

UNIVERSITÄT LEIPZIG

Fakultät für Physik und Geowissenschaften

Institut für Geographie

Quantifizierung der Rhizodeposition des Winterweizens

Wissenschaftliche Arbeit

zur Erlangung des akademischen Grades

Diplom – Geograph

Eingereicht von: Christian Tietz

Geboren am 2. August 1981 in Zerbst

Matrikelnummer: 9740940

Betreuer:

Prof. Dr. Hans Neumeister, Universität Leipzig

Dr. Katrin Kuka, Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung GmbH - UFZ

Leipzig, den 21.07.2008

Quantifizierung der Rhizodeposition des Winterweizens



Wissenschaftliche Arbeit zur
Erlangung des akademischen Grades
Diplom – Geograph

von Christian Tietz

Abbildung:

Minirhizotron-Bild V521BHM4_T002_L084_2007.03.14_143349_010_EKK.jpg

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	III
Formelverzeichnis.....	VII
Abkürzungsverzeichnis	VIII
Danksagung.....	IX
Eidesstattliche Erklärung	X
Zusammenfassung	XI
Summary	XII
1 Einleitung.....	1
1.1 Hintergrund	1
1.2 Problemstellung.....	1
1.2.1 Zielstellung.....	2
2 Grundlagen	4
2.1 Wurzeln	4
2.1.1 Funktion, Entwicklung und Morphologie von Pflanzenwurzeln	4
2.1.2 Entwicklung und Morphologie der Winterweizenwurzeln	6
2.2 Kohlenstoffeintrag über Wurzelrückstände.....	11
2.3 Die Stellung der Wurzel im CANDY-CIPS Modellsystem.....	13
2.4 Methoden zur Quantifizierung der Rhizodeposition	15
2.4.1 Destruktive Methoden zur Datengewinnung.....	15
2.4.2 Nicht-destruktive Methoden zur Datengewinnung.....	16
2.5 Quantifizierung der Rhizodeposition - Stand der Forschung	18
3 Untersuchungsgebiet und Methoden	21
3.1 Die Lehr- und Versuchsstation Bad Lauchstädt	22
3.1.1 Bodenkundliche und klimatische Standortbedingungen.....	24
3.1.2 Versuchsstandort des Winterweizens Parzelle 42a	27
3.2 Nicht destruktive Methode zur Datengewinnung: Minirhizotron	28
3.2.1 Bildgewinnung mit Minirhizotron-Kamerasystem.....	28

3.2.2	Datenauswertung.....	32
3.2.3	Bestimmung der Bildqualität	41
3.3	Destruktive Methode zur Datengewinnung: Bohrkernmethode	43
3.3.1	Probennahme	43
3.3.2	Probenaufbereitung	44
3.3.3	Rasterauszählungsverfahren.....	46
4	Ergebnisse und deren Bewertung	48
4.1	Auswertung der Bildqualität.....	48
4.2	Minirhizotron-Technik	50
4.2.1	Vergleich der WinRHIZO Tron MF und MiRIA Daten	51
4.2.2	Korrelation der WinRHIZO Tron MF und MiRIA Daten.....	60
4.2.3	Test einer verringerten Minirhizotron-Bilderanzahl für die Bildauswertung mit WinRHIZO Tron MF	66
4.3	Bohrkernmethode	69
4.4	Minirhizotron-Methode vs. Bohrkernmethode.....	72
4.4.1	Zusammenhang zwischen der Gesamtwurzellänge und der Wurzellängendichte.....	73
4.4.2	Zusammenhang zwischen dem Gesamtwurzelvolumen und der Wurzelmassendichte ..	76
4.4.3	Quantifizierung der Wurzelmasse und der Wurzellänge für den gesamten Beobachtungszeitraum	78
4.5	Zusammenfassung	83
5	Diskussion und Ansätze für eine verbesserte Quantifizierung der Rhizodeposition	85
5.1	Datenaufnahme	85
5.2	Datenaufbereitung	87
5.3	Datenauswertung.....	89
5.4	Fazit.....	91
6	Ausblick	93
7	Literatur- und Quellenverzeichnis	94

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1:	Längsschnitt durch eine Wurzelspitze mit Wurzelhaarzone.....	5
Abbildung 2:	Vergleich der ermittelten Durchwurzelungstiefen des Winterweizens verschiedener Autoren auf unterschiedlichen Standorten	9
Abbildung 3:	Wurzelentwicklung des Winterweizens	11
Abbildung 4:	Abgabe von Kohlenstoffverbindungen durch die Wurzel im Boden und deren Umwandlung	12
Abbildung 5:	Modellstruktur von CIPS	13
Abbildung 6:	Methodischer Ansatz zur Ermittlung quantitativer Daten zur Rhizodeposition	21
Abbildung 7:	Schema der Versuchsanlage in Bad Lauchstädt 2007	23
Abbildung 8:	Schema des Versuchsaufbaus für die Minirhizotron-Technik	24
Abbildung 9:	Normschwarzerde aus Löss (Ort: Bad Lauchstädt)	25
Abbildung 10:	Jährlicher Niederschlags- und Lufttemperaturverlauf in Bad Lauchstädt (1896-2007)	26
Abbildung 11:	Verlauf der durchschnittlichen Monatstemperatur und der monatlichen Niederschlagssummen September 2006 bis Juli 2007	27
Abbildung 12:	Komponenten des Minirhizotron-Kamerasystems	28
Abbildung 13:	Schematische und reale Darstellung der Versuchsanordnung	29
Abbildung 14:	Schema zur Vergabe des Dateinamens durch die Bilderfassungssoftware	29
Abbildung 15:	Kontrollbild im Inneren des Transportbehälters des Minirhizotron- Kamerasystems	30
Abbildung 16:	Kalibrierung von WinRHIZO Tron MF für den Bildaufnahmetag 27.02.2007	33
Abbildung 17:	Nachzeichnen einer Wurzel im Programm WinRHIZO Tron MF	34
Abbildung 18:	Schema zur Entscheidungsfindung des Lebensstatus der Wurzeln.....	36
Abbildung 19:	Schema zur Ermittlung der Referenzbilder	37
Abbildung 20:	Zusammenhang zwischen projizierter Wurzelfläche und Wurzeloberfläche	38
Abbildung 21:	Binärbild des Minirhizotron-Bildes V521BHM4_T001_L015_2007.02.27_ 105450_008_JAN.jpg.....	39
Abbildung 22:	Bildpunkt eines Minirhizotron-Bildes (V521BHM4_T001_L015_2007.03.1 4_142755_010_EKK.jpg)	41

Abbildung 23:	Beispielbilder für Bildqualitätsklassen.....	43
Abbildung 24:	Verortung der Probennahmepunkte auf der Parzelle 42a.....	44
Abbildung 25:	Ablauf der Wurzelauswaschung.....	45
Abbildung 26:	Schematische Darstellung der Kunststoffschale für die Anwendung des Rasterauszählungsverfahrens.....	47
Abbildung 27:	Verteilung der Bildqualitätsklassen pro Bildaufnahmetermin	49
Abbildung 28:	Anteil der Minirhizotron-Bilder mit schlechter Bildqualität pro Tiefenbereich und Bildaufnahmetermin	50
Abbildung 29:	Wurzeltiefe und Wuchshöhe im Verlauf der Pflanzenentwicklung	51
Abbildung 30:	Verfügbarkeit von Daten über tote Wurzeln (Win)	52
Abbildung 31:	Vergleich der Wurzelanzahl (Röhre 1 - 3), ermittelt mit Win und MiR	53
Abbildung 32:	Minirhizotron-Bild nach der Bearbeitung mit WinRHIZO Tron MF und MiRIA V521BHM4_T001_L018_2007.02.27_105436_008_JAN.jpg.....	53
Abbildung 33:	Vergleich verschiedener Wurzelkenngrößen (Röhre 1 – 3), ermittelt mit Win und MiR	55
Abbildung 34:	Vergleich der durchschnittlichen Wurzeldurchmesser (05.07.2007)	56
Abbildung 35:	Vergleich der Gesamtwurzellänge (05.07.2007), ermittelt mit Win und MiR	58
Abbildung 36:	Minirhizotron-Bild V521BHM4_T003_L014_2007.07.05_141047_017_CHR.jpg nach der Bearbeitung mit WinRHIZO Tron MF (A) und MiRIA (B)	59
Abbildung 37:	Korrelation der Wurzelanzahlen (Röhre 1 – 3), ermittelt mit Win und MiR ..	60
Abbildung 38:	Vergleich der MiRIA Detektion am Beispiel zweier Minirhizotron-Bilder (A: V521BHM4_T003_L066_2007.04.18_132538_012_EEE; C: V521BHM4_T001_L060_2007.04.18_130731_012_EEE)	63
Abbildung 39:	Korrelation verschiedener Wurzelkenngrößen (Röhre 1 – 3), ermittelt mit Win und MiR	64
Abbildung 40:	Schematische Darstellung der Stichprobenauswahl.....	66
Abbildung 41:	Korrelation der Wurzelanzahlen aus 30 und 90 Minirhizotron-Bildern (05.07.2007), ermittelt mit Win	67
Abbildung 42:	Korrelation verschiedener Wurzelkennwerte aus 30 und 90 Minirhizotron-Bildern (05.07.2007), ermittelt mit Win	68
Abbildung 43:	Tiefenverteilung der Wurzelmassendichte (Boh)	70
Abbildung 44:	Verteilung des Wurzelgewichts (Boh) pro Tiefenbereich	70
Abbildung 45:	Tiefenentwicklung der Wurzellängendichte (Boh).....	71
Abbildung 46:	Verteilung der Wurzellänge (Boh) pro Tiefenbereich	71

Abbildung 47:	Schematische Darstellung zur Datenverknüpfung zwischen Minirhizotron-Methode und Bohrkernmethode	73
Abbildung 48:	Korrelation der Wurzellängendichte (Boh) mit der Gesamtwurzellänge (Win)	74
Abbildung 49:	Vergleich der Tiefenentwicklung der Gesamtwurzellänge der lebenden und aller Wurzeln (Win).....	75
Abbildung 50:	Korrelation der Wurzellängendichte (Boh) mit der Gesamtwurzellänge (Win) lebender Wurzeln.....	75
Abbildung 51:	Korrelation der Wurzelmassendichte (Boh) mit dem Gesamtwurzelvolumen (Win)	76
Abbildung 52:	Tiefenentwicklung der Wurzelmassendichte (Boh), des Gesamtwurzelvolumens (Win) und des Gesamtwurzelvolumens (Win) lebender Wurzeln	77
Abbildung 53:	Korrelation der Wurzelmassendichte (Boh) mit dem Gesamtwurzelvolumen (Win) lebender Wurzeln.....	78
Abbildung 54:	Schema zur Quantifizierung der Wurzelmasse und der Wurzellänge im gesamten Beobachtungszeitraum	80
Abbildung 55:	Berechnete Wurzelmasse im Beobachtungszeitraum.....	81
Abbildung 56:	Berechnete Wurzellänge im Beobachtungszeitraum	83

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Botanische Einordnung der Getreidearten.....	7
Tabelle 2:	BBCH Entwicklungsstadien des Getreides	8
Tabelle 3:	Fruchtartenparameter zur ertragsabhängigen Berechnung des Kohlenstoffeintrags.....	15
Tabelle 4:	Bodenkundliche Kennwerte der Normschwarzerde aus Löss	26
Tabelle 5:	Übersicht zur Bildaufnahme der Parzelle 42a	31
Tabelle 6:	Übersicht zum Verhältnis von MiRIA Werten und WinRHIZO Tron MF Werten pro Bildaufnahmetermin für verschiedene Wurzelkenngrößen	57
Tabelle 7:	Übersicht zum Verhältnis zwischen WinRHIZO Tron MF und MiRIA Werten pro Tiefe für die Wurzelanzahl und Gesamtwurzellänge (05.07.2007).....	59
Tabelle 8:	Gegenüberstellung verschiedener Wurzelkenngrößen (Röhre 1 – 3), ermittelt mit Win und MiR.....	62
Tabelle 9:	Vergleich der Bestimmtheitsmaße zweier Korrelationsvarianten.....	65
Tabelle 10:	Werte zur Korrelation zwischen der Wurzelmassendichte (Boh) und der Wurzellängendichte (Boh).....	72
Tabelle 11:	Übersicht zu den Referenzdaten (Boh).....	74
Tabelle 12:	Faktoren zur Berechnung der Wurzelmasse anhand des Gesamtwurzelvolumens (Win) lebender Wurzeln.....	79
Tabelle 13:	Quantifizierung der Wurzelmasse im gesamten Beobachtungszeitraum (40 cm-120 cm).....	80
Tabelle 14:	Faktoren zur Berechnung der Wurzellänge anhand der Gesamtwurzellänge (Win) lebender Wurzeln	82
Tabelle 15:	Quantifizierung der Wurzellänge im gesamten Beobachtungszeitraum (40 cm-120 cm).....	82

Formelverzeichnis

Formel 1:	Fruchtartenparameter zur ertragsabhängigen Berechnung der Kohlenstoffreproduktion.....	14
Formel 2:	Gleichung zur Berechnung der Gesamtwurzellänge.....	46
Formel 3:	Vereinfachte Gleichung zur Berechnung der Gesamtwurzellänge	46
Formel 4:	Gleichung zur Berechnung des Wurzelvolumens.....	57

Abkürzungsverzeichnis

BHM	bodenhydrologische Messfläche
Boh	Bohrkernmethode
CANDY	CARbon and Nitrogen DYnamics
CIPS	Carbon turnover In Pore Space
CO ₂	Kohlendioxid
DOM	Dissolved Organic Matter
EWR	Ernte- und Wurzelrückstände
FOM	Fresh Organic Matter
FOM _L	labiler Anteil an FOM
FOM _R	stabiler Anteil an FOM
FOM _S	löslicher Anteil an FOM
MiR	MIRIA
MO	Mikroorganismen
Win	WinRHIZO Tron MF

Danksagung

Hiermit möchte ich mich bei all jenen bedanken, die mich während der Zeit, in der ich an dieser Diplomarbeit gearbeitet habe, persönlich und fachlich unterstützt haben.

Mein besonderer Dank gilt Herrn Prof. Dr. Hans Neumeister für zahlreiche anregende und hilfreiche Gespräche und Frau Dr. Katrin Kuka vom Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung GmbH - UFZ Halle, durch die das Thema der Arbeit angeregt und unterstützt wurde, ferner gab sie mir die Möglichkeit Einblicke in die Arbeit der Arbeitsgruppe C und N Dynamik des Departments Bodenphysik des Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung GmbH - UFZ Halle zu erhalten.

Ich danke ebenfalls Frau Janine Krüger für ihre tatkräftige und unerlässliche Unterstützung bei der Datenaufnahme.

Bei Herrn Bernd Herrmann bedanke ich mich für die schnelle und unkomplizierte Hilfe bei jeglichen technischen Fragen und die Erläuterungen zur Anwendung der beiden computergestützten Bildanalyseverfahren.

Frau Petra Petersohn und Frau Sylvia Schmögner vom Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung GmbH - UFZ Halle danke ich für die schnelle Bereitstellung jeglicher, von mir benötigter Daten.

Ganz herzlichen Dank möchte ich meiner Freundin und meiner Familie sagen, für den Rückhalt und das Vertrauen, das sie mir stets entgegengebracht haben.

Eidesstattliche Erklärung

„Ich erkläre hiermit ehrenwörtlich, dass ich die vorliegende Diplomarbeit ohne unzulässige Hilfe Dritter und Benutzung anderer als der angegebenen Hilfsmittel angefertigt habe. Die aus fremden Quellen direkt oder indirekt übernommenen Gedanken sind als solche kenntlich gemacht.

An der geistigen Erstellung der vorliegenden Diplomarbeit war außer mir niemand beteiligt. Dritte haben von mir weder unmittelbar noch mittelbar geldwerte Leistungen für Arbeiten erhalten, die im Zusammenhang mit dem Inhalt der vorliegenden Arbeit stehen.

Diese Diplomarbeit wurde bisher weder im Inland noch im Ausland in gleicher oder ähnlicher Form oder auszugsweise einer Prüfungsbehörde vorgelegt.

Ich erkläre mich damit einverstanden, dass meine Diplomarbeit nach positiver Begutachtung in der Zweigstelle Geographie der Universitätsbibliothek Leipzig zur Benutzung zur Verfügung steht.“

Leipzig, den 21. Juli 2008

Christian Tietz

Zusammenfassung

Böden haben Bedeutung für den globalen Kohlenstoffhaushalt und damit auch für das Klimasystem der Erde. Prozesse zur Kohlenstoffdynamik und -speicherung beeinflussen das Aufnahmevermögen und die damit verbundene Funktion des Bodens als Senke für Kohlendioxid. Als Speicherorgan von Pflanzen führt die Wurzel dem Boden bestimmte Mengen an Kohlenstoff zu. Das Wissen über die Quantität der Zufuhr ist für die Simulation von Umsatzprozessen im Boden von entscheidender Bedeutung. Informationen über die Dynamik des Kohlenstoffeintrags durch Wurzeln existieren bisher aber kaum.

Zur Ermittlung quantitativer Daten zur Rhizodeposition wird die Minirhizotron-Methode mit anschließender computergestützter Auswertung der Minirhizotron-Bilder mittels der Programme MiRIA (vgl. ERZ 2006) und WinRHIZO Tron MF verwendet. Für die Bestimmung von Referenzwerten wird die Bohrkernmethode nach SCHUURMAN & GOEDEWAAGEN (1971) angewendet.

In der vorliegenden Arbeit wird die Dynamik des Wurzelwachstums und der Rhizodeposition des Winterweizens für den Zeitraum vom 27.02.2007 bis zum 05.07.2007 bestimmt. Die beiden Bildanalyseprogramme bieten auf zwei unterschiedliche Arten die Möglichkeit mit verringertem Zeit- und Arbeitsaufwand Daten zu gewinnen. Grundsätzliche Überlegungen zur manuellen und automatischen Detektion und Einteilung von Wurzeln sind dazu nötig. Abgeleitet werden Ansätze aus der Literatur zur Wurzelmorphologie und -entwicklung, sowie aus existierenden Methoden der Rhizosphärenforschung. Mit Hilfe der Referenzwerte ist es abschließend möglich, eine Quantifizierung der Wurzelmasse und -länge aus Daten, die mittels der Minirhizotron-Methode gewonnen werden, vorzunehmen.

Summary

Soils are important for the global carbon budget and therefore also for the climate system of the earth. Processes of the carbon dynamic and carbon storage influence the capacity of soils and hence the associated function of the soil as a carbon dioxide sink. Roots are storage organs of plants which deposit a determinate quantity of carbon into the soil. The knowledge of the quantity of this deposition is of decisive importance for the simulation of turnover processes in the soil. Up to now, informations on the dynamic of the carbon input of roots are hardly available.

The minirhizotron method followed by a computer based analysis via the programs MiRIA (ERZ 2006) and WinRHIZO Tron MF is used for the investigation of quantitative data of the rhizodeposition. For the determination of reference values the auger method after SCHUURMAN & GOEDEWAAGEN (1971) is applied.

In the present diploma thesis the dynamic of root growth and rhizodeposition of winter wheat is investigated for the observation period from the 27th of February 2007 to the 5th of July 2007. The image analysis programs, which are used in this study, facilitate the reduction of expenditure of time and work for the data acquisition in two different ways. Fundamental advisements for the manual and automatic detection and classification of roots are necessary. Methodically starting points are derived from the literature of root morphology and development as well as from existing methods of the rhizosphere research. With the help of the reference values it is finally possible to quantify root weight and root length for the entire observation period from data that were collected by applying the minirhizotron method.

1 Einleitung

1.1 Hintergrund

Das Wurzelsystem von Pflanzen und der durchwurzelte Bodenraum spielen nach MERBACH (1992) eine wichtige Rolle in terrestrischen Ökosystemen. Relevanz haben vor allem die Vorgänge, die in der Kontaktzone zwischen Wurzel und Boden ablaufen. Diese beeinflussen die Boden- und Pflanzenentwicklung, Stoff- und Energieflüsse sowie die Toleranz gegenüber Belastungen (vgl. MERBACH 1999). Die Erforschung dieser Prozesse erweist sich als schwierig, weil die meisten Wurzeln für uns verborgen unter der Erde liegen (vgl. KUTSCHERA 1960). Nach LUSTER & FINLAY (2007) erfolgen die Prozesse im Wurzelraum auf der Mikroskala, weshalb diese häufig schwierig zu charakterisieren sind. Um diese Prozesse modellieren zu können, ist es deshalb notwendig fundamentale Erkenntnisse über die in der Mikroskala ablaufenden Prozesse zu besitzen. Diese Kenntnisse können auf eine höhere Skala übertragen werden (vgl. LUSTER & FINLAY 2007). Besonders die Wurzelforschung unter natürlichen Bedingungen ist nach BÖHM (1979) ein „Stiefkind“ der Wissenschaft. Der Grund dafür ist vor allem methodisch, da viele der bekannten Methoden mühsam und zeitintensiv sind, sowie die Ergebnisgenauigkeit häufig nicht sehr groß ist (vgl. BÖHM 1979). Verglichen mit anderen wissenschaftlichen Disziplinen benötigt die Wurzelforschung beträchtliche Budgets. Es ist deshalb sinnvoll umsichtig zu planen, eine entsprechende Methode zu wählen und genau zu wissen, welche Wurzeleigenschaft untersucht werden soll um die Forschungsfrage zu klären (vgl. SMIT et al. 2000).

1.2 Problemstellung

Böden haben in der Landschaft wichtige Funktionen. Vor allem zu nennen sind die Filter-, Puffer- und Speicherfunktion. In Böden ablaufende Prozesse zur Kohlenstoffspeicherung und -dynamik haben auch Bedeutung im globalen Maßstab, da diese Einfluss auf das Klimasystem der Erde und den globalen Kohlenstoffhaushalt nehmen (vgl. KUKA 2005). Der Boden ist aus diesem Grund seit der Übereinkunft der Vereinten Nationen zur Nachhaltigkeit (vgl. UNFCCC 1992) stärker in das Zentrum der Forschung gerückt, da dieser als Senke für Kohlenstoffdioxid ausgewiesen werden soll (vgl. KUKA 2005). So sollen beispielsweise die Möglichkeiten der Umstellung der Ackerbewirtschaftung auf konservierende Bodenbearbeitung untersucht werden. Europäischen Böden könnten mittels alternativer Landnutzung und verbessertem Management als Nettosenke für 0,8 %

der globalen Kohlendioxide dienen, die aus der Verbrennung von fossilen Rohstoffen entstehen (vgl. SMITH et al. 1997).

Unter anderem gab es bisher Forschungsarbeiten zur Identifizierung stabilisierender Mechanismen in Böden. Als Beispiel lässt sich das Schwerpunktprojekt 1090 „Böden als Quelle und Senke für CO₂-Mechanismen und Regulation der Stabilisierung organischer Substanzen in Böden“ der Deutschen Forschungsgemeinschaft nennen. Es wurden Modelle entwickelt, welche die Kohlenstoffakkumulation und -dynamik in Böden prognostizieren können (vgl. KUKA 2005). Beispiele für solche Modelle sind CANDY (vgl. FRANKO & OEHLISCHLÄGEL 1993), DAISY (vgl. HANSEN et al. 1990), CENTURY (vgl. METHRELL 1993), Roth-C (vgl. COLEMANN & JENKINSON 1995) und das Modell **Carbon turnover In Pore Space (CIPS)**, das von KUKA (2005) entwickelt wurde.

Für die Anwendung des Modells CIPS und die damit verbundene Modellierung der Wasser- und Nährstoffaufnahme durch die Pflanze sowie den Kohlenstoffumsatz im Boden sind Informationen über die zeitliche und räumliche Verteilung der Wurzeloberfläche im Boden eine wesentliche Voraussetzung. Der Grund dafür ist die Tatsache, dass Wurzeln eine der Hauptquellen für den Kohlenstoffeintrag in den Boden bilden (vgl. KLIMANEK 1997). Quantitative Informationen darüber liegen nur in geringem Maße vor. Probleme bereitet vor allem die Beobachtung des Wurzelwachstums durch die schon länger angewendete Technik von Probenahme und Auswaschung der Wurzeln. Diese ist sehr aufwändig, kann nicht zerstörungsfrei und mit beliebiger Häufigkeit durchgeführt werden. Hingegen ermöglicht die Technik der Wurzelbeobachtung mit Hilfe einer Minirhizotron-Kamera, an die eine anschließende Auswertung der Minirhizotron-Bilder geknüpft ist, eine nicht-destruktive kontinuierliche Beobachtung.

1.2.1 Zielstellung

Gegenstand dieser Diplomarbeit ist die Quantifizierung des Kohlenstoffeintrags von Wurzeln über ein bildgebendes Verfahren am Beispiel von Winterweizen, um diese Erkenntnisse in das Modellsystem CANDY-CIPS einfließen lassen zu können.

Ziel der Arbeit ist es quantitative Daten zur Wurzeldynamik zu ermitteln, indem die Minirhizotron-Technik als neuer methodischer Ansatz dafür getestet und bewertet wird. Außerdem sollen gewonnene praktische Erkenntnisse bei der Anwendung der Methode in eine Verbesserung und Anpassung der Methode einfließen.

Folgende Aufgaben ergeben sich aus der Zielstellung:

1. Ermittlung verschiedener methodischer Ansätze zur Wurzelbeobachtung sowie deren Beschreibung

2. Anwendung der Minirhizotron-Technik am Beispiel des Winterweizens (*Triticum aestivum* L.)
3. Prüfung der Eignung zweier rechnergestützter Bildanalyseverfahren zur Ermittlung quantitativer Wurzeldata
4. Nutzung der gewonnenen Erfahrungswerte zur Beschreibung einer verbesserten Methodenanwendung

Der Schwerpunkt der Arbeit liegt auf der Bearbeitung dieser vier Aufgaben. Dafür wird im Kapitel 2 „Grundlagen“ die Basis gelegt. Das Kapitel zeigt vorhandene methodische Ansätze auf und erklärt Hintergründe, die für die Bearbeitung des Themas essentiell sind. Die zweite Aufgabe wird im dritten Kapitel „Untersuchungsgebiet und Methoden“ bearbeitet. Darin wird die methodische Umsetzung der Minirhizotron-Technik im Rahmen dieser Arbeit vorgestellt. Außerdem wird die Bohrkernmethode, die notwendige Referenzwerte zur Minirhizotron-Technik liefert, erläutert. Das vierten Kapitel „Ergebnisse und deren Bewertung“ beschäftigt sich mit der Bearbeitung der 3. Aufgabe. Dazu werden die einzelnen Ergebnisse der Minirhizotron-Methode präsentiert, gegenübergestellt und interpretiert. Anschließend werden Zusammenhänge zwischen den Ergebnissen der Minirhizotron-Methode und der Bohrkernmethode untersucht und eine Quantifizierung der Rhizodeposition durch eine Kombination der Daten beider Methoden vorgenommen. Die vierte Aufgabe wird abgehandelt, indem alle gewonnen Erkenntnisse, welche durch die Anwendung der Methoden und den daraus resultierenden Ergebnissen gewonnen werden, in Kapitel 5 „Diskussion und Ansätze für eine verbesserte Quantifizierung der Rhizodeposition“ einfließen.

2 Grundlagen

Dieser Abschnitt vermittelt grundlegende und notwendige Informationen für die Bearbeitung der Aufgabengabenstellung. Zuerst werden Erkenntnisse über die Funktion, Morphologie und Entwicklung von Wurzeln allgemein und im Speziellen über die des Winterweizens gegeben. Des Weiteren wird der Kontext zwischen Wurzelwachstum und dem Eintrag von Kohlenstoff in den Boden dargelegt und der Stellenwert der Wurzel im CANDY-CIPS Modellsystem erläutert. Außerdem wird ein Überblick über die in der Literatur angegebene Entwicklung der methodischen Ansätze zur Wurzelbeobachtung gegeben und der aktuelle Stand der Wissenschaft in dieser Forschungsfrage erläutert.

2.1 Wurzeln

2.1.1 Funktion, Entwicklung und Morphologie von Pflanzenwurzeln

Höhere Pflanzen wie die Samenpflanzen (Spermatophyten) und die Farne (Pteridophyten) besitzen neben Laubblatt und Sprossachse die Wurzel als drittes wichtiges Organ (vgl. KAUSSMANN & SCHIEWER 1989). Die Hauptaufgaben der Wurzeln sind die Wasser- und Mineralstoffaufnahme, die Leitung des Wassers und der Mineralstoffe in den Sprossteil, sowie die Speicherung dieser (vgl. KUTSCHERA 1960). Neben diesen Funktionen hat eine Wurzel noch eine andere ökologisch wichtige Funktion. Durch Absterbeprozesse und die Absonderung von Substanzen durch die lebende Wurzel (Exsudation) gehen Teile der Wurzelmasse verloren und tragen zur Bildung der organischen Bodensubstanz bei (vgl. GISI et al. 1997).

Die Wurzelentwicklung zeichnet sich dadurch aus, dass als erstes Organ bei der Keimung eines Samens die Keimwurzel austritt, welche die Jungpflanze mit Nährionen und Wasser versorgt (vgl. GISI et al. 1997). Dabei wächst die Keimwurzel senkrecht in den Boden (vgl. LIEBEREI & REISDORFF 2007). Der Längsaufbau einer Wurzel gliedert sich nach GISI et al. (1997) in sechs Zonen (vgl. Abbildung 1). Den Abschluss einer Wurzel bildet die Wurzelhaube, die den Wurzelvegetationspunkt bedeckt. Darauf folgt die Zellteilungszone, welche die höchste Zellteilungsaktivität aufweist und die von der Streckungszone abgelöst wird. Es folgt eine Differenzierungszone an die sich die Wurzelhaarzone anschließt. Über die Wurzelhaare erfolgt die Stoffaufnahme. Sie können die Wurzeloberfläche um das Zwölfwache vergrößern und somit die Wasseraufnahme erhöhen. Wurzelhaare haben einen Durchmesser von 5 µm bis 20 µm (vgl. GISI et al. 1997), welche nach KUTSCHERA

(1960) nach wenigen Tagen absterben und daher nur bei den jüngsten Wurzelenden zu beobachten sind. Ausnahmen bilden einzelne Pflanzenarten (z. B. Winterweizen), die in der Lage sind, Wurzelhaare unter bestimmten Bedingungen länger zu erhalten (vgl. KUTSCHERA 1960). Wurzelverzweigungen, so genannte Seitenwurzeln, treten erst oberhalb dieser 6 Zonen auf (vgl. LIEBEREI & REISDORFF 2007).

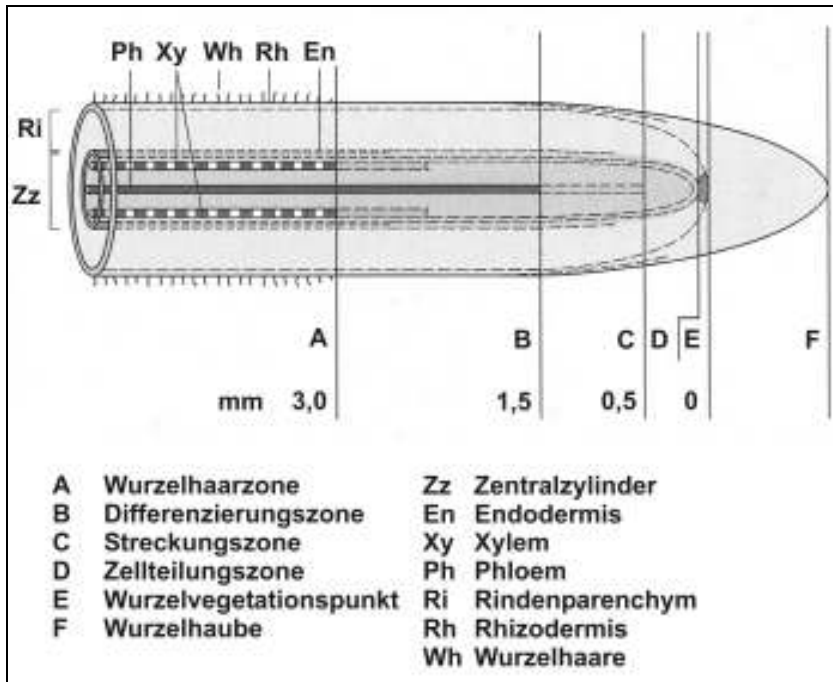


Abbildung 1: Längsschnitt durch eine Wurzelspitze mit Wurzelhaarzone
(Gisi et al. 1997)

Ein ausgedehntes Wurzelwerk entsteht, indem sich die Hauptwurzel in primäre und sekundäre Seitenwurzeln verzweigt (vgl. GISI et al. 1997). Ausgehend von der Reihenfolge der Entstehung direkt an der Hauptwurzel und deren Verzweigungen unterscheidet man nach Seitenwurzeln 1. bis n. Ordnung (vgl. KUTSCHERA 1960). Divergenzen im Wasser-, Luft- und Nährstoffgehalt sowie unterschiedliche Bodenporositäten bzw. -dichten führen zu unterschiedlicher Durchwurzelungstiefe des Bodens derselben Pflanzenarten an unterschiedlichen Standorten. Der Hauptwurzelraum erstreckt sich meistens bis in 1 m Tiefe. Ein Wurzeltiefenwachstum bis in größere Bodentiefen ist abhängig vom Bodentyp. Dieser Bereich des Bodens wird als Nebenwurzelraum bezeichnet. Das gesamte Bodenvolumen wird dabei nach GISI et al. (1997) lediglich zu 5 % bis 10 % besiedelt, obwohl eine Einzelpflanze bis zu mehreren Millionen wachsender Wurzelspitzen besitzen kann. In einem Liter Boden beträgt die gesamte Wurzellänge bis zu 3000 m und die gesamte Wurzeloberfläche 3 m² (vgl. GISI et al. 1997).

Die Morphologie der Wurzel ist den Umweltbedingungen und der genetischen Veranlagung geschuldet (vgl. BIRKEL 1990) und kann auch zwischen den einzelnen Sorten einer Kulturpflanze variieren. Das Wurzelnetz ist nach HELLRIEGEL (1886) (zitiert in

PISTOHLKORS 1898) deshalb kein verworrenes Netz, das ohne Gesetzmäßigkeiten aufgebaut ist. Als Umweltbedingungen sind in dieser Arbeit die Bodenverhältnisse zu verstehen. Diese lassen sich durch die Bodenart, aber auch durch die Lagerungsdichte, Eindringwiderstand, Porengröße, Porengrößenverteilung, Luftkapazität, Luftdurchlässigkeit, Aggregatgröße und -dichte, Bodenrisse, Bioporen, biologische Aktivität, Bodendurchlüftung, Sauerstoff- und Kohlendioxid-Gehalt, sowie Bodenwassergehalt und Wasserspannung charakterisieren (vgl. BIRKEL 1990). Die Bodenbearbeitung wirkt auf einige dieser bodenkundliche Parameter besonders ein. So kann durch ein verändertes ackerbauliches Management, wie der pfluglosen Bodenbearbeitung, oder mit einer ökologischen Anbauvariante Einfluss auf diese Bodenparameter genommen werden. Nach MÜLLER (1985) kommt es durch ausgeübten Druck durch Maschinen und Fahrzeuge zu einer Verdichtung des Bodens und damit verbunden zu einer starken Grobporenvolumenabnahme. Die Verwendung von Eggen und Fräsen als Bearbeitungsmethode führt nach BIRKEL (1990) zu wesentlich geringeren Verdichtungseffekten. Zu erwähnen wäre auch die Direktsaat, bei der der Boden nach der vorangegangenen Ernte ohne Bearbeitung neu bestellt wird (vgl. BELVINS et al. 1984) und Verdichtungseffekte ebenfalls reduziert werden. Schon geringe Veränderungen der Lagerungsdichte und dem damit verbundenen höheren Eindringwiderstand führen zu einer starken Reduzierung des Längenwachstums von Wurzeln (vgl. RUSSELL & GOSS 1974).

Die Wurzelentwicklung bei der Keimung ist bei jenen Pflanzen besonders stark, die Samen mit großen Vorräten an organischen Nährstoffen besitzen, welche für das Wurzelwachstum erforderlich sind. Deshalb ist in vielen Fällen das Wurzelwachstum zu Beginn der vegetativen Phase am größten, wohingegen das Sprosswachstum erst in einer späteren Entwicklungsphase zu einem Maximum kommt. Diese Eigenschaft ist sowohl für die Massenentwicklung der Wurzeln als auch für deren Tiefen- und Seitenausdehnung zutreffend (vgl. KUTSCHERA 1960). Die Autorin beschreibt weiterhin, dass in der Regel zu Beginn der Blüte die Wurzelmasse absolut am größten ist. Die Wurzelmasse nimmt mit verstärkter Ausbildung von Früchten und Blüten zunehmend ab. In dieser Entwicklungsphase kann der Wurzelabbau durch den Wurzelzuwachs nicht mehr ausgeglichen werden. Grund dafür ist nach KUTSCHERA (1960), dass oberirdisch neu gebildete Kohlenwasserstoffe zum größten Teil zum Aufbau der Früchte und Blüten verbraucht werden und nicht mehr zum Wurzelsystem gelangen.

