentwicklung ist sehr wahrscheinlich, wurde aber in der vorliegenden Arbeit nicht eingehender untersucht. Da die Versuchspartellen aller anderen Varianten in einem schmalen Streifen am Mittelhang liegen, ist für diese von ähnlichen Standortbedingungen und guter Vergleichbarkeit der Ergebnisse auszugehen.

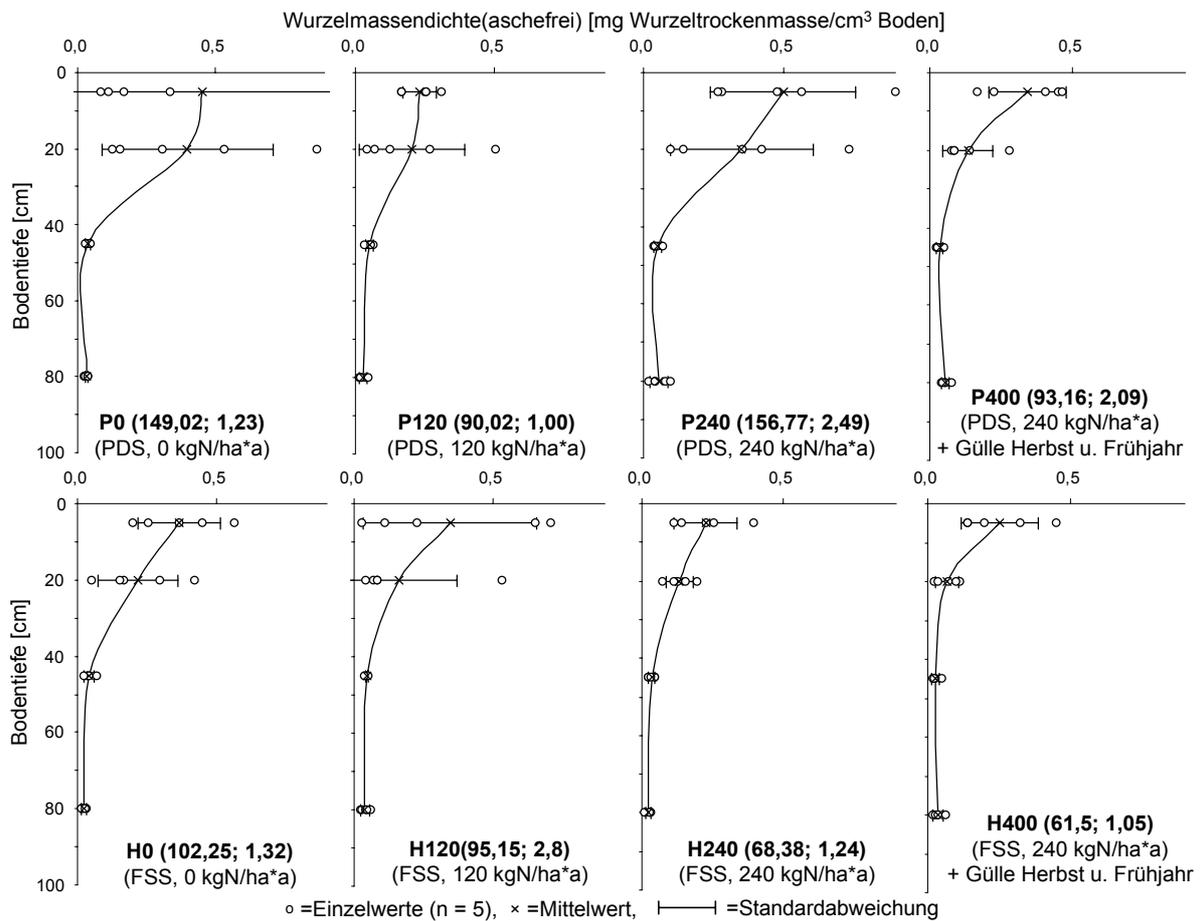


Abbildung 3.7: Wurzelmasseindichten (ohne Pfahlwurzel, aschefrei) von Wintertraps zur Ernte 1997 bei unterschiedlicher Bodenbearbeitung und N-Düngung in Abhängigkeit von der Bodentiefe (PDS = Pflugdrillsaat, FSS = Frässlensaat System Horsch; Zahlen in Klammern: aschefreie Gesamt-Wurzelrockenmasse ($WTM_{(0-100)}$ [g/m²]; aschefreie mittlere Pfahlwurzel-TM [g])

Neben der WLD wurden von den zum Erntetermin 1997 entnommenen Wurzelproben auch die Trockenmasse (TM) bestimmt und mit Hilfe dieser Werte die Wurzelmasseindichten (WMD) errechnet. Die TM der Pfahlwurzeln wurde hierbei separat erfaßt. Die Wurzelmasseindichte (WMD) nimmt ebenso wie die WLD mit der Bodentiefe annähernd exponentiell ab (Abbildung 3.7). Der Zusammenhang zwischen Profiltiefe und WMD ($r^2 = 0,34-0,75$) war schwächer ausgeprägt als die entsprechende Beziehung zwischen Bodentiefe und Wurzellängendichten. Verglichen mit den Ergebnissen der WLD-Bestimmung war die Streuung der WMD-Einzelwerte wesentlich stärker, die Standardabweichung der Mittelwerte dementsprechend größer.

Die Einflüsse von Stickstoffdüngung und Bodenbearbeitung, die durch die Auswertung der Wurzellängenuntersuchungen aufgezeigt werden konnten, wurden durch die Ergebnisse der Trockenmassenbestimmung weitestgehend bestätigt.

Die Effekte der **N-Düngung** waren je nach Bodenbearbeitungsverfahren unterschiedlich ausgeprägt. Die mit $156,8 \text{ g/m}^2$ größten Wurzel trockenmassen waren zum Erntetermin in den Pflugvarianten bei hohem mineralischen N-Angebot (P240) ausgebildet. Annähernd auf dem gleichen Niveau bewegte sich die WTM in der N-Mangelvariante P0 (149 g/m^2). Demgegenüber waren im Boden der Varianten P120 und P400 nur 90 resp. $93,2 \text{ g/m}^2$ Wurzel-TM zu finden. Die mittlere TM der Pfahlwurzeln belief sich in den Varianten mit hoher N-Düngung auf etwa 2 g und im N-Mangel bzw. bei niedrigem N-Düngungsniveau auf ca. 1 g. Unter Frässohlensaat waren umgekehrt die Trockenmassen der Pfahlwurzeln in den Varianten H0 und H120 größer als in den Varianten höheren N-Niveaus. In den Horschvarianten hatten die Rapspflanzen im N-Mangel die mit $102,3 \text{ g/m}^2$ höchste Wurzel-TM entwickelt. Mit jeder Steigerung der Stickstoffzufuhr ging eine Reduktion der WTM einher. Die Pfahlwurzel-TM lag in der Variante H120 am höchsten und nahm mit jeder Steigerung des N-Niveaus ab.

Auch die reduzierte **Bodenbearbeitung** hatte auf die Wurzel-TM den gleichen Effekt, der bereits hinsichtlich der Wurzellängen festgestellt wurde: Die Anwendung der Frässohlensaat hatte eine Verringerung der Wurzel trockenmassen zur Folge. Analog zur WLD waren die Auswirkungen der Bodenbearbeitung nach Horsch auf die WMD in der Unterkrume besonders stark ausgeprägt. In allen Variantenpaaren gleichen N-Niveaus lag die WMD in der Bodenschicht 10-30 cm unter Pflug stets erheblich über den Horschvarianten.

Als ein Maß für die „Elastizität“ von Wurzelsystemen kann die spezifische Wurzellänge (Quotient WL/Wurzel-TM [cm/mg], FITTER 1991) herangezogen werden (BRÜCK 1998). Unter der Annahme, daß die Dichte der Wurzeln in etwa gleich bleibt, geben die Zahlen Aufschluß über die mittleren Wurzeldurchmesser in der betreffenden Bodenschicht. Je höher die Zahlenwerte, desto geringer ist der mittlere Wurzeldurchmesser, d.h. desto dünner sind im Mittel die Wurzeln in der untersuchten Bodenschicht.

Die spezifischen Wurzellängen unter Winterraps zum Erntetermin 1997 sind in Abbildung 3.8 wiedergegeben. In den meisten Varianten war die spezifische Wurzellänge in der Oberkrume geringer als in der Unterkrume und nahm im Unterboden wieder zu. In den tieferen Boden-

schichten waren demnach weniger Wurzeln mit einem geringeren mittleren Durchmesser vorzufinden.

Die Wurzeln mit dem größten Durchmesser finden sich mit Ausnahme der Variante P400 regelmäßig in der Bodenschicht 10-30 cm. Unter gleichzeitigem Einsatz von Pflug und organischer Düngung waren in dieser Bodenschicht die im Profil dünnsten Wurzeln ausgebildet.

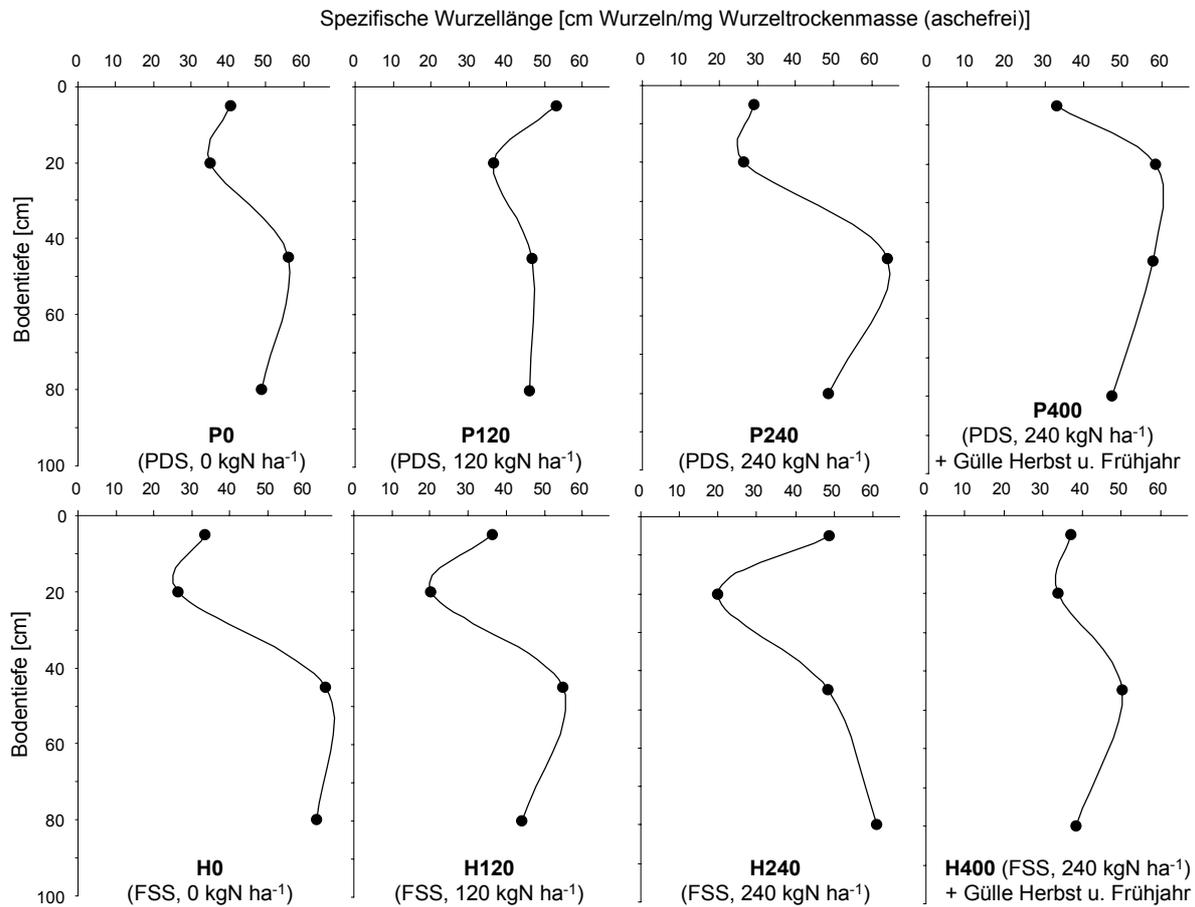


Abbildung 3.8: spezifische Wurzellänge von Winterrapswurzeln zur Ernte 1997 bei unterschiedlicher Bodenbearbeitung und N-Düngung in Abhängigkeit von der Bodentiefe (PDS = Pflugdrillsaat, FSS = Fräsohlsaatsystem Horsch)

Ein eindeutiger Einfluß der **N-Düngung** ist aus den Mustern der spezifischen WL nicht zu erkennen. In den Pflugvarianten war bei hohem N-Düngungsniveau eine leichte Tendenz zu größeren mittleren Wurzelradien im Oberboden auszumachen. Im Unterboden waren die Wurzeln bei besserer N-Versorgung der Pflanze im Schnitt eher dünner. Unter Horsch-Bodenbearbeitung waren mit höheren mineralischen Stickstoffgaben Trends zu dickeren Wurzeln in der Oberkrume und dünneren Wurzeln in der Unterkrume zu beobachten. Im Unterboden nahm der mittlere Wurzelradius mit steigender N-Versorgung tendenziell ab. Die beiden Varianten, die kombiniert mineralisch/organisch gedüngt worden waren, zeigten von den dargestellten Tendenzen abweichende Muster. Besonders auffällig waren die großen spezifischen Wurzellängen in der Bodenschicht 10-30 cm der Variante P400. Ob die Abweichungen durch die Gülleapplikation selbst bedingt waren oder überwiegend auf die Geländelage dieser Versuchspartien zurückzuführen waren, muß ungeklärt bleiben.

Eindeutiger fiel der Einfluß der **Bodenbearbeitung** aus. Die auffälligsten Unterschiede zwischen den Bodenbearbeitungsverfahren waren erwartungsgemäß in der Bodenschicht 10-30 cm zu finden. Die spezifische Wurzellänge unter Frässohlensaat war hier regelmäßig deutlich geringer als in der Pflugparzelle mit entsprechendem N-Niveau. In der unbearbeiteten Bodenschicht waren die Wurzeln dicker als in der gelockerten Unterkrume der Pflugparzellen. In der Oberkrume waren die spezifischen Wurzellängen in den Horschvarianten mit geringer oder ohne N-Düngung geringer als in den entsprechend gedüngten Pflugparzellen. Bei hoher N-Versorgung ist das Bild entgegengesetzt: hier lag die spezifische Wurzellänge höher als in den gepflügten Böden.

Gegenüber der Bestimmung der Wurzellängen erbrachte die zusätzliche Erhebung der Wurzel-trockenmassen keinen Erkenntnisgewinn. Die Einzelwerte streuten erheblich stärker als die der parallelen Längenmessungen. Auch die Berechnung der spezifischen Wurzellängen ließ keine eindeutigen Schlüsse zu. Da die Bestimmung der Wurzel-TM mit einem um ein Vielfaches höheren Arbeits- und Zeitaufwand sowie größeren potentiellen Fehlerquellen verbunden ist als die Bestimmung der Wurzellängen wurde bei allen folgenden Probenahmen auf die Ermittlung der Wurzel-trockenmassen verzichtet.

3.2. Versuchsjahr 1998

Im zweiten, dem mittleren Versuchsjahr 1998, wurde mit 6 bzw. 7 (P240 und H240) Beprobungsterminen die innerhalb der hier vorgestellten Untersuchung höchste zeitliche Auflösung verwirklicht. In Kooperation mit dem SFB-Teilprojekt A1 wurden parallel zu den Wurzeluntersuchungen auf exakt den Flächen, die auch zur Entnahme der Wurzel-/ Bodenproben genutzt wurden, jeweils $\frac{1}{2}$ m² geerntet und die Bestandesdichte sowie die Sproßtrockenmassen der Rapspflanzen bestimmt (BEIMS pers. Mittlg. 2000). Mit 890,5 mm Niederschlag und im Mittel 8,9°C war 1998 das feuchteste und kühlste der drei Versuchsjahre. Insbesondere in den Sommermonaten blieben die Lufttemperaturen deutlich hinter denen der Jahre 1997 und 1999 und auch hinter den langjährigen Mittelwerten zurück (vgl. Abbildung 3.1).

3.2.1. Wurzelentwicklung

Die Tiefenverteilung der Wurzeln war – wie im Vorjahr – zu allen Terminen durch eine nahezu exponentielle Abnahme der Wurzellängendichte mit der Bodentiefe gekennzeichnet.

Die erste Probenahme wurde bereits kurz nach der Keimung der Pflanzen im November 1997 durchgeführt. Die Gesamtwurzellängen waren zu Beginn der Vegetationsperiode noch sehr gering. Die Größenachskalierung der Abbildung 3.9 wurde dem Wertebereich entsprechend angepaßt. Bei einem Vergleich mit den Ergebnissen aus dem Vorjahr und zu späteren Terminen ist dies zu berücksichtigen. In den Unterbodenhorizonten war zu diesem Zeitpunkt noch kein nennenswertes Wurzelwachstum festzustellen.

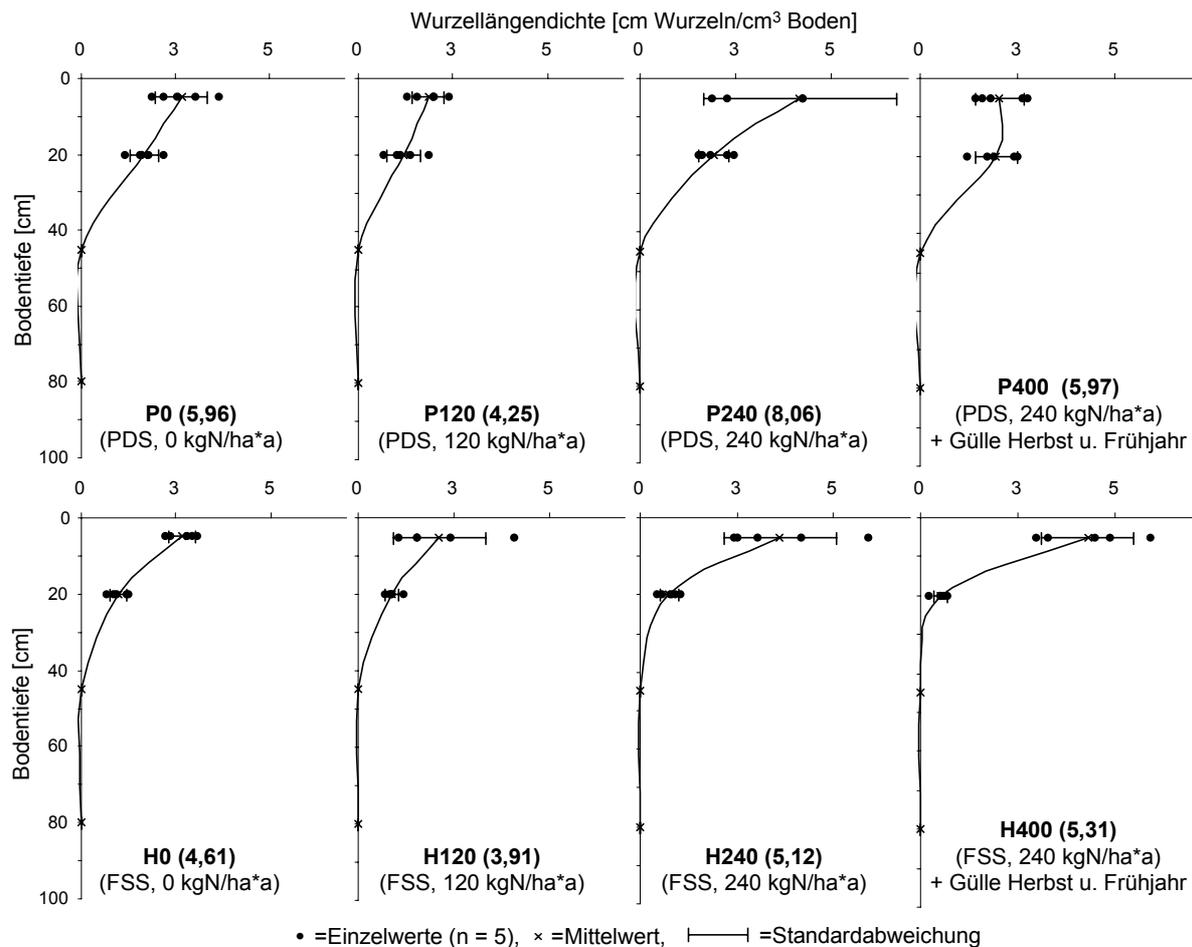


Abbildung 3.9: Wurzellängendichten von Winterraps zum Auflaufen 1997 bei unterschiedlicher Bodenbearbeitung und N-Düngung in Abhängigkeit von der Bodentiefe (PDS = Pflugschlagsaat, FSS = Frähschlagsaat System Horsch; Zahlen in Klammern: Gesamtwurzellänge ($WL_{(0-100)}$) [km/m^2])

In den Varianten mit hoher **N-Düngung** waren zu Beginn der vorwinterlichen Entwicklung, einige Wochen nach der Keimung der Rapspflanzen, die größten Wurzellängendichten ausgebildet. Die kleinsten Wurzelsysteme fanden sich zu diesem Zeitpunkt in beiden Bodenbearbeitungsblöcken in den Varianten mit niedrigem mineralischen N-Düngungsniveau (120 kgN/ha). Sowohl höhere als auch fehlende N-Düngung hatten größere WLD zur Folge. Eine interessante Differenzierung hinsichtlich der Durchwurzelung von Ober- und Unterkrume war zwischen den vier mittels Horsch-System bestellten Varianten zu beobachten: Je höher die N-Versorgung der Pflanzen dieses Bodenbearbeitungsblockes war, desto intensiver war die Durchwurzelung der Oberkrume. Dagegen nahm die WLD in der Unterkrume dieser Varianten mit zunehmender N-Düngung ab. Der N-Mangel erhöhte hier offensichtlich die Notwendigkeit, die schwerer durchwurzelbare Bodenschicht 10-30 cm zu erschließen. Bei guter N-Zufuhr war die Wurzelentwicklung zwar insgesamt stärker, blieb aber zunächst überwiegend auf die gut gelockerte und damit leicht durchwurzelbare Oberkrume konzentriert. Der Einfluß der **Bodenbearbeitung** auf die Durchwurzelung der Unterkrume war bereits in diesem frühen Stadium der Pflanzenentwicklung deutlich zu erkennen: Bei Anwendung des Horschverfahrens bleibt die Durchwurzelungsintensität in der Bodenschicht 10-30 cm weit

hinter den gepflügten Parzellen gleichen N-Düngungsniveaus zurück. Auch das Tiefenwachstum der Pfahlwurzel war vom Wachstumsbeginn an durch die Frässohle behindert.

Im Verlauf des Winters wurden Proben nur in den Varianten P240 und H240 im Februar 1998 entnommen. Allerdings war in diesen Varianten ein unerwartet kräftiger Wurzelzuwachs gegenüber dem Spätherbst 1997 festzustellen (vgl. Abbildung 3.9). In allen Bodentiefen hatte die Wurzellängendichte seit November 1997 erheblich zugenommen (Abbildung 3.10). Evtl. ist dies auf die überdurchschnittlich milden Temperaturen (s. Abbildung 3.1) in den ersten Wintermonaten zurückzuführen, die ein Wachstum der Pflanzen und ihrer Wurzelsysteme begünstigt haben könnten.

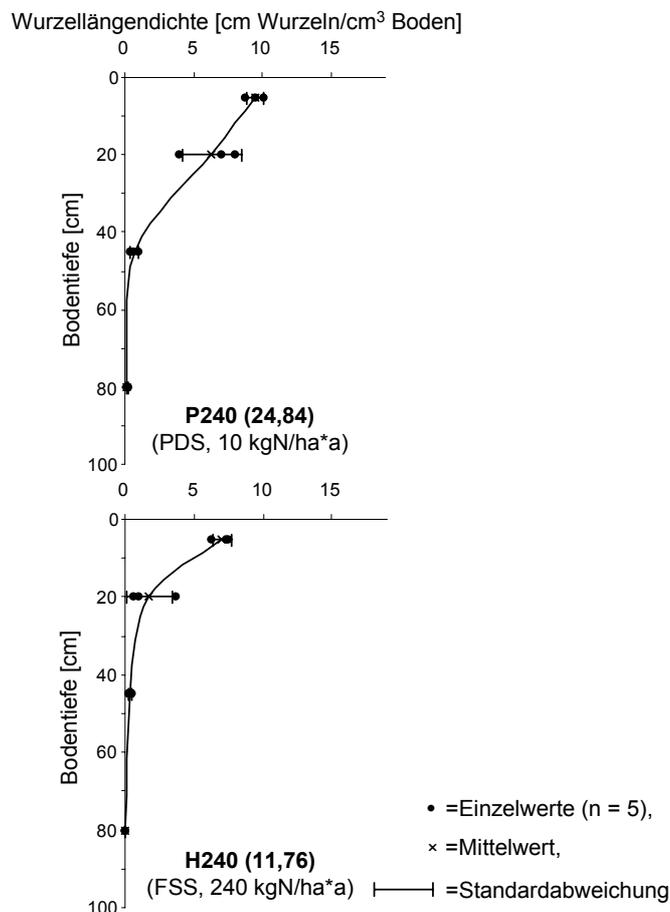


Abbildung 3.10: Wurzellängendichten von Winterraps im Februar 1998 bei unterschiedlicher Bodenbearbeitung und N-Düngung in Abhängigkeit von der Bodentiefe (PDS = Pflugdrillsaat, FSS = Frässohlensaat System Horsch; Zahlen in Klammern: Gesamtwurzellänge ($WL_{(0-100)}$) [km/m^2])

Der Effekt der tiefgründigeren Lockerung mit dem Pflug war erneut deutlich zu erkennen: Im Vergleich mit der gepflügten Variante blieb die Durchwurzelungsintensität der gehorschten Parzelle im gesamten Profil, vor allem wiederum in der Bodenschicht 10-30 cm, deutlich zurück. Insgesamt lag die $WL_{(0-100)}$ mit $24,84 \text{ cm}/\text{m}^2$ im gepflügten Boden um mehr als das doppelte höher als unter Frässohlensaat ($11,76 \text{ cm}/\text{m}^2$).

In den folgenden vier Wochen, bis zum März, war die WLD in den beiden Varianten P240 und H240 deutlich zurückgegangen (Abbildung 3.11). Besonders waren davon die Oberbodenhorizonte betroffen, während unterhalb 60 cm Bodentiefe sogar ein recht starker relativer Wurzelzuwachs zu verzeichnen war. Dies könnte u.a. mit dem Witterungsverlauf unmittelbar vor der Probenahme zusammenhängen. Dem Probenahmetermin war eine etwa 10 Tage andauernde nahezu niederschlagsfreie Zeit vorausgegangen. Im Vergleich zu der Probenahme vor Winter (Abbildung 3.9) war in allen Varianten und Bodentiefen ein erheblicher Wurzelzuwachs festzustellen. Während sich die Sproßtrockenmassen kaum verändert hatten, bzw. sogar zurückgegangen waren (vgl. Abbildung 3.22), war im Wurzelbereich auch in den Wintermonaten rege Wachstumsaktivität festzustellen.

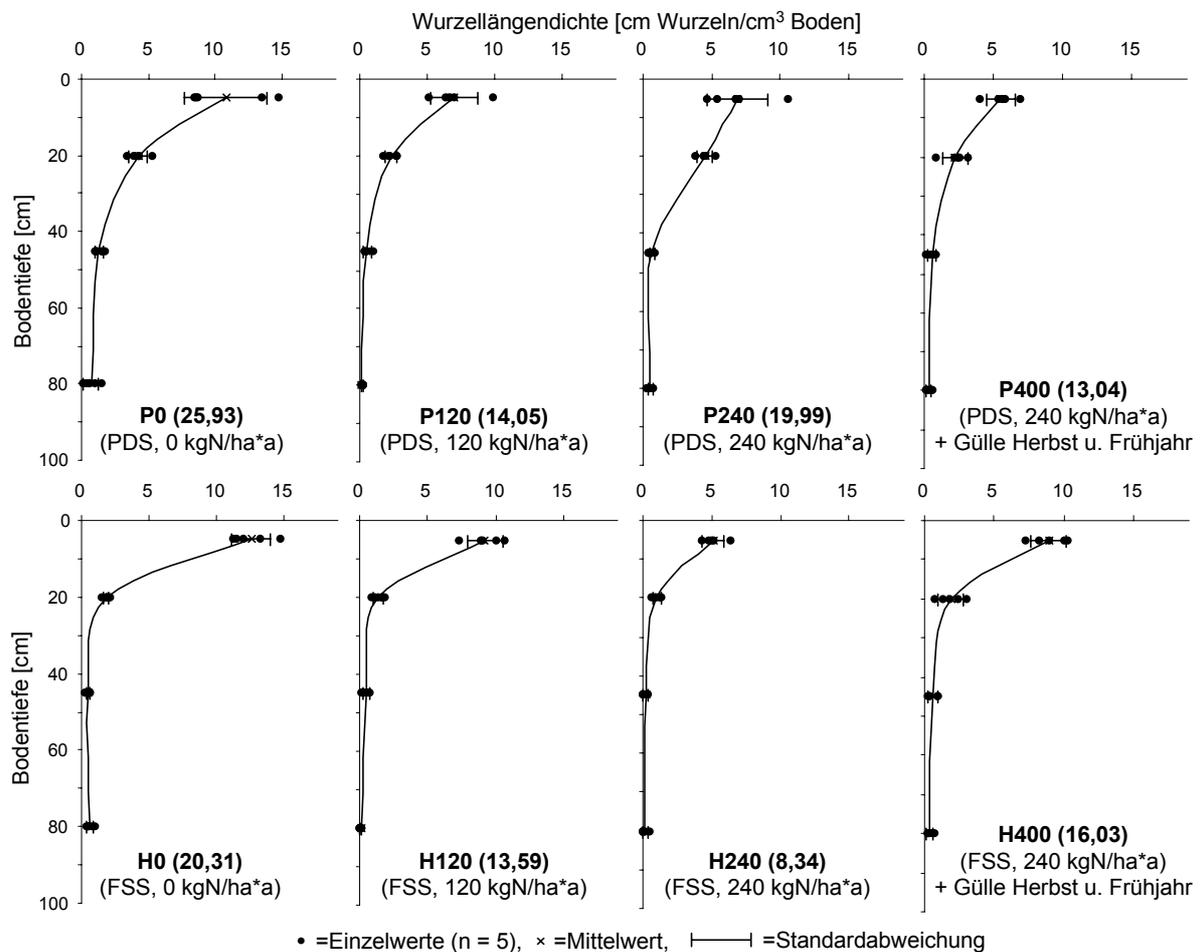


Abbildung 3.11: Wurzellängendichten von Winterraps im Rosettenstadium 1998 bei unterschiedlicher Bodenbearbeitung und N-Düngung in Abhängigkeit von der Bodentiefe (PDS = Pflugdrillsaat, FSS = Frässohlensaat System Horsch; Zahlen in Klammern: Gesamtwurzellänge ($WL_{(0-100)}$) [km/m^2])

Hinsichtlich des Einflusses der **N-Düngung** hatte sich das Bild der Wurzelverteilung bis zum Rosettenstadium (Abbildung 3.11) im Vergleich zum ersten Probenahmetermin vor Winter (vgl. Abbildung 3.9) stark verändert: Kurz nach dem Auflaufen waren die Wurzellängen der Pflanzen unter guter N-Versorgung noch am größten gewesen. Auffällig starke Zuwächse in den Oberböden der beiden ungedüngten Parzellen P0 und H0 hatten bis zum Rosettenstadium dazu geführt, daß in diesen Varianten nun die höchsten Wurzellängen vorlagen. Zugenommen

hatte die WLD auch in den Oberböden aller anderen Varianten, jedoch blieben die relativen Zuwachsraten um so weiter hinter den N-Mangelvarianten zurück, je höher das N-Düngungsniveau lag. In den Pflugvarianten war das Wurzelwachstum gleichmäßig auf die gesamte Krume ausgedehnt. Demgegenüber blieben unter Frässohlensaat der Zuwachs und damit auch die intensive Durchwurzelung auf die obersten 10 cm beschränkt. Mit jeder Steigerung der mineralischen N-Zufuhr ging in den Horschvarianten eine Verminderung der $WLD_{(0-100)}$ einher. Die Durchwurzelung der unteren Bodenschichten hatte sich gegenüber der vorwintertlichen Probenahme nur geringfügig verändert. Lediglich in der Variante P0 war ein nennenswerter Wurzelzuwachs unterhalb der Krume zu beobachten. Festzuhalten bleibt, daß die Durchwurzelung bereits zu Beginn der nachwintertlichen Vegetationsentwicklung der Rapspflanzen unter N-Mangel deutlich stärker ausgeprägt war als in den gedüngten Varianten. Dieser Befund höherer Wurzellängendichten bei ausbleibender Stickstoffdüngung bleibt fast ausnahmslos über die gesamte Vegetationsperiode bestehen.

Der Einfluß der **Bodenbearbeitung** war auch zum Rosettenstadium sehr gut zu erkennen. Während die durch die Fräse intensiv gelockerten obersten 10 cm der gehorschten Böden mit einer Ausnahme (H240) intensiver durchwurzelt waren als die Pflugvarianten gleicher N-Düngungsstufe, war unterhalb der Frässohle eine drastische Abnahme der WLD weit unter das Niveau der Pflugparzellen zu beobachten.

Bis zum Schossen (vgl. Abbildung 3.12) hatten die Gesamtwurzellängen mit einer Ausnahme in allen Varianten weiter zugenommen. Lediglich in der H120 war ein leichter Rückgang der $WLD_{(0-100)}$ zu verzeichnen. Die Zuwächse waren in erster Linie das Ergebnis starken Wurzelwachstums in der Krume. In den tieferen Bodenschichten der meisten Varianten hingegen stagnierte die WLD oder war sogar leicht zurückgegangen. In den Varianten P120 und H240 war die $WLD_{(30-100)}$ leicht angewachsen. Der Probenahme war eine kühle relativ trockene Phase von knapp 10 Tagen vorausgegangen (vgl. Abbildung 3.1). Nach der Beprobung waren Lufttemperaturen und Niederschlagsmengen angestiegen.

Je höher das Niveau der **N-Düngung** lag, desto stärker fielen unter Horsch zum Schossen die Netto-Wurzelzuwachsraten aus. Gegen den Trend wies die Variante H120 einen leichten Rückgang der DWI und damit die zu diesem Zeitpunkt schwächste Durchwurzelung aller Behandlungen auf. Innerhalb der gepflügten Varianten lagen die Zuwächse aller N-Varianten in einer einheitlichen Größenordnung. Bei kombiniert mineralisch/organischer Düngung war unter Pflug geringere, unter Frässohlensaat hingegen intensivere Durchwurzelung ausgebildet als bei rein mineralischer N-Düngung. Die absolut größten Wurzellängen waren erneut jeweils in den N-Mangelvarianten entwickelt.

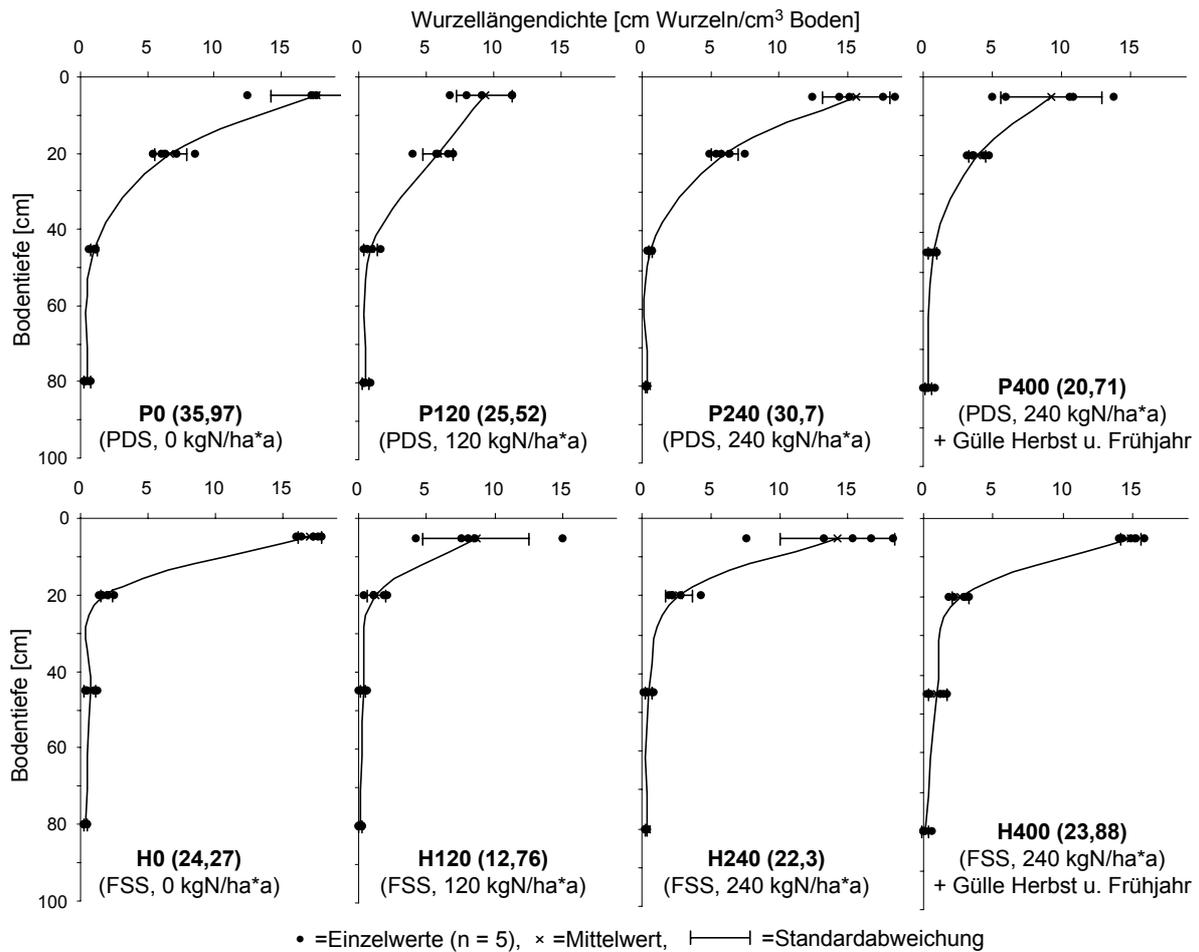


Abbildung 3.12: Wurzellängendichten von Winterraps zum Schossen 1998 bei unterschiedlicher Bodenbearbeitung und N-Düngung in Abhängigkeit von der Bodentiefe (PDS = Pflugdrillsaat, FSS = Fräsohleensaat System Horsch; Zahlen in Klammern: Gesamtwurzellänge ($WL_{(0-100)}$) [km/m^2])

Bodenbearbeitung mit dem Pflug führte zu Wurzelzuwächsen in beiden Schichten der Krume. Demgegenüber blieb die Netto-Wurzelneubildung in den Horschvarianten mit Ausnahme der H120 auf die obersten 10 cm beschränkt. Dementsprechend hatte die Diskrepanz zwischen Pflug- und Horschvarianten hinsichtlich der Durchwurzelung der Unterkrume weiter zugenommen. Abgesehen von den organisch gedüngten Varianten waren zum Schossen die gesamten Profile der gepflügten Parzellen durchgehend intensiver durchwurzelt.

Vor der Probenahme zum Blütetermin 1998 (Abbildung 3.13) waren fast zwei Wochen keine Niederschläge gefallen. Die Bodentemperatur in 10 cm Tiefe lag relativ gleichmäßig bei 14°C (vgl. Abbildung 3.1) Seit der Beprobung zum Schossen hatte v.a. die Durchwurzelung des Unterbodens in allen Varianten stark zugenommen. In keinem anderen Zeitintervall zwischen zwei Probenahmen waren derart starke Zuwachsraten im Unterboden zu beobachten wie zwischen Schossen und Blüte. In einigen Varianten hatte sich die $WL_{(30-100)}$ binnen vier Wochen mehr als verdreifacht. In der Krume war keine einheitliche Tendenz zu Wurzelzuwachs oder -abbau auszumachen. Hier überwogen je nach N-Düngung und/oder Bodenbearbeitung Wurzelneubildung oder -abbau.

Unter fehlender und geringer **N-Düngung** hatte die Krumendurchwurzelung im gehorschten Boden sehr stark zugenommen. Demgegenüber hatten die Pflanzen mit hoher N-Versorgung ihre Wurzelsysteme in der Krume kräftig reduziert. In den Pflugvarianten war mit Ausnahme der P120 durchgängig ein Rückgang der $WLD_{(0-30)}$ zu beobachten, der unter N-Mangel und 240 kgN/ha*a besonders stark ausfiel. Auffällig war dabei, daß die Zuwachsraten dort besonders hoch lagen, wo zum Schossen nur geringe Wurzellängen ausgebildet waren (z.B. P120 und H120). In den Varianten, die vier Wochen zuvor eine intensive Krumendurchwurzelung aufwiesen (z.B. P240 und H240) überwog hingegen Wurzelabbau. Nur die N-Mangelvariante P0 wich von dieser Regelmäßigkeit sehr stark ab: Hier war trotz des bereits zum Schossen sehr hohen Durchwurzelungsniveaus anhaltend starker Wurzelzuwachs zu verzeichnen.

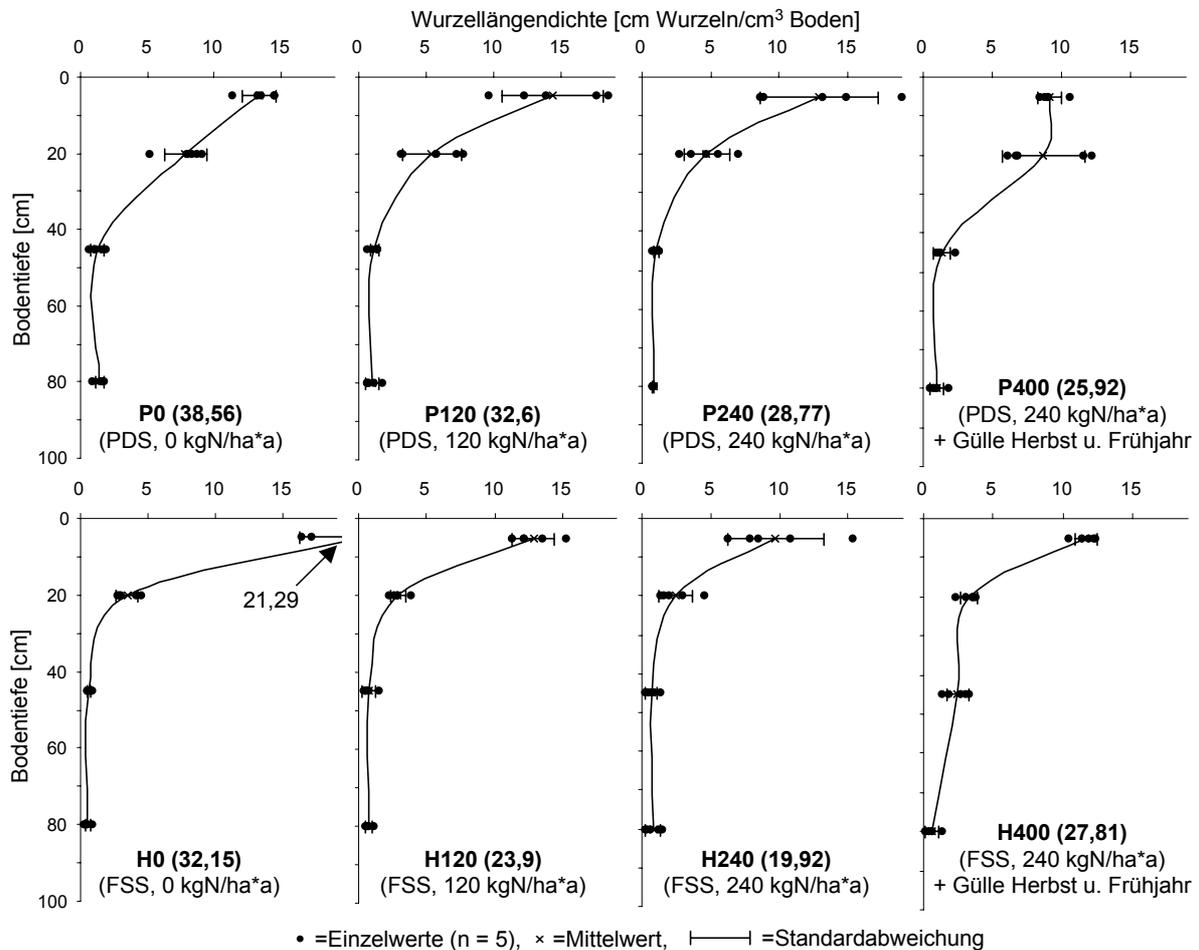


Abbildung 3.13: Wurzellängendichten von Winterraps zur Blüte 1998 bei unterschiedlicher Bodenbearbeitung und N-Düngung in Abhängigkeit von der Bodentiefe (PDS = Pflugdrillsaat, FSS = Frässlöhlsaatsystem Horsch; Zahlen in Klammern: Gesamtwurzellänge ($WL_{(0-100)}$) [km/m²])

Das Niveau der $WL_{(0-100)}$ lag in den Pflugvarianten zum Blütetermin um so höher, je geringer die N-Düngung war. Gleiches galt für die mineralisch gedüngten Böden unter Horsch. Lediglich die kombiniert mineralisch/organisch gedüngte Parzelle H400 wich von dieser Regelmäßigkeit ab, was evtl. nicht kausal mit der N-Düngung, sondern mit dem Bodenwasserhaushalt der H400-Parzellen zusammenhängen könnte. Wie in allen vorangegangenen Beobachtungen waren die mit Abstand größten Wurzelsysteme in den N-Mangelvarianten entwickelt.

Die Effekte der **Bodenbearbeitung** blieben unverändert in einer stark verringerten Unterkrumendurchwurzelung der Horschvarianten sichtbar. Auch über die gesamte Profiltiefe betrachtet waren die gepflügten Böden – mit Ausnahme der Variante H400, die vermutlich aufgrund ihrer schlechteren Wasserversorgung eine höhere DWI aufwies als die gepflügte Parallele – intensiver durchwurzelt.

Gegenüber dem Mai fiel im Juni 1998 merklich mehr Niederschlag, vor allem die zweite Juniwoche war regenreich. An den Tagen direkt vor der Probenahme während der Reife (Abbildung 3.14) blieb es jedoch trocken, die Bodentemperaturen waren nur leicht auf im Mittel etwa 15°C angestiegen.

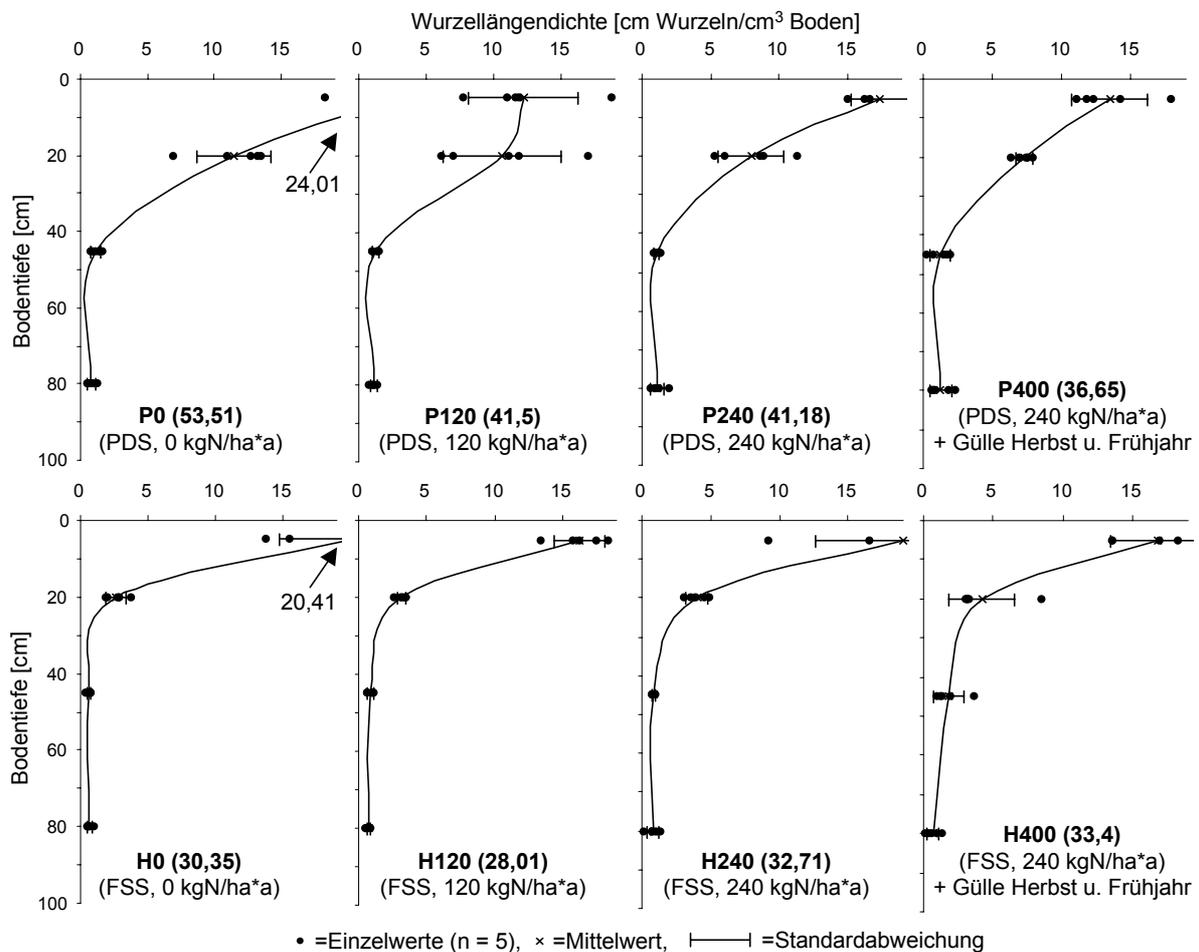


Abbildung 3.14: Wurzellängendichten von Winterraps während der Schotenentwicklung 1998 bei unterschiedlicher Bodenbearbeitung und N-Düngung in Abhängigkeit von der Bodentiefe (PDS = Pflugdrillsaat, FSS = Frässohlensaat System Horsch; Zahlen in Klammern: Gesamtwurzellänge ($WL_{(0-100)}$) [km/m^2])

Mit nur einer Ausnahme (H0) hatte die Durchwurzelung in der Krume seit der Blüte deutlich zugenommen. Bis auf die Variante H0, in der die größte $WL_{(0-100)}$ bereits zur Blüte vorlag, war nun in allen Varianten die maximale Durchwurzelung erreicht. In den Unterböden veränderte sich die DWI gegenüber dem Blütetermin nur in der Variante P0 nennenswert: Hier ging die $WL_{(30-100)}$ deutlich zurück.

Je höher die **N-Düngung** lag, desto größer waren die Zuwachsraten in den Horschvarianten. Unter N-Mangel war sogar ein Rückgang der DWI zu beobachten, der vermutlich als erstes Anzeichen einsetzender Wurzelseneszenz zu interpretieren sein dürfte. Dadurch waren zum ersten Mal die größten Wurzellängen in den hoch gedüngten Parzellen H400 und H240 festzustellen. In den Pflugvarianten war hinsichtlich der Dynamik zwischen Blüte und Schotenentwicklung kein N-Effekt zu erkennen. Hier nahm die $WL_{(0-100)}$ in allen Varianten gleichmäßig zu, so daß die bei weitem höchste WLD nach wie vor bei N-limitierten Bedingungen zu finden war und mit jeder höheren N-Düngungsstufe eine Verringerung der WL beobachtet werden konnte.

Die Effekte der **Bodenbearbeitung** waren noch etwas deutlicher ausgeprägt als an den vorangegangenen Terminen. Sowohl über das gesamte Profil betrachtet, als auch in den einzelnen Bodenschichten unterhalb der Frässohle waren in den Horschvarianten durchgehend wesentlich geringere Wurzellängendichten festzustellen als in gepflügtem Boden entsprechender N-Düngungsstufe. Gegenüber den Pflugvarianten war die DWI unter Frässohlensaat in der Oberkrume leicht erhöht, in der Unterkrume hingegen bis zum Vierfachen verringert. Mit zunehmender Stickstoffdüngung nahmen die Unterschiede zwischen den Bodenbearbeitungsverfahren ab.

Die letzten Proben wurden direkt nach der Ernte der Rapspflanzen Ende Juli entnommen. Die Witterung vor der Probenahme war durch leichte Niederschläge und für die Jahreszeit zu kühle Temperaturen gekennzeichnet (vgl. Abbildung 3.1). In allen Varianten hatte die WLD in der Krume stark abgenommen (Abbildung 3.15), was mit der beginnenden Seneszenz der Pflanzen zusammenhängen dürfte.

Bei fehlender **N-Düngung** waren in den Unterbodenhorizonten steigende WLD festzustellen. In allen gedüngten Varianten überwog hingegen auch unterhalb der Krume Wurzelabbau. Unter Pflug war mit einer Ausnahme in allen Varianten ein starker Rückgang der $WL_{(0-100)}$ festzustellen. Kaum verändert hatte sich die DWI in der Variante P120, die am Ende der Vegetationsperiode in einer ähnlichen Größenordnung lag wie unter N-Mangel (P0). Unter hohem N-Niveau lag die DWI wiederum deutlich geringer.

Unter Frässohlensaat war die Abnahme der DWI im N-Mangel am schwächsten ausgeprägt. Der Wurzelabbau in der Krume wurde hier durch starken Zuwachs im Unterboden fast kompensiert. Mit steigender mineralischer N-Düngung war ein zunehmend stärkerer Rückgang der DWI und geringere Gesamtwurzellängen verbunden. Aus der Reihe fiel zum wiederholten Male die zusätzlich organisch gedüngte Variante H400, die zur Ernte die höchste $WL_{(0-100)}$ unter Horsch aufwies. Hier fällt vor allen Dingen die – insbesondere für mit Frässohlensaat bestellten Boden – ungewöhnlich starke Erschließung der Unterkrume und des Unterbodens auf, die eher im Zusammenhang mit dem abweichenden Bodenwasserhaushalt der H400-Parzellen als mit der N-Düngung zu sehen sein dürfte. Ein Zusammenhang zwischen Güllendüngung und erhöhter Unterbodendurchwurzelung scheint hingegen wenig plausibel.

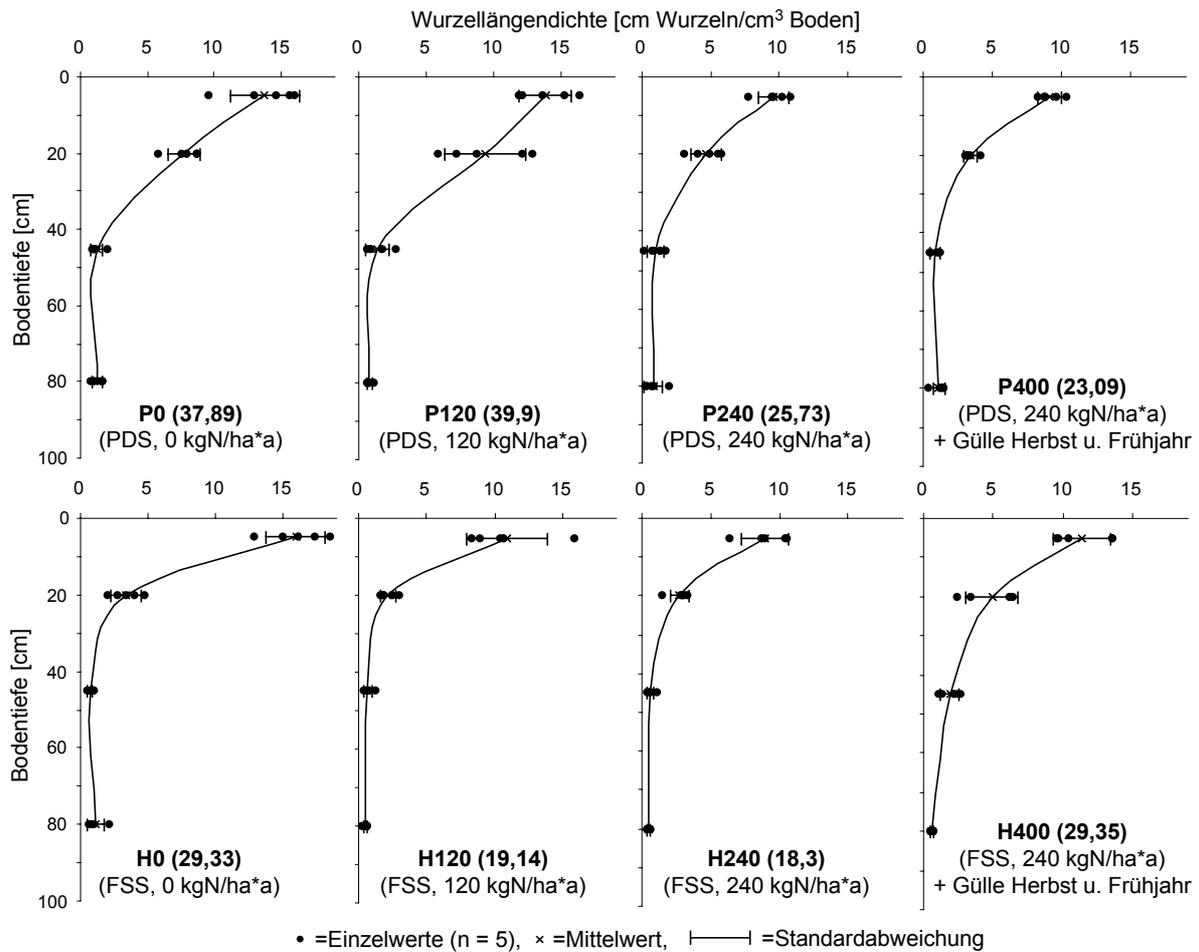


Abbildung 3.15: Wurzellängendichten von Winterraps zur Ernte 1998 bei unterschiedlicher Bodenbearbeitung und N-Düngung in Abhängigkeit von der Bodentiefe (PDS = Pflugdrillsaat, FSS = Frässlensaat System Horsch; Zahlen in Klammern: Gesamtwurzellänge ($WL_{(0-100)}$) [km/m^2])

Die Effekte der **Bodenbearbeitung** zeigten sich, wie an allen vorangegangenen Terminen, in einer starken Einschränkung der Unterkrumenbewurzelung in den Varianten, die mit dem Horschsystem bestellt worden waren. Die einzige Ausnahme stellte auch hier die Variante H400 mit erstaunlich hoher WLD in Unterkrume und tieferen Bodenschichten dar.

Bereits bei der Betrachtung der Einzeltermine war erkennbar geworden, daß nicht nur die absolute Höhe der DWI, sondern auch die zeitliche Dynamik der Wurzelentwicklung von den Faktoren N-Düngung und Bodenbearbeitung beeinflusst wurde. Die folgenden Abbildungen geben die Entwicklung der Wurzelsysteme im Verlauf der Vegetationsperiode 1998 wieder.

Höhere **N-Düngung** hatte unter Pflugbodenbearbeitung fast durchgehend eine geringere WLD zur Folge. Zwar verlief die Entwicklung der Wurzelsysteme bei hohem N-Niveau in den ersten Wochen nach der Keimung etwas schneller, bis zum Schossen hatte die WLD in der ungedüngten Variante jedoch sehr stark zugenommen (Abbildung 3.16). Bis kurz vor der Ernte fand sich in der N-Mangelvariante das mit Abstand größte Wurzelsystem aller in der vorliegenden Arbeit untersuchten Behandlungskombinationen.