2.1.2 Entwicklung und Morphologie der Winterweizenwurzeln

Auf Grund der unterschiedlichen Entwicklung und Morphologie der Wurzeln der einzelnen Pflanzenarten wird nun näher auf das Beobachtungsobjekt dieser Arbeit, den Winterweizen, eingegangen. Weizen (*Triticum* L.) zählt neben Mais und Reis zu den

weltweit wichtigsten Kulturpflanzen, die der Mensch als Nahrungsgrundlage nutzt (vgl. ZELLER & HSAM 2004). Vor allem der Saatweizen (*Triticum aestivum* L.) steht mit einem Anteil von 90 % des Weltweizenanbaus im Vordergrund. Dieser wird zum großen Teil in den gemäßigten Zonen, aber auch in den Subtropen angebaut (vgl. LIEBEREI & REISDORF 2007). Weizen gehört zur Familie der Süßgräser (vgl. Tabelle 1) und ist eine annuelle Pflanze, die im Herbst in Form von Winterweizen oder im Frühjahr in Form von Sommerweizen gesät wird. Winterweizen hat den Vorteil widerstandsfähiger gegenüber Kälte zu sein und kann Temperaturen bis -22 °C vertagen. Außerdem begünstigt diese so genannte Vernalisierung, dass der Winterweizen in der Wärmeperiode früher reift (vgl. JAENICKE 2002). Schwere und nährstoffreiche Böden wie z. B. Schwarzerde und Lehm Böden sind nach LIEBEREI & REISDORF (2007) sehr geeignet für den Anbau.

Abteilung	Samenpflanzen (Spermatophyta)
Unterabteilung	Bedecktsamige Pflanzen (Angiospermae)
Klasse	Einkeimblättrige (Monocotyledonae)
Ordnung	Graminales (Glumiflorae)
Familie	Süßgräser (Poaceae)

Tabelle 1: Botanische Einordnung der Getreidearten
(SEIBEL 2005)

Um die phänologischen Entwicklungsstadien des Winterweizens zu charakterisieren, wird die BBCH-Skala angewandt. Diese Skala basiert auf einer einheitlichen Codierung gleicher phänologischer Entwicklungsstadien bei verschiedenen Pflanzen (vgl. MEIER 2001). Durch diese Skala wird es möglich, in unterschiedlichen wissenschaftlichen Disziplinen, die sich mit der Pflanzenforschung beschäftigen, auf einheitliche Begrifflichkeiten zurückgreifen zu können. Auch in der landwirtschaftlichen Praxis findet die BBCH-Skala beispielsweise bei der Festlegung von Terminen zur Düngung Anwendung. Aufgebaut ist die Skala aus längeren, gegenseitig abgrenzbaren Entwicklungsphasen (Makrostadien), welche die aufsteigenden Ziffern 0 (Keimung) bis 9 (Absterben) der Pflanze umfassen und in Mikrostadien, die jedes Makrostadium noch mal von 0 bis 9 unterteilt. Mit Hilfe der Mikrostadien können genauere Angaben zum Zeitpunkt der Pflanzenentwicklung gegeben werden. Die Kombination aus Code des Makrostadiums und Code des Mikrostadiums ergibt einen zweistelligen Code (siehe Tabelle 2).

2.1 Wurzeln

Makrostadium	BBCH Stadium	Beschreibung
0 Keimung	00	Trockener Samen
	01-03	Samenquellung
	05	Keimwurzel aus dem Samen ausgetreten
	06	Keimwurzel streckt sich, Wurzelhaare und/oder Seitenwurzeln sichtbar
	09	Auflaufen
1 Blattentwicklung	10	Blatt spitzen
	11	1. Blatt entfaltet
	12	2. Blatt entfaltet
	1.	Stadien fortlaufend bis ...
	19	9 und mehr Laubblätter entfaltet
2 Bestockung	21	1. Bestockungstrieb sichtbar
	22	2. Bestockungstrieb sichtbar
	23	3. Bestockungstrieb sichtbar usw.
3 Schossen (Haupttrieb)	30	Haupttriebe beginnen sich zu strecken
	31	1-Knotenstadium
	32-34	2-Knotenstadium usw.
	37	Erscheinen des letzten Blattes (Fahnenblatt)
4 Ährenscheiden	45	Blattscheide geschwollen
	49	Grannenspitzen
5 Ährenschieben	51	Beginn Ährenschieben
	59	Ende Ährenschieben
6 Blüte	61	Beginn der Blüte
	65	Mitte der Blüte
	69	Ende der Blüte
7 Fruchtbildung	71	Beginn Kornbildung
	75	Mitte Milchreife
8 Reife	85	Teigreife
	87	Gelbreife
	89	Vollreife
9 Absterben	92	Totreife
	97	Pflanze abgestorben

Tabelle 2: BBCH Entwicklungsstadien des Getreides
(LANDWIRTSCHAFTSKAMMER NORDRHEIN-WESTFALEN 2008, MEIER 2001)

Der Winterweizen besitzt nach WEAVER (1926) (zitiert in KUTSCHERA 1960) vorwiegend drei bis sieben Keimwurzeln (vgl. KUTSCHERA 1960) und ebenfalls mehrere sprossbürtige Wurzeln. Bei der Wurzelentwicklung ist die Keimwurzel zu Beginn stark vorwüchsig. Die

Wuchsrichtung ist senkrecht nach unten. Mit einer anfangs seitwärts gerichteten dann später bogenförmig nach unten strebenden Ausbreitung folgen dann die übrigen Keimwurzeln (vgl. Abbildung 3 A). Die Keimwurzeln bleiben bis zur Reife (Makrostadium 8) erhalten und verzweigen sich in Seitenwurzeln 2., 3. und vereinzelt auch 4. Ordnung. Die sprossbürtigen Wurzeln sind zum Großteil nach unten gerichtet, durchwurzeln meistens den Boden nicht so tief wie die Keimwurzeln und verzweigen sich zahlreich in 1., teilweise in 2., aber selten in höherer Ordnung. Wurzelhaare kommen beim Winterweizen sehr zahlreich vor und können vornehmlich auf trockenen Standorten bis zu zehn Wochen überleben (vgl. WEAVER 1925, zitiert in KUTSCHERA 1960). Die lange Lebensdauer und die damit verbundene hohe Anzahl der Wurzelhaare ermöglicht dem Winterweizen größere Mengen des begrenzten Wassers des Bodens aufzunehmen. Die Weizenwurzel weist eine weißliche bis graubraune Farbe auf (vgl. KUTSCHERA 1960). In Abbildung 2 lässt sich erkennen, dass unterschiedliche Bodenarten und Klimate Einfluss auf die Wuchstiefe der Winterweizenwurzeln haben. Die Wurzeltiefen wurden durch verschiedene Autoren ermittelt und von KUTSCHERA (1960) zusammengestellt. Sie schwanken zwischen 75 cm (ohne Angabe der Bodenart und des Standortes) (vgl. KRAUS 1914 zitiert in KUTSCHERA 1960) und 222 cm auf Schlufflehm in Lincoln (Nebraska, USA) (vgl. WEAVER 1926, zitiert in KUTSCHERA 1960). Unterschiedliche Eindringwiderstände und eine unterschiedliche potenzielle Durchwurzelbarkeit des Bodens können dafür ausschlaggebend sein. Daraus wird ersichtlich, dass eine Untersuchung zum Wurzelwachstum nicht ohne weiteres von einem Standort auf andere Standorte übertragen werden kann, sondern jeweils für bestimmte Bodenarten und Klimate separat vorgenommen werden muss.

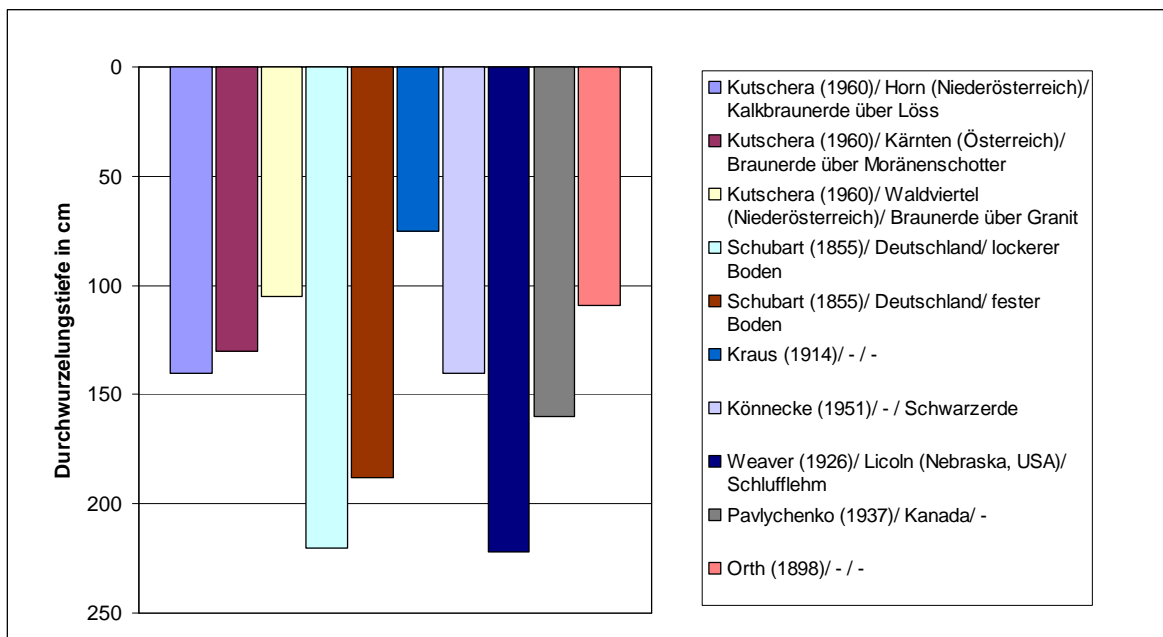


Abbildung 2: Vergleich der ermittelten Durchwurzelungstiefen des Winterweizens verschiedener Autoren auf unterschiedlichen Standorten

(Datengrundlage: Kutschera 1960)

Wie schon in Kapitel 2.1.1 beschrieben, ist das Wurzelwachstum bei einigen Pflanzen zu Beginn der vegetativen Phase am größten und dem des Sprosses vorausseilend. Analog dazu verhält sich der Winterweizen. Laut KUTSCHERA (1960) kann die längste Keimwurzel vor Beginn der Winterruhe bereits $\frac{2}{3}$ der größten Wurzeltiefe des reifen Wurzelsystems erreichen. Dies wird ebenfalls von WEAVER (1926) (zitiert in KUTSCHERA 1960) untermauert, der im Raum von Lincoln (Nebraska, USA) eine Wurzeltiefe von 115 cm bei einer 55 Tage alten Winterweizenpflanze vorfand. Der Spross hingegen hatte zu diesem Zeitpunkt erst eine Höhe von 7,6 cm erreicht. In Abbildung 3 ist in A ein Wurzelsystem dargestellt, das kurz nach der Winterruhe freigelegt wurde. Das Wurzelsystem hat zu diesem Zeitpunkt bereits $\frac{2}{3}$ der Tiefe des Wurzelsystems einer milchreifen Winterweizenpflanze (Makrostadium 7), die in Abbildung 3 B dargestellt ist, erreicht. Beide Pflanzen in Abbildung 3 A und B stammen von der gleichen Saat und wurden auf sich räumlich eng nebeneinander befindlichen Bodenstellen freigelegt. Die Sprosshöhe beträgt in Abbildung 3 A 7 cm und die Jungpflanze hat eine Wurzeltiefe von 120 cm. In Abbildung 3 B erreicht die Pflanze eine Wuchshöhe von 130 cm und wurzelt bis in 178,5 cm Tiefe. Die Entwicklung des Winterweizens von Abbildung 3 A zu Abbildung 3 B lässt nach KUTSCHERA (1960) erkennen, dass die Anzahl der sprossbürtigen Wurzeln sowie deren Tiefenstreben sehr zugenommen hat. Die seitliche Ausdehnung des Wurzelsystems ist hingegen nur um ca. 26 % und die vertikale Durchwurzelung um ca. 30 % angestiegen. Die Winterweizenwurzeln nehmen frühzeitig den größten Teils ihres Lebensraums ein und erschließen ihn daraufhin ergiebig. Grund dafür ist nach KUTSCHERA (1960) die Notwendigkeit der Pflanze zu überwintern und auch im zeitigen Frühjahr gegenüber Frost widerstandsfähig zu sein.

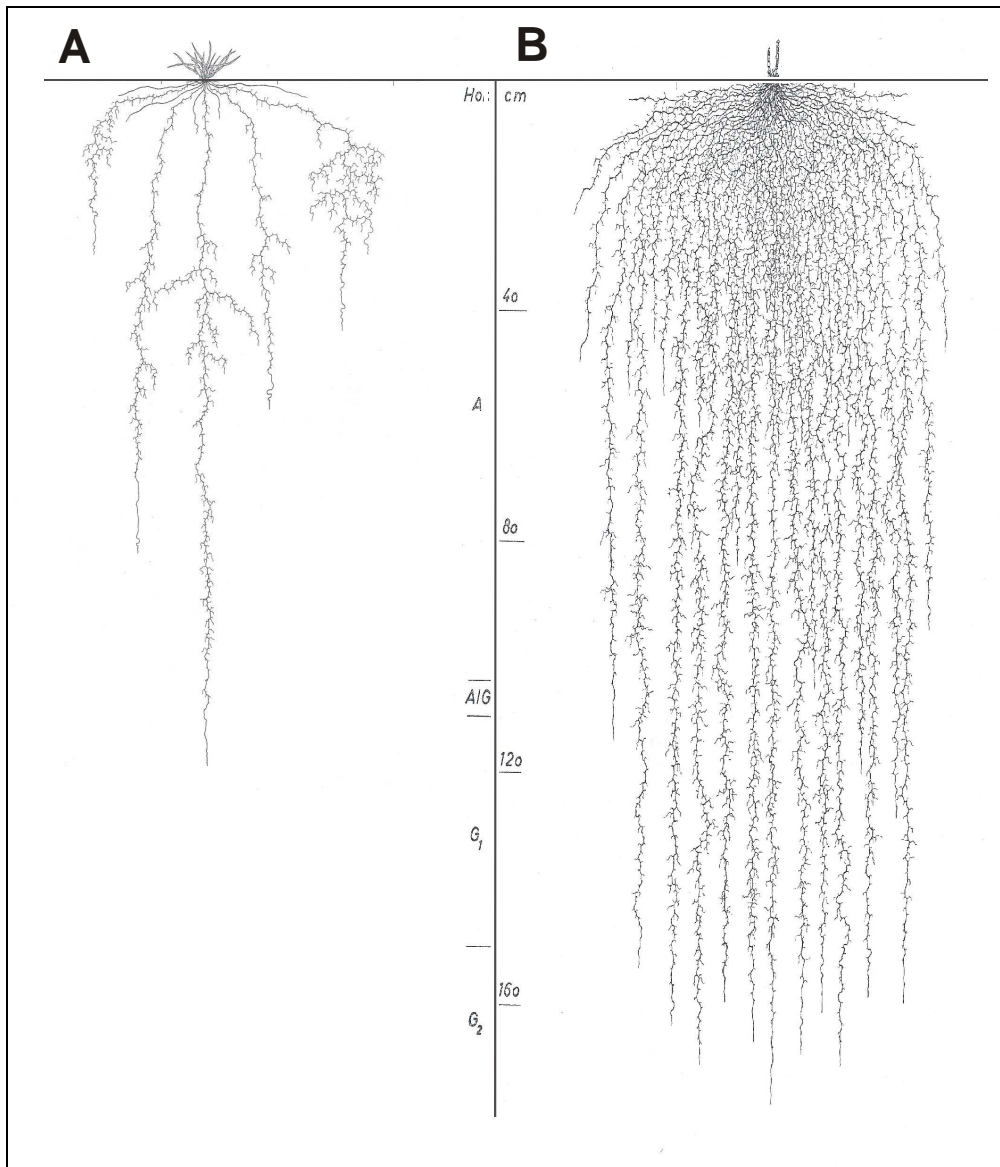


Abbildung 3: Wurzelentwicklung des Winterweizens
(KUTSCHERA 1960)

2.2 Kohlenstoffeintrag über Wurzelrückstände

Kohlenstoff, der im Boden vorhanden ist, spielt nach FRANKO (1997) eine grundlegende Rolle in Agrarökosystemen. Dies bezieht sich vor allem auf die Bedeutung für die organische Bodensubstanz. Wichtige Bodeneigenschaften wie z. B. Wasserspeichervermögen, Porenvolumen, Adsorptionsverhalten und Lagerungsdichte sowie Nährstofftransformationen innerhalb des Bodens werden durch den organischen Kohlenstoff beeinflusst. Beim Kohlenstoffumsatz kommt es in der organischen Bodensubstanz zu Mineralisierungsprozessen. Die Verfügbarkeit von Stickstoff als weiterer essentieller Pflanzennährstoff ist davon abhängig. Hauptsächlich verantwortlich für den Kohlenstoffeintrag in die Böden sind, mit bis zu 60 % nach KLIMANEK & ZWIERS (1990), die Reste von Ernte- und Wurzelrückständen, die somit auch Hauptquelle der Böden für die Versorgung

mit organischer Substanz sind. Als Bestandteile der Ernte- und Wurzelrückstände sind vor allem die Stoppel und die Wurzel zu nennen. Bei der Wurzel besteht die Stoffabgabe aus toten Pflanzenzellen und organischen Stoffen, die durch Ausscheidung lebender Wurzelzellen freigesetzt werden (vgl. Abbildung 4).

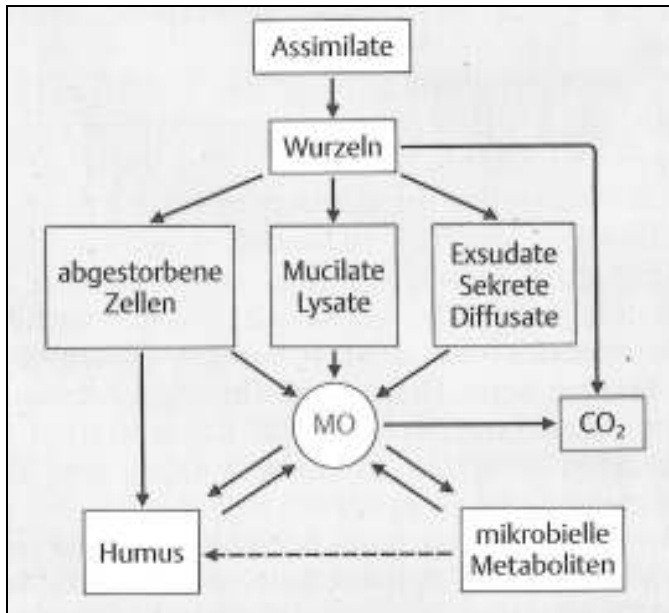


Abbildung 4: Abgabe von Kohlenstoffverbindungen durch die Wurzel im Boden und deren Umwandlung
(Gisi et al. 1997)

Während des Wachstums werden die toten Pflanzenzellen durch Zellabstoßung gebildet. Beispiele für solche Zellen sind die Wurzelhaubenzellen und Seitenwurzelzellen. Bei den Ausscheidungsprodukten sind unter anderem die Exsudate und Diffusate zu nennen. Abbildung 4 zeigt einen Überblick über alle Kohlenstoffverbindungen, die durch die Wurzel im Boden abgegeben werden. Einerseits wird durch die Wurzel Kohlendioxid (CO_2) direkt abgegeben. Auf der anderen Seite werden abgestorbene Zellen und andere Wurzelsubstanzen durch Mikroorganismen (MO) in Humus und CO_2 umgewandelt. Abhängig ist die Stoffabgabe der Wurzel vom Pflanzenwachstum und dadurch von allen Faktoren, die das Wachstum regulieren (vgl. Gisi et al. 1997). Die Quantitäten der Wurzelrückstände sind variabel und abhängig von Pflanzenart, Vegetationsstadium, Jahreswitterung, Bodenart und zu einem geringen Teil vom Ertrag (vgl. KÖRSCHENS & KLIMANEK 1988). Nach Gisi et al. (1997) liegt die Gesamtkohlenstoffrhizodeposition bei ca. 20 % der Pflanzentrockenmasse. Pro Jahr kann dies, abhängig von der Kulturart, bis zu 2000 kg/ha ausmachen.

2.3 Die Stellung der Wurzel im CANDY-CIPS Modellsystem

Das Modell CANDY (**C**arbon and **N**itrogen **D**ynamics) (vgl. FRANKO & OEHLISCHLÄGEL 1993) ist ein prozessorientiertes Modell zur Simulation der Kohlenstoff- und Stickstoffdynamik, des Bodenwasserhaushalts sowie der Bodentemperatur in agrarisch genutzten Systemen. Zusammen mit dem Modell CIPS (vgl. KUKA 2005) bildet es das CANDY-CIPS Modellsystem. CIPS basiert im Gegensatz zu anderen prozessorientierten Simulationsmodellen zur Beschreibung des Kohlenstoffhaushalts in Ackerböden, auf bodenstrukturabhängigen Umsatzprozessen und nutzt verschiedene Module des Modells CANDY. Der Modellansatz des CIPS Modells stützt sich auf die Hypothese, dass sich die gesamte organische Substanz im Boden am Kohlenstoffumsatz beteiligt und nur zeitweise abhängig von der Lokalisierung im Mikro-, Meso- oder Makroporenraum gegen Mineralisierung geschützt ist. Abbildung 5 verdeutlicht grafisch das Modellkonzept und zeigt die Aufteilung des Bodens in Reaktionsräume sowie den Umsatz und die Lokalisierung der organischen Substanz in den einzelnen Porenklassen. Die gesamte organische Substanz des Bodens wird im Modell in verschiedene messbare Pools aufgeteilt. Der DOM-Pool (DOM = Dissolved Organic Matter) bezeichnet den Pool der gelösten organischen Substanz durch den es möglich wird Kohlenstoff zwischen einzelnen Porenklassen auszutauschen.

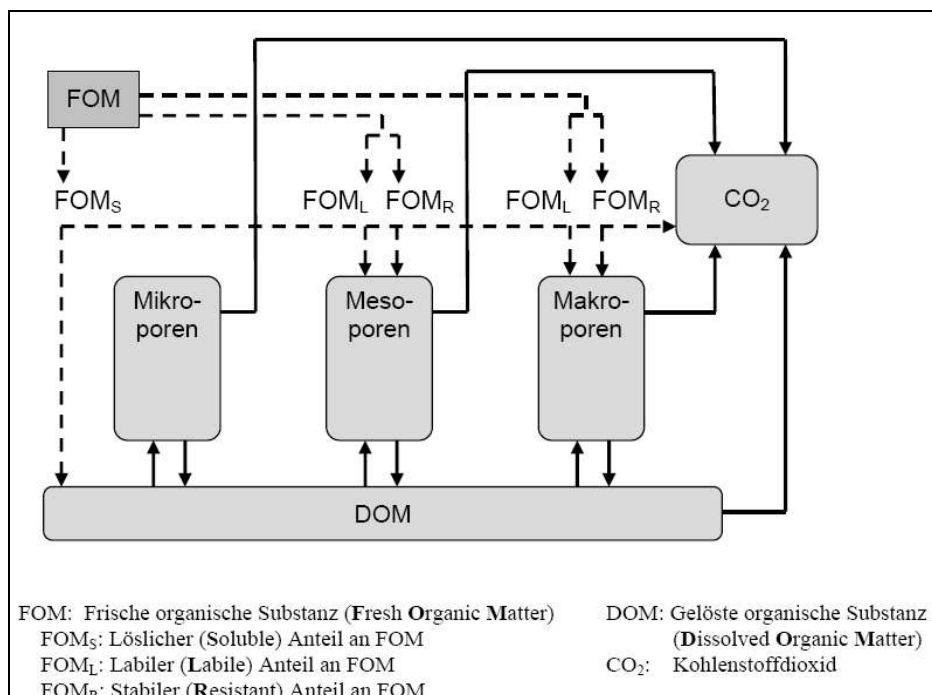


Abbildung 5: Modellstruktur von CIPS
(KUKA 2005)

Der Pool der frischen organischen Bodensubstanz (FOM = Fresh Organic Matter) beinhaltet den Kohlenstoffeintrag, der sich aus den Ernte- und Wurzelrückständen der

jeweiligen Feldfrüchte und den organischen Düngern, die auf das Feld ausgebracht werden, zusammensetzt. Unterteilt wird der FOM-Pool in einen löslichen (FOM_S), in einen labilen (FOM_L) und in einen stabilen Anteil (FOM_R). Diese Unterteilung kennzeichnet die unterschiedliche Mineralisierbarkeit (vgl. KUKA et al. 2007). Die Angaben zu den Ernte- und Wurzelrückständen der jeweiligen Feldfrüchte und den organischen Düngern stehen in Korrelation zu dünger- und fruchtartenspezifischen Kohlenstoffgehalten. Die Kohlenstoffmenge der Ernte- und Wurzelrückstände (C_{EWR}) im Speziellen wird berechnet mittels einer Gleichung (vgl. Formel 1) aus den Modellparametern k_{EWR} und F_{EWR} sowie dem Ertrag, die alle von den Fruchtarten abhängen (FRANKO 1997).

$$C_{EWR} = k_{EWR} + F_{EWR} \cdot Ertrag_{ha}$$

C_{EWR}	Kohlenstoffmenge der Ernte- und Wurzelrückstände (dt/ha)
k_{EWR}	ertragsabhängige Konstante (dt/ha)
F_{EWR}	Faktor zur Kalkulation des ertragsabhängigen Anteils von C_{EWR} (tC/dtErtrag)
$Ertrag_{ha}$	Ertrag pro Hektar (dt/ha)

Formel 1: Fruchtartenparameter zur ertragsabhängigen Berechnung der Kohlenstoffproduktion
(FRANKO 1997)

Diese Gleichung wurde von FRANKO (1997) für das Modell CANDY entwickelt. Die Fruchtartenparameter der Zuckerrübe, der Sommergerste, der Kartoffel und des Winterweizens sind beispielhaft in Tabelle 3 dargestellt. Diese vier Kulturarten entsprechen der konventionellen Fruchtfolge, die auf der für diese Arbeit relevanten Parzelle angewendet wird. Die ertragsabhängige Konstante (k_{EWR}) für Wintergetreide beträgt so zum Beispiel 4,0 dt/ha und der Faktor zur Kalkulation des ertragsabhängigen Anteils der Kohlenstoffmenge der Ernte- und Wurzelrückstände (F_{EWR}) 0,080 dtC/dtErtrag. Durch die Analyse der stofflichen Zusammensetzung und die vom Ertrag abhängige Ermittlung der Masse an Ernte- und Wurzelrückständen (vgl. KÖRSCHENS & KLIMANEK 1988) wurden diese Umsatzparameter gewonnen. Die Fruchtartenparameter wurden als Mittelwerte aller Untersuchungen bestimmt. Durch eine große Streuung um den Mittelwert besitzen diese jedoch nur einen Richtwertcharakter.

2.4 Methoden zur Quantifizierung der Rhizodeposition

Fruchtart	k_{EWR} in dt/ha	F_{EWR} in dtC/dtErtrag
Zuckerrübe	1,6	0,008
Sommergerste	3,1	0,078
Kartoffel	0,8	0,016
Wintergetreide	4,0	0,080

Tabelle 3: Fruchtartenparameter zur ertragsabhängigen Berechnung des Kohlenstoffeintrags (FRANKO 1997)

Durch die Verwendung spezieller Untersuchungsergebnisse ist eine Verbesserung der Parameter möglich. Damit kann die Aussagekraft von Simulationsuntersuchungen erhöht werden (vgl. FRANKO 1997).

2.4 Methoden zur Quantifizierung der Rhizodeposition

Von HILTNER (1904) wurde die Definition des Begriffes „Rhizosphäre“ als „Einflussphäre von Wurzeln“ erstmals auf einer Tagung der Deutschen Landwirtschaftlichen Gesellschaft bei einem Vortrag erwähnt. Seit dieser Zeit gab es viele Fortschritte in der Rhizosphärenforschung. In den letzten Jahren erlangte vor allem die Quantifizierung der Wurzelentwicklung einen höheren Stellenwert. Voraussetzung für die Ermittlung von Daten zur Quantifizierung ist das Vorhandensein geeigneter Methoden. Das Studium des in situ Wurzelwachstums stellt sich als eine schwierige Aufgabe dar. Problem ist, dass das Wurzelsystem durch die Bodenmatrix gegenüber visueller Beobachtung abgeschirmt ist. Eine direkte Beobachtung der Morphologie des auf dem Feld wachsenden Wurzelsystems wird dadurch schwierig (vgl. UPCHURCH et al. 1988). Viele der Feldmethoden sind arbeitsintensiv und haben ausgedehnte Zerstörung der Versuchsfelder zur Folge (vgl. MCMICHAEL & TAYLOR 1987). Die Methoden zur Beobachtung gehen deshalb in zwei grundsätzlich verschiedene Richtungen. Auf der einen Seite gibt es die **destruktiven Methoden** zur Datengewinnung. Bei diesen Methoden kann eine Untersuchung des Wurzelsystems nur einmal vorgenommen werden und die Pflanze wird zerstört. **Nicht-destruktive Methoden** zur Datengewinnung, wie beispielsweise die Minirhizotron-Methode, erlauben kontinuierliche in situ Beobachtungen an der lebenden Pflanze.

2.4.1 Destruktive Methoden zur Datengewinnung

Die **Monolithmethode** nach SCHUURMAN & GOEDEWAAGEN (1971) macht es möglich ein komplettes Bild der Struktur und der Gestalt eines Wurzelsystems und die totale Menge an Wurzeln zu erhalten. Eine Grube wird neben einer Pflanze ausgehoben und mit Hilfe eines Steckbrettes wird das komplette Wurzelsystem einer oder mehrerer Pflanzen samt

des umgebenden Bodens in Form eines vertikalen Monoliths entnommen. Danach wird das Wurzelsystem, welches sich weiterhin auf dem Steckbrett befindet, vom Bodenmaterial mit Hilfe von Wasser befreit und kann je nach Fragestellung weiterbearbeitet werden.

Mit Hilfe der **Bohrkernmethode** werden mittels eines Bohrers punktartig Wurzelfragmente zusammen mit Bodenmaterial vertikal aus dem Bodenprofil entnommen und anschließend ausgewaschen. Diese Methode gibt nach SCHUURMAN & GOEDEWAAGEN (1971) genaue Daten über die Wurzelmasse in jeder Bodenschicht.

Bei der **Ausgrabungsmethode** werden Metallzylinder oder -rahmen, die eine Höhe von 25 cm bis 30 cm haben, vertikal in den Oberboden eingeschlagen. Anschließend werden diese ausgegraben, die Wurzeln und das Bodenmaterial werden entnommen und im Anschluss werden die Wurzeln vom Bodenmaterial befreit. Die so erhaltenen Wurzelfragmente können wie bei der Bohrkernmethode anschließend weiter untersucht werden.

Für die **Profilwandmethode** nach OSKAMP & BATJER (1932) (zitiert in SCHUURMAN & GOEDEWAAGEN 1971) werden Gruben in bestimmter Entfernung zu einer Pflanze ausgehoben. Anschließend wird eine vertikale Fläche präpariert, die zur Pflanze gerichtet ist. Mit einem Raster aus horizontal und vertikal ausgerichteten Schnüren, die eine bestimmte Maschenweite besitzen und über die Fläche gelegt werden, können alle Wurzelenden von gekappten Wurzeln gezählt, dokumentiert, kartiert und fotografiert werden.

2.4.2 Nicht-destruktive Methoden zur Datengewinnung

SACHS (1873) (zitiert in MCMICHAEL & TAYLOR 1987) beschrieb erstmalig eine Methode, bei der die Wurzelentwicklung einer Pflanze in einer kleinen Glasbox beobachtet wird. Auf der Grundlage dieser Methode wurde die **Glaswandmethode** entwickelt, welche die Beobachtung des Wurzelwachstums unter Feldbedingungen ermöglicht. Nach ROBERTS (1976) ist das Installieren von Glasplatten oder Fenstern in einer Grube eine der einfachsten in situ Methoden um Wurzelsysteme kontinuierlich zu beobachten. Schon im frühen 20. Jahrhundert wurden in Deutschland Wurzellaboratorien, die Vorläufer der modernen **Rhizotrone**, konstruiert (vgl. BÖHM 1979). Moderne Rhizotrone bestehen nach MCMICHAEL & TAYLOR (1987) aus einem ausgehobenen Graben mit einem betonierten Gehweg zwischen zwei Bodenprofilen vor denen Glasfenster platziert werden. Der Begriff „Rhizotron“ wurde zu erst von LYFORD & WILSON (1966) benutzt. Seit dieser Zeit entstanden mehrere Rhizotrone, hauptsächlich in den USA und Kanada, die das gleiche oder ein etwas modifiziertes Design aufweisen.

Eine etwas andere Methode zur in situ Beobachtung von Wurzeln entwickelte BATES (1937). Er brachte Glasröhren, die im Inneren mit einer Lampe versehen waren, in das Wurzelsystem des Weidelgrases ein. BATES (1937) konnte damit das Wurzelsystem mit Hilfe eines Spiegels, der an einen Stab befestigt war, bis in eine Tiefe von 120 cm beobachten. Diese Methode wurde danach erst wieder von WADDINGTON (1971) in ähnlicher Weise beschrieben. In Gefäßen beleuchtete er das Innere von einer Acrylröhre mit einer Lichtquelle, die über Glasfasertechnik eingebracht wurde. Über einen Spiegel konnte das Innere der Röhre in verschiedenen Tiefen beobachtet und die beobachtete Wurzelmorphologie und -verteilung von Hand aufgezeichnet werden. Der Begriff „*Minirhizotron*“ wurde dann erstmalig von BÖHM (1974) als Beobachtungsmethode für das Wurzelwachstum hinter transparenten Röhren, die ins Erdreich eingebracht wurden, geprägt. BÖHM (1974) nutzte eine 150 cm lange Glasröhre, auf die horizontale und vertikale Linien geätzt waren. Diese Gitterfelder erleichterten bei der Feldarbeit die Beobachtung der Wurzelentwicklung und der Verteilung der Pflanzenwurzeln mit Hilfe eines Spiegels sowie einer batteriebetriebenen Lichtquelle, die an einem Stab montiert war. BÖHM et al. (1977) veröffentlichten als Erste eine Arbeit, bei der die Minirhizotron-Methode mit anderen Methoden zur Wurzelbeobachtung verglichen wurde. Die Verfeinerung und Weiterentwicklung der Methode ging unterdessen weiter. Der Stab wurde durch Endoskope (vgl. VOS & GROENWOLD 1983) oder das Duodenoskop nach SANDERS & BROWN (1978) abgelöst. SANDERS & BROWN (1978) fotografierten die Wurzeln durch transparente Röhren auf dem Feld innerhalb des Bodenprofils mit einer analogen 35 mm Kamera. Einen Schritt weiter gingen dann UPCHURCH & RITCHIE (1983), welche ein starres Endoskop mit einer Videokamera versahen und so Wurzelbilder auf einem Videoband festhalten konnten. Mit dem Einzug der Digitalfotografie in jüngster Vergangenheit konnten nach ERZ (2006) die möglichen Verluste der analogen Speicherung der Bilder vermieden werden. Nun war es möglich große Datenmengen aufzunehmen und im Anschluss computergestützt auszuwerten. ERZ (2006) entwickelte ein computergestütztes Verfahren, welches ermöglicht soll automatisch oder halb-automatisch Wurzelprojektionen in Minirhizotron-Bildern zu erkennen. Diese Methode hat nach VAN NOORDWIJK et al. (1985) den Vorteil häufige und reproduzierbare Wurzelbeobachtung unter natürlichen Bedingungen zu ermöglichen.

Die Anwendung und Weiterentwicklung der verschiedenen Methoden führte zu immer neuen Kenntnisgewinnen im Bereich der Rhizosphärenforschung. Anzuführen sind zum Beispiel gewonnene Erkenntnisse zur Quantifizierung der Infektion eines Wurzelsystems mit Mykorrhiza oder Pilzen (vgl. MAJDI & NYLUND 1996) oder zu Wurzeigenschaften wie Wachstumsrate, Verzweigung, Lebensdauer und dem Vorhandensein von Wurzelhaaren (vgl. SMIT et al. 2000). Trotzdem ist es nötig weiterhin die Methodenentwicklung und

Methodenverbesserung voran zu treiben um beispielsweise detailliertere Erkenntnisse zur Aufnahme von Wasser und Nährstoffen durch Wurzeln und deren Funktion im natürlichen Milieu des Bodens zu erlangen (vgl. SMIT et al. 2000).

2.5 Quantifizierung der Rhizodeposition - Stand der Forschung

BÖHM (1979) stellte fest, dass zur damaligen Zeit mit ca. 10.000 Veröffentlichungen zur Wurzelökologie relativ wenig Literatur vorhanden war, da im Gegensatz dazu wesentlich mehr Veröffentlichungen über oberirdische Pflanzenteile existierten. Viele der bis dahin ermittelten Informationen zum Wurzelwachstum wurden zufällig aus Studien mit anderen Forschungsfragen ermittelt. BÖHM (1979) prophezeite damals, dass sich das Hauptforschungsfeld mehr auf die Erlangung von quantitativen Daten bezüglich des Wurzelsystems fokussieren wird. Auch für die Ermittlung und das Wissen über die totale Biomasseproduktion von Pflanzen wären aus seiner damaligen Sicht mehr Daten über die Wurzelmasse nötig.

In der jüngeren Vergangenheit beschäftigten sich Wurzelstudien vorwiegend mit der Morphologie, den Formen des Wurzelsystems, der vertikalen Streuung und der Durchwurzelungstiefe (vgl. VOGT & PERSSON 1991). Frühe Studien zur Wurzeldynamik verfehlten es grundsätzlich zu charakterisieren, wann und wo das Wurzelwachstum stattfindet (vgl. PERSSON 1990). Veröffentlichte Daten von frühen Wurzeluntersuchungen hatten noch weitere Limitierungen. Unter anderem wurde in der Vergangenheit die Feinwurzelbiomasse inklusive des Anteils der toten Wurzeln nicht ermittelt. Erst ab den 1970er Jahren wurden die Wurzelstudien systematischer und bezogen sich mehr auf eine Ökosystembasis, die auch Dynamiken im Feinwurzelbereich umfasste (vgl. PERSSON 1990). Besonders hervorzuheben ist die Anwendung und Weiterentwicklung der Minirhizotron-Methode.

Durch die Vielzahl der verschiedenen vorhandenen Methoden kam es dazu, dass viele Autoren Arbeiten verfassten, in denen einzelne Methoden und deren Ergebnisse miteinander verglichen wurden. Beispiele für solche Arbeiten sind unter anderem BÖHM et al. (1977), BRAGG et al. (1983), MCMICHAEL & TAYLOR (1987), MAJDI et al. (1992), VOLKMAR (1993), BOX & RAMSEUR (1993), SAMSON & SINCLAIR (1994), KÜCKE et al. (1995), EPHRATH et al. (1999), JOSE et al. (2001) und MACHADO & OLIVEIRA (2003). Die Methodenvergleiche werden nach HEERAMAN & JUMA (1993) als eine Notwendigkeit angesehen um ältere Methoden mit neueren zu vergleichen. Teilweise ist bei diesen Untersuchungen nicht die Dynamik der quantitativen Daten über einen bestimmten Beobachtungszeitraum mit einbezogen worden, sondern es wurde lediglich der Vergleich

der Daten für einen Beobachtungstermin gemacht (vgl. MACHADO & OLIVEIRA 2003, HEERAMAN & JUMA 1993, JOSE et al. 2001).

Die Ergebnisse der Methodenvergleiche gehen auseinander. BOX & RAMSEUR (1993) berichten beispielsweise von einer linearen Beziehung zwischen Daten, die aus Bohrkernen ermittelt wurden (Wurzellängendichte oder Wurzelrockengewicht) und Minirhizotron-Daten (Wurzellänge oder Wurzelanzahl pro Flächeneinheit). Mehrere Arbeiten beschreiben eine Unterschätzung der Wurzelkenngrößen, die mit Hilfe der Minirhizotron-Technik ermittelt wurden, im oberen Bodenbereich, verglichen mit der Wurzellängendichte, die mit Hilfe der Bohrkernmethode bestimmt wurde (vgl. EPHRATH et al. 1999, HEERAMAN & JUMA 1993, MAJDI et al. 1992). Diese Studien zeigen auch eine bessere Übereinstimmung der beiden Methoden im tieferen Bodenbereich. Festzustellen ist bei einigen bisherigen Arbeiten, dass Messungen mit zwei (vgl. BRAGG et al. 1983, SAMSON & SINCLAIR 1994), drei (vgl. VOLKMAR 1993), vier (vgl. BOX & RAMSEUR 1993) oder fünf (vgl. EPHRATH et al. 1999) Aufnahmen von Minirhizotron-Bildern in der Vegetationsperiode vorgenommen wurden. Häufig wurden Minirhizotron-Röhren horizontal (vgl. VOLKMAR 1993, BÖHM et al. 1977, JOSE et al. 2001), mit einem Winkel von 30 ° (vgl. BOX & RAMSEUR 1993, SAMSON & SINCLAIR 1994) oder mit einem Winkel von 45 ° (vgl. MAJDI et al. 1992) in den Boden eingebracht.

Das Wissen über Dynamiken des Wurzelsystems ist sehr stark von der Entwicklung leistungsfähiger Methoden abhängig. Während sich bis in die 1970er Jahre sehr viele Arbeiten mit der grundsätzlichen Entwicklung und dem Test von Methoden befassten, wird seitdem vornehmlich versucht die Methoden mit einander zu vergleichen, aber auch real anzuwenden. Besonders die Minirhizotron-Technik ist aus der Erforschung zur Quantifizierung der Rhizodeposition nicht mehr wegzudenken. Der größte Teil der bisher mit der Minirhizotron-Technik ermittelten quantitativen Daten beschränkt sich auf Daten zur Wurzelanzahl (vgl. u.a. MACHADO & OLIVEIRA 2003, EPHRATH et al. 1999, BOX & RAMSEUR 1993) Wurzellänge (vgl. u.a. MACHADO & OLIVEIRA 2003, BOX & RAMSEUR 1993, HEERAMAN & JUMA 1993, MAJDI et al. 1992) und zur Wurzellängendichte (vgl. u.a. HEERAMAN & JUMA 1993, MAJDI et al. 1992, SAMSON & SINCLAIR 1994). Vereinzelt findet sich in der Literatur auch die Ermittlung anderer Daten, wie zur Wurzeloberfläche (vgl. JOSE et al. 2001).

Es zeigt sich, dass ein Bedarf besteht die Forschung auf diesem Gebiet weiter voranzubringen, um notwendige quantitative Wurzeldata für neue Forschungsfragen zu ermitteln. Einen entscheidenden Beitrag kann dazu die Weiterentwicklung und Verbesserung der Methodik liefern. Vor allem eine Verringerung des Arbeitsaufwandes und

Zeitbedarfs zur Ermittlung der Daten sowie eine Verbesserung der Ergebnisqualität sind in diesem Zusammenhang zu nennen.

3 Untersuchungsgebiet und Methoden

In diesem Abschnitt wird das Untersuchungsgebiet vorgestellt sowie eine Beschreibung der verwendeten Methoden vorgenommen. Im Detail werden Einzelheiten zum Versuchsstandort, wie bodenkundliche und klimatische Standortbedingungen, und zum Versuchsaufbau erläutert. Den methodischen Grundaufbau der Untersuchungen veranschaulicht Abbildung 6. Als nicht-destruktive Methode zur Datengewinnung wird auf der einen Seite die Minirhizotron-Methode mit daran anschließender computergestützter Auswertung der Minirhizotron-Bilder vorgenommen. Für die Auswertung finden die beiden Programme WinRHIZO Tron MF und das von ERZ (2006) entwickelte MiRIA Anwendung. Auf der anderen Seite wird als destruktive Methode zur Gewinnung von Referenzwerten die Bohrkernmethode nach SCHUURMAN & GOEDEWAAGEN (1971) angewendet. Abschließend fließen die ermittelten Daten des destruktiven und nicht-destruktiven Methodenteils gemeinsam in die Quantifizierung der Rhizodeposition ein.

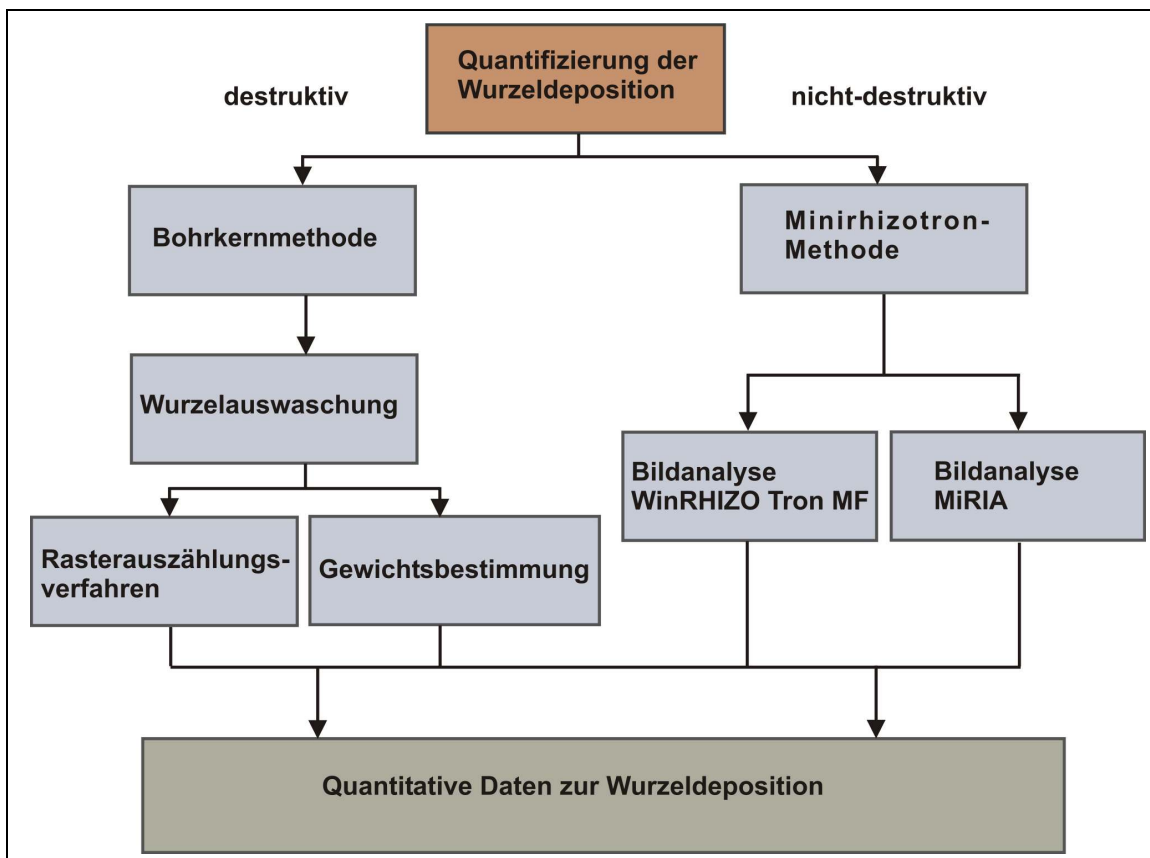


Abbildung 6: Methodischer Ansatz zur Ermittlung quantitativer Daten zur Rhizodeposition

3.1 Die Lehr- und Versuchsstation Bad Lauchstädt

Die Untersuchungen für diese Arbeit wurden südlich von Halle/Saale in der Lehr- und Versuchsstation Bad Lauchstädt durchgeführt. Der Statische Düngungsversuch auf dem Gelände dieser Anlage wurde 1902 angelegt. Weitere Untersuchungen finden auf einem Spurengasmessfeld und auf einem Intensivmessfeld statt. Insgesamt werden jährlich auf 25 ha bis 30 ha Versuche durchgeführt (vgl. INSTITUT FÜR ACKER- UND PFLANZENBAU MLU HALLE-WITTENBERG 2005).

Das Intensivmessfeld, das sich in drei Abschnitte teilt, wurde 1997 speziell zur Sammlung von Daten zur Pflanzenentwicklung, zur Stickstoff-Aufnahme unter verschiedenen Nutzungsvarianten und Ertragsmengen angelegt (vgl. Abbildung 7). Außerdem werden Bodenkennwerte wie Bodentemperatur und -feuchte für die Modellierung erfasst. Eine Wetterstation ergänzt das Intensivmessfeld.

Mähwiese, Brache und Dauerstilllegung bilden die Nutzung des Abschnitts V524. Eine achtjährige Fruchtfolge des Ökolandbaus mit den Früchten Winterweizen, Wintergerste, Kartoffel, Hafer, Silomais, Dinkel, Luzerne wird im Abschnitt V522 betrieben. Dieser Abschnitt sowie der Abschnitt V521, der sich durch eine konventionelle Fruchtfolge mit den Kulturarten Zuckerrübe, Sommergerste, Kartoffel und Winterweizen in gedüngter und ungedüngter Variante auszeichnet (vgl. UFZ 2007b), beinhalten jeweils 16 Parzellen (vgl. Abbildung 7). Jede der insgesamt 32 Parzellen hat eine Ausdehnung von 11 m x 10 m. Acht dieser Parzellen werden als bodenhydrologische Messflächen (BHM) benutzt. Dies umfasst die Erfassung verschiedener Bodenparameter, wie die Messung der Bodentemperatur und -feuchte in verschiedenen Tiefen. In den Jahren 2003 und 2004 baute man vier abgedeckte und begehbare Messgruben zur Wurzelbeobachtung zwischen die BHM. Alle Untersuchungen für diese Arbeit haben auf der Parzelle 42a (BHM 4) des Abschnitts V521 stattgefunden. Diese Parzelle ist in Abbildung 7 rot markiert.

3.1 Die Lehr- und Versuchsstation Bad Lauchstädt

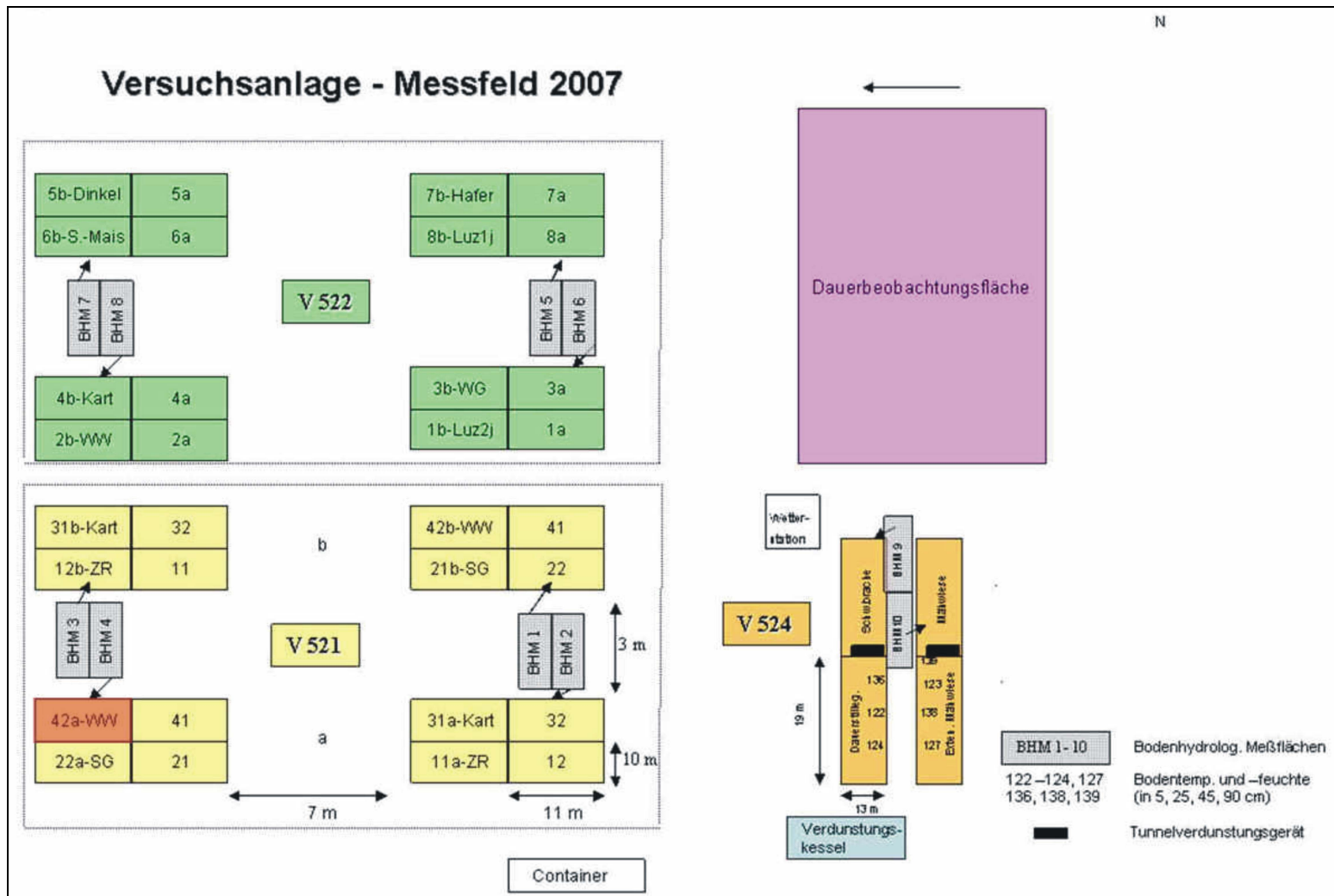


Abbildung 7: Schema der Versuchsanlage in Bad Lauchstädt 2007 (UFZ 2007b)

Durch die Messgruben war es möglich im September 2004 die acht BHM durch jeweils sieben transparente Röhren aus Zellulose-Acetat-Butyrat, die horizontal von den Messgruben aus in das Bodenprofil eingebracht wurden, zu ergänzen. Die Röhren besitzen einen Durchmesser von 5,08 cm (= 2 Zoll). Eine Röhre hat eine Länge von 182,88 cm (= 6 Fuß) wovon circa 19 cm außerhalb des Erdreiches in die Messgrube ragen. Die Röhren sind, ausgehend von der Erdoberfläche, in den Tiefen 45 cm, 60 cm, 75 cm, 90 cm, 120 cm, 150 cm und 180 cm installiert und haben einen horizontalen Abstand von jeweils 15 cm (vgl. Abbildung 8). Die obere 45 cm breite Zone ohne Röhre lässt wegen der Pflugbearbeitung eine permanente Installation von Röhren in diesem Bereich nicht zu.

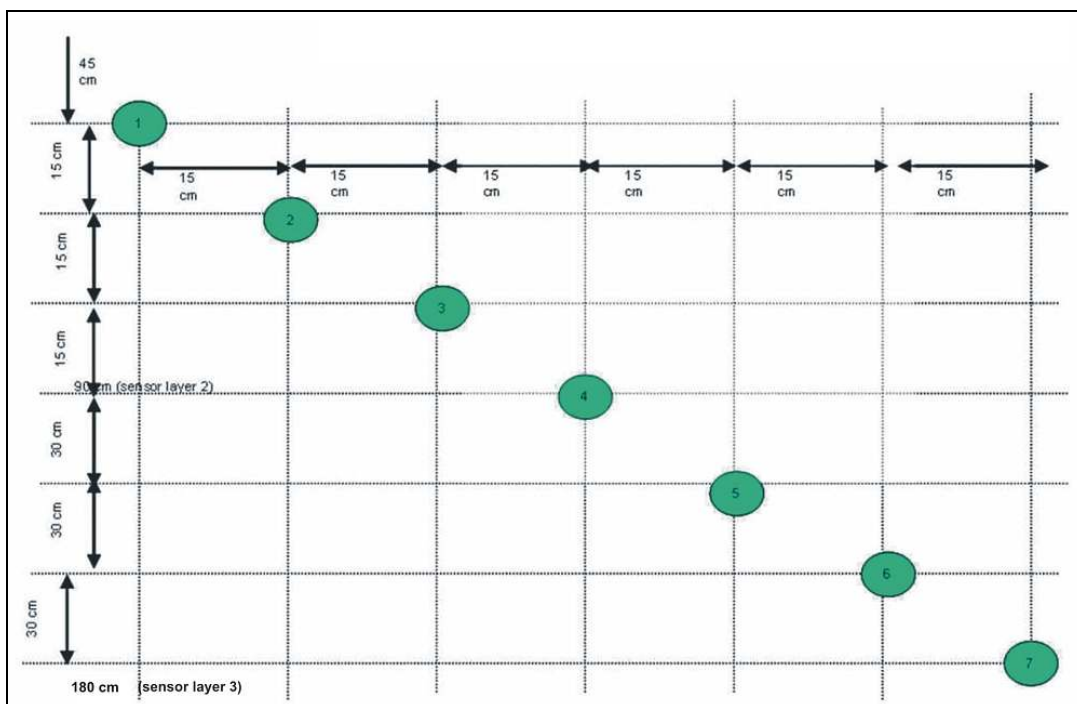


Abbildung 8: Schema des Versuchsaufbaus für die Minirhizotron-Technik (FRANKO 2006a)

3.1.1 Bodenkundliche und klimatische Standortbedingungen

Das Untersuchungsgebiet befindet sich im mitteldeutschen Löss-Schwarzerdegebiet. Der Boden zeichnet sich durch eine dunkelbraune bis schwarze Farbe bis in eine Tiefe von 55 cm aus (vgl. Abbildung 9), die durch den hohen Anteil an Humus verursacht wird. Der Substrattyp wird nach KÖRSCHENS & PFEFFERKORN (1998) als Löss beschrieben. Bis in eine Tiefe von 170 cm ist der Boden durchwurzelt. Des Weiteren weist er eine hohe Basensättigung auf, besitzt eine stabile Aggregatstruktur und ist stark geprägt von Bioturbation (vgl. ALTERMANN et al. 2005). Die Lössauflage hat insgesamt eine Mächtigkeit von 200 cm und besitzt eine hohe Wasserkapazität. Der Boden ist im durchwurzelteten Bereich in der Lage größere Wassermengen aufzunehmen als Niederschlag im

langjährigen Jahresmittel fällt. Der Standort bietet gute Bedingungen für Untersuchungen zur Stoffbilanzierung und zum Stofftransport, weil es kaum zur Auswaschung von Stoffen kommt und sich Verlagerungen und Stofftransporte ausschließlich auf das Löss-Profil beschränken (vgl. INSTITUT FÜR ACKER- UND PFLANZENBAU MLU HALLE-WITTENBERG 2003). Weitere bodenkundliche Kennwerte sind für die einzelnen Bodenhorizonte in Tabelle 4 dargestellt.

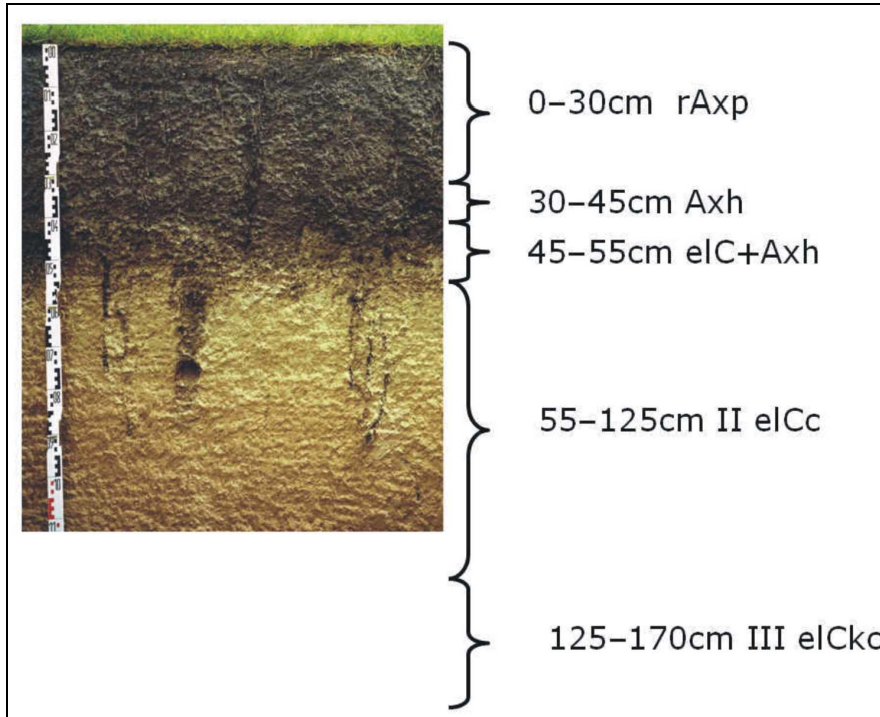


Abbildung 9: Normschwarzerde aus Löss (Ort: Bad Lauchstädt)
(ALTERMANN 2005 et al.)

Bis zu einer Tiefe von 55 cm ist der Boden nach ALTERMANN et al. 2005 sehr stark durchwurzelt. Eine mittlere Durchwurzlung findet sich im Tiefenbereich von 55 cm bis 125 cm, der nachfolgend in eine schwache und ab 125 cm in eine sehr schwache Durchwurzlung übergeht. Vergleicht man die Änderung der Durchwurzlung mit zunehmender Tiefe, lässt sich erkennen, dass diese mit der Änderung der Substrate einhergeht. Diese bestehenden Erkenntnisse können in die Ergebnisbetrachtung mit einbezogen werden.

3.1 Die Lehr- und Versuchsstation Bad Lauchstädt

Tiefe in cm	Trockenroh-dichte in g/cm ³	Feldkapazität (6,3kPa) in m ³ /m ³	Verfügbare Wassergehalt in m ³ /m ³	Porenraum in m ³ /m ³	Humusgehalt
0-30	1,40	0,384	0,229	0,462	mittel humos
30-45	1,38	0,385	0,234	0,475	mittel humos
45-55	1,31	0,377	0,227	0,508	schwach humos
55-125	1,42	0,382	0,287	0,468	sehr schwach humos
125-170	1,81	0,156	0,086	0,320	fast humusfrei
170-190	1,70	0,202	0,118	0,354	fast humusfrei

Tabelle 4: Bodenkundliche Kennwerte der Normschwarzerde aus Löss
(ALTERMANN et al. 2005)

Das langjährige Niederschlagsmittel (1896-2007) liegt bei 484 mm und das langjährige Temperaturmittel bei 8,8 °C (vgl. UFZ 2007a). Die Verteilungen der Jahresniederschläge und der Lufttemperatur weisen im Monat Juli ein Maximum auf (vgl. Abbildung 10). Der Monat mit den niedrigsten Niederschlägen ist der Februar. Die klimatischen Verhältnisse weisen darauf hin, dass sich die Lehr- und Versuchsstation im mitteldeutschen Trocken- gebiet befindet (vgl. KUKA 2005).

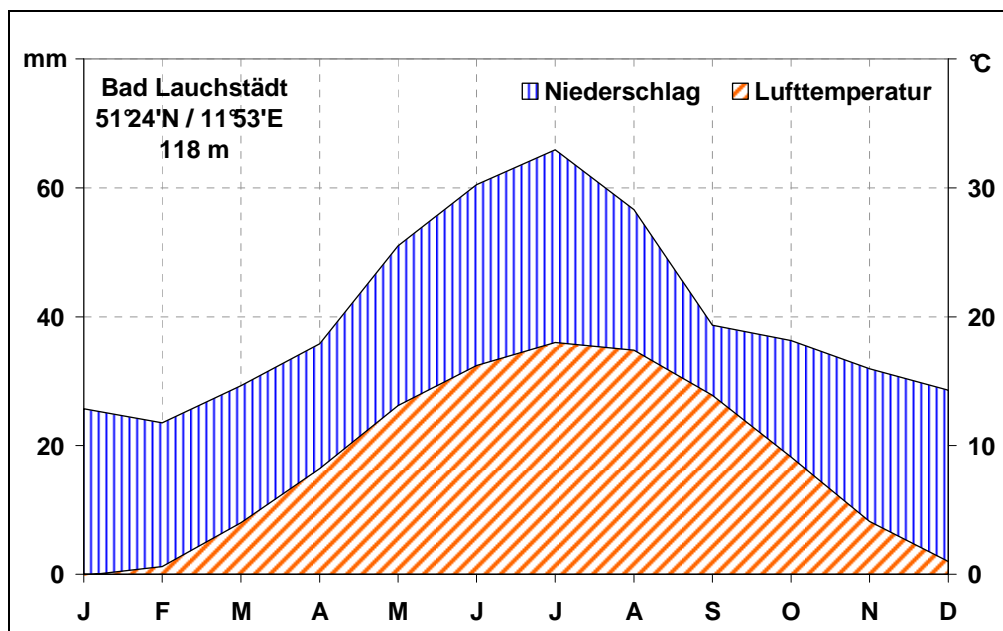


Abbildung 10: Jährlicher Niederschlags- und Lufttemperaturverlauf in Bad Lauchstädt
(1896-2007)
(UFZ 2007a)

3.1.2 Versuchsstandort des Winterweizens Parzelle 42a

Die Parzelle 42a wird mittels einer konventionellen Fruchtfolge unter der Zugabe von mineralischem Dünger bewirtschaftet. Im Zusammenhang mit konventionellem Landbau sind des Weiteren dichte Fruchtfolgen und der Einsatz von chemischen Mitteln zum Pflanzenschutz als Merkmale zu nennen (vgl. SCHILLING 2000). Nach der Ernte der Kartoffel und anschließenden Bodenbearbeitungsmaßnahmen wurde am 29.09.2006 die Winterweizensorte „Pegassos“ auf der Fläche gesät. Geerntet wurde die Frucht am 16.07.2007. Die durchschnittliche Temperatur lag in diesem Zeitraum bei 10,3 °C. Die Niederschlagsmengen pro Monat und den Verlauf der monatlichen Durchschnittswerte der Temperatur zwischen September 2006 und Juli 2007 zeigt Abbildung 11. Auffällig hierbei sind der milde Winter und die hohe Niederschlagssumme im Mai 2007. Hauptanteil an der hohen Niederschlagssumme hatte ein Starkregenereignis verbunden mit Hagelschauer am 25.05.2007. Insgesamt fielen dabei 74,7 mm/m² Niederschlag. Dieses Niederschlagsereignis führte zu einer Schädigung der Ähre des Winterweizens. Ein weiterer Einflussfaktor auf das Wachstumsverhalten des Winterweizens war ein starker, sichtbarer Verbiss durch Mäuse, hervorgerufen durch den milden Winter 2006/2007 und einer daraus resultierenden großen Mäusepopulation.

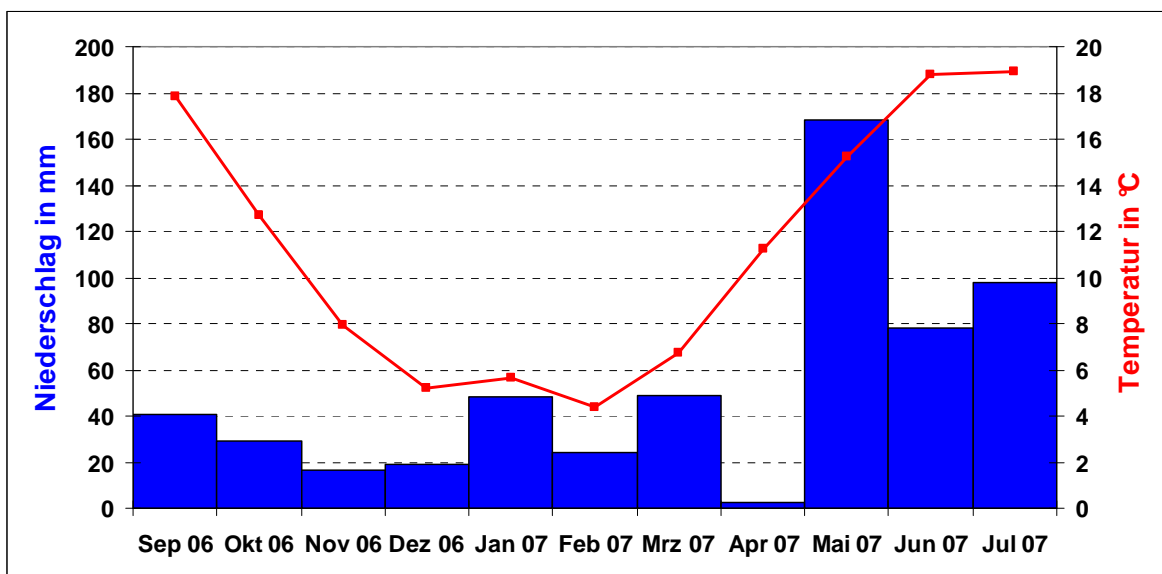


Abbildung 11: Verlauf der durchschnittlichen Monatstemperatur und der monatlichen Niederschlagssummen September 2006 bis Juli 2007

(Datengrundlage: UFZ 2008)

3.2 Nicht destruktive Methode zur Datengewinnung: Minirhizotron

3.2.1 Bildgewinnung mit Minirhizotron-Kamerasystem

Zur digitalen Bildaufnahme stand das Minirhizotron-Kamerasystem mit der Bezeichnung BTC-100X der Firma Bartz Technology Corporation zur Verfügung. Es besteht aus einer wasserdichten Kamera am Ende einer 2,20 m langen Teleskopstange (vgl. Abbildung 12 Nummer 1). Die Kamera verfügt über einen Zoom, mit dem der Beobachtungsbereich der Kamera fokussiert werden kann, sowie eine Beleuchtungseinheit (vgl. Abbildung 12 Nummer 2). Um im Feld direkt zu überprüfen, an welcher Position sich die Kamera im Inneren der Röhre gerade befindet, und um die Minirhizotron-Bilder zu speichern, gehört zur Ausrüstung noch das Bilderfassungssystem BTC I-CAP. Es ist über ein Verbindungskabel mit dem Minirhizotron-Kamerasystem verbunden. Zu dessen Komponenten zählt ein Laptop (vgl. Abbildung 12 B) mit dem Programm Digital Image Capture System Version 4.1, mit dem die digitalen Minirhizotron-Bilder vor Ort direkt betrachtet, erfasst und gespeichert werden.

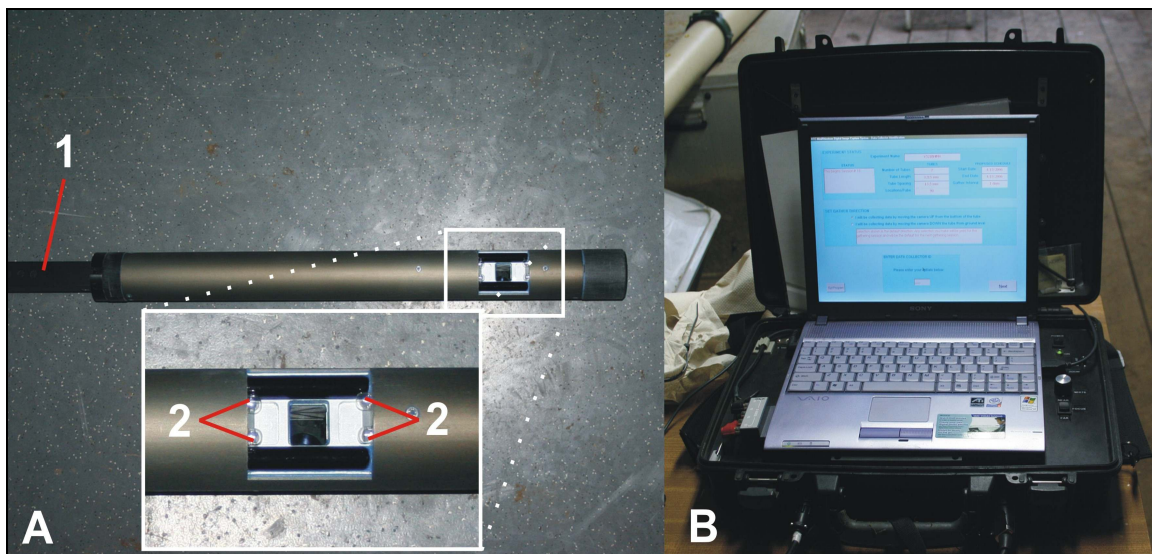


Abbildung 12: Komponenten des Minirhizotron-Kamerasystems

Um an verschiedenen Bildaufnahmeterminden Aufnahmen des gleichen Beobachtungsbereichs im Bodenprofil zu machen, wird das Kamerasystem immer fest an der Röhre arretiert. Die Teleskopstange wird 90 cm in die Röhre hinein geschoben. Auf dem Bildschirm des Laptops ist daraufhin ein aktuelles Bild des Beobachtungsbereiches aus dem Inneren der Röhre zu sehen (vgl. Abbildung 13 A). Die schematische Versuchsanordnung in Abbildung 13 A zeigt die Verbindung des Laptops mit dem Minirhizotron-Kamerasystem über ein Verbindungskabel. Der Kamerakopf befindet sich bei dieser Darstellung innerhalb der Röhre. Die reale Versuchsanordnung ist in Abbildung

13 B dargestellt, wobei ebenfalls das Minirhizotron-Kamerasystem fest an der Röhre angebracht ist und sich der Kamerakopf im Inneren der Röhre befindet.

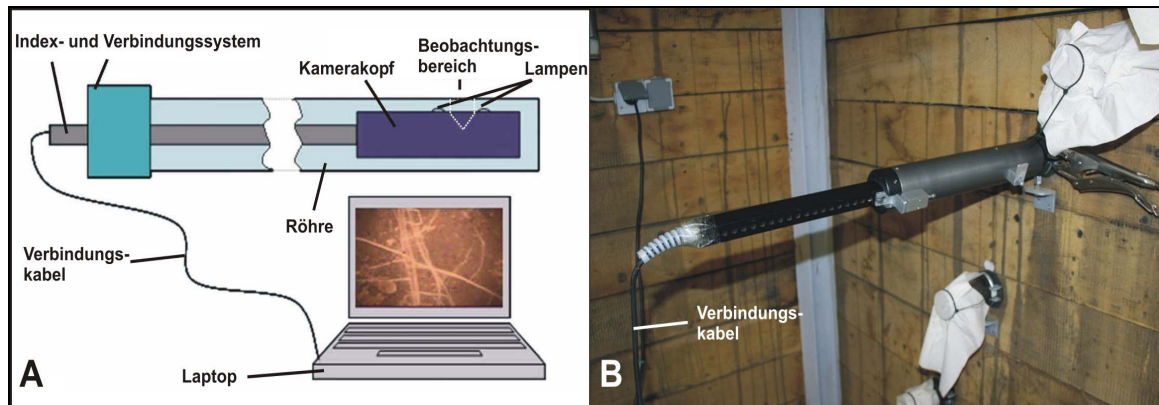


Abbildung 13: Schematische und reale Darstellung der Versuchsanordnung
(Abschnitt A: Franko 2006b)

Eine Bilderserie entspricht 90 aufeinander folgenden Minirhizotron-Bildern, die innerhalb einer Röhre pro Bildaufnahmetermin gemacht werden. Dies geschieht indem die Teleskopstange nach jeder Aufnahme eines einzelnen Minirhizotron-Bildes einen Zentimeter weiter aus der Röhre herausgezogen wird. Begonnen wird die Aufnahme der Bildserien in der obersten Röhre und wird in der vertikalen Reihenfolge der Röhren fortgesetzt. Bilder werden nur in Röhren aufgenommen, die auch über Wurzeln der aktuellen Kulturart verfügen. Diese unterscheiden sich meistens durch die hellere Wurzelfarbe im Vergleich zu älteren Wurzeln der vorangegangenen Kulturart. Jedem einzelnen Minirhizotron-Bild wird automatisch ein Dateiname durch die Software des Bilderfassungssystems zugewiesen. Der Dateiname enthält alle wichtigen Informationen (vgl. Abbildung 14).