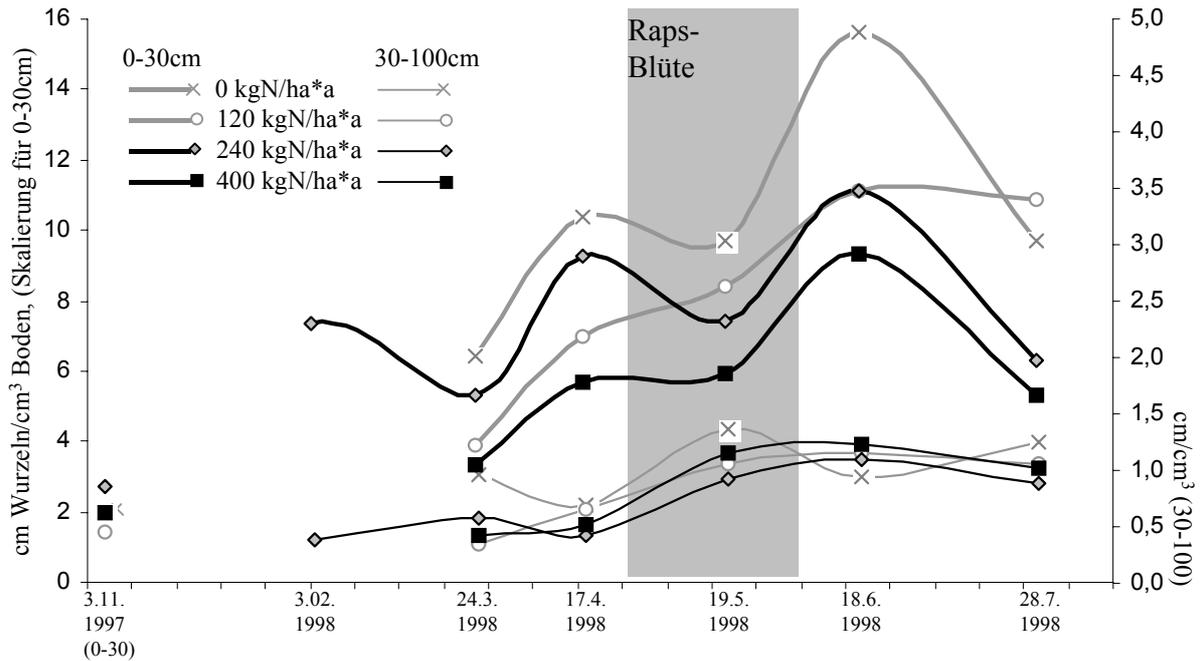


Abbildung 3.16: zeitliche Dynamik der WLD in der Vegetationsperiode 1998 (Pflugvariante) in Abhängigkeit von der N-Düngung differenziert nach Bodentiefen

Aus Abbildung 3.16 geht weiterhin hervor, daß die geringsten Wurzellängen nach Winter stets unter kombiniert mineralisch/organischer Düngung vorlagen. Die beiden rein mineralisch gedüngten Varianten nahmen dementsprechend eine Mittelstellung ein. Anfangs waren unter hoher (P240) N-Zufuhr, nach dem Schossen unter niedrigem N-Niveau (P120) höhere Gesamtwurzellängen ausgebildet.

In der Krume, der stets am intensivsten durchwurzelten Bodenschicht, war die Differenzierung in Abhängigkeit von der N-Düngung deutlich ausgeprägt. In den Unterböden waren die N-Effekte weniger eindeutig. Zwar war die WLD unter N-Mangel zumeist am höchsten, eine klare Abhängigkeit der Unterbodendurchwurzelung von der N-Düngung war jedoch nicht auszumachen. Organische Bodensubstanz, biologische Aktivität und das Angebot an pflanzenverfügbarem N sind im Oberboden konzentriert. Die Erschließung tieferer Bodenschichten ist folglich vorwiegend als Maßnahme zur Wasserversorgung der Pflanzen und höchstens untergeordnet zur Verbesserung der N-Akquisition geeignet. N-Effekte sollten sich dementsprechend bestenfalls mittelbar auf die Durchwurzelung des Unterbodens auswirken, da die Pflanzen unter guter N-Versorgung verstärktes Sproßwachstum und dadurch – absolut gesehen – höheren Wasserverbrauch aufweisen. So ist die fast in allen Varianten mit fortschreitender Dauer der Vegetationsperiode nahezu kontinuierliche Zunahme der $WL_{(30-100)}$ in erster Linie im Zusammenhang mit dem steigenden Wasserbedarf der Pflanzen zu sehen. Der Sommer 1998 war relativ kühl, die Niederschlagsverteilung ausgeglichen, so daß mit dem Auftreten von Wassermangel weniger zu rechnen war als z.B. im überdurchschnittlich warmen Juli 1997, in dem die Niederschläge überwiegend in Form von Starkregen gefallen waren (vgl. Abbildung 3.1).

Auffällig war in allen Varianten eine gewisse Gegenläufigkeit der Wurzelentwicklung in Krume und Unterboden. Stieg die DWI in der Krume zwischen zwei Terminen stark an, so war im Unterboden fast regelmäßig ein Wurzelabbau mindestens jedoch eine Stagnation der WLD zu verzeichnen. Umgekehrt nahm die Durchwurzelung tieferer Bodenschichten in den Phasen stark zu, in denen in der Krume eine Reduktion des Wurzelsystems zu beobachten war. Besonders ausgeprägt war diese Dynamik in den Varianten P0 und P240, in denen starke Schwankungen des DWI-Niveaus im Verlauf der Vegetationsperiode zu registrieren waren. Demgegenüber war die Dynamik in der Variante P120 sowohl in der Krume als auch im Unterboden relativ ausgeglichen.

In Übereinstimmung mit den Pflugvarianten war unter Frässohlensaat zu Beginn der vegetativen Entwicklung eine größere WLD bei hoher N-Düngung festzustellen (Abbildung 3.17). Bereits zum Schossen und auch im weiteren Verlauf der Vegetationsperiode war jedoch auch unter Horsch fast durchgängig die Durchwurzelung der Krume in der N-Mangelvariante H0 am intensivsten. Die maximale DWI war im N-Mangel bereits zur Blüte entwickelt. In den gedüngten Varianten lag der Höhepunkt der Krumendurchwurzelung – wie unter Pflug – erst während der Schotenentwicklung vor und blieb unter dem Niveau, das zur Blüte in der Variante H0 ermittelt wurde. Bis zur Ernte ging die DWI überall zurück. Die Differenzierung zwischen den N-Stufen unter Frässohlensaat fiel weit weniger deutlich aus als im Block der gepflügten Böden. Die DWI lag im Mittel in der Variante H120 am niedrigsten und in den hoch gedüngten Behandlungen H240 und H400 in einem Zwischenbereich.

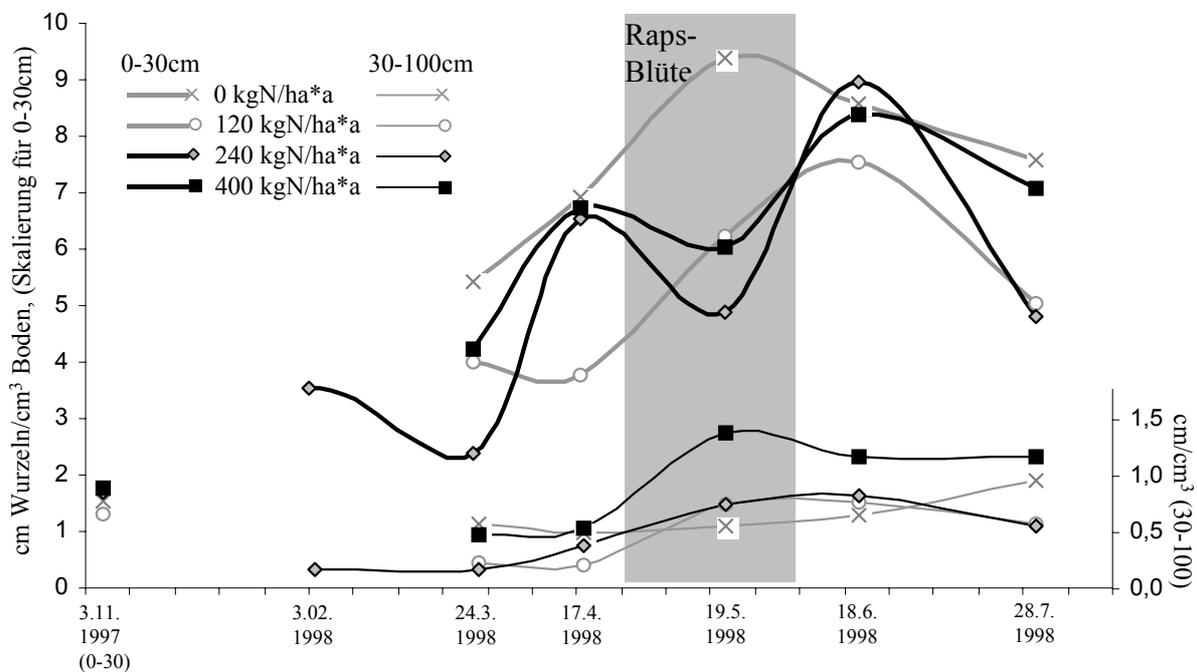


Abbildung 3.17: zeitliche Dynamik der WLD in der Vegetationsperiode 1998 (Horschvariante) in Abhängigkeit von der N-Düngung differenziert nach Bodentiefen

Darüber hinaus wird aus Abbildung 3.17 sehr gut ersichtlich, daß sich die Dynamik der Wurzelentwicklung in der Krume mit steigender N-Düngung veränderte: Unter fehlender bzw.

geringer N-Düngung stieg die DWI vom Schossen langsam bis zu einem Maximalniveau während bzw. kurz nach der Blüte an und nahm anschließend bis zum Erntetermin ab. Demgegenüber verlief die Wurzelentwicklung bei hoher N-Düngung mindestens zweigipfelig. Bis zum Schossen war ein steiler Anstieg der $WL_{(0-30)}$ zu beobachten, auf den eine ausgeprägte Abnahme während und ein erneuter starker Zuwachs nach der Blüte folgte. Am Ende der Vegetationsperiode setzte mit Beginn der Seneszenz Wurzelabbau ein.

Ein eindeutiger Einfluß der N-Düngung auf die Durchwurzelung des Unterbodens war auch unter Frässohlensaat nicht zu erkennen. Zwar lag die $WLD_{(30-100)}$ in der höchsten N-Stufe (H400) fast durchgängig am höchsten, eine kausale Beeinflussung durch die N-Düngung muß jedoch stark bezweifelt werden. Da die Parzellen mit kombiniert mineralisch/organischer Düngung im Horsch-Block am Oberhang und damit unter trockeneren Bedingungen angelegt waren, dürfte deren erhöhte Unterboden-WLD eher im Zusammenhang mit der Wasserversorgung der Pflanzen zu sehen sein.

Insgesamt bleibt festzuhalten, daß N-Mangel unabhängig vom Bodenbearbeitungsverfahren über die gesamte Vegetationsperiode gesehen eine deutlich verstärkte DWI zur Folge hatte. Klar ersichtlich waren die N-Effekte in der Krume, weniger stark ausgeprägt im Unterboden. In der Tendenz ist eine alternierende Entwicklung der Wurzelentwicklung in den Oberbodenhorizonten festzustellen. Vor dem Schossen nahm die WLD zu, bis zur Blüte ab, nach der Blüte wieder zu und zum Ende der Vegetationsperiode wieder ab. Unter Pflug war diese Dynamik mit Ausnahme der Variante P120, in der vom Schossen zur Blüte ein leichter Anstieg der WLD ermittelt wurde, konsistent. In den Horschvarianten wichen diejenigen mit schwacher bzw. ohne N-Düngung von diesem Muster ab. Evtl. ist die vegetative Entwicklung der Pflanzen unter N-limitierten Bedingungen zeitlich versetzt. In den gepflügten Böden war eine Gegenläufigkeit von Wurzelwachstum und -abbau in Ober- und Unterboden zu erkennen: Nahm die DWI in der Krume zu, war zumeist ein Rückgang im Unterboden zu verzeichnen. Umgekehrt überwog in tieferen Bodenschichten Wurzelwachstum wenn in der Krume Wurzelbiomasse abgebaut wurde. Auch unter Frässohlensaat war dies als Tendenz zu erkennen.

Unterschiedliche **Bodenbearbeitung** hatte ebenfalls – z.T. erhebliche – Variationen der Wurzelentwicklung zur Folge. Stark ausgeprägt waren die Unterschiede in der N-Mangelvariante (Abbildung 3.18). Sowohl die absolute Höhe der DWI als auch die Dynamik der Wurzelentwicklung zeigten sich von der Bodenbearbeitung beeinflusst.

In der Oberkrume der Pflugvariante alterniert die Wurzelentwicklung mit zwei „Gipfeln“ jeweils vor und nach der Rapsblüte. Unter Frässohlensaat hingegen nahm die DWI bis zur Blüte gleichmäßig zu und danach bis zur Ernte ab. Die Größenordnung der $WLD_{(0-10)}$ lag im Mittel in beiden Bodenbearbeitungssystemen auf ähnlichem Niveau. In der Bodenschicht 10-30 cm, die bei einer Bestellung mit dem System Horsch im Gegensatz zu gepflügtem Boden nicht gelockert wird, nahm die WLD unter beiden Bodenbearbeitungen bis zur Blüte nur leicht zu. Danach war unter Pflug ein kräftigerer Anstieg und im gehorschten Boden ein leichter Rückgang der DWI zu verzeichnen. Zum Ende der Vegetationsperiode ging die $WLD_{(10-30)}$ in der Pflugvariante zurück, während sie unter Horsch stagnierte. Im Unterboden war die Wurzelent-

wicklung weniger dynamisch. Lediglich in der Bodenschicht 60-100 cm war vom Schossen an ein leichter Anstieg festzustellen, der unter Frässohlensaat bis zum Ende der Vegetationsperiode andauerte und im gepflügten Boden von einer Phase abnehmender $WLD_{(60-100)}$ nach der Blüte unterbrochen war. Alles in allem war die Durchwurzelungsentwicklung in gepflügtem Boden von erheblichen Schwankungen geprägt, während sich die Dynamik unter reduzierter Bodenbearbeitung wesentlich ausgeglichener gestaltete.

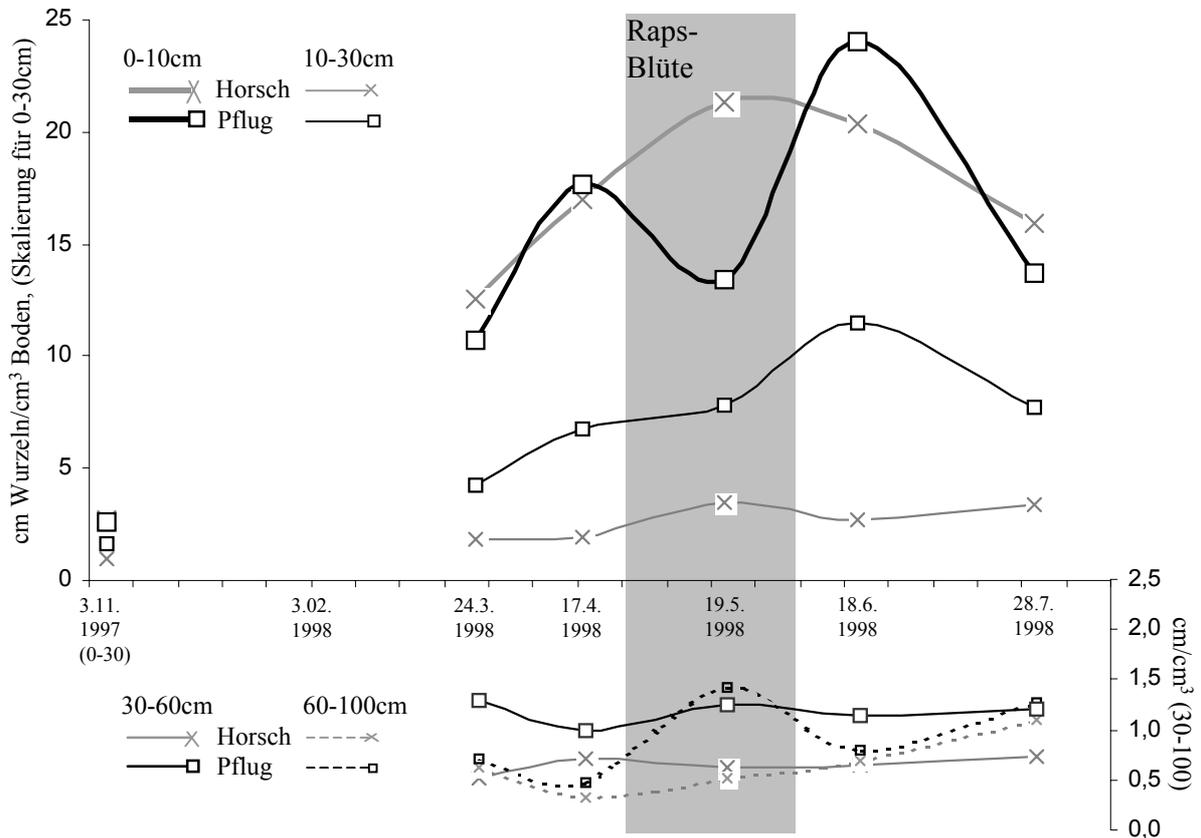


Abbildung 3.18: zeitliche Dynamik der WLD in der Vegetationsperiode 1998 (N-Niveau: 0 kg/ha*a) in Abhängigkeit von der Bodenbearbeitung differenziert nach Bodentiefen

Im Verlauf der gesamten Vegetationsperiode lag die Gesamtwurzellänge unter Pflug stets erheblich über der Horschvariante. Wie schon bei der Analyse der Einzeltermine deutlich wurde, wirkte sich die reduzierte Bodenbearbeitung vor allem in der Unterkrume aus. Unterhalb der Frässohle war die Durchwurzelung der Krume drastisch eingeschränkt. Bereits zu Beginn der vegetativen Entwicklung war dieser Befund deutlich ausgeprägt. Mit fortschreitender Dauer der Pflanzenentwicklung wurde die Diskrepanz zwischen den Bodenbearbeitungsverfahren immer größer und belief sich während der Schotenentwicklung auf über 400%!

Anders als die N-Effekte wirkte sich der Einfluß der Bodenbearbeitung bis in die Bodenschichten unterhalb der Ackerkrume aus. In beiden Unterbodenhorizonten wies die WLD unter Frässohlensaat während des gesamten Beobachtungszeitraumes geringere Werte auf.

Bei einem N-Niveau 120 kgN/ha*a (Abbildung 3.19) verlief die Wurzelentwicklung in Ober- und Unterkrume der Pflugvariante – anders als in allen anderen N-Düngungsstufen – gegenläufig. Stieg die WLD₍₀₋₁₀₎ bis zur Blüte an, so ging sie in der Unterkrume zurück. Danach nahm die DWI in 10-30 cm zu und in 0-10 cm ab. Zur Ernte war die WLD₍₀₋₁₀₎ leicht gestiegen, die WLD₍₁₀₋₃₀₎ gesunken. Diese gegenläufige Entwicklung war in den anderen N-Varianten zwischen Krume und Unterboden zu beobachten, nicht aber innerhalb der Krume. In der gehorschten Krume war die Entwicklung ausgeglichener. Das Maximum der WLD war in beiden Krumenschichten erst nach der Blüte erreicht, danach ging die DWI bis zur Ernte zurück. Die Unterboden-DWI nahm in beiden Varianten fast kontinuierlich bis zur Reife zu und danach zur Ernte hin ab.

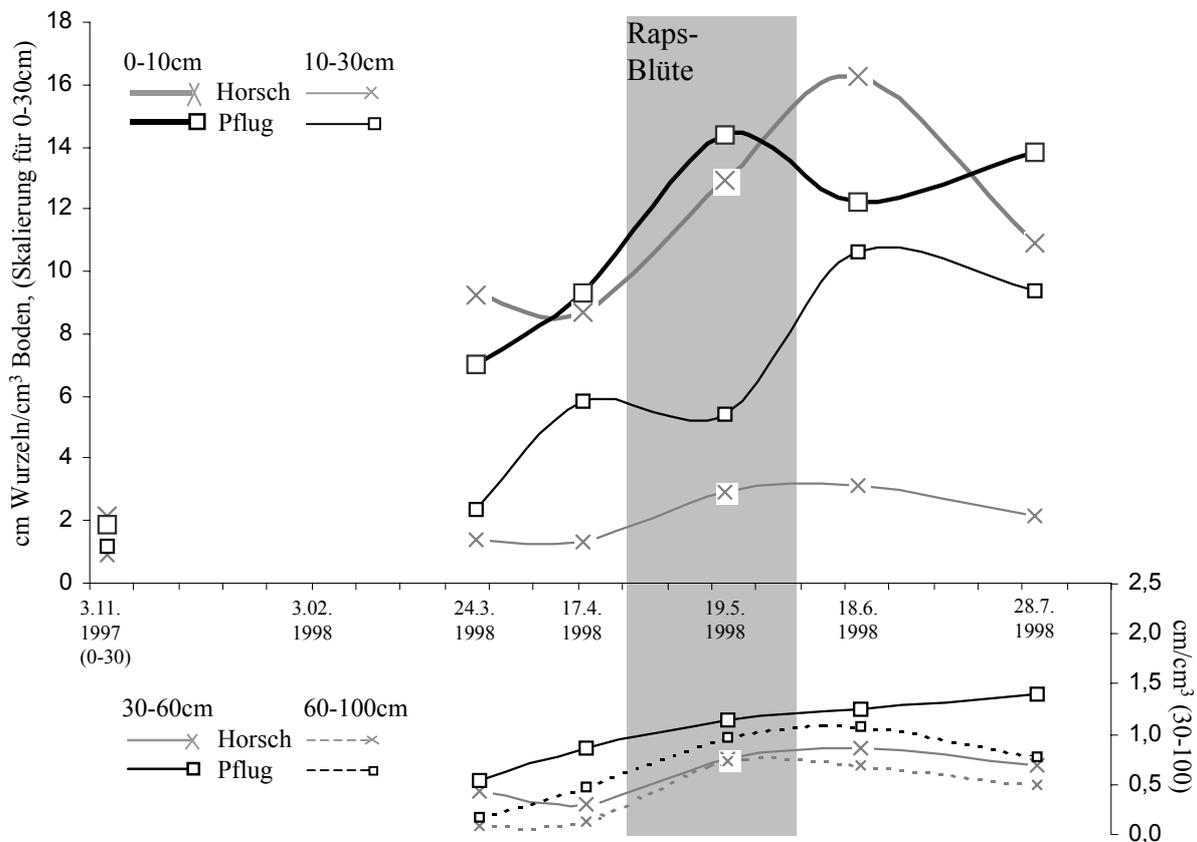


Abbildung 3.19: zeitliche Dynamik der WLD in der Vegetationsperiode 1998 (N-Niveau: 120 kg/ha*a) in Abhängigkeit von der Bodenbearbeitung differenziert nach Bodentiefen

Über die gesamte Vegetationsperiode gesehen blieb das Niveau der WLD₍₀₋₁₀₎ von der Bodenbearbeitung nahezu unbeeinflusst. In der Unterkrume hingegen zeigte sich erneut die gravierende Einschränkung der DWI, die mit der Anwendung der reduzierten Bodenbearbeitung einher ging und mit fortschreitender Pflanzenentwicklung zunehmend stärker ausgeprägt war. Sowohl das Eindringen in die Unterkrume als auch die Erschließung dieser Schicht war durch die Frässhohle offensichtlich erschwert. Dies wirkte sich auf alle Bodenschichten unterhalb der Bearbeitungsgrenze aus: In beiden Unterbodenschichten lag die DWI im gepflügten Boden konstant deutlich höher als unter Horsch.

Bei einem N-Düngungsniveau von 240 kg/ha*a (Abbildung 3.20) zeigt sich die Wurzelentwicklung in allen Krumen-Bodenschichten erstaunlich gleichförmig als ansteigend alternierende Kurve mit Höhepunkten zum Rosettenstadium im Februar, zum Schossen und während der Reife, sowie „Tälern“ zwischen Rosettenstadium und Schossen und zur Vollblüte. Zum Erntetermin hin war in allen Bodenschichten ein Abbau des Wurzelsystems zu beobachten. Die Durchwurzelung der Unterbodenhorizonte verlief tendenziell gegenläufig zur Dynamik in der Krume.

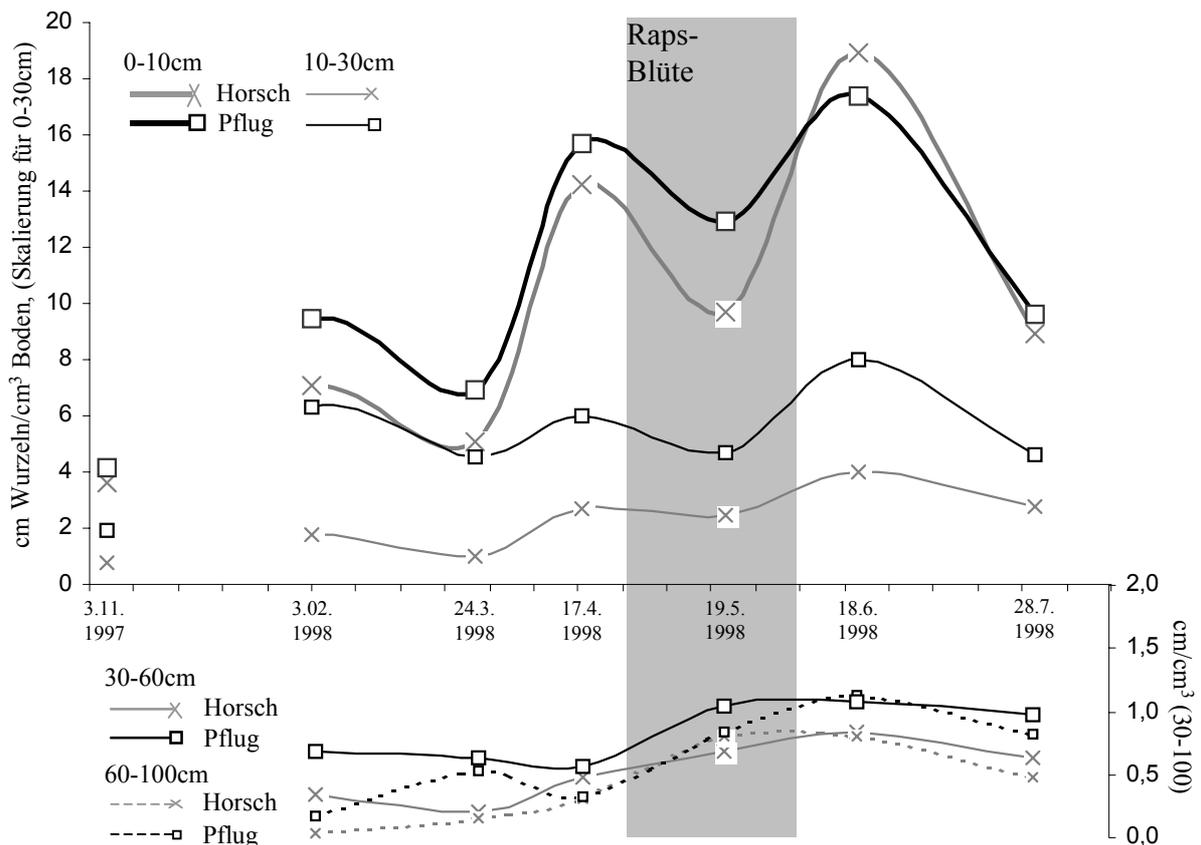


Abbildung 3.20: zeitliche Dynamik der WLD in der Vegetationsperiode 1998 (N-Niveau: 240 kg/ha*a) in Abhängigkeit von der Bodenbearbeitung differenziert nach Bodentiefen

Reduzierte Bodenbearbeitung führte in allen Bodenschichten fast durchgehend zu geringerer DWI. Insbesondere in der Unterkrume war ein durchschnittlich um das zwei- bis dreifache verringerter Wurzelbesatz zu registrieren.

Bei einer Interpretation der Ergebnisse der kombiniert mineralisch/organisch gedüngten Variante (Abbildung 3.21) ist zu berücksichtigen, daß die gepflügten Parzellen im Unter- und die Frässohlensaat am Oberhangbereich angelegt waren und die Varianten dadurch Unterschiede hinsichtlich Bodentyp und Bodenwasserhaushalt aufwiesen. Das Auftreten von Wassermangel war in der H400 wahrscheinlicher als in der Pflugvariante.

Ähnlich der N240 (vgl. Abbildung 3.20) verlief die Wurzelentwicklung in der Krume dieser Variante. Hier wies lediglich die DWI-Entwicklung in der Unterkrume der Horschvariante

einen abweichenden Verlauf mit einem stetigen Ansteigen der DWI über die gesamte Vegetationsperiode auf. In den Bodenschichten unterhalb der Krume wich die Dynamik erheblich von den übrigen N-Varianten ab, was auf die o.g. Wasserhaushalts-Unterschiede zurückzuführen sein dürfte. Besonders auffällig war der ungewöhnlich große Abstand zwischen der WLD in 30-60 cm und 60-100 cm Tiefe.

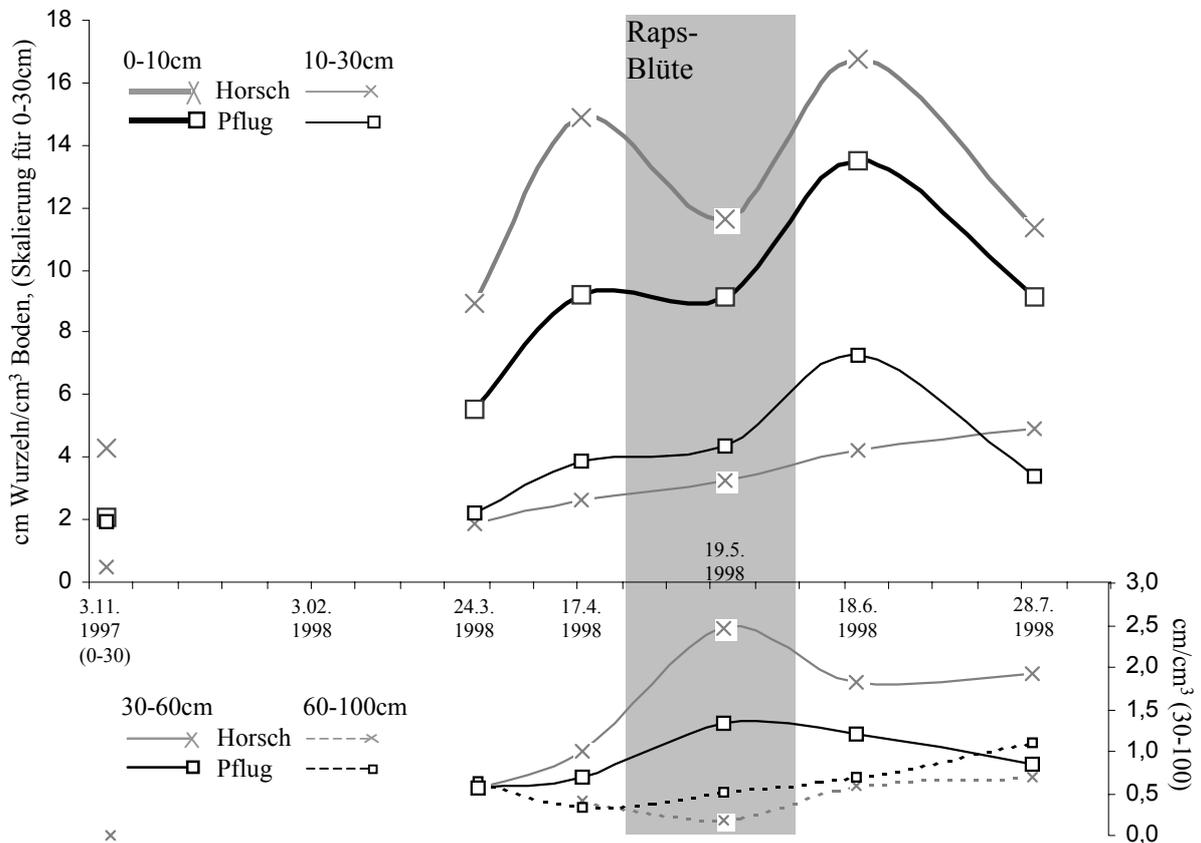


Abbildung 3.21: zeitliche Dynamik der WLD in der Vegetationsperiode 1998 (N-Niveau: 400 kg/ha*a) in Abhängigkeit von der Bodenbearbeitung differenziert nach Bodentiefen

In der Oberkrume lag die WLD unter Horsch während der gesamten Vegetationsperiode deutlich über der Pflugvariante. In der Unterkrume wirkte sich der einschränkende Effekt der Frässhle wiederum in einer geringeren DWI aus, allerdings war die Diskrepanz geringer als in den niedrigeren N-Düngungsstufen. Die $WLD_{(30-60)}$ lag unter Horsch höher, die $WLD_{(60-100)}$ niedriger als im gepflügten Boden. Hier waren die Einflüsse von Bodentyp und Wasserhaushalt besonders klar zu erkennen.

3.2.2. Sproßentwicklung

Parallel zur Bestimmung der WLD wurden in der Vegetationsperiode 1998 im Rahmen des SFB-Teilprojektes A1 (BEIMS 2000, pers. Mittlg.) auf exakt denselben Flächen die Trockenmassen der oberirdischen Pflanzenteile ermittelt. Die Sproßtrockenmassen (STM [g/m^2]) sind in Abbildung 3.22 dargestellt. Aufgrund der starken Veränderung der Größenordnung sind im

linken Teil der Grafik die ersten vier Termine im Herbst und Winter und auf der rechten Seite die Sproßentwicklung nach dem Frühlingsanfang dargestellt.

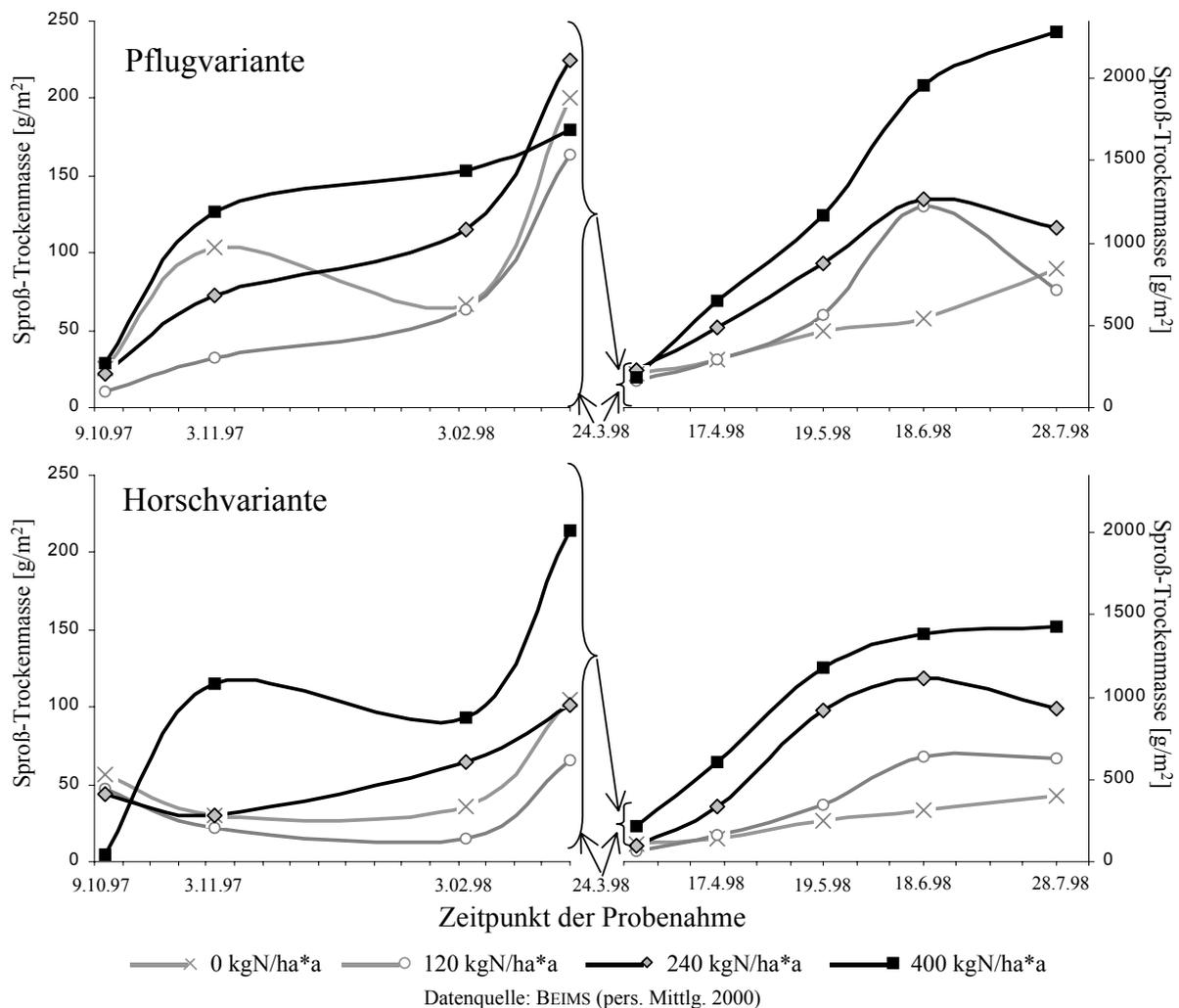


Abbildung 3.22: Entwicklung der Sproßtrockenmassen von Winterraps im Verlauf der Vegetationsperiode 1998 in Abhängigkeit von der N-Düngung differenziert nach Bodenbearbeitung

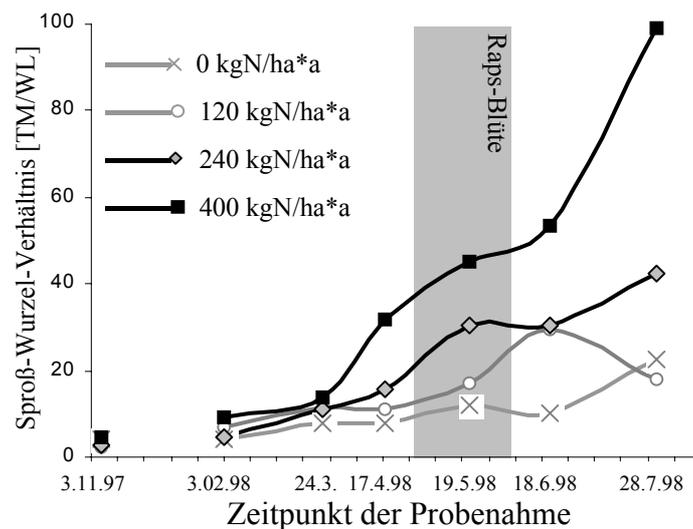
Ein eindeutiger Einfluß der **N-Düngung** war zu Beginn der vegetativen Entwicklung noch nicht zu erkennen. Ab dem Schossen lag dann die STM erwartungsgemäß in beiden Bodenbearbeitungsblöcken jeweils um so höher, je mehr N den Pflanzen zur Verfügung stand.

Die Effekte der **Bodenbearbeitung** hinsichtlich der STM waren ebenfalls ausgeprägt: Zum Auflaufen lag die STM in den Horschvarianten jeweils noch deutlich höher als auf gepflügtem Boden gleichen N-Niveaus. Zu allen späteren Untersuchungszeitpunkten jedoch war die STM in den Pflugvarianten höher. Reduzierte Bodenbearbeitung führte demnach 1998 zu einer Verringerung der oberirdischen Biomasseproduktion und, mit Ausnahme der Variante mit 240 kg/ha N-Düngung, auch – wie später gezeigt werden wird – zu geringeren Kornerträgen (vgl. Abbildung 3.31).

3.2.3. Sproß/Wurzel-Verhältnis

Das Sproß/Wurzel-Verhältnis (S/W) wurde in der vorliegenden Arbeit in Anlehnung an BARRACLOUGH (1984) und BRÜCK (1998) als Quotient von Sproßtrockenmasse und Wurzellänge [g Sproß-TM/km Wurzeln] berechnet. Die Pfahlwurzel geht dabei nicht in die Berechnung ein. Das S/W gibt Aufschluß über die Verteilung von Assimilaten auf Sproß und Wurzel, die in der Größenordnung genetisch festgelegt ist, in gewissen Grenzen jedoch durch äußere Faktoren modifiziert werden kann (KLEPPER 1991).

Aus den Abbildungen 3.23 und 3.24 geht hervor, daß das S/W mit fortschreitender Entwicklung der Pflanzen fast ausnahmslos in allen in der vorliegenden Arbeit untersuchten Behandlungskombinationen zunehmend weiter wurde. Der Anteil des Kohlenstoffs, der für Aufbau und Erhaltung des Wurzelsystems aufgewandt wird, nimmt demnach gegenüber dem C-Anteil, der in die Sproßentwicklung investiert wird, mit zunehmender Dauer der Vegetationsperiode ab. Sowohl die Anwendung verschiedener Bodenbearbeitungsverfahren als auch unterschiedlich hohe N-Düngung führten zu erheblichen Verschiebungen des S/W.



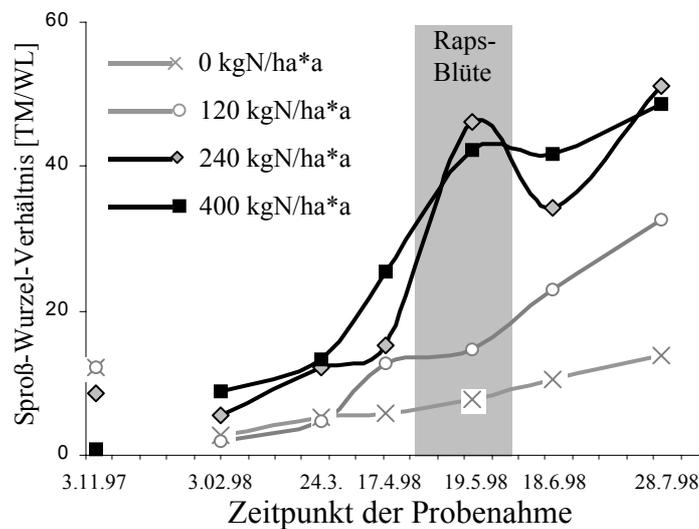
Daten zu Sproßtrockenmassen: BEIMS (pers. Mittlg. 2000)

Abbildung 3.23: Entwicklung der Sproß/Wurzel-Verhältnisse von Winterraps im Verlauf der Vegetationsperiode 1998 in Abhängigkeit von der N-Düngung (Pflugvariante)

Ein Einfluß der **N-Düngung** auf das S/W war in der vorwinterlichen Entwicklung der Rapspflanzen unter Pflug (Abbildung 3.23) noch nicht ersichtlich. Ab dem Schossen zeichnete sich jedoch von Termin zu Termin zunehmend ein Überwiegen der Sproßentwicklung mit steigender N-Zufuhr ab, die sich in erweiterten S/W niederschlug. Die auffällig stark ausgeprägte Sproßentwicklung und das dadurch sehr weite S/W in der Variante P400 könnte neben dem hohen N-Angebot durch die bessere Wasserversorgung der „P400“-Parzellen begünstigt sein.

Unter Frässohlensaat (Abbildung 3.24) war das S/W vor dem Winter in der Variante H400 am engsten und wurde immer weiter, je weniger N die Pflanzen zur Verfügung hatten. Nach dem Winter war die Sproßentwicklung – ebenso wie unter Pflug – absolut und relativ zum Wur-

zelwachstum um so kräftiger, je mehr N zugeführt wurde. Entsprechend wurde das S/W mit abnehmendem N-Düngungsniveau enger.



Daten zu Sproßtrockenmassen: BEIMS (pers. Mittlg. 2000)

Abbildung 3.24: Entwicklung der Sproß/Wurzel-Verhältnisse von Winterraps im Verlauf der Vegetationsperiode 1998 in Abhängigkeit von der N-Düngung (Horschvariante)

Die trockeneren Bodenverhältnisse der H400-Parzellen am Oberhang könnten die Ursache für die relativ hohe DWI in dieser Variante sein, die vergleichsweise enge S/W zur Folge hatte.

Die reduzierte **Bodenbearbeitung** führte mit einer Ausnahme zu engeren Sproß/Wurzel-Verhältnissen (Abbildung 3.25). Bis auf die Varianten mit 240 kg N-Düngung war sowohl die Sproßentwicklung als auch das Wurzelwachstum durch das Pflügen des Bodens begünstigt.

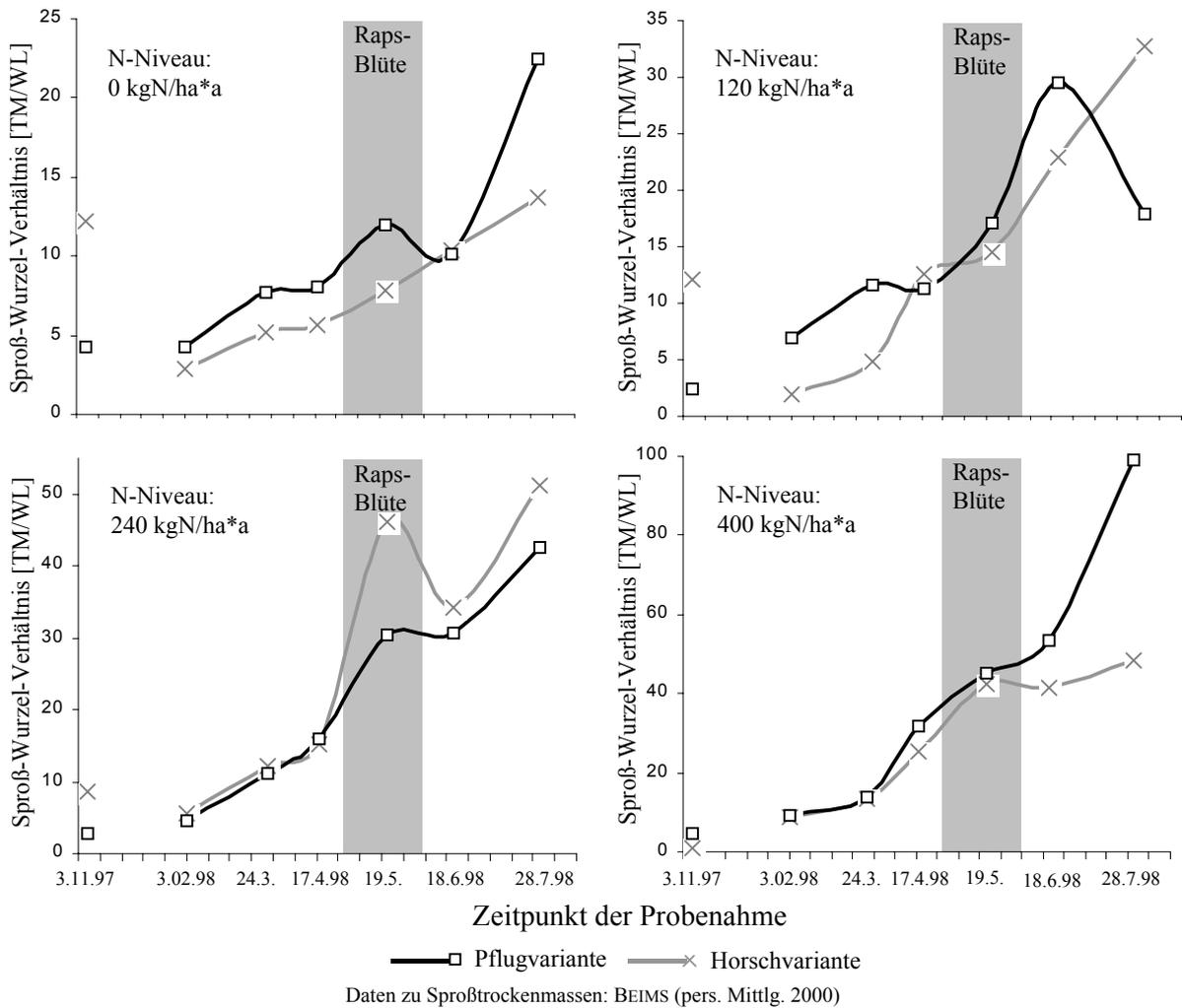


Abbildung 3.25: Entwicklung der Sproß/Wurzel-Verhältnisse von Winterraps im Verlauf der Vegetationsperiode 1998 in Abhängigkeit von der Bodenbearbeitung differenziert nach N-Düngungsniveau

3.3. Versuchsjahr 1999

Mit der Beprobung der Raps-Wurzelsysteme zu den drei Terminen Blüte, Schotenentwicklung und Ernte 1999 wurden die Durchwurzelungsuntersuchungen der vorliegenden Arbeit abgeschlossen. Die Niederschlagssumme lag 1999 mit 806,3 mm leicht über dem langjährigen Mittel. Allerdings wies die Niederschlagsverteilung ein ausgeprägtes Maximum im Dezember auf, während es in der Vegetationsperiode weniger regnete als in den zwei Jahren zuvor und auch gegenüber dem Durchschnittsjahr trockener blieb (vgl. Abbildung 3.1). Die Jahresmitteltemperatur lag mit 9,6°C deutlich über dem langjährigen Mittel und über den Werten der Versuchsjahre 1997 und '98.

3.3.1. Wurzelentwicklung

Die Tiefenverteilung der Wurzeln war – wie in den Jahren zuvor – von einer näherungsweise exponentiellen Abnahme der DWI mit der Bodentiefe gekennzeichnet. Gegenüber 1998 war das Niveau der Durchwurzelung deutlich geringer. Verglichen mit 1997 lag die DWI in der Pflugvariante niedriger und in den Horschvarianten höher. Der Mai des Jahres 1999 wies Temperaturen über und Niederschläge unter dem langjährigen Mittel auf. Die Tage vor der Probenahme waren relativ warm und trocken.

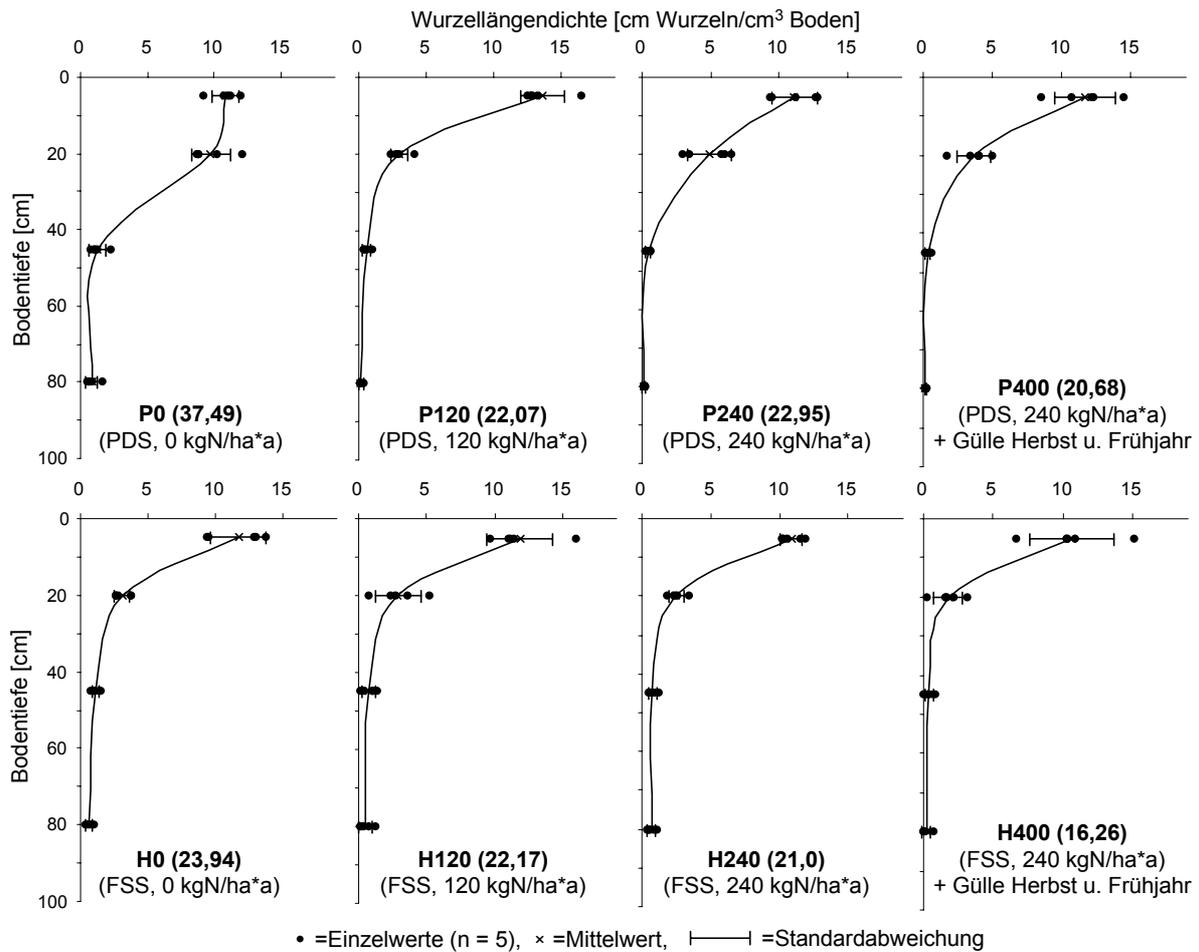


Abbildung 3.26: Wurzellängendichten von Winterraps zur Blüte 1999 bei unterschiedlicher Bodenbearbeitung und N-Düngung in Abhängigkeit von der Bodentiefe (PDS = Pflugdrillsaat, FSS = Frässhleensaat System Horsch; Zahlen in Klammern: Gesamtwurzellänge ($WL_{(0-100)}$) [km/m^2])

Mit steigender **N-Düngung** nahm die $WLD_{(0-100)}$ am Blütetermin 1999, wie aus Abbildung 3.26 hervorgeht, in beiden Bodenbearbeitungssystemen ab. Besonders die intensive Erschließung der Unterkrume der N-Mangelvariante unter Pflug fällt diesbezüglich auf.

Die reduzierte **Bodenbearbeitung** des Systems Horsch hatte – ebenso wie in den Jahren zuvor – eine verminderte Durchwurzelung der Bodenschicht unterhalb der Frässhle (10-30 cm Bodentiefe) zur Folge, die fast ausnahmslos auch zu geringeren Gesamtwurzellängen führte.

Der Zeitraum zwischen den Probenahmen Blüte und Reife blieb etwas trockener als in den Vorjahren. Die Bodentemperatur pendelte zwischen 15 und 16°C (vgl. Abbildung 3.1).

In allen Varianten, die **N-Düngung** erhielten, waren die Gesamtwurzellängen bis zur Reife angewachsen (Abbildung 3.27). Unter N-limitierten Bedingungen war die $WL_{(0-100)}$ hingegen reduziert.

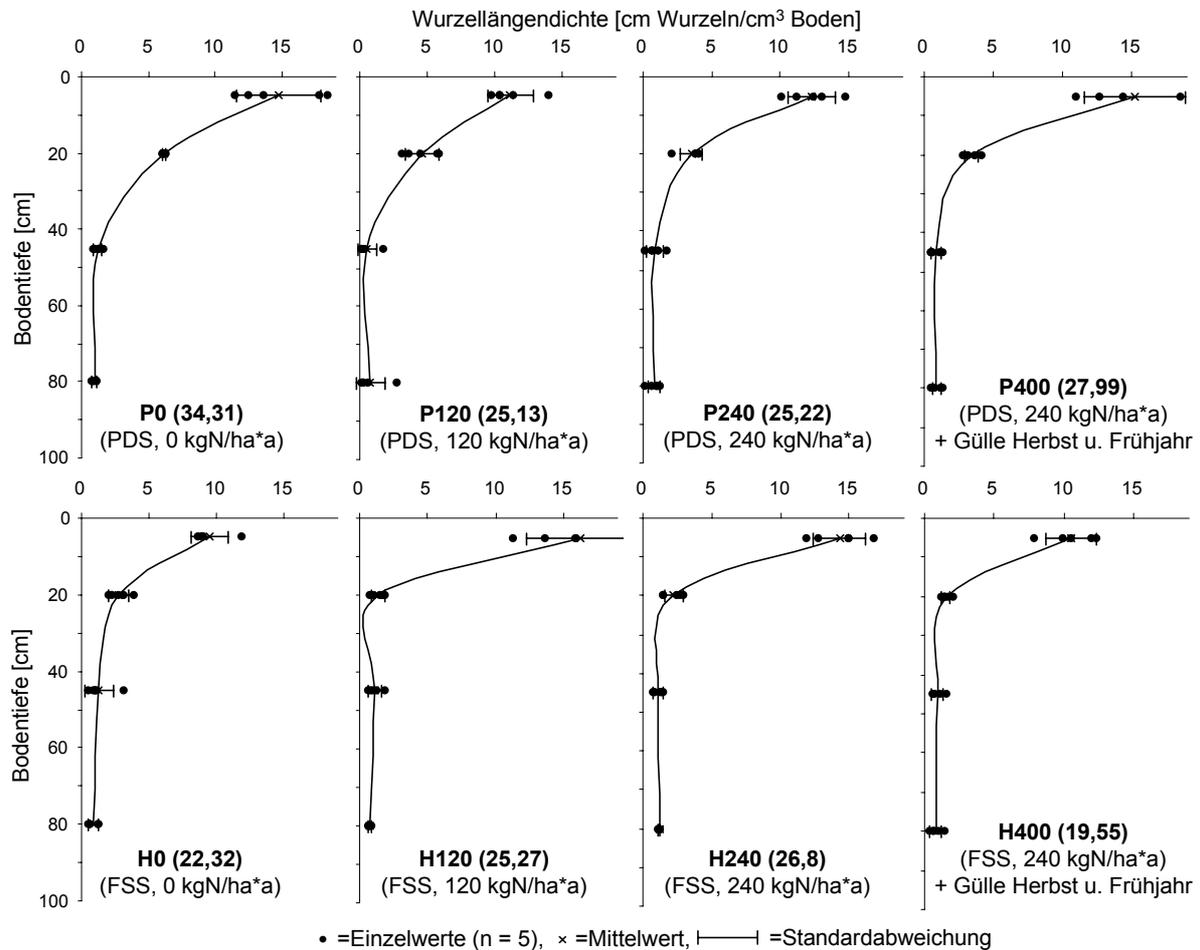


Abbildung 3.27: Wurzellängendichten von Winterraps zur Schotenentwicklung 1999 bei unterschiedlicher Bodenbearbeitung und N-Düngung in Abhängigkeit von der Bodentiefe (PDS = Pflugdrillsaat, FSS = Fräsohle System Horsch; Zahlen in Klammern: Gesamtwurzellänge ($WL_{(0-100)}$) [km/m^2])

Unter Pflug lag die DWI bei N-Mangel weiterhin deutlich über den gedüngten Varianten. Die niedrigste $WL_{(0-100)}$ war bei einer N-Zufuhr von 120 kg/ha^*a festzustellen, jede weitere Steigerung der N-Zufuhr führte zu einer leichten Erhöhung der DWI. Unter Fräsohle war das Niveau der Durchwurzelung zu diesem Zeitpunkt in den mineralisch gedüngten Böden höher als in den Varianten H0 und H400. Ausschlaggebend hierfür war eine intensive Erschließung der Oberkrume in den Varianten H120 und H240.

Der Einfluß der **Bodenbearbeitung** zeigte sich unverändert in einer Einschränkung der Unterkrumendurchwurzelung.

Im Zeitraum bis zur abschließenden Probenahme zur Ernte 1999 (Abbildung 3.28) war die Witterung zumeist sommerlich. Die Bodentemperaturen lagen um 20°C, die Niederschläge fielen überwiegend in Form von Starkregen. In der Woche vor der Ernte blieb es trocken. In den meisten Varianten hatte die WLD seit der Schotenentwicklung in der Krume noch zugenommen, in den Unterböden überwog Wurzelabbau.