Schema zur Vergabe des Dateinamens durch die Bilderfassungssoftware

Experiment_TNNN_LXXX_Date_Time_SSS_Gat.jpg

Experiment: Experimentname

TNNN: Röhrennummer

LXXX: Positionsnummer innerhalb der Röhre

Date: Aufnahmedatum

Time: Aufnahmeuhrzeit

SSS: Aufnahmenummer

Gat: Bearbeiter

jpg: Dateiformat

Abbildung 14: Schema zur Vergabe des Dateinamens durch die Bilderfassungssoftware
(RÉGENT INSTRUMENTS INC. 2003)

Die Beispieldatei V521BHM4_T001_L001_2007.06.21_092748_016_CHR.jpg beinhaltet die Informationen, dass dieses Minirhizotron-Bild zum Experiment V521BHM4 gehört und in Röhre 1 an Positionsnummer 1 am 21.06.2007 um 9:27 Uhr als Aufnahme Nummer 16 von Christian Tietz aufgenommen wurde.

Im Anschluss an die Aufnahme aller Bildserien in einer Grube wird ein Kontrollbild mit Millimeterpapier aufgenommen. Dieses Kontrollbild dient bei der späteren computer-gestützten Auswertung der Minirhizotron-Bilder der Kalibrierung (vgl. Abbildung 15). Diese macht die Ermittlung der realen Wurzelgröße anhand der im Minirhizotron-Bild abgebildeten Wurzelprojektion möglich.

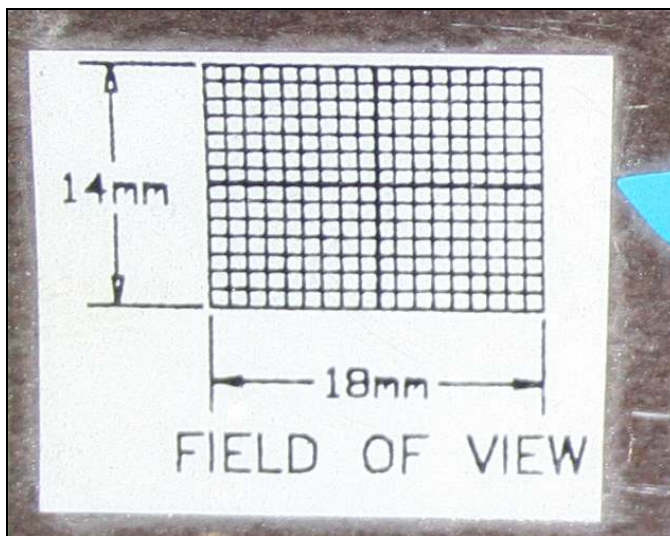


Abbildung 15: Kontrollbild im Inneren des Transportbehälters des Minirhizotron-Kamerasystems

Die Minirhizotron-Bilderfassung für das Winterweizenfeld 42a begann am 27.02.2007 und somit 151 Tage nach der Aussaat. Zu diesem Zeitpunkt hatte der Winterweizen das BBCH Stadium 29 erreicht (vgl. Tabelle 5) und stand kurz vor dem Schossen. An insgesamt zehn Terminen wurden Minirhizotron-Bilder erfasst. In Tabelle 5 sind die wichtigsten Angaben zu den einzelnen Bildaufnahmetermenen aufgeführt. So lässt sich erkennen, dass zum Beispiel am 23.05.2007 in den Röhren 1 bis 5 insgesamt 450 Minirhizotron-Bilder aufgenommen wurden. Die Aufnahme der Minirhizotron-Bilder fand 236 Tage nach der Aussaat und 14 Tage nach dem vorangegangenen Bildaufnahmetermin (09.05.2007) statt. Ebenfalls lässt sich aus der nachfolgend aufgeführten Tabelle entnehmen, in welchem Entwicklungsstadium sich der Winterweizen jeweils befand. Am 23.05.2007 war beispielsweise das Ende der Blüte erreicht. Der letzte Termin vor der Ernte war der 05.07.2007. Bei diesem Bildaufnahmetermin war ein Stadium zwischen der Gelbreife (BBCH Stadium 87) und der Vollreife (BBCH Stadium 89) des Winterweizens erreicht.

3.2 Nicht destruktive Methode zur Datengewinnung: Minirhizotron

Bildaufnahme- nummer	Bildaufnahmetermin	Tage seit Aussaat	BBCH Stadium	Beschreibung des BBCH Stadiums	Tage seit letzter Bildaufnahme	Anzahl Minirhizotron- Bilder	Röhre Nr.
1	27.02.2007	151	29	9. Bestockungstrieb sichtbar	-	270	1-3
2	07.03.2007	159	30/31	Haupttriebe beginnen sich zu strecken/1-Knoten Stadium	8	360	1-4
3	14.03.2007	166	30/31	Haupttriebe beginnen sich zu strecken/1-Knoten Stadium	7	360	1-4
4	28.03.2007	180	31/32	1-Knoten Stadium/2- Knotenstadium	14	332	1-4
5	18.04.2007	201	32/33	2-Knotenstadium/3-Knotenstadium	21	450	1-5
6	09.05.2007	222	49	Grannenspitzen	21	450	1-5
7	23.05.2007	236	69	Ende der Blüte	14	450	1-5
8	07.06.2007	251	75/85	Milchreife/Teigreife	15	450	1-5
9	21.06.2007	265	85/87	Teigreife/Gelbreife	14	450	1-5
10	05.07.2007	279	87/89	Gelbreife/Vollreife	11	450	1-5

**Tabelle 5: Übersicht zur Bildaufnahme der Parzelle 42a
(Beschreibung der BBCH Stadien: Landwirtschaftskammer Nordrhein-Westfalen 2008)**

Von den Winterweizenwurzeln (Parzelle 42a) wurden während der zehn Bildaufnahmetermine insgesamt 4022 Minirhizotron-Bilder aufgenommen, die anschließend für eine weitere Bearbeitung zur Verfügung standen.

3.2.2 Datenauswertung

Die Auswertung der Daten überführt qualitative Minirhizotron-Bilder in quantitativen Informationen. Von den zehn Bildaufnahmetermine wurden sechs ausgewählt, um die Minirhizotron-Bilder dieser Bildaufnahmetermine aufzubereiten und auszuwerten. Dabei handelt es sich um die Bildaufnahmetermine Nummer 1, 3, 5, 7, 9 und 10, die im Ganzen eine Datenmenge von 2430 Minirhizotron-Bildern umfassen. Für die Datenauswertung kamen zwei rechnergestützte Bildanalyseverfahren zum Einsatz, zum einen das Programm WinRHIZO Tron MF und zum anderen das Programm MiRIA. Es werden zwei Verfahren angewendet, um zu testen, ob es möglich ist mit einem vollautomatisch arbeitenden Programm dieselben Aussagen zu erhalten wie mit einem manuellen Programm. Grundsätzlich wird dabei davon ausgegangen, dass WinRHIZO Tron MF die Daten liefert, welche die bestmöglichen quantitativen Aussagen über die Minirhizotron-Bilder beinhalten. Ein ermittelter Zusammenhang zwischen den Daten beider rechnergestützter Bildanalyseverfahren würde zukünftig eine enorme Arbeitserleichterung ermöglichen.

WinRHIZO Tron MF

WinRHIZO Tron MF der Firma Regent Instruments ist ein manuelles Wurzelvermessungsprogramm auf Windows-Basis, welches erlaubt, Minirhizotron-Bilder zu analysieren. Für die Datenauswertung wird die Version 2003c verwendet. Das Programm macht es unter anderem möglich die Länge, den durchschnittlichen Durchmesser und das Volumen der auf den Minirhizotron-Bildern vorhandenen Wurzeln zu berechnen.

Bevor mit der eigentlichen Wurzelvermessung begonnen wird, muss das Programm WinRHIZO Tron MF kalibriert werden. Dazu wird das in Kapitel 3.2.1 (Seite 30) beschriebene Kontrollbild in das Programm geladen und mittels des darauf abgebildeten Millimeterpapiers (vgl. Abbildung 16) die Kalibrierung vorgenommen. Dadurch kann der Zusammenhang zwischen den Messwerten und den Werten der Messgröße unter bekannten Bedingungen ermittelt werden (vgl. STRAUß 2007). Für die Kalibrierung werden jeweils zwei Punkte auf einer vertikalen und horizontalen Linie des Millimeterpapiers positioniert. Anhand der ausgezählten Kästchen des Millimeterpapiers, die jeweils zwischen den Punkten liegen, kann WinRHIZO Tron MF die tatsächliche Größe der nachgezeichneten Wurzeln ermitteln. Dies ist nötig, da die verschiedenen

Zoomeinstellungen des Minirhizotron-Kamerasystems bei der Datenaufnahme zu ungenauen Messwerten bei der Auswertung führen würden.

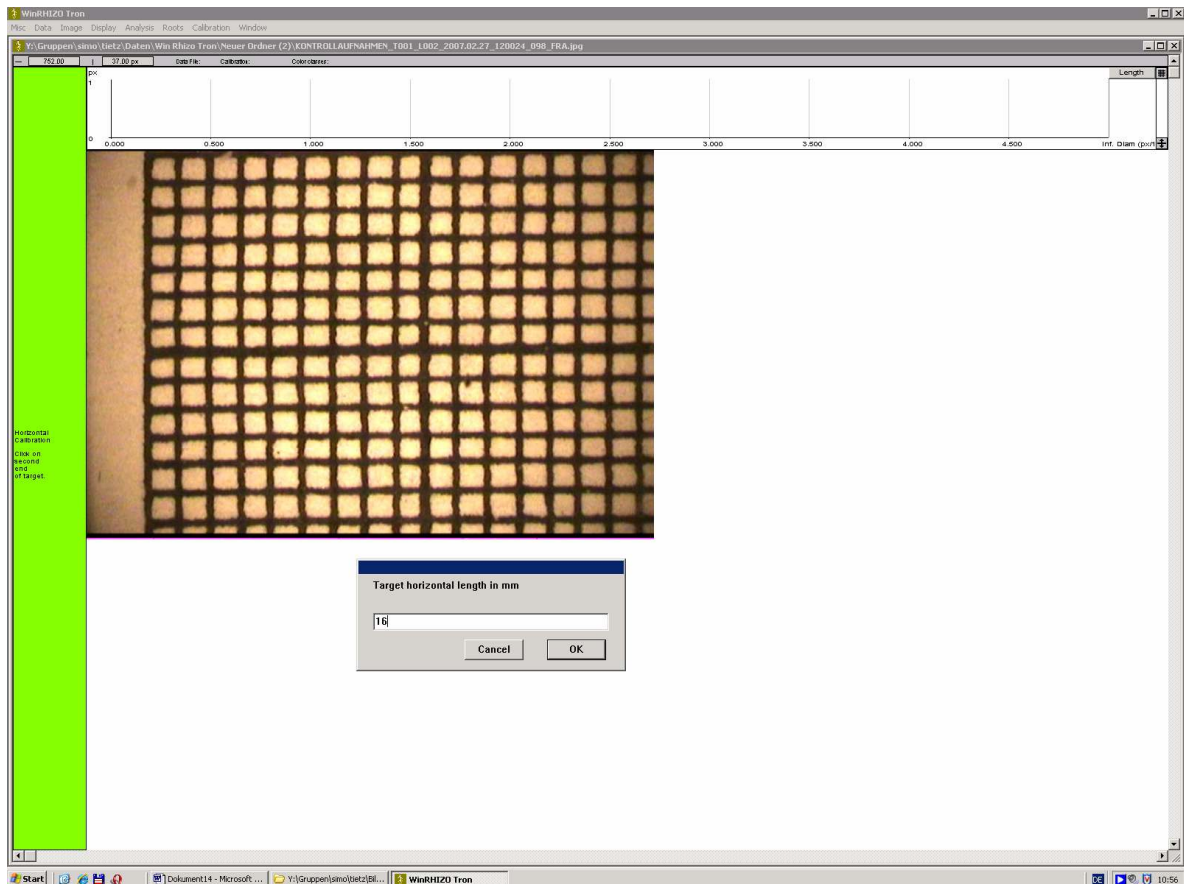


Abbildung 16: Kalibrierung von WinRHIZO Tron MF für den Bildaufnahmetermin 27.02.2007

Folgende Arbeitsschritte sind durchzuführen, um eine Wurzel im Programm zu vermessen:

1. Auswahl der Darstellungsvariante des Minirhizotron-Bildes
2. Optische Separation der Wurzel
3. Manuelles Vermessen der Wurzel
4. Statuszuordnung der Wurzel zu lebenden oder toten Wurzeln

1. Auswahl der Darstellungsvariante des Minirhizotron-Bildes

Bearbeitet werden kann stets nur ein Minirhizotron-Bild. Das Programm bietet dafür verschiedene Einstellungsmöglichkeiten für die Bearbeitung an. Als sinnvollste Darstellung hat sich die Funktion „Space Slice“ erwiesen. Dabei werden neben dem aufzuarbeitenden Minirhizotron-Bild noch das Vorherige und das Nachfolgende dargestellt. Der Vorteil dieser Darstellung ist, dass lange Wurzeln, die sich über mehrere Minirhizotron-Bilder erstrecken, über drei Minirhizotron-Bilder gleichzeitig verfolgt werden

können. Dies erleichtert die Statuszuordnung (vgl. Arbeitsschritt 4), weil der Lebensstatus schon beim vorherigen Minirhizotron-Bild bestimmt wurde. Weitere Darstellungsvarianten sind zum Beispiel „Frame“, bei der nur ein Minirhizotron-Bild geladen wird, und „Time Slice“, bei der Minirhizotron-Bilder von unterschiedlichen Bildaufnahmetermenen der gleichen Aufnahmeposition innerhalb der Röhre geöffnet werden.

2. Optische Separation der Wurzel

Wenn das Minirhizotron-Bild auf der Arbeitsoberfläche des Programms erscheint, müssen als erstes durch den Bearbeiter die Wurzeln gegenüber Bodenlebewesen, Schmutz und den Boden optisch abgegrenzt werden. Dies ist möglich durch Erfahrungswerte und Kenntnisse, die bei der Aufnahme der Minirhizotron-Bilder gewonnen werden. Das Wissen über die Gestalt von Bodenlebewesen ist z. B. notwendig, da diese die gleiche Farbe aufweisen wie die Wurzeln.

3. Manuelles Vermessen der Wurzel

Während der Vermessung muss der Bearbeiter mit der Maus und der Tastatur jede einzelne Wurzel manuell nachzeichnen und kann die Wurzelwachstumsrichtung und Wurzeldurchmesser gut nachempfinden (vgl. Abbildung 17). Dies geschieht, indem man die Wurzel manuell in Wurzelsegmente teilt. Bei jeder Biegung einer Wurzel oder bei einer Änderung des Wurzeldurchmessers ist es nötig ein neues Wurzelsegment zu beginnen. In Abbildung 17 sieht man beispielhaft, dass eine Wurzel von links beginnend nachgezeichnet wird und bisher erst ein Segment vorhanden ist. Wurzelhaare lassen sich auf Grund der nicht ausreichenden Auflösung der Minirhizotron-Bilder nicht vermessen.

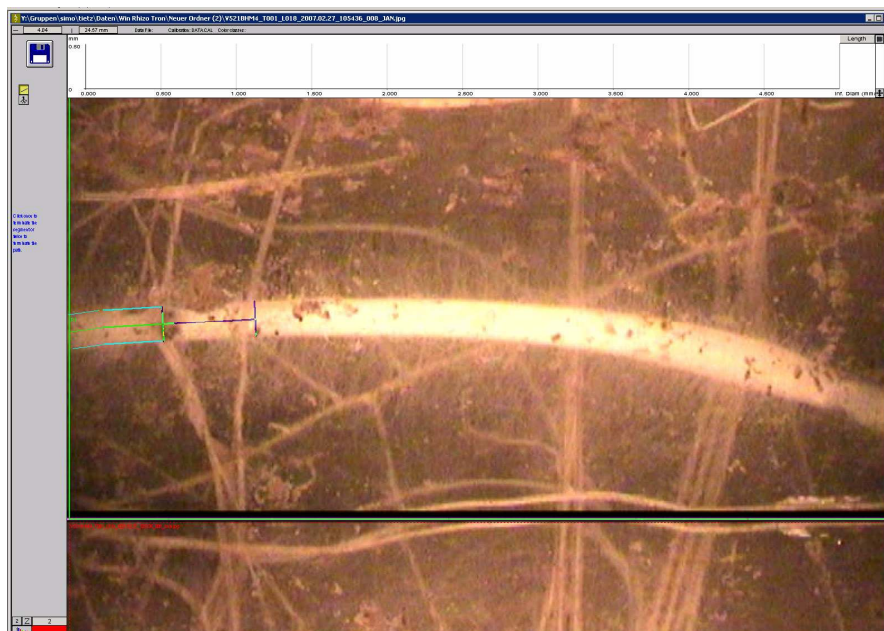


Abbildung 17: Nachzeichnen einer Wurzel im Programm WinRHIZO Tron MF

4. Statuszuordnung der Wurzel zu lebenden oder toten Wurzeln

Jeder nachgezeichneten Wurzel muss ein Status zugewiesen werden. Mit dem Status wird angegeben, ob eine Wurzel lebendig oder tot ist. Der Grund für die Statuszuordnung ist, dass unterschieden werden kann, ob eine Wurzel zur aktuellen Kulturart (lebende Wurzel) oder zur vorangegangenen Kulturart (tote Wurzel) gehört. Dadurch lassen sich bei der Quantifizierung der Wurzelkenngößen im Boden jeder Kulturart bestimmte ermittelte Kenngößen und Umsatzraten zuordnen.

Da die Einordnung in lebende oder tote Wurzeln allein dem Bearbeiter überlassen ist, ist es nötig Kriterien dafür festzulegen. Bei der Bestimmung des Lebensstatus der Minirhizotron-Bilder des ersten Termins einer Minirhizotron-Bildaufnahme für eine Kulturart gelten dabei andere Kriterien als für die darauf folgenden Bildaufnahmetermine. Für die Minirhizotron-Bilder des 27.02.2007 werden die Minirhizotron-Bilder des letzten Bildaufnahmetermins der vorangegangenen Kulturart dieser Parzelle herangezogen. Diese Gegenüberstellung macht erst eine Bestimmung des Lebensstatus der Wurzeln für alle Minirhizotron-Bilder eines Beobachtungszeitraums möglich. Folgende Kriterien wurden für die Identifizierung des Lebensstatus der Wurzeln aller Minirhizotron-Bilder des ersten Bildaufnahmetermins (27.02.2007) festgelegt.

1. Das Vorhandensein oder Fehlen von Wurzelhaaren.
2. Das Vorhandensein oder Fehlen derselben Wurzel auf dem Minirhizotron-Bild, welches beim letzten Bildaufnahmetermin (30.08.2006) der vorangegangenen Kulturart gemacht wurde.
3. Das Vorhandensein oder Fehlen optischer Merkmale der Wurzel im Bezug auf Wurzelfarbe und Wurzeldurchmesser gegenüber den Wurzeln, die im selbem Minirhizotron-Bild schon als lebendig oder tot identifiziert wurden.
4. Leichte Positionsänderung derselben Wurzel auf dem Minirhizotron-Bild des folgenden Bildaufnahmetermins.

Es müssen dabei nicht alle Kriterien gleichzeitig erfüllt sein, sondern in einer bestimmten Reihenfolge der Kriterienüberprüfung ergibt sich am Ende die Antwort auf die Frage nach dem Lebensstatus. Um den Umgang mit den Kriterien zu erläutern, ist in der folgenden Abbildung der Entscheidungsfindungsvorgang des Bearbeiters graphisch dargestellt.

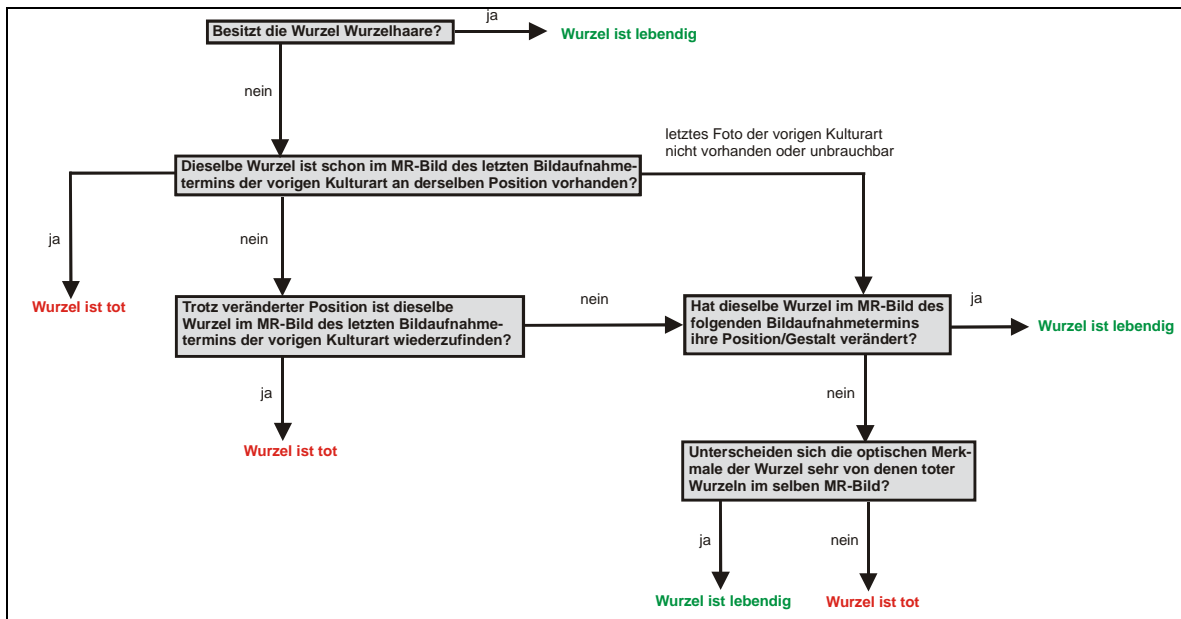


Abbildung 18: Schema zur Entscheidungsfindung des Lebensstatus der Wurzeln

Nach der Anwendung der beschriebenen Entscheidungsfindung liegen für jede Wurzel in allen Minirhizotron-Bildern des ersten Bildaufnahmetermins Angaben über den Lebensstatus vor. Für die Analyse der Minirhizotron-Bilder, die nach dem 27.02.2007 aufgenommen wurden, ist die Vorgehensweise eine etwas andere. Als Referenzbilder werden jeweils die Minirhizotron-Bilder des vorigen mit WinRHIZO Tron MF ausgewerteten Bildaufnahmetermins herangezogen (vgl. Abbildung 19). So wird beispielsweise mit Hilfe der Minirhizotron-Bilder vom 27.02.2007 eine Zuordnung der Wurzeln in den Minirhizotron-Bildern vom 14.03.2007 vorgenommen. Bereits als lebendig identifizierte Wurzeln werden auch in den Minirhizotron-Bildern des nachfolgenden Termins als lebendig bestimmt. Grundlegend wird davon ausgegangen, dass eine lebendige Wurzel zur aktuellen Kulturart gehört. Für die toten Wurzeln gilt ebenfalls das Prinzip, dass diese ihren Status für alle folgenden Bildaufnahmetermine beibehält. Finden sich bisher unbekannte Wurzeln kann in der Regel davon ausgegangen werden, dass es sich um lebende Wurzeln handelt. Bei etwaigen Unsicherheiten können zur Überprüfung auch die Minirhizotron-Bilder der nachfolgenden Bildaufnahmetermine benutzt werden. Wie in Abbildung 19 zu sehen, können z. B. für die Überprüfung einzelner Minirhizotron-Bilder des 14.03.2007 die Minirhizotron-Bilder des 18.04.2007 verwendet werden. Überprüft werden kann so, ob es sich bei bestimmten wurzelähnlichen Erscheinungen im Minirhizotron-Bild um Schmutz, ein Bodentierchen oder eine Wurzel handelt. Denn im Minirhizotron-Bild des folgenden Bildaufnahmetermins sind Erscheinungen wie Schmutz oder Bodentierchen mit einer hohen Wahrscheinlichkeit nicht mehr vorhanden. Bei Wurzeln hingegen ist ein „Verschwinden“ von einem Bildaufnahmetermin zum nächsten sehr unwahrscheinlich.

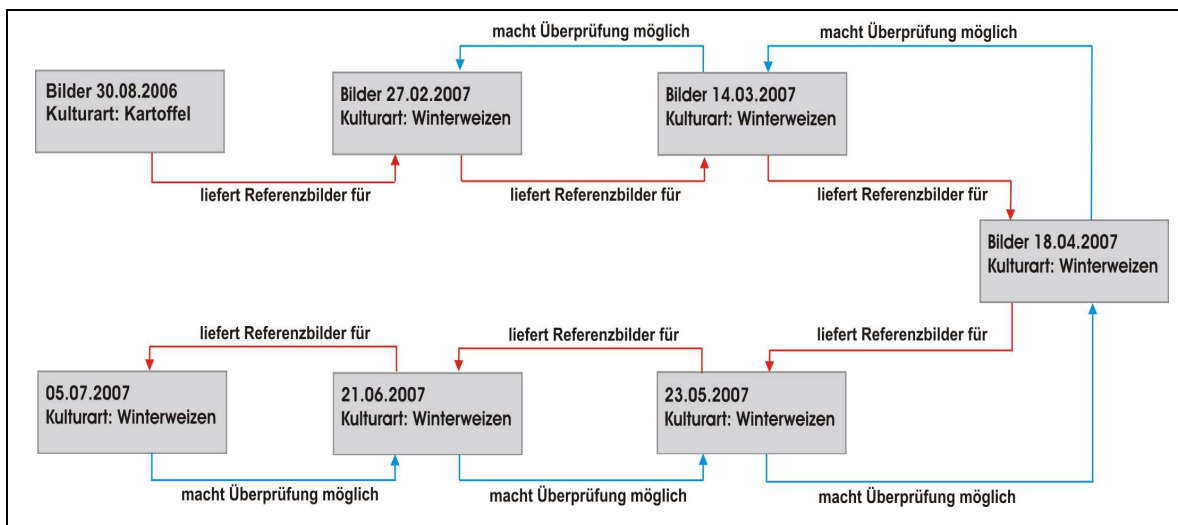


Abbildung 19: Schema zur Ermittlung der Referenzbilder

Eine Wurzel, die einmal als lebendig identifiziert wurde, wird bei den Minirhizotron-Bildern der darauf folgenden Bildaufnahmetermine der gleichen Kulturart ebenfalls der Status lebendig zugewiesen. Es können in den später aufgenommenen Minirhizotron-Bildern der anderen Bildaufnahmetermine des Winterweizens normalerweise keine toten Wurzeln hinzu-kommen, sondern nur lebende Wurzeln. Ausnahme dafür wäre eine leichte Veränderung des fotografierten Beobachtungsbereiches durch veränderte Zoomeinstellung des Minirhizotron-Kamerasystems, wodurch auch weitere tote Wurzeln auf dem Minirhizotron-Bild erscheinen können.

Um den Arbeits- und Zeitaufwand zu verringern und unter der Annahme, dass die Abbauprozesse der toten Wurzeln linear ablaufen, werden die toten Wurzeln nur für den 27.02.2007 und den 05.07.2007 vermessen. Aus den Wurzelkenngößen dieser beiden Bildaufnahmetermine werden die Wurzelkenngößen der toten Wurzeln für die fehlenden Termine berechnet. Die Vermessung der lebenden Wurzeln wird hingegen bei jedem Bildaufnahmetermin vorgenommen.

Unter anderem ermittelt WinRHIZO Tron MF aus den vermessenen Wurzeln eines Minirhizotron-Bildes die Wurzelanzahl, die Wurzellänge, die zweidimensionale Fläche des Teils der Wurzel der real im Minirhizotron-Bild zu sehen ist (projizierte Wurzelfläche), die dreidimensionale Oberfläche der Wurzel und das Wurzelvolumen. Das Programm berechnet aus der projizierten Wurzelfläche im Minirhizotron-Bild die dreidimensionale Mantelfläche der Wurzel (Wurzeloberfläche) innerhalb des Bodens, indem die einzelnen projizierten Wurzelflächen mit der Kreiszahl π ($\pi \approx 3,1415926$) multipliziert werden (vgl. Abbildung 20).

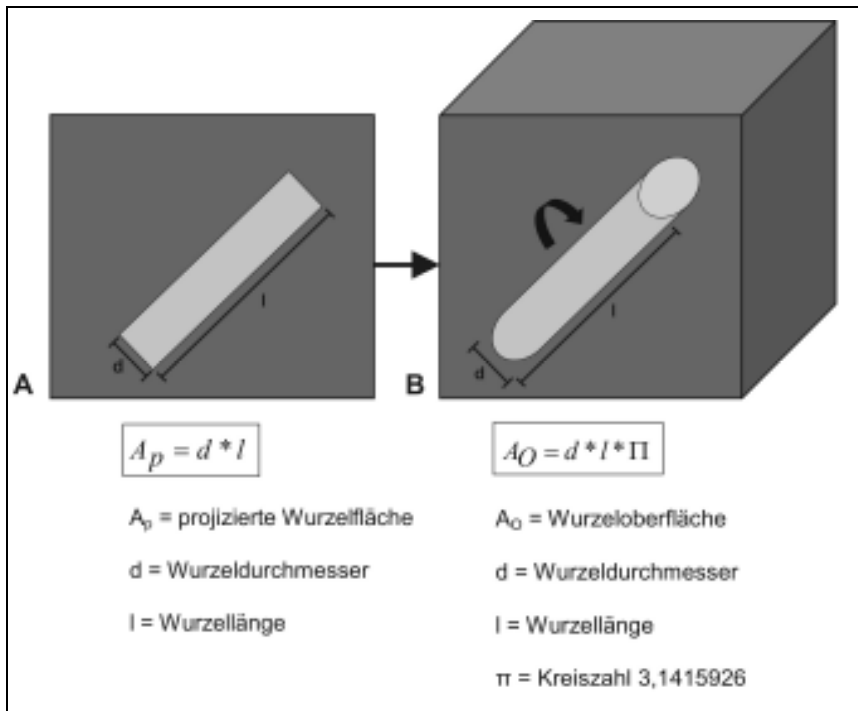


Abbildung 20: Zusammenhang zwischen projizierter Wurzelfläche und Wurzeloberfläche

MiRIA

Das Programm MiRIA beruht auf einem Verfahren, welches es ermöglicht in Minirhizotron-Bildern eigenständig Wurzelprojektionen zu erkennen. MiRIA arbeitet auf Linux-Basis und operiert in zwei Phasen. Zuerst werden nur bestimmte Teile der projizierten Wurzelregion, die mit hoher Sicherheit erkannt werden können, bestimmt. Dafür werden Regionen mit Hilfe der Binarisierung mit verschiedenen Schwellenwerten erzeugt (vgl. ERZ 2006). Binarisierung beschreibt einen Vorgang, der notwendig ist, um ein Objekt (Wurzel) vom Hintergrund (Boden) zu trennen. Dies geschieht, indem mit Hilfe von Schwellenwerten einzelnen Bildpunkten die Zugehörigkeit zum Objekt oder zum Hintergrund zugeordnet wird (vgl. VORNBERGER 1997). Von den so erzeugten Regionen werden mittels bestimmter Kriterien bezüglich der Farbe, Form, Größe und Regionenrand wiederum einzelne Regionen ausgewählt. Diese beinhalten dann mit einer hohen Wahrscheinlichkeit einen Teil einer Wurzelprojektion. Unter anderem wird durch einen Suchalgorithmus ein Konturpaar bestimmt, welches diese Teilregion begrenzt und somit den finalen „Keim“ bestimmt. Daher wird die erste Phase als **Keimdetektion** beschrieben. Mit einem „Keim“ ist hierbei kein Keim im biologischen Sinn gemeint, sondern ein Wurzelansatz (vgl. STRAUß 2007). In der zweiten Phase, der **Keimexpansion**, dienen die detektierten Keime dann als Ausgangspunkte einer weiteren Suche. Hierfür wird ein hierarchischer Expansionsansatz verwendet. Dieser basiert auf der Idee einer Vereinfachung der Suche nach Wurzelkonturen, indem sie in zwei unterschiedliche Ebenen aufgeteilt wird. Diese Kombination aus detaillierter Suche auf der unteren Ebene

und der Richtungssteuerung der Expansion auf der oberen Ebene ermöglicht eine effizientere Suche (vgl. ERZ 2006). In der zweiten Phase werden dadurch die Keime so verlängert, dass die gesamte zugehörige Wurzel überdeckt wird. Am Ende ist ein Binärbild das Ergebnis des gesamten Verfahrens zur Wurzeldetektion (vgl. Abbildung 21). Jedem Bildpunkt eines Minirhizotron-Bildes wird in diesem die Zugehörigkeit zur Wurzel- oder Hintergrundklasse zugeordnet. Aus diesen Daten kann der Bearbeiter relevante Daten wie mittlere Wurzelbreite, Wurzellänge und Wurzelfläche im Minirhizotron-Bild ermitteln (vgl. ERZ 2006).

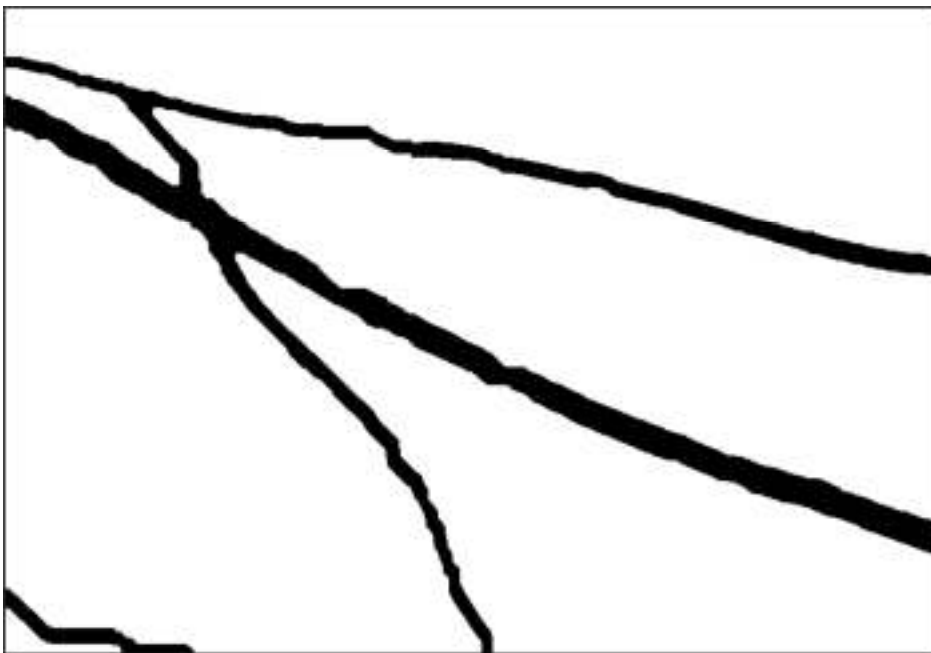


Abbildung 21: Binärbild des Minirhizotron-Bildes
V521BHM4_T001_L015_2007.02.27_105450_008_JAN.jpg

Für die Bildauswertung wird eine Version des Programms vom 22.04.2007 verwendet. Bei der Anwendung von MiRIA können je nach angestrebtem Arbeitsaufwand verschiedene Auswahlmöglichkeiten getroffen werden.

Der theoretische Ablauf im Rahmen der Detektierung mit dem maximalen Aufwand hat folgende Reihenfolge:

1. Keimdetektion
2. erste manuelle Überprüfung mit miria_gui
3. Wurzeldetektion
4. zweite manuelle Überprüfung mit miria_gui

Einzelne dieser vier Arbeitsschritte können mittels verschiedener programminterner Modi kombiniert oder übersprungen werden. Das Hilfsprogramm miria_gui ermöglicht mittels manueller Überprüfung falsche Keime und Wurzeln teilweise oder ganz zu entfernen. Die

manuellen Überprüfungen mit dieser Software sind nicht zwingend notwendig, denn auch ohne diese wird die Detektion vollständig vorgenommen.