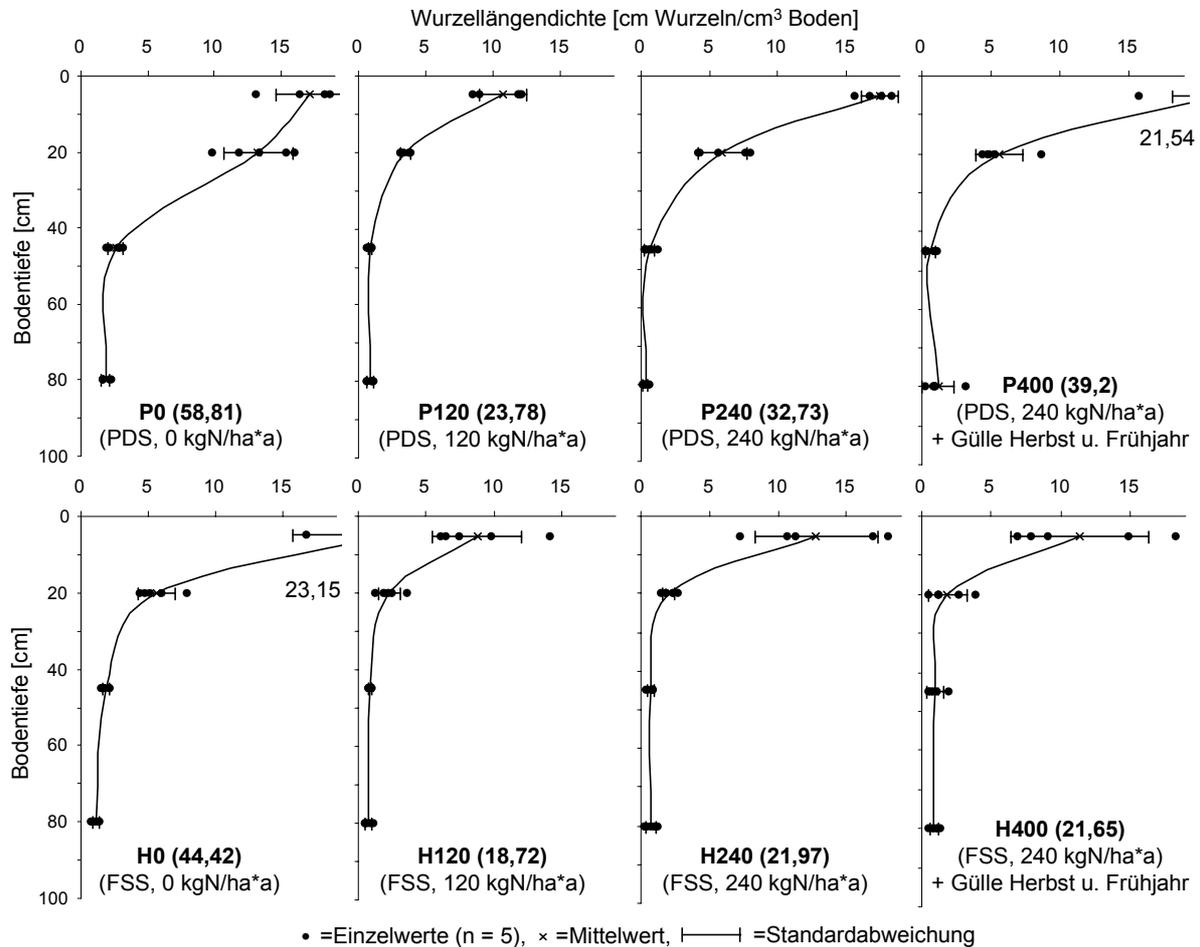


Abbildung 3.28: Wurzellängendichten von Winterraps zur Ernte 1999 bei unterschiedlicher Bodenbearbeitung und N-Düngung in Abhängigkeit von der Bodentiefe (PDS = Pflugdrillsaat, FSS = Frässlensaat System Horsch; Zahlen in Klammern: Gesamtwurzellänge ($WL_{(0-100)}$) [km/m^2])

Unter fehlender **N-Düngung** waren sowohl in der Krume als auch im Unterboden die stärksten WLD-Zuwächse zu verzeichnen. In den Unterböden der gedüngten Varianten stagnierte die DWI oder nahm ab. Bei einem N-Niveau von 120 kg/ha*a hatte die $WL_{(0-30)}$ unabhängig von der Bodenbearbeitung abgenommen, in den Varianten P240 und P400 waren in der Krume kräftige WL-Zuwächse festzustellen, während sich die $WL_{(0-30)}$ der hoch gedüngten Varianten unter Frässlensaat gegenüber der Reife fast unverändert zeigte. Die GesamtwLD war auch zur Ernte in beiden Bodenbearbeitungsblöcken in den N-Mangelvarianten mit großem Abstand am höchsten. Die kleinsten Wurzelsysteme waren jeweils in den Varianten mit 120 kgN/ha*a entwickelt, höhere N-Gaben hatten gegenüber den 120 kg/ha*a-Varianten größere Wurzellängendichten zur Folge.

Bodenbearbeitung mit dem System Horsch führte generell zu erheblich geringerer Gesamt-WLD. Besonders groß waren die Unterschiede in der Krume, wobei die Durchwurzelung der Unterkrume – wie zu allen vorangegangenen Untersuchungsterminen – durch die Anwendung der Frässohlensaat am stärksten eingeschränkt war.

Auch für 1999 soll abschließend ein Blick auf die Durchwurzelungsdynamik im Verlauf des Beobachtungszeitraumes und deren Beeinflussung durch die Versuchsfaktoren geworfen werden. Ein Vergleich mit den vorangegangenen Versuchsjahren zeigt, daß die Entwicklung der DWI zwischen Blüte und Ernte dem Verlauf des Jahres 1997 gleich, von der Dynamik 1998 jedoch stark abwich. Ursache hierfür dürfte der Witterungsverlauf sein: Während die Monate vor der Ernte 1997 und 1999 warm und trocken waren, wiesen Juni und Juli 1998 kühlere Temperaturen und gegenüber 1999 höhere Niederschläge auf (s. Abbildung 3.1).

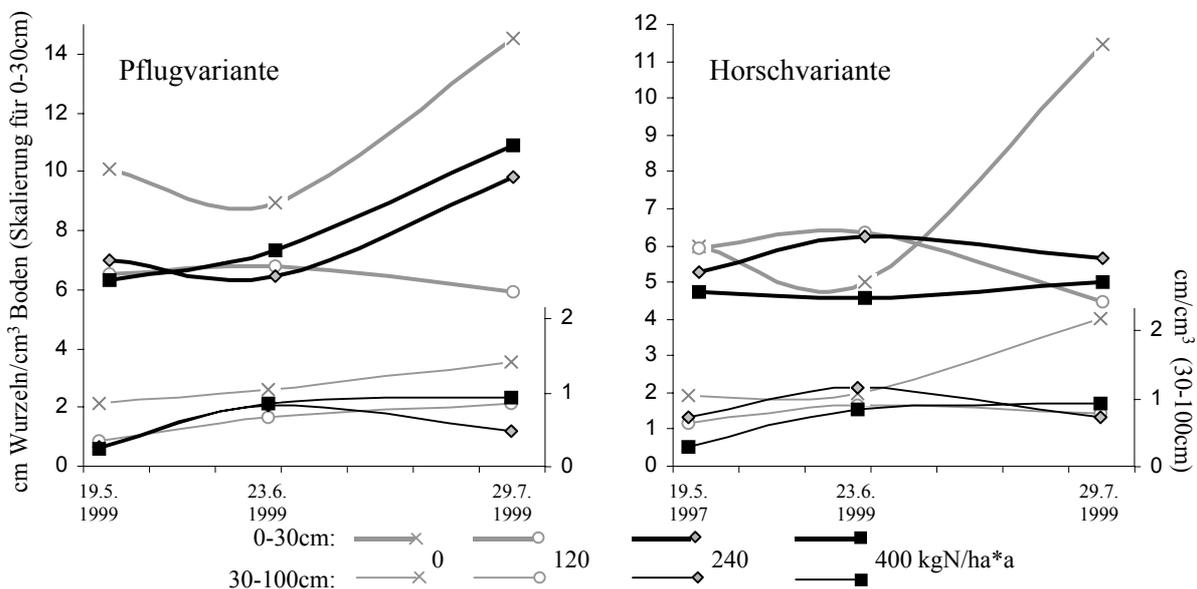


Abbildung 3.29: zeitliche Dynamik der WLD in der Vegetationsperiode 1999 in Abhängigkeit von der N-Düngung differenziert nach Bodenbearbeitung und Bodentiefen

In beiden Varianten ohne **N-Düngung** nahm die WLD in der Krume zwischen Blüte und Reife ab (Abbildung 3.29) und stieg danach sehr stark an, so daß die maximale $WLD_{(0-30)}$ hier erst zur Ernte erreicht war. Auch die Unterböden dieser Varianten waren am Ende der Vegetationsperiode am intensivsten durchwurzelt. Zwischen Blüte und Reife hatte sich die $WLD_{(30-100)}$ unter N-Mangel kaum verändert. Weit weniger dynamisch war die Entwicklung bei 120 kg/ha*a: Die $WL_{(0-30)}$ stieg nach der Blüte minimal an und nahm danach bis zur Ernte leicht ab. Im Unterboden veränderte sich das DWI-Niveau hier ebenfalls kaum. Bei hoher N-Zufuhr war unter Pflug ein Anstieg der $WL_{(0-30)}$ und Wurzelabbau im Unterboden nach der Reife zu verzeichnen. Zwischen Blüte und Reife veränderte sich die $WL_{(0-30)}$ nicht wesentlich, während die $WL_{(30-100)}$ zugenommen hatte. Sehr viel schwächer ausgeprägt war die Dynamik in den hoch gedüngten Horschvarianten. Hier zeigte sich die $WL_{(0-30)}$ zwischen Blüte und Ernte kaum verändert. Im Unterboden dieser Varianten überwogen von der Blüte bis zur Reife WL-Zuwächse, danach Wurzelabbau (H240) bzw. Stagnation (H400). Auch im dritten

Versuchsjahr war unter N-Mangel im gepflügten Boden in Krume und Unterboden stets die größte DWI ausgebildet. Mit Ausnahme des Reifetermines gilt dies auch für die Horschvarianten. Die Durchwurzelungsdynamik wies unter N-limitierten Bedingungen stärkere Schwankungen auf als dies in den gedüngten Varianten der Fall war.

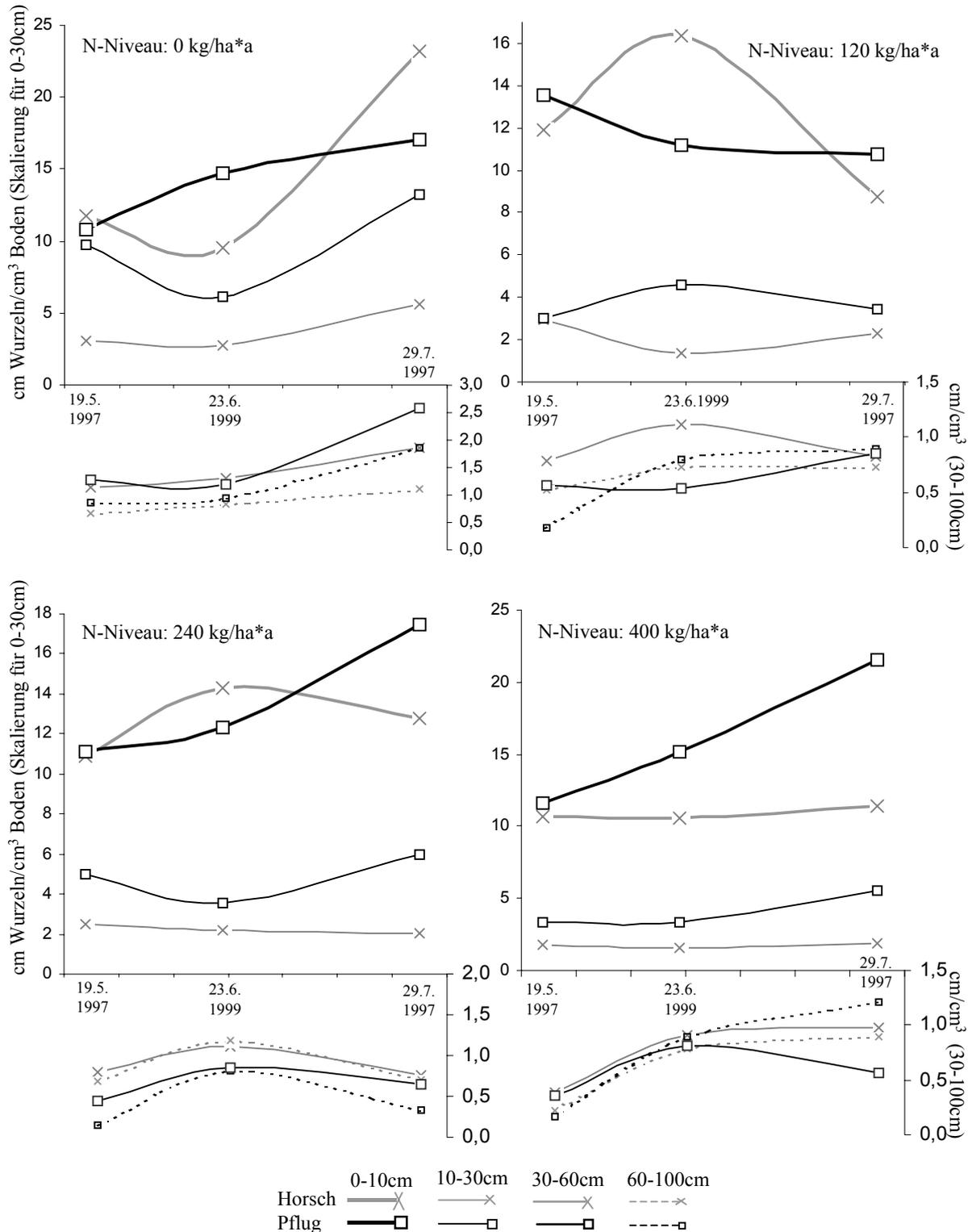


Abbildung 3.30: zeitliche Dynamik der WLD in der Vegetationsperiode 1999 in Abhängigkeit von der Bodenbearbeitung differenziert nach N-Düngungsniveau und Bodentiefen

Auch differenzierte **Bodenbearbeitung** führte 1999 zu unterschiedlichen Entwicklungen der Wurzelsysteme (Abbildung 3.30). Vor allem in der bei Anwendung der Frässohlensaat nicht gelockerten Bodenschicht 10-30 cm, der Unterkrume, waren die Effekte der Bodenbearbeitung gut zu erkennen. Bei N-Mangel und niedriger N-Zufuhr war die Dynamik in der Oberkrume der Horschvarianten erheblich stärker, in der Unterkrume hingegen etwas schwächer ausgeprägt als unter Pflug. In den Varianten mit hoher N-Versorgung waren dagegen in beiden Krumen-Bodenschichten die stärkeren Schwankungen im gepflügten Boden festzustellen. Während die Pflanzen in den Pflugvarianten die gesamte Krume zur N-Akquisition leicht erschließen konnten, sind die Wurzelsysteme im gehorschten Boden im Wesentlichen auf die Oberkrume beschränkt. Eine Ausweitung des Wurzelsystems als Reaktion auf N-Mangel bleibt demnach unter Frässohlensaat vorwiegend auf die Oberkrume beschränkt, während den Wurzelsystemen im gepflügten Boden die gesamte Krume zur Verfügung steht.

In allen N-Düngungsstufen und zu allen Zeitpunkten war die DWI in der Unterkrume der mit Frässohlensaat bestellten Böden stets deutlich geringer als in den Pflugvarianten. Anders als im Vorjahr war ein eindeutiger Einfluß der Bodenbearbeitung auf die Unterbodendurchwurzelung nicht festzustellen. In den gedüngten Varianten waren die Unterbodenhorizonte unter Frässohlensaat 1999 tendenziell sogar intensiver durchwurzelt.

3.4. Erträge (1997-1999)

Für die Beurteilung der Auswirkungen von Bewirtschaftungsmaßnahmen sind aus agronomischer Sicht die erzielten Erträge, jeweils in Relation zum materiellen Aufwand, von besonderem Interesse. Neben rein wirtschaftlichen Gesichtspunkten spielen Fragen der ökologischen Verträglichkeit und der Nachhaltigkeit eine wichtige Rolle bei der Bewertung eines Anbausystems. Ziel einer nachhaltigen Wirtschaftsweise sind hohe Erträge bei gleichzeitig möglichst geringer Belastung des Agrarökosystems. Aus Abbildung 3.31 geht hervor, daß es neben den Effekten von Bodenbearbeitung und N-Düngung auch erhebliche Unterschiede zwischen den Versuchsjahren gab:

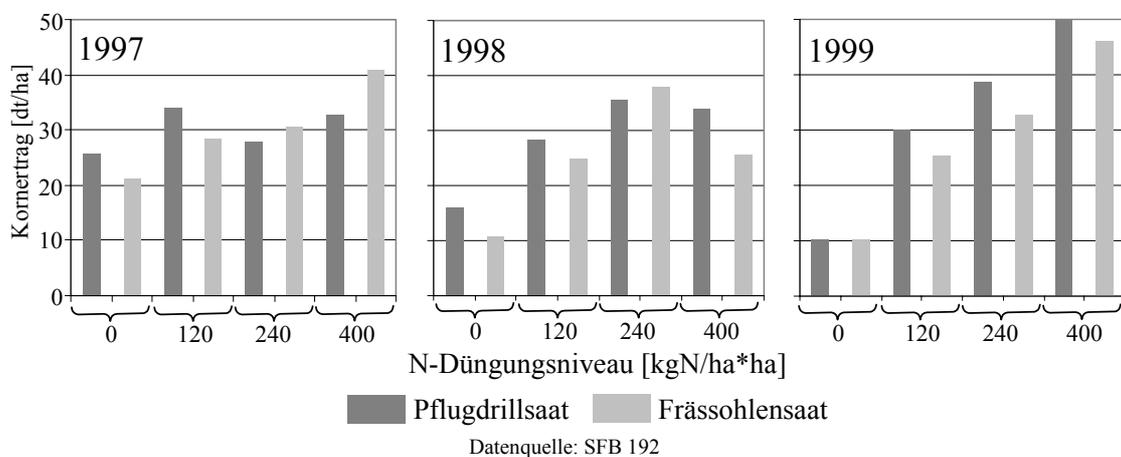


Abbildung 3.31: Erträge von Winterraps auf den untersuchten Varianten des SFB 192 im Beobachtungszeitraum

Gesteigerte **N-Düngung** führte im Mittel der drei Jahre erwartungsgemäß zu höheren Kornerträgen. Das niedrigste Ertragsniveau war in allen Versuchsjahren stets in den N-Mangel-Varianten festzustellen. Unter Frässohlensaat wurden 1997 und 1999 mit jeder Erhöhung der N-Zufuhr gesteigerte Erträge erzielt. 1998 wurde auf den Parzellen, die zusätzlich Gülle erhalten hatten, weniger geerntet als in den rein mineralisch gedüngten. Auf gepflügtem Boden waren 1999 durch höheren N-Dünger-Einsatz regelmäßig Ertragssteigerungen erzielt worden. 1998 lag der Ertrag der Gülle-Variante P400 leicht unter der Variante P240. 1997 war der höchste Ertrag bei einem N-Niveau von 120 kg/ha*a erzielt worden. Auffällig war der von Jahr zu Jahr abnehmende Kornertrag unter N-limitierten Bedingungen, der als Indiz für die fortschreitende Aushagerung der N-Mangelvarianten zu sehen sein dürfte.

Reduzierte **Bodenbearbeitung** führte im Mittel zu leichten Ertragseinbußen. 1997 und 1998 lagen die Erträge auf gehorschtem Boden bei geringer bzw. fehlender N-Düngung unter, in den hoch gedüngten Varianten, mit Ausnahme der zusätzlich organisch gedüngten Varianten im Jahr 1998, über den Pflugvarianten. 1999 wurden auf gepflügtem Boden bei allen N-Düngungsniveaus höhere Kornerträge erzielt.

4. Diskussion

Sowohl aktuelle Größe und Ausdehnung eines Wurzelsystems zu einem definierten Zeitpunkt als auch die deren Veränderung im Verlauf einer bestimmten Zeitspanne resultieren aus einer Kombination verschiedenster Einflußfaktoren, die während der Entwicklung der Pflanzen auf sie einwirken (FITTER 1991). Durch Pflanzenart und -sorte sind spezifische Grundmuster der Wurzelentwicklung – modifiziert durch individuelle Eigenschaften der Einzelpflanze – genetisch vorgegeben (KUTSCHERA 1960, KUTSCHERA & LICHTENEGGER 1982), die in Anpassung an natürliche Standortfaktoren wie z.B. Relief (WESTING & SÖCHTIG 1985), physikalische Bodenbeschaffenheit (GOSS 1977, HELAL 1991), Nährstoffangebot (STEINECK 1983) und -verteilung (GLIEMEROTH 1953), hydrologische Situation (HARRACH & VORDERBRÜGGE 1991), Witterung (CANELL 1985) sowie biogene Umweltbedingungen (ZOBEL 1991) in weiten Grenzen variieren können. In dieses Wirkungsgefüge greift schließlich der Mensch ein sowohl auf der Seite der artspezifischen Voraussetzungen durch Züchtung und gentechnische Manipulationen als auch auf Seite der Standortbedingungen durch Bewirtschaftungsmaßnahmen auf landwirtschaftlich genutzten Flächen sowie vielen anderen Veränderungen der Umweltbedingungen z.B. durch Abgasemissionen, Absenkung des Grundwassers, Flächenversiegelung usw.

4.1. Bestimmungsmethoden

Die quantitative Erfassung von Menge und räumlicher Ausdehnung von Pflanzenwurzeln unter Feldbedingungen gestaltet sich sehr viel komplizierter als dies bei oberirdischen Phytomasse der Fall ist (BÖHM 1978, BARRACLOUGH 1984). Von der Probenahme über -aufbereitung bis zur Messung des gewünschten Parameters sind alle Schritte mit erheblich höherem

Zeit- und Arbeitsaufwand sowie mit einer größeren Anzahl und schwerwiegenderen Fehlerquellen behaftet.

Prinzipiell ist die Quantifizierung der Wurzelmenge über eine Bestimmung der Trockenmasse oder der Länge möglich (VAN NOORDWIJK 1983). In der ersten Phase des in der vorliegenden Arbeit ausgewerteten Projektes wurden beide Möglichkeiten anhand der zum Erntetermin 1997 mittels Bohrkernmethode (BÖHM 1979) und anschließendem Auswaschen (s. Teil 1, Kap. 2.3.1.) gewonnenen Wurzelproben miteinander verglichen. Dabei kristallisierte sich die Schätzung der Wurzellänge für die vorgegebenen Fragestellungen als das bei weitem geeignetere Verfahren heraus. Während die Schätzung der Wurzellänge mittels Intersektionsmethode (NEWMAN 1966, TENNANT 1975) vergleichsweise schnell und genau ist, weist die Bestimmung der TM einige erhebliche Nachteile auf: Die größten Schwierigkeiten bereiteten organische und mineralische Verunreinigungen, die auch nach Auswaschen und Dekantieren in den Proben verblieben. Insbesondere mineralische Partikel stellen aufgrund ihres gegenüber organischem Material deutlich höheren spezifischen Gewichtes eine gewichtige Fehlerquelle dar und sind letztendlich nicht gänzlich zu eliminieren, da z.B. kolloidale Partikel z.T. direkt an den Wurzelbruchstücken anhaften können. Die für die Wägung notwendige möglichst vollständige Reinigung der Proben ist extrem arbeits- und zeitintensiv, da alle Schmutzpartikel manuell entfernt werden müssen. Demgegenüber ist bei der Intersektionszählung eine gewisse Verunreinigung der Proben akzeptabel, da Wurzeln optisch leicht von Fremdbestandteilen zu unterscheiden sind und diese somit keinen Fehler verursachen. Bei der Zählung ist es weiterhin möglich, Wurzeln verschiedener Pflanzenarten aufgrund von Morphologie und Färbung zu unterscheiden (FITTER 1991) sowie z.B. Verzweigungsgrad, Farbe und Wurzeldurchmesser mit zu erfassen. Derartige Parameter können bei einer TM-Bestimmung nicht ermittelt werden, Fremdwurzeln führen unweigerlich zu einer Überschätzung der Wurzel-TM. Als ein weiterer Vorteil der Wurzellängen- gegenüber einer TM-Bestimmung wird von BÖHM (1978) eine bessere Korrelation der WL mit der Wasser- und Nährstoffaufnahme der meisten Pflanzenarten ins Feld geführt. BARRACLOUGH & LEIGH (1984) fanden den Kornertrag von Winterweizen wesentlich enger mit der WL als mit der WTM korreliert. Nach VAN NOORDWIJK (1983) ist die Wurzellänge als der geeignetere Parameter zur Interpretation funktioneller und physiologischer Prozesse hinsichtlich der Wasser- und Nährstoffaufnahme anzusehen.

Beim Vergleich der Datensätze wiesen die TM-Werte in Übereinstimmung mit Ergebnissen von BARRACLOUGH (1984) sowie BARRACLOUGH & LEIGH (1984) wesentlich stärkere Streuung auf (vgl. Abbildung 3.7) als die WL. Höhere Standardabweichung und schlechtere statistische Auswertbarkeit waren die Folge. In der Tendenz erbrachte die Auswertung der Wurzeltrockenmassen die gleichen Aussagen in geringerer Schärfe und somit keine zusätzliche Information. Die Berechnung der spezifischen Wurzellänge (Quotient aus Wurzellänge und Wurzeltrockenmasse, vgl. Abbildung 3.8) ließ keine eindeutigen Schlüsse zu.

Auch die Bestimmung der Wurzellänge mit Hilfe eines computergestützten Bildauswertungssystems erwies sich unter den gegebenen Versuchsbedingungen als nicht praktikabel. Wiederum stellten Verunreinigungen der Proben das größte Problem dar. Die Ergebnisse waren

nicht reproduzierbar und der Zeitaufwand letztlich deutlich höher als bei der Schätzung der Wurzellänge mittels Intersektionszählung, die nach eingehender Prüfung aus den o.g. Gründen als geeignetste Methode für die vorliegende Untersuchung gewählt wurde.

4.2. Wurzelentwicklung

Als Organ zur mechanischen Fixierung im Substrat sowie zu Aufnahme und Transport von Wasser und Nährstoffen (FITTER 1991) stehen Wurzeln in direktem Kontakt mit der Bodenmatrix und sind unmittelbarer als oberirdische Pflanzenteile von Änderungen der physikalischen Substratbeschaffenheit durch Bodenbearbeitung und der chemischen Zusammensetzung der Bodenlösung durch Düngung betroffen (BECK 1996).

4.2.1. Tiefenverteilung der Wurzeln

Die Durchwurzelung des Bodens nahm unter Winterraps mit zunehmender Profiltiefe in allen Varianten und an sämtlichen Beobachtungsterminen annähernd exponentiell ab und entsprach damit der 1997 unter Winterweizen und -gerste (vgl. Teil 2) beobachteten Tiefenfunktion. Dieser Befund blieb unbeeinflusst davon, ob die Quantität der unterirdischen Biomasse über Wurzellängen oder Trockenmassen ermittelt wurde und deckt sich ausnahmslos mit den Angaben über die Tiefenverteilung von Rapswurzeln in der ausgewerteten Literatur (METTE 1987, LEHFELD 1988, BARRACLOUGH 1989, POMIKALKO 1992, KJELLSTRÖM & KIRCHMANN 1994, BONARI et al. 1995). Das Muster abnehmender DWI mit der Bodentiefe wird übereinstimmend auch unter anderen einjährigen Kulturpflanzen wie z.B. Winterweizen (u.a. GLIEMEROTH et al. 1968, BAEUMER et al. 1971, BÖHM 1978, FRANKEN & FAYED 1983, BARRACLOUGH & LEIGH 1984, HAMBLIN et al. 1990, HARRACH & VORDERBRÜGGE 1991, KÄTTERER et al. 1993, ASSENG et al. 1997), Wintergerste (WESTING & SÖCHTIG 1985), Sommergerste (GLIEMEROTH et al. 1968, BAEUMER et al. 1971, HANSSON et al. 1987, ANDRÉN et al. 1993), Roggen (POMIKALKO 1992), Hafer (BAEUMER 1980, BÖHM & KÖPKE 1977, HARRACH & VORDERBRÜGGE 1991, METTE 1994), Mais (ANDERSON 1988, WIESLER 1991, POMIKALKO 1992, METTE 1994), Zuckerrüben (HARRACH & VORDERBRÜGGE 1991, TENHOLTERN & HARRACH 1992), Erbsen (POMIKALKO 1992), Perlhirse (BRÜCK 1998), Klee-gras (POMIKALKO 1992), Luzerne (HANSSON et al. 1991) und natürlicher Grasvegetation (GASS & OERTLI 1980, WEBER & DAY 1996) beobachtet. Bäume und Sträucher weisen dagegen häufig andere Tiefenverteilungsmuster auf (GLATZEL 1983, METTE 1994).

Verminderte **N-Düngung** und vor allem die reduzierte **Bodenbearbeitung** bewirkten eine verstärkte Abnahme der DWI mit der Bodentiefe. Gleiche Effekte hinsichtlich N-Düngung beobachteten BARRACLOUGH et al. (1989), ASSENG et al. (1997), HAMBLIN et al. (1990) unter Weizen, GASS & OERTLI (1980) unter Wiese, hinsichtlich der Bodenbearbeitung METTE (1987), BONARI et al. (1995) unter Winterraps sowie ANDERSON (1988) und HUGHES et al. (1992) bei Mais.

4.2.2. Quantität der Durchwurzelung

Die im Rahmen der vorliegenden Arbeit ermittelten Wurzellängen bzw. -trockenmassen von Winterraps bewegen sich durchweg in einem Wertebereich, der mit von LEHFELD (1988), POMIKALKO (1992), KJELLSTRÖM & KIRCHMANN (1994), BONARI et al. (1995), DRECCER et al. (2000) sowie STEINGROBE (1998 u. 2000) zu den entsprechenden Entwicklungsstadien erhobenen Daten gut übereinstimmt. METTE (1987) fand in der Tendenz etwas höhere, BARRACLOUGH (1989) unter einer WR-Hochleistungssorte etwas geringere Wurzellängen.

Aus einer Vielzahl von Untersuchungen geht hervor, daß die Wurzelentwicklung von Kulturpflanzen in hohem Maße durch Bodenbearbeitung (GLIEMEROTH et al. 1968, BONARI et al. 1995, CANNELL et al. 1986, HILFIKER & LOWERY 1988, HARRACH & VORDERBRÜGGE 1991, BRAIM et al. 1992, HUGHES et al. 1992, SEYFARTH et al. 1999, KARUNATILAKE et al. 2000 u.a.) und N-Düngung (z.B. GLIEMEROTH 1953, BERGMANN 1953, TENNANT 1976, GEISLER & KRÜTZFELD 1983, FRANKEN & FAYED 1983, HANSSON et al. 1987, ANDERSON 1988, HAMBLIN et al. 1990, BARRACLOUGH et al. 1989, SATTELMACHER et al. 1990, SMOLDERS & MERCKX 1992, JOHANSSON 1992 und DRECCER et al. 2000) beeinflußt wird.

Um Unterschiede hinsichtlich Witterungsverlauf der einzelnen Versuchsjahre und Bodeneigenschaften der Versuchsschläge als Varianzursachen weitestgehend auszuschließen, wurde die varianzanalytische Prüfung der Versuchsfaktoren mit den Mittelwerten der Termine Blüte und Ernte über die drei Versuchsjahre hinweg durchgeführt. Dabei ergaben sich signifikante Effekte für die Wurzelentwicklung von Winterraps sowohl durch Bodenbearbeitung (BB) und N-Düngung (N) als auch der Interaktion BB*N.

Der **Einfluß der N-Düngung** zeigte sich bereits bei der Betrachtung der einzelnen Termine (vgl. Abbildungen 3.2, 3.4, 3.9 - 3.15 und 3.26 - 3.28). Hier war deutlich zu erkennen, daß die WLD in den N-Mangelvarianten konsistent über drei Jahre in beiden Bodenbearbeitungsblöcken und an fast allen Terminen weit über den gedüngten Varianten lag. Die Ergebnisse der Varianzanalyse bestätigten diesen Befund (Abbildung 3.32).

Im Gegensatz zu den Ergebnissen von BARRACLOUGH (1989) und STEINGROBE (2000) unter Winterraps sowie von ALLEN & MORGEN (1972) für Sommerraps, die jeweils bei unterlassener N-Düngung vermindertes Netto-Wurzelwachstum beobachteten, war an den Terminen Blüte und Ernte, also in dem Zeitraum, in dem unter Raps in den meisten Fällen die maximale DWI entwickelt ist, im Mittel über drei Versuchsjahre eine größere Gesamt-WLD in den Varianten ohne N-Düngung festzustellen (Abbildung 3.32). In der Pflugvariante waren die Unterschiede zwischen ungedüngten und gedüngten Varianten an beiden in die Prüfung einbezogenen Terminen hoch signifikant ($P < 0,001$), unter Frässohlensaat fielen die Unterschiede etwas geringer aus, waren jedoch insbesondere am Erntetermin ebenfalls signifikant ($P < 0,05$). Innerhalb der N-gedüngten Varianten war zur Blüte noch eine leichte Tendenz zu geringerer WLD mit steigender N-Zufuhr festzustellen, die jedoch nicht signifikant und bis zur Ernte fast verschwunden war. Die zusätzliche Gülledüngung in den Varianten H400 und P400 hatte gegenüber rein mineralischer N-Düngung keinen Einfluß auf die DWI.

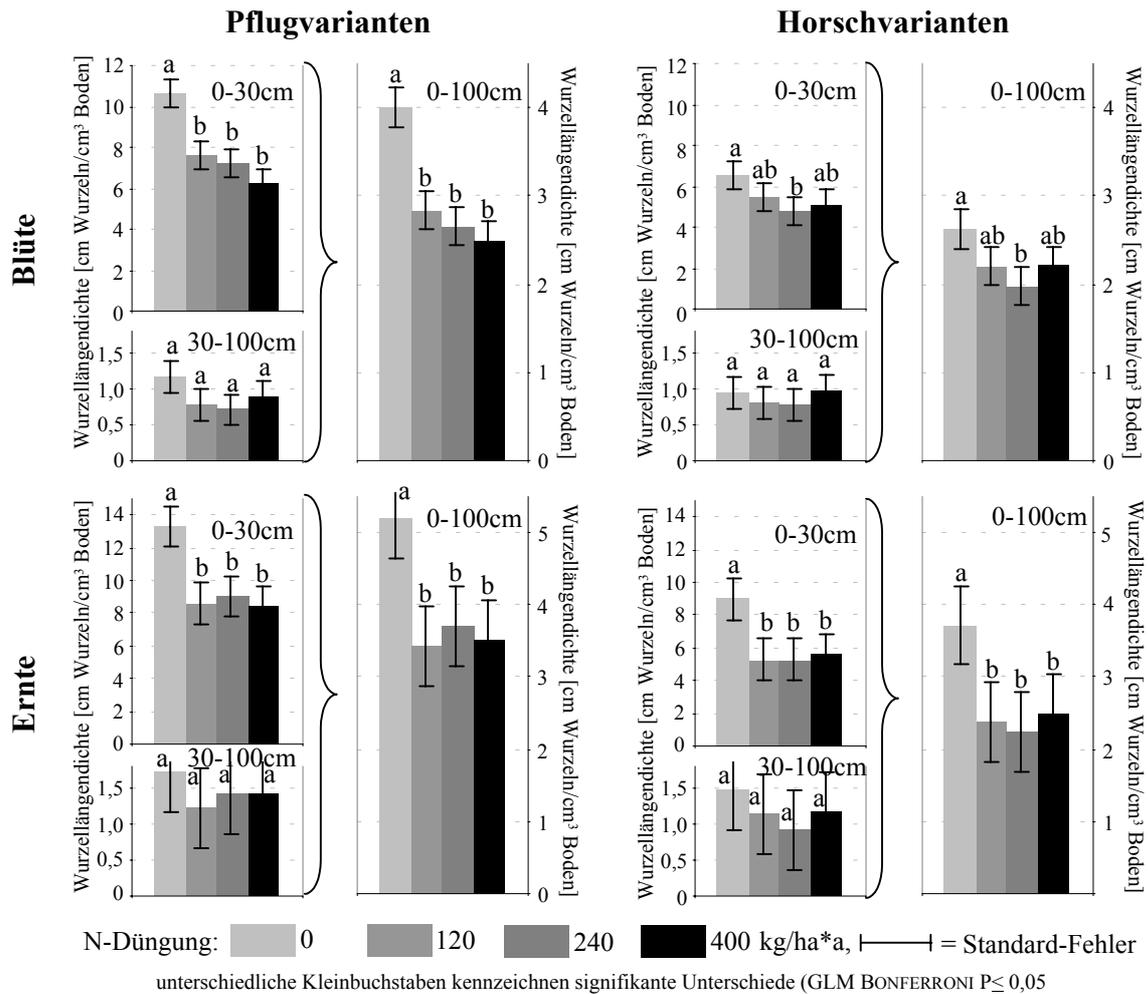


Abbildung 3.32: Wurzellängendichten von Wintertraps zur Blüte und zur Ernte im Mittel über drei Jahre (1997-1999) in Abhängigkeit von der N-Düngung differenziert nach Bodenbearbeitungsverfahren und Bodentiefen

Aus Abbildung 3.32 geht weiterhin hervor, daß sich der N-Effekt vor allem auf die Krume auswirkte. Besonders die Unterkrume der N-Mangelvarianten war zumeist deutlich intensiver durchwurzelt als in gedüngtem Boden (vgl. Abbildungen 3.2, 3.4, 3.9 - 3.15 und 3.26 - 3.28). Im Unterboden lag die WLD unter N-Mangel zwar ebenfalls meist höher als in den gedüngten Böden, diese Unterschiede waren jedoch nicht signifikant.

Mit der Ausdehnung des Wurzelsystems bei N-Mangel war die Reaktion des Wintertraps signifikant von der unter Getreide 1997 beobachteten Dynamik (vgl. Teil 2, Kap 3.4. und 4.4.) unterschieden. Weizen und Gerste hatten auf dem gleichen Standort um so größere DWI entwickelt, je höher das Niveau der mineralischen N-Düngung lag. Zu – hinsichtlich der N-Effekte bei WW und WG – übereinstimmenden Ergebnissen kamen u. a. POMMER (1983), FRANKEN & FAYED (1983), BARRACLOUGH et al. (1989), HANSSON et al. (1991), GOSS et al. (1993) und DRECCER et al. (2000) unter Feldbedingungen, sowie JOHANSSON (1992) in Gefäßversuchen. Ebenso wurden unter Mais (ANDERSON 1988) und Wildgräsern verschiedener Familien (TILMAN & WEDIN 1991, WEBER & DAY 1996) zunehmende Wurzelbiomassen mit gesteigerter N-Zufuhr festgestellt. SATTELMACHER & THOMS (1995) konnten in Nährlösungsversuchen mit jungen Maispflanzen zeigen, daß ein lokal an einzelnen Wurzelsegmenten pla-

ziertes erhöhtes N-Angebot schon nach wenigen Tagen zu verstärktem Wurzelwachstum in der N-Angebotszone führte. Mögliche Ursachen für die von den untersuchten Getreidearten abweichende Reaktion von Raps auf N-Mangel wurden in Teil 2 (Kap. 4.4.) diskutiert.

Im Gegensatz zu den für WW und WG in der vorliegenden Arbeit erzielten Ergebnissen und zu den oben zitierten Autoren wurden in anderen Studien unter Gerste (GEISLER & KRÜTZFELD 1983, ZAGAL et al. 1993), Mais (GEISLER & MAARUFI 1975) und Wildgräsern (GASS & OERTLI 1980, JAVORKOVÁ & GÁBORCÍK 1992) steigende Wurzellängen bzw. -trockenmassen mit abnehmender N-Düngung beobachtet. Ebenso reagierten Hafer (POMMER 1983), Brennesseln (FETENE et al. 1993), Spinat (SMOLDERS & MERCKX 1992) Ackerbohnen (GEISLER & MAARUFI 1975) und Weizen bei Wasserknappheit (HAMBLIN et al. 1990) auf N-Mangel mit gesteigertem Wurzelwachstum. ENNIK & HOFMANN (1983) beobachteten, daß durch kurze Perioden extremen N-Mangels das Wurzelwachstum von italienischem Raygras sehr stark angeregt wurde. Diese und viele andere Beispiele aus der Literatur, die einmal positive, dann wieder negative oder auch gar keine Korrelationen des Wurzelwachstums mit der N-Düngermenge aufzeigen, lassen vermuten, daß neben dem durch Düngung dem Boden zugeführten Stickstoff noch andere Faktoren für die N-Effekte hinsichtlich der Reaktion des Wurzelsystems eine Rolle spielen müssen.

Untersuchungen zur Beeinflussung des Wurzelwachstums von Winterraps durch N-Düngung im Freiland wurden ebenfalls von BARRACLOUGH (1989) und STEINGROBE (2000) durchgeführt. BARRACLOUGH (1989) fand zur Blüte im Versuchsjahr 1984 bei der Hochleistungssorte *Jet neuf* bei einem Düngungsniveau von 240 kgN/ha*a 71 g/m² Wurzel-trockenmasse und eine Wurzellänge von 28,3 km/m² gegenüber 38 g/m² resp. 17,6 km/m² bei unterlassener N-Düngung. STEINGROBE (2000) berichtet von durch N-Zufuhr (240 kg/ha) signifikant erhöhten Netto-Wurzellängen der Rapsorten *Lirajet* und *Bristol* während des Schossens und zum Beginn der Blüte des Versuchsjahres 1997. Im Verlauf der Blüte und zur Reife war die DWI in den gedüngten und ungedüngten Varianten jeweils etwa gleich hoch. Zur Ernte 97 hatte *Bristol* in der gedüngten Variante, *Lirajet* hingegen unter fehlender N-Düngung die höhere DWI entwickelt. Im zweiten Versuchsjahr, 1998, ermittelte STEINGROBE (2000) unter beiden Sorten in den gedüngten Varianten tendenziell – während der Reife signifikant – höhere Netto-Wurzellängen. Der Wurzelumsatz beider Sorten war dagegen nach unterlassener N-Düngung erhöht. Letzteres weist auf ein verstärktes Wurzelwachstum – bei gleichzeitig erhöhter Wurzelsterberate – und damit auf eine erhöhte absolute Assimilatanteile ins Wurzelsystem bei geringerem N-Angebot hin. Auch DRECCER et al. (2000) berichten von mit zunehmender N-Zufuhr tendenziell steigender WLD unter Winterraps, eine Variante ohne N-Düngung gab es in ihrem Versuch allerdings nicht. ALLEN & MORGAN (1972) fanden in einem zweijährigen Versuch unter den Sommerrapsorten *Zollerngold* und *Cresus* ebenfalls eine Verminderung der Wurzel-trockenmasse durch unterlassene N-Düngung.

Auf den ersten Blick scheint der Befund signifikant höherer Wurzellängen in den N-Mangelvarianten in direktem Widerspruch zu den Ergebnissen von ALLEN & MORGAN (1972), BARRACLOUGH (1989) und STEINGROBE (2000) zu stehen. Berücksichtigt man allerdings, daß die N₀-Parzellen auf den Flächen des SFB 192 bereits zum Beginn der Untersuchungen im

siebten Jahr ohne jede N-Düngung bewirtschaftet wurden, während die Versuche der o.g. Autoren auf Flächen durchgeführt wurden, die zuvor über lange Zeiträume praxisübliche Düngermengen erhalten hatten und die N-Zufuhr jeweils nur für den Zeitraum des Versuches, also für ein resp. zwei Jahre ausgesetzt wurde, wird schnell deutlich, daß die Ergebnisse nicht ohne weitere Überlegungen vergleichbar sind.

Parallel zu Wurzeluntersuchungen durchgeführte Messungen (FRAHM 2000) ergaben, daß die organisch gebundenen N-Reserven in den Böden der N-Mangelvarianten aufgrund der langen Zeitdauer ohne N-Düngung gegenüber den mit N gedüngten Standorten signifikant reduziert waren. Der von den Kulturpflanzen aufgenommene und mit dem Erntegut vom Feld entfernte Stickstoff wurde in den N₀-Parzellen über Jahre hinweg nicht ausgeglichen. Die Rückführung von N aus Ernterückständen und Wurzelresten in den Boden war aufgrund deren geringerer N-Gehalte vermindert, die Mineralisierung der Vegetationsreste durch ein erweitertes C/N-Verhältnis erschwert. Die biologische Aktivität in den Böden der N-Mangelvarianten war gegenüber gedüngtem Boden insgesamt vermindert (FRAHM 2000). Die o.g. Prozesse führen in ihrer Summe zu einer von Jahr zu Jahr fortschreitenden Verarmung des Bodens hinsichtlich der N-Versorgung. Als Indiz für die auch nach sieben Jahren weiterhin andauernde „Aushagerung“ der N-Mangelvarianten ist die Tatsache zu werten, daß die Erträge (vgl. Abbildung 3.31) der Nullparzellen von 1997 bis 1999 kontinuierlich zurückgingen. Die mittlere WLD der gedüngten Varianten hatte im Laufe dieser Jahre tendenziell leicht ab-, unter N-Mangel hingegen noch etwas zugenommen. Im in der vorliegenden Arbeit vorgestellten Versuch ist demnach von einer starken „Aushagerung“ der Böden und einem sehr viel massiveren N-Mangel auszugehen, als dies nach ein oder zwei Jahren unterlassener N-Düngung der Fall sein kann.

Da durch ein ausgedehnteres Wurzelsystem größere Bodenvolumina zur N-Akquisition erschlossen werden können, ist in einem verstärkten Wurzelwachstum eine mögliche effektive Anpassungsstrategie an N-Mangel zu sehen, die um so notwendiger erscheint, als die spezifische N-Aufnahmerate der Wurzeln bei reduziertem N-Angebot signifikant abnimmt (DRECCER et al. 2000). Dem entgegen steht eine bei N-Mangel – trotz möglicher hoher potentieller Photosyntheseleistung – insgesamt verminderte Primärproduktion, die bei einer gleichbleibenden Aufteilung der Assimilate eine Einschränkung des Wachstums der gesamten Pflanze, also auch des Wurzelsystems, zur Folge haben müßte. Da der „Minimum Faktor“ (MARSCHNER 1986) im vorliegenden Fall das N-Angebot ist, müßte für eine Kompensation des limitierenden Faktors das „funktionelle Gleichgewicht“ (BROUWER 1983) der Assimilatverteilung zwischen Sproß und Wurzel zugunsten des Wurzelsystems verschoben werden. BECK (1996) nimmt an, daß das Signal für diese „Verschiebung“ von den Wurzeln selbst ausgeht und durch phytohormonelle „Botschaften“, namentlich einer abnehmenden Konzentration bestimmter Cytokinine, ein verstärkter Assimilatexport ins Wurzelsystem ausgelöst wird. In entsprechenden Versuchen mit Brennesseln konnte gezeigt werden, daß nach externer Applikation bestimmter Cytokinine der Anteil der Assimilattranslokation in den Sproß-Haupttrieb stark zunahm (BECK 1996). Auch nach VAN DER WERF & NAGEL (1996) spricht vieles für eine solche phytohormonelle Steuerung der Assimilatverteilung zwischen Sproß und Wur-

zelsystem. (Ob tatsächlich Cytokinine oder zusätzlich weitere Phytohormone die Assimilatverteilung regulieren ist noch nicht abschließend geklärt).

Der N-Status einer Pflanze hängt nach BECK (1996) eng mit der Cytokininkonzentration in den Wurzeln zusammen. Dies legt den Schluß nahe, daß die Reduktion des Cytokinidgehaltes (oder jene anderer Phytohormone die die Assimilatverteilung regulieren bzw. an dieser Regulierung beteiligt sind) um so stärker ausfällt, je ausgeprägter das N-Defizit in der Wurzelumgebung ist. Entsprechend ist eine verstärkte Reaktion, namentlich ein vermehrter Assimilattransfer ins Wurzelsystem zu erwarten. Die Ergebnisse der vorliegenden Arbeit, insbesondere in Relation zu den Resultaten von BARRACLOUGH (1989) und STEINGROBE (2000) stehen in sehr gutem Einklang mit der vorgetragenen Hypothese, die auch die Unterschiede hinsichtlich der eigenen und der zitierten Arbeiten erklären würde: Bei optimalem N-Angebot wird der bei weitem überwiegende Anteil der Assimilate in das Sproßwachstum investiert (BECK 1996). Die Photosyntheseleistung ist sehr hoch, so daß – trotz des relativ geringeren Anteils – größere absolute Mengen an Assimilaten für Aufbau und Unterhalt des Wurzelsystems zur Verfügung stehen. Von suboptimalem N-Angebot bis zu einem moderaten N-Mangel nimmt die relative Assimilattranslokation ins Wurzelsystem zu, die Nettoassimilationsrate hingegen ab, so daß trotz höherer relativer Zuteilung in die Wurzeln Sproß- und – wenngleich in geringerer Rate – auch das Wurzelwachstum zurückgehen (VAN DER WERF & NAGEL 1996). Massiver N-Mangel – wie er in den N₀-Varianten des SFB-Versuches vorliegt – führte bei Raps schließlich zu einer so starken Verschiebung der Assimilatverteilung zugunsten der Wurzeln, daß die absolute Wurzellänge – bei gleichzeitig sehr starker Reduktion des Sproßwachstums – diejenige in den N-gedüngten Varianten überstieg. Eine Rolle könnte hierbei evtl. zusätzlich die durch die verringerte Blattfläche höherer Blätter abnehmende Beschattung unterer Blätter spielen, deren Lichtinterzeption und Photosyntheseaktivität dadurch erhöht wird. Nach FETENE et al. (1993) werden Assimilate aus einem Blatt bevorzugt in naheliegende Senken exportiert, was bedeuten würde, daß die Blätter unterer Schichten, relativ zu höheren Blättern, vermehrt Assimilate ans Wurzelsystem abgeben könnten.

Ein Indiz für durch N-Mangel intensiviertes Wurzelwachstum ist ein von STEINGROBE (2000) sowie MAX & SATTELMACHER (2000) unter Raps bei unterlassener N-Düngung festgestellter tendenziell erhöhter Wurzelumsatz. Nach CALDWELL (1979 zit. Nach WEBER & DAY 1996) besitzen jüngere Wurzeln ein höheres N-Aneignungsvermögen als gealterte. Dadurch könnte ein erhöhter Wurzelumsatz zu einer besseren Nutzung der N-Reserven des Bodens beitragen, da ein größerer Anteil an jungen Wurzeln vorhanden ist und darüber hinaus nach dem Ausschöpfen der in einer Bodenregion verfügbaren N-Reserven ein Teil der C-Verbindungen aus den absterbenden Wurzeln wieder für das Wurzelwachstum in anderen Bodenzonen zur Verfügung stünde. Daß Retranslokationen von C-Verbindungen im Wurzelsystem von Raps in größerem Umfang stattfinden und umgelagerte C-Verbindungen am Aufbau neu gewachsener Wurzeln beteiligt sind, konnte im Rahmen dieses Projektes gezeigt werden (MAX & SATTELMACHER 2000). Gegenüber gedüngten Pflanzen tendenziell erhöhte Wachstums- und Sterberaten und damit einen größeren Anteil jüngerer Wurzeln am Gesamtwurzelsystem fanden auch WEBER & DAY (1996) unter ungedüngten wildwachsenden Gräsern.

Abweichende Pflanzenart- und -sortenspezifische Charakteristika wie sie z. B. im vorliegenden Versuch zwischen Raps und Weizen bzw. Gerste festgestellt wurden, könnten mit Unterschieden hinsichtlich N-Bedarf, zeitlichem Verlauf der N-Aufnahme, Vegetationsentwicklung sowie verschiedenen Gewichtung- und Regulationsmustern bezüglich der Assimilatverteilung zwischen Sproß und Wurzel zusammenhängen. So finden sich in der Literatur sowohl Beispiele für bereits bei suboptimaler gegenüber hoher N-Versorgung erhöhter DWI unter Mähwiesen (JAVORKOVÁ & GÁBORCÍK 1992), als auch für gegenüber höherer N-Versorgung geringerer DWI unter extremem N-Mangel wie z.B. bei Gerste nach 6 Jahren ohne N-Düngung (HANSSON et al. 1991) oder unter Dünenvvegetation (WEBER & DAY 1996). POMMER (1983) ermittelte bei sonst gleichen Bedingungen bei WW und Sommergerste durch Unterlassen der N-Düngung reduzierte, bei Hafer jedoch gesteigerte DWI. GEISLER & KRÜTZFELD (1983) stellten hinsichtlich der N-Effekte sowohl zwischen verschiedenen Arten als auch einzelnen Sorten der gleichen Arten Unterschiede fest. Ergebnisse anderer Autoren zeigen darüber hinaus, daß die Reaktionsmuster durch sich verändernde Umweltfaktoren modifiziert werden können. So fanden z.B. HAMBLIN et al. (1990) bei ausreichender Wasserversorgung die gegenüber N-Mangel höhere DWI unter mit N gedüngtem Weizen. Umgekehrt war in einem extrem trockenen Jahr die Durchwurzelung bei N-limitierten Bedingungen intensiver. GEISLER & MAARUFI (1975) beobachteten diesen Effekt in Gefäßversuchen mit Mais. Auch veränderte CO₂-Konzentration der Luft (FITTER et al. 1996, COTRUFO & GORISSEN 1997), Lichtintensität (SATTELMACHER et al. 1993, ZAGAL 1994), Temperatur (FORBES et al. 1997) oder Kurz-/Langtag-Bedingungen (BECK 1996) können die Reaktionsmuster beeinflussen.

Neben der Stärke des N-Mangels könnte der Zeitpunkt der Adaption der Pflanzen an N-limitierte Bedingungen eine Rolle für die Entwicklung des Wurzelsystems spielen. Im ersten Jahr der Umstellung einer zuvor über Jahre mit konventionellen N-Düngermengen versorgten Ackerfläche auf Bewirtschaftung ohne N-Düngung ist nicht von gravierendem N-Mangel auszugehen. Insbesondere in der vorwinterlichen Entwicklung steht den Pflanzen noch die gleiche Menge N zur Verfügung wie auf den Flächen, die weiterhin N-Düngung erhalten sollen. Erst nach der ersten N-Gabe, die zu Raps in der Regel am Ende des Winters erfolgt, beginnt eine Differenzierung des N-Angebotes. Demgegenüber waren die Rapspflanzen in den N-Mangelvarianten des hier diskutierten Versuches ab dem Moment der Aussaat stark N-limitierten Bedingungen unterworfen.

KUTSCHERA (1960) weist darauf hin, daß besonders in frühen Stadien der Pflanzenentwicklung das Wurzelwachstum durch N-Mangel stark angeregt wird. Bestätigt wird dies durch Gefäßversuche von GEISLER & KRÜTZFELD (1983) mit Sommergerste, Mais und Ackerbohnen, SMOLDERS & MERCKX (1992) mit Spinat, ZAGAL et al. (1993) mit Gerste sowie FETENE et al. (1993) mit Brennesseln, in denen die Pflanzen in den ersten Wochen nach der Keimung jeweils unter geringerem N-Angebot deutlich größere Wurzelbiomassen entwickelten als unter höherem N-Düngungsniveau. Dies deutet darauf hin, daß für eine Adaption der Pflanzen an N-Mangel das N-Angebot in einer frühen Phase der Pflanzenentwicklung entscheidend ist. In den N-Mangelvarianten des hier diskutierten Versuches fanden die Pflanzen schon zur Keimung massiven N-Mangel vor. Dementsprechend war eine Anpassung an den N-Mangel bereits in der ersten Phase der vegetativen Entwicklung möglich.

Die These, daß eine frühe Adaption an N-limitierte Standortbedingungen eine Vergrößerung des Wurzelsystems als Reaktion auf N-Mangel begünstigt, wird durch Ergebnisse von GASS und OERTLI (1980) untermauert, die zeigen, daß die DWI im Boden einer 15 Jahre vor dem Versuch brachgefallenen gegenüber einer gedüngten Wiese sehr stark erhöht war. Demgegenüber beobachteten VAN DER WERF & NAGEL (1996), daß bei Pflanzen, die unter optimalem N-Angebot angezogen wurden, nach einer Überführung in N-limitiertes Milieu die relative Wachstumsrate (RGR) (nach einem kurzzeitigem Anstieg der $RGR_{(Wurzel)}$) sowohl der Wurzel als auch des Sprosses langfristig abnahm, wobei die $RGR_{(Sproß)}$ anfänglich stärker betroffen war. Auffällig ist weiterhin, daß verringertes Wurzelwachstum bei reduzierter N-Zufuhr überwiegend in Feldversuchen, in denen die N-Zufuhr nur für die Versuchsdauer ausgesetzt wurde oder in Gefäßversuchen mit Ackerboden festzustellen war, während in Langzeitfeldversuchen, Nährlösungsxperimenten oder Studien in artifiziellem – also vor Versuchsbeginn N-freiem – Substrat häufiger gesteigertes Wurzelwachstum unter N-Mangel beobachtet wurde.

Neben den unmittelbaren Effekten der N-Düngung könnten einige andere Faktoren für die signifikant höhere DWI in den ungedüngten Varianten mitverantwortlich sein oder sich verstärkend auswirken. So stellte FRAHM (2000) auf den Flächen des SFB 192 fest, daß der Bodenwassergehalt in den N-Mangelvarianten (z.T. signifikant) geringer war als in den gedüngten Varianten. Die höhere Bestandesdichte und Blattfläche der gedüngten Pflanzen führt zu stärker Beschattung und geringeren Windgeschwindigkeiten an der Bodenoberfläche und damit höchstwahrscheinlich zu verminderter Evaporation. Mit steigender N-Düngung wurden unter Sommerraps (ALLEN & MORGAN 1972), Gerste und Mais (GEISLER & MAARUFI 1975) sowie Wildgräsern (SCHUURMANN & KNOT 1974) abnehmende relative Transpirationsraten festgestellt, so daß der absolute Wasserverbrauch mit zunehmender N-Düngung nur leicht gesteigert wird und die abnehmende Evaporation diesen Effekt insgesamt überkompensiert. Nach KUTSCHERA (1960) führt – in gewissen Grenzen, die extremen Wassermangel oder das Auftreten anaerober Bedingungen ausschließen – abnehmender Bodenwassergehalt relativ zum Sproß zu größeren Wurzelmassen. In Feldversuchen von KJELLSTRÖM & KIRCHMANN (1994) mit Raps, BARRACLOUGH & LEIGH (1984), FRANKEN & FAYED (1983) sowie HAMBLIN et al. (1990) mit Weizen und GEISLER (1983) mit Ackerbohne wurden jeweils in trockenen Jahren sehr viel höhere DWI ermittelt als in feuchteren Jahren. Auch STUDER et al. (1992) stellten in Gefäßversuchen mit Mais unter leichtem Wasserstreß erhöhte Wurzelmassen gegenüber „optimal“ bewässerten Pflanzen fest.

Weiterhin ist nicht auszuschließen, daß auch Sortenunterschiede die Reaktionen auf N-Mangel modifizieren. STEINGROBE (2000) stellte z.B. zu bestimmten Entwicklungsstadien (s.o.) signifikante Unterschiede im Wurzelwachstum zwischen den Winterrapssorten *Lirajet* und *Bristol* fest. Auch deren Reaktion auf N-Mangel fiel unterschiedlich aus. So war unter *Bristol* zur Ernte 1997 bei N-Mangel höhere, unter *Lirajet* jedoch geringere DWI ausgebildet. Experimente von GEISLER & GRÜTZFELD (1983) zeigten, daß nicht nur zwischen verschiedenen Arten, sondern auch zwischen den Sorten einer Art Unterschiede hinsichtlich der N-Effekte auf das Wurzelwachstum bestehen können.

Eine zusätzliche Reduzierung der Wurzelbiomasse in den gedüngten Varianten könnte evtl. durch Fraß von Bodenorganismen verursacht worden sein. Mikrobielle Biomasse und Aktivität, Regenwurmabundanzen und -biomassen sowie die Fraßaktivität der Bodenfauna war unter N-Mangel auf den SFB-Flächen erheblich reduziert (FRAHM 2000). Auch BAEUMER (1980) fand höhere Regenwurm-Biomassen in gedüngten gegenüber ungedüngten Böden. CORTEZ & BOUCHE (1992) konnten zeigen, daß Regenwürmer lebende Wurzeln in erheblichem Umfang als Nahrungsquelle nutzen.

Der **Einfluß der Bodenbearbeitung** wurde beim Raps bereits durch die unterschiedliche Morphologie der Pfahlwurzel in den Pflug- bzw. Horschvarianten ersichtlich (vgl. Abbildung 3.3), deren Eindringen bei Anwendung der Frässohlensaat in Bodenschichten unterhalb der Frässohle in Übereinstimmung mit Ergebnissen von METTE (1987) stark behindert war.

Der Besatz der Primärwurzel mit Seitenwurzeln sowie der Verzweigungsgrad des Wurzelsystems war in Nähe der Bodenoberfläche augenscheinlich stark erhöht. Selbst auf sandigem Substrat beobachteten BONARI et al. (1995), daß das Tiefenwachstum der Rapsfahlwurzel bereits im zweiten Jahr nach der Umstellung auf reduzierte Bodenbearbeitung signifikant gehemmt war. BAEUMER et al. (1971) und gleichermaßen ELLIS et al. (1977) berichten von ähnlichen Effekten bei Gerste, deren Keim- und Seiten- sowie sproßbürtigen Wurzeln in bearbeitetem Löß- resp. Tonboden bevorzugt in die Tiefe, in unbearbeitetem Boden nach Direktsaat jedoch verstärkt in seitliche Richtung wuchsen. PEARSON & GOSS (1974) beobachteten unter Gerste generell eine starke Akkumulation der Wurzeln oberhalb der Bearbeitungsgrenze bei reduzierter Bodenbearbeitung und massiv gehemmtes Tiefenwachstum. Darüber hinaus stellten ELLIS et al. (1977) bei Gerste sowie FINNEY & KNIGHT (1973) bei Weizen unter Direktsaat/reduzierter Bearbeitung ein – gegenüber gepflügtem Boden – signifikant verlangsamtes Längenwachstum der primären Seitenwurzeln und eine frühere, verstärkte Verzweigung des Wurzelsystems fest, welches sich in der Oberkrume vorwiegend in horizontaler Richtung ausbreitete.

Wie aufgrund des gehemmtem Tiefenwachstums der Pfahlwurzel zu erwarten war, blieb auch die WLD in den Horschvarianten unterhalb der Frässohle konsistent über alle Beobachtungstermine in drei Jahren und unabhängig vom N-Düngungsniveau stets deutlich hinter den gepflügten Varianten zurück. Die Varianzanalyse, die mit den Mittelwerten der Termine Ernte und Blüte aus den drei Jahren durchgeführt wurde, bestätigte die Signifikanz dieses Befundes (Abbildung 3.33). In den meisten Fällen war die Einschränkung der Durchwurzelung der Unterkrume so stark, daß auch die Gesamt-WLD der Horschvarianten gegenüber den gepflügten Böden signifikant reduziert war. In der Oberkrume lag – besonders ausgeprägt zur Ernte – ein sich mit zunehmender N-Düngungsstufe verstärkender Trend zu intensiverer Durchwurzelung der gepflügten Böden vor. Unterhalb 30 cm war kein Einfluß der Bodenbearbeitung mehr vorhanden. Nahezu identisch waren die Auswirkungen der reduzierten Bodenbearbeitung auf die DWI unter Gerste und Weizen (nur 1997 untersucht), die ebenso wie unter Raps in den Horschvarianten in der Unterkrume durchweg geringer war.

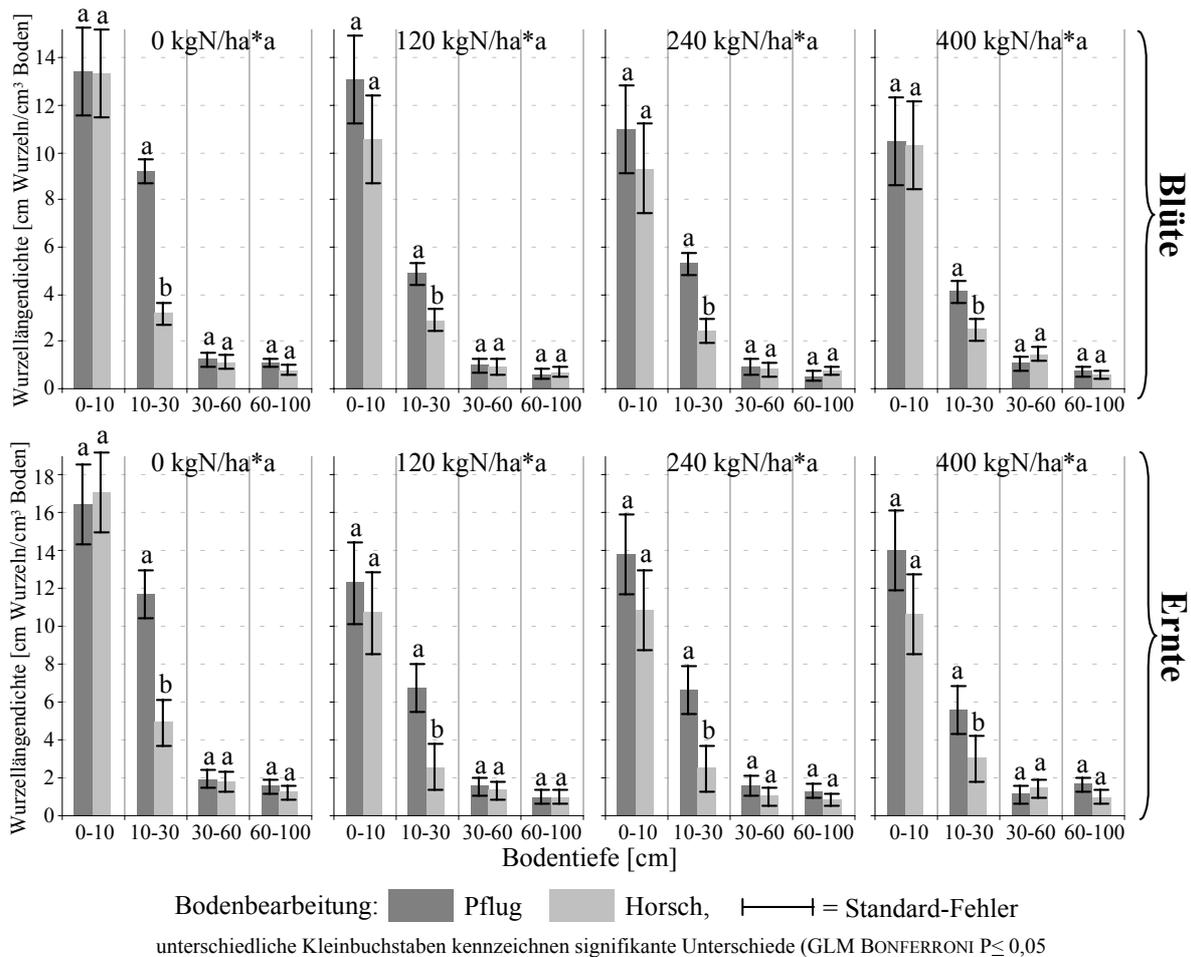


Abbildung 3.33: Wurzellängendichten von Winterraps zur Blüte und zur Ernte im Mittel über drei Jahre (1997-1999) in Abhängigkeit von der Bodenbearbeitung differenziert nach N-Düngungsstufe und Bodentiefe

Zu weitestgehend übereinstimmenden Ergebnissen kommt METTE (1987) bei einem Vergleich zwischen Pflug und Fräse auf einer zuvor 10 Jahre differenziert bearbeiteten pseudovergleyten Parabraunerde aus Löß: WMD und WLD von Pfahl-, Seiten-, und Feinwurzeln der WR-Sorte *Korina* (nach WG) waren in der Bodenschicht unterhalb der Fräsohle der gefrästen Böden während Rosettenstadium, Blüte und Ernte stets signifikant geringer als in gepflügtem Boden. Ergebnisse von BONARI et al. (1995) zeigen, daß die Dauer der Anwendung einer reduzierten Bodenbearbeitung einen entscheidender Faktor hinsichtlich der Beeinflussung der Wurzelentwicklung darstellt. So stellten sie auf Sandboden in der Toscana in den ersten zwei Jahren nach der Umstellung von Pflug auf Scheibenegge jeweils zur Blüte eine – in der Oberkrume signifikant – verstärkte Wurzel-TM-Produktion unter Winterraps in reduziert bearbeitetem Boden fest. Bereits im zweiten Jahr wurden die Differenzen zwischen den Varianten geringer, unterhalb der Bearbeitungstiefe der Egge war nun die gepflügte Variante signifikant intensiver durchwurzelt. Im dritten Jahr war schließlich die DWI in der gepflügten Variante, vor allem unterhalb der Oberkrume, signifikant höher. Eine ähnliche Entwicklung der Bodendurchwurzlung in den ersten vier Jahren eines Vergleiches zwischen Pflug und Direktsaat beschreiben ELLIS et al. (1979) auf tonigen Böden. Die Böden der Horschvarianten

auf den SFB-Flächen wurden bereits seit 1990 reduziert bearbeitet, so daß von stabil etablierten Effekten der Bodenbearbeitung auszugehen ist.

Unter Bodenbedingungen, die denen der SFB-Flächen vergleichbar waren, beobachteten HARRACH & VORDERBRÜGGE (1991), nach langjährig differenzierter Bodenbearbeitung unter Zuckerrübe verminderte DWI in der Unterkrume bei insgesamt gleichmäßigerer Durchwurzelung des Gesamtprofils in der reduziert bearbeiteten Variante (Flügelschargrubber/Rototegge). BRAIM et al. (1992) unter Gerste auf sandigem Lehm sowie COMIA et al. (1994) unter Hafer und KARUNATILAKE et al. (2000) unter Mais auf tonigem Lehm stellten ebenfalls mit jeder Reduktion der Bearbeitungsintensität eine Abnahme der DWI in allen untersuchten Bodenschichten (bis 110, 50 resp. 70 cm) fest, wobei insbesondere Hafer unterhalb der Bearbeitungsgrenze der Scheibenegge sowie Mais in allen Bodentiefen signifikant weniger Wurzeln entwickelt hatten. BAEUMER et al. (1971) und BAEUMER (1980) stellten keine signifikanten Unterschiede der DWI zwischen unbearbeiteten und gepflügten Löß-Parabraunerden fest. Hafer und Weizen zeigten einen Trend zu abnehmender, Gerste hingegen zu höherer WLD nach Direktsaat.

In Studien auf ausgeprägt sandigen oder tonigen Substraten wurden häufig geringere Unterschiede oder sogar gesteigerte DWI durch Reduktionen der Bearbeitungsintensität festgestellt. So berichten HARRACH & VORDERBRÜGGE (1991) unter Zuckerrüben sowie SEYFARTH et al. (1999) unter Triticale von mit der Bearbeitungsintensität deutlich abnehmender DWI auf Sandböden. ELLIS & BARNES (1980) fanden in Tonböden höhere WLD nach Direktsaat während des Schossens von Gerste; bis zur Blüte hatten sich die Unterschiede durch höhere Zuwachsraten in den Pflugvarianten jedoch ausgeglichen. PEARSON et al. (1991) berichten von generell verbesserter Durchwurzelbarkeit schwerer Tonböden nach einigen Jahren konservierender Bodenbearbeitung und führen dies auf eine stabilisierte Aggregatstruktur sowie den längeren Erhalt von Schrumpfs- und Trockenrißstrukturen zurück, die das Vordringen der Wurzeln in den Boden erleichtern. Im allgemeinen sind tonige Substrate gegenüber Strukturzerstörungen durch Bodenbearbeitung unter ungünstigen Bedingungen und Bodenverdichtungen durch Einsatz schweren Geräts besonders empfindlich (EHLERS 1983).

Untersuchungen, die in den ersten Jahren nach der Umstellung auf reduzierte Bearbeitungsverfahren durchgeführt wurden (z.B. ELLIS et al. 1979, CANNELL et al. 1986, BONARI et al. 1995, LAMPURLANÉS et al. 2001), zeigten, daß Einschränkungen der Durchwurzelbarkeit der nicht gelockerten Bodenschichten sich erst nach einigen Jahren einstellten. In den Jahren direkt nach der Umstellung wurden auf tiefgründigem Substrat z.T. sogar signifikante Steigerungen der DWI festgestellt (CANNELL et al. 1986, BONARI et al. 1995, LAMPURLANÉS et al. 2001). Auf flachgründigen, steinigen Standorten waren durchwurzelungshemmende Effekte (LAMPURLANÉS et al. 2001) und verringertes Tiefenwachstum der Wurzeln (AGENBAG & MAREE 1991) bereits im ersten Jahr mit reduzierter Bearbeitung festzustellen.

Die Beobachtung von Jahr zu Jahr deutlich zunehmender Lagerungsdichten und Eindringwiderstände in den Horizonten unterhalb der Bearbeitungsgrenze der reduziert bearbeiteten Varianten korrespondiert mit der zunehmend gehemmten Wurzelentwicklung. Vor allem der

Übergang vom bearbeiteten zum unbearbeiteten Boden stellte sich – in Übereinstimmung mit den Ergebnissen der vorliegenden Arbeit sowie den Beobachtungen von METTE (1987) – als Hindernis für die Erschließung tiefer liegender Bodenschichten heraus.

TIGGES (pers. Mitteilung, 2000) ermittelte parallel zu den hier ausgewerteten Durchwurzelungsuntersuchungen auf den Flächen des SFB 192 in der Unterkrume (12 cm Bodentiefe) unter Pflug Lagerungsdichten von $1,29 \text{ g/cm}^3$, in der Horschvariante $1,47 \text{ g/cm}^3$. Im Vergleich zu den gepflügten Böden in der Oberkrume deutlich geringere (H: $1,12 \text{ g/cm}^3$, P: $1,29 \text{ g/cm}^3$) in der Unterkrume jedoch wesentlich höhere (H: $1,61 \text{ g/cm}^3$, P: $1,44 \text{ g/cm}^3$) Lagerungsdichten in der Horschvariante des SFB stellte FREY (1998) bereits in der Periode 1994-96 fest. Der mechanische Widerstand, den Wurzeln beim Eindringen in die Bodenmatrix überwinden müssen, ist mit der Lagerungsdichte eng korreliert (BENNIE 1991). Das Gesamtporenvolumen (GPV) eines Bodens geht mit zunehmend dichter Lagerung zurück, die Porengrößenverteilung wird dahingehend verändert, daß der Anteil grober Poren ab- und der feinerer zunimmt, was eingeschränkte Wasserkapazität, hydraulische Leitfähigkeit, Permeabilität und Gasdiffusion zur Folge hat (HELAL 1991). Je nach Bodenart und Verdichtungsgrad kann auch die nFK reduziert werden. Die Untersuchungen von FREY (1998) auf den SFB-Flächen ergaben, daß in der Unterkrume der Horschvarianten gegenüber den gepflügten Böden die nFK leicht verringert war und häufiger und länger andauernd anaerobe Bedingungen auftraten.

Versuche von SCHURMAN (1965) und GOSS (1977) zeigten, daß erhöhter mechanischer Widerstand die Wurzelentwicklung von Gerste resp. Hafer unter kontrollierten Bedingungen im Gefäßversuch erheblich einschränkte. WILSON et al. (1977) sowie HELAL & SAUERBECK (1986) berichten, daß Wurzelanzahl und -länge sowie der Verzweigungsgrad des Wurzelsystems von Gerste resp. Mais um so mehr zurückgehen, je dichter der Boden gelagert ist. Besonders gravierend wirken sich sprunghafte Dichte-Wechsel, wie sie an der Grenze von bearbeitetem zu unbearbeitetem Boden auftreten, auf das Wurzelwachstum in den Schichten unterhalb der Bearbeitungsgrenze aus (SCHURMAN 1965, TENHOLTERN & HARRACH 1992). Ergebnisse von BARRACLOUGH & WEIR (1988), die einen regelrechten „Wurzelstau“ über einer verdichteten Schicht in einem Sandboden beschreiben, sowie von HARRACH & VORDERBRÜGGE (1991), die drastisch abnehmende WLD unterhalb von Schichten mit plötzlichem Übergang von gelockertem zu verdichtetem Boden beobachteten, bestätigen dies. Flachgründiger bearbeitete Böden sind hiervon stärker betroffen als gepflügte, da die Bearbeitungsgrenze näher an der Bodenoberfläche liegt und dadurch das vertikal leicht durchwurzelbare Bodenvolumen reduziert ist.

In den untersuchten Böden auf den Flächen des SFB 192 waren sowohl die Lagerungsdichten in der Unterkrume der Horschvarianten als auch der Dichteunterschied zwischen Ober- und Unterkrume, der zudem sehr viel näher der Bodenoberfläche auftrat, wesentlich größer. Dadurch waren Luft- und Wasserkapazität und -permeabilität reduziert, was häufiger als unter Pflug zu O_2 -Mangel führte (FREY 1998). Durch das Fräsen wird die Bodenstruktur in den oberen 5-10 cm letztlich stärker gestört, der Boden stärker gelockert als durch den Pflug (FREY 1998), was die sehr geringe Lagerungsdichte in dieser Tiefe belegt. Nach (STIRZAKER et al. 1996) kann sich auch zu geringe Bodendichte aufgrund des verminderten Boden-Wurzel-

Kontaktes ungünstig auswirken. Durch das Ablegen des gefrästen Bodenmaterials auf den unbearbeiteten Boden bei der Bodenbearbeitung mit dem Horschsystem ist der Anschluß an das Porensystem unterlagernder Bodenschichten nach der Aussaat zunächst vermindert. Die Kombination der genannten Faktoren muß als sehr hinderlich für das Wurzelwachstum angesehen werden und ist mit größter Wahrscheinlichkeit der Hauptgrund für den Befund signifikant verminderter DWI in den Unterkrumen der Horschvariante.

Der Rückgang der Porenraumkontinuität und des Gesamtporenvolumens, insbesondere des Anteils der Makroporen am GPV, wirkt sich nach CANNELL (1985) in mehrfacher Hinsicht einschränkend auf die Wurzelentwicklung aus: Zum einen nimmt die Anzahl leicht durchwurzelbarer Hohlraumstrukturen (WIERSUM 1957) und deren Kontinuität ab, zum anderen steigt aufgrund von Einschränkungen hinsichtlich Gasaustausch und Wasserleitfähigkeit die Wahrscheinlichkeit des Auftretens von Sauerstoffmangel. Kontinuierliche Grobporen werden von Wurzeln bevorzugt als Wachstumsbahnen genutzt (HELAL 1991) und spielen insbesondere für die Erschließung des Unterbodens eine wichtige Rolle (EHLERS et al. 1983, STIRZAKER et al. 1996). Geringere Luftkapazität und abnehmende O₂-Konzentrationen der Bodenluft führen zu sinkenden Wurzelwachstumsraten bis hin zu zeitweiligem Stillstand bei extremem O₂-Mangel (GEISLER 1978). HELAL & SAUERBECK (1986) konnten weiterhin zeigen, daß trotz geringeren Wurzelwachstums die Assimilattranslokationen ins Wurzelsystem mit zunehmender Bodendichte ansteigen. Dies spricht – ebenso wie die Beobachtung erhöhter unterirdischer CO₂-Produktion in unbearbeitetem Boden (FRANZLUEBBERS et al. 1995^b) – für verstärkte metabolische Aktivität im Wurzelsystem und/oder erhöhte Umsatz- und Exsudationsprozesse mit nachfolgend gesteigerter mikrobieller Aktivität in der Rhizosphäre. Des weiteren stellten SARQUIS et al. (1991) mit steigendem Bodenwiderstand und -wassergehalt erhöhte Ethylenfreisetzung unter Mais fest. Ethylen wird von Pflanzenwurzeln und Bodenorganismen um so mehr produziert, je dichter bzw. feuchter ein Boden ist (HELAL 1991). Erhöhte Partialdrücke von CO₂ (GEISLER 1978) bzw. Ethylen (SMITH & ROBERTSON 1971) bewirken jeweils verringertes Wurzelwachstum. Verstärkt werden diese Effekte im verdichteten Boden zusätzlich durch die Verminderung der Gasdiffusionsraten, die einen verlangsamten Abtransport von CO₂ und Ethylen zur Folge haben, was phasenweise zu Anreicherungen dieser Gase im Boden, mit entsprechenden Konsequenzen für das Wurzelwachstum, führen kann.

Berichte über Erfahrungen mit dem Horschsystem im Vergleich zur Bodenbearbeitung mit dem Pflug geben BORCHERT (1988), DIEZ et al. (1988) sowie FLIEGER et al. (1988). Die beiden erstgenannten Studien beziehen sich auf den gleichen Versuch, in dem die Kulturen Sommerweizen und Silomais auf zuvor bereits seit 16-18 resp. 6-8 Jahren mit dem Horschsystem bestellten Löß-Parabraunerden angebaut wurden. FLIEGER et al. (1988) untersuchten die Auswirkungen der Horsch-Bearbeitung auf Löß-Parabraunerden und Gipskeuper-Pelosoilen, die bereits seit über 20 Jahren reduziert bearbeitet wurden sowie einer seit 5-8 Jahren mittels Horschsystem bestellten Braunerde auf Buntsandstein. In beiden Versuchen wurden in Übereinstimmung mit den Ergebnissen des SFB-Versuches gegenüber den gepflügten Böden erhöhte Lagerungsdichten bzw. Eindringwiderstände in der gesamten Krume festgestellt. Das GPV war auf den Horsch-Standorten verringert. Besonders ausgeprägt waren die Unterschiede auf dem Tonboden. Mit Ausnahme des 20jährig gehorschten Lößbodens war der

Grobporenanteil gegenüber der Pflugvariante verringert. Angaben zum Wurzelwachstum der Kulturpflanzen finden sich in den genannten Arbeiten leider nicht.

Weitestgehend übereinstimmende Ergebnisse hinsichtlich der bodenphysikalischen Parameter wurden auch unter anderen Verfahren reduzierter Bodenbearbeitung ermittelt. In einem bei weitem überwiegenden Teil vergleichender Studien zu reduzierter gegenüber konventioneller Bodenbearbeitung wurden – unabhängig von der Art des Bearbeitungsverfahrens – erhöhte Lagerungsdichten festgestellt, mit entsprechenden Konsequenzen hinsichtlich Eindringwiderstand, GPV, Porenraumkontinuität, Porengrößenverteilung sowie Luft- und Gashaushalt in den durch die Reduktion der Bodenbearbeitung betroffenen Bodenschichten. Dies gilt sowohl für sandige (CZERATZKI & RUHM 1971, FINNEY & KNIGHT 1973, PEARSON & GOSS 1974, CHANEY et al. 1985, BARRACLOUGH & WEIR 1988, CARTER 1992^a, BRAIM et al. 1992, BONARI et al. 1995), schluffige (HAMMEL 1989, CHRISTIAN & BACON 1990, TEBRÜGGE & DÜRING 1999), lehmige (HILL & CRUSE 1985, BALL et al. 1994, BALL & ROBERTSON 1994, FRANZLUEBBERS et al. 1995^b, TEBRÜGGE & DÜRING 1999) und tonige Substrate (CZERATZKI & RUHM 1971, CLUTTERBRUCK & HODGSON 1984, CHRISTIAN & BACON 1990, COMIA et al. 1994), als auch für flachgründige, steinige Böden (AGENBAG & MAREE 1991, LAMPURLANÉS et al. 2001). Häufig weisen auch die Schichten unterhalb der Krume höhere Dichten auf, während die Oberkrume in Abhängigkeit vom Bearbeitungsverfahren gegenüber gepflügtem Boden entweder dichter oder, wie auf den SFB-Flächen nach Anwendung der Fräsohlsaat, lockerer sein kann. Mit zunehmender Dauer der reduzierten Bearbeitung war zumeist ein Anwachsen der Unterschiede festzustellen. Nach Einsatz von Pflug oder anderem tieflockerndem Gerät sind nach der Bearbeitung aufgrund von Sackung des gelockerten Bodens stärkere Veränderungen im Jahresverlauf zu beobachten, während die Dynamik hinsichtlich der bodenphysikalischen Eigenschaften in reduziert oder unbearbeitetem Boden erheblich ausgeglichener ist (EHLERS 1973, FRANZLUEBBERS 1995^b) und die Aggregatstabilität erhöht ist (CHANEY et al. 1985, DIEZ et al. 1988, SCHJØNNING & RASMUSSEN 1989, CARTER 1992^b, RASMUSSEN 1999).

In einigen der genannten Arbeiten wurden auch die Bodenwassergehalte und -temperaturen ermittelt. Ohne Ausnahme wurden mit abnehmender Bearbeitungsintensität – z. Zt. signifikant – steigende Wassergehalte festgestellt (HAMBLIN & TENNANT 1981, HAMMEL 1989, CHRISTIAN & BACON 1990, BALL & ROBERTSON 1994, FRANZLUEBBERS et al. 1995^b, ARSHAD & GILL 1997). Gleiches berichtet BORCHERT (1988) von gehorschten Böden. Als Ursache für diese Beobachtungen werden geringere hydraulische Leitfähigkeit und dadurch geringere Infiltrationsgeschwindigkeit angeführt. FRANZLUEBBERS et al. (1995^a) stellten morgens stets höhere Temperaturen an der Oberfläche unbearbeiteter Böden fest, im Verlauf von sonnigen Tagen erwärmten sich jedoch regelmäßig die gepflügten Böden stärker. Von gegenüber gepflügten geringerer Erwärmung minimal bearbeiteter Böden berichten auch EKEBERG & RILEY (1997) sowie DIEZ et al. (1988) bei Anwendung des Horschsystems. Wenngleich vermutlich in vergleichsweise geringem Umfang könnten auch niedrigere Temperaturen sowie höhere Bodenfeuchte zu einer Verminderung des Wurzelwachstums beitragen. Auf den Flächen des SFB ist eine solche Erklärung jedoch auszuschließen, da hier abweichend von den o.g. Ergebnissen höhere Wassergehalte stets in der Krume der Pflugvarianten festgestellt wur-

den (FRAHM 2000). Ausschlaggebend dürfte hierfür jedoch weniger die Bodenbearbeitung als vielmehr die abweichende hydrologische und geländeklimatische Situation der Varianten innerhalb der Versuchsanlage (Horsch am Oberhang, Pflug im Unterhang- und Hangfußbereich) sein.

Neben der Veränderung der aufgeführten bodenphysikalischen Eigenschaften der Krume, in denen höchstwahrscheinlich die Hauptursache für die beobachtete Verringerung der DWI unter reduzierter Bodenbearbeitung zu sehen ist, wurden von FRAHM (2000) auch Unterschiede hinsichtlich der chemischen und biologischen Bodenverhältnisse beobachtet. In der Krume der gepflügten Böden lag der pH geringfügig, aber signifikant niedriger (P: 6,6, H:6,7) als unter Frässlensaatsaat. Der Gehalt an organischem Kohlenstoff (C_t) war unter Pflug tendenziell leicht erhöht, die N_t -Gehalte beider Varianten waren gleich. Unterschiede zwischen den Bearbeitungsverfahren gab es erwartungsgemäß hinsichtlich der Verteilung zwischen Ober- und Unterkrume, wobei sich sowohl pH und C_t , als auch der Wassergehalt in der Krume der gepflügten Böden sehr ausgeglichen zeigten, während in der Oberkrume der gehorschten Böden eine Anreicherung der organischen Substanz festzustellen war: Sowohl C_t und N_t als auch der Wassergehalt waren in der Oberkrume gegenüber der Unterkrume signifikant erhöht, der pH tendenziell saurer.

Der Befund von Anreicherung von organischer Substanz in den oberen Schichten der Krume reduziert bearbeiteter Böden wird durch Ergebnisse anderer Autoren durchgängig bestätigt und ist fast immer signifikant. Zumeist wird auch von absolut größeren C_{org} -Gehalten (BAEUMER 1980, CHANEY et al. 1985, FLIEGER et al. 1988, CARTER 1992^b, BALL et al. 1994, BØRRESEN & NIØS 1994, COMIA et al. 1994, FRANZLUEBBERS et al. 1996, EKEBERG & RILEY 1997) und – sofern diese Parameter bestimmt wurden – Anreicherungen der Makronährstoffe N, P und K (BAEUMER 1980, CLUTTERBRUCK & HODGSON 1984, FLIEGER et al. 1988, EKEBERG & RILEY 1997) in der Krume un- oder reduziert bearbeiteter Böden berichtet. BALL et al. (1994) sowie EKEBERG & RILEY (1997) stellten in dieser Schicht darüber hinaus stark erhöhte Mg- und Mn- resp. Ca-Gehalte fest. Eine Akkumulation von Nährstoffen in der Oberkrume der Horschvariante könnte eine Ursache für den sich mit zunehmender N-Düngung verstärkenden Trend zu geringerer WLD unter reduzierter Bodenbearbeitung sein.

Signifikant gegenüber der Pflugvariante erhöht waren in Übereinstimmung mit Ergebnissen von FLIEGER et al. (1988) mikrobielle Biomasse und -aktivität in der Krume der nach dem System Horsch bearbeiteten Böden (FRAHM 2000). Wiederum war eine ausgeprägte Differenzierung zwischen Ober- und Unterkrume festzustellen. Die Regenwurmabundanzen waren entgegen den Erwartungen in den gepflügten Böden höher, wobei der Anteil der anektischen Arten (z.B. *Lumbricus terrestris*), die permanente vertikale Wohnröhren anlegen, unter Horsch höher war. FRAHM (2000) führt den Befund geringerer Regenwurmabundanzen unter Horsch auf die ungünstigeren hydrologischen Bedingungen dieser Variante zurück. In anderen Studien wurden überwiegend erhöhte Abundanzen von Regenwürmern ermittelt (BAEUMER 1980, FLIEGER et al. 1988, BALL & ROBERTSON 1994, RASMUSSEN 1999).

CLUTTERBRUCK & HODGSON (1984) fanden unter Direktsaat eine höhere Anzahl, in gefrästem Boden jedoch weniger Regenwürmer als in gepflügtem Boden. Dabei überwogen – ähnlich den Befunden von FRAHM (2000) auf den SFB-Flächen – unter Pflug flachgrabende, unter Fräse hingegen tiefgrabende Arten. Dies legt den Schuß nahe, daß der intensive Eingriff durch die Fräse zu stärkeren Schädigungen der Tiere im Oberboden führt, als das Pflügen, was auch FREY (1998) hinsichtlich der Horschvarianten des SFB annimmt.

Zu hinsichtlich der bodenphysikalischen Parameter von den bisher zitierten Quellen grundsätzlich abweichenden Ergebnissen kommen EKEBERG & RILEY (1997) auf einem Lehmboden (Moräne) in Norwegen: Von minimaler über flache bis hin zur Pflugbodenbearbeitung nahm die Lagerungsdichte mit gesteigerter Bearbeitungsintensität zu, GPV, Makroporenanteil und Permeabilität nahmen hingegen ab. Vor allem die Unterschiede zwischen der minimal bearbeiteten und der gepflügten Variante waren meist hoch signifikant. Die naheliegendste Erklärung für diesen zum allgemeinen Trend der Ergebnisse konträren Befund ist die außergewöhnliche Dauer der Experimente, die im 16. Jahr nach der Umstellung auf Minimalbearbeitung durchgeführt wurden, in Kombination mit der – gegenüber den meisten anderen Untersuchungen – radikaleren Reduzierung der Bodenbearbeitung. Untersuchungen auf einem nahezu im natürlichen Zustand befindlichen Lößlehm (Walwiese) zeigten, daß im Vergleich mit einem gepflügten Ackerstandort, der abgesehen von den spezifischen Veränderungen durch langjährige ackerbauliche Nutzung, sehr ähnliche pedologische Eigenschaften aufwies, GPV und Makroporenanteil bis in eine Tiefe von 60 cm ebenfalls sehr deutlich erhöht waren (HARTGE 1983). Es ist daher nicht auszuschließen, daß eine Zeitspanne von 9 Jahren für die Entwicklung eines ungestörten Bodengefüges mit einem stabilen Makroporensystem nicht ausreicht, bzw. daß bereits eine Bodenbearbeitung mit der Fräse eine solche Entwicklung verhindert.

4.2.3. Zeitlicher Verlauf der Wurzelentwicklung

Die zeitliche Entwicklung des Wurzelsystems von Winterraps wurde in der vorliegenden Untersuchung im mittleren Versuchsjahr 1998 von kurz nach dem Auflaufen der Pflanzen bis zur Ernte verfolgt. Vom ersten Beobachtungstermin bis zur Reife überwog im Mittel aller Varianten Wurzelwachstum, erst danach Wurzelabbau, so daß der Höhepunkt der Durchwurzelung erst zur Reife erreicht war (vgl. Abbildungen 3.16 und 3.17) In den trockeneren Jahren 1997 (Abbildung 3.5) und 1999 (Abbildung 3.29) war die maximale DWI erst am Erntetermin ausgebildet.

Vom Rosettenstadium bis zur Ernte anwachsende Wurzellängen und –massen fand METTE (1987) bei der Winterrapsorte *Korina*. POMIKALCO (1992) und STEINGROBE (2000) (Sorten *Lirajet* und *Bristol*) ermittelten die größte DWI von Raps zur Reife. Unter den Sommerrapsorten *Zollerngold* und *Cresus* fanden ALLEN & MORGAN (1972) die größte DWI ebenfalls während der Entwicklung der Schoten. Demgegenüber war die maximale Ausdehnung der Wurzelsysteme in Versuchen von BARRACLOUGH (1989) mit der Sorte *Bienvenu*, KJELLSTRÖM & KIRCHMANN (1994) (Sorte *Hanna*) bereits zur Blüte erreicht. Bis zur Ernte

nahm die Wurzellänge bei BARRACLOUGH (1989) und STEINGROBE (2000) stark ab, während ALLEN & MORGAN (1972) sowie KJELLSTRÖM & KIRCHMANN (1994) im Zeitraum zwischen maximaler DWI und Ernte nur leichte Rückgänge bzw. Stagnation der Wurzellänge registrierten. Auch für andere Arten finden sich abweichende Angaben in der Literatur: Unter Weizen z.B. wurde von BÖHM (1978) sowie ASSENG et al. (1997) die größte DWI zur Blüte ermittelt, während in Untersuchungen von BARRACLOUGH & LEIGH (1984) die WL von der Aussaat bis kurz vor der Ernte in zwei Jahren kontinuierlich anstieg. KÄTTERER et al. (1993) berichten von einem Maximum der Wurzelbiomasse von WW während der Reife. FRANKEN & FAYED (1983) fanden die höchsten Wurzelrockenmassen unter WW im Versuchsjahr 1979 hingegen schon zu Beginn der Blüte bzw. bereits zum Schossen (1980) vor. Unter Gerste ermittelten HANSSON et al. (1991) sowie STEINGROBE et al. (2001) ebenso wie POMIKALKO (1992) unter Sommer- und Winterroggen die größten Wurzelbiomassen erst deutlich nach der Blüte. Ein sehr frühes Erreichen der maximalen DWI bereits während des Blatt-Sproßwachstums beobachtete POMIKALKO (1992) bei Mais im Versuchsjahr 1988. Ein Jahr später war hingegen die maximale DWI auf zwei von drei Standorten erst zur Ernte ausgebildet.

Der Höhepunkt der Durchwurzelung ist, wie aus den hier vorgestellten Daten sowie der zitierten Literatur hervorgeht, nicht wie – vor allem in älterer Literatur (z.B. BERGMANN 1953) – z.T. postuliert wird, an einen fixen Zeitpunkt gebunden und ebensowenig pflanzenartspezifisch, sondern kann in Abhängigkeit von äußeren Einflüssen wie z.B. Witterungsverlauf (FRANKEN & FAYED 1983), Bodentyp (POMIKALKO 1992) Nährstoffangebot (ASSENG et al. 1997) und -verfügbarkeit (GLIEMEROTH 1953) und Bodenwassergehalt (GEISLER 1982) stark variieren. Darüber hinaus konnte BARRACLOUGH (1989) zeigen, daß die zeitliche Entwicklung von Wurzelsystemen und damit auch der Zeitpunkt ihrer maximalen Ausdehnung stark vom Aussaattermin beeinflußt wird.

Der zeitliche Verlauf der Wurzelentwicklung des Winterraps verlief 1998 nicht kontinuierlich, sondern war von starken Schwankungen zwischen den einzelnen Terminen mit in den meisten Varianten zwei „Gipfeln“ während Schossen und Reife und einem verminderten Wurzelwachstum während der Blüte gekennzeichnet. Auffällig war hierbei, daß phasenweise eine gegenläufige Entwicklung zwischen einzelnen Bodenschichten festzustellen war, was durch einen Blick auf die zeitlichen Verläufe der relativen Wachstumsraten sofort augenscheinlich wird (Abbildungen 3.34 und 3.35): besonders kräftigem Wurzelzuwachs in einer Schicht stand häufig ausgeprägter Wurzelabbau in einer anderen gegenüber. Evtl. ist dies im Zusammenhang mit einer sich verändernden Angebotssituation hinsichtlich Wasser- und/oder Nährstoffen im Bodenprofil und unterschiedlichem Bedarf entsprechend den Entwicklungsstadien der Rapspflanzen zu sehen. Für diese These sprechen u.a. Beobachtungen von GLIEMEROTH (1953), in dessen Versuchen mit Gerste und Hafer stets dort die größte Menge an Wurzeln wuchs, wo die höchste N-Düngung angeboten wurde, und auch durch P bzw. K das Wurzelwachstum in derjenigen Bodenschicht stimuliert wurde, in der die Nährstoffe appliziert wurden, während in den ungedüngten Bodenschichten der relative Anteil der Wurzelmasse zurückging.

Einen ähnlichen, alternierenden Verlauf der Wurzelentwicklung von Winterraps mit zwei Maxima beschreiben ALLEN & MORGAN (1972), KJELLSTRÖM & KIRCHMANN (1994), DRECCER et al. (2000) und STEINGROBE (2000). Aus den Daten von BARRACLOUGH (1989), POMIKALKO (1992), sowie KJELLSTRÖM & KIRCHMANN (1994) ist zudem in Übereinstimmung mit den hier vorgestellten Ergebnissen eine gegenläufige Entwicklung zwischen Unter- und Oberboden zu erkennen, die von den genannten Autoren jedoch nicht diskutiert wird. Auch unter einigen anderen Arten wird von im Jahresverlauf stark alternierendem Wurzelbestand berichtet (z.B. SEN & TANWAR 1983). Ausgeglichenener, zumeist mit nur einem Maximum, wird die zeitliche Entwicklung des Wurzelbestandes der Getreidearten Weizen (BÖHM 1978, FRANKEN & FAYED 1983, BARRACLOUGH & LEIGH 1984, HAMBLIN et al. 1990, KÄTTERER et al. 1993, ASSENG et al. 1997), Gerste (HANSSON et al. 1987), Mais und Sommerroggen (POMIKALKO 1992), sowie wildwachsender Gräser (WEBER & DAY 1996) beschrieben, wobei die Daten von FRANKEN & FAYED (1983), BARRACLOUGH & LEIGH (1984) sowie POMIKALKO (1992) auch bei Winterweizen resp. Mais/Sommerroggen nebeneinander Auf- und Abbau von unterirdischer Biomasse in verschiedenen Bodenschichten erkennen lassen. Im Gegensatz dazu ermittelten KÄTTERER et al. (1993) unter Weizen, HANSSON et al. (1987) bei Gerste, POMIKALKO (1992) bei Winterroggen sowie WEBER & DAY (1996) unter natürlicher Grasvegetation eine über alle untersuchten Bodenschichten gleichförmige Wurzelentwicklung.

Ein eindeutiger **Einfluß der N-Düngung** auf den zeitlichen Verlauf der Wurzelentwicklung von Winterraps war weder aus den hier vorgestellten Ergebnissen, noch aus den Daten von BARRACLOUGH (1989) oder STEINGROBE (2000) abzuleiten. Besonders deutlich wird dies bei einer Betrachtung der relativen Wachstumsraten (Abbildung 3.34).

Hier zeigt sich, daß besonders unter Pflug die zeitliche Abfolge von Wurzelzuwachs und -abbau von der N-Düngung unbeeinflusst bleibt. In den gehorschten Böden ist unter geringer und fehlender N-Düngung eine Verschiebung zu erkennen, die mit einem verkürzten Vegetationszyklus unter N-limitierten Bedingungen zusammenhängen könnte. Für das Auftreten von Phasen überwiegenden Wurzelwachstums bzw. -abbaus scheint in erster Linie der Witterungsverlauf des jeweiligen Versuchsjahres eine entscheidende Rolle zu spielen, wofür auch Befunde von KJELLSTRÖM & KIRCHMANN (1994) sprechen, die in zwei Jahren bei sonst konstanten Versuchsbedingungen stark veränderte Muster der zeitlichen Durchwurzelungsdynamik von Winterraps fanden. Im in der vorliegenden Arbeit vorgestellten Versuch hatte die DWI 1997 und 1999 z.B. zwischen Blüte und Ernte zumeist zugenommen, während 1998 Wurzelabbau überwog.

Höhere N-Düngung führte 1997 in den gepflügten Böden zwischen Blüte und Ernte – besonders ausgeprägt im Unterboden – zu erhöhten relativen Wurzelwachstumsraten. Unter Frässohlensaat hingegen lagen die Zuwachsraten um so höher, je weniger N die Pflanzen erhielten (vgl. Abbildung 3.35). 1998 und 1999 bestätigten sich diese Trends jedoch nicht. Zu Beginn der vegetativen Entwicklung des Erntejahres 1998 zeigte sich das Wurzelwachstum durch höhere N-Düngung noch in allen Varianten beschleunigt. Im Verlauf der Vegetationsperiode veränderte sich das Bild jedoch erheblich. Während die Wur-

zelentwicklung zwischen Blüte und Ernte in der Variante P0 am dynamischsten war, blieb sie unter Horsch sehr ausgeglichen. Unter Frässohlensaar war die Wurzelentwicklung in den N-limitierten Varianten gegenüber den hoch gedüngten stark verändert: N-Mangel hatte ein verfrühtes Erreichen der maximalen WLD bereits zur Blüte zur Folge.

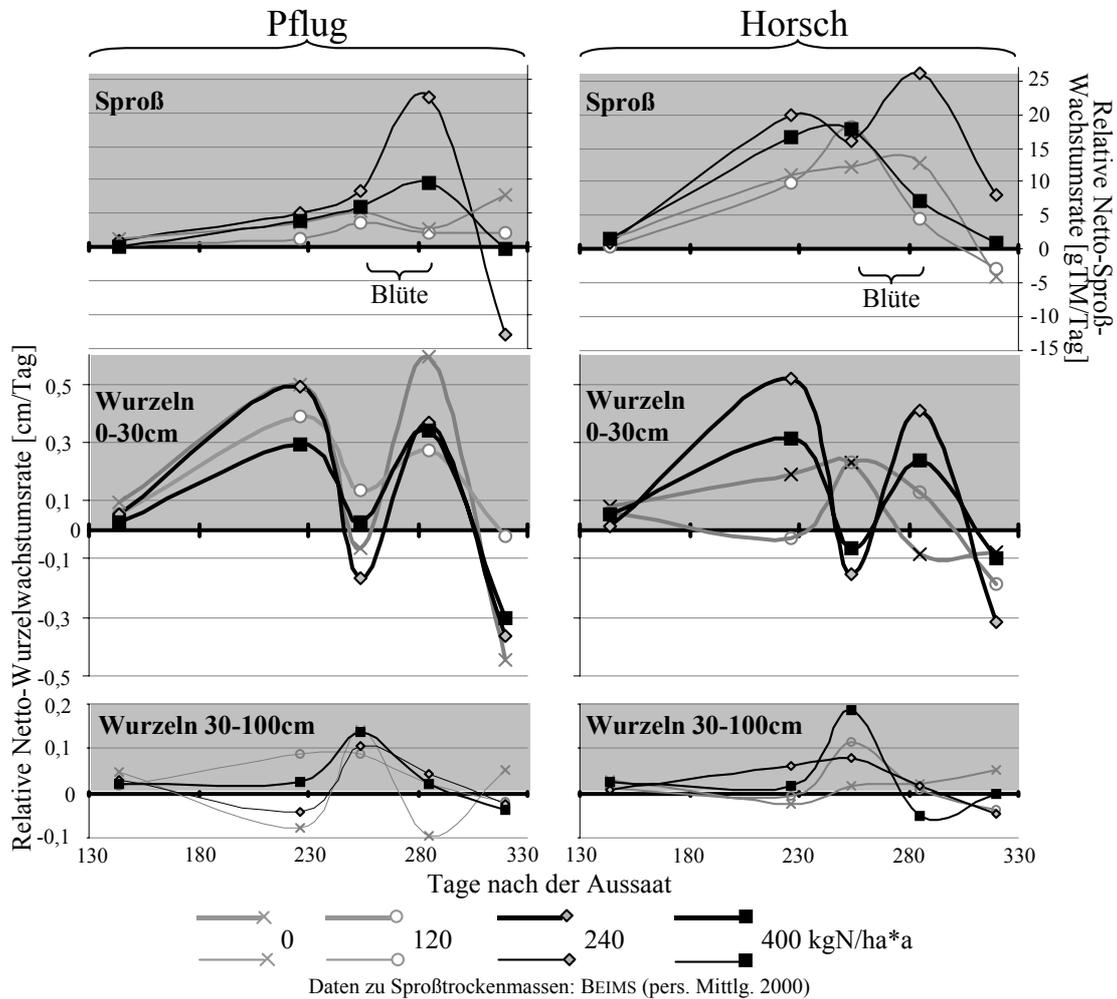


Abbildung 3.34: Relative Wachstumsraten von Winterraps (Sproß und Wurzeln) in Abhängigkeit von der N-Düngung, differenziert nach Bodenbearbeitung und Bodentiefen (grau unterlegt: Zuwachsrate > Abbauraten)

1999 fiel ein sehr starkes Ansteigen der DWI zur Ernte unter N-Mangel auf, dem geringere Zuwächse (Pflugvarianten) bzw. Wurzelabbau (Horschvarianten) unter hoher N-Düngung gegenüberstanden.

Etwas ausgeprägter war der **Einfluß der Bodenbearbeitung** auf den zeitlichen Verlauf der Netto-Wurzelentwicklung von Winterraps. 1997 standen nur zwei Probenahmetermine zur Verfügung, zwischen denen unter beiden Bodenbearbeitungsverfahren durchgängig in allen Bodentiefen Wurzelzuwachs festzustellen war. Die Zuwachsraten in der Oberkrume lagen bei fehlender/geringer N-Düngung in den Horschvarianten und bei hoher N-Zufuhr in den gepflügten Böden höher. In der Unterkrume war stets unter Pflug stärkeres Wurzelwachstum festzustellen.

1998 verlief der Wechsel von Phasen mit Überwiegen von Wurzelwachstum bzw. -abbau bei hoher N-Zufuhr zwischen beiden Bodenbearbeitungsverfahren weitestgehend parallel (Abbildung 3.35). Bei N-Mangel resp. geringem N-Angebot hingegen wichen die zeitlichen Entwicklungsmuster der Horschvarianten erheblich von jenen unter Pflug ab. In H0 war die maximale DWI abweichend von allen übrigen Varianten bereits zur Blüte erreicht. Die relativen Wachstumsraten nahmen danach bis zur Ernte ab. 1999 traten die größeren Schwankungen der Oberkrumendurchwurzelung bei geringem N-Niveau in den Horschvarianten und bei hohem N-Niveau unter Pflug auf. In der Unterkrume war die Wurzelentwicklung stets in den gepflügten Böden weitaus dynamischer.

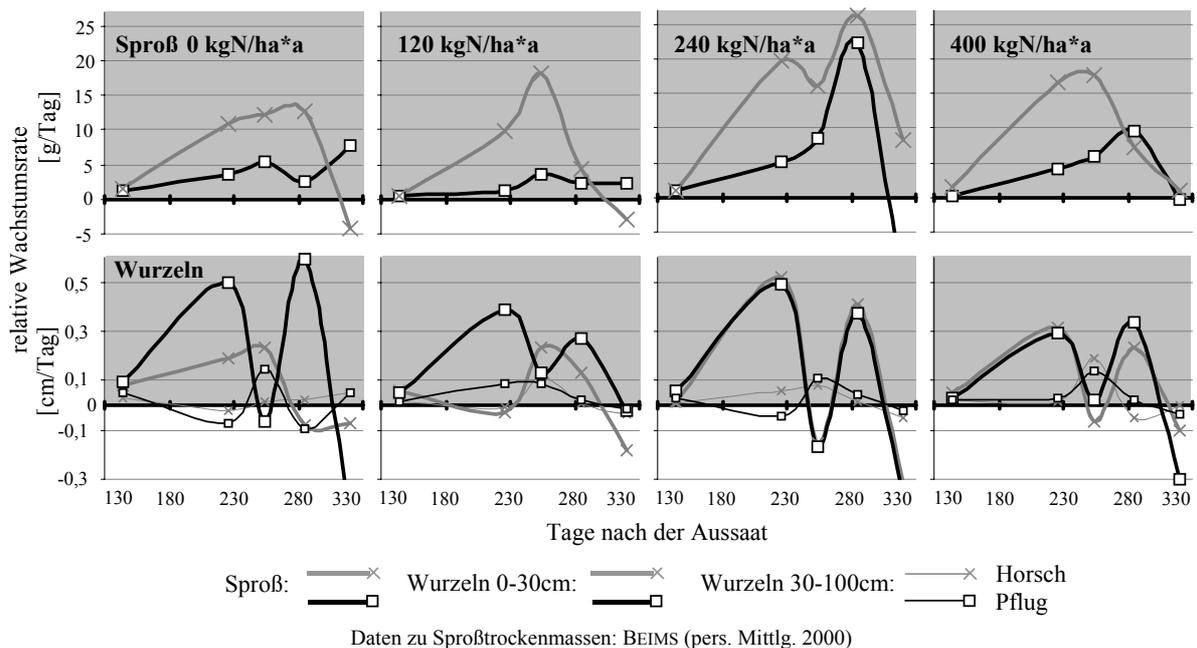


Abbildung 3.35: Relative Wachstumsraten von Winterraps (Sproß und Wurzeln) in Abhängigkeit von der Bodenbearbeitung, differenziert nach N-Niveau und Bodentiefen (grau unterlegt: Zuwachsrate > Abbaurate)

Insgesamt stellte sich, in Übereinstimmung mit Ergebnissen von METTE (1987), der im Vergleich Fräse/Pflug ebenfalls geringere zeitliche Variationen der Unterkrumen-DWI nach Anwendung der Fräse feststellte, die Dynamik der Wurzelentwicklung unter Horsch-Bodenbearbeitung zumeist erheblich ausgeglichener dar. Gegenüber reduzierter Bodenbearbeitung fielen die Schwankungen der DWI in gepflügtem Boden zwischen den einzelnen Terminen – insbesondere in der Unterkrume – häufig wesentlich stärker aus. Traten stärkere Schwankungen im gehorschten Boden auf, so blieben diese in den meisten Fällen auf die Oberkrume beschränkt. Dies könnte ein Hinweis darauf sein, daß eine Lockerung des Bodens Reaktionen des Wurzelsystems auf sich kurzfristig verändernde äußere Bedingungen erleichtert und/oder eine über längeren Zeitraum reduzierte Bodenbearbeitung zu stabileren und homogeneren Bodenbedingungen führt.

4.3. Sproß-Wurzel-Relationen

Das Sproß/Wurzelverhältnis (S/W) von Winterraps wurde mit fortschreitender Dauer der Vegetationsperiode in allen Behandlungsvarianten zunehmend weiter (vgl. Abbildungen 3.23 - 3.25). Dies entspricht der durchschnittlichen Entwicklung von einjährigen Kulturpflanzen, die in frühen Phasen der Pflanzenentwicklung zunächst meist einen Schwerpunkt des Wachstums im Wurzelsystem aufweisen, der sich mit zunehmender Entwicklung immer mehr auf den Sproß verschiebt. So wurde eine entsprechende Entwicklung des S/W unter Winterraps ebenfalls von BARRACLOUGH (1989) und DRECCER et al. (2000) beobachtet. Andere Kulturpflanzenarten, wie z.B. Mais (ANDERSON 1988), Winterweizen (BARRACLOUGH et al. 1989, KÄTTERER et al. 1993, DRECCER et al. 2000) und Wintergerste (BRAIM et al. 1992) weisen dieselbe Dynamik auf.

Nach WERGER (1983) ist das S/W und dessen Entwicklung im Verlauf der Entwicklung einer Pflanzenart genetisch festgelegt, kann aber in weiten Grenzen durch Umwelteinflüsse modifiziert werden. Nach BECK (1996) führen limitierende Bedingungen im Boden, also der direkten Umwelt des Wurzelsystems, vornehmlich zu reduzierten, Einschränkungen in der „Sproßumwelt“ eher zu erhöhten Sproß/Wurzelverhältnissen. Dementsprechend wurden Auswirkungen der Versuchsfaktoren, insbesondere der N-Düngung, auf das S/W erwartet.

Einfluß der N-Düngung

Gesteigerte N-Düngung hatte eine starke Erhöhung des S/W des Winterraps zur Folge. Dieser Befund wurde mit zunehmendem Pflanzenalter immer ausgeprägter (vgl. Abbildung 3.23 und 3.24). Daß die relative Assimilatverteilung zwischen Sproß und Wurzel sich bei N-Mangel zugunsten des Wurzelsystems verschiebt, gilt als allgemein anerkannt (TENNANT 1976, SATTELMACHER et al. 1990, BECK 1996) und wird auch für Raps durch die Resultate von BARRACLOUGH (1989), STEINGROBE (1998) und DRECCER et al. (2000) bestätigt, aus deren Ergebnissen hervorgeht, daß sich das Sproß/Wurzelverhältnis unter N-Mangel stark verengt. Dieser Effekt wurde auch bei anderen Kulturpflanzen wie z.B. Gerste (GEISLER & MAARUFI 1975, HANSSON et al. 1987, JOHANSSON 1992, GOSS et al. 1993), Weizen (BARRACLOUGH et al. 1989, HAMBLIN et al. 1990), Kartoffeln (SATTELMACHER et al. 1990), Mais (GEISLER & MAARUFI 1975, ANDERSON 1988), Tomaten (STEINECK 1983) oder Spinat (SMOLDERS & MERCKX 1992) beobachtet. Gleiches wird von verschiedenen ein- und mehrjährigen Grasspecies berichtet (TILMAN & WEDIN 1991, COTRUFO & GORISSEN 1997) Demnach wird bei reduzierter N-Düngung ein größerer Anteil der produzierten Assimilate ins Wurzelsystems investiert (HANSSON et al. 1991). Mögliche Ursachen hierfür wurden in den vorangegangenen Abschnitten ausführlich diskutiert.

Einfluß der Bodenbearbeitung

Mit Ausnahme des Variantenpaares mit 240 kg/ha*a N-Düngung lag das S/W in den gepflügten Böden stets deutlich über dem der Horschvarianten. Übereinstimmende Resultate in Versuchen mit reduzierter Bodenbearbeitung wurden unter Winterweizen (CANNELL et al. 1986, HAMBLIN et al. 1990) sowie Hafer (CANNELL et al. 1986) ermittelt. BRAIM et al. (1992) fanden bei Gerste nach reduzierter Bodenbearbeitung mit der Zinkenegge engere, nach Di-

rektsaat jedoch deutlich höhere S/W gegenüber gepflügtem Boden. Ebenso berichten CHANEY et al., daß sich das S/W unter Sommergerste nach Direktsaat gegenüber Pflug fast verdoppelte. HUGHES et al. (1992) ermittelten unter Mais und Hafer ein Ansteigen des S/W mit jeder Reduzierung der Bearbeitungsintensität. In den genannten Beispielen war ein sich verengendes S/W zumeist eine Folge von relativ zum Sproß stärker vermindertem Wurzelwachstum. In den übrigen Fällen war das Sproßwachstum stärker beeinträchtigt als die Wurzelentwicklung. Welcher Teil der Pflanze überwiegend betroffen ist, dürfte neben der Bodenbearbeitung noch durch andere Faktoren mitbestimmt worden sein.

Für die in der vorliegenden Arbeit festgestellte Minderung des S/W durch reduzierte Bodenbearbeitung dürfte vor allem das aufgrund der erhöhten Lagerungsdichte in der Unterkrume eingeschränkte Wurzelwachstum verantwortlich sein. Versuche von GOSS (1977) sowie MÜLLER et al. (1990) ergaben, daß sich mit zunehmender Bodendichte das S/W unter Gerste stark verengte. Untersuchungen von HELAL & SAUERBECK (1986) zeigten darüber hinaus, daß der Assimilattransfer ins Wurzelsystem und der Verbrauch durch die unterirdischen Pflanzenorgane in verdichtetem Boden zunimmt.

Insgesamt bleibt festzuhalten, daß sowohl eine Reduktion der N-Zufuhr als auch der Bodenbearbeitung in Relation zum Sproß zu verstärkten Investitionen ins Wurzelsystem führte.

Eine Betrachtung der zeitlichen Entwicklung der Wurzelsysteme sowie der relativen Wachstumsraten verdeutlichte, daß im Verlauf der Vegetationsperiode auch Phasen auftreten, in denen der Abbau von Wurzeln deren Neubildung überwiegt. Auch in Zeiten überwiegenden Wurzelwachstums ist von einem parallelen Wurzelabbau auszugehen. Versuche z.B. von SAUERBECK & JOHNNEN (1976) und HENDRICK & PREGITZER (1996) belegen dies. Der Anteil abgestorbener Wurzeln wird mit der Bohrkernmethode nicht erfaßt, so daß durch diese nur die Netto-Entwicklung beschrieben werden kann. Es ist jedoch sehr wahrscheinlich, daß N-Düngung und Bodenbearbeitung auch Lebensdauer der Wurzeln sowie Wurzelumsatz und Rhizodeposition beeinflussen. Dieser Komplex wird im folgenden Teil dieser Arbeit ausführlich behandelt.

5. Literatur

- AGENBAG, G. A. & P. C. J. MAREE (1991): Effect of tillage on some soil properties, plant development and yield of spring wheat (*Triticum Aestivum* L.) in stony soil. In: Soil & Tillage Research 21 (1-2), S. 97-112.
- ALLEN, E. J. & D. G. MORGAN (1972): A quantitative analysis of the effects of nitrogen on the growth, development and yield of oilseed rape. In: Journal of Agricultural Science, Cambridge 78, S. 315-324.
- ANDERSON, E. L. (1988): Tillage and N fertilization effects on maize root growth and root:shoot ratio. In: Plant and Soil 108 (2), S. 245-251.
- ANDRÉN, O., A. C. HANSSON & K. VÉGH (1993): Barley nutrient uptake, root growth and depth distribution in two soil types in a rhizotron with vertical and horizontal mini-rhizotrons. In: Swedish Journal of Agricultural Research 23 (3), S. 115-126.
- ARSHAD, M. A. & K. S. GILL (1997): Barley, canola and wheat production under different tillage-fallow-green manure combinations on a clay soil in a cold, semiarid climate. In: Soil & Tillage Research 43, S. 263-275.
- ASSENG, S., C. RICHTER & G. WESSOLEK (1997): Modelling root growth of wheat as the linkage between crop and soil. In: Plant and Soil 190, S. 267-277.
- BAEUMER, K. (1980): Stickstoffdüngung zu Getreide bei reduzierter Bodenbearbeitung. In: Kali Briefe 15 (2), S. 77-90.
- BAEUMER, K., W. EHLERS & G. PAPE (1971): Erste Erfahrungen im Anbau ohne Bodenbearbeitung in Göttingen. In: Landw. Forsch., Sonderheft 26 (1), S. 264-272.
- BALL, B. C. & E. A. G. ROBERTSON (1994): Soil structural and transport properties associated with poor growth of oilseed rape in soil direct drilled when wet. In: Soil & Tillage Research 31. S. 118-133.
- BALL, B. C., R. W. LANG, E. A. G. ROBERTSON & M.F. FRANKLIN (1994): Crop performance and soil conditions on imperfectly drained loams after 20-25 years of conventional tillage or direct drilling. In: Soil & Tillage Research 31. S. 97-118.
- BARRACLOUGH, P. B. & A. H. WEIR (1988): Effects of a compacted subsoil layer on root and shoot growth, water use and nutrient uptake of winter wheat. In J. agric. Sci., Camb. 110 (2), S. 207-216.
- BARRACLOUGH, P. B. & R. A. LEIGH (1984): The growth and activity of winter wheat roots in the field: the effect of sowing date and soil type on root growth of high-yielding crops. In: J. agric. Sci., Camb. 103, S. 59-74.
- BARRACLOUGH, P. B. (1984): The growth and activity of winter wheat roots in the field: root growth of high-yielding crops in relation to shoot growth. In: J. agric. Sci., Camb. 103, S. 439-442.

- BARRACLOUGH, P. B. (1989): Root growth, macro-nutrient uptake dynamics and soil fertility requirements of a high-yielding winter oilseed rape crop. In: *Plant and Soil* 119, S. 59-70.
- BARRACLOUGH, P. B., H. KUHLMANN & A. H. WEIR (1989): The Effects of Prolonged Drought and Nitrogen Fertilizer on Root and Shoot Growth and Water Uptake by Winter Wheat. In: *Journal of Agronomy and Crop Science* 163 (5), S. 352-360.
- BECK, E. H. (1996): Regulations of shoot/root ratio by cytokinins from roots in *Urtica dioica*: Opinion. In: *Plant and Soil* 185, S. 3-12.
- BEIMS, S. (2000): pers. Mitteilung, Institut für allgemeinen Pflanzenbau der Christian-Albrechts-Universität zu Kiel.
- BENNIE, A. T. P. (1991): Growth and mechanical Impedance. In: WAISEL, Y., A ESHEL & U. KAFKAFI (Hrsg.): *Plant Roots. The Hidden Half*. Marcel Dekker, Inc. New York, Basel, Hong Kong, S. 309-330.
- BERGMANN, W. (1953): Wurzelwachstum und Ernteertrag. In: *Ber. der schw. Bot. Ges.* 97, S. 337-368.
- BIOLOGISCHE BUNDESANSTALT FÜR LAND- UND FORSTWIRTSCHAFT (Hrsg.) (1997): *Growth Stages of Plants/Entwicklungsstadien von Pflanzen*. BBCH-Monograph. Blackwell Wissenschaftsverlag Berlin, Wien, Oxford, Edinburgh, Boston, London, Melbourne, Paris, Tokio.
- BÖHM, W. & U. KÖPKE (1977): Comparative root investigations with two profile wall methods. In: *Acker- und Pflanzenbau (J. Agronomy & Crop Science)* 144, S. 297-303.
- BÖHM, W. (1978): Untersuchungen zur Wurzelentwicklung bei Winterweizen. In: *Z. Acker- und Pflanzenbau* 147, S. 264-269.
- BÖHM, W. (1979): *Methods of studying root systems*. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, New York.
- BONARI, E., M. MAZZONCINI. & A. PERUZZI (1995): Effects of conventional and minimum tillage on winter oil seed rape (*Brassica napus* L.) in a sandy soil. In: *Soil & Tillage Research* 33 (2), S. 91-108.
- BORCHERT, H. (1988): Bodenphysikalische Veränderungen eines Lößbodens bei langjähriger pflugloser Bewirtschaftung. In: *Bayerisches Landwirtschaftliches Jahrbuch* 65 (7), S. 813-824.
- BØRRESEN, T. & A. NIØS (1994): The effect of ploughing depth and seedbed preparation on crop yield, weed infestation and soil properties from 1940 to 1990 on a loam soil in south eastern Norway. In: *Soil and Tillage Research* 32, S. 21-39.
- BOWEN, G. D. (1991): Soil Temperature, Root Growth, and Plant Function. In: WAISEL, Y., A ESHEL & U. KAFKAFI (Hrsg.): *Plant Roots. The Hidden Half*. Marcel Dekker, Inc. New York, Basel, Hong Kong, S. 309-330.