Es stehen vier Modi zur Verfügung:

1. `miria_sd_detect`: Keimdetektion
2. `miria_rd_detect`: Wurzeldetektion
3. `miria_semiauto`: Halbautomatischer Modus, bei dem die folgenden Arbeitsschritte nacheinander gestartet werden 1. Keimdetektion 2. `miria_gui` wird zur möglichen manuellen Nachbearbeitung geöffnet 3. Wurzeldetektion 4. `miria_gui` wird zur möglichen manuellen Nachbearbeitung geöffnet
4. `miria_detect`: Keim- und Wurzeldetektion in einem Schritt

Der vierte Modus birgt den geringsten Arbeitsaufwand bei dessen Anwendung und wird deshalb für die Detektion im Rahmen dieser Untersuchung genutzt. Keime und Wurzeln werden automatisch detektiert und es findet keine Nachbearbeitung mit `miria_gui` statt. Um die benötigte Zeit für die Detektion der 2430 Minirhizotron-Bilder weiter zu verkürzen, wurde eine Änderung in der Datei `singledetect.sh` vorgenommen und der maximale Speicherbedarf des Programms auf 800 Megabyte und die maximale Zeitdauer der Detektion eines Minirhizotron-Bildes auf zwei Stunden begrenzt.

Grundsätzlich muss erwähnt werden, dass MiRIA keine Unterscheidung zwischen toten und lebenden Wurzeln vornimmt und deshalb den einzelnen Wurzeln keinen Lebensstatus zuweist.

Weil bei der Detektion eines Minirhizotron-Bildes mit MiRIA ein Binärbild entsteht (vgl. Abbildung 21), müssen die gesamten ausgegebenen Dateien der Bilddetektion vor der Auswertung noch in relevante Daten transformiert werden, da für die Quantifizierung der Wurzel im Boden Binärbilder von geringerer Bedeutung sind. Grundlage für die Datentransformation bildet das Wissen über die Anzahl der Bildpunkte, aus dem sich ein digitales Minirhizotron-Bild aufbaut. Abbildung 22 zeigt einen Ausschnitt eines stark vergrößerten Minirhizotron-Bildes, in dem ein einzelner Bildpunkt markiert ist. Das in der Untersuchung für diese Arbeit verwendete Minirhizotron-Kamerasystem liefert Minirhizotron-Bilder mit 770 horizontalen und 530 vertikalen Bildpunkten. Der fotografierte Beobachtungsbereich innerhalb des Bodens hat eine durchschnittliche Größe von 18,8 cm x 13 cm. Somit ist eine Berechnung der Kantenlängen eines einzelnen Bildpunktes möglich. Ein Bildpunkt entspricht einer Ausdehnung von 0,0245 cm x 0,0245 cm des Beobachtungsbereiches (vgl. Abbildung 22). Weil sich eine Wurzel im Binärbild aus einer bestimmten Anzahl von horizontal und vertikal angeordneten Bildpunkten aufbaut, ist es möglich Länge, durchschnittliche Breite und Fläche der Wurzel im Binärbild zu ermitteln. Durch Änderungen in der Zoomeinstellung der Minirhizotron-

Kamera kann es zu Änderungen des Verhältnisses zwischen Bildpunktgröße und realem Bildausschnitt kommen. Im Programm WinRHIZO Tron MF wird aus diesem Grund eine Kalibrierung vorgenommen, um dies zu verhindern. In der Programmstruktur von MiRIA ist hingegen keine Kalibrierung vorgesehen.

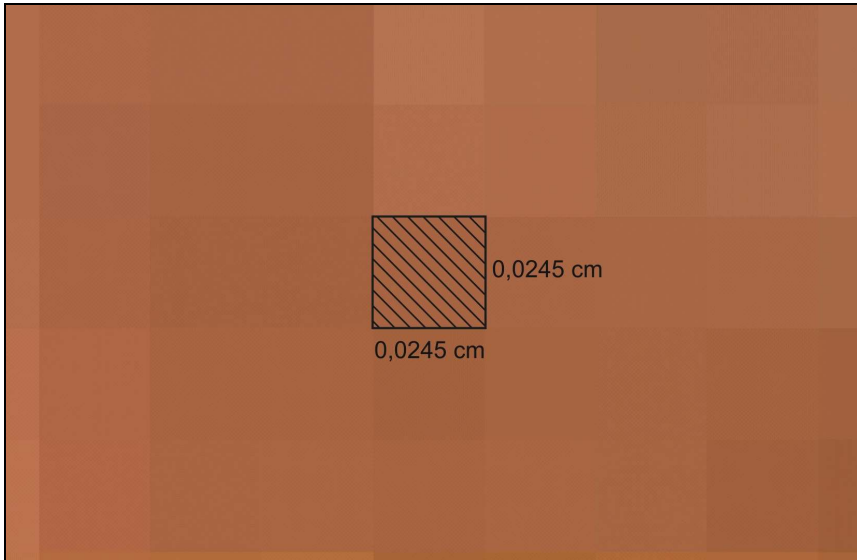


Abbildung 22: Bildpunkt eines Minirhizotron-Bildes (V521BHM4_T001_L015_2007.03.14_142755_010_EKK.jpg)

Aus der Länge und der durchschnittlichen Breite einer Wurzel können die dreidimensionale Mantelfläche der Wurzel (Wurzeloberfläche) und das Wurzelvolumen errechnet werden. Dazu muss die Wurzel als ein Zylinder mit durchgehend gleichem Durchmesser idealisiert werden. Dies wurde für die Datenauswertung im Rahmen dieser Arbeit gemacht.

3.2.3 Bestimmung der Bildqualität

Bei der manuellen Wurzelvermessung mit WinRHIZO Tron MF ist aufgefallen, dass die Qualität der Minirhizotron-Bilder sehr unterschiedlich ist. Für die Ergebnisbetrachtung erscheint es deshalb erforderlich die Bildqualität mit einzubeziehen. Dies führte zur Überlegung einer Klassifizierung. Die praktische Erfahrung mit den Minirhizotron-Bildern bei der Wurzelvermessung hat gezeigt, dass sich drei Klassen von Bildqualitäten unterscheiden lassen. Zum einen gibt es die Minirhizotron-Bilder, die eine **gute Bildqualität** aufweisen. Kriterien für eine Einteilung in diese Klasse sind eine hohe Bildschärfe, sehr geringe bis gar keine Verschmutzungen auf der Röhre, gute Ausleuchtung des Beobachtungsbereiches, Abgrenzbarkeit der Wurzeln gegenüber dem Boden und die Erkennbarkeit vorhandener Wurzelhaare. Diese Bildqualität macht die Wurzelvermessung sehr einfach, weil Wurzeln optisch sehr leicht zu erkennen sind (vgl. Abbildung 23 A). Eine weitere Klasse beinhaltet die Minirhizotron-Bilder **mittlerer**

Bildqualität (vgl. Abbildung 23 B). Hierbei handelt es sich um Minirhizotron-Bilder, die etwas unscharf sind, da zum Beispiel bei der Bildaufnahme falsch fokussiert wurde. Des Weiteren finden sich vereinzelt Verschmutzungen auf der Röhre, wie beispielsweise Wassertropfen, die das Minirhizotron-Bild an dieser Stelle verzerren, oder Bodenmaterial, das sich von außen auf der Röhre abgelagert hat. Diese Beeinträchtigungen verhindern den Blick auf vorhandene Wurzeln nicht gänzlich, führen aber dazu, dass bei der Wurzelvermessung nicht so genau gearbeitet werden kann wie bei guter Bildqualität. Grundsätzlich ist die Bearbeitung zeitintensiver, mit einer höheren Ungenauigkeit behaftet, aber generell möglich. Die Bearbeitung der Klasse von Minirhizotron-Bildern **schlechter Bildqualität** hingegen ist mit einem großen Fehler behaftet, sehr zeitintensiv oder manchmal auch gar nicht möglich. Schlechte Bildqualität zeichnet sich aus durch große Unschärfe, über 25% der Fläche des Beobachtungsbereiches ist durch Verschmutzungen auf der Röhre verdeckt und lässt keinen Blick auf die sich womöglich dahinter befindlichen Wurzeln zu (vgl. Abbildung 23 C). Des Weiteren sind diese zu dunkel, es gab Fehler bei der Bildaufnahme oder einzelne Minirhizotron-Bilder sind doppelt vorhanden.

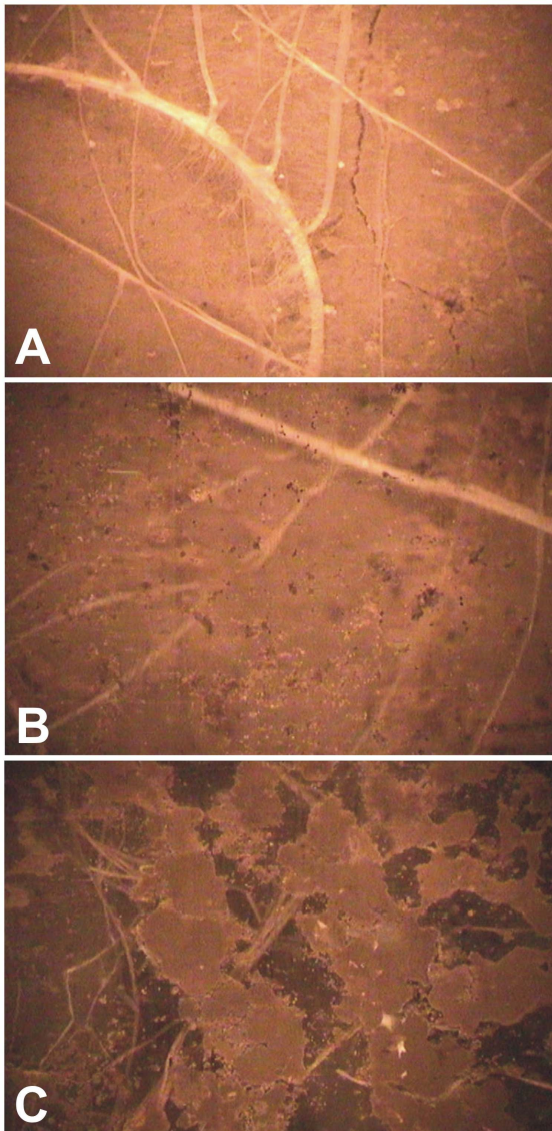


Abbildung 23: Beispielbilder für Bildqualitätsklassen

Für die praktische Anwendung der Klasseneinteilung wurden alle Minirhizotron-Bilder einzeln analysiert und auf die zuvor erwähnten Kriterien hin untersucht. Um den Flächenanteil der Röhrenverschmutzung abzuschätzen wurde eine Einstufung von Flächenanteilen der AG BODEN (1994) hinzugezogen.

3.3 Destruktive Methode zur Datengewinnung: Bohrkernmethode

3.3.1 Probennahme

Am 17.07.2007, einen Tag nach der Ernte der Parzelle 42a, wurden mit Hilfe eines zylinderförmigen Bohrers (Innendurchmesser = 8 cm) an vier Punkten der Parzelle Bodenproben entnommen. Um die Störung des Bodens der Ackerfläche zu minimieren wurden nur vier Einstiche vorgenommen. Zur Berücksichtigung der räumlichen Varianzen der Wurzelverteilung im Boden wurden jeweils zwei Einstiche auf der Pflanzenreihe und

zwei Einstiche zwischen den Pflanzenreihen platziert (vgl. Abbildung 24). Diese Verteilung der Einstiche wird bereits von SCHUURMAN & GOEDEWAAGEN (1971) beschrieben. Die Probennahmepunkte befanden sich auf der Seite des BHM4 gegenüber der Seite der Röhren (vgl. Abbildung 24). Eine Probennahme direkt neben den Röhren ist nicht möglich, weil die Röhren hätten beschädigt werden können.

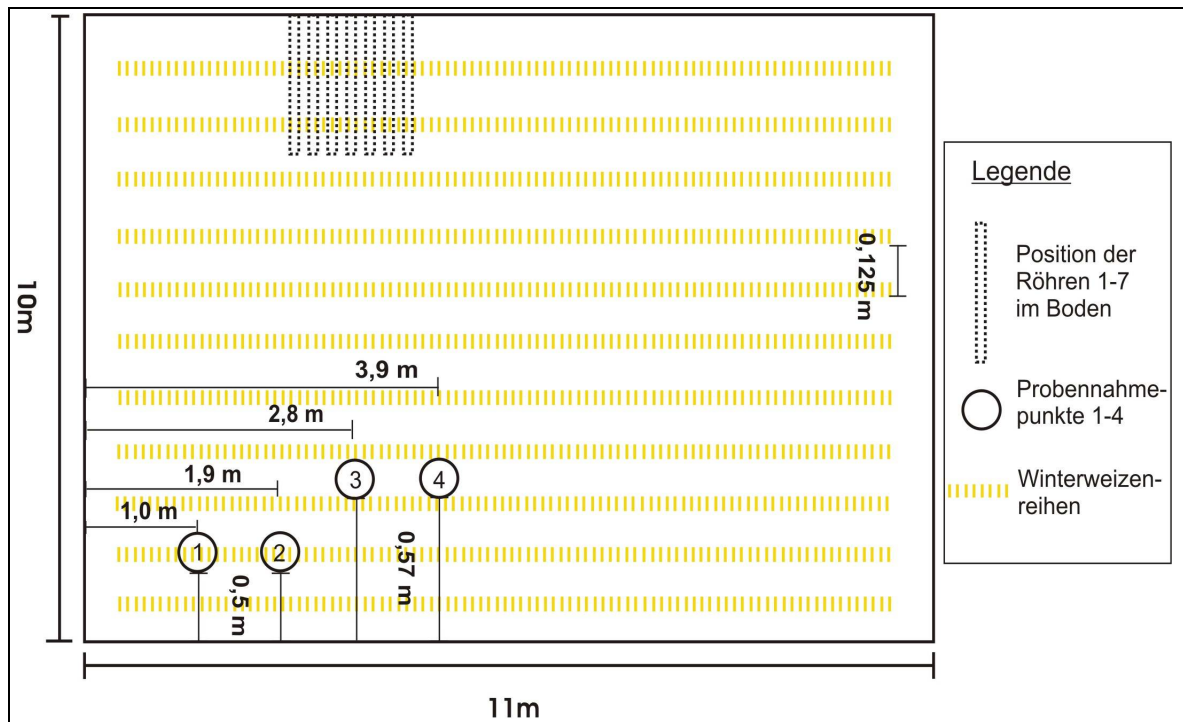


Abbildung 24: Verortung der Probennahmepunkte auf der Parzelle 42a

Für die Beprobung bis in eine Tiefe von 120 cm wurden Bodenproben segmentweise mit einer jeweiligen Höhe von 10 cm entnommen. Die Tiefe ist so gewählt, da bei der vorangegangenen Anwendung der Minirhizotron-Technik nur bis in diese Tiefe Wurzeln gefunden wurden und für einen Vergleich und die Kombination beider Methoden ebenfalls nur diese Beprobungstiefe notwendig ist. Für die Probennahme werden Markierungen in 10 cm Intervallen außen auf dem Bohrer angebracht. Pro Einstich ergeben sich dadurch jeweils 12 Bodenproben. Lediglich beim Probennahmepunkt 1 weicht die Einteilung der ersten drei Segmente ab, da nur 11 Bodenproben entnommen wurden. Auf insgesamt 47 beläuft sich die Zahl der entnommenen Bodenproben. Jede wurde separat in einen Kunststoffbeutel verpackt, beschriftet und bis zur weiteren Bearbeitung bei 7 °C gelagert.

3.3.2 Probenaufbereitung

Für die Entfernung des Bodenmaterials von den Wurzeln (vgl. Abbildung 25 A) wurden die einzelnen Bodenproben zuerst mittels eines Rundsiebs mit einer Maschenweite von 1 mm und einem Wasserstrahl behandelt (vgl. Abbildung 25 B). Die feineren Wurzeln (<1 mm) wurden mit einem engmaschigeren Rundsieb (Maschenweite von 0,063 mm) aus der

aufgefangenen Suspension separiert. Alle verbliebenen Fremdpartikel wie andere Pflanzenreste und grobe Bodenbestandteile wurden von den beiden Rundsieben manuell entfernt. Die Überführung auf das feinere Rundsieb (vgl. Abbildung 25 C) und die anschließende Reinigung der gesamten Wurzeln mit destilliertem Wasser bildete den nächsten Arbeitsschritt. Nach fünfminütiger Abtropfzeit wurden alle Wurzeln einer Probe in ein Wiegeschälchen (vgl. Abbildung 25 D) überführt, gewogen und in zwei Teile unterteilt.

Der eine Teil einer Wurzelprobe kam zur Trocknung in den Trockenschrank (vgl. Abbildung 25 E), wo die Wurzelproben für 21 Stunden bei 60 °C bis zur Gewichtskonstanz getrocknet wurden (vgl. SCHUURMAN & GOEDEWAAGEN 1971). Daraufhin erfolgte die Überführung dieser in den Exsikkator, gefolgt von der Bestimmung der Trockenmasse. Mit den ermittelten Daten ließ sich der Feuchtegehalt jeder Probe bestimmen. Mit Hilfe der Trockenmasse der Wurzeln pro Bodensegment konnte die Wurzelmasse ermittelt werden, weil das Bodenvolumen aus dem die Trockenmasse stammt, bekannt war. Die Wurzelmasse beschreibt das gesamte Wurzeltrockengewicht in einem bestimmten Bodenvolumen.

Der andere Teil der Wurzelproben wird in Rotisol eingelegt (vgl. Abbildung 25 F). Dies bewirkt, dass die Wurzeln ihre Form beibehalten und nicht durch Austrocknung an Volumen und Länge verlieren. Dadurch kann mit diesem Teil der Wurzelproben eine Bestimmung der Wurzellängendichte mit Hilfe des Rasterauszählungsverfahrens (vgl. NEWMAN 1966) durchgeführt werden. Die Wurzellängendichte gibt an, welche Gesamtlänge alle Wurzeln in einem bestimmten Bodenvolumen haben.

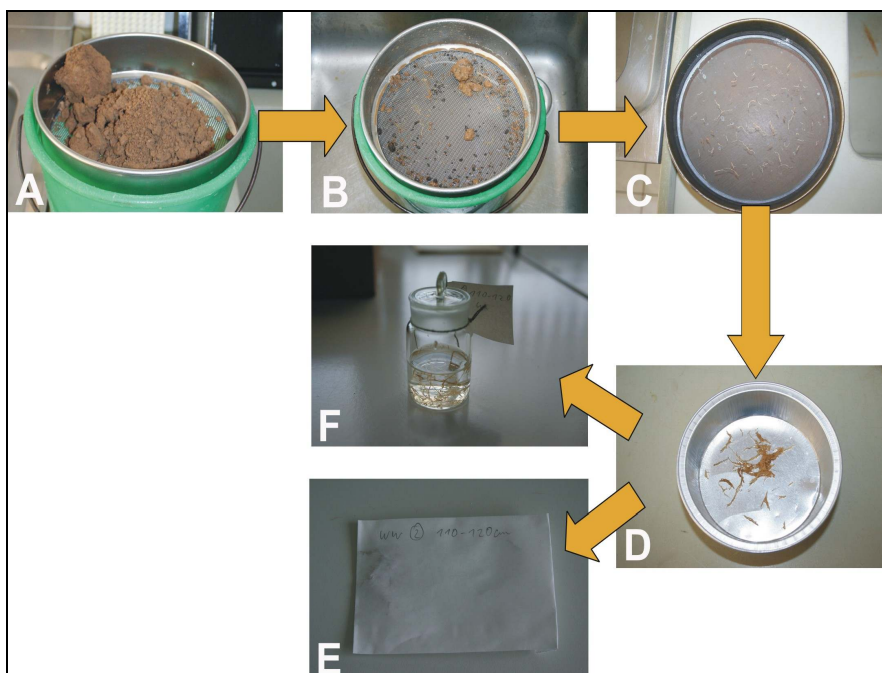


Abbildung 25: Ablauf der Wurzelreinigung

3.3.3 Rasterauszählungsverfahren

NEWMAN (1966) entwickelte eine Methode (englische Bezeichnung: line intersect method), die es ermöglicht die Summe aller Wurzellängen einer Probe zu bestimmen. Grundlage dieses Rasterauszählungsverfahrens (deutsche Bezeichnung nach WIESENMÜLLER 1999) ist die Annahme, dass innerhalb einer Fläche, in der gerade Linien zufällig verteilt liegen, längere Wurzeln im Durchschnitt diese Linien häufiger schneiden als kürzere Wurzeln. Aus der Anzahl der Schnittpunkte der Wurzeln mit den Linien lässt sich die Wurzellänge abschätzen (vgl. NEWMAN 1966). Folgende Gleichung wurde dafür von NEWMAN (1966) entwickelt.

$$R = \frac{\pi NA}{2H}$$

R	Gesamtwurzellänge
N	Schnittpunkte der Wurzeln mit den Linien
A	Fläche des Rechtecks
H	Gesamtlänge der Linien

Formel 2: Gleichung zur Berechnung der Gesamtwurzellänge
(NEWMAN 1966)

TENNANT (1976) beschreibt eine Vereinfachung dieser Gleichung für ein Raster mit unbestimmter Dimension, die unabhängig ist von der Messfläche und der Länge der Linien (vgl. Formel 3). Dies war möglich, weil es zwischen der Messfläche und der Länge der Linien ein einfaches Verhältnis gibt (vgl. TENNANT 1976).

$$R = \frac{11}{14} N$$

R	Gesamtwurzellänge
N	Schnittpunkte der Wurzeln mit den Linien

Formel 3: Vereinfachte Gleichung zur Berechnung der Gesamtwurzellänge
(TENNANT 1976)

Für die Anwendung der Methode im Rahmen dieser Arbeit wurde eine runde Kunststoffschale mit einem Durchmesser von 13,6 cm, die mit einem Raster mit einer Maschenweite von 1,3 cm versehen war, verwendet (vgl. Abbildung 26).

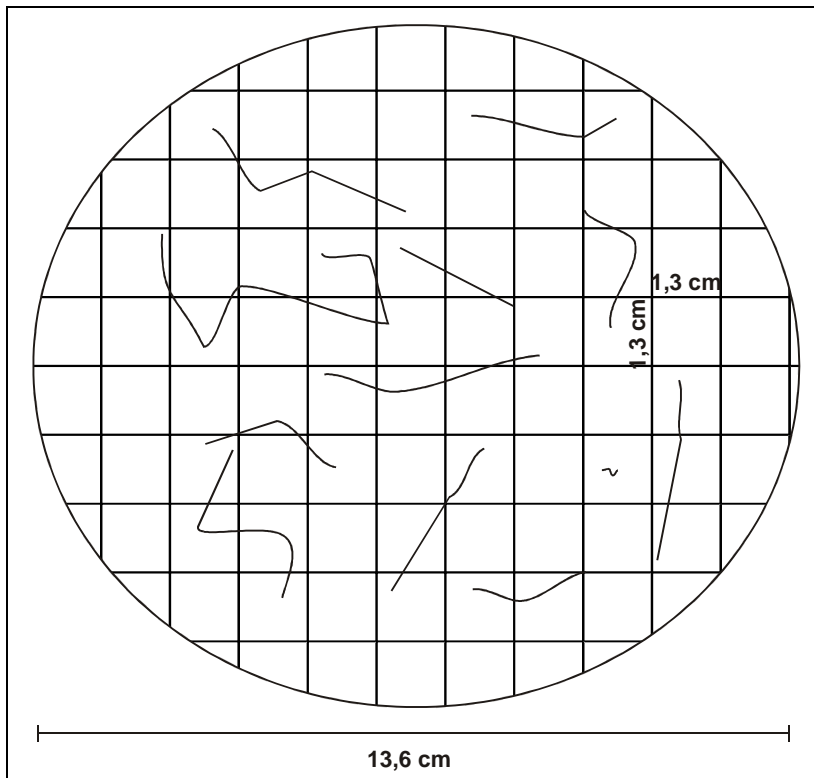


Abbildung 26: Schematische Darstellung der Kunststoffschale für die Anwendung des Rasterauszählungsverfahrens

Die Wurzeln wurden bei der Anwendung der Methode zufällig auf der Kunststoffschale verteilt. Bei einer zu großen Wurzelanzahl in einer Wurzelprobe wurden die Schnittpunkte in mehreren Etappen ausgezählt. Dazu war es notwendig die Kunststoffschale mit den Wurzeln unter ein Binokularmikroskop (Stemi SV11, Firma Zeiss) zu stellen und mittels eines Handzählers die Anzahl der Schnittpunkte der Wurzeln mit den vertikalen Rasterlinien und anschließend die Anzahl der Schnittpunkte der Wurzeln mit den horizontalen Rasterlinien zu bestimmen. Die Addition der einzelnen Schnittpunktzahlen einer Wurzelprobe ergab einen Wert aus dem, mit Hilfe der Formel 3, die Gesamtwurzellänge berechnet wurde.

4 Ergebnisse und deren Bewertung

Die vorgestellten Methoden liefern Daten, die durch eine Kombination miteinander das Ziel der Arbeit, eine Ermittlung quantitativer Wurzeldaten, ermöglichen. Im aktuellen Kapitel werden die ermittelten Ergebnisse betrachtet und diejenigen bestimmt, die für eine Quantifizierung geeignet sind. Als erstes werden dafür die Daten der Bildqualitätsanalyse betrachtet, da dies bei der Ergebnisanalyse der beiden computergestützten Bildanalyseverfahren mit berücksichtigt werden muss. Anschließend werden die Ergebnisse der Programme WinRHIZO Tron MF und MiRIA gegenübergestellt und korreliert. Es werden Zusammenhänge und Unterschiede erläutert, interpretiert und das für die Quantifizierung besser geeignete rechnergestützte Bildanalyseverfahren bestimmt. Daraufhin wird getestet, ob eine Verringerung der Minirhizotron-Bilder pro Röhre bei der Datenauswertung mit WinRHIZO Tron MF ähnliche Ergebnisse liefert wie die gesamte Bilderserie von Minirhizotron-Bildern einer Röhre. Die Vorstellung und Interpretation der Ergebnisse der Bohrkernmethode bilden den nächsten Schritt der Ergebnisbetrachtung. Anschließend werden die Ergebnisse der Bohrkernmethode mit den Ergebnissen des Programms WinRHIZO Tron MF korreliert und daraus diejenigen Ergebnisse bestimmt, die für eine Quantifizierung in Frage kommen. Abschließend wird mit den als Referenzwerten fungierenden Daten der Bohrkernmethode eine Quantifizierung der realen Wurzellänge und der realen Wurzeltrockenmasse im Boden für den gesamten Beobachtungszeitraum vorgenommen.

Um die Verständlichkeit und Lesbarkeit des Ergebnisteils zu verbessern, werden die Wurzelkenngrößen, die mittels der verschiedenen Methoden ermittelt wurden, an gegebener Stelle mit den Abkürzungen Win (WinRHIZO Tron MF), MiR (MiRIA) und Boh (Bohrkernmethode) versehen. Dadurch wird es einfacher die jeweilige Kenngrößen der richtigen Methode zuzuordnen. Wichtige Kernaussagen des Ergebnisteils sind, zur Unterstreichung ihrer Bedeutung, hervorgehoben.

4.1 Auswertung der Bildqualität

Minirhizotron-Bilder mit schlechter Qualität können Fehler bei der Wurzelvermessung mit WinRHIZO Tron MF und vor allem bei der vollautomatischen Detektion mit MiRIA hervorrufen. Bei der Analyse der Qualität der Minirhizotron-Bilder fällt auf, dass sich diese im Verlauf des Beobachtungszeitraumes verändert (vgl. Abbildung 27). Während am 27.02.2007 noch 28,5 % aller Minirhizotron-Bilder eine schlechte Qualität aufweisen,

nimmt dieser Wert bis zum 23.05.2007 auf 1,3 % ab. Danach wird dieser Anteil bis zum Ende des Beobachtungszeitraumes wieder größer und beträgt am 05.07.2007 15,3 %. Die Gründe dafür können vielfältig sein. Die Bildqualität ist zum einen abhängig vom Erfahrungsstand und der Geübtheit der Person, die die Minirhizotron-Bilder aufgenommen hat. Die Aufnahmen für diese Arbeit wurden beispielsweise von drei verschiedenen Personen vorgenommen. Denkbar sind zum anderen auch intensive Regenereignisse als weiterer Einflussfaktor. Bei diesen Regenereignissen kann es zur Ansammlung von Ablagerungen oder Wassertropfen außen auf den Röhren kommen und so die Bildqualität herabgesetzt werden. Hervorgerufen wird dies durch Niederschlagswasser, das zwischen Boden und Außenwand der Messgrube in die Tiefe gelangt. Am 25.05.2007 kam es zu einem Regenereignis mit insgesamt 74,7 mm/m² Niederschlag (vgl. 3.1.2 Seite 27). Bei den beiden Bildaufnahmetermen nach diesem Niederschlagsereignis nimmt vermutlich daraufhin der Anteil der Minirhizotron-Bilder mit schlechter und mittlerer Qualität im Vergleich zum 23.05.2007 wieder zu (vgl. Abbildung 27).

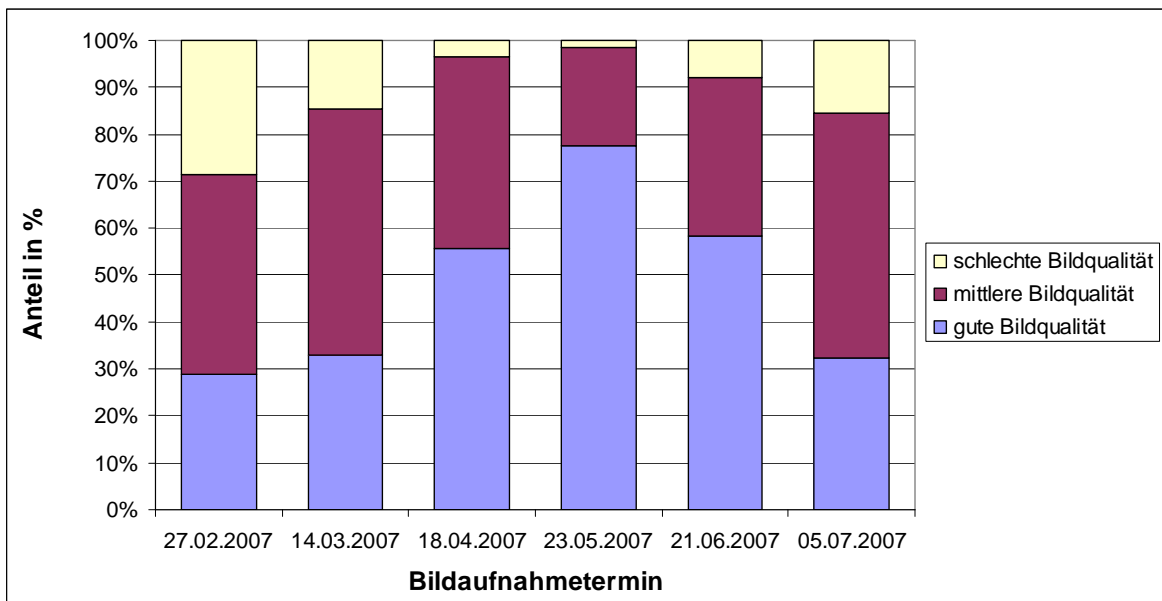


Abbildung 27: Verteilung der Bildqualitätsklassen pro Bildaufnahmetag

Es zeigen sich bei der Betrachtung der Anteile der Minirhizotron-Bilder mit schlechter Qualität pro Tiefenbereich (vgl. Abbildung 28) ebenfalls große Unterschiede innerhalb eines Bildaufnahmetages. Die Grafik zeigt, dass am 21.06.2007 in 45 cm Tiefe 5,6 % und in 120 cm Tiefe 28,9 % der Minirhizotron-Bilder eine schlechte Qualität besitzen. Ebenso schwankt diese in einem Tiefenbereich im Verlauf der Zeit sehr. Während beispielsweise am 27.02.2007 in 75 cm Tiefe noch 38,9 % der Minirhizotron-Bilder eine schlechte Qualität aufweisen, finden sich am 23.05.2007 in diesem Tiefenbereich nur gute und mittlere Bildqualitäten. Die Ergebnisse der Bildqualitätsanalyse sind bei der

Interpretation der Ergebnisse der computergestützten Bildanalyseverfahren mit einzubeziehen.

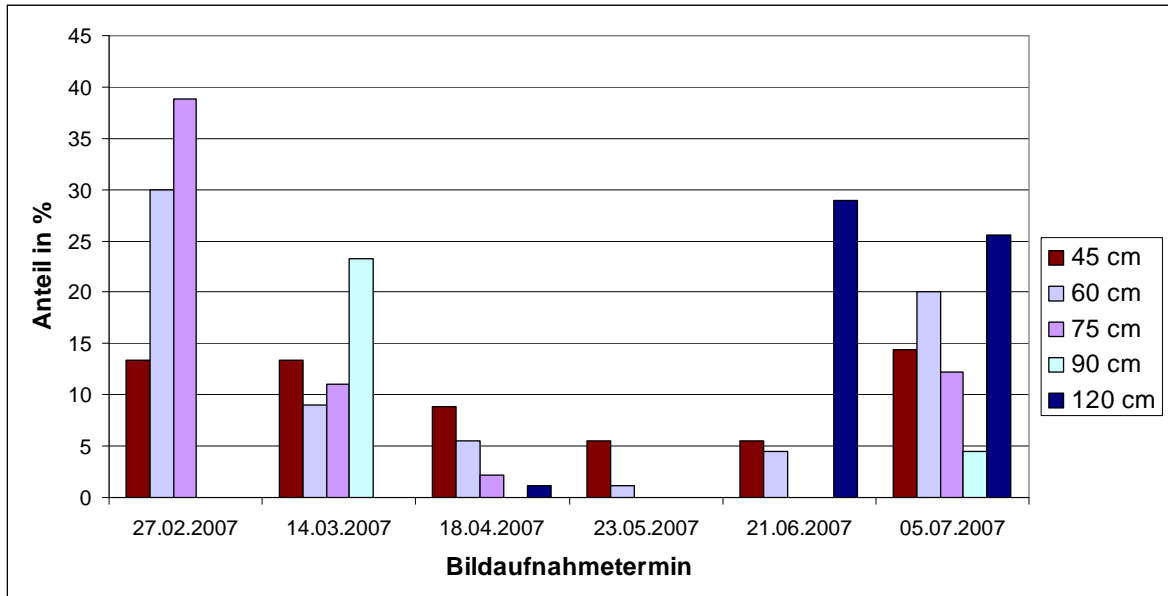


Abbildung 28: Anteil der Minirhizotron-Bilder mit schlechter Bildqualität pro Tiefenbereich und Bildaufnahmetermin

4.2 Minirhizotron-Technik

Ein entscheidender Nutzen der Minirhizotron-Technik zeigt sich anhand des Kenntniskennnisgewinns über die Entwicklung der Durchwurzelungstiefen im Beobachtungszeitraum. Bereits die Bildaufnahme mit der Minirhizotron-Technik liefert einen Überblick über den Verlauf des vertikalen Wurzelwachstums im Beobachtungszeitraum. Dazu ist keine computergestützte Aufbereitung der Minirhizotron-Bilder nötig. Grund dafür ist, dass im Rahmen dieser Untersuchung nur Minirhizotron-Bilder in den Tiefenbereichen aufgenommen wurden, in denen Wurzeln der aktuellen Kulturart vorhanden waren. Beim ersten Bildaufnahmetermin am 27.02.2007 (159 Tage nach der Aussaat) haben die Wurzeln des Winterweizens schon eine Tiefe von 75 cm erreicht (vgl. Abbildung 29). Da für die Zeit der Aussaat bis zum ersten Bildaufnahmetermin keine Angaben zur Wurzeltiefe vorliegen, ist dieser Teil gestrichelt dargestellt. Beim fünften Bildaufnahmetermin (201 Tage nach der Aussaat) betrug die maximale Wurzeltiefe 120 cm. Bis zur Ernte kam es zu keinem weiteren ersichtlichen vertikalen Wachstum in tiefere Bodenbereiche. Ebenfalls in Abbildung 29 dargestellt ist die Entwicklung der Wuchshöhe des Winterweizens. Auffällig ist, dass die Wurzeln ihre maximale Tiefe bereits am 201. Tag nach der Aussaat erreicht haben, der oberirdische Teil der Pflanze aber erst 35 Tage später seine maximale Wuchshöhe erreicht. Des Weiteren zeigt sich, dass das Wurzelwerk am 159. Tag schon eine Tiefe von 90 cm, der obere Pflanzenteil aber gerade einmal 30 cm Wuchshöhe erreicht hat. Dadurch werden

die Erkenntnisse von KUTSCHERA (1960) bestätigt (vgl. Seite 10), die feststellte, dass das Wurzelwachstum zu Beginn der vegetativen Phase am größten ist und dem Wachstum des Sprosses vorausseilt.