- BRAIM, M. A., K. CHANEY & D. R. HODGESON (1992): Effects of simplified cultivation on the growth and yield of spring barley on a sandy loam soil. 2. Soil physical properties and root growth; root:shoot relationships; inflow rates of nitrogen; water use. In: *Soil & Tillage Research* 22 (1-2), S. 173-187.
- BROUWER, R. (1983): Functional equilibrium: sense or nonsense? In: *Neth. J. Agric. Sci.* 10, S. 399-408.
- BRÜCK, H. (1998): Varietal Differences in Yield, root size and water-use-efficiency in pearl millet (*pennisetum glaucum* L.). Dissertation. In: BLUME, H.-P., R. HORN, J. LAMP, B. SATTELMACHER (Hrsg.): *Schriftenreihe Institut für Pflanzenernährung und Bodenkunde Universität Kiel* 46.
- CANNELL, R. Q. (1985): Reduced tillage in North-West Europe – a review. In: *Soil & Tillage Research* 5, S. 129-177.
- CANNELL, R. Q., D. G. CHRISTIAN & F. K. G. HENDERSON (1986): A study of mole drainage with simplified cultivation for autumn-sown crops on a clay soil. 4. A comparison of direct drilling and mouldboard ploughing on drained and undrained land on root and shoot growth, nutrient uptake and yield. In: *Soil & Tillage Research* 7 (3), S. 251-272.
- CARTER, M. R. (1992^a): Characterizing the soil physical condition in reduced tillage system for winter wheat on a fine sandy loam using small cores. In: *Canadian Journal of soil science* 72, S. 395-402.
- CARTER, M. R. (1992^b): Influence of reduced tillage systems on organic matter, microbial biomass, macro-aggregate distribution and structural stability of the surface soil in humid climate. In: *Soil & Tillage Research* 23 (4), S. 361-372.
- CHRISTIAN, D. G. & E. T. G. BACON (1990): A long-term comparison of ploughing, tine cultivation and direct drilling on the growth and yield of winter cereals and oilseed rape on clayey and silty soils. In: *Soil & tillage Research* 18, S. 311-331.
- CLUTTERBRUCK, B. J. & D. R. HODGESON (1984): Direct drilling and shallow cultivation compared with ploughing for spring barley on a clay loam in northern England. In: *Journal of Agricultural Science* 102 (1), S. 127-134.
- COMIA R. A., M. STENBERG, P. NELSON, T. RYDBERG & I. HAKANSSON (1994): Soil and crop responses to different tillage systems. In: *Soil & Tillage Research* 29, S. 335-355.
- CORTEZ, J. & M. B. BOUCHE (1992): Do earthworms eat living roots? In: *Soil Biology and Biochemistry* 24 (9), S. 913-915.
- COTRUFO, M. F. & A. GORRISEN (1997): Elevated CO₂ enhances below-ground C allocation in three perennial grass species at different levels of N-availability. In: *New Phytologist* 137 (3), S. 421-431.
- CZERATZKI, W. & E. RUHM (1971): Ergebnisse aus Versuchen mit bearbeitungsloser Bestellung. In: *Landw. Forsch.* 24, Sonderheft 26 (1), S. 264-272.

- DIEZ, T., J. KREITMAYR, & H. WEIGELT (1988): Einfluß langjähriger pflugloser Ackerbewirtschaftung (System HORSCH) auf Pflanzenwachstum, Wirtschaftlichkeit und Boden. In: Bayerisches Landwirtschaftliches Jahrbuch 65 (7), S. 789-812.
- DRECCER, M. F., A. H. C. M. SCHAPENDONK, G. A. SLAFER & R. RABBINGE (2000): Comparative response of wheat and oilseed rape to nitrogen supply: absorption and utilisation efficiency of radiation and nitrogen during the reproductive stages determining yield. In: Plant and Soil 220 (1-2), S. 189-205.
- EHLERS, W. (1973): Gesamtporenvolumen und Porengrößenverteilung in unbearbeiteten und bearbeiteten Lößböden. In: Z. Pflanzenernährung und Bodenkunde 134, S. 193-207.
- EHLERS, W. (1983): Auswirkungen der Bodenbearbeitung mit schwerem Gerät und der Bodenbearbeitung auf das Bodengefüge und Pflanzenwachstum. In Kali-Briefe 16 (9), S. 499-516.
- EHLERS, W., U. KÖPKE, F. HESSE & W. BÖHM (1983): Penetration resistance and root growth of oats in tilled and untilled loess soils. In: Soil & Tillage Research 3, S. 261-275.
- EKEBERG, E. & H. C. F. RILEY (1997): Tillage intensity on soil properties and crop yield in a long-term trial on morainic loam soil in southeast Norway. In: Soil & Tillage Research 42, S. 277-293.
- ELLIS, F. B & B. T. BARNES (1980): Growth and development of root systems of winter cereals grown after different tillage methods including direct drilling. In: Plant and Soil 55, S. 283-295.
- ELLIS, F. B., J. G. ELLIOT, B. T. BARNES & K. R. HOWSE (1977): Comparison of direct drilling, reduced cultivation and ploughing on the growth of cereals 2.: Spring Barley on a sandy loam soil: physical conditions and root growth. In: J. agric. Sci., Camb. 89, S. 631-642.
- ELLIS, F. B., J. G. ELLIOT, F. POLLARD, R. Q. CANNELL & B. T. BARNES (1979): Comparison of direct drilling, reduced cultivation and ploughing on the growth of cereals. 3. Winter wheat and spring barley on a calcareous clay. In: J. agric. Sci., Camb. 93, S. 391-401.
- ENNIK, G. C. & T. B. HOFMANN (1983): Variation in the root mass of regrass types and its ecological consequences. In: Neth. J. Agric. Sci. 31, S. 325-334.
- FETENE, M., I. MÖLLER & E. BECK (1993): The effect of nitrogen supply to *Urtica dioica* L. plants on the distribution of Assimilate Between Shoot and Roots. In: Botanica Acta 106 (3), S. 228-234.
- FINNEY, J. R. & B. A. G. KNIGHT (1973): The effect of soil physical conditions produced by various cultivation systems on the root development of winter wheat. In: J. Agric. Sci., Camb. 80, S. 435-442.
- FITTER, A. H. (1991): Characteristics and Functions of Root Systems. In: WAISEL, Y., A. ESHEL & U. KAFKAFI (Hrsg.): Plant Roots. The Hidden Half. Marcel Dekker, Inc. New York, Basel, Hong Kong, S. 3-25.

- FITTER, A. H., G.K. SELF, J. WOLFENDEN, M. M. I. VAN VUUREN, T. K. BROWN, L. WILLIAMSON, J. D. GRAVES & D. ROBINSON (1996): Root production and mortality under elevated atmospheric carbon dioxide. In: *Plant and Soil* 187, S. 299-306.
- FLIEGER, J., D. GEHLEN, & D. SCHRÖDER (1988): Der Einfluß konventioneller und minimaler Bodenbearbeitung (Horsch-System) auf physikalische chemische und biologische Bodeneigenschaften bei leichten, mittelschweren und schweren Böden. In: *VDLUFA-Schriftenreihe* 28, 403-412.
- FORBES, P. J., K. E. BLACK & J. E. HOOKER (1997): Temperature-induced alteration to root longevity in *Lolium perenne*. In: *Plant and Soil* 190, S. 87-90.
- FRAHM, A. (2000): Das Edaphon in Oberböden einer norddeutschen Jungmoränenlandschaft unter dem Einfluß verschiedener Bewirtschaftungsmaßnahmen. Dissertation. In: BLUME, H.-P., R. HORN, J. LAMP & B. SATTELMACHER (Hrsg.): *Schriftenreihe Institut für Pflanzenernährung und Bodenkunde Universität Kiel* 55.
- FRANKEN, H. & E. S. FAYED (1983): Zur Wurzelbildung bei Winterweizen in Abhängigkeit von Bodentiefe und N-Düngung. In: BÖHM, W., L. KUTSCHERA & E. LICHTENEGGER (Hrsg.): *Wurzelökologie und ihre Nutzanwendung / Root Ecology and its practical application*. Bundesanstalt Gumpenstein, S. 453-462.
- FRANZLUEBBERS, A. J., F. M. HONS & D. A. ZUBERER (1995^a): Tillage and Crop effects on seasonal soil carbon and nitrogen dynamics. In: *Soil Science Society of America Journal* 59 (6), S. 1618-1624.
- FRANZLUEBBERS, A. J., F. M. HONS & D. A. ZUBERER (1995^b): Tillage-induced seasonal changes in soil physical properties affecting soil CO₂ evolution under intensive cropping. In: *Soil & Tillage Research* 34 (1), S. 41-60.
- FRANZLUEBBERS, A. J., F. M. HONS & D. A. ZUBERER (1996): Seasonal dynamics of active soil carbon and nitrogen pools under intensive cropping in conventional and no tillage. In: *Z. Pflanzenernährung und Bodenk.* 159 (4), S.343-349.
- FREY, D. (1998): Eignung des Systems Horsch als reduzierte Bodenbearbeitung zur Förderung der Bodenfruchtbarkeit auf Böden des Östlichen Hügellandes in Schleswig-Holstein. Dissertation. In: BLUME, H.-P., A. FINCK, R. HORN, B. SATTELMACHER (Hrsg.): *Schriftenreihe Institut für Pflanzenernährung und Bodenkunde Universität Kiel* 43.
- GEISLER, G. (1978): Der Lufthaushalt des Bodens in seiner Bedeutung für das Pflanzenwachstum. In: *Kali-Briefe* 14 (1), S. 61-78.
- GEISLER, G. (1982): Untersuchungen zur Adaption des Wurzelsystems als Organ der Wasser- und Nährstoffaufnahme an unterschiedliche Bodenbedingungen. In: *Z. Acker- und Pflanzenbau (J. Agronomy & Crop Science)* 151, S. 99-117.
- GEISLER, G. (1983): Untersuchungen zur Ökologie der Wurzelsysteme landwirtschaftlicher Kulturpflanzen (Mais, Ackerbohne, Gerste). In: BÖHM, W., L. KUTSCHERA & E. LICHTENEGGER (Hrsg.): *Wurzelökologie und ihre Nutzanwendung / Root Ecology and its practical application*. Bundesanstalt Gumpenstein, S. 173-183.

- GEISLER, G. & B. KRÜTZFELD (1983): Untersuchungen zur Wirkung von „Stickstoff“ auf die Morphologie, die Trockenmassenbildung und die Aufnahmeleistung der Wurzelsysteme von Mais-, Sommergersten und Ackerbohnsorten unter Berücksichtigung der Temperatur. I Wurzelmorphologie. In: Z. Acker- und Pflanzenbau 152, S. 336-353.
- GEISLER, G. & D. MAARUFI (1975): Der Einfluß des Bodenwassergehaltes und der Stickstoffdüngung auf Pflanzenwachstum, Wurzelmorphologie, Transpiration und Stickstoffaufnahme. In: Z. Acker- und Pflanzenbau 141, S. 211-230.
- GLATZEL, G. (1983): Root distribution and soil water depletion in an oak-hornbeam stand (*Quercus petraea*, *Q. robur*, *Carpinus betulus*) and spruce thicket (*Picea abies*). In: BÖHM, W., L. KUTSCHERA & E. LICHTENEGGER (Hrsg.): Wurzelökologie und ihre Nutzenanwendung / Root Ecology and its practical application. Bundesanstalt Gumpenstein, S. 453-462.
- GLIEMEROTH, G. (1953): Bearbeitung und Düngung des Unterbodens in ihrer Wirkung auf Wurzelentwicklung, Stoffaufnahme und Pflanzenleistung. In: Z. Acker- und Pflanzenbau 96, S. 1-44.
- GLIEMEROTH, G., G. KAHNT & N. SIDIRAS (1968): Einwirkungen von Unterbodenverdichtungen auf Wurzelwachstum und Nährstoffhaushalt. In: Landwirtschaftliche Forschung, Sonderheft 22, S. 70-77.
- GOSS, M. J. (1977): Effects of mechanical impedance on root growth in barley (*Hordeum vulgare* L.). I: Effects on the elongation and branching of seminal root axes. In: J. exper. Bot. 28, S. 96-111.
- GOSS, M. J., M. H. MILLER, L. D. BAILEY & C. A. GRANT (1993): Root growth and distribution in relation to nutrient availability and uptake. In: Eur. J. Agron. 2, S. 57-67.
- HAMBLIN, A. P. & D. TENNANT (1981): The influence of tillage on soil water behavior. In: Soil Science 3, S. 233-239.
- HAMBLIN, A., D. TENNANT & M. W. PERRY (1990): The cost of stress: Dry matter partitioning changes with seasonal supply of water and nitrogen to dryland wheat. In: Plant and Soil 122, S. 47-58.
- HAMMEL, J. E. (1989). Long Term Tillage and Crop Rotation Effects on Bulk Density and Soil Impedance in Northern Idaho. In: Soil Sci. Soc. Am. J. 53, S. 1515-1519.
- HANSSON, A.-C., R. PETTERSSON & K. PAUSTIAN (1987): Shoot and Root Production and Nitrogen Uptake in Barley, with and without Nitrogen Fertilization. In: J. Agronomy & Crop Science 158, S. 163-171.
- HANSSON, A.-C., O. ANDRÉN & E. STEEN (1991): Root production on four arable crops in Sweden and its effect on abundance of soil organisms. In: British ecological society special publication 10, Plant root growth: an ecological perspective, S. 247-265.
- HARRACH, T. & T. VORDERBRÜGGE (1991): Die Wurzelentwicklung von Kulturpflanzen in Beziehung zum Bodentyp und Bodengefüge. In: Berichte über Landwirtschaft 204, Sonderheft Bodennutzung und Bodenfruchtbarkeit Bd. 2: Bodengefüge, S. 69-82.

- HELAL, H. M. & D. SAUERBECK (1986): Entwicklung des Wurzelsystems in Abhängigkeit von der Bodendichte. In: VDLUFA-Schriftenreihe 20, Kongreßband 1986, S. 381-388.
- HELAL, H. M. (1991): Bodengefüge, Wurzelentwicklung und Wurzelfunktionen. In: Zeitschrift für Pflanzenernährung und Bodenkunde 154, S.403-407.
- HENDRICK, R. L. & K. S. PREGITZER (1996): Applications of minirhizotrons to understand root function in forests and other natural ecosystems. In: Plant and Soil 185, 293-304.
- HILFIKER, R. E. & B. LOWERY (1988): Effect of conservation tillage systems on corn root growth. In: Soil & Tillage Research 12 (3), S. 269-283.
- HILL, R. L. & R. M. CRUSE (1985): Tillage Effects on Bulk Density and Soil Strength of Two Mollisols. In: Soil Science Society of America Journal 49 (5), S. 1270-1273.
- HORSCH, D. (1990): Reduzierte Bodenbearbeitung, angepasste Technik und Unkrautbekämpfung nach dem System Horsch. In: DIERCKS, R. & R. HEITFUSS (Hrsg.): Integrierter Landbau. BLV-Verlagsgesellschaft, München, Wien, Zürich, S. 273-281.
- HUGHES, K. A., D. J. HORNE, C. W. ROSS & J. F. JULIAN (1992): A 10 year maize/oats rotation under three tillage systems: 2. Plant population, root distribution and forage yields. In Soil & Tillage Research 22 (1-2), S. 145-158.
- JAVORKOVÁ, A. & N. GÁBORČÍK (1992): Influence of Nitrogen fertilization and cutting frequency on root system of seminatural grassland. In: KUTSCHERA, L, E. HÜBL, E. LICHTENEGGER, H. PERSSON & M. SOBOTIK (Hrsg.): Wurzelökologie und ihre Nutzanwendung/Root Ecology and its practical application 2, 3. ISSR Symp. Verein für Wurzelforschung, Klagenfurt, S. 450-452.
- JOHANSSON, G. (1992): Below-ground carbon distribution in barley (*Hordeum vulgare* L.) with and without nitrogen fertilization. In: Plant and Soil 144 (1), S. 93-99.
- KARUNATILAKE, U., H. M. VAN ES & R. R. SCHINDELBECK (2000): Soil and maize response to plow and no-tillage after alfalfa-to-maize conversion on a clay loam soil in new york. In: Soil & Tillage Research 55, S. 31-42.
- KÄTTERER, T., A. C. HANSSON & O. ANDRÉN (1993): Wheat root biomass and nitrogen dynamics – effects of daily irrigation and fertilization. In: Plant and Soil 151, S. 21-30.
- KJELLSTRÖM, C. G. & H. KIRCHMANN (1994): Dry matter production of oilseed rape (*Brassica Napus* L.) with special reference to the root system. In: J. agric. Sci., Camb. 123, S. 327-332.
- KLEPPER, B. (1991): Root-Shoot-Relationships. In: WAISEL, Y., A. ESHEL & U. KAFKAFI (Hrsg.): Plant Roots. The Hidden Half. Marcel Dekker, Inc. New York, Basel, Hong Kong, S. 265-286.
- KUTSCHERA, L. & L. LICHTENEGGER (1982): Wurzelatlas mitteleuropäischer Grünlandpflanzen. Bd. 1. Gustav Fischer-Verlag, Stuttgart.
- KUTSCHERA, L. (1960): Wurzelatlas mitteleuropäischer Ackerunkräuter und Kulturpflanzen. DLG-Verlag, Frankfurt/Main.

- LEHFELD, J. (1988): Auswirkungen von Krümmenbasisverdichtungen auf die Durchwurzelbarkeit sandiger und lehmiger Bodensubstrate bei Anbau verschiedener Kulturpflanzen. In: Arch. Acker- und Pflanzenbau 32, S. 533-539.
- LINKER, S. (2000): Raps: Hoher Bedarf schafft feste Preise. In: WWW.HTRRL.de., Internetseite des Hessischen Dienstleistungszentrums für Landwirtschaft Gartenbau und Naturschutz.
- MARSCHNER, H. (1986): Mineral Nutrition of higher Plants. Academic press. London, San Diego, Toronto.
- MAX, J. & B. SATTELMACHER (2000): Der Einfluß von Bodenbearbeitung und N-Düngung auf die Verteilung von ^{14}C -markierten Assimilaten auf Sproß und Wurzel sowie auf die Rhizodeposition bei Winterraps. In: MERBACH, W., L. WITTENMAYER & J. AUGUSTIN (Hrsg.): Rhizodeposition und Stoffverwertung. 10. Borkheider Seminar zur Ökophysiologie des Wurzelraumes. Wissenschaftliche Arbeitstagung in Schmerwitz, 27.-29. September 1999. B. G. Teubner, Stuttgart, Leipzig, S. 72-78.
- METTE, R (1987): Einfluß einer Bodenbearbeitung durch Pflug oder Fräse auf das Wurzelsystem von Winterraps (*Brassica Napus* L.) Diplomarbeit/Stuttgart Hohenheim. Unveröffentlicht.
- METTE, R (1994): Ertragsstruktur und Mineralstoffaufnahme von Mais und Hafer im Einflußbereich von Wallhecken. Auswirkungen auf den Mineralstoff- und Wasserhaushalt unter besonderer Berücksichtigung der Wurzelökologie von Kulturpflanzen und Knickvegetation. Dissertation Universität Kiel. Verlag Ulrich E. Grauer, Stuttgart.
- NEWMAN, E. J. (1966): A method of estimating the total length of root in a sample. J. appl. Ecol. 3, S. 139-145.
- POMIKALKO, A. (1992): Durchwurzelungsintensität zweier für Schleswig-Holstein typischer Böden unter konventionell und alternativ landwirtschaftlicher Nutzung mit besonderer Berücksichtigung methodischer Aspekte. Dissertation. In: BLUME, H.-P., A. FINCK, R. HORN, B. SATTELMACHER (Hrsg.): Schriftenreihe Institut für Pflanzenernährung und Bodenkunde Universität Kiel 19.
- POMMER, G. (1983): Haben alte Sorten mehr Wurzeln als neue Zuchtsorten? In: BÖHM, W., L. KUTSCHERA & E. LICHTENEGGER (Hrsg.): Wurzelökologie und ihre Nutzenanwendung/Root Ecology and its practical application. Bundesanstalt Gumpenstein, S.483-490.
- RASMUSSEN, K. J. (1999): Impact of ploughless soil tillage on yield and soil quality: A Scandinavian review. In: Soil & Tillage Research 53, S. 3-14.
- SARQUIS, J. I., W. R. JORDAN & P. W. MORGAN (1991): Ethylene Evolution from Maize (*Zea mays* L.) Seedling Roots and Shoots in response to mechanical impedance. In: Plant. Physiol. 96, S. 1171-1177.
- SATTELMACHER, B., F. KLOTZ & H. MARSCHNER (1990): Influence of the nitrogen level on root growth and morphology of two potato varieties differing in nitrogen acquisition. In: Plant and Soil 123, S. 131-137.

- SATTELMACHER, B., J. GERENDAS, K. THOMS, H. BRÜCK & N. H. BAGDADY (1993): Interaction between root growth and mineral nutrition. In: *Environmental and Experimental Botany* 33, S. 63-73.
- SATTELMACHER, B. & K. THOMS (1995): Morphology and Physiology of the Seminal Root System of young Maize (*Zea mays L.*) Plants as influenced by a locally restricted Nitrate supply. In: *Zeitschrift für Pflanzenernährung und Bodenkunde* 158, S. 493-497.
- SAUERBECK, D. & B. JOHNEN (1976): Der Umsatz von Pflanzenwurzeln während der Vegetationsperiode und dessen Beitrag zur „Bodenatmung“. In: *Zeitschrift für Pflanzenernährung und Bodenkunde* 139, S. 315-328.
- SCHJØNNING, P. & K. J. RASMUSSEN (1989) Long term reduced cultivation. I. Soil strength and stability. In: *Soil & Tillage Research* 15, S. 79-90.
- SCHUURMAN, J. J. (1965): Influence of soil density on root development and growth of oats. In: *Plant and Soil* 22, S. 352-374.
- SCHUURMAN, J. J. & L. KNOT (1974): The effect of nitrogen on the root and shoot development of *Lolium multiflorum* var. *westerwoldicum*. In: *Neth. J. Agric. Sci.* 22, S. 82-88.
- SEN, D. N. & G. S. TANWAR (1983): Arid environment and root behaviour. In: BÖHM, W., L. KUTSCHERA & E. LICHTENEGGER (Hrsg.): *Wurzelökologie und ihre Nutzanwendung/Root Ecology and its practical application*. Bundesanstalt Gumpenstein, S. 185-206.
- SEYFARTH, W., M. JOSCHKO, J. ROGASIK, W. HÖHN, J. AUGUSTIN, S. SCHROETTER (Hrsg.) (1999): *Bodenökologische und pflanzenbauliche Effekte konservierender Bodenbearbeitung auf sandigen Böden*. ZALF-Bericht 39, Müncheberg.
- SMITH, K. A. & P. D. ROBERTSON (1971): Effect of ethylene on root extension of cereals. In: *Nature* 234, S. 148-149.
- SMOLDERS, E. & R. MERCKX (1992): Growth and shoot:root partitioning of spinach plants as affected by nitrogen supply. In: *Plant, Cell and Environment* 15, S. 795-807.
- STEINECK, O. (1983): Der Einfluß der Hauptnährstoffe auf die Wurzelbildung. In: BÖHM, W., L. KUTSCHERA & E. LICHTENEGGER (Hrsg.): *Wurzelökologie und ihre Nutzanwendung/Root Ecology and its practical application*. Bundesanstalt Gumpenstein, S. 99-114.
- STEINGROBE, B. (1998): Gross and net root growth of rape. Poster, Jahrestagung der Deutschen Gesellschaft für Pflanzenernährung, 11.-12. Juni 1998, Dülmen.
- STEINGROBE, B. (2000): Influence of nitrogen on root growth and root turnover of oilseed rape. Poster, IACR – Rothamsted Millennium Conference: Interactions in the root environment – an integrated approach. 10.-12. April 2000, Harpenden, UK.
- STEINGROBE, B., H. SCHMID & N. CLAASEN (2001): Root production and root mortality of winter barley and its implication with regard to phosphate acquisition. In: *Plant and Soil* 237, S. 239-248.

- STUDER, C., U. SCHMIDHALTER & J. J. OERTLI (1992): Interactive Effects of N-, P-, K-, and Water Stresses on Root and Shoot Development of Maize Seedlings. In: KUTSCHERA, L, E. HÜBL, E. LICHTENEGGER, H. PERSSON & M. SOBOTIK (Hrsg.): Wurzelökologie und ihre Nutzenanwendung/Root Ecology and its practical application 2, 3. ISSR Symp. Verein für Wurzelforschung, Klagenfurt, S. 187-188.
- TEBRÜGGE, F. & R.-A. DÜRING (1999): Reducing tillage intensity – a review of results from a long-term study in Germany. In: Soil and Tillage Research 53, S. 15-28.
- TENHOLTERN, R. & T. HARRACH (1992): Soil physical limitations of root growth in anthrosols and the effect of deep loosening. In: KUTSCHERA, L, E. HÜBL, E. LICHTENEGGER, H. PERSSON & M. SOBOTIK (Hrsg.): Wurzelökologie und ihre Nutzenanwendung/Root Ecology and its practical application 2, 3. ISSR Symp. Verein für Wurzelforschung, Klagenfurt, S. 377-380.
- TENNANT, D. (1975): A test of a modified line intersect method of estimating root length. In: The Journal of Ecology 63, S. 995-1001.
- TENNANT, D. (1976): Root growth of wheat. I. Early pattern of multiplication and extension of wheat roots including effects of levels of nitrogen, phosphorus and potassium. In: Australian Journal of agricultural Research 27, S. 183-196.
- TEUTEBERG, W. (1980): Der Anbau von Raps unter besonderer Berücksichtigung der Düngung. In: Kali-Briefe 15 (5), S. 297-303.
- TIGGES, U (2000): Untersuchungen zum mehrdimensionalen Wassertransport unter besonderer Berücksichtigung der Anisotropie der hydraulischen Leitfähigkeit. Dissertation. In: BLUME, H.-P., R. HORN, J. LAMP, B. SATTELMACHER (Hrsg.): Schriftenreihe Institut für Pflanzenernährung und Bodenkunde Universität Kiel 19.
- TILMAN, D. & D. WEDIN (1991): Plant traits and resource reduction for five grasses growing on a nitrogen gradient. In: Ecology 72, S. 685-700.
- VAN DER WERF, A. & O. W. NAGEL (1996): Carbon allocation to shoots and roots in relation to nitrogen supply is mediated by cytokinins and sucrose: Opinion. In: Plant and Soil 185, S. 21-32.
- VAN NOORDWIJK, M. (1983): Functional Interpretation of Root Densities in the Field for Nutrient and Water Uptake. In: BÖHM, W., L. KUTSCHERA & E. LICHTENEGGER (Hrsg.): Wurzelökologie und ihre Nutzenanwendung / Root Ecology and its practical application. Bundesanstalt Gumpenstein, S.207-226.
- VERHOOG, A. D. (2002): Ölsaatenanbau in der EU. In: EUROSTAT (Hrsg.): Statistik kurz gefaßt – Thema 5: Landwirtschaft und Fischerei. S. 1-7.
- WEBER, E. P. & F. P. DAY (1996): The effect of nitrogen fertilization on the phenology of roots in a barrier island sand dune community. In: Plant and Soil 182, S. 139-148.
- WERGER, M. J. A. (1983): Wurzel/Sproß-Verhältnis als Merkmal der Pflanzenstrategie. In: BÖHM, W., L. KUTSCHERA & E. LICHTENEGGER (Hrsg.): Wurzelökologie und ihre Nutzenanwendung/Root Ecology and its practical application. Bundesanstalt Gumpenstein, S.323-334.

- WESTING, A & H. SÖCHTIG (1985): Bestimmung der Wurzeldichte in Böden unterschiedlicher Profiltiefe. In: *Mitteilgn. Dtsch. Bodenkundl. Gesellsch.* 43, S. 697-701.
- WIERSUM, L. K. (1957): The relationship of the size and the structural rigidity of pores to their penetration by roots. In: *Plant and Soil* 9, S. 75-78.
- WILSON, A. J., A. W. ROBARDS & M. J. GOSS (1977): Effects of mechanical impedance on root growth in barley (*Hordeum vulgare* L.). II Effects on cell development in seminal roots. In: *J. Exp. Bot.* 28, S. 1216-1226.
- ZAGAL, E. (1994): Influence of light intensity on the distribution of carbon and consequent effects on mineralization of soil nitrogen in a barley (*Hordeum vulgare* L.)-soil system. In *Plant and Soil* 160, S. 21-31.
- ZAGAL, E., S. BJARNASON & U. OLSSON (1993): Carbon and nitrogen in the root-zone of barley (*Hordeum vulgare* L.) supplied with nitrogen fertilizer at two rates. In: *Plant and Soil* 157 (1), S. 51-63.
- ZOBEL, R. W. (1991): Genetic Control of Root Systems. In: WAISEL, Y., A. ESHEL & U. KAFKAFI (Hrsg.): *Plant Roots. The Hidden Half.* Marcel Dekker, Inc. New York, Basel, Hong Kong, S. 27-38.

Teil 4: Einfluß von N-Düngung und Bodenbearbeitung auf ^{14}C -Assimilatverteilung, Wurzelumsatz und Rhizodeposition bei Winterraps (*Brassica napus* L.)

1. Einleitung

In Teil 3 der vorliegenden Arbeit wurden Wurzelentwicklung und Sproß/Wurzel-Relationen von Winterraps und ihre Beeinflussung durch Bodenbearbeitung und N-Düngung dargestellt. Es wurde gezeigt, daß beide Hauptfaktoren maßgeblich auf die Größe der Wurzelsysteme, ihre zeitliche Entwicklung und insbesondere auf das Verhältnis Sproß/Wurzelsystem einwirken. Die hierfür zu bestimmten Terminen ermittelten Wurzellängen geben Aufschluß über die Größe eines Wurzelsystems jeweils zu einem definierten Stadium der Pflanzenentwicklung. Veränderungen zwischen zwei Terminen zeigen die Entwicklung der Nettowurzellänge im dazwischen liegenden Zeitintervall. Bereits diese Daten verdeutlichten, daß Wurzelsysteme keineswegs statische Gebilde sind, sondern fortwährend den spezifischen Bedürfnissen der Pflanzen zu einem bestimmten Entwicklungsstadium sowie höchstwahrscheinlich auch sich verändernden Standortbedingungen angepaßt werden. Insbesondere aus den relativen Wurzelwachstumsraten (vgl. Abb. 3.34 u. 3.35) wurde eindeutig ersichtlich, daß im Laufe der Vegetationsperiode Phasen mit einem Überwiegen des Wurzelwachstums solche gegenüberstehen, in denen mehr Wurzeln absterben als neu gebildet werden.

In einer Reihe von Versuchen (z.B. SAUERBECK & JOHNEN 1976, HELAL & SAUERBECK 1989, SWINNEN et al. 1995^b, WEBER & DAY 1996, FITTER et al. 1997, STEINGROBE et al. 2001^b) konnte gezeigt werden, daß im Verlauf der Vegetationsperiode erhebliche Mengen an Wurzeln absterben und abgebaut werden. Die Beobachtung von Wurzelsystemen lebender Pflanzen mit Minirhizotronen (z.B. HENDRICK & PREGITZER 1996) ergab darüber hinaus, daß Wurzelneubildung und -abbau stets parallel nebeneinander stattfinden, also fortwährend Wurzelbiomasse umgesetzt wird. Diese Gleichzeitigkeit von Wachstum und Absterben macht eine Quantifizierung des Anteils an abgestorbenen und umgesetzten Wurzeln aus der Differenz der Wurzellängendaten zweier Termine unmöglich. Die mit Hilfe der Bohrkernmethode erhobenen Wurzellängen stellen als Momentaufnahmen Nettowerte dar, die sich aus der Differenz des gesamten Wurzelwachstums und allen Wurzelverlusten im Zeitraum zwischen der Keimung der Pflanze und der Probenahme ergeben. Die in diesem Zeitintervall abgestorbenen Wurzeln werden mit der Bohrkernmethode nicht erfaßt, so daß die Größenordnung dieses Anteils der Wurzelproduktion unbekannt bleibt. Die Summe der während eines definierten Zeitintervalls abgestorbenen Wurzeln (inklusive der Wurzelhaare) wird im Folgenden als Wurzelumsatz (WU) bezeichnet.

Aus agronomischer und pflanzenphysiologischer Sicht ist nicht allein die Nettogröße des Wurzelsystems, sondern der gesamte Assimilataufwand, den die Pflanze in Wachstum und Aufrechterhaltung des Wurzelsystems sowie die Nährstoffaufnahme investiert, bedeutsam. Nach Absterben und Abbau von Wurzelbiomasse geht ein Teil der dadurch freigesetzten Kohlenstoffverbindungen schließlich in den „C-Pool“ des Bodens über. Zusätzlich zu dieser durch Wurzelumsatz in den Boden gelangten organischen Substanz gibt bereits das lebende

Wurzelsystem, neben respiratorischem CO₂, eine Vielzahl verschiedenster C-Verbindungen in Form von Exsudaten, Diffusaten, Lysaten und Mucilaten (vgl. GISI 1997) ins umliegende Substrat ab. Dieser, in seiner Gesamtheit als Rhizodeposition (RD) bezeichnete, Transfer von organischen Verbindungen vom Sproß über das Wurzelsystem in den Boden stellt eine der wichtigsten Quellen für organischen Kohlenstoff im Boden dar (LYNCH & WHIPPS 1990). Nach GUCKERT (1992) hat die Rhizodeposition den größten Anteil am Energietransfer über die Pflanzen in den Boden und ist daher auch aus bodenökologischer Sicht von großer Bedeutung. Die mikrobielle Aktivität im Boden wird z.B. maßgeblich vom Ausmaß der Rhizodeposition beeinflusst (LYNCH & WHIPPS 1990). Für nicht ackerbaulich genutzte Böden oder unter Bodenbearbeitungsverfahren, bei denen ein alljährliches Einarbeiten der Ernterückstände in tiefere Schichten der Krume durch das Pflügen entfällt – wie dies auch bei der im in der vorliegenden Arbeit ausgewerteten Versuch angewandten Fräsohlsaart im System Horsch der Fall ist – kommt der Rhizodeposition als Quelle organischer Verbindungen in tieferen Bodenschichten gegenüber konventionell bearbeiteten Böden eine zusätzlich erhöhte Bedeutung zu.

Raps werden seit langem immer wieder günstige Eigenschaften als Vorfrucht (z.B. MARTIN & RADEMACHER 1960, TEUTEBERG 1980) sowie ein positiver Einfluß auf Gefügestabilität und „Bodengare“ (KAHNT 1981) zugeschrieben und dies häufig mit einem großen, tief in den Boden eindringenden und leicht zersetzbaren Wurzelsystem in Zusammenhang gebracht. Obwohl die Rapsanbaufläche in Deutschland seit Jahren kontinuierlich zunimmt (VERHOOG 2002), ist der Raps von den auf den SFB-Flächen angebauten die am wenigsten untersuchte Art. Einer möglichen Bedeutung von Wurzelumsatz und Rhizodeposition hinsichtlich der Vorfruchteigenschaften von Raps wurde bisher kaum Beachtung geschenkt. In einem bei weitem überwiegenden Teil der Studien zu Assimilatverteilung, Wurzelumsatz und Rhizodeposition wurden Versuchspflanzen in vegetativen Entwicklungsstadien untersucht. Ein Großteil der von den Pflanzen zu Beginn der Vegetationsperiode in den Boden eingetragenen wurzelbürtigen organischen Substanz ist unter Bedingungen, die in mitteleuropäischen Agrarökosystemen vorherrschen, zur Ernte bereits abgebaut (SAUERBECK et al. 1976). Für die Vorfruchteigenschaften sind aber sicherlich die nach der Ernte noch vorhandenen Substanzen bedeutender. Während der generativen Pflanzenentwicklung weisen annuelle Spezies oft wesentlich andere Muster hinsichtlich Assimilatverteilung und -verwendung auf als in vegetativen Stadien (LILJEROTH et al. 1990, GREGORY & ATWELL 1991). Informationen zu den genannten Parametern liegen für Raps (SHEPHERD & DAVIES 1993, ZAGAL 1994^b) oder verwandten Arten (z.B. Senf, [SAUERBECK & JOHNEN 1976], Ölrettich [MERBACH et al. 1996]) nur sehr spärlich und dann zumeist für Pflanzen in frühen Entwicklungsphasen vor. Daher, und da während der Blüte die Anzahl der Schoten und Körner festgelegt wird (HABEKOTTÉ 1993) und die Phase zwischen Ende der Blüte und Ernte maßgeblich den Ernteertrag (Gewicht der Körner) bestimmt (DRECCER et al. 2000), erschien die Durchführung der Experimente mit Rapspflanzen zu Beginn der generativen Entwicklung besonders vielversprechend.

Bei gleichbleibender Nettogröße des Wurzelsystems ist ein erhöhter Wurzelumsatz gleichbedeutend mit schnellerem Wachstum und kürzerer Lebensdauer einzelner Wurzelsegmente. Da junge Wurzeln höhere Aufnahmeleistungen für Wasser und Nährstoffe aufweisen als gealterte

(CALDWELL 1979 zit. nach WEBER & DAY 1996, GOSS et al. 1993, SCHENK 1996) und zudem durch beschleunigtes Wurzelwachstum ständig neue Bodenvolumina erschlossen würden, könnte erhöhter Wurzelumsatz eine effiziente Strategie zur Reaktion auf wasser- und/oder nährstofflimitierte Bedingungen darstellen. Durch gleichzeitigen Abbau gealterter Wurzeln in bereits verarmten Bodenregionen würde der Assimilataufwand für deren Erhalt „eingespart“.

Zur Überprüfung dieser Thesen sowie einer umfassenderen Beurteilung der Auswirkungen von Bodenbearbeitung und N-Düngung hinsichtlich der Wurzelentwicklung unter Raps ist die Kenntnis wenigstens der Größenordnung von Wurzelumsatz und Rhizodeposition unumgänglich. Aus dieser Notwendigkeit ergeben sich die Ziele der in diesem Kapitel vorgestellten Versuche:

- Eine möglichst genaue Schätzung von WU und RD unter Winterraps
- Überprüfung der Einflüsse von Bodenbearbeitung und N-Düngung auf Assimilatverteilung, WU und RD

Eine exakte Messung von WU und RD unter Feldbedingungen ist bisher aufgrund großer methodischer Schwierigkeiten nicht gelungen. Mit Hilfe von Minirhizotronen (z.B. HENDRICK & PREGITZER 1996, FITTER et al. 1997), Ingrowth cores (HANSSON et al. 1992, STEINGROBE et al. 2000, u.a.), ^{14}C -Bilanzen (z.B. SAUERBECK & JOHNEN 1976, MERBACH et al. 1996, ZAGAL 1994^b) oder ^{14}C -Pulsmarkierung (z.B. KEITH et al. 1986, GREGORY & ATWELL 1991, JENSEN 1993) wurde bisher versucht, sich einer Quantifizierung von WU bzw. RD zu nähern. Minirhizotrone und Ingrowth Cores erlauben lediglich eine Schätzung des WU. Alle anderen Komponenten der RD bleiben unberücksichtigt. Beide Methoden erfassen nur Teilbereiche des Bodenraumes, deren Repräsentativität nicht überprüfbar ist und stehen darüber hinaus im Verdacht, die Wachstumsumgebung der Wurzeln in der untersuchten Bodenregion zu beeinflussen. Eine kontinuierliche Markierung mit ^{14}C und Bilanzierung der ^{14}C -Ströme erfaßt die RD als Summenparameter, erlaubt jedoch keine Quantifizierung des WU-Anteils. Zudem sind solche Experimente extrem aufwendig und im Feldversuch aufgrund rechtlicher Hindernisse und ökologischer Bedenken nicht praktikabel. Einen vielversprechenden Ansatz stellten SWINNEN et al. (1995^b) vor. In Anlehnung an diese Arbeit wurden 1998 insgesamt 54 Rapspflanzen in vier Versuchsvarianten einmalig kurzfristig mit geringen Mengen $^{14}\text{CO}_2$ begast („Pulsmarkierung“) und anschließend nach drei bzw. elf Wochen (Ernte) die ^{14}C -Aktivität in Wurzeln (AW) und Bodenmaterial (AB) ermittelt (Versuch 2). Die Differenz von AW nach drei bzw. elf Wochen (Δ_{AW}) wird in Anlehnung an SWINNEN et al. (1995^b) gemäß

$$[1] \quad \Delta_{\text{AW}} = \text{AW}_{(3 \text{ Wochen})} - \text{AW}_{(\text{Ernte})}$$

dem relativen WU innerhalb dieses Zeitintervalls zugeschrieben. Mögliche ^{14}C -Verluste durch die Wurzelatmung im Zeitintervall drei bis elf Wochen nach der Pulsmarkierung (PM) sind in Δ_{AW} enthalten. Da der Anteil der Wurzelatmung an der gesamten $^{14}\text{CO}_2$ -Freisetzung mit größer werdendem Abstand zur PM immer geringer wird (KUZYAKOV et al. 1999), und die Veratmung der „jungen“ ^{14}C -markierten Photosyntheseprodukte im wesentlichen auf die ersten drei Wochen nach der PM beschränkt ist (SWINNEN et al. 1995^b), ist davon auszugehen,

daß eine Überschätzung des WU durch die Wurzelatmung zwischen erster und abschließender Probenahme – wenn überhaupt – nur in sehr geringem Umfang anzunehmen ist.

RD setzt sich aus dem WU sowie organischen C-Verbindungen zusammen, die durch eine Vielzahl unterschiedlicher Prozesse von den Wurzeln an den Boden abgegeben werden. Die ^{14}C -Verbindungen, die durch Abgabe von Hüll- und Schleimstoffen während des Wurzelwachstums, Exsudation, Mucilage etc. innerhalb der ersten drei Wochen nach der PM in den Boden eingetragen werden, sind durch die ^{14}C -Aktivität im Bodenmaterial zur ersten Probenahme ($\text{AB}_{(3 \text{ Wochen})}$) repräsentiert.

In $\text{AB}_{(3 \text{ Wochen})}$ ebenfalls enthalten sind bereits in dieser Zeit möglicherweise auftretende Einträge durch „echten“ Wurzelumsatz, also alle ^{14}C -Verbindungen, die innerhalb der ersten drei Wochen nach der PM durch das Absterben von Wurzeln in den Boden gelangt sind. Dieser Anteil ist jedoch als sehr gering einzuschätzen, da ^{14}C aus der PM in erster Linie in junge „frisch“ gewachsene Wurzeln eingebaut werden dürfte und von einem Absterben dieser jungen Wurzeln in der ersten Zeit nach ihrem Wachstum nicht in größerem Umfang auszugehen ist. Die Schätzung der RD bleibt davon unberührt, allenfalls führt dieser Fehlbetrag zu einer geringfügigen Unterschätzung des Anteils von WU an RD.

Ein weiterer unbekannter Teil der über die Wurzeln innerhalb der ersten drei Wochen in den Boden transferierten ^{14}C -Verbindungen ($\text{AB}_{(3 \text{ Wochen})}$) wurde durch den mikrobiellen Metabolismus wurzelbürtigen Materials unter Freisetzung von respiratorischem $^{14}\text{CO}_2$ umgesetzt. Dieser Anteil ist in $\text{AB}_{(3 \text{ Wochen})}$ nicht enthalten und würde dementsprechend in der Berechnung von RD fehlen. Die Summe des aus dem Boden austretenden respiratorischen $^{14}\text{CO}_2$ (RE) setzt sich aus der Respiration der Wurzeln (RW) einerseits und der Respiration der Bodenorganismen (RB) andererseits zusammen. RB ist im hier gewählten Ansatz methodisch nicht von RW zu unterscheiden, so daß bei der Berechnung von RD entweder die Einbeziehung von RW zu hohe oder aber die Nichtberücksichtigung von RB zu niedrige Werte für RD nach sich ziehen würde. Da $\text{RE}_{(3 \text{ Wochen})}$ gemessen wurde, würde die Kenntnis des Verhältnisses RW : RB eine Berechnung von RB ermöglichen. RB wäre dann gemäß

$$[2] \quad \text{RD}_{(\text{min.})} = \text{WU} + \text{AB}_{(3 \text{ Wochen})} + \text{RB}_{(3 \text{ Wochen})}$$

in die Berechnung von RD einzubeziehen. (Da sich später zeigen wird, daß noch ein weiterer Teil der RD in einer Berechnung nach [2] nicht berücksichtigt würde, ist das Ergebnis der obigen Berechnung zunächst als „Mindest-RD“ $\text{RD}_{(\text{min.})}$ ausgedrückt). Nach GUCKERT (1992) liegt der Anteil der Atmung der Wurzeln, respektive der Mikroorganismen im allgemeinen jeweils bei ca. 50%. SHEPHERD & DAVIES (1993) beziffern das Verhältnis RW : RB für 25 Tage alte Futterrapspflanzen in den ersten zwei Wochen nach PM auf etwa 40% : 60%. SWINNEN & VAN VEEN (1992) schätzen den Anteil von RW wesentlich höher ein: Basierend auf Gefäßversuchen mit 30 Tage alten Weizenpflanzen gehen sie von bis zu 93% RW (3 Wochen nach PM) aus. Aus Feldversuchen mit Sommergerste und Sommerweizen schloß SWINNEN (1994) auf einen Anteil der RW von mindestens 75% innerhalb von 21 Tagen nach ^{14}C -PM. Zumeist lag der geschätzte Anteil von RW höher und war tendenziell um so größer,

je jünger die Pflanzen zum Zeitpunkt der PM waren. Nach SAUERBECK & JOHNEN (1976) geht der Anteil der Wurzelatmung an der gesamten $^{14}\text{CO}_2$ -Freisetzung aus dem Boden mit fortschreitender Entwicklung der Pflanzen immer mehr zurück. Für Sommerweizen geben diese Autoren einen Anteil der RW an RE von maximal 50% (Bestockung) über ca. 13% zur Blüte bis zu lediglich 4% (Totreife) an. Neuere Ergebnisse von KUZJAKOV et al. (1999) bestätigen dies prinzipiell, schätzen aber den Beitrag der Wurzelatmung an RWB mit 41% im Mittel aller untersuchten Stadien etwas höher ein. Da aus der Literatur die eindeutige Ableitung eines plausiblen Wertes für die Schätzung des RB-Anteils nicht ohne weiteres möglich war, eine Nichtberücksichtigung von RB aber in jedem Falle einen Fehler verursachen würde, wird für die Berechnung der RD in Anlehnung an GUCKERT (1992) ein Anteil der RB von 50% angesetzt. Dieser Wert entspricht zum einen der von SHEPHERD & DAVIES (1993) angegebenen Größenordnung für Raps, zum anderen wird dadurch erreicht, den evtl. entstehenden Fehlbetrag in beide Richtungen mit max. 50% möglichst gering zu halten.

Eine ausführliche Darstellung der Standortverhältnisse, der Behandlungsvarianten, der Versuchsanordnung, der Vorgehensweise bei Probenahme, Analyse und Datenauswertung sowie des Witterungsverlaufes im Versuchsjahr 1998 findet sich in Teil 1, Kap. 2. Aus dem gewählten Versuchsaufbau lassen sich zusätzlich Informationen über die Assimilatverteilung über Sproß und Wurzelsystem gewinnen, was eine Beurteilung der Auswirkung von N-Düngung und Bodenbearbeitung auf diese Größen erlaubt.

Eine zentrale Voraussetzung für die Schätzung des Wurzelumsatzes nach dem oben beschriebenen Ansatz ist, daß die Verteilung der Assimilate auf Sproß und Wurzeln für das durchschnittliche Assimilations- und Allokationsverhalten der Pflanzen repräsentativ ist. Nur wenn der Markierungsgrad der Wurzelsubstanz nach einer bestimmten Zeit annähernd stabil bleibt und keine relevanten Umverlagerungen ^{14}C -markierter Verbindungen innerhalb des Wurzelsystems mehr stattfinden, ist gewährleistet, daß der Verlust an ^{14}C -Aktivität in den Wurzeln zwischen zwei Zeitpunkten tatsächlich den WU dieser Periode repräsentiert.

KEITH et al. (1986) ermittelten für Weizen im Feldversuch eine Allokationsperiode von etwa drei Wochen. Nach SWINNEN et al. (1994^b) ist die Assimilatverteilung in Getreidepflanzen spätestens nach etwa 19 Tagen weitestgehend abgeschlossen. MEHARG & KILLHAM (1990^b) gingen in Ihren Versuchen mit englischen Raygras (*Lolium perenne*) von einer vollständigen Assimilatverteilung bereits nach 7 Tagen aus. In Gefäß- und Nährlösungsversuchen wurde eine nahezu abgeschlossene Allokation z.T. nach wesentlich kürzeren Zeitintervallen festgestellt, z.B. bei Weißklee (*Trifolium repens*) nach 24h (DANCKWERTS & GORDON 1989). MILCHUNAS et al. (1985) schlossen aus Versuchen mit Sommerweizen und *Bouteloua gracilis* (einem perennierenden Gras), daß ein Großteil der Transportprozesse junger, mobiler Assimilate über die Pflanze – also auch die Verteilung aus der zeitnahen Photosynthese stammender C-Verbindungen auf Sproß- und Wurzelsystem – innerhalb der ersten 5 Tage stattfindet und nach dieser Zeit ein Großteil des noch in der Pflanze befindlichen ^{14}C in den „strukturellen C-Pool“, v.a. in Zellwandgewebe, eingebaut ist. Die Remobilisierung von Kohlenhydraten ist grundsätzlich möglich. Es wird angenommen, daß Remobilisierungsprozesse v.a. während der Reife der generativen Organe auftreten und daß diese der hauptsächliche „Sink“

für remobilisierte C-Verbindungen sind (BELL & INCOLL 1990). Ob das Wurzelsystem in relevantem Umfang von C-Umverlagerungsprozessen betroffen ist, wird im Laufe dieser Arbeit thematisiert werden.

Um mit möglichst hoher Wahrscheinlichkeit von einer weitestgehend stabilen Assimilatverteilung ausgehen zu können, wurde die erste Probenahme – gestützt auf die oben erwähnten Angaben – drei Wochen nach der Markierung angesetzt. Dabei wurde unterstellt, daß in dieser Allokationsperiode zwischen Begasung und erster Ernte die „jungen“ ins Wurzelsystem transferierten ^{14}C -markierten Assimilate nur für Wurzelwachstum und -respiration verbraucht werden und noch kein nennenswerter WU stattfindet. Um die Annahme einer nach drei Wochen weitestgehend stabilen Assimilatverteilung zu überprüfen und insbesondere für den Raps zu evaluieren, wurde in der Variante P240 (Pflugdrillsaat, 240 kgN/ha*a, die in etwa praxisüblichen Bedingungen in Schleswig-Holstein entspricht) ein Vorversuch mit neun Pflanzen durchgeführt (vgl. Teil 1, Kap. 2.4.1.). Nach 7, 14 bzw. 21 Tagen wurden jeweils drei Pflanzen geerntet und die Verteilung der ^{14}C -markierten Assimilate über Sproß, Wurzeln und Boden ermittelt.

Die Ergebnisse dieses Vorversuches (Versuch 1) ließen bereits starke Zweifel an der Annahme einer „stabilen Assimilatverteilung“ aufkommen. Versuch 2 lieferte weitere Hinweise, daß im gesamten Verlauf der Pflanzenentwicklung nach der PM ^{14}C -markierte Verbindungen innerhalb der Pflanze umverlagert wurden. Es scheint, daß das Wurzelwachstum nicht ausschließlich mit „jungen“ Assimilaten aus der rezenten Photosynthese bestritten wird, sondern „alte“ Assimilate sukzessive ins Wurzelsystem investiert werden. Träfe diese Annahme zu, so würden WU und RD bei einer Berechnung mit [1] respektive [2] stark unterschätzt. Tatsächlich war in den gedüngten Versuchsvarianten zwischen Blüte- und Erntetermin sogar eine Zunahme der ^{14}C -Aktivität im Wurzelsystem festzustellen, so daß hier eine Berechnung des WU mit dem ursprünglich geplanten Ansatz [1] gänzlich unmöglich war und auch RD unterschätzt würde. Eine Kenntnis der Menge an ^{14}C -Verbindungen, die durch Retranslokation aus oberirdischen Pflanzenteilen und/oder der Pfahlwurzel ins Wurzelsystem und den Boden gelangt sind, würde allerdings die Berechnung gemäß

$$[3] \quad \text{WU} = \Delta_{\text{AW}} + \text{AW}_{(\text{Wurzelzuwachs})}$$

ermöglichen. In die Berechnung von RD müßte der Anteil an retranslozierten ^{14}C -Verbindungen, der von den neu gewachsenen Wurzeln in den Boden ($\text{AB}_{(\text{Zuwachs})}$) eingetragen wurde, einbezogen, die Gleichung [2] also wie folgt ergänzt werden:

$$[4] \quad \text{RD} = \text{WU} + \text{AB}_{(3 \text{ Wochen})} + \text{RB}_{(3 \text{ Wochen})} + \text{AB}_{(\text{Zuwachs})}$$

In einem dritten Experiment, das 1999 – wiederum in der Variante P240 – stattfand, wurde die These überprüft, daß „alte“ Assimilate in die Wurzelneubildung investiert werden und der quantitative Umfang dieser durch Retranslokation in die neu gebildeten Wurzeln eingebauten ^{14}C -Verbindungen sowie der damit verbundene Eintrag von retransloziertem ^{14}C in den Boden ermittelt. Dazu wurde 1999 eine erneute ^{14}C -PM von 9 Rapspflanzen durchgeführt (Versuch

3). Versuchsaufbau und Vorgehensweise bei der ^{14}C -Markierung wurden beibehalten (vgl. Teil 1, Kap. 2.4.). In die Edelstahlröhren wurden zusätzlich Ingrowth Cores eingebaut (vgl. STEINGROBE et al. 2000). Dies sind mit wurzelfreiem Bodenmaterial gefüllte Netzschläuche. Um ein unerwünschtes vorzeitiges Eindringen von Wurzeln in die Ingrowth Cores zu verhindern, waren diese zu Beginn des Versuches durch PVC-Rohre vom umgebenden Boden getrennt. Drei Wochen nach der ^{14}C -PM wurden die ersten drei Ingrowth Cores zur Bewurzelung durch Entfernen der PVC-Rohre geöffnet, weitere zwei Wochen später mitsamt den in sie hinein gewachsenen Wurzeln entnommen und der nächste Satz Netzschläuche geöffnet. Dies wurde insgesamt fünfmal wiederholt, so daß neu gewachsene Wurzeln aus den Perioden 3-5, 5-7, 7-9, 9-11 und 11-13 Wochen nach der PM gewonnen wurden. Die Wurzeln in den Ingrowth Cores können nur innerhalb der Zeit, in der die Cores geöffnet waren, gewachsen sein. Sollte in diesen Wurzeln ^{14}C nachzuweisen sein, so kann dieses nur durch Retranslokation aus anderen Pflanzenteilen in die neu gebildeten Wurzeln gelangt sein.

2. Ergebnisse und Diskussion

2.1. Pflanzenentwicklung

Die Entwicklung der Rapspflanzen in den Bodensäulen entsprach in beiden Versuchsjahren augenscheinlich dem durchschnittlichen Wuchs in der umgebenden Versuchsparzelle. Die Trockenmasse der Versuchspflanzen in der Variante H0 war gegenüber dem umgebenden Feld tendenziell erhöht, die der hochgedüngten Pflanzen geringfügig vermindert. Die Unterschiede waren nicht signifikant und auch die Entwicklung der Trockenmassen verlief in allen Behandlungskombinationen ohne signifikante Abweichungen zu den auf freier Bodenoberfläche wachsenden Pflanzen der entsprechenden Variante. Demnach kann von einer guten Übertragbarkeit der in den Bodensäulen gewonnenen Ergebnisse auf die im Feld gewachsenen Pflanzen ausgegangen werden.

2.2. Verteilung der ^{14}C -markierten Assimilate

Die absoluten ^{14}C -Aktivitäten, die in den einzelnen Fraktionen gemessen wurden, besitzen zunächst wenig Aussagekraft. Aus Verteilung und Verbleib des während der Markierung assimilierten ^{14}C sollen Rückschlüsse auf durchschnittliche Allokation und Nutzung der Photosyntheseprodukte innerhalb des Systems Pflanze-Wurzelsystem-Boden abgeleitet werden. Daher werden im Folgenden alle Ergebnisse als relative Zahlen wiedergegeben. Sofern nicht explizit eine andere Bezugsgröße genannt wird, ist der prozentuale Anteil der ^{14}C -Aktivität einer Fraktion an der ^{14}C -Bruttoassimilation, also der gesamten von der Pflanze während der Begasung aufgenommenen ^{14}C -Menge, angegeben. Dieser wird als Wiederfindungsrate (WFR) einer bestimmten Fraktion (z.B. $\text{WFR}_{(\text{Stengel})}$) bezeichnet.

In der Fachliteratur, insbesondere dann, wenn Pflanzen kontinuierlich über längere Phasen in Atmosphären gleichbleibenden ^{14}C -Partialdrucks markiert werden, wird häufig die ^{14}C -Net-

toassimilation (entspricht der $\text{WFR}_{(\text{ges.})}$), teilweise auch die ins Wurzelsystem transferierte ^{14}C -Menge (oder andere Teilsummen) als Bezugsbasis herangezogen. In diesen Fällen ergeben sich z.T. wesentlich höhere Zahlenwerte als bei der Angabe der WFR. In Versuchen mit kontinuierlicher Markierung (KM) ist der Bezug auf die Nettoassimilation zweckmäßig, da die Pflanzen u.U. sehr unterschiedlich große absolute Mengen an ^{14}C aufnehmen. Die Bruttoassimilation bleibt, aufgrund der Reassimilation des durch Respiration des Sprosses (RS) freigesetzten $^{14}\text{CO}_2$, bei KM unbekannt. Demgegenüber erhalten bei der Pulsmarkierung (PM), die für die Experimente der vorliegenden Arbeit zum Einsatz kam, in der Regel alle Versuchspflanzen definierte, gleich große Mengen ^{14}C . Die Reassimilation von $^{14}\text{CO}_2$ aus der RS ist aufgrund des kurzen Verbleibs der Pflanzen in den Begasungshauben vernachlässigbar.

Da die $\text{WFR}_{(\text{ges.})}$ mit fortschreitendem Abstand zur PM abnimmt, würde sich durch die Verwendung der Nettoassimilation als Bezugsgröße im Falle von PM-Versuchen auch die Berechnungsbasis für die Angabe relativer Anteile ständig verändern. Die Abnahme der $\text{WFR}_{(\text{ges.})}$ nach PM ist in allererster Linie durch den ^{14}C -Austrag durch RS begründet. Sie kann aber auch andere Ursachen haben (Substanzausträge jeglicher Art), die in der Regel im Feldversuch nicht quantifizierbar sind. Darüber, ob bei der Angabe der relativen Assimilatverteilung die Gesamtmenge des ursprünglich einmal assimilierten ^{14}C (Bruttoassimilation) oder nur der Teil des tatsächlich ins Pflanzengewebe aufgenommenen ^{14}C aus pflanzenphysiologischer Sicht sinnvoller wäre, ließe sich ausgiebig diskutieren. (Von Bedeutung wäre hier z.B., in welcher Fraktion und in welcher Zeit die Assimilate ins Pflanzengewebe eingebaut wurden).

Aus den angeführten Gründen, aufgrund der besseren Vergleichbarkeit (die Nettoassimilation läßt sich aus Bruttoassimilation und prozentualem Anteil einer Fraktion jederzeit berechnen – umgekehrt ist dies nicht ohne weiteres möglich) und der Tatsache, daß die ^{14}C -Ausgangsaktivität die einzige wirklich definierte Bezugsbasis darstellt, wurde der Verwendung der Bruttoassimilation als Bezugsgröße der Vorzug gegeben. Dennoch wurden bei der Varianzanalyse alle Tests sowohl mit der Berechnungsbasis Bruttoassimilation als auch mit den korrespondierenden Werten der Nettoassimilation durchgeführt. Abweichende Ergebnisse hinsichtlich der Signifikanz von Unterschieden zwischen den Behandlungsvarianten ergaben sich dabei nur in Ausnahmefällen. Die grundsätzlichen Aussagen bezüglich der Wirkung der Versuchsfaktoren blieben davon unberührt, zusätzliche Erkenntnisse oder Interpretationsmöglichkeiten waren nicht abzuleiten. So die zusätzliche Angabe der Anteile an der Nettoassimilation im Einzelfall sinnvoll erschien, ist dies im Text erwähnt. Unbedingt ist bei der Interpretation der Ergebnisse – v.a. bei Vergleichen mit Literaturangaben (Höhe der numerischen Beträge!) auf die verwendete Bezugsbasis sowie die Art des Markierungsverfahrens (KM/PM) zu achten!

2.3. Versuch 1: Einfluß der Zeitdauer nach ^{14}C -Pulsmarkierung

Zur Überprüfung der Annahme einer nach spätestens drei Wochen abgeschlossenen Assimilatallokation (vgl. KEITH et al. 1986) innerhalb der Versuchspflanzen wurden 1998 auf Schlag 5 des SFB 192 in der Versuchsvariante P240 (Pflugdrillsaat, 240 kgN/ha*a) 12 Winterrapspflanzen (Sorte *Falcon*) ^{14}C -pulsmarkiert. Eine, zwei und drei Wochen nach PM sowie am Ende der Vegetationsperiode (11 Wochen nach PM) wurden je drei Pflanzen gerntet und die ^{14}C -Aktivität in einzelnen Sproßorganen sowie Wurzeln und Bodenmaterial in drei Bodentiefen (0-10, 10-20 u. 20-30 cm) bestimmt. Dem Boden entweichendes $^{14}\text{CO}_2$ wurde kontinuierlich in 0,5M Natronlauge aufgefangen und dessen ^{14}C -Aktivität alle 3-4 Tage ermittelt (vgl. Teil 1, Kap. 2.4.3.).

2.3.1. Einfluß der Zeitdauer nach ^{14}C -Pulsmarkierung

Eine Woche nach der ^{14}C -PM, die zu Beginn der Rapsblüte (BBCH-Code 63) Anfang Mai 1998 zwischen 11:00 und 15:00 Uhr bei wolkenlosem Himmel erfolgte, befanden sich 60% des brutto assimilierten ^{14}C im System Pflanze-Wurzel-Boden ($\text{WFR}_{(\text{ges.})}$) (Abbildung 4.1). Die im Verlauf der ersten Woche nach ^{14}C -PM aus dem System ausgetragenen 40% des ursprünglich aufgenommenen ^{14}C sind nicht eindeutig einem Prozeß zuzuordnen, sollten aber im wesentlichen RS zuzuschreiben sein. SHEPHERD & DAVIES (1993) beziffern die ^{14}C -Verluste durch RS innerhalb von 13 Tagen nach PM für 25 Tage alte Futterrapspflanzen auf 33%. Vergleichbare Werte für RS geben u.a. DANCKWERTS & GORDON (1989) für Weißklee (40-45% bereits 24h nach ^{14}C -PM), SWINNEN et al. (1994^b) für Sommerweizen (33%, 5 Tage nach PM), SWINNEN et al. (1995^b) für Sommergerste (36-40%) und Winterweizen (21-29% jeweils drei Wochen nach PM), JENSEN (1993) für Sommergerste (40-60%, 6 Tage nach PM) sowie DAVENPORT & THOMAS (1988) für unbegrannte Trespe (*Bromus inermis* Leyss.) (54-65%) und Mais (31-45% [jeweils inkl. RW und RB am Ende der Vegetationsperiode nach wöchentlich wiederholter ^{14}C -PM]) an.

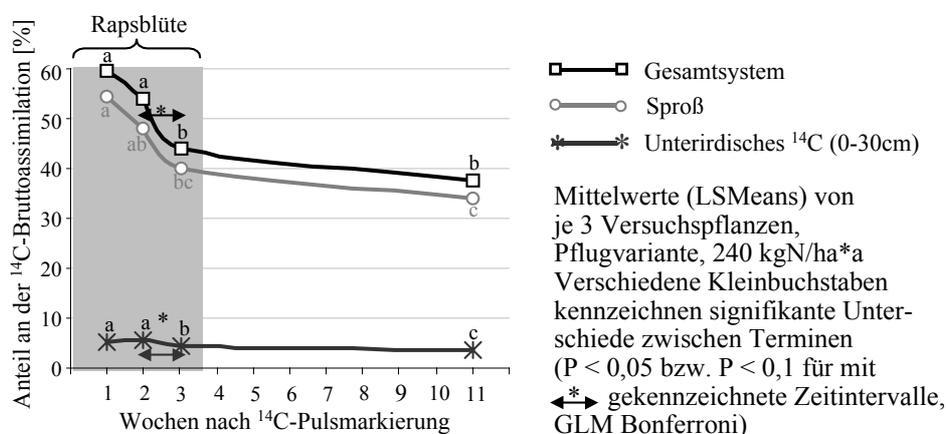


Abbildung 4.1: ^{14}C -Wiederfindungsraten im Sproß, unterhalb der Bodenoberfläche (bis 30 cm Bodentiefe) und im Gesamtsystem in Abhängigkeit von der Zeitdauer nach ^{14}C -Pulsmarkierung zum Beginn der Rapsblüte (5.5.1998)

In den ersten Tagen nach PM ist die Freisetzung von ^{14}C durch RS am höchsten. Bereits ab dem zweiten Tag nach PM wird nur noch ein geringer Teil der assimilierten ^{14}C -Verbindungen vom Sproß veratmet (KUZYAKOV & DOMANSKI 2002).

Neben RS ist beim Raps in zunächst geringem, nach Ende der Blüte zunehmendem Umfang von einem ^{14}C -Austrag durch den Verlust von Blüten- und Blattmasse auszugehen. Auch ^{14}C in Wurzeln und Boden unterhalb 30 cm Bodentiefe ist in der Differenz zwischen ^{14}C -Brutto- und Nettoaufnahme enthalten. Allerdings ist dieser Fehlbetrag als sehr gering einzuschätzen. In Wurzeln und Boden von fünf – parallel zu dem hier vorgestellten Versuch – 1 m tief eingebrachten Bodensäulen wurden in der Bodenschicht 30-90 cm nie mehr als max. 0,6% des von den Rapspflanzen brutto assimilierten ^{14}C wiedergefunden. Übereinstimmend stellten SWINNEN et al. (1994^b) ^{14}C -Translokation in Wurzeln und Boden unterhalb der Krume in nur sehr geringem Umfang fest.

Drei Wochen nach PM hatte sich die $\text{WFR}_{(\text{ges.})}$ – gegenüber den Werten eine Woche nach PM signifikant – auf 44% verringert. Am Ende der Vegetationsperiode (11 Wochen nach PM) waren nur noch 37,5% des ursprünglich aufgenommenen ^{14}C im System nachzuweisen. Der Unterschied zwischen der $\text{WFR}_{(\text{ges.})}$ nach drei Wochen und zur Ernte war nicht signifikant (n.s.).

Ähnliche zeitliche Entwicklungen der $\text{WFR}_{(\text{ges.})}$ beobachteten MILCHUNAS et al. (1985) bei Sommerweizen (SW) und *Bouteloua gracilis* sowie SWINNEN et al. (1994^b) in einem – hinsichtlich Versuchsaufbau und ^{14}C -Markierungstechnik sehr gut vergleichbaren – Experiment mit SW: 5 Tage nach PM waren 33%, 19 Tage nach PM 35,7% und 33 Tage nach PM 36,1% des brutto assimilierten ^{14}C aus dem System ausgetragen. Diese ^{14}C -Verluste werden von den zuletzt genannten Autoren vollständig auf RS zurückgeführt. In weiteren Versuchen ermittelten SWINNEN et al. (1995^b), je nach Art und Entwicklungsstadium der Pflanzen zum Zeitpunkt der PM, unterschiedliche ^{14}C -Verluste durch RS bei Winterweizen (WW) und Sommergerste (SG): Fand die PM zum Auflaufen der Pflanzen statt, waren drei Wochen später 36% (SG) bzw. 40% (WW) des brutto assimilierten ^{14}C veratmet (nur RS). Bis zur Ernte stieg der ^{14}C -Verlust bei WW auf 47% an, während sich dieser Wert bei SG nach der dritten Woche nur noch um etwa 1% auf 37% erhöhte. Erfolgte die PM zum Ährenschieben, zeigte sich die RS bei SG deutlich gesteigert (40% nach 3 Wochen, 42% zur Ernte), während WW erheblich geringere Respirationsverluste aufwies (21% bzw. 29%). Bei einem Vergleich der Literaturangaben mit den Ergebnissen der vorliegenden Arbeit fällt auf, daß die ^{14}C -Verluste beim Winterraps mit wachsendem zeitlichen Abstand zur ^{14}C -PM die der von SWINNEN et al. (1994^b und 1995^b) untersuchten Getreidearten in zunehmendem Maße übersteigen. Neben einer möglicherweise höheren RS (es ist bekannt, daß die Respiration – beeinflusst durch eine Vielzahl verschiedener Faktoren wie z.B. art- und sortenspezifische Unterschiede, Entwicklungsstadium der Pflanzen sowie diverser Standortfaktoren und Wachstumsbedingungen stark schwanken kann) dürften hier auch die ^{14}C -Verluste durch den Bestandsabfall beim Raps eine nicht zu unterschätzende Rolle spielen. Je größer der Abstand zur Assimilation des ^{14}C wird, desto wahrscheinlicher ist es, daß der Anteil der Blatt- und Blütenverluste an den ^{14}C -Austrägen erhöht ist. Dies gilt insbesondere für die Entwicklungsstadien nach der Blüte, da der Raps in dieser Phase den gesamten Blattbestand abbaut. Die

Veratmung „gealterter“ ^{14}C -markierter Assimilate dürfte demgegenüber nach der dritten Woche nach PM zunehmend an Bedeutung verlieren.

Wie aus Abbildung 4.1 weiter hervorgeht, befand sich der mit 54% bei weitem größte Teil des brutto assimilierten ^{14}C eine Woche nach PM im Sproß. Bis zur dritten Woche nahm die $\text{WFR}_{(\text{Sproß})}$ signifikant auf 40% ab. Im Zeitraum vom Ende der Blüte bis zur Ernte war nur noch ein leichter Rückgang auf 34% (n.s.) festzustellen. Die zeitliche Entwicklung der $\text{WFR}_{(\text{Sproß})}$ entsprach damit weitestgehend der $\text{WFR}_{(\text{ges.})}$, woraus hervorgeht, daß mengenmäßig vor allem die ^{14}C -Verluste im Sproßbereich (RS, Blatt- und Blütenverluste) hinsichtlich der Veränderungen im Gesamtsystem ins Gewicht fallen. Entsprechende Verläufe der $\text{WFR}_{(\text{Sproß})}$ beschreiben wiederum MILCHUNAS et al. (1985) bei *Bouteloua gracilis* und SW sowie SWINNEN et al. (1994^b), wiederum mit höheren absoluten Werten und geringeren Veränderungen nach der ersten Woche (54%, 50%, 48% - 5, 19 bzw. 33 Tage nach PM von SW). Weit geringere $\text{WFR}_{(\text{Sproß})}$ ermittelten SWINNEN et al. (1995^b) bei WW (27% drei Wochen nach PM und 21% zur Ernte) und SG (23 bzw. 16%), wenn die PM in einem frühen Entwicklungsstadium (Auflaufen) erfolgte, deutlich höhere Werte (WW: 72/62%, SG: 52/46%) jedoch nach PM in einem späten Stadium der Pflanzenentwicklung (Ährenschieben).

Der Assimilattransfer vom Sproß in Fraktionen unterhalb der Bodenoberfläche (uBOF) war innerhalb der ersten 7 Tage nach PM am höchsten. Eine Woche nach PM waren 5,4% des brutto assimilierten ^{14}C ins Wurzelsystem transferiert und als unterirdisches ^{14}C wiedergefunden worden. Bis zur zweiten Woche nahm die $\text{WFR}_{(\text{uBOF})}$ noch schwach (n.s.) auf 5,8% zu, von der zweiten bis zur dritten Woche sowie bis zur Ernte signifikant ab. Am Ende der Vegetationsperiode befanden sich noch 3,6% der ursprünglich durch die Pflanze aufgenommenen ^{14}C -Aktivität in den ersten 30 cm unterhalb der Bodenoberfläche. Einen – bei höheren absoluten Werten – annähernd gleichen Verlauf des Assimilattransfers ins Wurzelsystem (beobachtet nur bis 13 Tage nach PM) beschreiben SHEPHERD & DAVIES (1993) für Raps schon in sehr frühem Entwicklungsstadium. Für andere Spezies (z.B. SW [MILCHUNAS et al. 1985], WW u. SG [SWINNEN et al. 1995^b]) werden häufig ähnliche Muster beschrieben. Dabei liegt der Anteil der $\text{WFR}_{(\text{uBOF})}$ zumeist wesentlich höher, was mit artspezifischen Unterschieden und v.a. dem Entwicklungsstadium zum Zeitpunkt der PM zusammenhängen dürfte.

Die Verteilung der ^{14}C -markierten Assimilate auf Sproß und unterirdische Fraktionen blieb über die gesamte Beobachtungsdauer fast konstant bei einem Verhältnis von etwa 90:10. Ein nahezu identisches Verhältnis $\text{WFR}_{(\text{Sproß})}:\text{WFR}_{(\text{uBOF})}$ geben DAVENPORT & THOMAS (1988) für Mais an, während sie für unbegrannte Tresse unter gleichen Versuchsbedingungen eine Relation von 60:40 ermittelten. SHEPHERD & DAVIES (1993) ermittelten für sehr jungen Futterraps 13 Tage nach PM ein Verhältnis von 75:25. ZAGAL (1994^b) beziffert diese Relation für Winterraps nach KM bis 41 Tage nach Keimung auf 70:30 und nach 62 Tagen auf 56:44. MARTIN & MERCKX (1992) geben für Weizen ein Verhältnis von 64:36 an. MILCHUNAS et al. (1985) stellten unter SW ab der zweiten Woche nach PM unterhalb der Bodenoberfläche sogar höhere ^{14}C -Aktivitäten fest als im Sproß. Insgesamt variieren die Angaben zur Assimilatverteilung zwischen Sproß und unterirdischen Fraktionen in Abhängigkeit von Pflanzenart (z.B. MILCHUNAS et al. 1985, BARTA 1987, DAVENPORT & THOMAS 1988, LYNCH & WHIPPS

1990) und -sorte (z.B. MARTIN & KEMP 1980, LILJEROTH et al. 1990, XU & JUMA 1993), Ausdauer (annuell-perennierend) (ZAGAL 1994^b), Entwicklungsstadium der Pflanzen zu Zeitpunkt der PM (z.B. MEHARG & KILLHAM 1990^b, GREGORY & ATWELL 1991, SWINNEN 1994, ZAGAL 1994^b) bzw. der Ernte (MERBACH et al. 1996), Jahreszeit (BÉLANGER et al. 1992) und Tageszeit der ^{14}C -Fixierung (SWINNEN et al. 1994^b) in weiten Grenzen. Darüber hinaus wird die Assimilatallokation von einer Vielzahl exogener Faktoren wie z.B. Bodentyp (DINWOODIE & JUMA 1988), Lagerungsdichte (HELAL & SAUERBECK 1986, ATWELL 1990), Wassergehalt (SHONE et al. 1983, MEHARG & KILLHAM 1990^a), pH (MEHARG & KILLHAM 1990^c) oder Temperatur (BOUMA et al. 1997) des Bodens, Länge der Photoperiode (WHIPPS 1984), Lichtintensität (ZAGAL 1994^a), Lufttemperatur (MARTIN & KEMP 1980), CO_2 -Partialdruck der Umgebungsluft (FITTER et al. 1996, VERBURG et al. 1998) und N-Versorgung (LILJEROTH et al. 1990, BÉLANGER et al. 1992, JOHANSSON 1992, FETENE et al. 1993) beeinflusst.

Der größte Anteil der $\text{WFR}_{(\text{Sproß})}$ entfiel auf den Stengel der Rapspflanze (Abbildung 4.2). Von 35,5% nach einer Woche sank die $\text{WFR}_{(\text{Stengel})}$ kontinuierlich auf 26,5% zur Ernte. Die stärkste Abnahme (29,5%) war zwischen erster und zweiter Woche nach Markierung zu verzeichnen. Nach der zweiten Woche war die Abnahme der $\text{WFR}_{(\text{Stengel})}$ nicht mehr signifikant. Die zu Anfang starke Abnahme der $\text{WFR}_{(\text{Stengel})}$ kann nur auf Umverlagerung mobiler C-Verbindungen und nachfolgenden Verbrauch dieser Fraktion zurückzuführen sein, da größere Substanzverluste von Stengelgewebe nicht zu beobachten waren und keine Anreicherung in anderen Pflanzenteilen festzustellen war.

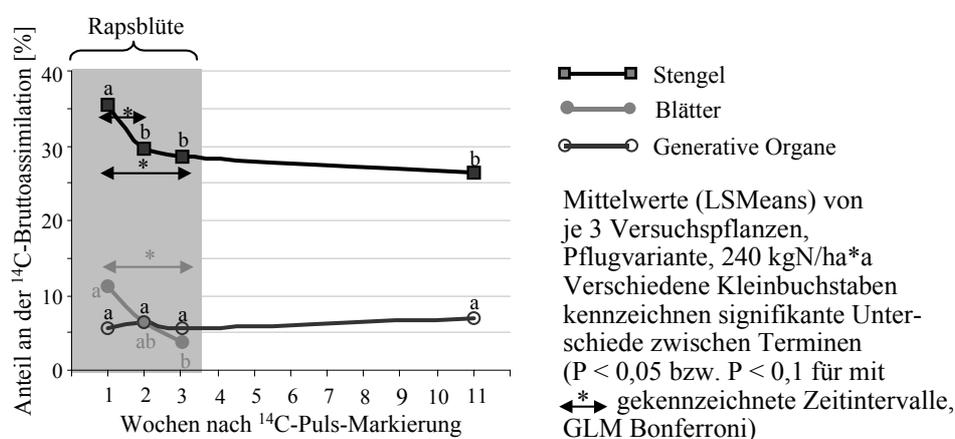


Abbildung 4.2: ^{14}C -Wiederfindungsraten in Sproßorganen in Abhängigkeit von der Zeitdauer nach ^{14}C -Pulsmarkierung zum Beginn der Rapsblüte (5.5.1998)

In den Blättern befanden sich nach 7 Tagen 11,3% der ^{14}C -Bruttoassimilation. Innerhalb der folgenden 14 Tage nahm dieser Anteil signifikant auf nur noch 3,8% ab. Am Erntetermin waren keine Blätter mehr vorhanden. Dies verdeutlicht die Bedeutung der Blattverluste für die Abnahme der $\text{WFR}_{(\text{ges.})}$ bzw. der $\text{WFR}_{(\text{Sproß})}$ im Zeitraum zwischen Blüte und Ernte und zeigt, daß diese nicht alleine der RS zugeschrieben werden kann (s.o.). Die WFR in den generativen Organen (Blüten bzw. Schoten) veränderte sich im Verlauf des Beobachtungszeitraums nicht signifikant.

Eine sehr andere Gewichtung der Verteilung ^{14}C -markierter Assimilate im Sproß beobachteten SHEPHERD & DAVIES (1993) bei Futterraps in sehr frühem Entwicklungsstadium (zum Zeitpunkt der PM 25 Tage alte Pflanzen): Der größte Teil des assimilierten ^{14}C befand sich kurz nach der PM (>70%) sowie 6 (ca. 50%) bzw. 13 Tage nach PM (40%) in den Blättern. Wesentlich geringer fiel die Zuteilung zum Stengel mit ca. 12% direkt nach PM, knapp 18% nach 6 bzw. 11% nach 13 Tagen aus. Dies zeigt deutlich, daß sich die Verteilung der Nährstoffe und Kohlenhydrate innerhalb der Pflanze mit dem Übergang von der vegetativen in die generative Entwicklungsphase grundlegend ändert. Eine ^{14}C -Verteilung auf die Sproßorgane von 44% in den Kolben, 40% in den Blättern und nur 16% im Stengel geben DAVENPORT & THOMAS (1988) für Mais, nach wöchentlicher ^{14}C -PM über die gesamte Vegetationsperiode an. Während des vegetativen Wachstums begaste Zuckerhirse (*sorghum bicolor* L.) translozierte den größten Teil der Assimilate stets in die Blätter (FERNÁNDEZ et al. 2003). Auffällig ist dabei vor allem die beim Raps sehr viel höhere ^{14}C -Akkumulation im Stengel, die – ebenso wie die sowohl in der eigenen Arbeit als auch von SHEPHERD & DAVIES (1993) bei jungem Raps festgestellte starke zeitliche Variation der $\text{WFR}_{(\text{Stengel})}$ – als Hinweis auf eine beim Raps möglicherweise ausgeprägtere Funktion des Stengels als Speicherorgan interpretiert werden kann.

In Pflanzenteile unterhalb der Bodenoberfläche sowie in den Boden selbst können ^{14}C -markierte Photosyntheseprodukte ausschließlich durch Transfer vom Sproß ins Wurzelsystem gelangt sein. Die $\text{WFR}_{(\text{uBOF})}$ erreichte 14 Tage nach PM mit 5,8% ihr Maximum. Bezogen auf die Nettoassimilation ergibt dies einen Anteil von 10,8%. Mit jeweils ca. 11% (der Nettoassimilation) fast identische Werte beobachteten BARTA 1987 bei Luzerne (*Medicago sativa* L.) und Hornklee (*Lotus corniculatus* L.) in einem Pflanzenalter von 3-4 Wochen sowie DAVENPORT & THOMAS (1988) als Mittelwert für Mais nach wiederholter PM zu verschiedenen Entwicklungsstadien. Diese Werte erscheinen verglichen mit einem Großteil der Literaturangaben auf den ersten Blick relativ niedrig: Den gesamten Anteil des in die unterirdischen Systemteile transferierten ^{14}C beziffern SHEPHERD & DAVIES (1993) für jungen Futterraps auf 17% der Bruttoassimilation (entspricht ca. 25% an der Nettoassimilation). Nach 28 Tagen kontinuierlicher ^{14}C -Begasung, die 13 Tage nach Keimung begonnen wurde, hatte Winterraps 31%, nach 49 Tagen sogar 44% des netto assimilierten ^{14}C in die unterirdischen Fraktionen transferiert (ZAGAL 1994^b). Z.T. liegen die entsprechenden Angaben (in % der Nettoassimilation) noch darüber: Für junge Weizenpflanzen wurden z.B. Werte von 44% (MERCCKX et al. 1985) oder 69% (WHIPPS 1984) ermittelt. Einige weitere Beispiele (Alter der Pflanzen in Klammern): Gerste (21 Tage): 54% (WHIPPS 1984), Gerste (8 Wochen) 27% (JOHANSSON 1992), Raygras (43 Tage): 42,5% (KUZYAKOV & DOMANSKI (2002), unbegrannte Trespe (Mittel über Vegetationsperiode): 41% (DAVENPORT & THOMAS 1988), Mais (14 Tage): 28% (WHIPPS 1985), Zuckerhirse (53 Tage): 33% (FERNÁNDEZ et al. 2003), Tomaten (14 Tage): 43% und Erbsen (4 Wochen): 44% (WHIPPS 1987). Solch hohe Werte werden fast ausnahmslos bei jungen Pflanzen beobachtet, die sich in der vegetativen Phase der Entwicklung befinden. Der überwiegende Teil der Studien – vor allem Nährlösungs- und Gefäßversuche – wird mit Pflanzen in den ersten Wochen nach der Keimung durchgeführt.

Mit zunehmendem Pflanzenalter nimmt der Anteil des Assimilattransfers unter die Bodenoberfläche ($\text{Transf.}_{(\text{uBOF})}$) z.T. dramatisch ab (alle Angaben im folgenden Absatz in % der Nettoassimilation): Wurde z.B. englisches Raygras 4 Wochen nach Aussaat mit $^{14}\text{CO}_2$ begast, belief sich der Anteil des $\text{Transf.}_{(\text{uBOF})}$ 7 Tage später auf 67% (MEHARG & KILLHAM 1990^b). Erfolgte die PM 24 Wochen nach Aussaat, war dieser Anteil auf 13,8% gesunken. Entsprechende Veränderungen mit dem Pflanzenalter wurden bei Weizen (LILJEROTH et al. 1990, GREGORY & ATWELL 1991, SWINNEN et al. 1994^b) und Gerste (GREGORY & ATWELL 1991, JENSEN 1993, ZAGAL 1994^b, SWINNEN et al. 1995^b) beobachtet. Besonders stark ausgeprägte Unterschiede hinsichtlich des $\text{Transf.}_{(\text{uBOF})}$ wurden bei Weizen und Gerste beobachtet, wenn die Pflanzen im Feldversuch jeweils vor und nach Beginn der generativen Entwicklungsphase ^{14}C -pulsmarkiert wurden: Transferierte zum Auflaufen markierter Weizen noch 55% in die Fraktionen unterhalb der BOF, so nahm der $\text{Transf.}_{(\text{uBOF})}$ bei PM zum Ährenschieben bzw. zur Teigreife auf 8,5% bzw. 8% (GREGORY & ATWELL 1991), in Versuchen von KEITH et al. (1986) sogar bis 3% ab. Zu entsprechenden Stadien pulsmarkierte Gerste wies Werte von 63,7%, 12,6% und 4,4% auf (SWINNEN 1994). Der Grund für diese Veränderungen liegt höchstwahrscheinlich in der mit fortschreitendem Reifungsprozeß immer größer werdenden „Sink“-Stärke der generativen Organe annueller Spezies.

Beim Vergleich der verschiedenen Spezies fällt auf, daß der Anteil des $\text{Transf.}_{(\text{uBOF})}$ (bei vergleichbarem Entwicklungsstadium) bei dicotyledonen gegenüber monocotyledonen sowie C_4 -gegenüber C_3 -Pflanzen jeweils geringer ist. Evtl. ist dies im Zusammenhang mit einer möglicherweise höheren C-Effizienz (MERBACH et al. 1996) dieser Pflanzen zu sehen. Leguminosen (Erbsen) weisen hingegen – vermutlich aufgrund der hohen C-Kosten für die N-Fixierung (MERBACH et al. 1999) – vergleichsweise hohe $\text{Transf.}_{(\text{uBOF})}$ -Raten auf.

Der größte Anteil am unterirdischen ^{14}C ($\text{WFR}_{(\text{uBOF})}$) befand sich eine Woche nach PM mit 2,4% bereits im Bodenmaterial ($\text{WFR}_{(\text{Boden})}$), 1,6% waren in der Pfahlwurzel ($\text{WFR}_{(\text{PW})}$) und 1,25% in Seiten- und Feinwurzeln ($\text{WFR}_{(\text{WZ})}$) enthalten. Lediglich um die 0,2% waren als respiratorisches $^{14}\text{CO}_2$ aus dem Boden diffundiert (Abbildung 4.3).

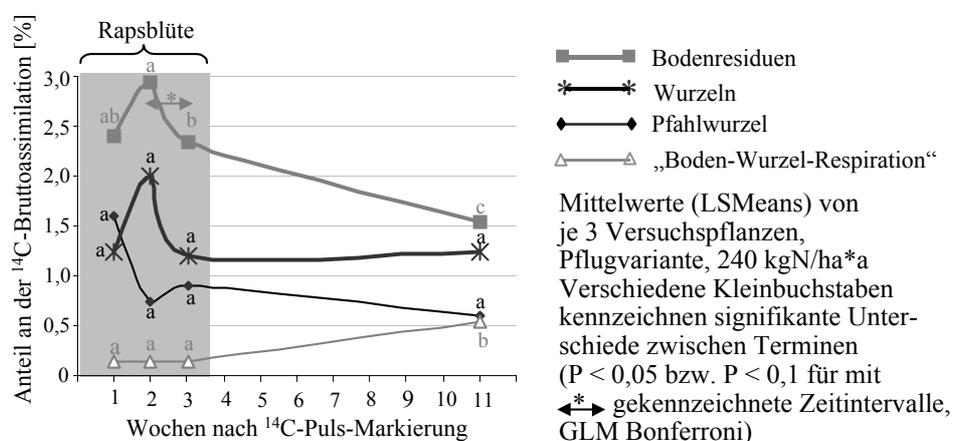


Abbildung 4.3: ^{14}C -Wiederfindungsraten in den Fraktionen unterhalb der Bodenoberfläche (bis 30 cm Tiefe) in Abhängigkeit von der Zeitdauer nach ^{14}C -Pulsmarkierung zum Beginn der Rapsblüte (5.5.1998)

Bei Winterraps in vegetativen Wachstumsphasen fiel der (während einer kontinuierlichen ^{14}C -Begasung im Gefäßversuch) ins Bodenmaterial abgegebene ^{14}C -Anteil – bei insgesamt erheblich höherem $\text{Transf.}_{(\text{uBOF})}$ – deutlich geringer aus (ZAGAL 1994^b). Relativ geringe ^{14}C -Einträge in den Boden ermittelte ZAGAL (1994^b) auch für Gerste und Raygras. Wesentlich größere Mengen ^{14}C wurden von den Wurzeln an den Boden abgegeben, wenn z.B. Gerste (DINWOODIE & JUMA 1988, SWINNEN 1994) oder Zuckerhirse (FERNÁNDEZ et al. 2003) in Feldversuchen pulsmarkiert wurden.

Von dem im Boden befindlichen ^{14}C -Quantum kann ein nicht näher zu bestimmender Anteil durch Verluste von Feinwurzeln/Wurzelhaaren und löslichen ^{14}C -Verbindungen während des Auswaschens ins Bodenmaterial eingetragen worden sein. Diese Annahme wird durch entsprechende Befunde von SWINNEN et al. (1994^a) bestätigt, die ^{14}C -Verluste von bis zu 45% beim Auswaschen von Weizen- und Gerstenwurzeln feststellten, wobei die Auswaschungsverluste um so größer waren, je kürzer der Probenahmetermin auf die ^{14}C -PM folgte und je später im Verlauf des Entwicklungszyklus der Pflanze pulsmarkiert wurde.

Unter Berücksichtigung des Entwicklungsstadiums der Pflanzen liegen $\text{WFR}_{(\text{Wz})}$ und $\text{WFR}_{(\text{Boden})}$ in der von SWINNEN (1994) (bereinigt um die Auswaschungsverluste) sowie von MARTIN & KEMP (1980) für verschiedene Weizensorten genannten Größenordnung. (FERNÁNDEZ et al. (2003) fanden geringere, DINWOODIE & JUMA (1988) sowie auch MARTIN & MERCKX (1992) unter Weizen relativ zur $\text{WFR}_{(\text{Wz})}$ erheblich größere ^{14}C -Anteile im Bodenmaterial.

Die $\text{WFR}_{(\text{Boden})}$ erreichte, wie aus Abbildung 4.3 hervorgeht, zwei Wochen nach PM ihr Maximum und nahm von der zweiten bis zur dritten Woche sowie von der dritten Woche bis zur Ernte jeweils signifikant ab. Dementsprechend war die Menge des $^{14}\text{CO}_2$ aus der Respiration von Wurzeln und Bodenorganismen (RWB) zwischen dritter Woche und Ernte signifikant angestiegen. Allerdings kann der Rückgang der $\text{WFR}_{(\text{Boden})}$ nicht allein durch die RB erklärt werden, blieb doch die Summe der ^{14}C -Aktivität aus der RWB hinter dem Rückgang der $\text{WFR}_{(\text{Boden})}$ zurück. Als Erklärung für diese Differenz kommen z.B. Auswaschungsverluste von löslichen organischen oder anorganischen ^{14}C -Verbindungen oder Verschleppung ^{14}C -markierten Materials durch Fraß und nachfolgende Abwanderung von Bodenorganismen (z.B. Regenwürmer) aus dem untersuchten Bodenvolumen in Frage. In sehr begrenztem Umfang ist auch eine erneute Aufnahme von ^{14}C -Verbindungen durch die Wurzeln selbst nicht auszuschließen (JENSEN 1993). Darüber hinaus ist von geringfügigen ^{14}C -Verlusten während Lagerung und Auswaschung der Proben auszugehen (BÖHM 1979).

Abweichend von den hier vorgestellten Ergebnissen erreichte die $\text{WFR}_{(\text{Boden})}$ im Feldversuch mit Weizen, dem ein ausgeprägtes Speicherorgan wie die Pfahlwurzel fehlt, bereits innerhalb der ersten 5 Tage nach PM ihr Maximum (SWINNEN et al. 1994^b). Ab der zweiten Woche waren die zeitlichen Verläufe dann vergleichbar – gekennzeichnet durch eine langsame und sich im Laufe der Zeit schwächer werdende Abnahme der $\text{WFR}_{(\text{Boden})}$. Im Gefäßversuch stellten MILCHUNAS et al. (1985) die maximale $\text{WFR}_{(\text{Boden})}$ unter Weizen bereits 3,5 h nach PM und in

den anschließenden 9 Wochen einen leichten, aber kontinuierlichen Rückgang (n.s.) der $\text{WFR}_{(\text{Boden})}$ fest.

Die RWB fiel gegenüber Angaben in der Literatur auf den ersten Blick recht gering aus. Am Ende der Vegetationsperiode waren lediglich 1,4% des netto assimilierten ^{14}C (= 13,5% des $\text{Transf.}_{(\text{uBOF})}$) durch Wurzeln und Bodenmikroorganismen veratmet worden. MERBACH et al. (1996) stellten bei Messungen der RW von 8 verschiedenen Spezies in frühen Stadien der vegetativen Entwicklung große Unterschiede zwischen den Arten fest. Die höchsten Werte traten bei Leguminosen (Erbse/Luzerne) mit Anteilen der RW z.T. > 20% an der Nettoassimilation auf. Getreide (SW) lag mit um die 10% im Mittelfeld, während die mit 4% geringste RW aller in der zitierten Studie untersuchten Pflanzen der Kreuzblütler Örettich aufwies. Mit ebenfalls nur ca. 4% der Nettoassimilation schätzen SHEPHERD & DAVIES (1993) die Wurzelatmung drei Wochen alter Rapspflanzen ein. Desweiteren geht aus den Untersuchungen von MERBACH et al. (1996) hervor, daß die RW bereits während der vegetativen Stadien mit fortschreitender Pflanzenentwicklung rasch abnimmt. Versuche von MEHARG & KILLHAM (1990^b) sowie SWINNEN et al. (1995^b) bestätigen dies und zeigen weiter, daß die RW insbesondere mit dem Übergang in die generativen Entwicklungsstadien sehr stark nachläßt. GREGORY & ATWELL (1991) beziffern den Anteil der Respiration von Wurzeln und Bodenorganismen (RWB) unter Weizen und Gerste im Feldversuch bei Begasung zur Bestockung auf 16% bzw. 25%. Bei PM zur Blüte sank der Anteil der RWB auf lediglich 3,3% respektive 2,1%, zur Milchreife schließlich auf 2,7% bzw. 2,1% der Nettoassimilation ab. Angaben zu Raps oder verwandten Arten, die in vergleichbaren Entwicklungsstadien markiert wurden, waren der Literatur zum Zeitpunkt dieser Untersuchungen leider nicht zu entnehmen. Legt man aber die gegenüber anderen Arten auffallend geringe RW von Rapspflanzen bereits in sehr frühem Entwicklungsstadium (SHEPHERD & DAVIES 1993) zugrunde und berücksichtigt darüber hinaus, daß die RW mit fortschreitender Pflanzenentwicklung immer geringer wird, so sind die in der vorliegenden Arbeit gemessenen Werte durchaus realistisch.

Aus Abbildung 4.3 geht weiterhin hervor, daß die $\text{WFR}_{(\text{PW})}$ und $\text{WFR}_{(\text{WZ})}$ sich im Untersuchungszeitraum nicht signifikant veränderten. Jedoch fällt zwischen erster und zweiter Probenahme eine sehr ausgeprägte Tendenz zu abnehmender $\text{WFR}_{(\text{PW})}$ bei gleichzeitig starker Zunahme der $\text{WFR}_{(\text{WZ})}$ auf. Dies weist auf eine mögliche Bedeutung der Pfahlwurzel als Speicherorgan hin: Offensichtlich wird ein Teil der vom Sproß in die Pfahlwurzel transferierten Assimilate zunächst „zwischengelagert“, um dann sukzessive in den Sproß oder ans Wurzelsystem und schließlich in den Boden abgegeben zu werden. Ein derartiger Zusammenhang würde die von SWINNEN et al. (1994^b) beobachtete abweichende zeitliche Entwicklung der $\text{WFR}_{(\text{WZ})}$ unter Weizen erklären, die von einem raschen Anstieg innerhalb der ersten 5 Tage nach PM und nachfolgendem stetigen Rückgang der $\text{WFR}_{(\text{WZ})}$ gekennzeichnet war.

Zwischen zweiter und dritter Woche nach PM nahm die $\text{WFR}_{(\text{PW})}$ leicht zu, in den Seiten- und Feinwurzeln hingegen ab. Bis zur Ernte war anschließend in der Pfahlwurzel ein schwacher Rückgang (n.s.), im Wurzelsystem ein leichter Anstieg (n.s.) des ^{14}C -Gehaltes zu verzeichnen. Dies legt die Vermutung nahe, daß im gesamten Verlauf der Vegetationsperiode das Wurzelwachstum nicht nur aus neu fixierten Assimilaten, sondern auch aus dem Vorrat in der Pfahl-

wurzel bestritten wird. Wenngleich beide Tendenzen statistisch nicht signifikant waren, macht eine Zunahme der Aktivität im Wurzelsystem eine Berechnung der relativen Rhizodeposition nach der o.g. Gleichung [1] unmöglich, da sich daraus ein negativer Wert für WU ergeben würde. Bereits an dieser Stelle zeigt sich, daß der gewählte Ansatz zumindest für Raps nicht geeignet ist, den WU zu berechnen.

Die folgende Abbildung 4.4 zeigt die Veränderungen der ^{14}C -Aktivitäten in Wurzeln und Boden differenziert nach Bodenschichten. Die Zunahme der ^{14}C -Aktivität im Bodenmaterial zwischen dritter Woche und Ernte blieb im wesentlichen auf die beiden oberen Schichten (0-10 u. 10-20 cm) beschränkt. In diesen Substratlagen befand sich der bei weitem größte Anteil der ^{14}C -Aktivität.

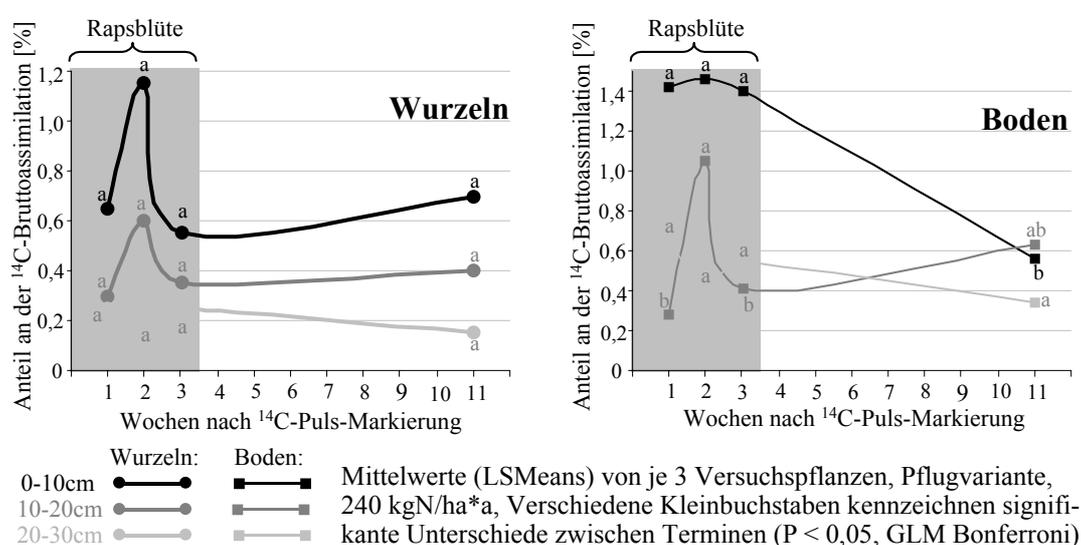


Abbildung 4.4: ^{14}C -Wiederfindungsraten in den Fraktionen unterhalb der Bodenoberfläche (bis 30 cm Tiefe) in Abhängigkeit von der Zeitdauer nach ^{14}C -Pulsmarkierung zum Beginn der Rapsblüte (5.5.1998)

In der obersten Schicht veränderte sich die $\text{WFR}_{(\text{Boden})}$ in den ersten drei Wochen kaum, nahm danach bis zur Ernte jedoch signifikant ab. In 10-20 cm Tiefe war zwischen erster und zweiter Woche signifikant ein starker Anstieg, danach bis zur dritten Woche ein ebenso ausgeprägter Abfall der WFR festzustellen, der hinsichtlich Dynamik und zeitlichem Verlauf parallel mit der $\text{WFR}_{(\text{WZ})}$ der Bodenschichten 0-10 und 10-20 cm verlief. Bis zum Erntetermin nahm die $\text{WFR}_{(\text{Boden } 10-20\text{cm})}$ dann leicht ab (n.s.). Die Veränderungen innerhalb 20-30 cm Bodentiefe waren nur schwach (n.s.). Die starke Abnahme der $\text{WFR}_{(\text{Boden } 0-10\text{cm})}$ nach der dritten Woche, der wesentlich geringere Veränderungen in den darunterliegenden Schichten gegenüberstehen, ist in erster Linie im Zusammenhang mit einer höheren biologischen Aktivität direkt unterhalb der Bodenoberfläche und dadurch beschleunigtem Abbau und Veratmung der wurzelbürtigen ^{14}C -Verbindungen zu sehen. In geringem Umfang könnte auch eine Verlagerung durch Auswaschung löslicher ^{14}C -Verbindungen zur Abnahme der $\text{WFR}_{(\text{Boden})}$ in der Bodenschicht 0-10 cm beigetragen haben, wodurch sich die leichte Zunahme in der mittleren Schicht erklären würde. Versuche von MERBACH et al. (1999) ergaben, daß von 10 unter-

suchten Arten die Wurzelausscheidungen der Brassicaceae Ölrettich den größten Anteil wasserlöslicher ^{14}C -Verbindungen aufwies.

Die $\text{WFR}_{(\text{Wz})}$ nahm mit der Tiefe, analog zur Durchwurzelungsintensität (vgl. Teil 3), zu allen Terminen annähernd exponentiell ab. Entsprechende Tiefenverteilungen wurden übereinstimmend von DINWOODIE & JUMA (1988), XU & JUMA (1993), JENSEN (1993) sowie SWINNEN et al. (1994^b) beobachtet.

Hinsichtlich der zeitlichen Entwicklung fällt eine ausgeprägte Differenzierung innerhalb der Schichten auf: In der obersten Bodenschicht war bis zur zweiten Woche nach PM ein kräftiger Anstieg, danach schnelles Abfallen der $\text{WFR}_{(\text{Wz})}$ zu verzeichnen. Nach unten schwächt sich dieses Muster ab, ist aber auch in der mittleren Tiefe noch sehr deutlich zu erkennen. Demgegenüber nahm die $\text{WFR}_{(\text{Wz})}$ in 20-30 cm Tiefe bereits nach der ersten Woche geringfügig ab, um anschließend zwischen zweiter und dritter Woche wieder leicht anzusteigen. Im weiteren Verlauf der Vegetationsperiode war in den beiden oberen Schichten ein geringfügiger Anstieg, in der untersten Schicht jedoch ein minimaler Rückgang der $\text{WFR}_{(\text{Wz})}$ zu beobachten. Diese Muster passen hervorragend zu der zuvor geäußerten Vermutung, daß in der Pfahlwurzel zwischengespeicherte Kohlenhydrate sukzessive ins Wurzelsystem investiert werden: Die Raps Pfahlwurzel dringt etwa 10-15 cm tief in den Boden ein. Je näher sich die Wurzelsegmente als Verbraucher der angelieferten Kohlenhydrate an der Quelle der C-Verbindungen, in diesem Falle dem „Speicher“ Pfahlwurzel befinden, desto höher scheint die Menge der abgegebenen C-Verbindungen zu sein. Je weiter entfernt von der Pfahlwurzel die Wurzeln wachsen, desto geringer ist der Anteil der Zuteilung aus dem labilen Pool der Pfahlwurzel. Dies entspricht der Vorstellung, daß der C-Export bevorzugt zu den der „Source“ am nächsten gelegenen „Sinks“ (FETENE et al. 1993) stattfindet. Die Existenz eines Vorrates mobiler oder remobilisierbarer Kohlenhydrate in der Pfahlwurzel würde einen Erklärungsansatz für die leichte Zunahme der $\text{WFR}_{(\text{Wz})}$ nach Ablauf der dritten Woche liefern.

Alles in allem traten nach der dritten Woche in Sproß- und Wurzelsubstanz keine signifikanten Veränderungen der WFR mehr auf. Dies bestätigt im wesentlichen die eingangs erwähnte Annahme einer nach spätestens drei Wochen überwiegend stabilen Assimilatverteilung (KEITH et al. 1986, SWINNEN et al. 1994^b u.a.). Da aber, wie aus den Abbildungen 4.3 und 4.4. hervorgeht, die $\text{WFR}_{(\text{Wz})}$ – vor allem in den beiden obersten Bodenschichten – vom Zeitpunkt 3 Wochen nach PM bis zur Ernte leicht zu- und nicht wie erwartet abnahm, ist die Berechnung des WU aus einer hypothetisch unterstellten Abnahme der $\text{WFR}_{(\text{Wz})}$ zwischen diesen beiden Terminen nicht möglich. Die Rhizodeposition würde entsprechend stark unterschätzt. Als Ursache für den leichten Netto-Anstieg der WFR nach der dritten Woche kommt in erster Linie der Einbau von retranslozierten C-Verbindungen in neu wachsende Wurzeln in Frage. Als mögliche Quellen für diese mobilen/remobilisierten C-Verbindungen sind die Pfahlwurzel und der Stengel der Rapspflanzen zu nennen. MILCHUNAS et al. (1985) beobachteten auch bei Weizen und v.a. einem perennierenden Gras (*Bouteloua gracilis*) Bewegungen von mobilen ^{14}C -Verbindungen bis 9 Wochen nach PM. Diese bewirkten ab 5 Tage nach PM zwar ebenso wie beim Winterraps keine signifikanten Veränderungen der WFR in Sproß oder Wurzeln, aber bei *Bouteloua gracilis* einen kontinuierlichen Anstieg der $\text{WFR}_{(\text{Wz})}$ über die gesamte

Beobachtungsdauer. Bei Weizen wurden ebenfalls ^{14}C -Flüsse beobachtet. Anders aber als bei dem perennierenden Gras verlief die ^{14}C -Verlagerung bei der annualen Art vorwiegend von der Wurzel in den Sproß. In beiden Spezies beobachteten die Autoren über die gesamte Versuchsdauer einen Einbau ^{14}C -markierter Verbindungen in Zellwandgewebe, wobei mit fortschreitender Pflanzenentwicklung der Anteil der Wurzeln an diesem ^{14}C -Einbau aus dem mobilen Pool relativ zum Sproß immer mehr zunahm. Am Ende des Versuches (Weizen: Totreife) war bei beiden Arten mehr ^{14}C in Zellwänden der Wurzeln als in denen des Sprosses nachzuweisen. All diese Beobachtungen belegen das Vorhandensein eines "Pools" mobiler bzw. remobilisierbarer C-Verbindungen innerhalb der Pflanze. Die im hier vorgestellten Versuch zwischen den beiden Probenahmeterminen beobachteten Anstiege der ^{14}C -Aktivitäten in den generativen Organen (+2%) sowie den Seiten- und Feinwurzeln sind, wenngleich statistisch nicht signifikant, als deutliche Hinweise auf solche ^{14}C -Flüsse auch in der Rapspflanze zu interpretieren. Da die Differenz aus den Werten zweier Meßzeitpunkte nur die Netto-Veränderung erfaßt, ist davon auszugehen, daß die realen Bewegungen größeren Umfangs sind.

2.4. Versuch 2: Einfluß von N-Düngung und Bodenbearbeitung

Der Einfluß von Bodenbearbeitung und N-Düngung auf die Assimilatverteilung in Winterrapspflanzen wurde 1998 auf Schlag 5 des SFB 192 untersucht. Aus der Kombination von je zwei Bodenbearbeitungsverfahren (Pflugdrillsaat „P“ und Frässohlensaat System Horsch „H“) und zwei N-Düngungsstufen (0 bzw. 240 kgN/ha*a) ergaben sich vier Versuchsvarianten (P0, P240, H0 u. H240). Anschließend an eine ^{14}C -PM zu Beginn der Rapsblüte (BBCH-Code 62 unter N-Mangel, bzw. 63 unter 240 kgN/ha) wurden nach drei Wochen bzw. nach elf Wochen zum Ende der Vegetationsperiode 3-6 Pflanzen je Versuchsvariante geerntet und die ^{14}C -Gehalte in einzelnen Sproßorganen, Wurzeln und Boden dreier Bodenschichten à 10 cm sowie dem Boden entweichendem respiratorischen $^{14}\text{CO}_2$ gemessen (vgl. Teil 1, Kap. 2.4.3.). Ursprünglich war die Berechnung von Wurzelumsatz (WU) und Rhizodeposition (RD) aus der Abnahme der ^{14}C -Aktivität in den Wurzeln (AW) zwischen den beiden Terminen (Δ_{AW}) vorgesehen. Bereits die Auswertung der Ergebnisse von Versuch 1 zeigte jedoch, daß aufgrund von Assimilatretanslokationen ins Wurzelsystem die Rhizodeposition bei dieser Vorgehensweise höchstwahrscheinlich stark unterschätzt würde.

2.4.1. Einfluß der N-Düngung

Im Mittel über alle Behandlungskombinationen war ein signifikanter Rückgang der Gesamtwiederfindungsrate ($\text{WFR}_{(\text{ges.})}$) vom Blüte- (drei Wochen nach PM) bis zum Erntetermin festzustellen (Tabelle 4.1). Die Wechselwirkung „N-Düngung*Entnahmetermin“ war statistisch nicht signifikant, so daß eine gemeinsame Verrechnung beider Termine zur Beurteilung der N-Effekte zulässig ist. Die Varianzanalyse ergab hingegen signifikante Einflüsse der Interaktion „Bodenbearbeitung*N-Düngung“ (BB^*N) für den Anteil an der ^{14}C -Bruttoassimilation in Gesamtsystem, Sproß, Stengel und Pfahlwurzel. Für diese Fraktionen muß die Beurteilung der N-Effekte daher getrennt nach Bodenbearbeitungsböcken erfolgen.

Tabelle 4.1: Einfluß der N-Düngung auf die ^{14}C -Wiederfindungsraten im System Pflanze-Boden 3 („Blüte“) bzw. 11 Wochen („Ernte“) nach ^{14}C -Pulsmarkierung zum Beginn der Rapsblüte (5.5.1998)

	Termin: Blüte		Ernte		\bar{x} beide Termine	
	0	240	0	240	0	240
N-Niveau [kgN/ha*a]:						
Fraktion:	Anteil an der ^{14}C -Bruttoassimilation [%]*					
Gesamtsystem (Frässohlensaat)	72,0 ^a	45,3 ^b	60,0 ^a	37,6 ^b	66,0 ^a	41,5 ^b
Gesamtsystem (Pflug)	58,5 ^a	44,0 ^b	47,2 ^a	37,5 ^a	52,9 ^a	40,8 ^b
Sproß (Frässohlensaat)	69,3 ^a	42,0 ^b	56,6 ^a	34,6 ^b	63,0 ^a	38,3 ^b
Sproß (Pflug)	54,5 ^a	40,0 ^b	43,4 ^a	34,0 ^a	49,0 ^a	37,0 ^b
^{14}C unterhalb der Bodenoberfläche	3,37 ^a	3,78 ^a	3,48 ^a	3,33 ^a	3,42 ^a	3,45 ^a

* Mittelwerte (LSMeans) von je 3 Versuchspflanzen/Bodensäulen, unterschiedliche Kleinbuchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede zwischen den N-Düngungsstufen, (GLM BONFERRONI, $P < 0,05$).

Wie aus Tabelle 4.1 hervorgeht, führte N-Düngung gegenüber der ungedüngten Variante stets zu erheblich geringerer ^{14}C -WFR_(Sproß) und dadurch bedingt zu einer wesentlich kleineren WFR_(ges.). Im Mittel beider Termine war dieser Effekt hoch signifikant ($P < 0,0001$).

Die durch das Verfahren der Pulsmarkierung (PM) mit einer definierten ^{14}C -Aktivität, die für alle Pflanzen gleich hoch war, gewonnenen Daten sind repräsentativ für die Assimilatverteilung und -verwertung, nicht aber für die Photosyntheseleistung, also die pro Zeiteinheit assimilierte C-Menge. Da alle markierten Pflanzen direkt im Anschluß an die PM die gleiche Menge ^{14}C aufgenommen hatten, darf die gegenüber der N-Mangelvariante verminderte ^{14}C -Nettoassimilation der gedüngten Pflanzen keinesfalls mit einer absolut geringeren C-Fixierung gleichgesetzt werden. Bei näherer Betrachtung zeigt sich vielmehr, daß der Stoffwechsel der Pflanzen bei guter N-Versorgung insgesamt erheblich intensiviert war. Den Effekt signifikant (Gerste) bzw. tendenziell (Weizen) höherer ^{14}C -Nettoassimilation durch reduzierte Düngung nach einer PM mit definierter ^{14}C -Aktivität beobachteten in sehr ähnlicher Weise SWINNEN et al. (1995^a) bereits bei wesentlich geringeren Unterschieden hinsichtlich der N-Zufuhr. Die Sproßtrockenmassen und der $C_{(\text{ges.})}$ -Gehalt des Sprosses und demnach die Netto-C-Fixierung waren durch den N-Mangel reduziert, die WFR_(Sproß) jedoch erhöht. Die geringere ^{14}C -Nettoassimilation der Pflanzen in den Varianten mit hoher N-Zufuhr kann nur durch größere ^{14}C -Verluste – in erster Linie einer höheren RS – verursacht worden sein. Photosyntheseleistung und Biomasseproduktion werden bis zur optimalen N-Versorgung durch Steigerung der N-Zufuhr erhöht (vgl. BECK 1996). Für Raps sind größere Blatt- und Schotenflächen, höhere Effizienz hinsichtlich der Ausnutzung der photosynthetisch nutzbaren Strahlung und in der Konsequenz eine gesteigerte Biomasseproduktion dokumentiert (DRECCER et al. 2000). Für den N-gedüngten Raps im hier ausgewerteten Versuch kann das nur bedeuten, daß die während der PM in den Begasungshauben zur Verfügung stehende ^{14}C -Aktivität in wesentlich kürzerer Zeit aufgenommen worden sein muß und die Pflanzen nachfolgend größere Mengen ^{12}C assimilierten als die Sprosse der N-Mangelvarianten ($^{12}\text{CO}_2$ wurde bereits während der PM nachgeliefert, um eine Unterschreitung des Kompensationspunktes zu verhindern). Als Belege seien hier die – gegenüber N-defizitären Pflanzen – erheblich größeren Sproßtrockenmassen (vgl. Abbildung 3.22), die zum Zeitpunkt der PM wesentlich höhere relative Wachstumsrate (vgl. Abbildung 3.34) und vor allem die beträchtlich geringere spezifische Aktivität

der Trockensubstanz der Rapssprosse aus den Varianten mit 240 kgN/ha*a angeführt. Die spezifische Aktivität des Sproßmaterials betrug in den N-Mangelpflanzen zur Blüte im Mittel 133 kBq/g, zur Ernte waren es 109 kBq/g. Die korrespondierenden Werte für N-gedüngte Pflanzen lagen bei 77 respektive 43 kBq/g. Zu übereinstimmenden Ergebnissen kamen VERBURG et al. (1998), die mittels einer PM von *Calluna vulgaris*, in deren Verlauf Pflanzen 16 Stunden lang einer Atmosphäre mit konstantem $^{14}\text{CO}_2$ Partialdruck ausgesetzt waren zeigten, daß bei hoher N-Zufuhr die ^{14}C -Netto-Fixierung etwas mehr als verdoppelt und die spezifische Aktivität in der Trockensubstanz der N-defizitären Pflanzen 3 Wochen nach PM im Mittel um etwa 35% verringert war. Die Unterschiede zwischen den N-Stufen waren dabei geringer als im eigenen Versuch.

Sowohl die niedrigeren Werte der spezifischen Aktivität, in denen eine stärkere Verdünnung des assimilierten ^{14}C durch ^{12}C zum Ausdruck kommt, als auch die stärkere Abnahme zwischen den Terminen sind nur durch höhere Fixierung von ^{12}C zwischen beiden Terminen zu erklären, da eine selektive Abgabe von ^{14}C nicht anzunehmen ist. Aus den Werten läßt sich überschlüssig eine bei N-Düngung um ungefähr das Doppelte höhere Netto-C-Fixierung (mit zum Erntetermin steigender Tendenz) abschätzen. Der höheren Photosyntheseleistung steht ein verstärkter Energiebedarf der größeren und schneller wachsenden Pflanzen gegenüber, der in einem verstärkten Assimilatverbrauch für Erhaltungatmung und Biosynthese und in der Summe schließlich einer höheren RS zum Ausdruck kommt. Da nach BELL & INCOLL (1990) durch Respiration bevorzugt Assimilate aus der rezenten Photosynthese und nur untergeordnet remobilisierte verbraucht werden, ist hierin die Ursache für die stark verminderte ^{14}C -Nettoassimilation der N-gedüngten Rapspflanzen zu sehen. Um die reale Steigerung der C-Assimilation durch N-Düngung abzuschätzen, müßten diese Erhaltungs- und Synthesekosten einbezogen werden. Die RS der N-gedüngten Pflanzen lag im Mittel beider Termine um etwa 30% höher, so daß sich bei verdoppelter Netto-C-Fixierung grob geschätzt eine um etwa das Dreifache erhöhte Brutto-C-Fixierung ergibt. Bei – mit den eigenen Experimenten – vergleichbaren Unterschieden hinsichtlich der N-Versorgung fanden COTRUFO & GORISSEN (1997) die Netto-C-Fixierung dreier Grasspezies um über 300% gesteigert.

Häufig wurde der Einfluß der N-Zufuhr auf die Verteilung ^{14}C -markierter Assimilate an Pflanzen studiert, die über längere Perioden in Atmosphären mit ^{14}C -markiertem CO_2 bei +/- konstantem $^{14}\text{C}/^{12}\text{C}$ -Verhältnis wuchsen (kontinuierliche Markierung [KM]). Diese Experimente führen generell zu dem Ergebnis durch N-Düngung erhöhter ^{14}C -Fixierung, namentlich z.B. bei Weizen (LILJEROTH et al. 1990), Gerste (JOHANSSON 1992, ZAGAL 1993), verschiedenen perennierenden Gräsern (COTRUFO & GORISSEN 1997) sowie *Calluna vulgaris* (VERBURG et al. 1998). Der entscheidende Unterschied zwischen KM und PM besteht darin, daß in den Begasungskammern bei KM ständig ^{14}C nachgeliefert wird. Das gesamte durch RS freigesetzte $^{14}\text{CO}_2$ verbleibt in der Kammer und steht den Pflanzen somit sofort wieder zur Reassimilation zur Verfügung. Die Verluste durch RS können bei KM nicht erfaßt werden.

Der Anteil der in die Fraktionen unterhalb der Bodenoberfläche transferierten ^{14}C -Assimilate (Transf._{(u)BOF}) an der ^{14}C -Bruttoassimilation lag durchgehend bei ca. 3,5% und blieb von der N-Düngung weitestgehend unbeeinflußt. SWINNEN et al. (1995^a) stellten bei Gerste eine

Tendenz zu geringerem, unter Weizen jedoch keine Veränderung des $\text{Transf.}_{(\text{uBOF})}$ in einem Anbausystem mit reduzierter Düngung und Bodenbearbeitung fest.

Wie aus Tabelle 4.2 unschwer zu erkennen ist, wurde die Allokation des brutto assimilierten ^{14}C innerhalb des Sprosses maßgeblich von der N-Düngung beeinflusst. Hinsichtlich der ^{14}C -Gehalte im Stengel fiel dieser Einfluß in beiden Bodenbearbeitungsblöcken sehr unterschiedlich aus. Unter Frässohlensaat führte N-Düngung signifikant zu stark reduzierter, unter Pflug zu leicht (n.s.) erhöhter $\text{WFR}_{(\text{Stengel})}$. Die $\text{WFR}_{(\text{Stengel})}$ nahm in beiden Bodenbearbeitungsblöcken unter N-Mangel vom Blüte- bis zum Erntetermin ab. Unter Horsch war diese Tendenz sehr deutlich ($P = 0,057$), während bei hohem N-Niveau unter Pflug nur geringfügige Änderungen und in der Horschvariante sogar ein leichter Zuwachs zu erkennen war (n.s.). N-Mangel scheint demnach zu einer stärkeren Auslagerung der im Stengel gespeicherten Kohlenhydrate in der Zeit bis zur Ernte geführt zu haben.

Die $\text{WFR}_{(\text{Blätter})}$ war insgesamt recht gering und lag mit 2,9% in der gedüngten Variante signifikant höher als unter fehlender N-Düngung (0,7%), was damit zusammenhängen dürfte, daß der in allen Varianten zu beobachtende Beginn der Seneszenz der Blätter unter N-Mangel etwas fortgeschrittener war.