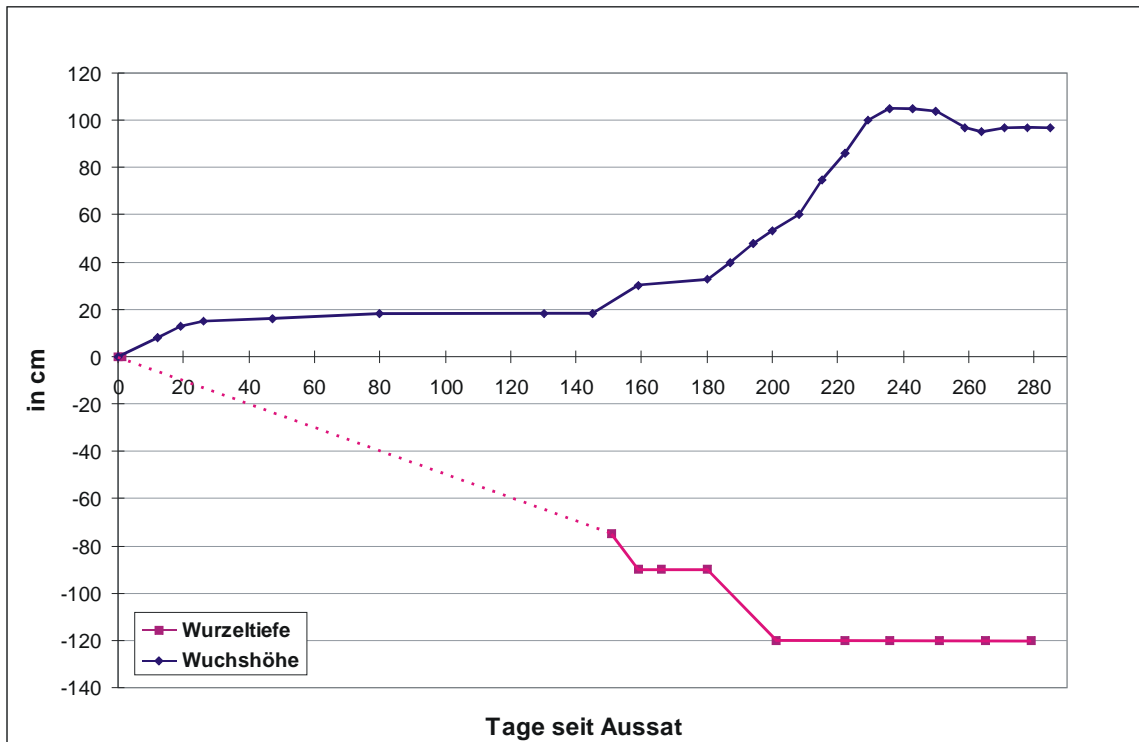


Abbildung 29: Wurzeltiefe und Wuchshöhe im Verlauf der Pflanzenentwicklung

4.2.1 Vergleich der WinRHIZO Tron MF und MiRIA Daten

Nach der Datenaufbereitung mit WinRHIZO Tron MF stehen für alle Wurzelkenngrößen der toten Wurzeln lediglich Daten für den 27.02.2007 und den 05.07.2007 zur Verfügung (vgl. Abbildung 30). Für alle diese Kenngrößen ergibt sich eine Abnahme innerhalb dieses Zeitraums. Für die Vergleichbarkeit der Ergebnisse der Programme MiRIA und WinRHIZO Tron MF ist es nötig auch für die fehlenden Bildaufnahmetermine WinRHIZO Tron MF Daten der toten Wurzeln zu besitzen, da MiRIA Wurzeln unabhängig vom Lebensstatus detektiert. Durch das Wissen über die Daten jeder Wurzelkenngröße für den 27.02.2007 und den 05.07.2007 kann eine Berechnung für die dazwischen liegenden Bildaufnahmetermine vorgenommen werden. Voraussetzung dafür ist die Annahme einer linearen Abnahme innerhalb dieses Zeitraums. Die einzelnen Daten der lebenden Wurzeln sind für jeden der sechs Bildaufnahmetermine bekannt und werden zu den berechneten Daten der toten Wurzeln hinzuaddiert. Dieses Prinzip wird für alle Wurzelkenngrößen toter Wurzeln (Win) angewendet. Die Gegenüberstellung der so teilweise manuell ermittelten und teilweise berechneten WinRHIZO Tron MF Daten mit den MiRIA Daten ist sinnvoll, da eine Abnahme aller Kenngrößen der toten Wurzeln vom

27.02.2007 hin zum 05.07.2007 anhand der manuell ermittelten Daten nachgewiesen wurde. Trotzdem ist es möglich, dass die Abnahme nicht vollkommen linear abgelaufen ist. Dies muss bei der Gegenüberstellung der Ergebnisse beachtet werden.

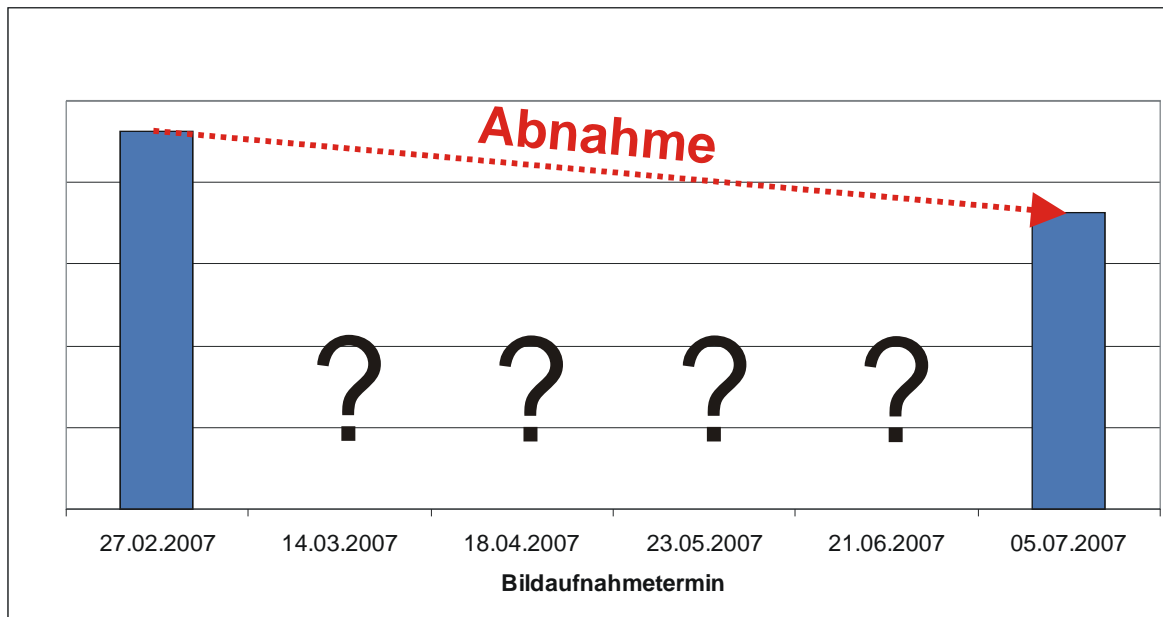


Abbildung 30: Verfügbarkeit von Daten über tote Wurzeln (Win)

Zur Einschränkung dieser Vorgehensweise ist zu sagen, dass bei der Berechnung der toten Wurzeln nur Aussagen über die Daten der oberen drei Röhren gemacht werden können, da beim Bildaufnahmetermin 27.02.2007 nur Minirhizotron-Bilder für diesen Tiefenbereich aufgenommen wurden. Auch die Daten der Kenngrößen der toten Wurzeln können daher nur für diese drei Röhren berechnet werden. Dies hat ebenfalls zur Folge, dass ein Vergleich und eine Korrelation zwischen den WinRHIZO Tron MF und MiRIA Daten nur für diese drei Röhren über den gesamten Beobachtungszeitraum vorgenommen werden kann.

In Abbildung 31 sind die ermittelten **Wurzelnzahlen** beider computergestützter Programme im Verlauf des Beobachtungszeitraumes gegenübergestellt. Sehr offensichtlich ist ein großer Unterschied zwischen den ermittelten Werten. **Mit dem Programm WinRHIZO Tron MF werden bei allen sechs Bildaufnahmeterminen deutlich mehr Wurzeln gefunden als mit MiRIA.** Durchschnittlich detektiert MiRIA nur 15,8 % der WinRHIZO Tron MF Wurzelnanzahl. Auch der Verlauf der Werte stimmt nicht überein. Während die Wurzelnanzahl in den Minirhizotron-Bildern, die mittels WinRHIZO Tron MF nachgezeichnet wurden, am 05.07.2007 ihren Minimalwert erreicht, ist die maximale Wurzelnanzahl der mittels MiRIA detektierten Minirhizotron-Bilder genau an diesem Bildaufnahmetermin zu finden.

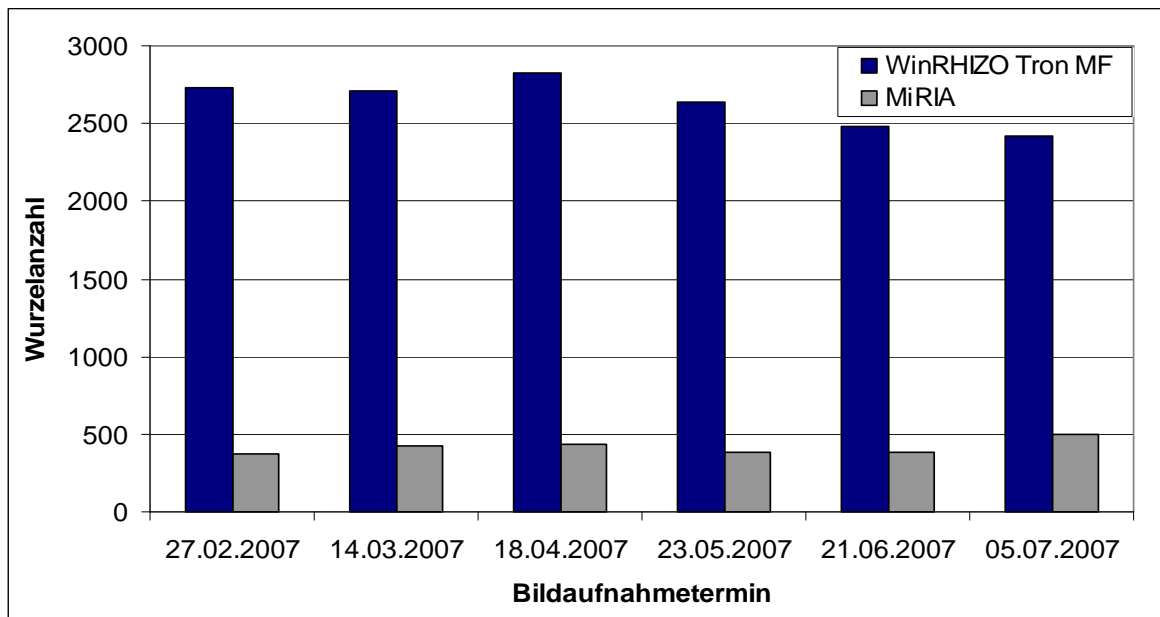


Abbildung 31: Vergleich der Wurzelanzahl (Röhre 1 - 3), ermittelt mit Win und MiR

Mit der Bildqualität kann dieser enorme zahlenmäßige Unterschied nicht allein begründet werden. Natürlich spielt die Qualität der Minirhizotron-Bilder eine sehr große Rolle. Nimmt man die Ergebnisse der Bildqualitätsanalyse zu Hilfe (vgl. Abbildung 27) zeigt sich, dass z. B. am 05.07.2007 der Anteil von Minirhizotron-Bildern mit mittlerer und schlechter Qualität besonders hoch ist. Die Wurzelanzahl (MiR) ist mit 20,6 % des WinRHIZO Tron MF Wertes aber sogar am höchsten. In Abbildung 32 ist der Grund dafür gut zu erkennen.

Vor allem bei Minirhizotron-Bildern mit vielen Wurzeln detektiert MiRIA zu wenig Wurzeln. Dargestellt ist in A das Minirhizotron-Bild V521BHM4_T001_L018_2007.02.27_105436_008_JAN.jpg nach der Bearbeitung in WinRHIZO Tron MF.

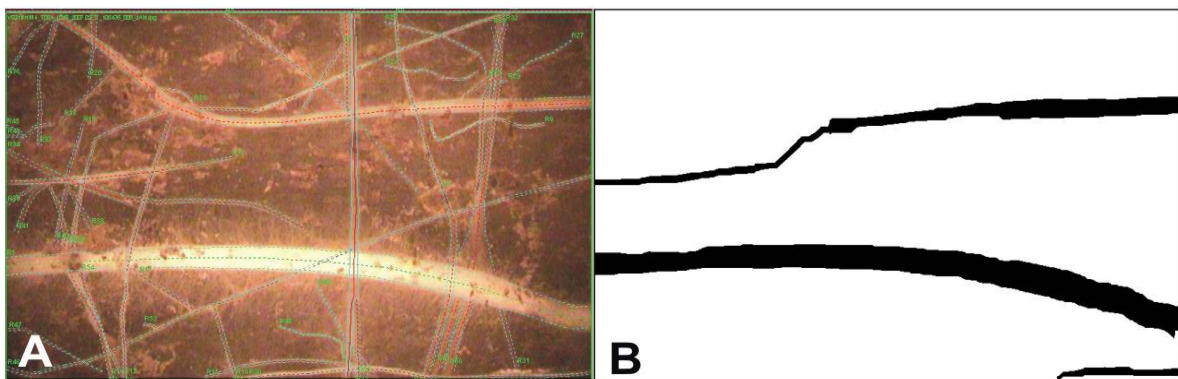


Abbildung 32: Minirhizotron-Bild nach der Bearbeitung mit WinRHIZO Tron MF und MiRIA V521BHM4_T001_L018_2007.02.27_105436_008_JAN.jpg

Das Minirhizotron-Bild wird in die Klasse guter Qualität eingeordnet. In Abbildung 32 B ist das MiRIA Binärbild des gleichen Minirhizotron-Bildes zu sehen. Während bei der manuellen Auswertung mit WinRHIZO Tron MF 51 Wurzeln entdeckt und vermessen

werden, detektiert MiRIA nur drei Wurzeln. Zu erkennen ist ebenfalls, dass MiRIA nur Wurzeln detektiert, deren farblicher Kontrast zum Hintergrund besonders ausgeprägt ist. Dabei handelt es sich meistens um lebende Wurzeln. **Die Wurzeln mit geringerem Durchmesser werden durch MiRIA sehr häufig nicht detektiert.**

Die durch MiRIA ermittelten Summen der einzelnen Wurzellängen (*Gesamtwurzellänge*) sind stets wesentlich kleiner als die durch die manuelle Auswertung mit WinRHIZO Tron MF ermittelten (vgl. Abbildung 33). Mit durchschnittlich 34,3 % nähern sich die Gesamtwurzellängen (MiR) aber schon etwas mehr den WinRHIZO Tron MF Werten an im Gegensatz zur Wurzelanzahl.

Begründen lassen sich die geringeren Werte mit der geringen Anzahl an detektierten Wurzeln. Da dies nur circa $\frac{1}{6}$ der durch die manuelle Auswertung mit WinRHIZO Tron MF ermittelten Wurzeln sind, können folgerichtig keine äquivalenten Gesamtwurzellängen ermittelt werden.

Da es in den beiden Programmen einen direkten Zusammenhang zwischen der projizierten zweidimensionalen Wurzelfläche (projizierte Gesamtwurzelfläche) und der dreidimensionalen Wurzeloberfläche (Gesamtwurzeloberfläche) gibt (vgl. Seite 37), wird der Vergleich für diese beiden Kenngrößen an dieser Stelle gemeinsam vorgenommen.

Abbildung 33 zeigt weitere Grafiken zu den Wurzelkenngrößen ***projizierte Gesamtwurzelfläche*** und ***Gesamtwurzeloberfläche***. Die durch MiRIA detektierten Werte nähern sich den WinRHIZO Tron MF Werten stärker an. **Durchschnittlich 75,6 % des WinRHIZO Tron MF Wertes der projizierten Gesamtwurzelflächen und der Gesamtwurzeloberflächen pro Bildaufnahmetermin detektiert MiRIA.**

4.2 Minirhizotron-Technik

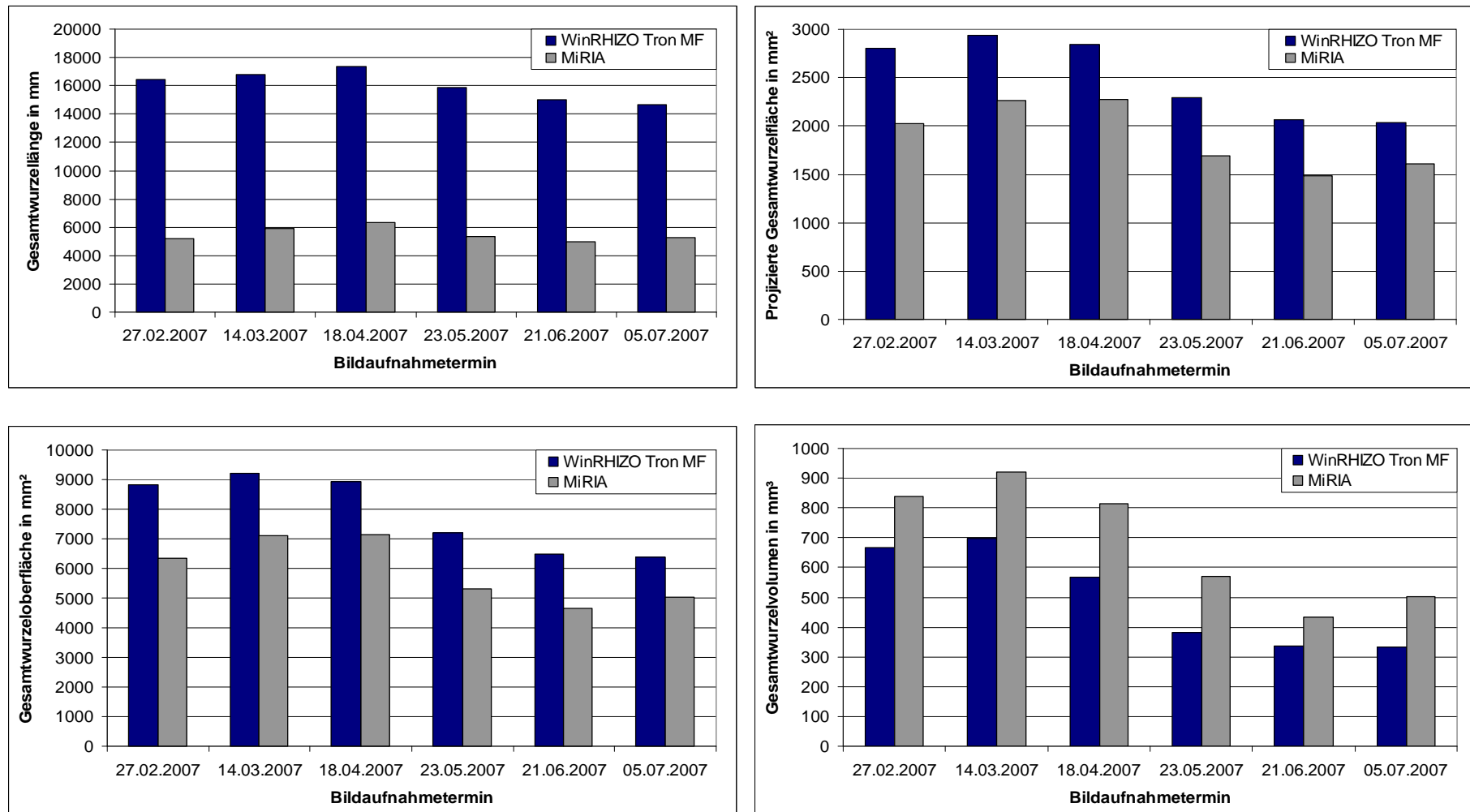


Abbildung 33: Vergleich verschiedener Wurzelkenngrößen (Röhre 1 – 3), ermittelt mit Win und MiR

Verwunderlich ist, dass die detektierten projizierten Gesamtwurzelflächen (MiR) und Gesamtwurzeloberflächen (MiR) über $\frac{3}{4}$ der WinRHIZO Tron MF Werte erreichen, da MiRIA wesentlich weniger Wurzeln und auch geringere Wurzellängen detektiert hatte. Ursache dafür ist in den detektierten Wurzel durchmessern (MiR) zu suchen. **Die Wurzel durchmesser, die mittels MiRIA detektiert wurden, sind durchschnittlich größer als die mittels WinRHIZO Tron MF ermittelten.** Um diese These zu stützen werden in Abbildung 34 die ermittelten Wurzel durchmesser beider Programme für den 05.07.2007 dargestellt. Vor allem im Tiefenbereich von 45 cm bis 60 cm, in dem zu jedem Bildaufnahme termin die meisten Wurzeln detektiert werden, ist der Wurzel durchmesser (MiR) durchschnittlich doppelt so groß. Zurückzuführen ist das auf die Detektion hauptsächlich lebender Wurzeln durch MiRIA. Lebende Wurzeln weisen gegenüber toten Wurzeln mit großer Häufigkeit einen größeren Wurzel durchmesser auf.

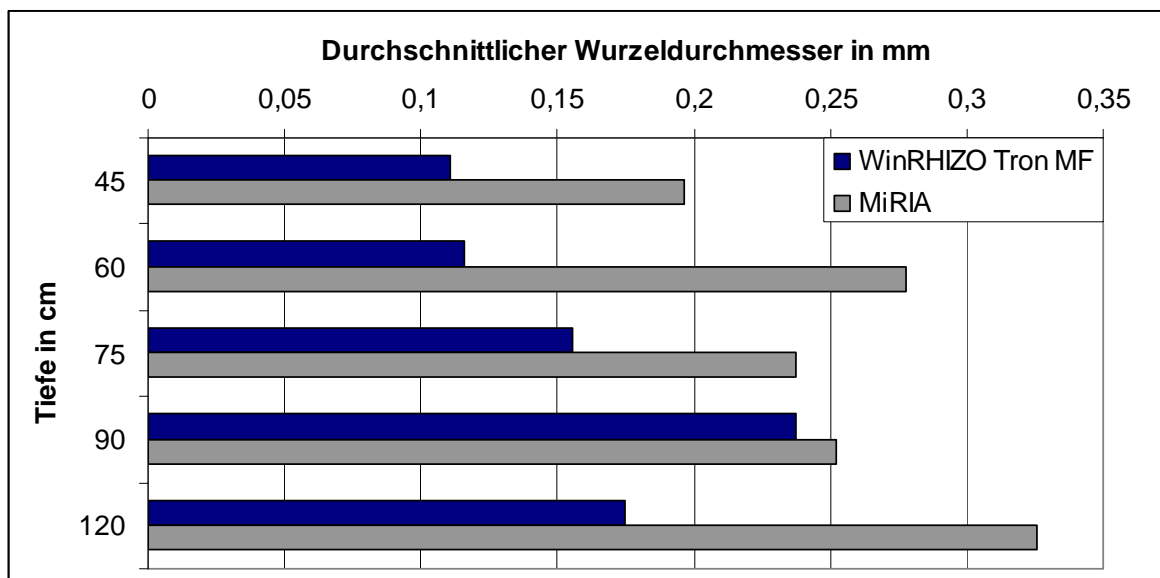


Abbildung 34: Vergleich der durchschnittlichen Wurzel durchmesser (05.07.2007)

Bei der Gegenüberstellung des ermittelten **Gesamtwurzelvolumens** pro Bildaufnahme termin der beiden Programme ergibt sich ein anderes Minirhizotron-Bild. In Abbildung 33 ist zu erkennen, dass MiRIA stets höhere Gesamtwurzelvolumina detektiert als WinRHIZO Tron MF. **Durchschnittlich ermittelt MiRIA 138,5 % des mit WinRHIZO Tron MF manuell vermessenen Wurzelvolumens.**

Als Grund dafür lassen sich, wie schon bei der projizierten Gesamtwurzelfläche und Gesamtwurzeloberfläche, die mittels MiRIA ermittelten durchschnittlich größeren Wurzel durchmesser nennen. Zur Berechnung des Wurzelvolumens wird bei beiden Programmen die Gleichung zur Berechnung eines geraden Zylinders (vgl. Formel 4) genutzt. Dadurch ergibt sich ein größerer Einfluss des Wurzel durchmessers für das

Wurzelvolumen als bei der Berechnung der projizierten Gesamtwurzelfläche und der Gesamtwurzeloberfläche.

$$V = \frac{\pi}{4} d^2 * l$$

V	Wurzelvolumen
π	Kreiszahl 3,1415926
d	Wurzeldurchmesser
l	Wurzellänge

Formel 4: Gleichung zur Berechnung des Wurzelvolumens

Als zweiter möglicher Grund ist die konstante Bildpunktgröße bei der Berechnung des Wurzelvolumens anhand der Binärbildinformationen zu nennen. Die Größe des aufgenommenen Beobachtungsbereichs kann sich bei den einzelnen Bildaufnahmetermin durch Veränderung der Zoomeinstellung des Minirhizotron-Kamerasystems ändern. Es kann jedoch keine Kalibrierung im Programm MiRIA vorgenommen werden und die Ermittlung eines zu großen Wurzelvolumens kann die Folge sein.

In Tabelle 6 werden die zuvor erwähnten Verhältnisse zwischen den durch MiRIA detektierten Kenngrößen gegenüber den mittels WinRHIZO Tron MF ermittelten zusammengefasst dargestellt.

Kenngröße	Durchschnittliches prozentuales Verhältnis von MiRIA Werten gegenüber WinRHIZO Tron MF Werten
Wurzelaanzahl	15,8 %
Gesamtwurzellänge	34,3 %
Projizierte Gesamtwurzelfläche	75,6 %
Gesamtwurzeloberfläche	75,6 %
Gesamtwurzelvolumen	138,5 %

Tabelle 6: Übersicht zum Verhältnis von MiRIA Werten und WinRHIZO Tron MF Werten pro Bildaufnahmetermin für verschiedene Wurzelkenngrößen

Die vorangegangene Gegenüberstellung bezog sich auf die Summe der Daten der jeweiligen Wurzelkenngrößen pro Bildaufnahmetermin, die im Tiefenbereich von 45 cm bis 75 cm ermittelt wurden. Am Beispiel der Gesamtwurzellänge soll nun genauer auf das Verhältnis in den einzelnen Tiefenbereichen für den Bildaufnahmetermin 05.07.2007 geschaut werden. Die Daten dieses Bildaufnahmetermins besitzen eine hohe Aussagekraft, da sowohl die lebenden als auch die toten Wurzeln in den Minirhizotron-Bildern mit dem Programm WinRHIZO Tron MF vermessen wurden.

Abbildung 35 zeigt die Gesamtwurzellängen, die mit beiden Programmen für die Tiefen 45 cm, 60 cm und 75 cm ermittelt wurden. Deutlich wird, dass in den einzelnen Tiefenbereichen die Verhältnisse unterschiedlich sind. Während in 45 cm und 60 cm Tiefe MiRIA 37,8 % und 31,1 % der WinRHIZO Tron MF Werte detektiert (vgl. Tabelle 7) und damit dem durchschnittlichen Anteilswert über dem gesamten Beobachtungszeitraum von 34,3 % (vgl. Tabelle 6) annähert, erreicht MiRIA in 75 cm Tiefe sogar 60,7 % der WinRHIZO Tron MF Werte.

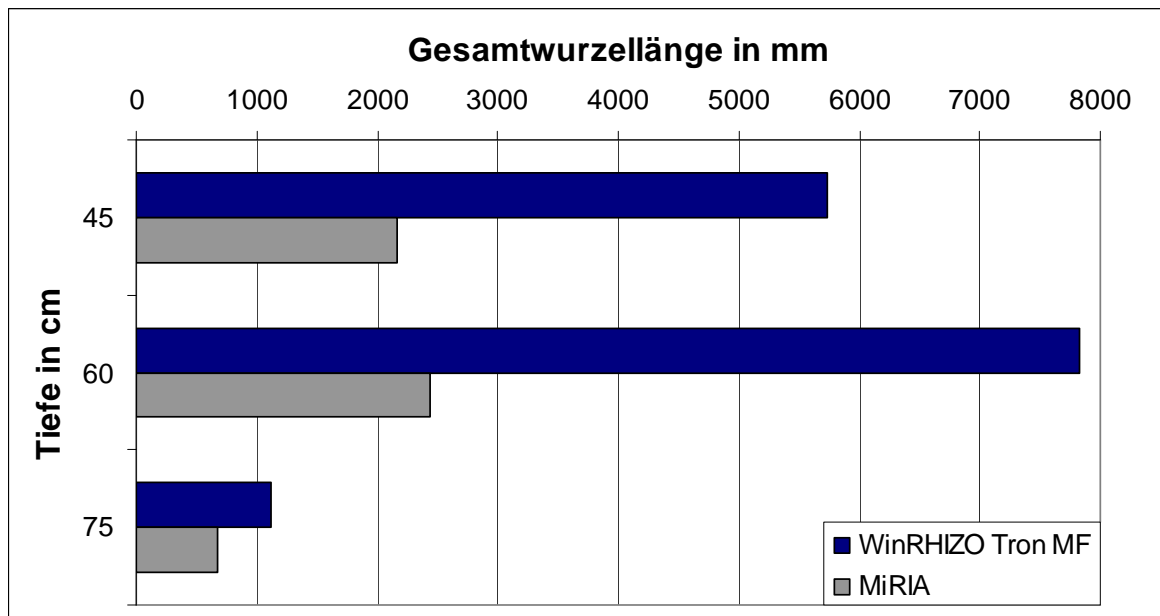


Abbildung 35: Vergleich der Gesamtwurzellänge (05.07.2007), ermittelt mit Win und MiR

Ein möglicher Grund dafür ist, dass sich besonders in den oberen beiden Tiefenbereichen sehr viele Wurzeln finden. Mittels manueller Auswertung mit WinRHIZO Tron MF wurden in 45 cm und 60 cm Tiefe zusammen 2253 Wurzeln ermittelt (vgl. Tabelle 7). MiRIA hingegen detektierte nur 427 und damit nur 18,9 %. In 75 cm Tiefe detektierte MiRIA 71 Wurzeln, dem 167 durch WinRHIZO Tron MF ermittelte Wurzeln gegenüberstehen. In Tiefenbereichen, in denen Minirhizotron-Bilder mit vielen Wurzeln aufgenommen wurden, hat MiRIA mit der Detektion der Wurzeln Schwierigkeiten. Das Netz aus teilweise mehr als 50 Wurzeln pro Minirhizotron-Bild kann das Programm nicht ausreichend detektieren und findet nur wenige Wurzeln pro Minirhizotron-Bild. **Auch bei guter Bildqualität detektiert MiRIA maximal sechs Wurzeln pro Minirhizotron-Bild. Bei der manuellen Bildanalyse mit WinRHIZO Tron MF werden bis zu 56 Wurzeln gefunden.** Ist die tatsächliche Wurzelanzahl pro Minirhizotron-Bild gering, verbessert sich auch das Verhältnis der von mit MiRIA detektierten Wurzeln gegenüber den mittels WinRHIZO Tron MF vermessenen. So kann MiRIA 42,5 % der Wurzelanzahl (Win) in den Minirhizotron-Bildern, die in 75 cm Tiefe aufgenommen wurden, finden (vgl. Tabelle 7). Aus diesem

Grund detektiert MiRIA dort eine Gesamtwurzellänge, die 60,7 % des WinRHIZO Tron MF Wertes entspricht.

	Wurzelanzahl			Gesamtwurzellänge		
	WinRHIZO Tron MF	MiRIA	Verhältnis	WinRHIZO Tron MF	MiRIA	Verhältnis
45cm	1075	271	25,2%	5736,8cm	2167,8cm	37,8 %
60cm	1178	156	13,2 %	7823,7cm	2436,6cm	31,1 %
75cm	167	71	42,5 %	1113,8cm	675,7cm	60,7 %

Tabelle 7: Übersicht zum Verhältnis zwischen WinRHIZO Tron MF und MiRIA Werten pro Tiefe für die Wurzelanzahl und Gesamtwurzellänge (05.07.2007)

Die Bildqualität kann als Grund für die unterschiedlichen Verhältnisse zwischen den ermittelten Werten beider Programme in den einzelnen Tiefen ebenfalls genannt werden. Es fiel bei der stichprobenartigen Betrachtung einzelner Minirhizotron-Bilder und den dazugehörigen Binärbildern auf, dass MiRIA bei Minirhizotron-Bildern mittlerer und schlechter Bildqualität Wurzeln detektiert, die nicht existent sind. Vor allem durch Verschmutzungen oder Wassertropfen an der Röhre kann dies hervorgerufen werden. Abbildung 36 veranschaulicht dies. Es handelt sich hierbei in A um ein Minirhizotron-Bild schlechter Qualität vom 05.07.2007 aus 75 cm Tiefe, indem mittels manuellem Verfahren mit WinRHIZO Tron MF keine Wurzel gefunden wurde. MiRIA detektiert hingegen zwei Wurzeln, die im Binärbild Abbildung 36 B zu sehen sind. Möglicherweise sind hierbei Kontraste zwischen den Verschmutzungen und dem Bildhintergrund dafür verantwortlich. **Insgesamt lässt sich feststellen, dass MiRIA auf der einen Seite real vorhandene Wurzeln nicht detektiert und andererseits Wurzeln detektiert werden, die nicht vorhanden sind.**

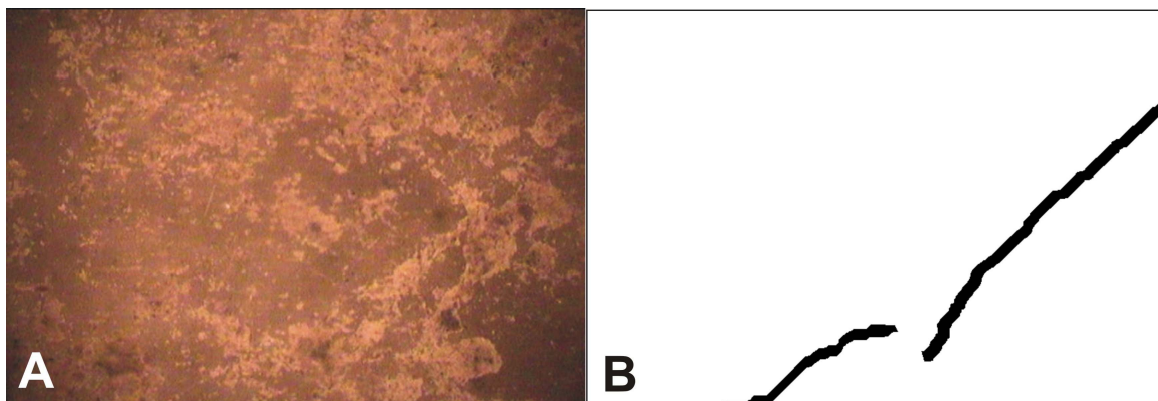


Abbildung 36: Minirhizotron-Bild V521BHM4_T003_L014_2007.07.05_141047_017_CHR.jpg nach der Bearbeitung mit WinRHIZO Tron MF (A) und MiRIA (B)

4.2.2 Korrelation der WinRHIZO Tron MF und MiRIA Daten

Um den Arbeitsaufwand für die Bildanalyse der Minirhizotron-Bilder weiter zu verringern, wäre eine vollautomatische Bildanalyse wünschenswert. Im bisherigen Ergebnisteil wurde deutlich, dass das vollautomatisch arbeitende Programm MiRIA gegenüber der manuellen Vermessung mit WinRHIZO Tron MF sehr unterschiedliche Ergebnisse liefert. Zu nennen ist vor allem die viel geringere Wurzelanzahl und die geringere Gesamtwurzellänge. Auf der anderen Seite detektiert MiRIA einen durchschnittlich größeren Wurzeldurchmesser. Das hat zur Folge, dass sich sowohl die MiRIA Werte zur projizierten Gesamtwurzelfläche und zur Gesamtwurzeloberfläche den WinRHIZO Tron MF Daten mehr angleichen. Beim Gesamtwurzelsvolumen führt es sogar zu einer Überschätzung der WinRHIZO Tron MF Daten durch die MiRIA Daten. Eine alleinige Verwendung des Programms MiRIA zur Gewinnung von quantitativen Daten erscheint deshalb nicht sehr vielversprechend.

Eine Verschneidung der Ergebnisse beider Programme könnte zu einer Verbesserung der Aussagekraft der MiRIA Werte führen. Dafür wird nun überprüft, ob ein Zusammenhang zwischen den durch beide computergestützte Bildanalyseverfahren ermittelten Wurzelkenngrößen existiert. Dazu werden im folgenden Abschnitt die einzelnen Kenngrößen im Verlauf des Beobachtungszeitraums miteinander korreliert. Die bei der Korrelation verwendeten MiRIA und WinRHIZO Tron MF Werte sind in Tabelle 8 dargestellt.

Bei der Korrelation der Wurzelanzahlen zeigt sich, dass der Zusammenhang zwischen den MiRIA und WinRHIZO Tron MF Werten sehr klein ist (vgl. Abbildung 37). Das Bestimmtheitsmaß beträgt nur 0,12, weil die Streuung der Werte um die Regressionsgerade sehr stark ist.