Tabelle 4.2: Einfluß der N-Düngung auf die Verteilung ^{14}C -markierter Assimilate auf die Sproßorgane 3 („Blüte“) bzw. 11 Wochen („Ernte“) nach ^{14}C -Pulsmarkierung zum Beginn der Rapsblüte (5.5.1998)

Termin: N-Niveau [kgN/ha*a]:	Blüte		Ernte		\bar{x} beide Termine	
	0	240	0	240	0	240
Sproßorgan:	Anteil an der ^{14}C -Bruttoassimilation [%]*					
Stengel (Frässohlensaat)	30,3 ^a	18,7 ^b	24,0 ^a	22,2 ^a	27,2 ^a	20,4 ^b
Stengel (Pflug)	24,0 ^a	28,5 ^a	20,6 ^a	26,5 ^a	22,3 ^a	27,5 ^a
Blätter	0,7 ^a	2,9 ^b	÷	÷	÷	÷
Blüten	0,12 ^a	0,05 ^a	÷	÷	÷	÷
Schoten (inkl. Körner)	33,4 ^a	9,8 ^b	27,7 ^a	9,8 ^b	30,7 ^a	9,8 ^b
Körner	÷	÷	11,2 ^a	4,5 ^b	÷	÷

* Mittelwerte (LSMeans) von je 3 Versuchspflanzen, unterschiedliche Kleinbuchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede zwischen den N-Düngungsstufen, (GLM BONFERRONI, $P < 0,05$), ÷: keine Daten zu diesem Termin.

Zum Zeitpunkt der ersten Probenahme war der Raps bereits fast vollständig verblüht. Dementsprechend gering war die WFR in den restlichen Blüten. N-Mangel hatte eine sehr stark erhöhte $\text{WFR}_{(\text{Blüten})}$ zur Folge. Von allen untersuchten Fraktionen wiesen die Blüten der N-defizitären Pflanzen die mit großem Anstand höchste spezifische Aktivität (1750 kBq/g TS!) auf. Aufgrund des geringen Stichprobenumfangs (Reste von Blüten nur noch an wenigen Einzelpflanzen) war der Befund höherer $\text{WFR}_{(\text{Blüten})}$ unter N-Mangel statistisch nicht abzusichern.

Sehr große Unterschiede zwischen den N-Düngungsvarianten zeigten sich hinsichtlich der WFR in den generativen Organen. Bereits bei der ersten Probenahme zum Ende der Blüte befand sich unter N-Mangel der größte Teil des brutto assimilierten ^{14}C in den Schoten. Gegenüber den Pflanzen, die N-Düngung erhielten, war dieser Anteil hoch signifikant um etwa

das Dreifache erhöht. Knapp die Hälfte des ^{14}C der Schoten entfiel am Erntetermin auf die Samenkörner. Da zum Zeitpunkt der PM noch keine Schotenansätze zu erkennen waren, ist davon auszugehen, daß ein sehr großer Teil des in den Schoten eingebauten ^{14}C – vor allem innerhalb der ersten drei Wochen nach PM – durch Retranslokation vormals mobiler ^{14}C -Verbindungen aus anderen Teilen der Pflanze in die generativen Organe umverlagert wurde. Daß Umverlagerungen von Kohlenhydraten innerhalb der Pflanze in größerem Umfang auftreten und daß remobilisierte C-Verbindungen hauptsächlich in die generativen Organe retransloziert werden, zeigten BELL & INCOLL (1990) in ^{14}C -PM-Experimenten mit Weizen. Dabei wurde in frühen Entwicklungsstadien aufgenommenes ^{14}C aus den Blättern in geringen Mengen in den Ähren wiedergefunden. Teile des nach der Blüte assimilierten ^{14}C wurden zunächst im Stengel gespeichert und im späteren Verlauf der Vegetationsperiode in die Ähren retransloziert. Die Abnahmen der $\text{WFR}_{(\text{Stengel})}$ insbesondere in den N-Mangelvarianten implizieren ähnliche Prozesse beim Raps, die im Prinzip in beiden N-Düngungsstufen, unter N-Mangel jedoch erheblich verstärkt, abgelaufen zu sein scheinen.

Die Tatsache, daß zum Erntetermin bemerkenswerte ^{14}C -Aktivitäten in den Samenkörnern nachzuweisen waren – unter N-Mangel in signifikant größerem Umfang – belegt die Präsenz von Umverlagerungsprozessen. Zur ersten Probennahme waren Samen noch nicht ausgebildet. ^{14}C -markierte Substanz kann demnach nur durch Retranslokation in die Körner gelangt sein, die ebenfalls von HOCKING & MASON et al. (1993) beobachtet und eingehender untersucht wurde. Nach diesen Autoren setzen Umverlagerungsprozesse mit dem beginnenden Wasserentzug aus Schoten und Körnern etwa 3-4 Wochen vor der Totreife verstärkt ein. C-Verbindungen und Nährstoffe werden in den Schotenwänden abgebaut und in die Körner umverlagert. Diese Beschreibung deckt sich sehr gut mit dem hier beobachteten Verlauf der $\text{WFR}_{(\text{Schoten})}$ und $\text{WFR}_{(\text{Körner})}$. Die stark abnehmende $\text{WFR}_{(\text{Stengel})}$ legt darüber hinaus den Schluß nahe, daß auch C-Verbindungen aus dem Stengel in größerem Umfang an diesen Retranslokationsprozessen beteiligt sind. Insgesamt konzentrierte sich unter N-Mangel ein Großteil (>50%) der $\text{WFR}_{(\text{Sproß})}$ in den generativen Organen, während dieser Anteil in den N-gedüngten Pflanzen unter einem Drittel lag.

Der ^{14}C -Transfer vom Sproß ins Wurzelsystem (inklusive Pfahlwurzel) fiel mit ca. 3,5% des brutto assimilierten ^{14}C relativ gering aus (vgl. Tabelle 4.1). Wie weiter oben bereits diskutiert, ist dies höchstwahrscheinlich im Zusammenhang mit artspezifischen Besonderheiten und v.a. mit dem fortgeschrittenen Entwicklungsstadium zum Zeitpunkt der PM zu sehen.

Die Verteilung auf die unterirdischen Fraktionen (Tabelle 4.3) wurde nur teilweise durch die N-Düngung beeinflusst. Verglichen mit der N-Mangelvariante lag die $\text{WFR}_{(\text{PW})}$ der mit N gedüngten Pflanzen unter Frässohlensaat signifikant höher, im gepflügten Boden hingegen tendenziell niedriger (n.s.). Die WFR im Wurzelsystem (Seiten- und Feinwurzeln [$\text{WFR}_{(\text{WZ})}$]) wurde von der N-Zufuhr nicht signifikant beeinflusst. Tendenziell lag am Ende der hypothetisch angenommenen Allokationsperiode drei Wochen nach PM die $\text{WFR}_{(\text{WZ})}$ der N-defizitären Pflanzen etwas höher. Im Bodenmaterial war die Verteilung umgekehrt: Hier lag die WFR 3 Wochen nach PM in den gedüngten Varianten signifikant höher.

Tabelle 4.3: Einfluß der N-Düngung auf die Verteilung der ins Wurzelsystem transferierten, ^{14}C -markierten Assimilate 3 („Blüte“) bzw. 11 Wochen („Ernte“) nach ^{14}C -Puls-markierung zum Beginn der Rapsblüte (5.5.1998)

Termin:	Blüte		Ernte		\bar{x} beide Termine	
	0	240	0	240	0	240
N-Niveau [kgN/ha*a]:	0	240	0	240	0	240
Fraktion:	Anteil an der ^{14}C -Bruttoassimilation [%]*					
Pfahlwurzel (Fräsohlensaat)	0,33 ^a	0,87 ^b	0,24 ^a	0,72 ^b	0,29 ^a	0,79 ^b
Pfahlwurzel (Pflug)	1,35 ^a	0,90 ^a	0,52 ^a	0,60 ^a	0,94 ^a	0,75 ^a
Seiten- und Feinwurzeln	1,16 ^a	0,92 ^a	0,86 ^a	1,06 ^a	1,01 ^a	0,99 ^a
Bodenmaterial	1,12 ^a	1,83 ^b	1,24 ^a	1,21 ^a	1,18 ^a	1,52 ^a
„Boden-Wurzel-Atmung“ (kumuliert)	0,42 ^a	0,39 ^a	1,03 ^a	0,50 ^b	÷	÷

* Mittelwerte (LSMeans) von je 3 Versuchspflanzen/Bodensäulen, unterschiedliche Kleinbuchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede zwischen den N-Düngungsstufen, (GLM BONFERRONI, $P < 0,05$), ÷: keine Angabe da kumulierte Daten.

Zwischen Blüte- und Erntetermin nahm die $\text{WFR}_{(\text{Wz})}$ unter N-Mangel leicht ab, bei guter N-Versorgung hingegen zu (n.s.). Wiederum war der Verlauf der $\text{WFR}_{(\text{Boden})}$ mit einem Anstieg unter N-Mangel und einer Abnahme unter N-Düngung gegenläufig (n.s.). Parallel dazu war in beiden N-Stufen ein Rückgang der $\text{WFR}_{(\text{PW})}$ (in größtem Umfang und signifikant in P0) zu beobachten, was Exporte von C-Verbindungen aus der Pfahlwurzel andeutet, die unter N-Mangel stärker ausgeprägt waren. Wenngleich es sich bei den Veränderungen von $\text{WFR}_{(\text{Wz})}$ und $\text{WFR}_{(\text{Boden})}$ meist nur um Tendenzen handelt, spricht vieles dafür, daß sie als Hinweis auf C-Flüsse zwischen Pfahlwurzel, Wurzelsystem und Bodenmaterial zu interpretieren sind, die jeweils abhängig von der N-Düngung unterschiedlich ausgeprägt waren. Besonders hingewiesen sei an diesem Punkt nochmals auf den Anstieg der $\text{WFR}_{(\text{Wz})}$ in den N-gedüngten Varianten, der bei einer Berechnung des WU nach dem einleitend vorgestellten Ansatz [1] zu einem negativen Wurzelumsatz führen würde. Selbst bei einer Einbeziehung der offensichtlich aus der Pfahlwurzel nachgelieferten ^{14}C -Verbindungen ergäben sich unrealistisch niedrige Werte, was die Vermutung nahelegt, daß Retranslokationen auch aus dem Sproßbereich (höchstwahrscheinlich aus unteren Abschnitten des Stengels) ins Wurzelsystem stattfanden.

Bei vergleichbaren Untersuchungen zum Einfluß der N-Düngung auf die Assimilatverteilung zwischen Sproß- und Wurzelsystem wurden ganz überwiegend höhere relative Assimilatverteilungen ins Wurzelsystem als Folge verringerter N-Zufuhr bei den untersuchten Arten festgestellt (z.B. Weizen [LILJEROTH et al. 1990], Gerste [JOHANSSON 1992, ZAGAL et al. 1993], Gräser [BÉLANGER et al. 1992, COTRUFO & GORISSEN 1997], Brennessel [FETENE et al. 1993] sowie sowie *Calluna vulgaris* [VERBURG et al. 1998]). Aus den hier vorgestellten Ergebnissen der PM von Raps zur Blüte geht dieser Trend nicht eindeutig hervor. Eine Rolle könnte hierbei spielen, daß die Pflanzenentwicklung zum Zeitpunkt der PM unter N-Mangel etwas fortgeschrittener war als in den hochgedüngten Varianten. Wie bereits erwähnt, geht der $\text{Transf.}_{(\text{uBOF})}$ bei annuellen Arten mit zunehmendem Pflanzenalter stark zurück (vgl. z.B. GREGORY & ATWELL 1991). Besonders ausgeprägt ist dieser Rückgang beim Übergang von vegetativer zu generativer Entwicklung (vgl. ZAGAL 1994^b). In den N0-Varianten lagen die Wurzellängendichten durchgehend höher (vgl. Abbildung 3.32). Das Sproß/Wurzel-Verhältnis wurde mit gesteigerter N-Zufuhr stetig weiter. Mit fortgeschrittener Pflanzenentwicklung trat dieser Effekt in zunehmendem Maße auf (vgl. Abbildung 3.23). Dies zeigt, daß im Mittel

über die Vegetationsperiode auch beim Raps die relative Assimilatanteile ins Wurzelsystem mit anwachsendem N-Defizit stark zunimmt.

Die Menge des durch RWB freigesetzten $^{14}\text{CO}_2$ war unter N-Mangel stark – zum Erntetermin signifikant – erhöht. Übereinstimmend berichten u.a. JOHANSSON (1992) bei Gerstensämlingen und VERBURG et al. (1998) bei *Calluna vulgaris* von relativ zur assimilierten ^{14}C -Menge signifikant erhöhter RWB bei geringerer N-Zufuhr. Die $\text{WFR}_{(\text{Wz})}$ nahm mit der Tiefe stark ab. Diese Abnahme entsprach weitestgehend dem Verlauf der Tiefenverteilung der Wurzelbiomasse (vgl. dazu z.B. Abbildung 3.7). Abbildung 4.5. zeigt weiterhin, daß die $\text{WGR}_{(\text{Boden})}$ zwischen den Bodenschichten 0-10 cm und 10-20 cm stark zurückging. Die $\text{WFR}_{(\text{Boden})}$ in 20-30 cm entsprach in etwa jener der mittleren Schicht. Entsprechende Ergebnisse mit übereinstimmender Tiefenverteilung von Wurzelbiomasse und $\text{WFR}_{(\text{Wz})}$ bei geringerem Rückgang der $\text{WFR}_{(\text{Boden})}$ mit zunehmender Bodentiefe beobachteten SWINNEN et al. (1994^b) unter SW. Sehr ähnliche Tiefenverteilungen von $\text{WFR}_{(\text{Wz})}$ und $\text{WFR}_{(\text{Boden})}$ wurden auch bei SG festgestellt (XU & JUMA 1993, JENSEN 1993).

Die zur Blüte durch N-Defizit signifikant erhöhte $\text{WFR}_{(\text{Wz})}$ in der Bodentiefe 0-10 cm dürfte auf intensiviertes Wurzelwachstum, die stärkere Abnahme bis zur Ernte auf gesteigerten WU in dieser Schicht zurückzuführen sein. Die zur Ernte signifikant höhere $\text{WFR}_{(\text{Boden})}$ in 10-20 cm Tiefe der N-gedüngten Variante könnte aus Auswaschung löslicher ^{14}C -Verbindungen aus der Oberkrume resultieren, deren $\text{WFR}_{(\text{Boden})}$ zwischen den Probenahmen sehr stark zurückging. Es wäre denkbar, daß die Wurzelrückstände und -ausscheidungen der N-gedüngten Pflanzen, z.B. aufgrund ihres mutmaßlich engeren C/N-Verhältnisses, höhere Anteile leicht abbau- und auswaschbarer Verbindungen aufweisen und dadurch ein höherer Anteil löslicher ^{14}C -Verbindungen zustande kommt. Hinweise auf einen solchen Zusammenhang liefern Ergebnisse von COTRUFO & GORISSEN (1997) und (VERBURG et al. 1998), die in der Bodenlösung signifikant erhöhte ^{14}C -Aktivitäten unter besser N-versorgten Pflanzen nachwiesen.

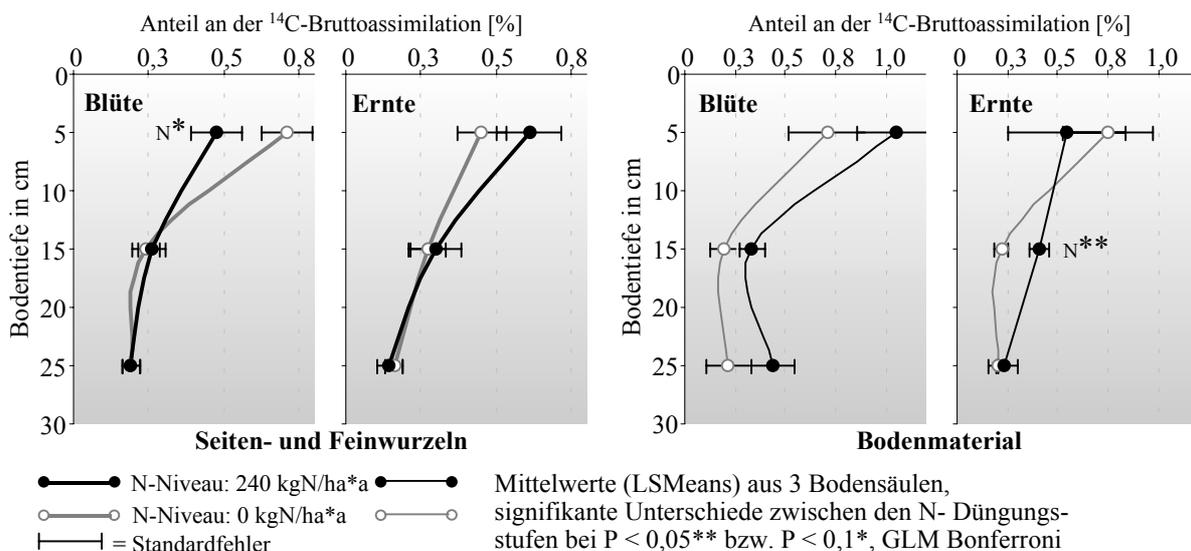


Abbildung 4.5: Einfluß der N-Düngung auf die Tiefenverteilung ins Wurzelsystem transferierter ^{14}C -markierter Assimilate 3 („Blüte“) bzw. 11 Wochen („Ernte“) nach ^{14}C -Pulsmarkierung zum Beginn der Rapsblüte (5.5.1998)

Die mit zunehmender Bodentiefe relativ zur $WFR_{(WZ)}$ steigende $WFR_{(Boden)}$ ist möglicherweise auch im Zusammenhang mit der in tieferen Schichten zunehmend dichteren Lagerung des Substrats zu sehen: Bei jungen Maispflanzen bewirkte eine größere Bodendichte erhöhte Abgabe von ^{14}C an den Boden (HELAL & SAUERBECK 1986), deren Ursache in verstärkter Produktion und Abgabe von Mucigel und Zell-Lysaten liegen dürfte (SWINNEN et al. 1994^b).

Die Menge des durch Respiration von Wurzeln und Bodenorganismen (RWB) freigesetzten und nachfolgend aus dem Boden diffundierten $^{14}CO_2$ war in der ersten Woche nach der ^{14}C -PM am höchsten (Abbildung 4.6). Bis zur zweiten Woche war der Verlauf der $^{14}CO_2$ -Freisetzung in beiden N-Düngungsvarianten nahezu identisch. In der gedüngten Variante wurden nach der dritten Woche nur noch sehr geringe Mengen $^{14}CO_2$ durch RWB freigesetzt. Demgegenüber blieb die Veratmung ^{14}C -markierter Verbindungen in der N-Mangelvariante bis zur Ernte auf deutlich höherem Niveau, so daß die Gesamtmenge des $^{14}CO_2$ aus der RWB am Ende der Vegetationsperiode unter N-Mangel fast doppelt so hoch lag wie in der gedüngten Variante. Da in der hoch gedüngten Variante geringere Wurzellängendichten vorlagen, müssen hier in den ersten drei Wochen nach PM relativ pro Einheit Wurzelbiomasse größere Mengen $^{14}CO_2$ veratmet worden sein. Diese Annahme stimmt mit Ergebnissen von LILJEROTH et al. (1990) sowie JOHANSSON (1992) überein, die eine Erhöhung der absoluten ^{14}C -Freisetzung (pro Einheit Wurzelbiomasse) durch RWB bei gesteigerter N-Düngung von Weizen respektive Gerste feststellten. Der relative Anteil der RWB an der Nettoassimilation war jedoch unter N-Mangel signifikant höher (JOHANSSON 1992), was sich ebenfalls mit den Ergebnissen der vorliegenden Arbeit deckt.

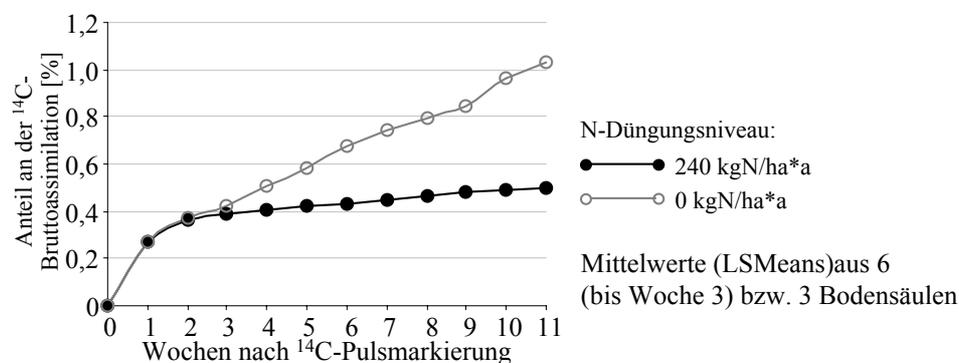


Abbildung 4.6: Einfluß der N-Düngung auf den Anteil des aus dem Boden freigesetzten $^{14}CO_2$ („Boden-Wurzel-Atmung“, kumuliert) nach ^{14}C -Pulsmarkierung zum Beginn der Rapsblüte (5.5.1998)

KUZYAKOV & DOMANSKI (2002) geben an, daß bei Raygras bereits zwei Tage nach PM der Anteil von RB an der gesamten freigesetzten $^{14}CO_2$ -Menge den der RW übersteigt: Während RW mit zunehmendem Abstand zur PM rasch abnimmt, geht die $^{14}CO_2$ -Freisetzung insgesamt nur sehr langsam zurück. Dementsprechend wächst der Anteil der RB überproportional an. Da nach SWINNEN et al. (1994^b) ab der dritten Woche nach PM der bei weitem größte Teil der $^{14}CO_2$ -Produktion auf die RB zurückzuführen ist, läßt die höhere $^{14}CO_2$ -Freisetzung in der Variante N0 auf das Vorhandensein erhöhter Mengen organischer C-

Verbindungen im Boden schließen, was als Hinweis auf durch N-Mangel intensivierten Wurzelumsatz zu interpretieren sein könnte.

Daß die verstärkte $^{14}\text{CO}_2$ -Freisetzung unter N-Mangel erst nach drei Wochen in höheren Freisetzungsraten zum Ausdruck kommt, spricht ebenfalls für die Annahme eines verstärkten WU, da nach SWINNEN (1994) die Umsetzung organischer Wurzelauausscheidungen – in Abhängigkeit von ihrer chemischen Zusammensetzung – mit einem gewissen zeitlichen Versatz beginnt: Während das Maximum der Veratmung leicht zersetzbarer wurzelbürtiger, ^{14}C -markierter organischer Substanz durch Bodenmikroorganismen sehr schnell nach ihrem Eintrag in den Boden erreicht wird, erfolgt der Höhepunkt des Abbaus schwer zersetzbarer Materials, z.B. aus Wurzelzellwänden, erst mit einem zeitlichen Versatz von 8-11 Tagen. Ein langsamerer Abbau der organischen Bodensubstanz ist allein deshalb schon anzunehmen, da die biologische Aktivität in den Böden der N-Mangelvarianten gegenüber gedüngtem Boden insgesamt vermindert war (FRAHM 2000).

2.4.2. Einfluß der Bodenbearbeitung

Aufgrund der statistisch signifikanten Interaktion BB*N muß auch der Haupteffekt Bodenbearbeitung in Hinblick auf die WFR im Gesamtsystem sowie in Sproß, Stengel und Pfahlwurzel getrennt nach N-Düngungsstufen betrachtet werden.

Unter fehlender N-Düngung war ein starker Einfluß der Bodenbearbeitung auf die $\text{WFR}_{(\text{Sproß})}$ und dadurch bedingt auch im Gesamtsystem festzustellen (Tabelle 4.4):

Tabelle 4.4: Einfluß der Bodenbearbeitung auf die ^{14}C -Wiederfindungsraten im System Pflanze-Boden 3 (Blüte) bzw. 11 Wochen (Ernte) nach ^{14}C -Pulsmarkierung zum Beginn der Rapsblüte (5.5.1998)

Termin: Bodenbearbeitung	Blüte		Ernte		\bar{x} beide Termine	
	Horsch	Pflug	Horsch	Pflug	Horsch	Pflug
Fraktion:	Anteil an der ^{14}C -Bruttoassimilation [%]*					
Gesamtsystem (0 kgN/ha*a)	72,0 ^a	58,5 ^b	60,0 ^a	47,2 ^b	66,0 ^a	52,9 ^b
Gesamtsystem (240 kgN/ha*a)	45,3 ^a	44,0 ^a	37,6 ^a	37,5 ^a	41,5 ^a	40,8 ^a
Sproß (0 kgN/ha*a)	69,3 ^a	54,5 ^b	56,6 ^a	43,4 ^b	63,0 ^a	49,0 ^b
Sproß (240 kgN/ha*a)	42,0 ^a	40,0 ^a	34,6 ^a	34,0 ^a	38,3 ^a	37,0 ^a
^{14}C unterhalb der Bodenoberfläche	2,90 ^a	4,30 ^b	3,30 ^a	3,50 ^a	3,00 ^a	3,9 ^a

* Mittelwerte (LSMeans) von je 3 Versuchspflanzen/Bodensäulen, unterschiedliche Kleinbuchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede zwischen den Bodenbearbeitungssystemen, (GLM BONFERRONI, $P < 0,05$).

Im Sproß der Pflanzen, die auf mittels Frässohlensaat bestelltem Boden wuchsen, war sowohl 3 als auch 11 Wochen nach der PM ein signifikant größerer Anteil des ursprünglich bei der Begasung aufgenommenen ^{14}C noch vorhanden, was analog zu den Beobachtungen bei N-Mangel (s.o.) auf eine um knapp 20% geringere RS zurückzuführen sein dürfte. Bei hohem N-Niveau war kein Einfluß der Bodenbearbeitung mehr auf $\text{WFR}_{(\text{ges.})}$ bzw. $\text{WFR}_{(\text{Sproß})}$ zu erkennen. Die Trockenmassebildung war durch die reduzierte Bodenbearbeitung bei fehlender N-

Düngung stark herabgesetzt, während sie sich bei einem N-Niveau von 240 kgN/ha*a kaum von der gepflügten Variante unterschied (vgl. Abbildung 3.22). Demnach ist die – gegenüber H0 – höhere RS der N-defizitären Pflanzen auf gepflügtem Boden als eine Folge des höheren Energieverbrauches durch Erhaltungsaerobic und Biomasseproduktion zu interpretieren. Ein wachstumshemmender Einfluß der Bodenbearbeitung trat bei guter N-Versorgung offensichtlich nicht mehr auf.

Als mögliche Ursachen für die das Pflanzenwachstum einschränkende Wirkung der reduzierten Bodenbearbeitung kommen im wesentlichen die unterhalb der Bearbeitungsgrenze erhöhte Lagerungsdichte, der scharfe Dichtewechsel an der Fräsohle sowie die höhere Wahrscheinlichkeit des Auftretens von anaeroben Bedingungen im Boden in Betracht, die FREY (1998) in den reduziert bearbeiteten Böden der SFB-Versuchsflächen ermittelte, auf denen auch die eigenen Experimente angesiedelt waren. In Versuchen mit Weizen (ATWELL 1990) war die Verteilung einer definierten, für alle Pflanzen gleich großen ^{14}C -Menge dementsprechend sehr ähnlich: Diese war gekennzeichnet durch absolut und relativ größere ^{14}C -Akkumulation im Sproß und geringeren $\text{Transf.}_{(\text{uBOF})}$ der Pflanzen, die auf verdichtetem Substrat wuchsen.

Gegenüber Pflanzen, die bei einer Bodendichte von $1,4 \text{ g/cm}^3$ wuchsen, beobachteten HELAL & SAUERBECK (1986) bei jungen Maispflanzen in auf $1,6 \text{ g/cm}^3$ verdichteten Böden eine Reduktion der Assimilationsleistung (nach KM) um fast die Hälfte. FREY (1998) gibt die Lagerungsdichte für die Unterkrume der Horsch- respektive Pflugvarianten auf den SFB-Flächen mit $1,61 \text{ g/cm}^3$ gegenüber $1,44 \text{ g/cm}^3$ an. Die Angaben zur Wirkung von O_2 -Mangel sind weniger eindeutig. Kürzere anaerobe Phasen führten bei Raygras nach PM mit definierter ^{14}C -Aktivität zu stark reduzierter Nettoassimilation (MEHARG & KILLHAM 1990^a), was einen extremen Anstieg der RS bedeuten würde, sofern die Pflanzen die angebotene ^{14}C -Menge vollständig assimiliert hatten (was aus den veröffentlichten Daten nicht eindeutig hervorgeht). Andernfalls, und dieser Fall scheint wahrscheinlicher, müßte diese Reduktion als starke Einschränkung der Photosyntheseleistung gedeutet werden, wie sie bei länger anhaltendem O_2 -Mangel auftritt (BARTA 1987). Obgleich diese Angaben gut mit den unter Winterraps beobachteten Effekten harmonieren würden, war ein Auftreten anaerober Bedingungen im Boden zum Zeitpunkt der PM eher unwahrscheinlich. Die Beeinflussung langfristigerer Effekte, wie z.B. die zeitliche Entwicklung der WFR in einzelnen Fraktionen oder die RWB durch zeitweiligen O_2 -Mangel ist allerdings nicht auszuschließen, zumal Juni und Juli 1998 überdurchschnittlich feucht und kühl waren (vgl. Abbildung 3.1).

Der $\text{Transf.}_{(\text{uBOF})}$ lag im gehorschten Boden parallel zur Reduktion der Wurzellängendichte dieser Behandlung – am Blütetermin signifikant – niedriger als in der Pflugvariante.

Die Verteilung der ^{14}C -markierten Assimilate auf die einzelnen Sproßorgane (Tabelle 4.5) wurde in hohem Maße durch die Bodenbearbeitung mitbeeinflusst. Bezüglich der ^{14}C -Gehalte im Stengel zeigte sich eine ausgeprägte Wechselwirkung der Bodenbearbeitung mit der N-Düngung: Unter N-Mangel hatte reduzierte Bodenbearbeitung tendenziell erhöhte, bei guter N-Versorgung hingegen eine signifikant geringere $\text{WFR}_{(\text{Stengel})}$ zur Folge. Die WFR in Blättern und Blüten war auf gepflügtem Boden etwas höher (n.s.):

Tabelle 4.5: Einfluß der Bodenbearbeitung auf die Verteilung ^{14}C -markierter Assimilate auf die Sproßorgane 3 (Blüte) bzw. 11 Wochen (Ernte) nach ^{14}C -Pulsmarkierung zum Beginn der Rapsblüte (5.5.1998)

Sproßorgan:	Termin: Blüte		Ernte		\bar{x} beide Termine	
	Bodenbearbeitung: Horsch	Pflug	Horsch	Pflug	Horsch	Pflug
	Anteil an der ^{14}C -Bruttoassimilation [%]*					
Stengel (0 kgN/ha*a)	30,3 ^a	24,0 ^a	24,0 ^a	20,6 ^a	27,2 ^a	22,3 ^a
Stengel (240 kgN/ha*a)	18,7 ^a	28,5 ^b	22,2 ^a	26,5 ^a	20,4 ^a	27,5 ^a
Blätter	1,5 ^a	2,2 ^a	÷	÷	÷	÷
Blüten	0,02 ^a	0,08 ^a	÷	÷	÷	÷
Schoten (inkl. Körner)	25,7 ^a	17,6 ^a	22,3 ^a	15,2 ^b	24,0 ^a	16,3 ^b
Körner	÷	÷	9,1 ^a	6,6 ^a	÷	÷

* Mittelwerte (LSMeans), unterschiedliche Kleinbuchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede zwischen den Bodenbearbeitungssystemen, (GLM BONFERRONI, $P < 0,05$), ÷: keine Daten zu diesem Termin.

Beachtliche Differenzen waren zwischen den Bodenbearbeitungsverfahren hinsichtlich der ^{14}C -Gehalte in den Schoten festzustellen: Die Pflanzen, die auf dem ungepflügten Boden der Horschvariante gewachsen waren, hatten einen signifikant höheren Anteil des zum Markierungszeitpunkt brutto assimilierten ^{14}C in das Wachstum der Schoten investiert als die diejenigen in der Pflugvariante. Je stärker die Mangelsituation, wie sie die reduzierte Bodenbearbeitung, insbesondere in Kombination mit starkem N-Mangel, offensichtlich darstellt, desto größer scheint der Teil der in die generativen Organe translozierten Assimilate zu sein.

Unter Berücksichtigung der Einflüsse der N-Düngung (s.o.) läßt sich aus den vorgefundenen Mustern folgende Vorstellung entwickeln: Unter Bedingungen, die die C-Assimilation und infolge dessen das Wachstum der Pflanzen limitieren, entsteht hinsichtlich der Verfügbarkeit von Photosyntheseprodukten ein gewisser Mangel. Der „Sink“ für die assimilierten Kohlenhydrate, der während der generativen Entwicklungsphase die größte Stärke aufweist, sind die generativen Organe (vgl. BELL & INCOLL 1990). Je geringer die Menge der zu verteilenden Assimilate wird, desto größer wird der Assimilatmangel in allen Pflanzenteilen und desto stärker wirkt sich das „Sink-Stärke-Gefälle“ aus, das die Zuteilung der Photosyntheseprodukte zu den generativen Organen begünstigt. Bei guter Versorgung wird der Gradient schwächer und dementsprechend die Verteilung der Assimilate über alle Teile der Pflanze gleichmäßiger. Wird der Bedarf der generativen Organe vollständig befriedigt, ist bildlich gesprochen die „Senke ausgefüllt“, eine Potentialdifferenz nicht mehr vorhanden und die Pflanze kann sich den „Aufbau eines Vorrates“, eine Einlagerung von Assimilaten, z.B. in Stengel oder Pfahlwurzel, „leisten“.

Für die Assimilatzuteilung des Raps heißt dies: Je größer die Streßsituation, desto mehr ^{14}C -markierte Assimilate wurden in die Schoten respektive nachfolgend in die Körner transloziert. In fortgeschrittenen Phasen der generativen Entwicklung tritt offenbar eine Remobilisation von C-Verbindungen in den Schotenwänden und nachfolgende Retranslokation in die Körner auf, was mit Beobachtungen von HOCKING et al. (1997) und DRECCER et al. (2000) übereinstimmt.

In der Pfahlwurzel waren bei N-Mangel unter Pflug im Mittel beider Termine signifikant höhere ^{14}C -Mengen zu finden als dies in der Horschvariante der Fall war (Tabelle 4.6). Bei guter N-Versorgung war kein Unterschied zwischen den Bodenbearbeitungsverfahren hinsichtlich der $\text{WFR}_{(\text{PW})}$ festzustellen. Der ^{14}C -Gehalt in den Seiten- und Feinwurzeln lag unabhängig von der N-Düngung stets – im Mittel beider Termine signifikant – im gepflügten Boden höher. Auch der ^{14}C -Eintrag über die Wurzeln ins Bodenmaterial der Pflugvariante war gegenüber den Horschvarianten deutlich (zur Blüte signifikant) erhöht. Neben der Tatsache, daß in gelockertem Boden größere Wurzelsysteme festgestellt wurden (vgl. Abbildung 3.33), kommen als weitere Ursachen für die verminderte $\text{WFR}_{(\text{Wz})}$ der Pflanzen in der Horschvariante höhere Lagerungsdichte sowie eine größere Wahrscheinlichkeit des Auftretens anaerober Bedingungen in den Krumenschichten unterhalb der Fräsohle (vgl. FREY 1998) hinzu.

Tabelle 4.6: Einfluß der Bodenbearbeitung auf die Verteilung der ins Wurzelsystem transferrierten ^{14}C -markierten Assimilate 3 (Blüte) bzw. 11 Wochen (Ernte) nach ^{14}C -Pulsmarkierung zum Beginn der Rapsblüte (5.5.1998)

Termin: N-Niveau [kgN/ha*a]:	Blüte		Ernte		\bar{x} beide Termine	
	Horsch	Pflug	Horsch	Pflug	Horsch	Pflug
Fraktion:	Anteil an der ^{14}C -Bruttoassimilation [%]*					
Pfahlwurzel (0 kgN/ha*a)	0,33 ^a	1,35 ^b	0,24 ^a	0,52 ^a	0,29 ^a	0,94 ^b
Pfahlwurzel (240 kgN/ha*a)	0,87 ^a	0,90 ^a	0,72 ^a	0,60 ^a	0,79 ^a	0,75 ^a
Seiten- und Feinwurzeln	0,90 ^a	1,18 ^a	0,79 ^a	1,13 ^a	0,85 ^a	1,15 ^b
Bodenmaterial	1,17 ^a	1,78 ^b	1,08 ^a	1,37 ^a	1,12 ^a	1,57 ^a
„Boden-Wurzel-Atmung“ (kumuliert)	0,40 ^a	0,41 ^a	0,86 ^a	0,68 ^a	÷	÷

* Mittelwerte (LSMeans), unterschiedliche Kleinbuchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede zwischen den Bodenbearbeitungssystemen, (GLM BONFERRONI, $P < 0,05$), ÷: keine Angabe da kumulierte Daten.

So beobachtete BARTA (1987) eine gravierende Reduktion der ^{14}C -Assimilattranslokation in die Wurzeln von Luzerne (*Medicago sativa* L.) und gemeinem Hornklee (*Lutus corniculatus* L.) nach Auftreten massiven O_2 - Mangels im Wurzelraum. HELAL & SAUERBECK (1986) stellten bei jungen Maispflanzen bereits bei leicht erhöhter Bodenverdichtungen deutlich abnehmende ^{14}C -Aktivitäten in den Wurzeln und darüber hinaus eine verstärkte RW fest. Letzteres war ebenso als zunehmend ausgeprägte Tendenz (n.s.) in den Horschvarianten zu beobachten.

Besonders deutlich wird der Einfluß der Lagerungsdichte bei der Betrachtung der Tiefenverteilung der $\text{WFR}_{(\text{Wz})}$ (Abbildung 4.7). Während sich in den oberen 10 cm – die in beiden untersuchten Bodenbearbeitungsverfahren gelockert werden – kein Einfluß der Bodenbearbeitung auf die WFR in Wurzeln und Boden zeigte, waren in den Bodenschichten, die bei Anwendung der Fräsohlensaat nicht gelockert werden (10-20 cm u. 20-30 cm), die ^{14}C -Gehalte in der Wurzelbiomasse gegenüber der gepflügten Variante stets deutlich – zur Blüte signifikant – vermindert. Die ^{14}C -Wiederfindungsrate im Bodenmaterial lag ebenfalls grundsätzlich im gepflügten Boden höher als bei reduzierter Bearbeitung. Besonders stark ausgeprägt und statistisch signifikant war dieser Effekt am Erntetermin in der mittleren Bodenschicht 10-20 cm. Insgesamt nahm der Anteil an der ^{14}C -Bruttoassimilation in den Wurzeln in beiden Bodenbearbeitungsblöcken mit der Tiefe annähernd exponentiell ab (Abbildung 4.7). Überein-

stimmende Tiefenverteilung der WFR in Wurzeln und Bodenmaterial beobachteten XU & JUMA (1993), JENSEN (1993) sowie SWINNEN et al. (1994^b) jeweils unter Sommergerste.

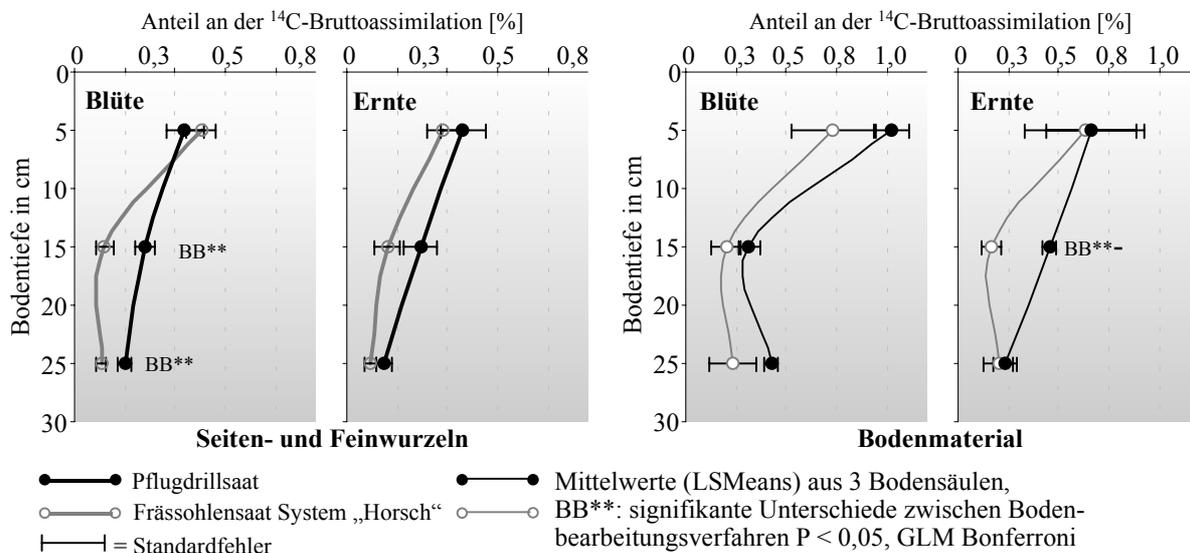


Abbildung 4.7: Einfluß der Bodenbearbeitung auf die Tiefenverteilung ins Wurzelsystem transferierter ^{14}C -markierter Assimilate 3 (Blüte) bzw. 11 Wochen (Ernte) nach ^{14}C -Pulsmarkierung zum Beginn der Rapsblüte (5.5.1998)

In zwei verschiedenen Böden, deren Lagerungsdichte mit der Bodentiefe unterschiedlich stark zunahm, fanden DINWOODIE & JUMA (1988) in sehr guter Übereinstimmung mit den hier vorgestellten Ergebnissen wesentlich geringere ^{14}C -Anteile in den Wurzeln und eine stärkere Abnahme mit der Bodentiefe im dichter gelagerten Boden. Untersuchungen u.a. von HARRACH & VORDERBRÜGGE (1991) zeigen darüber hinaus, daß das Auftreten von abrupten Dichte-Wechseln im Boden die Durchwurzelung unterhalb des „Dichte-Sprungs“ sehr viel stärker einschränkt als dies bei gleichmäßiger Zunahme der Lagerungsdichte mit der Tiefe der Fall ist. Einen solchen sprunghaften Wechsel der Bodendichte stellt die Frässhole in den Horschvarianten dar (vgl. FREY 1998).

Die $^{14}\text{CO}_2$ -Freisetzung durch RWB (Abbildung 4.8) verlief in beiden Bodenbearbeitungsblöcken in den ersten vier Wochen nach der ^{14}C -PM etwa auf gleichem Niveau. Da unter Pflug eine deutlich höhere WLD gefunden wurde (vgl. Abbildung 3.33), bedeutet eine gleiche RWB, daß in den Horschvarianten relativ pro Einheit Wurzelbiomasse höherer ^{14}C -Austrag durch Respiration auftrat. Ab der vierten Woche schließlich überstieg die RWB der Horschvarianten die der gepflügten auch absolut. Als Ursachen hierfür kommen eine verstärkte Respiration der Wurzeln und eine erhöhte Abgabe leicht abbaubarer wurzelbürtiger ^{14}C -Verbindungen mit nachfolgender Veratmung durch Bodenmikroorganismen in Frage. Letztere Vermutung könnte durch einen erhöhten ^{14}C -Anteil in löslichen C-Fractionen erhärtet werden, wie sie von ATWELL (1990) als Folge gesteigerter Bodendichte bei Weizenpflanzen oder BARTA (1987) als Tendenz bei zunehmendem O_2 -Mangel im Wurzelraum von Luzerne und Hornklee beobachtet wurden. Eine Kombination beider Prozesse erscheint am

wahrscheinlichsten, da in der ersten Zeit nach PM die RW den entscheidenden Beitrag zu RWB leistet, spätestens nach der dritten Woche aber der RB-Anteil den von RW übersteigt.

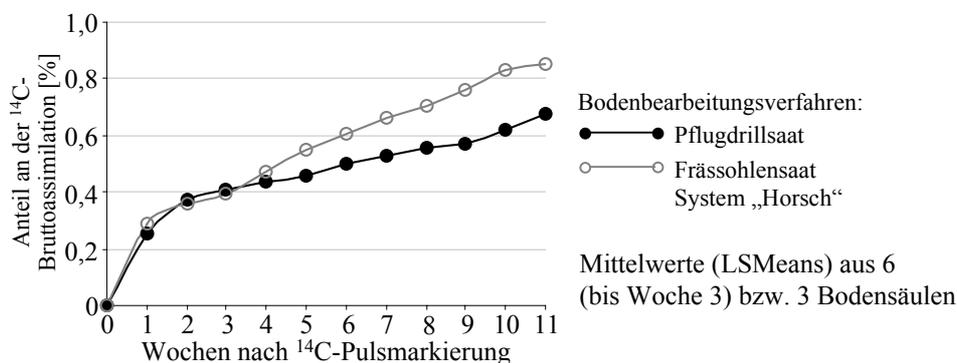


Abbildung 4.8: Einfluß der Bodenbearbeitung auf den Anteil des aus dem Boden freigesetzten $^{14}\text{CO}_2$ („Boden-Wurzel-Atmung“, kumuliert) nach ^{14}C -Pulsmarkierung zum Beginn der Rapsblüte (5.5.1998)

Als Ursachen für die gefundenen Unterschiede sind wiederum v.a. die höhere Lagerungsdichte sowie evtl. auch die potentiell schlechtere O_2 -Versorgung in den Bodenschichten unterhalb der Frässohle (FREY 1998) zu nennen. Da die wachsenden Wurzeln im verdichteten Boden größere Widerstände überwinden müssen, dürfte v.a. in einem erhöhtem Energieverbrauch während des Wurzelwachstums eine Ursache für die gesteigerte WR zu sehen sein. Darüber hinaus könnte z.B. eine intensivierete Produktion und Abgabe von Schleimstoffen (z.B.) Mucigel das Eindringen der Wurzeln in den Boden erleichtern. Der anschließende Verbrauch dieser Substanzen durch Bodenmikroorganismen hätte wiederum eine Steigerung der RWB in den Horschvarianten zur Folge. Bereits hingewiesen wurde auf die Arbeiten von HELAL & SAUERBECK (1986), die eine Ausweitung der Respirationstätigkeit von Wurzeln junger Maispflanzen mit steigender Bodendichte beobachteten. Erhöhte WR-Raten bereits nach kurzfristigem Auftreten anaerober Bedingungen im Wurzelraum von englischem Raygras stellten MEHARG & KILLHAM (1990^a) fest.

2.5. Versuch 3: ^{14}C in neu gebildeten Wurzeln

Mit dem Ziel zu testen, ob während der PM zur Blüte assimiliertes ^{14}C nach Ablauf der hypothetisch angenommenen Allokationsperiode von drei Wochen remobilisiert und in das Wachstum neuer Wurzeln investiert wird, wurden 1999 auf Schlag 2 des SFB 192 in der Variante P240 (Pflugdrillsaat, 240 kgN/ha) neun Rapspflanzen wiederum zu Beginn der Rapsblüte (BBCH-Code 62) ^{14}C -pulsmarkiert. Die Assimilatverteilung im System Pflanze-Wurzel-Boden und deren zeitliche Entwicklung werden kurz dargestellt, sollen hier aber nicht erneut diskutiert werden. Diesbezüglich sei auf die Auswertung der Versuche 1 und 2 verwiesen.

1999 war gegenüber 1998 deutlich trockener und wärmer. Die Jahresmitteltemperatur lag über dem langjährigen Mittel, die Regenmenge der Vegetationsperiode darunter (vgl. Abbildung 3.1). Die Durchwurzelungsintensität der Krume lag zum Zeitpunkt der PM in beiden

Jahren etwa auf gleichem Niveau, entwickelte sich jedoch danach recht unterschiedlich (vgl. Abbildungen 3.16 u. 3.29): Während 1998 ein starker Anstieg bis 4 Wochen vor der Ernte und danach ein ebenso deutlicher Rückgang erfolgte, war zwischen Blüte und Ernte 1999 eine ausgeprägte Zunahme der Wurzellänge zu verzeichnen, was höchstwahrscheinlich als Folge der gegenüber 1998 größeren Trockenheit zu interpretieren ist.

Die PM erfolgte 1999 einige Tage früher, die Rapserte etwas mehr als eine Woche später als 1998, so daß die markierten Rapspflanzen insgesamt 12 Tage länger auf dem Feld verblieben als im Vorjahr. In je drei der neun Bodensäulen waren zwei bzw. drei Ingrowth Cores eingebaut. Mit drei, neun bzw. dreizehn Wochen Abstand zur PM wurden je drei Pflanzen und Bodensäulen entnommen, entsprechend der Vorgehensweise der Versuche 1 u. 2 in Sproß- Wurzel- und Bodenfraktionen aufgeteilt und deren ^{14}C -Gehalt bestimmt. Eine Erfassung der RWB war aufgrund des Platzbedarfes der Ingrowth Cores nicht möglich. Die Ingrowth Cores wurden aufeinanderfolgend nach je zwei Wochen Bewurzelungsdauer gezogen und die ^{14}C -Aktivität in neu gebildeten Wurzeln und Bodenmaterial bestimmt (vgl. Teil 1, Kap. 2.4.). Unter der Annahme, daß der Wurzelzuwachs in den Ingrowth Cores repräsentativ für den gesamten Wurzelraum der Pflanze ist, wurde die WFR in neu gebildeten Wurzeln innerhalb der Bodensäule aus den ^{14}C -Gehalten der Wurzeln in den Cores extrapoliert. Auf diese Weise konnte für insgesamt 5 Zeitintervalle beginnend 3, 5, 7, 9 bzw. 11 Wochen nach PM überprüft werden, ob und in welchem Umfang remobilisierte ^{14}C -Verbindungen in Wurzeln eingebaut werden, die im jeweiligen Zeitraum neu gewachsen waren.

2.5.1. Verteilung der ^{14}C -markierten Assimilate

Drei Wochen nach der ^{14}C -PM, die ebenso wie im Vorjahr zu Beginn der Rapsblüte stattgefunden hatte, waren im Sproß nur noch 31,3%, im Gesamtsystem nur 36,4% des ursprünglich brutto assimilierten ^{14}C vorhanden. Bis zur Ernte nahm die $\text{WFR}_{(\text{Sproß})}$ bis auf 22,5%, die $\text{WFR}_{(\text{ges.})}$ auf 25,8% ab (Tabelle 4.7). Die ^{14}C -Menge, die aus dem System, zunächst vor allem durch RS, nach der Blüte zunehmend durch Bestandsabfall, ausgetragen wurde, lag damit deutlich über der des Vorjahres. Der $\text{Transf.}_{(\text{uBOF})}$ lag bei etwa 5% der Bruttoassimilation und war damit gegenüber 1998 leicht erhöht, obwohl die RWB 1999 nicht mit erfaßt wurde.

Tabelle 4.7: ^{14}C -Wiederfindungsraten im System Pflanze-Boden 3 (Blüte), 9 (Reife) bzw. 13 Wochen (Ernte) nach ^{14}C -Pulsmarkierung zum Beginn der Rapsblüte (29.4.1999)

Termin:	Blüte	Reife	Ernte
Fraktion:	Anteil an der ^{14}C -Bruttoassimilation [%]*		
Gesamtsystem	36,41	26,86	25,83
Sproß	31,33	23,31	22,53
^{14}C unterhalb der Bodenoberfläche	4,95	3,52	3,29

* Mittelwerte (arithm. Mittel) von je 3 Versuchspflanzen/Bodensäulen.

Bis zur Ernte hatte sich die $\text{WFR}_{(\text{uBOF})}$ auf 3,3% reduziert. Verglichen mit dem Vorjahr war das Verhältnis $\text{WFR}_{(\text{Sproß})}:\text{WFR}_{(\text{uBOF})}$, wahrscheinlich als Folge der größeren Trockenheit,

leicht zugunsten der unterirdischen Fraktionen auf 87%:13% verschoben, blieb allerdings wie 1998 über die gesamte Beobachtungsdauer nahezu konstant.

Den größten Anteil an der $\text{WFR}_{(\text{ges.})}$ hatte – wie 1998 – der Stengel des Haupttriebes. Zusätzlich separat untersucht wurde die WFR in den Nebentriebstengeln, die bei weitem nicht deren Trockenmasseanteil entsprach. Die spezifische Aktivität des Haupttriebstengels lag um das fünffache über der der Nebentriebe (Tabelle 4.8). Bei der Speicherung von „Assimilatvorräten“ scheinen diese keine bzw. nur eine untergeordnete Rolle zu spielen. Der Anstieg der $\text{WFR}_{(\text{Stengel})}$ von erster zu zweiter Probenahme dürfte auf ^{14}C -Retranslokation aus seneszenten Blättern zurückzuführen sein, wie sie auch BELL & INCOLL (1990) für Weizen beschreiben. Die WFR der Blätter, die bis drei Wochen nach der Begasung verwelkt waren, betrug nur noch ein Zehntel der WFR grüner Blätter. In den letzten 4 Wochen (evtl. schon früher) vor der Ernte überwogen die C-Flüsse aus dem Stengel. „Adressaten“ dieser Umverteilung waren in erster Linie die generativen Organe: Die $\text{WFR}_{(\text{Schoten})}$ nahm von der Blüte bis zur Ernte kontinuierlich zu, woran der ^{14}C -Zuwachs in den Körnern überproportionalen Anteil hatte.

Tabelle 4.8: ^{14}C -Wiederfindungsraten in einzelnen Sproßorganen 3 (Blüte), 9 (Reife) bzw. 13 Wochen (Ernte) nach ^{14}C -Pulsmarkierung zum Beginn der Rapsblüte (29.4.1999)

Termin:	Blüte	Reife	Ernte
Fraktion:	Anteil an der ^{14}C -Bruttoassimilation [%]*		
Stengel Haupttrieb	15,91	19,46	16,22
Stengel Nebentriebe	1,31	1,21	1,01
Stengel gesamt	17,22	20,67	17,23
Blätter (grün)	9,91	÷	÷
Blätter (welk)	1,28	÷	÷
Blätter gesamt	11,19	÷	÷
Blüten	2,19	÷	÷
Schoten inkl. Körner	0,73	2,84	5,30
Körner	÷	0,29	2,29

* Mittelwerte (arithm. Mittel) von je 3 Versuchspflanzen, ÷: keine Daten zu diesem Termin.

Aus diesen Daten noch nicht eindeutig ersichtlich, aber durchaus denkbar sind auch Retranslokationen aus dem mobilen Pool des Stengels ins Wurzelsystem. Zunahmen der $\text{WFR}_{(\text{PW})}$ sowie der $\text{WFR}_{(\text{Wz})}$ in 10-20 cm Tiefe (Tabelle 4.9) zwischen Reife und Erntetermin, einem Zeitraum zu dem die PM bereits weit zurück lag, erhärten diese Vermutung.

Die $\text{WFR}_{(\text{PW})}$ war im Mittel gegenüber 1998 fast verdoppelt. $\text{WFR}_{(\text{Wz})}$ und $\text{WFR}_{(\text{Boden})}$ entsprachen der Größenordnung, ihre Tiefenverteilung den Mustern des Vorjahres. Zwischen Blüte und Reife war ein leichter Rückgang, im Zeitintervall Reife-Ernte hingegen eine schwache Zunahme der $\text{WFR}_{(\text{Wz})}$ festzustellen. Die $\text{WFR}_{(\text{Boden})}$ hatte im Beobachtungszeitraum kontinuierlich nachgelassen. Hinsichtlich der ^{14}C -Gehalte in Wurzeln und Boden nach der Blüte ist zu beachten, daß geringfügige ^{14}C -Mengen mit den Ingrowth Cores aus dem System entnommen worden waren (Tabelle 4.9).

Tabelle 4.9: ¹⁴C-Wiederfindungsraten in den Fraktionen unterhalb der Bodenoberfläche 3 (Blüte), 9 (Reife) bzw. 13 Wochen (Ernte) nach ¹⁴C-Pulsmarkierung zum Beginn der Rapsblüte (29.4.1999)

Termin:	Blüte	Reife	Ernte
Fraktion:	Anteil an der ¹⁴ C-Bruttoassimilation [%]*		
Pfahlwurzel	1,63	1,29	1,55
Wurzeln 0-10 cm Bodentiefe	0,47	0,42	0,43
Wurzeln 10-20 cm Bodentiefe	0,43	0,23	0,40
Wurzeln 20-30 cm Bodentiefe	0,17	0,17	0,14
Summe Wurzeln (0-30 cm)	1,07	0,82	0,96
Boden 0-10 cm Bodentiefe	0,99	0,66	0,36
Boden 10-20 cm Bodentiefe	0,84	0,43	0,24
Boden 20-30 cm Bodentiefe	0,44	0,32	0,18
Summe Boden (0-30 cm)	2,27	1,41	0,78

* Mittelwerte (arithm. Mittel) von je 3 Versuchspflanzen/Bodensäulen.

2.5.2. Transfer retranslozierter ¹⁴C-Verbindungen in neu gebildete Wurzeln

In jedem der je zweiwöchigen Zeitintervalle, in denen Ingrowth Cores zur Bewurzelung geöffnet waren, wurde ¹⁴C in den neu gebildeten Wurzeln und im Bodenmaterial der Cores nachgewiesen:

Tabelle 4.10: Transfer zum Beginn der Rapsblüte (29.4.1999) assimilierter ¹⁴C-Verbindungen in neu gebildete Wurzeln bei zunehmendem zeitlichem Abstand zur ¹⁴C-Pulsmarkierung

Zeitintervall [Wochen nach ¹⁴ C-Pulsmarkierung]:	3-5	5-7	7-9	9-11	11-13	Summe
Fraktion	Anteil an der ¹⁴ C-Bruttoassimilation [%]*					
¹⁴ C in neu gebildeter Wurzelbiomasse	0,28	0,20	0,17	0,16	0,09	0,90
¹⁴ C-Abgabe neu gebildeter Wurzeln an den Boden	1,61	0,39	0,27	1,34	0,55	4,16
¹⁴ C-Transfer in neu gebildete Wurzeln gesamt	1,89	0,59	0,44	1,50	0,64	5,06

* Mittelwerte (arithm. Mittel) von je 3 Ingrowth Cores aus unterschiedlichen Bodensäulen

Dies belegt, daß Wurzelwachstum nicht ausschließlich mit Assimilaten aus der zeitnahen Photosynthese bestritten wird, sondern in erheblichem Umfang auch mit retranslozierten C-Verbindungen, die zu einem wesentlich früheren Zeitpunkt aufgenommen wurden. Mobile bzw. remobilisierbare C-Pools im Stengel und/oder der Pfahlwurzel sind die wahrscheinlichsten Quellen für diese „gealterten Assimilate“. Kumuliert über den Zeitraum 3 bis 13 Wochen nach ¹⁴C-PM übertraf der Transfer remobilisierter, „alter“ Assimilate ins Wurzelsystem sogar geringfügig die Menge des Transf._(UBOF) der ersten drei, direkt an die PM anschließenden Wochen (Tabelle 4.10). Daß Remobilisierung und Umverteilung von C-Verbindungen – insbesondere in späten Phasen der Pflanzenentwicklung – in größerem Umfang auftreten, zeigen Untersuchungen von HOCKING & MASON (1993), HOCKING et al. (1997) und DRECCER et al. 2000 an Raps- sowie BELL & INCOLL (1990) an Weizenpflanzen. Mit fortschreitender Reife der Pflanzen nimmt die Assimilationsleistung ab und Umverteilungsprozesse in erster Linie

aus dem Stengel und bei Raps zusätzlich aus den Schotenwänden in die Samenkörner setzen verstärkt ein. Diese Prozesse sind anhand der in den Tabellen 4.2, 4.5 und 4.8 wiedergegebenen Daten auch für die im vorgestellten Versuch pulsmarkierten Pflanzen nachzuvollziehen. Aus Tabelle 4.10 geht nun zusätzlich hervor, daß auch das Wurzelsystem einen nicht zu unterschätzenden „Sink“ für remobilisierte C-Verbindungen darstellt.

Mit zunehmendem Abstand zur ^{14}C -PM ging die WFR in den neu gebildeten Wurzeln ($\text{WFR}_{(\text{Wz-Zuwachs})}$) zurück. Die von den neu gewachsenen Wurzeln an den umliegenden Boden abgegebenen ^{14}C -Mengen lagen stets deutlich über der $\text{WFR}_{(\text{Wz-Zuwachs})}$ des jeweiligen Zeitfensters. Dabei ist zu berücksichtigen, daß nach SWINNEN et al. (1994^a) ein erheblicher Anteil der ^{14}C -Verbindungen aus der Wurzelbiomasse während des Auswaschens ins Bodenmaterial gelangen kann. Bis zur neunten Woche nahm die WFR im Bodenmaterial der Ingrowth-Cores ($\text{WFR}_{(\text{Core-Boden})}$) kontinuierlich ab. Im Zeitintervall 9 bis 11 Wochen nach PM war ein sprunghafter Anstieg der $\text{WFR}_{(\text{Core-Boden})}$ festzustellen. Ursachen für diesen Befund könnten entweder verstärkte Mobilisierungsprozesse und/oder eine erhöhte Investition vorhandener mobiler ^{14}C -Verbindungen in den Wurzelzuwachs sein. Evtl. ist dies im Zusammenhang mit einer Zunahme der Nettowurzellänge in diesem Zeitraum zu sehen (vgl. Abb. 3.16), die sich allerdings nicht in der $\text{WFR}_{(\text{Wz-Zuwachs})}$ niederschlug. Bis zur Ernte ging die $\text{WFR}_{(\text{Core-Boden})}$ wieder zurück. Insgesamt gelangte durch die Abgabe retranslozierter C-Verbindungen eine größere Menge ^{14}C in den Boden als durch den Eintrag von jungen Photosyntheseprodukte in den ersten drei Wochen nach PM. Die $\text{WFR}_{(\text{Core-Boden})}$ schwankte zwischen den einzelnen Wachstumsintervallen erheblich. Eine Erklärung für diesen Effekt könnte in der unterschiedlich starken Abgabe bestimmter Verbindungen (z.B. Mucigel, Exsudate oder Zell-Lysate) „je nach Bedarf“, z.B. bei zunehmender Trockenheit oder in Phasen erhöhten Nährstoffbedarfs zu sehen sein. So stellten z.B. MARTIN & MERCKX (1992) eine erhöhte ^{14}C -Abgabe ins Bodenmaterial bei Wasserstreß fest, was mit einer erhöhten Produktion von Mucigel in trockenerem Substrat (SWINNEN 1994^b) zusammenhängen dürfte. Auch abnehmende N-Gehalte im Boden führen dazu, daß ein größerer Anteil der in die unterirdischen Fraktionen exportierten ^{14}C -Verbindungen in den Boden eingetragen werden (JOHANSSON 1992, COTRUFO & GORISSEN 1997, VERBURG et al. 1998).

2.6. Berechnungen zur Schätzung von Wurzelumsatz und Rhizodeposition

Die Ergebnisse der in den vorhergehenden Abschnitten vorgestellten Versuche zeigen, daß die ursprünglich geplante Schätzung des Wurzelumsatzes (WU) in Anlehnung an den von SWINNEN et al. (1995^b) vorgeschlagenen Berechnungsansatz unter Winterraps zu einer massiven Unterschätzung des WU führen würde. Insbesondere in Versuch 3 konnte gezeigt werden, daß im gesamten Verlauf der Vegetationsperiode nach der ^{14}C -PM mobile bzw. remobilisierte ^{14}C -Verbindungen ins Wurzelsystem exportiert und dort auch ins Wachstum neuer Wurzeln investiert werden. Die grundlegende Annahme einer „stabilen“ Assimilatverteilung nach einer definierten Allokationsperiode (vgl. KEITH et al. 1986 und SWINNEN et al. 1994) ist demnach – zumindest für Winterraps – nicht zutreffend. Die Differenz zwischen $\text{AW}_{(3\text{Wochen})}$ und $\text{AW}_{(11\text{Wochen})}$ (Δ_{AW}) repräsentiert somit nur einen geringen Teil des tatsächlichen WU. Eine

Berechnung der Rhizodeposition (RD) nach [2] würde dementsprechend zu Werten führen, die um den nicht erfaßten Anteil des WU zu niedrig liegen und auch die über die neu gewachsenen Wurzeln an den Boden abgegebenen (retranslozierten) ^{14}C -Mengen nicht beinhalten. Die Ergebnisse der Berechnung von RD nach [2] stellen daher gewissermaßen eine „Mindest-RD“ ($\text{RD}_{(\text{min.})}$) dar. Die Tatsache, daß der über den Untersuchungszeitraum kumulierte Transfer remobilisierter ^{14}C -Verbindungen in Wurzelzuwachs und Bodenmaterial ($\text{Transf.}_{(\text{uBOF-Zuwachs})}$) sogar höher lag als der $\text{Transf.}_{(\text{uBOF})}$ innerhalb der ersten drei Wochen nach ^{14}C -PM verdeutlicht, daß Δ_{AW} vermutlich sehr weit hinter den realen WU-Raten zurückbleibt.

Die errechneten Werte lagen tatsächlich unrealistisch niedrig. In der Tendenz führten sowohl reduzierte Bodenbearbeitung als auch N-Mangel jeweils zu erhöhtem Δ_{AW} . Der Anteil der durch RD in den Boden eingetragenen C-Verbindungen sowohl an der Bruttoassimilation als auch an der ins Wurzelsystem transferierten Assimilatmenge war hingegen durch N-Zufuhr und Bodenbearbeitung mit dem Pflug erhöht (Tabelle 4.11). Zu hinsichtlich der N-Effekte auf den RD-Anteil am $\text{Transf.}_{(\text{uBOF})}$ identischen Ergebnissen mit Zahlenwerten in der gleichen Größenordnung (+N: 69-79%, -N: 60-75%) kommen LILJEROTH et al. (1990) bei Versuchen mit Weizen.

Tabelle 4.11: Differenz des ^{14}C -Gehaltes zwischen ^{14}C -Pulsmarkierung zur Blüte (5.5.1998) und Ernte (Δ_{AW}) und geschätzte „Mindest-“Rhizodeposition ($\text{RD}_{(\text{min.})}$) unter Winterraps in Abhängigkeit von N-Düngung und Bodenbearbeitung

	Δ_{AW} [%]*	$\text{RD}_{(\text{min.})}$ [%]*	
	(Anteil an $\text{AW}_{(3\text{Wochen})}$ **	(Anteil an ^{14}C -Bruttoassimilation)	(Anteil an $\text{Transf.}_{(\text{uBOF})}$ ***)
N-Niveau			
0 kgN/ha*a	25,9	1,6	60,9
240 kgN/ha*a	-15,2	1,8	65,8
Bodenbearbeitungsverfahren:			
Horsch	12,2	1,4	60,8
Pflug	4,2	1,9	61,1

* Berechnung auf der Grundlage von Mittelwerten (arithm. Mittel) von je 6 Versuchspflanzen/Bodensäulen,

** Δ_{AW} : % der ^{14}C -Aktivität in Wurzeln 3 Wochen nach ^{14}C -Pulsmarkierung,

*** $\text{RD}_{(\text{min.})}$: % des ^{14}C -Transfers ins Wurzelsystem (ohne Pfahlwurzel) 3 Wochen nach ^{14}C -Pulsmarkierung

Welchen Umfang Assimilatretanslokationen ins Wurzelsystem erreichen müssen, verdeutlicht ein negativer Wert für Δ_{AW} in der N-Düngungsvariante mit 240 kgN/ha*a. Ein negativer WU ist selbstverständlich nicht möglich. In diesem Fall wurde der ^{14}C -Verlust infolge echten WU's durch Nachlieferung ^{14}C -markierter Verbindungen aus dem Sproß und/oder der Pfahlwurzel sogar überkompensiert. Daher ging WU in die Berechnung von $\text{RD}_{(\text{min.})}$ dieser Variante mit $\text{WU} = 0$ ein.

Da für die Variante „P240“ die ^{14}C -Menge bestimmt wurde, die durch Retranslokation in jene Wurzeln gelangte, die im Zeitintervall 3-13 Wochen nach ^{14}C -PM neu gebildet wurden, kann für diese Variante eine Korrektur des WU nach Gleichung [3] und nachfolgend die Berechnung der RD nach [4] vorgenommen werden. Dabei ergab sich ein relativer WU von 94% und Anteile der RD von 7,52% an der Bruttoassimilation bzw. 88% am $\text{Transf.}_{(\text{uBOF})}$. Diese Werte

besagen, daß in der Variante P240 94% der zur Blüte gebildeten Wurzeln am Erntetermin abgestorben und umgesetzt waren. Bis zum Ende der Vegetationsperiode waren ca. 7,5% der ^{14}C -Bruttoassimilation (bzw. ca. 88% des gesamten $\text{Transf.}_{(\text{uBOF})}$) in Form organischer und anorganischer Verbindungen in den Boden eingetragen worden. STEINGROBE (1998) ermittelte über die gesamte Vegetationsperiode für Winterraps – relativ zur Länge des zur Ernte bestehenden Wurzelsystems – eine um Faktor 2-3 größere Bruttowurzelproduktion. Bezogen auf die „Rest-WL“ am Erntetermin ergibt sich daraus eine relative WU-Rate von 100 bis 200% (die Länge der Wurzeln, die während der Vegetationsperiode umgesetzt wurden, entspricht 100-200% der WL am Erntetermin). In der vorliegenden Arbeit wurde der relative WU nur für das letzte Drittel der Wachstumsperiode geschätzt. Extrapoliert man diese Zahlen auf die gesamte Vegetationsperiode, erscheint die Erwartung vergleichbarer Werte realistisch. Ähnliche, z.T. noch höhere Angaben finden sich z.B. für Gerste (100-200% [STEINGROBE et al. 2001^a]), Weizen (100-300% [STEINGROBE et al. 2001^b]), Zuckerrübe (200-400% [STEINGROBE 2001^a]) und Ackerbohne (>500% [STEINGROBE 2001^b]).

Die RD eines anderen Kreuzblütlers (Ölrettich) wird von MERBACH et al. (1999) auf 11% der Netto- ^{14}C -Assimilation beziffert. Nimmt man Verluste durch RS von ungefähr 30% an, so liegen diese Werte in einer erstaunlich ähnlichen Größenordnung wie die des Raps im eigenen Versuch. Für Luzerne (14%) und Weizen (18%, jeweils an der Nettoassimilation) geben MERBACH et al. (1999) höhere Werte an. MILCHUNAS et al. (1985) schätzen den ^{14}C -Eintrag in den Boden durch RD (ohne WU-Anteil) auf 15% (der Brutto- ^{14}C -Fixierung) bei Weizen und 6% bei *Bouteloua gracilis*, was die Annahme großer artspezifischer Unterschiede nahelegt und den Wertebereich der im eigenen Versuch ermittelten Ergebnisse einschließt.

SHEPHERD & DAVIES (1993) schätzen den Anteil des von jungen Futterrapspflanzen 13 Tage nach PM in den Boden eingetragenen ^{14}C am $\text{Transf.}_{(\text{uBOF})}$ auf 30-34%. Auch wenn in dieser Schätzung WU nicht berücksichtigt wurde und die zugrundeliegende Zeitspanne bei SHEPHERD & DAVIES (1993) wesentlich kürzer war als im eigenen Versuch, bleiben diese Werte doch deutlich hinter denen des hier ausgewerteten Experimentes zurück. Neben den genannten Unterschieden dürfte hierbei das Entwicklungsstadium der Pflanzen während der ^{14}C -Assimilation eine wichtige Rolle spielen: So finden sich in der Literatur reichlich Hinweise, daß mit fortschreitender Pflanzenentwicklung – insbesondere mit dem Übergang von der vegetativen zu generativen Entwicklung – der Anteil der in den Boden eingetragenen wurzelbürtigen Substanzen zunimmt, während demgegenüber der Anteil des Einbaus in die Wurzelbiomasse zurückgeht (LILJEROTH et al. 1990, MEHARG & KILLHAM 1990^b, GREGORY & ATWELL 1991, SWINNEN et al. 1994^b, ZAGAL 1994^b).

Wird unterstellt, daß der Verbrauch von Assimilaten aus der rezenten Photosynthese und von retranslozierten C-Verbindungen für Wurzelwachstum in der Zeit zwischen PM und Ernte bei allen Rapspflanzen in einem etwa konstanten Verhältnis zueinander stehen und gleiches für die in den Boden eingetragenen ^{14}C -Mengen gilt, so lassen sich für alle Varianten aus dem Verhältnis $\text{WFR}_{(\text{Wz-Zuwachs})} : \text{WFR}_{(\text{Wz})}$ bzw. $\text{WFR}_{(\text{Core-Boden})} : \text{WFR}_{(\text{Boden})}$ der Variante P240 behandlungsspezifische Korrekturfaktoren bilden, mit deren Hilfe WU und RD auch für die anderen Varianten geschätzt werden können (Tabelle 4.12).

Tabelle 4.12: Berechnete Werte für Wurzelumsatz (WU) und Rhizodeposition (RD) unter Winterraps in Abhängigkeit von N-Düngung und Bodenbearbeitung nach ^{14}C -Pulsmarkierung zur Blüte (5.5.1998)

N-Niveau	relativer WU [%]*	RD [%]*	
	(Anteil an $A_{W(3\text{Wochen})}$ **	(Anteil an ^{14}C -Bruttoassimilation)	(Anteil am gesamten $\text{Transf.}_{(u\text{BOF})}$ ***)
0 kgN/ha*a	109,9	5,6	82,1
240 kgN/ha*a	68,8	7,0	83,9
Bodenbearbeitungsverfahren:			
Horsch	96,2	5,2	83,4
Pflug	88,2	7,4	82,8

*Berechnungen auf Grundlage der Mittelwerte (arithm. Mittel) von je 6 Versuchspflanzen/Bodensäulen und 3 Ingrowth Cores,

**WU: % der ^{14}C -Aktivität in Wurzeln drei Wochen nach ^{14}C -Pulsmarkierung,

***RD: % des gesamten ^{14}C -Transfers (inkl. retransloziertem ^{14}C) ins Wurzelsystem (ohne Pfahlwurzeln)

Aus Tabelle 4.12 geht hervor, daß reduzierte Bodenbearbeitung und vor allem N-Mangel zu einem erheblich gesteigerten WU führte. Dieser Befund deckt sich mit unveröffentlichten Ergebnissen von STEINGROBE (1998, 2000, pers. Mittlg. 2004), der unter Raps sowohl bei N- als auch bei P-Mangel stark erhöhte WU-Raten mittels der Ingrowth-Core-Methode ermittelte. Auch Untersuchungen von WEBER & DAY (1996) unter Einsatz von Minirhizotronen in natürlicher Dünenvegetation ergaben eine Tendenz zu erhöhten Wachstums- und Sterberaten bei geringerem N-Niveau, wobei Wurzelverluste von bis zu 3,5% pro Tag beobachtet wurden. Erhöhte Sterberaten von Cortex-Zellen und eine Stimulation des Wachstums von Wurzelhaaren als Konsequenz N-limitierter Bedingungen stellten ROBINSON & RORISON (1987) fest. Beide Beobachtungen implizieren einen höheren Umsatz von Wurzelbiomasse unter N-Mangel. Signifikant höhere WU-Raten wurden ebenfalls als Folge von P-Mangel bei Gerste (STEINGROBE et al. 2001^a) und Zuckerrüben (STEINGROBE 2001^a), sowie K-Mangel bei Ackerbohne (STEINGROBE 2001^b) beobachtet.

Mit dem einleitend vorgestellten Ansatz, der modifiziert ursprünglich auch im eigenen Versuch zum Einsatz kommen sollte, schätzten SWINNEN et al. (1995^b) den relativen WU von Weizen auf 43% (PM zum Auflaufen) bzw. 36% (PM zum Ährenschieben). Für Gerste in entsprechenden Stadien ermittelten diese Autoren einen relativen WU von 49-55% respektive 12-27%. Für den Vergleich mit den Ergebnissen der vorliegenden Arbeit bieten sich die Daten des späteren Entwicklungsstadiums an, da auch der Raps zu Beginn der generativen Entwicklung pulsmarkiert wurde. Die Gegenüberstellung der relativen WU-Raten von Winterraps mit den von SWINNEN et al. (1995^b) für Gerste und Weizen geschätzten Beträgen ergibt beachtliche Differenzen zwischen diesen und den eigenen Ergebnissen. Ruft man sich an dieser Stelle die Werte für Δ_{AW} (Tabelle 4.11) in Erinnerung, so wird sofort augenfällig, daß die Größenordnung der „WU-Raten“, die SWINNEN et al. (1995^b) insbesondere für Gerste angeben, sehr viel eher den Δ_{AW} -Werten als denen des relativen WU für Winterraps ähneln.

In Versuch 3 (vgl. Tabelle 4.10) konnte gezeigt werden, daß in erheblichem Umfang retranslozierte Assimilate in das Wachstum junger Wurzeln investiert wurden, was bei einer Verwendung des von SWINNEN et al. (1995^b) vorgeschlagenen Ansatzes zu einer massiven Unterschätzung des WU geführt hätte (vgl. Werte in den Tabellen 4.11 und 4.12). Daß Retranslo-

kationen mobiler C-Verbindungen auch in Weizenpflanzen auftreten, zeigen Untersuchungen von MILCHUNAS et al. (1985) und BELL & INCOLL (1990) und wird auch von SWINNEN et al. (1995^b) als mögliche Fehlerquelle bei der Schätzung des WU diskutiert, die in der vorliegenden Arbeit durch die Einbeziehung der ¹⁴C-Aktivitäten im Wurzelzuwachs in die Kalkulation eliminiert werden konnte. Da Schätzungen des WU von Weizen, Gerste und weiteren Gräsern mit anderen Methoden (z.B. KM [SAUERBECK & JOHNEN 1976, SAUERBECK et al. 1976, SAUERBECK et al. 1980] Ingrowth Cores [STEINGROBE et al. 2001^a, STEINGROBE et al. 2001^b] oder Minirhizotronen [WEBER & DAY 1996] stets höhere Werte ergaben als die von SWINNEN et al. (1995^b) ermittelten, erscheint die Annahme berechtigt, daß die Schätzung des WU aus der ¹⁴C-Aktivitätsabnahme zwischen zwei Terminen ohne eine Korrektur um die retranslozierten ¹⁴C-Mengen allgemein nicht zu realistischen Ergebnissen führt. Auftreten und Umfang der Remobilisierung von C-Verbindungen und deren Retranslokation dürfte von einer Vielzahl verschiedenster Faktoren beeinflusst werden. Retranslokationen sind z.B. durchaus auch aus dem Wurzelsystem in den Sproß denkbar (vgl. MILCHUNAS et al. 1985) und könnten in diesem Falle nicht mit der in Versuch 3 angewandten Technik erkannt oder gar quantifiziert werden, würden aber nichtsdestotrotz zu einer Überschätzung des WU führen.

Ein weiterer Nachteil der Schätzung des relativen WU mittels Berechnung der Abnahme der ¹⁴C-Aktivität in den Wurzeln besteht darin, daß nur der relative WU für die markierten Wurzeln im Zeitintervall von der PM bis zur finalen Probenahme erfaßt wird. Da weder das Verhältnis der Assimilatallokation zwischen Sproß und Wurzelsystem, noch der Umfang von Wurzelwachstum und -abbau im Verlauf der Vegetationsperiode konstant bleiben, ist eine gesicherte Aussage bei einer einmaligen PM nur für einen sehr kleinen Teil des Wurzelsystems und ein begrenztes Zeitintervall möglich. Je länger dieses Zeitintervall gewählt wird, desto größer werden die Unsicherheiten hinsichtlich möglicher Im- oder Exporte mobiler/remobilisierter ¹⁴C-Verbindungen ins oder aus dem Wurzelsystem. Der Nutzen von PM-Techniken für Untersuchung von Assimilatverteilung, C-Flüssen und auch die Quantifizierung bestimmter Anteile der RD ist unbestritten. Steht jedoch die Schätzung des WU im Mittelpunkt des Interesses, scheint die Verwendung von Minirhizotronen und/oder Ingrowth Cores empfehlenswerter zu sein. Neben den diskutierten Fehlerquellen sollte dabei nicht zuletzt auch der große technische, zeitliche und finanzielle Aufwand bedacht werden, den die Verwendung von ¹⁴C-PM-Techniken bedeutet.

Im Zeitraum von der PM bis zur Ernte wurde ca. 5,2-7,4% des brutto assimilierten ¹⁴C als RD in den Boden eingetragen (Tabelle 4.12). Dieser Anteil war jeweils erhöht, wenn die Pflanzen N-Dünger erhalten hatten und wenn sie in gepflügtem Boden gewachsen waren. Der Anteil der durch RD in den umgebenden Boden eingetragenen C-Verbindungen an in die unterirdischen Fraktionen transferierten ¹⁴C lag in allen Behandlungsvarianten mit etwas über 80% in einer Größenordnung, wie sie auch von LILJEROTH et al. (1990) unter Weizen gefunden wurde (60-79% – mögliche Retranslokation ins Wurzelsystem nicht berücksichtigt) und zeigte sich durch N-Düngung und Bodenbearbeitung kaum beeinflusst. D.h. daß unter N-Mangel und reduzierter Bodenbearbeitung der Anteil des WU an der gesamten RD deutlich erhöht war, während bei guter N-Versorgung und in gepflügtem Boden ein größerer Teil der gesamten RD aus direkt (z.B. durch Mucilage, Exsudation oder Sekretion) in den Boden eingetragenen

C-Verbindungen bestand. Dies läßt auf Unterschiede hinsichtlich der Nutzung von in unterirdische Fraktionen transferierten Assimilaten sowie der stofflichen Zusammensetzung der in den Boden eingetragenen Substanzen schließen. Während durch gesteigerten WU der Anteil an relativ schwer abbaubarem Material (z.B. Wurzelzellwände) anwachsen dürfte, handelt es sich bei solchen Substanzen, die durch direkte Abgabe von der lebenden Pflanzenwurzel in den Boden gelangen, überwiegend um niedermolekulare, leicht zersetzbare Verbindungen, deren Anteil an der RD dementsprechend unter N-Düngung größer sein müßte. Befunde von COTRUFO & GORISSEN (1997) und VERBURG et al. (1998), die signifikant erhöhte Abgabe löslicher ^{14}C -Verbindungen durch die Wurzeln von Gräsern bzw. *Calluna vulgaris* durch gesteigerte N-Zufuhr feststellten, lassen ähnliches vermuten. Eine mögliche Ursache für die (relativ) erhöhte RD unter Pflug bzw. N-Düngung ist in einem verstärkten Wasserverbrauch der besser entwickelten Bestände dieser Varianten zu sehen, da Wurzeln in trockenem Boden größere Mengen Mucigel produzieren und an den Boden abgeben. Die Unterschiede zwischen den N-Stufen könnten ebenfalls auf eine verstärkte Abgabe von Exsudaten zurückzuführen sein, die durch einen – relativ zu den N-Mangelvarianten – erhöhten Bedarf an anderen Nährstoffen (z.B. Phosphor), deren Düngermenge in allen Varianten gleich war, resultieren könnte.

Um eine ungefähre Vorstellung von der Gesamtmenge der durch Rhizodeposition in den Boden eingetragenen Substanzen zu erhalten sind weitere Annahmen und Berechnungen notwendig: Zunächst wird vorausgesetzt, daß die Verteilung der ^{14}C -markierten Assimilate für das durchschnittliche Assimilations- und Allokationsverhalten der Rapspflanzen im Zeitraum zwischen Blüte und Ernte repräsentativ ist. Wird weiter unterstellt, daß der C-Anteil in der Wurzelbiomasse in etwa dem der durch RD freigesetzten Substanzen entspricht, so müßte die Relation Wiederfindungsrate (WFR) zu Trockenmasse (TM) der Wurzeln ($\text{WFR}_{(Wz)} : \text{TM}_{(Wz)}$) gleich dem entsprechenden Verhältnis für die Substanzen der RD ($\text{WFR}_{(RD)} : \text{TM}_{(RD)}$) sein:

$$[5] \quad \frac{\text{WFR}_{(Wz)}}{\text{TM}_{(Wz)}} = \frac{\text{WFR}_{(RD)}}{\text{TM}_{(RD)}}$$

Aufgelöst nach $\text{TM}_{(RD)}$ ergibt sich aus [5] die Trockenmasse der durch RD im Zeitraum zwischen ^{14}C -PM und Ernte in den Boden eingetragenen organischen Substanz pro Einzelpflanze. Durch Multiplikation mit der mittleren Bestandsdichte (BD [Pflanzen/Flächeneinheit]), deren Werte für jede einzelne Variante vorlagen, wird auf die Flächeneinheit hoch gerechnet:

$$[6] \quad \text{TM}_{(RD)} = \frac{\text{WFR}_{(RD)} \cdot \text{TM}_{(Wz)}}{\text{WFR}_{(Wz)}} \cdot \text{BD}$$

Da die Wurzeltrockenmassen für den Blütetermin 1998 nicht bekannt waren, wurden diese aus Wurzellänge zur Blüte 1998 und spezifischer Wurzellänge (bestimmt zur Ernte 1997, vgl. Abbildung 3.8) für jede Variante berechnet. Ebenso wurden die Trockenmassen für Seiten- und Feinwurzeln sowie die Pfahlwurzel für den Erntetermin 1998 errechnet. Dabei floß jeweils die aschefreie Trockensubstanz in die Berechnungen ein. Mit aller – aufgrund der Vielzahl der zugrunde liegenden Annahmen – gebotenen Vorsicht läßt sich auf diese Weise eine

Vorstellung von der Größenordnung der Einträge organischer Substanz in den Boden durch Rhizodeposition im Zeitraum zwischen der Rapsblüte und der Ernte gewinnen:

Tabelle 4.13: Schätzung der Substanzeinträge in den Boden (0-30 cm) durch Rhizodeposition (RD) und wurzelbürtige Ernterückstände (WER) von Winterraps in Abhängigkeit von N-Düngung und Bodenbearbeitung im Zeitraum zwischen ¹⁴C-Pulsmarkierung zur Blüte (5.5.1998) und Ernte

Behandlungsvariante N-Niveau	Eintrag wurzelbürtiger Substanz in den Boden* (aschefreie Trockenmasse [kg/ha])			
	RD	WER ohne Pfahlwurzeln	WER mit Pfahlwurzeln	Summe WER mit Pfahlwurzeln + RD
0 kgN/ha*a	1035	194	756	1791
240 kgN/ha*a	1093	130	931	2025
Bodenbearbeitung:				
Pflug	1369	204	1134	2503
Horsch	807	121	582	1389

* Berechnung auf Grundlage der Mittelwerte (arithm. Mittel) von je 6 (RD) bzw. 10 (WER) Versuchspflanzen, zur Vorgehensweise bei der Berechnung s. Ausführungen im Text. Daten zu Bestandesdichte: SFB 192

Aus Tabelle 4.13 geht hervor, daß die im Zeitraum zwischen Blüte und Ernte durch RD in den Boden eingetragene C-Verbindungen den größten Anteil nach der Ernte im Boden zurückgelassener wurzelbürtiger Rückstände stellen. WHIPPS (1990) gibt den Wertebereich für den gesamten Eintrag von wurzelbürtigem Kohlenstoff in den Boden mit 1200 bis 2900 kgC/ha*a an. Bei einem C-Anteil von etwa 40% lägen die C-Einträge durch die Rapswurzeln in den Boden in den Monaten Mai, Juni und Juli 1998 zwischen knapp 600 bis 1000 kgC/ha*a. Extrapoliert auf die gesamte Vegetationsperiode ist eine Übereinstimmung mit der von WHIPPS (1990) genannten Größenordnung sehr wahrscheinlich. Insgesamt führten sowohl N-Düngung gegenüber N-Mangel als auch Pflugbodenbearbeitung gegenüber dem System Horsch zu höheren Einträgen an wurzelbürtiger Substanz in den Boden.

3. Literatur

- ATWELL, B. J. (1990): The effect of soil compaction on wheat during early tillering. III. Fate of carbon transported to the roots. In: *New Phytologist* 115, S. 43-50.
- BARTA, A. L. (1987): Supply and partitioning of assimilates to roots of *Medicago sativa* L. and *Lotus corniculatus* L. under anoxia. In: *Plant, Cell and Environment* 10, S. 151-156.
- BECK, E. H. (1996): Regulations of shoot/root ratio by cytokinins from roots in *Urtica dioica*: Opinion. In: *Plant and Soil* 185, S. 3-12.
- BÉLANGER, G., F. GASTAL & F. R. WAREMBOURG (1992): The Effects of Nitrogen Fertilization and the Growing Season on Carbon Partitioning in a Sward of Tall Fescue (*Festuca arundinacea* SCHREB.) In: *annals of botany (London)* 70, S. 239-244.
- BELL, C. J. & L. D. INCOLL (1990): The redistribution of assimilate in field-grown winter wheat. In: *Journal of Experimental Botany* 41, S. 949-960.
- BÖHM, W. (1979): Methods of studying root systems. *Ecological studies* 33. Springer Verlag, Berlin, Heidelberg, New York.
- BOUMA, T. J., K. L. NIELSEN, D. M. EISSENSTAT & J. P. LYNCH (1997): Estimating respiration of roots in soil: Interactions with soil CO₂, soil temperature and soil water content. In *Plant and Soil* 195, S. 221-232.
- BIOLOGISCHE BUNDESANSTALT FÜR LAND- UND FORSTWIRTSCHAFT (Hrsg.) (1997): Growth Stages of Plants/Entwicklungsstadien von Pflanzen. BBCH-Monograph. Blackwell Wissenschaftsverlag Berlin, Wien, Oxford, Edinburgh, Boston, London, Melbourne, Paris, Tokio.
- COTRUFO, M. F. & A. GORRISEN (1997): Elevated CO₂ enhances below-ground C allocation in three perennial grass species at different levels of N-availability. In: *New Phytologist* 137, S. 421-431.
- DANCKWERTS, J. E. & A. J. GORDON (1989): Long-term partitioning, storage and remobilization of ¹⁴C assimilated by *Trifolium repens* (cv. Blanca). In: *Annals of Botany* 64, S. 533-544.
- DAVENPORT, J. R. & R. L. THOMAS (1988): Carbon partitioning and Rhizodeposition in Corn and Bromegrass. In: *Canadian Journal of soil science* 68, S. 693-701.
- DINWOODIE, G. D. & N. G. JUMA (1988): Factors affecting the distribution and dynamics of ¹⁴C in two soils cropped to barley. In *Plant and Soil* 110, S. 111-121.
- DRECCER, M. F., A. H. C. M. SCHAPENDONK, G. A. SLAFER & R. RABBINGE (2000): Comparative response of wheat and oilseed rape to nitrogen supply: absorption and utilisation efficiency of radiation and nitrogen during the reproductive stages determining yield. In: *Plant and Soil* 220, S. 189-205.

- FERNÁNDEZ, J., C. M. DOLORES, P. AGUADO & E. MAGRO (2003): Carbon allocation in a sweet sorghum-soil system using ^{14}C as a tracer. In: J. Plant Nutr. Soil Sci. 166, S. 23-30.
- FETENE, M., I. MÖLLER & E. BECK (1993): The Effect of Nitrogen Supply to *Urtica dioica* L. Plants on the Distribution of Assimilate Between Shoot and Roots. In: Botanica Acta 106, S. 228-234.
- FITTER, A. H., G.K. SELF, J. WOLFENDEN, M. M. I. VAN VUUREN, T. K. BROWN, L. WILLIAMSON, J. D. GRAVES & D. ROBINSON (1996): Root production and mortality under elevated atmospheric carbon dioxide. In: Plant and Soil 187, S. 299-306.
- FITTER, A. H., J. D. GRAVES, J. WOLFENDEN, G. K. SELF, T. K. BROWN, D. BOGIE & T. A. MANSFIELD (1997): Root production and turnover and carbon budgets of two contrasting grasslands under ambient and elevated atmospheric carbon dioxide concentrations. In: New Phytologist 137, S. 247-255.
- FRAHM, A. (2000): Das Edaphon in Oberböden einer norddeutschen Jungmoränenlandschaft unter dem Einfluß verschiedener Bewirtschaftungsmaßnahmen. Dissertation. In: BLUME, H.-P., R. HORN, J. LAMP & B. SATTELMACHER (Hrsg.): Schriftenreihe Institut für Pflanzenernährung und Bodenkunde Universität Kiel 55.
- FREY, D. (1998): Eignung des Systems Horsch als reduzierte Bodenbearbeitung zur Förderung der Bodenfruchtbarkeit auf Böden des Östlichen Hügellandes in Schleswig-Holstein. Dissertation Universität Kiel. In: BLUME, H.-P.; FINCK, A.; HORN, R.; SATTELMACHER, B.: Schriftenreihe Institut für Pflanzenernährung und Bodenkunde Universität Kiel 43.
- GISI, U., R. SCHENKER, R. SCHULIN, F. X. STADELMANN & H. STICHER, (1997): Bodenökologie, 2. Auflage, Georg Thieme Verlag, Stuttgart, New York.
- GOSS, M. J., M. H. MILLER, L. D. BAILEY & C. A. GRANT (1993): Root growth and distribution in relation to nutrient availability and uptake. In: Eur. J. Agron. 2, S. 57-67.
- GREGORY, P. J. & B. J. ATWELL (1991): The fate of carbon in pulse-labelled crops of barley and wheat. In: Plant and Soil 136, S. 205-214.
- HABEKOTTÉ, B. (1993): Quantitative analysis of pod formation, seed set and seed filling in winter oilseed rape (*Brassica napus* L.) under field conditions. In: Field crops Res. 35, S. 21-33.
- HANSSON, A.-C., E. STEEN & O. ANDRÉN (1992): Root growth of daily irrigated and fertilized barley investigated with ingrowth cores, soil cores and minirhizotrons. In: Swedish Journal of agricultural research 22, S. 141-152.
- HARRACH, T. & T. VORDERBRÜGGE (1991): Die Wurzelentwicklung von Kulturpflanzen in Beziehung zum Bodentyp und Bodengefüge. In: Berichte über Landwirtschaft 204, Sonderheft Bodennutzung und Bodenfruchtbarkeit Bd. 2: Bodengefüge, S. 69-82.
- HELAL, H. M. & D. SAUERBECK (1986): Entwicklung und Aktivität des Wurzelsystems in Abhängigkeit von der Bodendichte. In: VDLUFA-Schriftenreihe 20, Kongreßband 1986, S. 381-388.

- HELAL, H. M. & D. SAUERBECK (1989): Carbon Turnover in the Rhizosphere. In: Zeitschrift für Pflanzenernährung und Bodenkunde 152, S.211-216.
- HENDRICK, R. L.; PREGITZER, K. S. (1996): Applications of minirhizotrons to understand root function in forests and other natural ecosystems. In: Plant and Soil 185, 293-304.
- HOCKING, P. J. & L. MASON (1993): Accumulation, distribution and redistribution of dry matter and mineral nutrients in fruits of canola (oilseed rape), and the effects of nitrogen fertilizer and windrowing. In: Austr. J. Agric. Res. 44, S. 1377-1388.
- HOCKING, P. J., P. J. RANDALL & D. DEMARCO (1997): The response of dryland canola to nitrogen fertilizer: partitioning and mobilization of dry matter and nitrogen and nitrogen effects on yield components. In: Field Crops Res. 49, S. 201-220.
- JENSEN, B. (1993): Rhizodeposition by $^{14}\text{CO}_2$ -pulse-labelled spring barley grown in small field plots on sandy loam. In: Soil Biology and Biochemistry 25, S. 1553-1559.
- JOHANSSON, G. (1992): Below-ground carbon distribution in barley (*Hordeum vulgare* L.) with and without nitrogen fertilization. In: Plant and Soil 144, S. 93-99.
- KAHNT, G. (1981): Gründüngung. DLG-Verlag, Frankfurt am Main.
- KEITH, H., OADES, J. M. & J. K. MARTIN (1986): Input of carbon to soil from wheat plants. In: Soil Biology and Biochemistry 18, S. 445-449.
- KUZYAKOV, Y., A. KRETZSCHMAR & K. STAHR (1999): Contribution of *Lolium perenne* rhizodeposition to carbon turnover of pasture soil. In: Plant and Soil 213, S. 127-136.
- KUZYAKOV, Y. & G. DOMANSKI (2002): Model for rhizodeposition and CO_2 efflux from planted soil and its validation by ^{14}C -Pulse-Labeling of ryegrass. In: Plant and Soil 239, S. 87-102
- LILJEROTH, E., J. A. VAN VEEN & H. J. MILLER (1990): Assimilate translocation to the rhizosphere of two wheat lines and subsequent utilization by rhizosphere microorganisms at two soil nitrogen concentrations. In: Soil Biology and-Biochemistry 22, S. 1015-1021.
- LYNCH, J. M. & J. M. WHIPPS (1990): Substrate flow in the Rhizosphere. In: Plant and Soil 129, S. 1-10.
- MARTIN, J. K. & J. R. KEMP (1980): Carbon loss from roots of wheat cultivars. In: Soil Biology and Biochemistry 12, S. 551-554.
- MARTIN, J. K. & R. MERCKX (1992): The partitioning of photosynthetically fixed carbon within the rhizosphere of mature wheat. In: Soil Biology and Biochemistry 24, S. 1147-1156.
- MARTIN, B.; RADEMACHER, B. (1960): Experimentelle Untersuchungen zur Frage der Nachwirkung von Rapswurzelrückständen. In: Z. Acker- und Pflanzenbau 111, S. 105-115.
- MEHARG, A. A. & K. KILLHAM (1990^a): Carbon distribution within the plant and rhizosphere for *Lolium perenne* subjected to anaerobic soil conditions. In: Soil Biology and Biochemistry 22, S. 643-648.

- MEHARG, A. A. & K. KILLHAM (1990^b): Carbon distribution within the plant and rhizosphere in laboratory and field-grown *Lolium perenne* at different stages of development. In: Soil Biology and Biochemistry 22, S.471-478.
- MEHARG, A. A. & K. KILLHAM (1990^c): The effect of soil-pH on rhizosphere carbon flow of *Lolium perenne*. In: Plant and Soil 123, S. 1-8.
- MERBACH, W., E. MIRUS, G. KNOF, R. REMUS, S. RUPPEL, R. RUSSOW, A. GRANSEE, & J. SCHULZE (1999): Release of carbon and nitrogen compounds by plant roots and their possible ecological importance. In: Zeitschrift für Pflanzenernährung und Bodenkunde 162, S. 373-383.
- MERBACH, W.; KNOF, G.; AUGUSTIN, J.; JACOB, H-J.; JÄGER, R.; TOUSSANT, V. (1996): Ökophysiologische Wechselbeziehungen zwischen Pflanze und Boden. In: MÜHLE, H.; CLAUS, S.: Reaktionsverhalten von agrarischen Ökosystemen homogener Areale. B.G. Teubner, Stuttgart, Leipzig, S. 195-207.
- MERCKX, R., A. DEN HARTOG & J. A. VAN VEEN (1985): Turnover of root-derived material and related microbial biomass formation in soils of different texture. In: Soil Biology and Biochemistry 17, S. 565-569.
- MILCHUNAS, D. G., W. K. LAUENROTH, J. S. SINGH, C. V. COLE & H. W. HUNT (1985): Root turnover and production by ¹⁴C dilution: implications of carbon partitioning in plants. In: Plant and Soil 88, S. 353-365.
- ROBINSON, D. & I. H. RORISON (1987): Root hairs and plant growth at low nitrogen availabilities. In: New Phytologist 107, S. 681-693.
- SAUERBECK, D. & B. JOHNEN (1976): Der Umsatz von Pflanzenwurzeln während der Vegetationsperiode und dessen Beitrag zur „Bodenatmung“. In: Zeitschrift für Pflanzenernährung und Bodenkunde 139, S. 315-328.
- SAUERBECK, D., B. JOHNEN & R. SIX (1976): Atmung, Abbau und Ausscheidungen von Weizenwurzeln im Laufe ihrer Entwicklung. In: Landwirtschaftliche Forschung Sonderheft 32/I, S. 49-58.
- SAUERBECK, D., S. NONNEN & J. L. ALLARD (1980): Assimilatverbrauch und -umsatz im Wurzelraum in Abhängigkeit von Pflanzenart und -anzucht. In: Landwirtschaftliche Forschung Sonderheft 37, S. 207-216.
- SCHENK, M. K. (1996): Regulation of nitrogen uptake on the whole plant level. In: Plant and Soil 181, S. 131-137.
- SHEPHERD, T. & H. V. DAVIES (1993): Carbon Loss from the Roots of Forage Rape (*Brassica napus* L.) Seedlings Following Pulse-labelling with ¹⁴CO₂. In: Annals of Botany 72, S. 155-163.
- SHONE, M. G. T., J. M. WHIPPS, A. V. FLOOD (1983): Effects of localized and overall water stress on assimilate partitioning in barley between shoots, roots and root exudates. In: New Phytologist 95, S. 625-634.

- STEINGROBE, B. (1998): Gross and net root growth of rape. Poster, Jahrestagung der Deutschen Gesellschaft für Pflanzenernährung, 11.-12. Juni 1998, Dülmen.
- STEINGROBE, B. (2000): Influence of nitrogen on root growth and root turnover of oilseed rape. Poster, IACR – Rothamsted Millennium Conference: Interactions in the root environment – an integrated approach. 10.-12. April 2000, Harpenden, UK.
- STEINGROBE, B., H. SCHMID & N. CLAASEN (2000): The use of the ingrowth core method for measuring root production of arable crops – influence of soil conditions inside the ingrowth core on root growth. In: *J. Plant Nutr. Soil Sci.* 163, S. 459-465.
- STEINGROBE, B., H. SCHMID & N. CLAASEN (2001^a): Root production and root mortality of winter barley and its implication with regard to phosphate acquisition. In: *Plant and Soil* 237, S. 239-248.
- STEINGROBE, B., H. SCHMID, R. GUTSER & N. CLAASEN (2001^b): Root production and root mortality of winter wheat grown on sandy and loamy soils in different farming systems, In: *Biol Fertil Soils* 33, S. 331-339.
- STEINGROBE, B. (2001^a): Root renewal of sugar beet as a mechanism of P uptake efficiency. In: *J. Plant Nutr. Soil Sci.* 164, S. 533-539.
- STEINGROBE, B. (2001^b): Root Growth Dynamics of *Vicia faba* and its Implication with the K-supply. In: W. J. HORST et al. (Hrsg.): *Plant nutrition – Food security and sustainability of agro-ecosystems through basic and applied research. Development in plant and soil sciences*, Vol. 92, Kluwer Academic Press, Dordrecht, S. 588-589
- SWINNEN, J. & H. VAN-VEEN (1992): Unterscheidung von Wurzel- und mikrobieller Atmung im Boden durch Exsudatmarkierung. In: *Soil utilization and soil fertility. Volume 4. Humus budget. Berichte über Landwirtschaft* 206, Sonderheft, S. 114-116.
- SWINNEN, J., J. A. VAN VEEN & R. MERCKX (1994^a): Losses of ¹⁴C from roots of pulse-labelled wheat and barley during washing from soil. In: *Plant and Soil* 166, S. 93-99.
- SWINNEN, J., J. A. VAN VEEN & R. MERCKX (1994^b): ¹⁴C-pulse-labelling of field-grown spring wheat: an evaluation of its use in rhizosphere carbon budget estimations. In: *Soil Biology and Biochemistry* 26, S. 161-170.
- SWINNEN, J. (1994): Evaluation of the use of a model rhizodeposition technique to separate root and microbial respiration in soil. In: *Plant and Soil* 165, S. 89-101.
- SWINNEN, J., J. A. VAN VEEN & R. MERCKX (1995^a): Carbon fluxes in the rhizosphere of winter wheat and spring barley with conventional vs. integrated farming. In: *Soil Biology and Biochemistry* 27, S. 811-820.
- SWINNEN, J., J. A. VAN VEEN & R. MERCKX (1995^b): Root decay and turnover of rhizodeposits in field-grown winter wheat and spring barley estimated by ¹⁴C pulse-labelling. In: *Soil Biology and Biochemistry* 27, S. 211-217.
- TEUTEBERG, W. (1980): Der Anbau von Raps unter besonderer Berücksichtigung der Düngung. In: *Kali-Briefe* 15, S. 297-303.

- VERBURG, P. S. J., A. GORISSEN, W. J. ARP (1998): Carbon allocation and decomposition of root derived organic matter in a plant-soil system of *Calluna vulgaris* as affected by elevated CO₂. In: Soil Biology and Biochemistry 30 (10-11) S. 1251-1258.
- VERHOOG, A. D. (2002): Ölsaatenanbau in der EU. In: EUROSTAT (Hrsg.): Statistik kurz gefaßt – Thema 5: Landwirtschaft und Fischerei. S. 1-7.
- WEBER, E. P. & F. P. DAY (1996): The effect of nitrogen fertilization on the phenology of roots in a barrier island sand dune community. In: Plant and Soil 182, S. 139-148.
- WHIPPS, J. M. (1984): Environmental factors affecting the loss of carbon from the roots of wheat and barley seedlings. In: Journal of Experimental Botany 35, S. 767-773.
- WHIPPS, J. M. (1985): Effect of CO₂ concentration on growth carbon distribution and loss of carbon from the roots of maize. In: Journal of Experimental Botany 36, S. 644-651.
- WHIPPS, J. M. (1987): Carbon loss from the roots of tomato and pea seedlings grown in soil. In: Plant and Soil 103, S. 95-100.
- WHIPPS, J. M. (1990): Carbon economy. In: LYNCH, J. M. (Hrsg.): The rhizosphere. Wiley, New York, S. 59-97.
- XU, J. G. & N. G. JUMA (1993): Above-and below-ground transformation of photosynthetically fixed carbon by two barley (*Hordeum vulgare* L.) cultivars in a typic Cryoboroll. In: Soil Biology and Biochemistry 25, S. 1263-1272.
- ZAGAL, E., S. BJARNASON & U. OLSSON (1993): Carbon and nitrogen in the root-zone of barley (*Hordeum vulgare* L.) supplied with nitrogen fertilizer at two rates. In: Plant and Soil 157, S. 51-63.
- ZAGAL, E. (1994^a): Influence of light intensity on the distribution of carbon and consequent effects on mineralization of soil nitrogen in a barley (*Hordeum vulgare* L.)-soil system. In Plant and Soil 160, S. 21-31.
- ZAGAL, E. (1994^b): Carbon distribution and nitrogen partitioning in a soil-plant system with barley (*Hordeum vulgare* L.) Reygrass (*Lolium perenne*) and rape (*Brassica Napus* L.) grown in a ¹⁴CO₂-atmosphere. In: Plant and Soil 166, S. 63-74.

Zusammenfassung

Im Rahmen des Sonderforschungsbereiches 192 der Universität Kiel wurden in drei aufeinanderfolgenden Jahren (1997-99) die Auswirkungen differenzierter Bodenbearbeitung und N-Düngung auf Entwicklung und Dynamik der Wurzelsysteme von Kulturpflanzen unter temperiert-humidem Klima (Jahresmittel von Temperatur und Niederschlag: 8,2°C, 779 mm) untersucht. Ununterbrochen seit 1990 wurde je eine Hälfte der Versuchsflächen auf dem Versuchsgut Hohenschulen (Östl. Hügelland, Schleswig-Holstein, 54° 16' N, 9° 53' E) mit Pflugdrillsaat („P“), resp. Fräsohlsaart im System „Horsch“ („H“) bestellt. Auf beiden Bodenbearbeitungsblöcken waren N- Düngungsvarianten von 0 bis 400 kg/ha etabliert. Angebaut wurde auf schluffig-lehmigen Böden (vorwiegend erodierte Parabraunerden und Kolluvisole) die Fruchtfolge Wintergerste (WG) - Winterraps (WR) - Winterweizen (WW). Mittels Bohrkernmethode wurde in allen drei Jahren die Durchwurzelungsintensität (DWI) unter WR, 1997 zusätzlich unter WW und WG ermittelt. Während der Rapsblüte des Jahres 1998 wurden Rapspflanzen unter H- und P-Bodenbearbeitung sowie jeweils 0 resp. 240 kgN/ha*a N-Düngung ¹⁴C-pulsmarkiert und anschließend die Verteilung der ¹⁴C-markierten Assimilate auf Sproß und Wurzelsystem analysiert. Aus der Abnahme des ¹⁴C-Gehaltes im Wurzelsystem im Zeitintervall 3-11 Wochen nach ¹⁴C-Pulsmarkierung wurde der relative Wurzelumsatz (WU) geschätzt. Da die Auswertung dieses Versuches ergab, daß sich die Wurzelneubildung nicht ausschließlich durch Einbau von Produkten der rezenten Photosynthese vollzieht, sondern in größerem Umfang remobilisierte Assimilate ins Wurzelsystem transferiert und in den Wurzelneuzuwachs investiert werden, wurde 1999 eine weitere ¹⁴C-Pulsmarkierung von WR (nur in Variante P/240 kgN/ha*a) durchgeführt. Dabei wurden im Zeitraum 3-13 Wochen nach ¹⁴C-Pulsmarkierung neu gebildete Wurzeln mittels Ingrowth-Cores separat erfaßt und ihr ¹⁴C-Gehalt ermittelt. Auf diese Weise konnte das Ausmaß der Translokation „gealterter“ Assimilate in die Wurzelneubildung festgestellt und die Schätzung des WU mittels dieser Daten optimiert werden. Aus den Ergebnissen wurden Rhizodeposition (RD) und die Menge der wurzelbürtigen Ernterückstände errechnet. Die Untersuchungen führten zusammengefaßt zu folgenden Ergebnissen:

Die maximale DWI wurde bei allen drei Arten regelmäßig erst in der zweiten Hälfte der Vegetationsperiode zwischen Blüte- und Erntetermin erreicht. WW hatte stets größere Wurzelsysteme (Maximum: 50 km Wurzeln/m² Boden) als WG (max. 45 km/m²) und (außer unter N-Mangel) WR. Im N-Mangel lag die DWI unter WR (max. 60 km/m²) stets über, in mit N-gedüngtem Boden konsistent unter der von WG und WW. Die zeitliche Entwicklung der DWI von WR war durch einen bis kurz vor der Ernte tendenziell ansteigenden, alternierenden Verlauf gekennzeichnet, in den ein bis zwei Intervalle abnehmender DWI (häufig während der Blüte) eingeschaltet waren. In den meisten Varianten war zu beobachten, daß Wurzelzuwachsen in der Krume abnehmende DWI im Unterboden – und umgekehrt – gegenüberstand. Der ¹⁴C-Assimilattransfer ins Wurzelsystem lag aufgrund des fortgeschrittenen Entwicklungsstadiums der Pflanzen lediglich bei ca. 3,5%.

Die reduzierte **Bodenbearbeitung H** bewirkte bei WR, WW und WG eine gegenüber P verringerte DWI, wobei stets die Bodenschichten unterhalb der Bearbeitungsgrenze (ca. 10 cm)

besonders stark betroffen war. Bei WR war die durchwurzelungshemmende Wirkung bereits makroskopisch an einem gestauchten Wuchs der Pfahlwurzel und einem „Abknicken“ oberhalb der Frässohle zu erkennen. Das Sproß-Wurzel-Verhältnis wurde im Verlauf der Vegetationsperiode stetig weiter und lag zumeist in der P-Variante höher als unter H. Der ^{14}C -Assimilattransfer ins Wurzelsystem von WR war unter Horsch stark verringert, die Zuteilung in die generativen Organe deutlich erhöht. Die Abnahme des ^{14}C -Gehalts im Sproß zwischen Blüte und Ernte durch Respiration und Bestandsabfall (Verlust von Blüten- und Blattsubstanz) fiel verglichen mit den gepflügten Varianten insgesamt erheblich geringer aus. Die Schätzungen des relativen WU für den Zeitraum zwischen Pulsmarkierung und Ernte ergaben höhere Werte (96% gegenüber 88% unter Pflug) bei reduzierter Bodenbearbeitung, die RD hingegen war gegenüber gepflügtem Boden vermindert. Die Menge der durch RD in den Boden eingetragenen organischen Substanz wurde unter Horsch auf etwa 800 kg/ha*a, die gesamte nach der Ernte im Boden zurückgelassene wurzelbürtige Substanzmenge (inkl. der Pfahlwurzeln) auf 1390 kg/ha*a (aschefreie Trockensubstanz) geschätzt. Für die Pflugvariante ergab die Schätzung 1370 respektive 2500 kg/ha*a.

Mit zunehmender **N-Düngung** war bei WW und WG verstärktes Wurzelwachstum festzustellen. Demgegenüber lag die DWI des WR stets unter N-Mangel am höchsten. Steigerungen der N-Zufuhr führten bei WR fast immer zu verringerter DWI. Das Sproß-Wurzel-Verhältnis war durchgängig umso weiter, je mehr N die Pflanzen erhalten hatten. Die ^{14}C -Assimilatverteilung zwischen Sproß und Wurzel war von der N-Düngung nicht signifikant beeinflusst. N-Mangel führte zu verminderter Sproßrespiration und zu einer hoch signifikant verstärkten ^{14}C -Assimilatverteilung in die generativen Organe. Aus den ^{14}C -Verteilungsmustern war sehr klar eine Akkumulation offensichtlich retranslozierter Assimilate in den Samenkörnern zu erkennen, deren Herkunft wahrscheinlich Stengel und Schotenwände waren. In den ersten drei Wochen nach der Pulsmarkierung war signifikant eine stärkere Freisetzung von respiratorischem $^{14}\text{CO}_2$ unter N-limitierten Bedingungen festzustellen. N-Mangel führte zu stark erhöhtem WU (110% gegenüber 70% bei N-Zufuhr). Die Höhe der durch Rhizodeposition in den Boden eingetragenen Stoffmenge wurde durch unterschiedliche N-Düngung kaum beeinflusst und lag unter N-Mangel bei ca. 1035 kg/ha*a, unter hoher N-Zufuhr bei 1090 kg/ha*a. Art und stoffliche Zusammensetzung der durch RD freigesetzten Substanzen dürften sich jedoch erheblich unterscheiden: Unter N-Mangel sind größere Mengen schwer abbaubarer Verbindungen (Wurzelzellwände) zu erwarten, während bei höherem N-Niveau der Anteil niedermolekularer, leicht zersetzbarer Substanzen zunehmen dürfte. Die Gesamtmenge der wurzelbürtigen Ernterückstände wurde im N-Mangel auf 1790 kg/ha*a und bei hohem N-Niveau auf 2025 kg/ha*a geschätzt.

Erhöhter Wurzelumsatz wird als Strategie zur Anpassung an N-Mangel gedeutet. Verstärkte Substanzabgabe durch Rhizodeposition wird zum einen als Zeichen insgesamt erhöhten Energieverbrauchs, zum anderen als Folge intensivierter Exsudation der besser N-versorgten Pflanzen (Phosphoraufnahme) interpretiert, deren Bedarf an Wasser und sonstigen Nährstoffen (im Versuch nicht variiert) relativ zu den Pflanzen unter N-Mangel erheblich erhöht gewesen sein dürfte.

Summary

Net production and changes in root length over time of winter oilseed rape (*Brassica napus* L. var. *Falcon*) were investigated during three successive years at the experimental farm at Hohen Schulen in the northern part of Germany (54° 16' N, 9° 53' E). This study was part of the Special Research Foundation Program No. 192 at the University of Kiel. The main focus of this program was to determine the effects of soil tillage and N source/rate on root development of agronomic crops under temperate humid climatic conditions (mean annual temperature and rainfall were 8.2°C and 779 mm, respectively). The soils association was dominated by silty loam soils (stagni-haplic Luvisols and stagni-cumulic Anthrosols). Effects of two tillage treatments being plough (P) versus reduced tillage system "Horsch" (H) and different N-rates (0 to 400 kg N ha⁻¹) on root growth dynamics of winter oilseed rape (WR), rotated with winter barley (WG) and winter wheat (WW) were studied. Soil coring was used to determine root length densities (RLD) for rape (1997-1999), barley (1997) and wheat (1997). Oil seed rape plants for the two tillage treatment and 0 and 240 N rate treatment combinations were pulse-labeled with ¹⁴C during flowering in 1998 to study assimilate partitioning and accumulation in the root system. The ¹⁴C decay rates of root tissue during the 8-week period following the first harvesting (3 weeks after the pulse) were used to assess root turnover (RT) rates. Since a substantial fraction of carbon accumulating in newly formed roots came from retranslocation from older tissues rather than from assimilation, the above pulse-labeling experiment was repeated in 1999 (240 N "plow" treatment only). Combining the labeled carbon technique with "in-growth soil cores" facilitated the assessment of the contribution of internally cycled "old" carbon to the formation of new roots. This information was required for a more accurate estimation of RT rates and also used to calculate rhizodeposition (RD) rates. Assimilate accumulation in residual root mass was determined at crop maturity.

For all crops, maximum root length densities occurred during the second part of the reproductive growth phase. On average, wheat had the most extensive root system. Deviating from the norm, under N limiting conditions greatest RLD were found for rape. Maximum RLD in topsoils (0-30cm) were 13.4, 11.1, 15.6 cm root cm⁻³ for wheat, barley, and rape, respectively. The RLD of barley and wheat increased with N rate, whereas for rape the zero N-rate had the greatest RLD. At the 240 N-rate RLD for cereals were greater than those for rape. At the zero N treatment the reverse was true. Although overall RLD values continued to increase until crop maturation, this trend was punctuated with short-term relative decreases in RLD during periods of reduced assimilate availability as was the case during flowering. Similarly, root proliferation in the topsoil coincided with a reduction in RLD in the subsoil and vice versa. Due to the labeling of the plants at a relative "late" growth stage, ¹⁴C translocation rates to the roots was only on the order of 3.5%.

Reduced tillage resulted in decreased RLD values for all crops. This reduction in RLD was most pronounced at a soil depth of 10-30 cm. In the case of rape, reduced tillage resulted in formation of "j-shaped" tap-roots due to the presence of a shallow compacted zone. Shoot to root ratios increased over time, and values were typically greater for plow treatment compared to reduced tillage treatment. Reduced tillage reduced assimilate allocation to roots, thus re-

sulting in increased carbon supply to reproductive organs. Reduced tillage also decreased ^{14}C losses between flowering and maturity associated with maintenance respiration and leaf/flower drop. Calculated root turnover rates between flowering and maturity for reduced tillage and plow treatments were 96 and 88%, respectively. Corresponding root deposition rates were 800 and 1370 kg ha^{-1} . Respective values for ash-free root biomass accumulation rates were 1390 and 2500 kg ha^{-1} .

Increased N rates enhanced root growth of barley and wheat. However, increased N-availability reduced RLD of rape. Shoot to root ratios typically increased as N-supply increased. Nitrogen rate had no effect on allocation of labeled carbon between shoots and roots. Under N-limiting conditions, respiration of shoots was reduced and ^{14}C allocation to reproductive growth increased. Based on ^{14}C accumulation patterns, it was concluded that substantial fraction of assimilates accumulating in the seed originated from seed pods and stems. Under N-limiting conditions respiration losses of ^{14}C increased during the first 3 weeks after labeling. Root turnover rates increased from 70% under 240 kg N ha^{-1} to 110% under N limited conditions. Rhizodeposition rates were not (greatly) affected by N rate and values for the 0 and 240 kg N ha^{-1} treatments were 1035 and 1090 kg ha^{-1} , respectively. However, the type and composition of products associated with rhizodepositon were supposed to be greatly affected by N-supply. Thus, under N limiting conditions, accumulation of more recalcitrant root ectodermis compounds could be assumed. With an increase in N supply, the fraction of smaller and more readily degradable carbon molecules were presumed to be increased. Residual root biomass increased from 1790 to 2025 kg ha^{-1} as N rates increased from 0 to 240 kg N ha^{-1} .

It can be argued that the increase in root turnover rates reflects a crop adaptation to N-limiting conditions. Higher rhizodeposition rates of N-sufficient plants could be related to overall greater root metabolism and assimilate requirements associated with higher nutrient and/or water uptake rates per unit root length compared to N-limited roots.

Lebenslauf

Name: Johannes Max
Geburtsdaten: 28. Dezember 1965, Frankfurt am Main

1972 – 1976 Grundschule, Frankfurt am Main und Schmitten/Taunus
1976 – 1978 Förderstufe, Riedelbach/Taunus
1978 – 1985 Gymnasialer Zweig der Christian-Wirth-Schule, Usingen
Abschluß: Abitur
1985 – 1986 Zivildienst: DRK, Kreisverband Hochtaunus
1986 – 1994 Philipps-Universität, Marburg/Lahn
Studium der Geographie
Justus-Liebig-Universität, Gießen, Agrarwissenschaftliche Fakultät
Studium der Bodenkunde (Abschluß als Nebenfach)
Diplomarbeit: „Untersuchungen zum Bodenwasser- und Nitrathaushalt,
ein Beitrag zum Grundwasserschutz in Weinbaugebieten“
Abschluß: Diplom-Geograph

1994 – 1995 Planungsbüro für Landschafts- und Tierökologie, Erwitte/Westfalen,
Zwenkau/Sachsen, Mühlhausen/Thüringen
Wissenschaftlicher Mitarbeiter

1995 – 1997 BMW Rolls-Royce AeroEngines, Oberursel/Taunus
1997 – 2000 Christian-Albrechts-Universität zu Kiel, Institut für Pflanzenernährung
und Bodenkunde, Sonderforschungsbereich 192
Wissenschaftlicher Mitarbeiter

2000 – 2001 Siemens Business Services, München
Qualifizierungsprogramm zum „Applikations-Entwickler GIS“

2001 – 2002 Universität Stuttgart-Hohenheim, Agrarwissenschaftliche Fakultät
Wissenschaftlicher Mitarbeiter

04/2004 Institut für Pflanzenernährung und Bodenkunde
der Christian-Albrechts-Universität zu Kiel
Abschluß: Promotion

2003 – 2004 Hessische Landesanstalt für Umwelt und Geologie, Abteilung W3
„Grund- und Oberflächengewässer“
Wissenschaftlicher Mitarbeiter