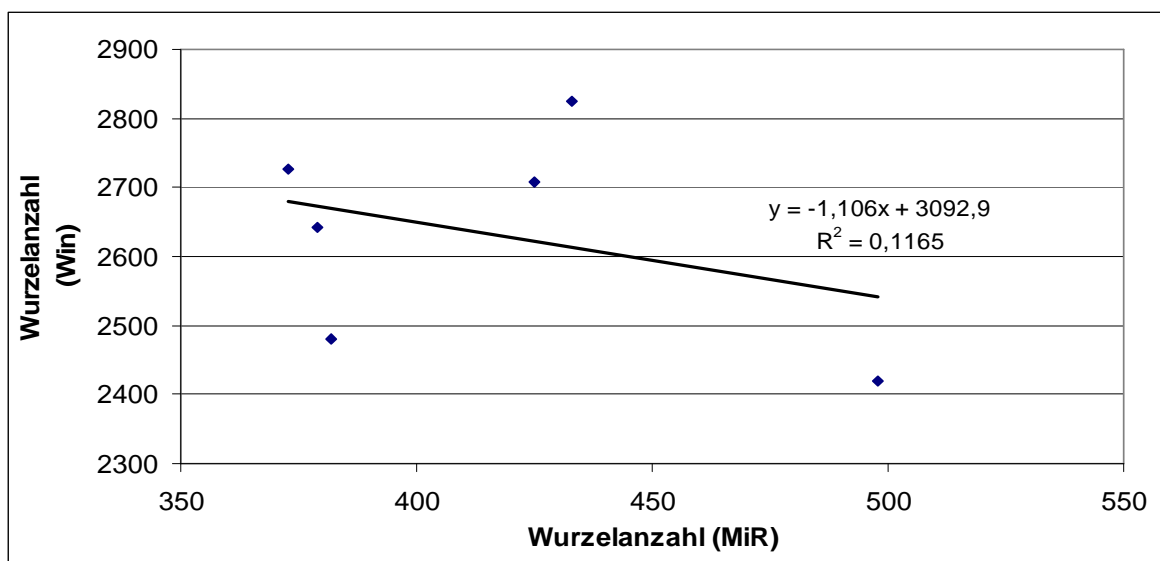


Abbildung 37: Korrelation der Wurzelanzahlen (Röhre 1 – 3), ermittelt mit Win und MiR

Als Grund für den geringen Zusammenhang der beiden Datenreihen ist denkbar, dass auch hier die generelle Problematik der Wurzelerkennung durch MiRIA die Ursache ist. Da nur Wurzeln detektiert werden, die besonders kontrastreich gegenüber dem Hintergrund sind, ist anzunehmen, dass in Kombination mit unterschiedlichen Bildqualitäten große Varianzen innerhalb der MiRIA Detektion entstehen. In Abbildung 38 A lässt sich sehr leicht im originalen Minirhizotron-Bild erkennen, dass zwei Wurzeln vorhanden sind. MiRIA detektiert genau diese zwei Wurzeln (vgl. Abbildung 38 B), weil vermutlich der Kontrast zum Hintergrund sehr gut ist. Abbildung 38 C zeigt ein anderes Minirhizotron-Bild mit vielen, aber feineren Wurzeln als in Abbildung 38 A. Durch MiRIA werden hier ebenfalls zwei Wurzeln detektiert (vgl. Abbildung 38 D). Daraus ergeben sich erhebliche Diskrepanzen zwischen den Ergebnissen beider Programme.

4.2 Minirhizotron-Technik

Datum	WinRHIZO Tron MF	MiRIA	WinRHIZO Tron MF	MiRIA	WinRHIZO Tron MF	MiRIA
	Wurzelaanzahl	Wurzelaanzahl	Gesamtwurzel- länge in mm	Gesamtwurzel- länge in mm	Projizierte Gesamtwurzel- fläche in mm ²	Projizierte Gesamtwurzel- fläche in mm ²
27.02.2007	2727	373	16436,10	5168,37	2804,56	2021,85
14.03.2007	2708	425	16766,21	5895,41	2934,32	2266,21
18.04.2007	2826	433	17361,64	6367,01	2842,81	2268,89
23.05.2007	2641	379	15883,33	5318,84	2294,43	1690,54
21.06.2007	2481	382	15028,81	4969,06	2068,40	1483,80
05.07.2007	2420	498	14674,35	5280,09	2031,21	1603,82

Datum	WinRHIZO Tron MF	MiRIA	WinRHIZO Tron MF	MiRIA
	Gesamtwurzeloberfläche in mm ²	Gesamtwurzeloberfläche in mm ²	Gesamtwurzelvolumen in mm ³	Gesamtwurzelvolumen in mm ³
27.02.2007	8810,78	6351,64	665,94	840,06
14.03.2007	9218,45	7119,29	697,21	921,03
18.04.2007	8930,96	7127,71	567,11	814,06
23.05.2007	7208,17	5310,84	382,57	571,82
21.06.2007	6498,07	4661,37	335,30	432,65
05.07.2007	6381,22	5038,39	332,22	500,45

Tabelle 8: Gegenüberstellung verschiedener Wurzelkenngrößen (Röhre 1 – 3), ermittelt mit Win und MiR

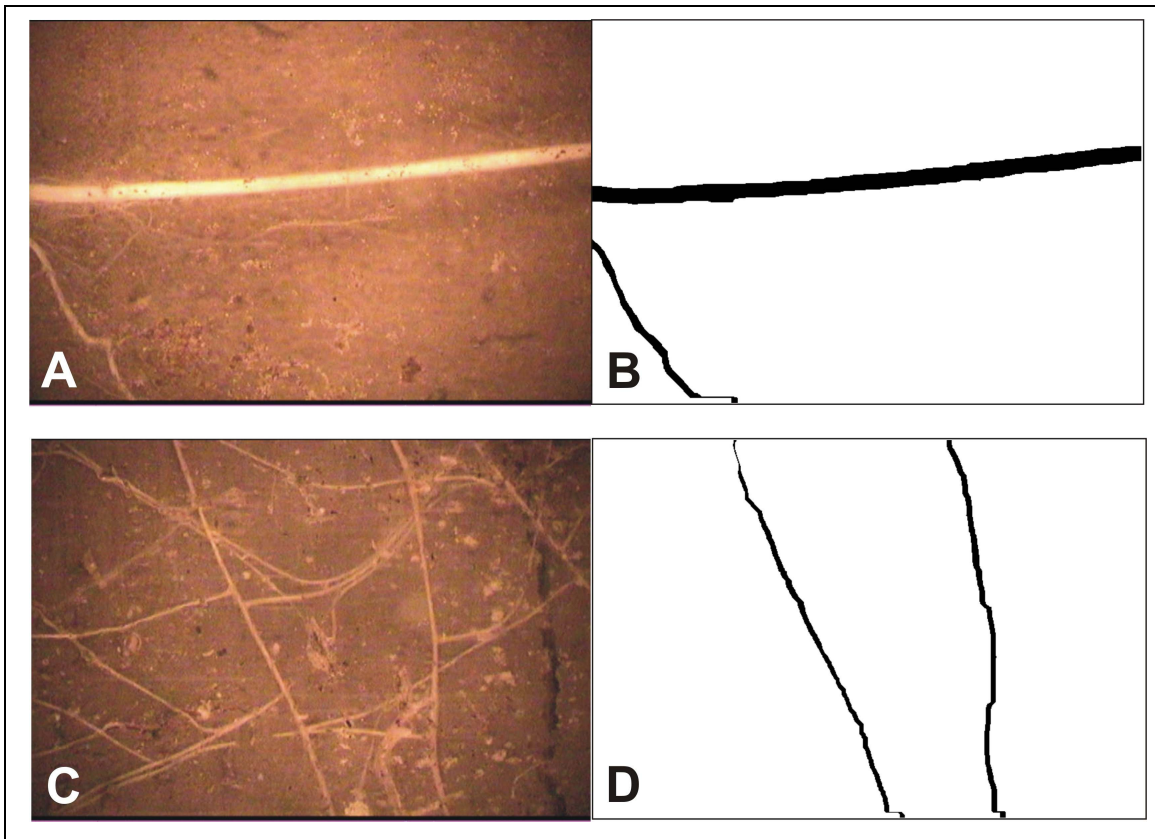


Abbildung 38: Vergleich der MiRIA Detektion am Beispiel zweier Minirhizotron-Bilder
 (A: V521BHM4_T003_L066_2007.04.18_132538_012_EEE;
 C: V521BHM4_T001_L060_2007.04.18_130731_012_EEE)

Als ein weiterer möglicher Grund für den geringen Zusammenhang ist die Berechnung der Anzahl der toten Wurzeln zwischen dem 27.02.2007 und dem 05.07.2007 für die WinRHIZO Tron MF Daten (vgl. Seite 37).

Die Korrelationen der Kenngrößen Gesamtwurzellänge, projizierte Gesamtwurzelfläche, Gesamtwurzeloberfläche und Gesamtwurzelvolumen sind in Abbildung 39 (Seite 64) dargestellt. Die dafür verwendeten Daten zeigt Tabelle 8 (Seite 62). Für jede Kenngröße wird die Summe, der aus den Röhren 1 bis 3 ermittelten Werte, beider Programme pro Bildaufnahmetermin miteinander korreliert. Bei der Gesamtwurzellänge ist nur eine mäßige Korrelation zu verzeichnen, weil das Bestimmtheitsmaß 0,64 beträgt. Besonders der Messwert vom 27.02.2007 befindet sich relativ weit entfernt von der Regressionsgeraden. Mit einem Bestimmtheitsmaß von 0,94 ist hingegen bei der projizierten Gesamtwurzelfläche und der Gesamtwurzeloberfläche ein guter Zusammenhang zwischen den Werten der beiden Bildanalyseverfahren gegeben. Beim Gesamtwurzelvolumen findet sich sogar ein Bestimmtheitsmaß von 0,96.

4.2 Minirhizotron-Technik

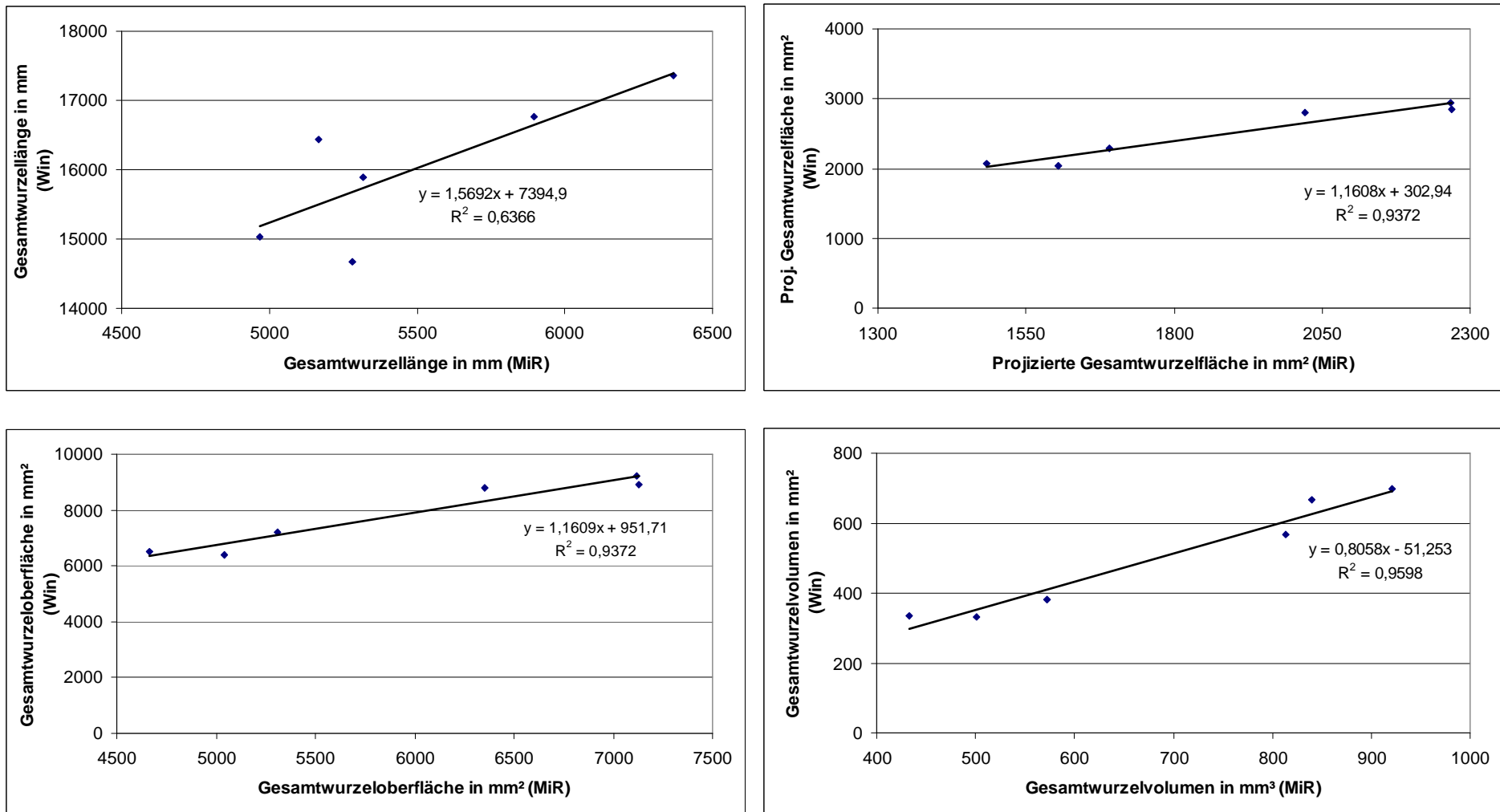


Abbildung 39: Korrelation verschiedener Wurzelkenngrößen (Röhre 1 – 3), ermittelt mit Win und MiR

Für die mäßige Korrelation der MiRIA Werte zur Gesamtwurzellänge gegenüber den WinRHIZO Tron MF Werten können dieselben Gründe genannt werden, die schon bei der Korrelation der Wurzelanzahlen angesprochen wurden: Die im Vergleich zwischen MiRIA und WinRHIZO Tron MF sehr unterschiedliche Anzahl ermittelter Wurzeln und die Bildqualität. Besonders am 27.02.2007 gibt es mit 28,5 % sehr viele Minirhizotron-Bilder schlechter Qualität in der Tiefe von 45 cm bis 75 cm. Die guten Korrelationen bei den weiteren Kenngrößen kommen zustande, weil bei den Berechnungen zur Ermittlung der Kenngrößen die Unterschiede immer weiter eliminiert werden. Dadurch kommt es zu ähnlichen Entwicklungen im Verlauf des Beobachtungszeitraums (vgl. Abbildung 33 Seite 55).

Um noch genauere Aussagen über den Zusammenhang zwischen MiRIA und WinRHIZO Tron MF Werten treffen zu können, werden weitere Korrelationen zwischen MiRIA und WinRHIZO Tron MF Kenngrößen für einen einzelnen Bildaufnahmetermin durchgeführt. Der Bildaufnahmetermin 05.07.2007 wurde dafür gewählt, weil an diesen Bildaufnahmetermin sowohl die lebenden als auch die toten Wurzeln manuell mit WinRHIZO Tron MF vermessen wurden. Es ergeben sich völlig andere Zusammenhänge als bei der vorherigen Korrelation der Datenreihen über den gesamten Beobachtungszeitraum. In Tabelle 9 werden die einzelnen Zusammenhänge zwischen MiRIA und WinRHIZO Tron MF Daten in Form des Bestimmtheitsmaßes für beide Korrelationsvarianten gegenübergestellt. Es zeigt sich, dass die Korrelation der Datenreihen des Gesamtwurzelvolumens für den Bildaufnahmetermin 05.07.2007 mit einem Bestimmtheitsmaß von 0,14 einen sehr geringen Zusammenhang ergibt. Bei der vorangegangenen Korrelation der Datenreihen für den gesamten Beobachtungszeitraum wies das mit MiRIA detektierte Gesamtwurzelvolumen hingegen mit einem Bestimmtheitsmaß von 0,96 noch den besten Zusammenhang auf. Ähnliche Auffälligkeiten zeigen sich für alle Wurzelkenngrößen (vgl. Tabelle 9).

	Bestimmtheitsmaße der Korrelationen für gesamten Beobachtungszeitraum	Bestimmtheitsmaße der Korrelationen für Bildaufnahmetermin 05.07.2007
Wurzelanzahl	0,12	0,69
Gesamtwurzellänge	0,64	0,93
Projizierte Gesamtwurzelfläche	0,94	0,74
Gesamtwurzeloberfläche	0,94	0,74
Gesamtwurzelvolumen	0,96	0,14

Tabelle 9: Vergleich der Bestimmtheitsmaße zweier Korrelationsvarianten

Die sehr unterschiedlichen Zusammenhänge der einzelnen Kenngrößen bei den beiden Korrelationsvarianten lassen den Schluss zu, dass die ermittelten Daten des Programms

MiRIA nicht dieselben aussagekräftigen Ergebnisse liefern wie die Daten des Programms WinRHIZO Tron MF. Eine Verschneidung der Daten beider Programme würde deshalb keine befriedigenden Ergebnisse liefern. **Eine Verringerung des Arbeits- und Zeitaufwandes ist durch die Verwendung des Programms MiRIA nicht möglich. Ebenfalls kann MiRIA zur Quantifizierung der Rhizodeposition im Rahmen dieser Arbeit nicht herangezogen werden.**

4.2.3 Test einer verringerten Minirhizotron-Bilderanzahl für die Bildauswertung mit WinRHIZO Tron MF

Da die für diese Untersuchung verwendete Version von MiRIA keine gehaltvollen Daten liefern kann, soll nun eine weitere Möglichkeit ausgeschöpft werden, um effizienter Daten mit Hilfe der Minirhizotron-Methode zu ermitteln. Hauptproblem der manuellen Bildauswertung mit WinRHIZO Tron MF ist, dass ein geübter Bearbeiter für ein Minirhizotron-Bild mit 33 Wurzeln durchschnittlich 15 Minuten benötigt. Durch die hohe Anzahl der Minirhizotron-Bilder ergibt sich daher ein hoher zeitlicher Aufwand. Logisches Ziel wäre die Anzahl der auszuwertenden Minirhizotron-Bilder pro Röhre zu verringern, dabei aber trotzdem Daten zu erhalten, die mit den Daten der Gesamtheit der Minirhizotron-Bilder einer Röhre korrelieren.

Dieser Ansatz wurde mit den Daten der manuellen Auswertung mit WinRHIZO Tron MF getestet. Dazu sind 30 Minirhizotron-Bilder pro Tiefenbereich des Bildaufnahmeterrains 05.07.2007 ausgewählt worden. Für die 30 Minirhizotron-Bilder pro Röhre wurden in jedem Tiefenbereich die Minirhizotron-Bilder mit den Positionsnummern 31 bis 60 ausgesucht. Diese bilden einen zusammenhängenden Ausschnitt aus einer theoretischen, 90 Minirhizotron-Bilder umfassenden Minirhizotron-Bilderreihe, die sich bei der Aufnahme ergibt. Dieser Ausschnitt wird willkürlich und ohne Beachtung der Bildqualität und der Wurzelanzahl bestimmt. In Abbildung 40 ist das Prinzip dargestellt.

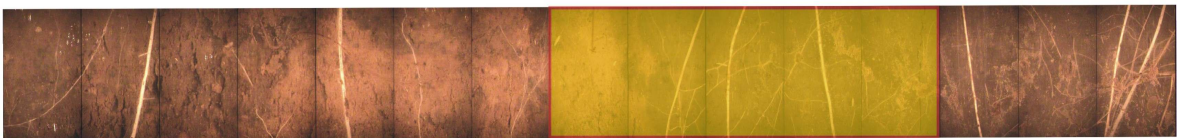


Abbildung 40: Schematische Darstellung der Stichprobenauswahl

Die Daten der Minirhizotron-Bilder der Stichproben werden mit den Daten der Minirhizotron-Bilder der dazugehörigen gesamten Röhren gegenübergestellt. Es wird überprüft, ob ein Zusammenhang besteht. Alle Daten umfassen die toten und die lebenden Wurzeln.

Die Korrelation ergibt, dass bei allen Wurzelkenngrößen ein Zusammenhang zwischen den Daten, die aus 30 und denen, die aus 90 Minirhizotron-Bildern ermittelt wurden, besteht. Bei der Wurzelanzahl ergibt sich ein Bestimmtheitsmaß von 0,96 und somit ein starker Zusammenhang (vgl. Abbildung 41).

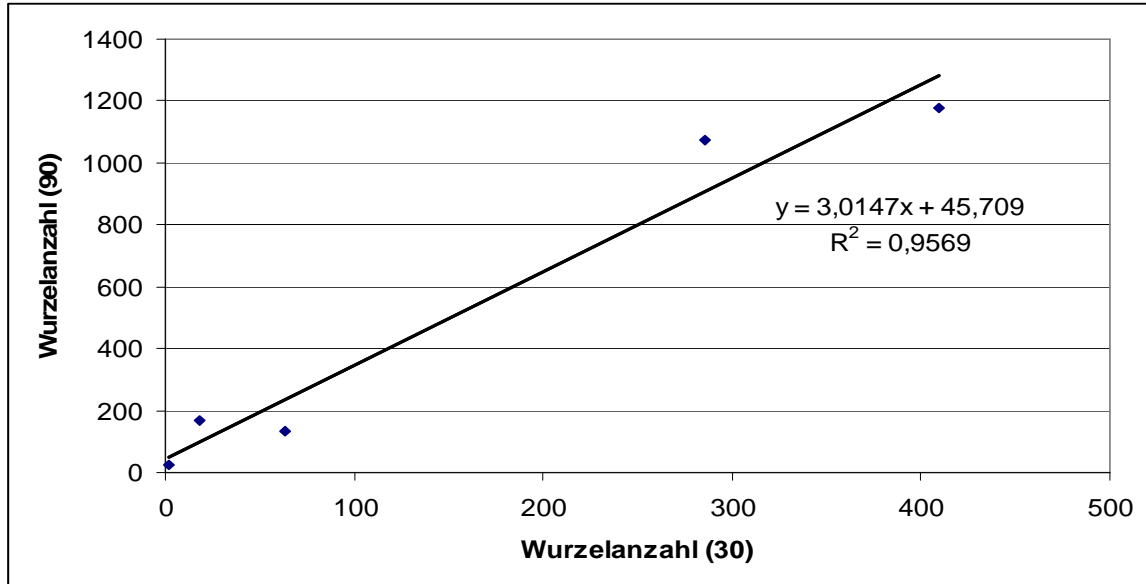


Abbildung 41: Korrelation der Wurzelanzahlen aus 30 und 90 Minirhizotron-Bildern (05.07.2007), ermittelt mit Win

Bei der Gesamtwurzellänge, der projizierten Gesamtwurzelfläche und der Gesamtwurzeloberfläche ergibt sich mit einem Bestimmtheitsmaß von 0,95, 0,96 und 0,96 ebenfalls ein guter Zusammenhang zwischen den Daten der Stichprobe und den Daten der gesamten Minirhizotron-Bilder einer Röhre (vgl. Abbildung 42). Ein guter Zusammenhang der Daten zum Gesamtwurzelvolumen ist mit einem Bestimmtheitsmaß von 0,89 ebenfalls gegeben.

4.2 Minirhizotron-Technik

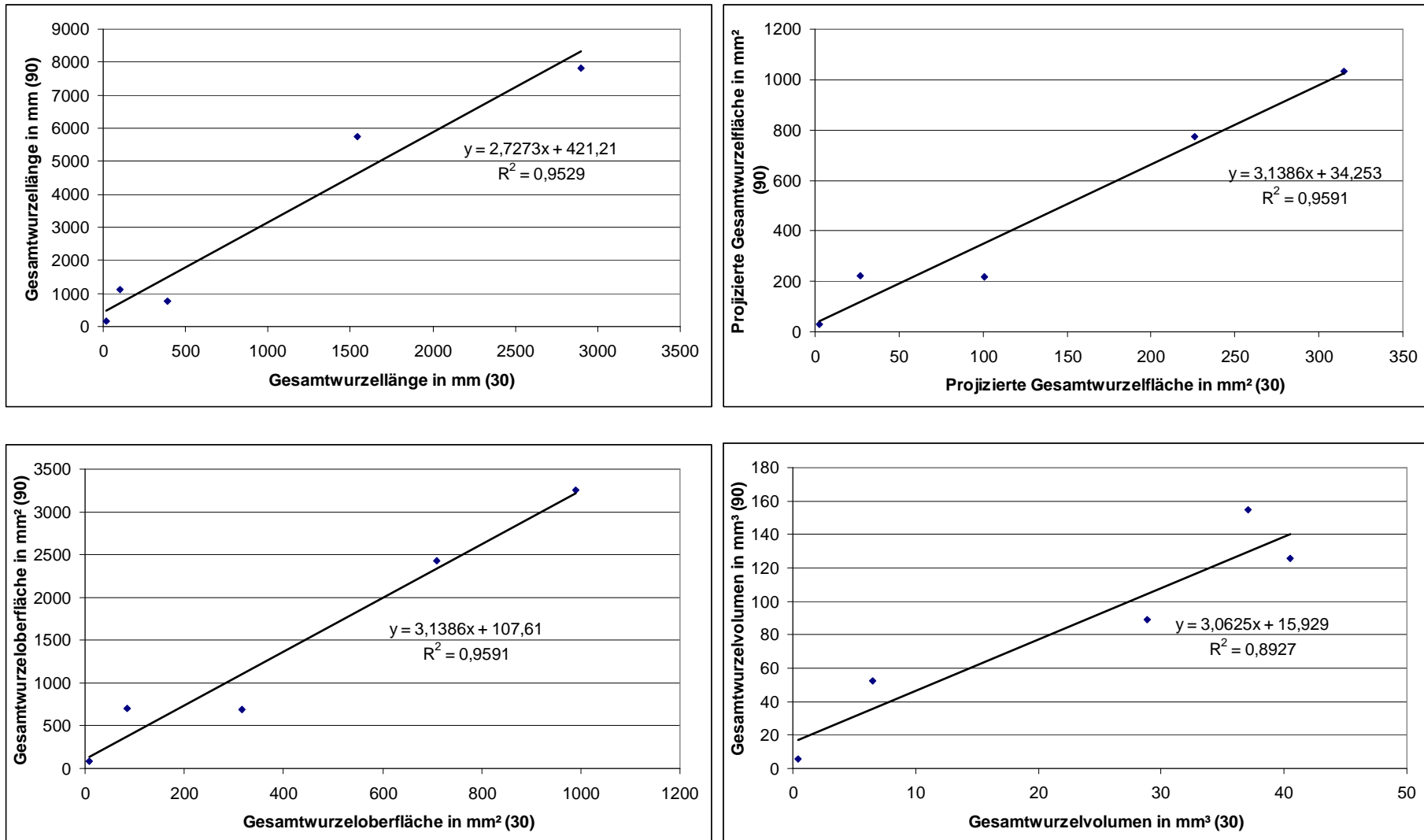


Abbildung 42: Korrelation verschiedener Wurzelkennwerte aus 30 und 90 Minirhizotron-Bildern (05.07.2007), ermittelt mit Win

Insgesamt kann gesagt werden, dass eine Verringerung des Arbeits- und Zeitaufwandes bei der Bearbeitung von Minirhizotron-Bildern mit WinRHIZO Tron MF durch eine Verkleinerung der Bilderanzahl pro Röhre auf 30 Minirhizotron-Bilder möglich ist.

4.3 Bohrkernmethode

Die Bohrkernmethode mit daran anschließenden Verfahren zur Gewichtsbestimmung und zur Rasterauszählung ermittelt verschiedene quantitative Kenngrößen der Wurzel im Boden. Alle Daten umfassen sowohl lebende als auch tote Wurzeln, da bei der Auswaschung der Wurzeln keine Unterscheidung und Trennung vorgenommen wurde. Alle Angaben zur Masse beziehen sich auf die Wurzeltrockenmasse. Als erstes werden die Ergebnisse der Bestimmung der Wurzelmasse und anschließend die Ergebnisse des Rasterauszählungsverfahrens vorgestellt.

In Abbildung 43 sind die Wurzelmassendichten der vier Probennahmepunkte im Tiefenverlauf dargestellt. Die Angaben zur Wurzelmasse beziehen sich stets auf die Trockenmasse der Wurzeln. Die oberen 40 cm des Bodens werden für jeden Probennahmepunkt zusammengefasst, weil Minirhizotron-Daten für diesen Bereich des Bodens nicht vorliegen. Bei einer Korrelation der Datenreihen der Bohrkernmethode mit denen der Minirhizotron-Methode kann dieser Bereich nicht einbezogen werden. Der rote Balken in jedem Tiefenbereich gibt den Durchschnittswert an. Deutlich zu erkennen ist die starke Schwankung pro Tiefenabschnitt zwischen den einzelnen Standorten. Grund dafür ist die Heterogenität der Wurzelverteilung im Boden. Es zeigt sich außerdem, dass besonders in den oberen 40 cm die Wurzelmasse je cm^3 besonders groß ist. Sie ist durchschnittlich mit $0,51 \text{ mg/cm}^3$ mehr als doppelt so groß wie im direkt darunter befindlichen Bodenabschnitt (40 cm bis 50 cm). Die Ergebnisse decken sich mit den von ALTERMANN et al. (2005) in Bad Lauchstädt ermittelten Stärken der Durchwurzelung in den verschiedenen Bodenhorizonten. Es lässt sich darauf schließen, dass der obere Bodenbereich den Wurzeln des Winterweizens die besten Wachstumsbedingungen bietet und es dadurch zu einem besonders dichten Wurzelwerk kommt. Ein Grund dafür kann in der konventionellen Bewirtschaftung gesucht werden, bei der es durch Bodenbearbeitungsmaßnahmen zu einer Auflockerung des Bodens kommt. Mit zunehmender Tiefe nimmt der durchschnittliche Wert der Wurzelmassendichte fast stetig ab. Nur bei den Werten in den Tiefenbereichen 70 cm bis 80 cm und 100 cm bis 110 cm kommt es zu einer geringen Zunahme der Werte gegenüber dem darüber liegenden Tiefenbereich.

Aus diesen Ergebnissen ist ersichtlich, dass das Wurzelwerk vornehmlich im oberen Bodenbereich besonders ausgeprägt ist. Diese Erkenntnis hat vor allem Einfluss auf die Beurteilung der in dieser Arbeit umgesetzten Minirhizotron-Methode. **Minirhizotron-Röhren sind in den oberen 45 cm des Bodens nicht vorhanden und deshalb existieren keine Minirhizotron-Daten für den Bodenbereich mit der größten Wurzelmasse.**

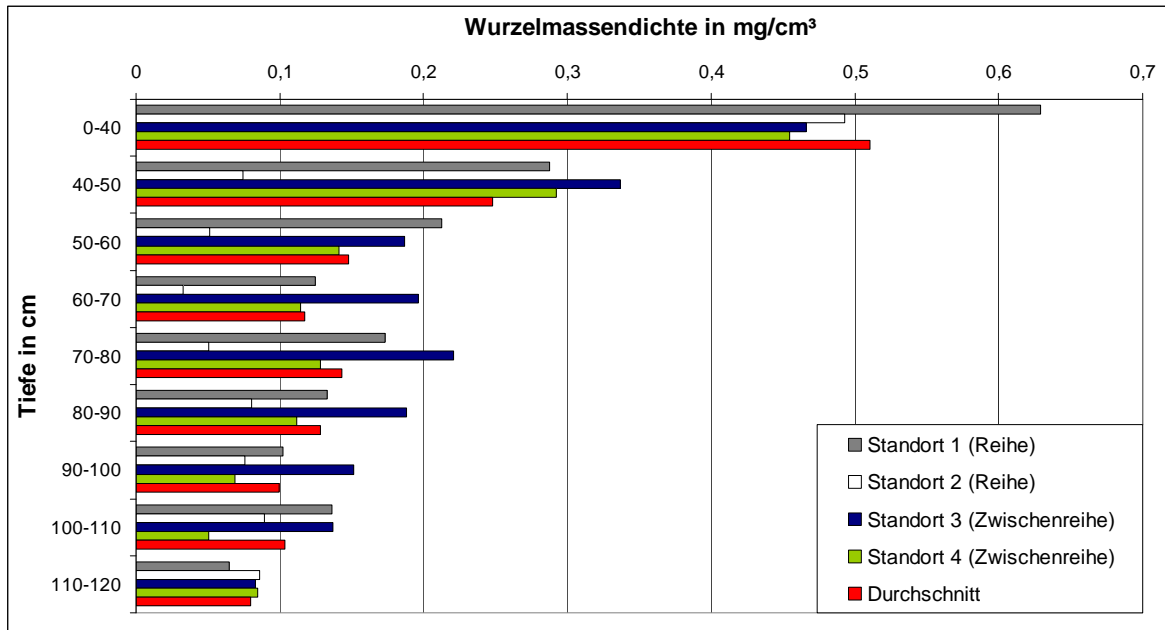


Abbildung 43: Tiefenverteilung der Wurzelmasse (Boh)

Die prozentuale Verteilung der Wurzelmasse (vgl. Abbildung 44) bestätigt ebenfalls die Erkenntnisse, welche schon in der Grafik zur Wurzelmasse ersichtlich waren. Durchschnittlich beläuft sich das Wurzeltrockengewicht auf 31,09 kg/m². 65,7 % der gesamten Wurzeltrockenmasse finden sich in den oberen 40 cm des Bodens. Auch hier gibt es Schwankungen zwischen den einzelnen Probennahmepunkten, das bestätigt die Heterogenität des Wurzelwerkes innerhalb des Bodens und unterstreicht die Notwendigkeit mehrerer Beprobungspunkte.

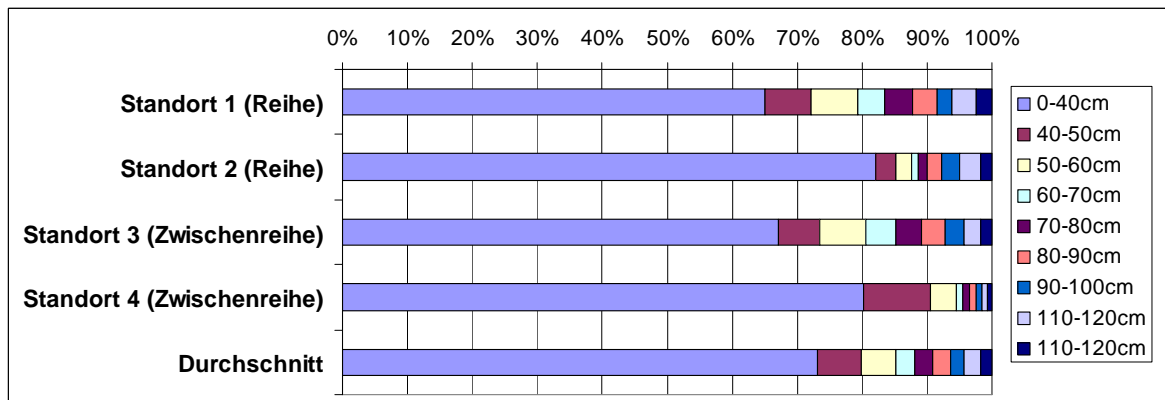


Abbildung 44: Verteilung der Wurzelmasse (Boh) pro Tiefenbereich

Die Entwicklung des Verlaufs der Wurzellängendichte mit zunehmender Tiefe ist in Abbildung 45 dargestellt. Es ist erkennbar, dass der Verlauf dem der Wurzelmassendichte ähnelt. Besonders hoch sind die Werte mit durchschnittlich 2,9 cm/cm³ im Tiefenbereich von 0 cm bis 40 cm und mit zunehmender Tiefe sinken die Werte fast stetig. Wie auch bei der Wurzelmassendichte kommt es im Tiefenbereich von 100 cm bis 110 cm zu einem geringen Anstieg gegenüber dem darüber liegenden Tiefenbereich. Auch hier wird das Problem der verwendeten Umsetzung der Minirhizotron-Methode deutlich, denn es finden sich die mit Abstand größten Werte in den oberen 40 cm des Bodens, der durch Minirhizotron-Röhren jedoch nicht erschlossen ist.

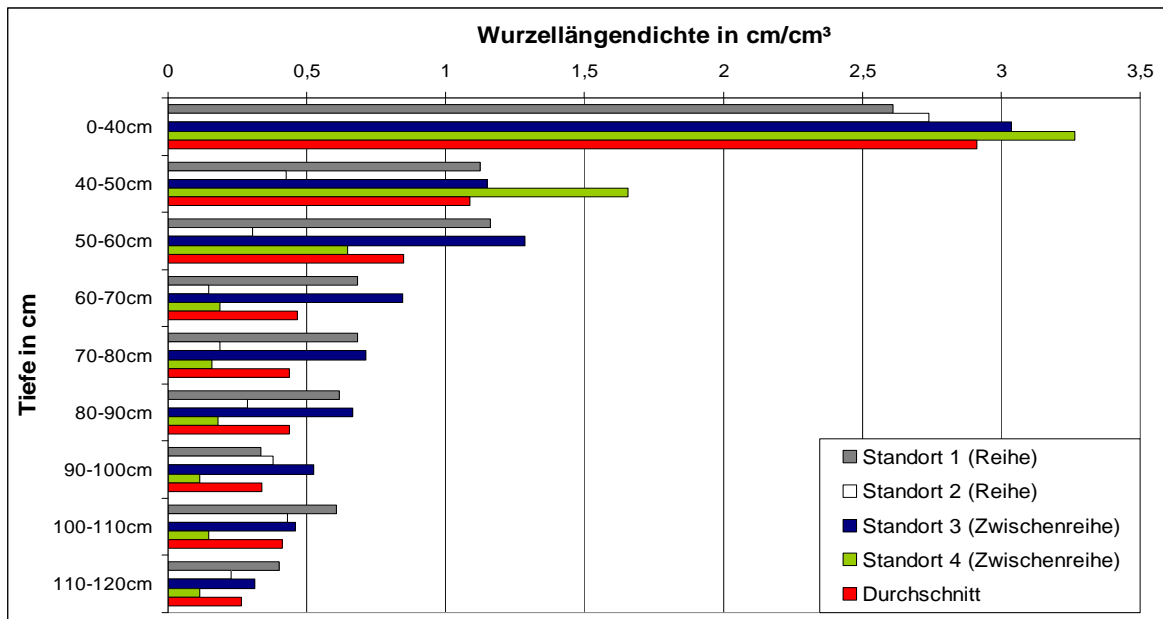


Abbildung 45: Tiefenentwicklung der Wurzellängendichte (Boh)

Anhand der Verteilung der Wurzellänge auf die verschiedenen Tiefenbereiche des Bodens (vgl. Abbildung 46) werden die Erkenntnisse der Verteilung der Wurzelmasse im Boden bestätigt. Die durchschnittliche Wurzellänge beträgt 15,94 km/m², wovon sich 73,1 % in den oberen 40 cm des Bodens befinden.

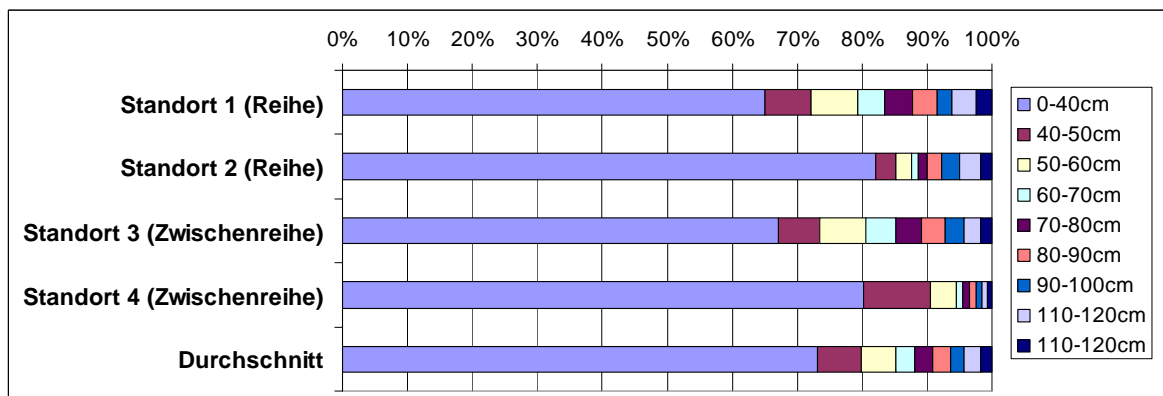


Abbildung 46: Verteilung der Wurzellänge (Boh) pro Tiefenbereich

Um den Zusammenhang und die Aussagekraft der Wurzelmasse und Wurzellängendichte zu unterstreichen wurde eine Korrelation zwischen beiden Datenreihen durchgeführt. Die dafür verwendeten Werte sind in Tabelle 10 aufgeführt. Mit einem ermittelten Bestimmtheitsmaß von 0,98 besteht ein sehr guter Zusammenhang zwischen Wurzelmasse und Wurzellängendichte. Dieses Ergebnis betont die gute Anwendbarkeit der Daten für eine Korrelation mit den Daten der Bohrkernmethode sowie die Verwendung als Referenzwerte für eine Quantifizierung der Rhizodeposition.

Tiefenbereich	Wurzelmasse in mg/cm ³	Wurzellängendichte in cm/cm ³
0cm-40cm	0,51	2,91
40cm-50cm	0,25	1,08
50cm-60cm	0,15	0,85
60cm-70cm	0,12	0,46
70cm-80cm	0,14	0,44
80cm-90cm	0,13	0,44
90cm-100cm	0,09	0,34
100cm-110cm	0,10	0,41
110cm-120cm	0,08	0,26

Tabelle 10: Werte zur Korrelation zwischen der Wurzelmasse (Boh) und der Wurzellängendichte (Boh)

4.4 Minirhizotron-Methode vs. Bohrkernmethode

Um eine Quantifizierung der Deposition von Wurzeln im Boden vornehmen zu können reichen die mittels der Minirhizotron-Methode ermittelten Daten nicht aus. Erst durch Referenzgrößen, welche die tatsächliche Wurzelmasse oder -länge im Boden widerspiegeln, können die Minirhizotron-Daten stärkere Aussagekraft gewinnen. Aus diesem Grund wurde die Bohrkernmethode angewendet. Somit stehen Minirhizotron-Daten vom 05.07.2007 und Daten zur tatsächlichen Wurzelmasse und -länge vom 17.07.2007 zur Verfügung. Da sich der Winterweizen schon am Ende seiner Entwicklung befand und kein weiteres Wurzelwachstum zu erwarten war, wird es als irrelevant angesehen, dass zwischen beiden Datenaufnahmen eine Zeitspanne von 12 Tage lag. Weil im Kapitel 4.2.2 (Seite 60) festgestellt wurde, dass mit den Daten des Programms MiRIA keine Quantifizierung der Rhizodeposition ermittelt werden kann, wird bei einer Gegenüberstellung der MiRIA Daten mit den Daten der Bohrkernmethode verzichtet. Im Folgenden werden aber die Ergebnisse des Programms WinRHIZO Tron MF für den 05.07.2007 und die ermittelten Werte der Bohrkernmethode gegenübergestellt. Dadurch soll ermittelt werden, ob die Daten miteinander korrelieren.

Dafür wurden Überlegungen angestellt, welche WinRHIZO Tron MF Daten den Referenzgrößen der Bohrkernmethode, Wurzelmasse und Wurzellängendichte, gegenübergestellt werden können. Da die mit WinRHIZO Tron MF ermittelte Gesamtwurzellänge die Summe aller Wurzellängen in einem Ausschnitt des Bodens in einer bestimmten Tiefe repräsentiert, wird der Zusammenhang dieser Kenngröße mit der Wurzellängendichte geprüft. Die Wurzelmasse wird mit dem Gesamtwurzelvolumen korreliert, weil bei gleicher Masse der Wurzeln das Gewicht und das Volumen in einem direkten Zusammenhang stehen.

4.4.1 Zusammenhang zwischen der Gesamtwurzellänge und der Wurzellängendichte

Als erstes sollen die Gesamtwurzellängen des Bildauswertungsprogramms WinRHIZO Tron MF pro Tiefe mit der Wurzellängendichte pro Tiefe korreliert werden. Um die Daten miteinander vergleichbar zu machen ist es notwendig die Werte aus den gleichen Tiefenbereichen gegenüberzustellen. Abbildung 47 zeigt schematisch die Lösung, die dafür gefunden wurde. Den Daten zur Wurzellängendichte aus den oberen 40 cm des Bodens können keine Minirhizotron-Daten gegenübergestellt werden. Für die anderen Tiefenbereiche werden z. B. den ermittelten Minirhizotron-Daten aus 45 cm Tiefe die Daten der Bohrkernmethode aus dem Tiefenbereich 40 cm bis 50 cm gegenübergestellt. Bei der Röhre 2 in 60 cm Tiefe werden die Daten dem Mittelwert der Wurzellängendichte aus den beiden Tiefenbereichen 50 cm bis 60 cm und 60 cm bis 70 cm gegenübergestellt (vgl. Tabelle 11).

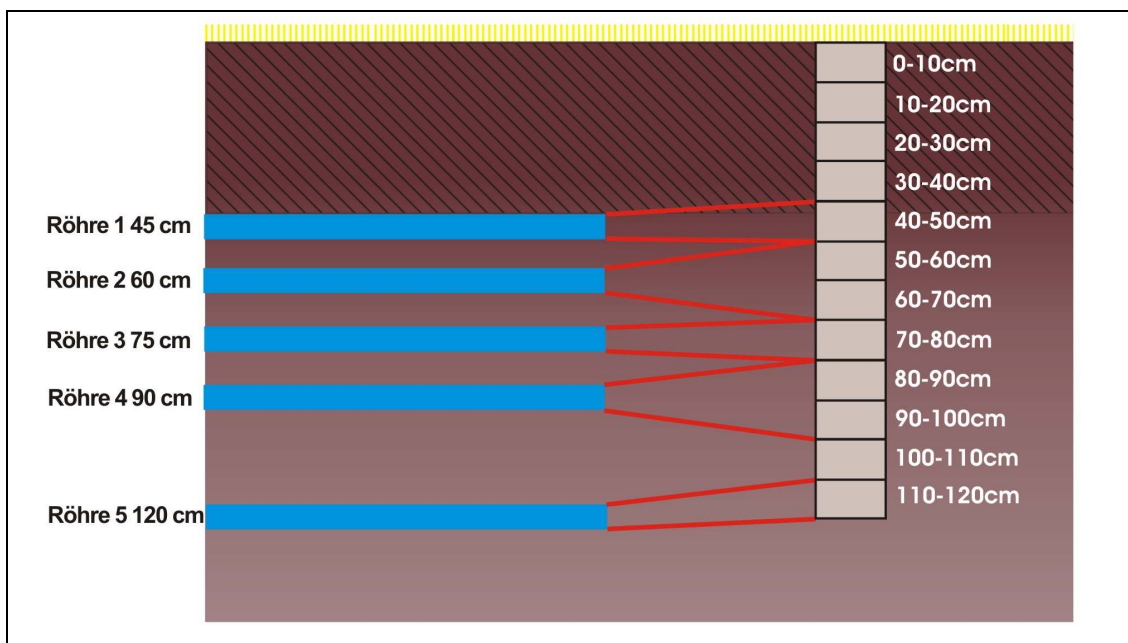


Abbildung 47: Schematische Darstellung zur Datenverknüpfung zwischen Minirhizotron-Methode und Bohrkernmethode

Werte ermittelt aus	Wurzellängendichte in cm/cm ³	Wurzelmasendichte in mg/cm ³
40 cm-50 cm	1,08	0,25
Mittelwert 50 cm-70 cm	0,66	0,13
70 cm-80 cm	0,44	0,14
Mittelwert 80 cm-100 cm	0,39	0,11
110 cm-120 cm	0,26	0,08

Tabelle 11: Übersicht zu den Referenzdaten (Boh)

Die Korrelationen zwischen den Gesamtwurzellängen (Win) des 05.07.2007 und der Wurzellängendichte ergeben mit einem Bestimmtheitsmaß von 0,57 keinen ausreichenden Zusammenhang (vgl. Abbildung 48).

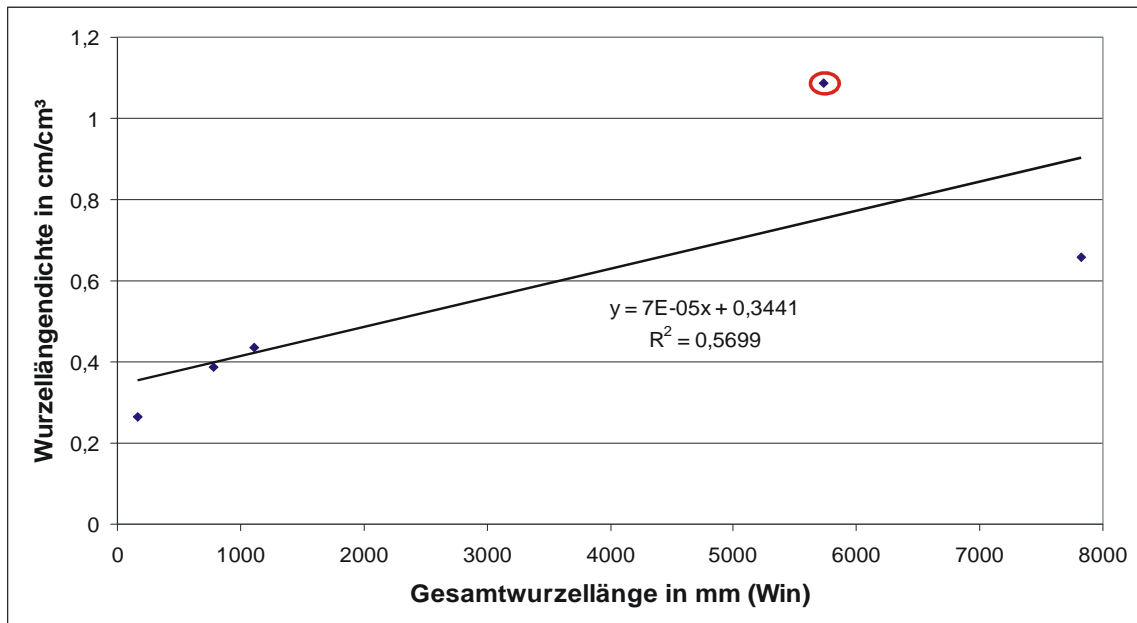


Abbildung 48: Korrelation der Wurzellängendichte (Boh) mit der Gesamtwurzellänge (Win)

Der Grund für die schlechte Korrelation ist ein Wertepaar, das besonders weit entfernt von der Regressionsgeraden liegt. In Abbildung 48 ist dieses Wertepaar rot markiert. Hervorgerufen wird dieser Ausreißer durch eine Auffälligkeit im Tiefenverlauf der Gesamtwurzellänge (Win). Mit Hilfe des Programms werden in den Minirhizotron-Bildern aus 60 cm Tiefe größere Wurzellängen ermittelt als in den Minirhizotron-Bildern des darüber liegenden Tiefenbereichs (vgl. Abbildung 49). Die Wurzellängendichte nimmt hingegen mit zunehmender Tiefe stetig ab (vgl. Tabelle 11).

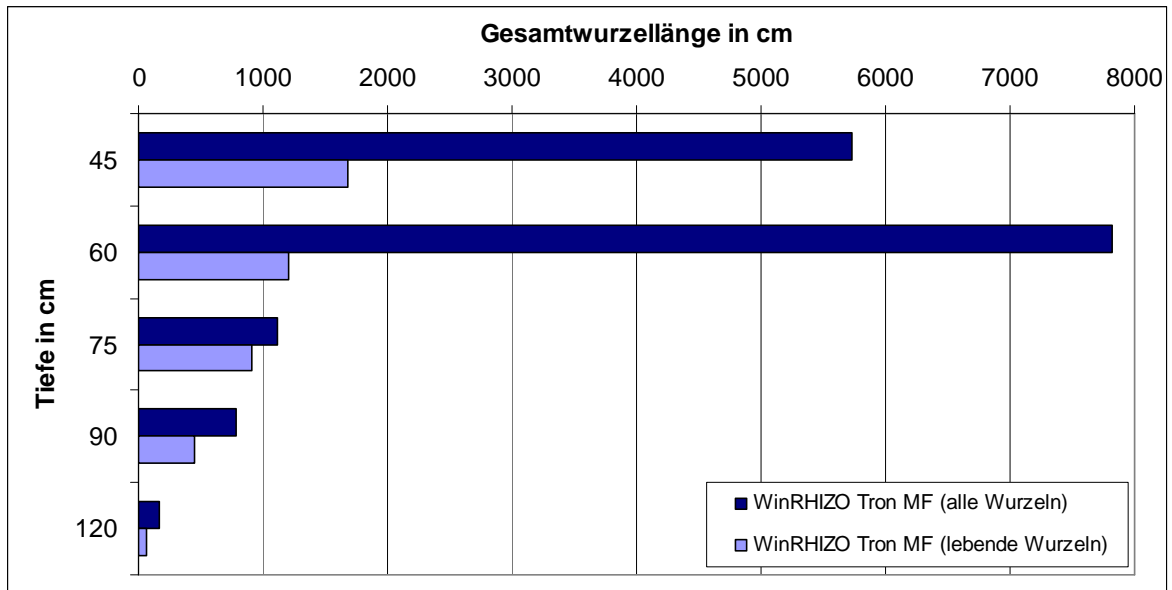


Abbildung 49: Vergleich der Tiefenentwicklung der Gesamtwurzellänge der lebenden und aller Wurzeln (Win)

Nimmt man für eine Korrelation nur die Gesamtwurzellängen (Win) der lebenden Wurzeln hinzu, ergeben sich weitaus bessere Zusammenhänge zwischen Wurzellängendichte (Boh) und Gesamtwurzellänge (Win). Abbildung 50 zeigt, dass bei dieser Korrelation mit einem Bestimmtheitsmaß von 0,88 ein relativ guter Zusammenhang zwischen beiden Wurzelkenngrößen vorhanden ist. Ein Grund für die bessere Korrelation ist die Tatsache, dass der Tiefenverlauf der Gesamtwurzellänge lebender Wurzeln ebenfalls mit zunehmender Tiefe abnimmt (vgl. Abbildung 49) und somit dem der Wurzellängendichte eher entspricht.

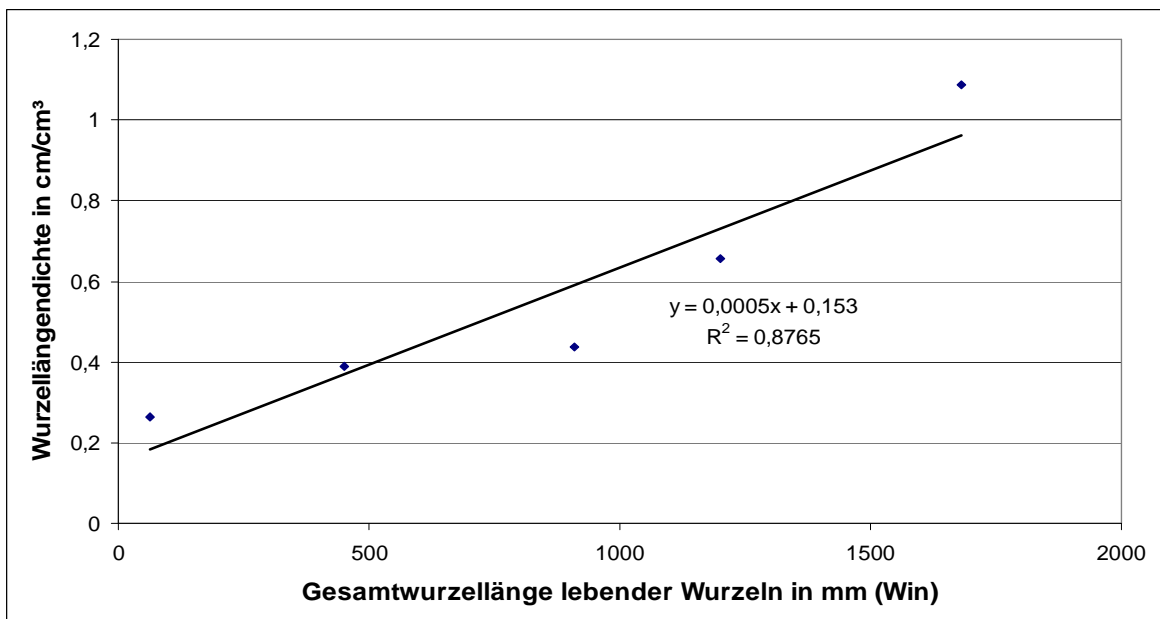


Abbildung 50: Korrelation der Wurzellängendichte (Boh) mit der Gesamtwurzellänge (Win) lebender Wurzeln

Der Grund für die bessere Korrelation der Gesamtwurzellänge der lebenden Wurzeln mit der Wurzellängendichte ist womöglich in der Bohrkernmethode mit anschließender Auswaschung der Wurzeln zu suchen. Es wurde kein Unterschied bei der Separierung der Wurzeln nach ihrem Lebensstatus gemacht, trotzdem müssen auf Grund der besseren Korrelation vermutlich vornehmlich lebende Wurzeln separiert worden sein.

Zusammenfassend muss zur Wechselbeziehung zwischen Wurzellängendichte und der Gesamtwurzellänge gesagt werden, dass vor allem die WinRHIZO Tron MF Werte der lebenden Wurzeln genutzt werden können, um die reale Wurzellängendichte im Boden zu beschreiben.

4.4.2 Zusammenhang zwischen dem Gesamtwurzelvolumen und der Wurzelmasse

Nachdem der Zusammenhang zwischen der Wurzellängendichte und den Daten der beiden Bildanalyseverfahren untersucht wurde, folgt nun eine Überprüfung einer weiteren Wechselbeziehung. Dabei wird der Zusammenhang zwischen der Wurzelmasse (Boh) und dem Gesamtwurzelvolumen (Win) geklärt.

Die Korrelation ergibt, dass zwischen dem Gesamtwurzelvolumen (Win) und der Wurzelmasse (Boh) mit einem Bestimmtheitsmaß von 0,32 ein ungenügender Zusammenhang besteht (vgl. Abbildung 51).

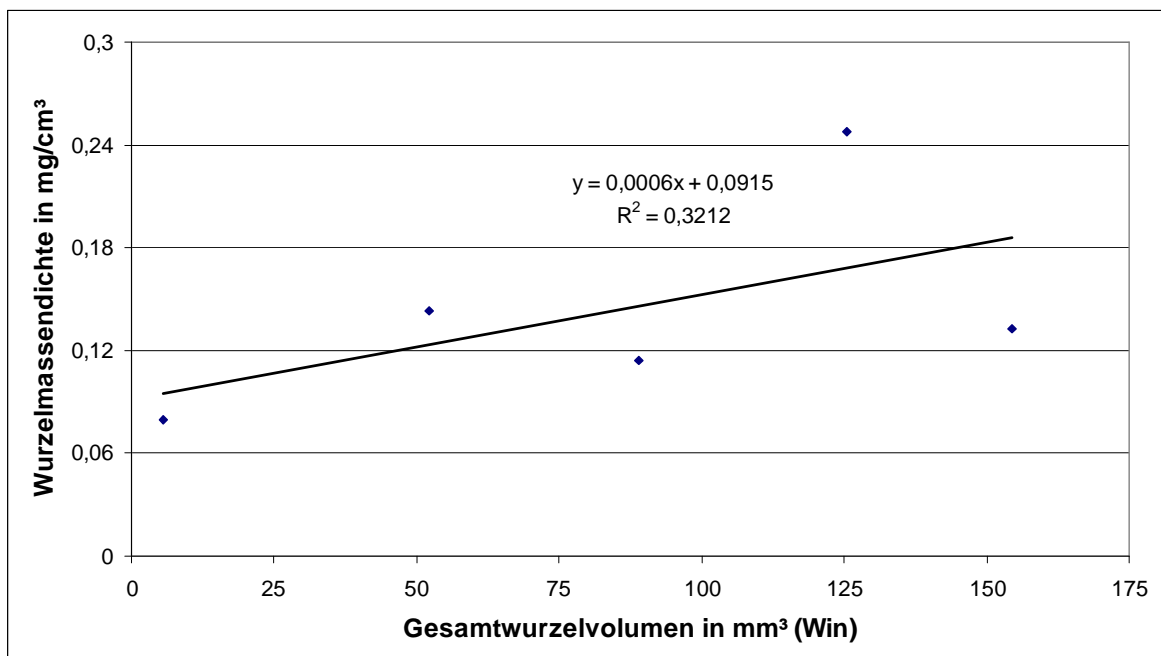


Abbildung 51: Korrelation der Wurzelmasse (Boh) mit dem Gesamtwurzelvolumen (Win)

Als Grund dafür kommt der sich deutlich unterscheidende Tiefenverlauf des Gesamtwurzelvolumens gegenüber dem Tiefenverlauf der Wurzelmasse in Frage

(vgl. Abbildung 52). Die Wurzelmasse nimmt mit zunehmender Tiefe fast stetig ab. Zu erwarten wäre ebenfalls eine Abnahme des Gesamtwurzelvolumens mit der Tiefe. Die WinRHIZO Tron MF Werte zeigen aber eine andere Tiefenentwicklung und es ist keine gleichmäßige Abnahme erkennbar.

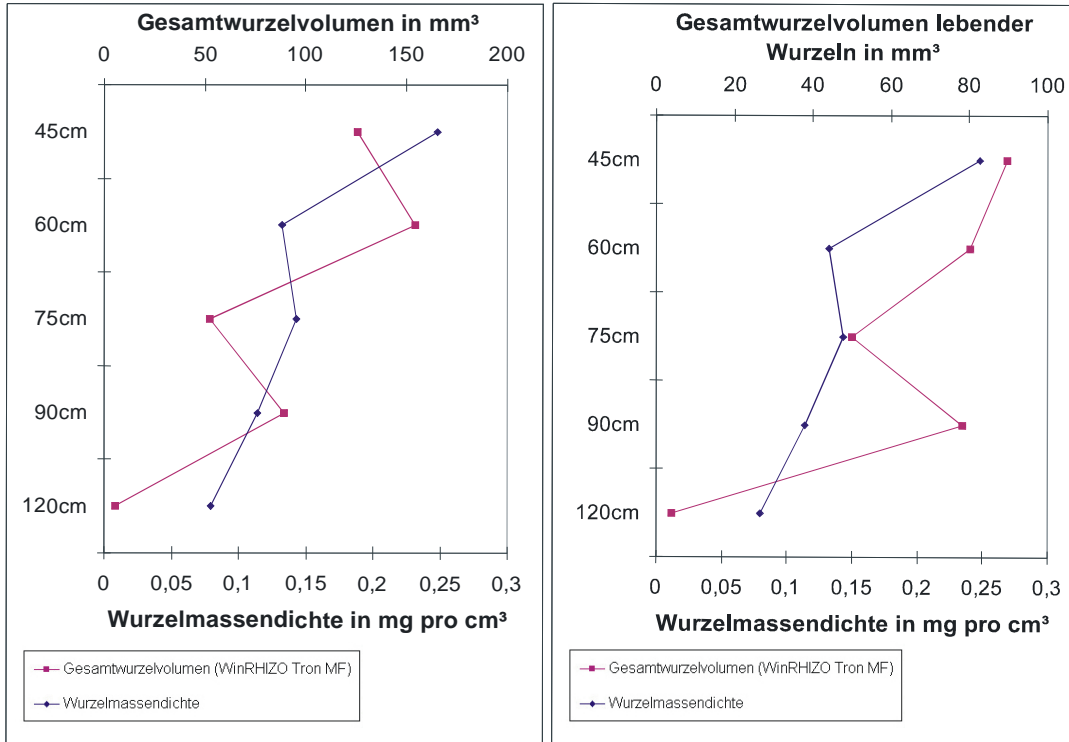


Abbildung 52: Tiefenentwicklung der Wurzelmasse (Boh), des Gesamtwurzelvolumens (Win) und des Gesamtwurzelvolumens (Win) lebender Wurzeln

Die Korrelation der Wurzelmasse mit dem Gesamtwurzelvolumen lebender Wurzeln zeigt mit einem Bestimmtheitsmaß von 0,45 einen besseren, aber keinen besonders guten Zusammenhang (vgl. Abbildung 53).

Abbildung 52 illustriert, warum ebenfalls kein guter Zusammenhang besteht. Das Gesamtwurzelvolumen der lebenden Wurzeln nimmt bis in die Tiefe von 75 cm ab. In 90 cm Tiefe kommt es zu einer starken Zunahme, die von einer starken Abnahme in 120 cm Tiefe gefolgt wird. Der Verlauf der Wurzelmasse hingegen zeigt eine fast stetige Abnahme. Nur der Wert aus 75 cm zeigt eine minimale Zunahme gegenüber dem darüber liegenden Wert.

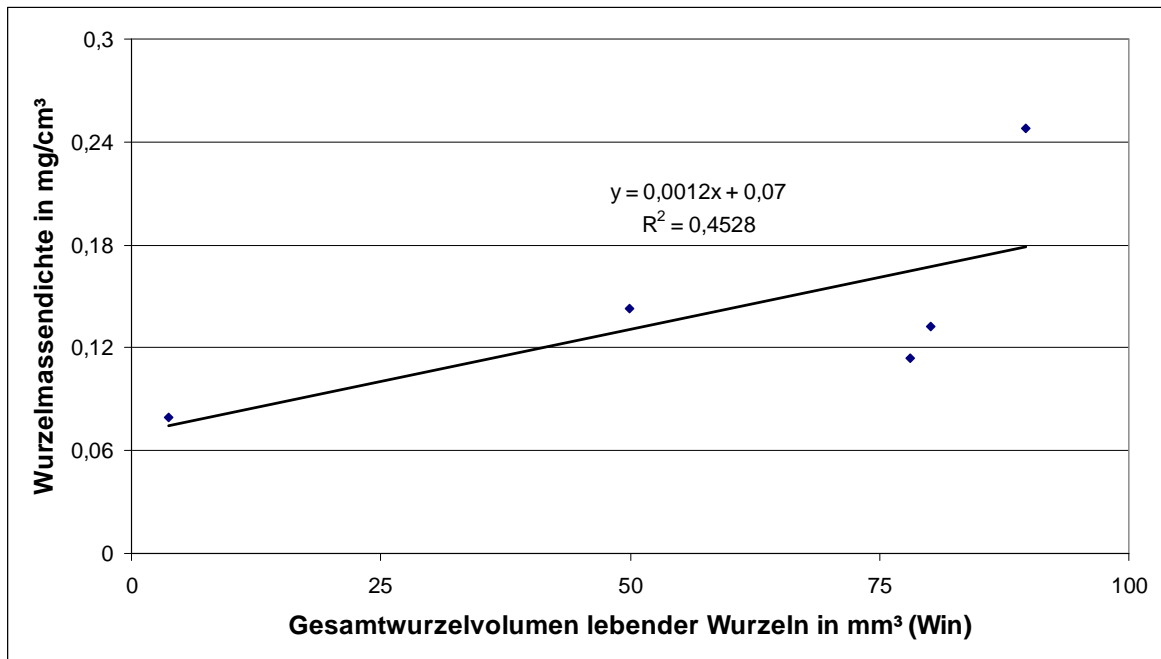


Abbildung 53: Korrelation der Wurzelmassendichte (Boh) mit dem Gesamtwurzelvolumen (Win) lebender Wurzeln

Wie schon bei der Korrelation der Wurzellängendichte (Boh) mit der Gesamtwurzellänge (Win) zeigt sich, dass das mittels manueller Vermessung mit WinRHIZO Tron MF ermittelte Gesamtwurzelvolumen der lebenden Wurzeln den besten Zusammenhang zur Wurzelmassendichte (Boh) liefert. **Für eine Quantifizierung der Wurzelmasse und der Wurzellänge im gesamten Beobachtungszeitraum kommt nur die Verwendung der WinRHIZO Tron MF Daten der lebenden Wurzeln in Frage.**

4.4.3 Quantifizierung der Wurzelmasse und der Wurzellänge für den gesamten Beobachtungszeitraum

Um das Ziel dieser Arbeit zu erreichen, mittels Minirhizotron-Daten in Kombination mit experimentell ermittelten Daten eine Quantifizierung der Rhizodeposition vorzunehmen, wird in diesem Abschnitt eine Verknüpfung der Daten vorgenommen. Die gute Korrelation der mittels WinRHIZO Tron MF ermittelten Gesamtwurzellänge lebender Wurzeln mit der realen Wurzellängendichte hat gezeigt, dass ein Zusammenhang zwischen Minirhizotron-Daten und experimentell ermittelten Wurzelkenngrößen besteht. Trotz der nur mäßigen Korrelation der Wurzelmassendichte (Boh) mit dem Gesamtwurzelvolumen (Win) der lebenden Wurzeln wird eine Ermittlung aussagekräftiger Daten zur Rhizodeposition erwartet. Grundlage dafür ist die durch die Korrelation teilweise bestätigte Annahme, dass das Gesamtwurzelvolumen (Win) lebender Wurzeln die tatsächliche Wurzelmasse im Boden repräsentiert. Das gleiche gilt für die Gesamtwurzellänge (Win) lebender Wurzeln,

für die angenommen wird, dass diese die tatsächliche Wurzellänge im Boden widerspiegelt.

Für eine Berechnung der Wurzelmasse pro Bildaufnahmetermin im Beobachtungszeitraum wird das Gesamtwurzelvolumen der lebenden Wurzeln jedes ausgewerteten Bildaufnahmetermins verwendet. Es ist nötig Faktoren für diese Berechnung zu ermitteln, da lediglich für den letzten Bildaufnahmetermin Daten beider Methoden vorliegen. Dafür stehen die Gesamtwurzelvolumina, die aus den Minirhizotron-Bildern der einzelnen Tiefen des 05.07.2007 ermittelt wurden, und die mit der Bohrkernmethode ermittelten Wurzelmassen des 17.07.2007 zur Verfügung. Jedem ermittelten Gesamtwurzelvolumen einer Röhre wird ein Wurzelmassewert aus einem bestimmten Bodenbereich gegenübergestellt. Das Prinzip ähnelt dem in Abbildung 47 (Seite 73) dargestellten. Beispielsweise steht einer tatsächlichen Wurzelmasse im Tiefenbereich von 40 cm bis 50 cm von durchschnittlich 2,48 kg/m² vom 17.07.2007 ein Gesamtwurzelvolumen lebender Wurzeln von 89,65 mm³ in einer Tiefe von 45 cm gegenüber (vgl. Tabelle 12). Daraus ergibt sich durch Division ein Faktor von 0,028. Dieser wird im gesamten Beobachtungszeitraum als konstant angesehen und ermöglicht es mit dem Gesamtwurzelvolumen (Win) der lebenden Wurzeln jedes bearbeiteten Bildaufnahmetermins die tatsächliche Wurzelmasse im Tiefenbereich von 40 cm bis 50 cm zu bestimmen (vgl. Abbildung 54).

Wurzelmasse aus Tiefenbereich	Wurzelmasse in kg/m ²	Gesamtwurzelvolumen aus Tiefe	Gesamtwurzelvolumen in mm ³	Faktor
40cm-50cm	2,49	45cm	89,65	0,028
Summe 50cm-70cm	2,65	60cm	80,12	0,033
70cm-80cm	1,43	75cm	49,87	0,029
Summe 80cm-100cm	2,28	90cm	78,09	0,029
Summe 100cm-120cm	1,83	120cm	3,78	0,485

Tabelle 12: Faktoren zur Berechnung der Wurzelmasse anhand des Gesamtwurzelvolumens (Win) lebender Wurzeln

Für jeden Tiefenbereich ergibt sich ein anderer Faktor. Dieses Vorgehen ist vorteilhaft, da beispielsweise für die Berechnung der Wurzelmasse für den 27.02.2007 nur Minirhizotron-Daten aus den drei Tiefen 45 cm, 60 cm und 75 cm zum Gesamtwurzelvolumen vorhanden sind (vgl. Abbildung 54). Ein einziger Faktor, der sich auf alle fünf Tiefenbereiche bezieht, würde eine Fehlerquelle sein.

4.4 Minirhizotron-Methode vs. Bohrkernmethode

	27.02.2007	14.03.2007	18.04.2007	23.05.2007	21.06.2007	05.07.2007
Tiefenbereich 1	$W_{Win} * F_1 = W_{Boh}$	$W_{Win} * F_1 = W_{Boh}$	$W_{Win} * F_1 = W_{Boh}$	$W_{Win} * F_1 = W_{Boh}$	$W_{Win} * F_1 = W_{Boh}$	$W_{Boh} / W_{Win} = F_1$
Tiefenbereich 2	$W_{Win} * F_2 = W_{Boh}$	$W_{Win} * F_2 = W_{Boh}$	$W_{Win} * F_2 = W_{Boh}$	$W_{Win} * F_2 = W_{Boh}$	$W_{Win} * F_2 = W_{Boh}$	$W_{Boh} / W_{Win} = F_2$
Tiefenbereich 3	$W_{Win} * F_3 = W_{Boh}$	$W_{Win} * F_3 = W_{Boh}$	$W_{Win} * F_3 = W_{Boh}$	$W_{Win} * F_3 = W_{Boh}$	$W_{Win} * F_3 = W_{Boh}$	$W_{Boh} / W_{Win} = F_3$
Tiefenbereich 4		$W_{Win} * F_4 = W_{Boh}$	$W_{Win} * F_4 = W_{Boh}$	$W_{Win} * F_4 = W_{Boh}$	$W_{Win} * F_4 = W_{Boh}$	$W_{Boh} / W_{Win} = F_4$
Tiefenbereich 5			$W_{Win} * F_5 = W_{Boh}$	$W_{Win} * F_5 = W_{Boh}$	$W_{Win} * F_5 = W_{Boh}$	$W_{Boh} / W_{Win} = F_5$

$F_{1..5}$	Berechnete Faktoren für den jeweiligen Tiefenbereich (05.07.2007)	Tiefenbereich 1 = 40 cm - 50 cm
W_{Win}	Werte des Gesamtwurzelvolumens/Gesamtwurzellänge lebender Wurzeln (WinRHIZO Tron MF)	Tiefenbereich 2 = 50 cm - 70 cm
W_{Boh}	Werte der Wurzelmasse/Wurzellänge (Bohrkernmethode)	Tiefenbereich 3 = 70 cm - 80 cm
W_{boh}	Berechnete Werte der Wurzelmasse/Wurzellänge	Tiefenbereich 4 = 80 cm - 100 cm
.....	Bildaufnahmeterrin für den Faktoren ermittelt wurden	Tiefenbereich 5 = 100 cm - 120 cm

Abbildung 54: Schema zur Quantifizierung der Wurzelmasse und der Wurzellänge für den gesamten Beobachtungszeitraum

Mit den ermittelten Faktoren ist es möglich für die restlichen fünf Bildaufnahmetermine eine Quantifizierung der Wurzelmasse im Tiefenbereich von 40 cm bis 120 cm vorzunehmen, indem der jeweilige Wert des Gesamtwurzelvolumens lebender Wurzeln eines Tiefenbereichs mit dem entsprechenden Faktor multipliziert wird (vgl. Abbildung 54). In Tabelle 13 und in Abbildung 55 sind die Ergebnisse der Quantifizierung dargestellt. Es zeigt sich, dass es bis zum 18.04.2007 zu einem Anstieg der Wurzelmasse im Boden kommt. Anschließend nimmt die Wurzelmasse bis zum 05.07.2007 stetig ab.

Bildaufnahmeterrin	27.02.2007	14.03.2007	18.04.2007	23.05.2007	21.06.2007	05.07.2007
Wurzelmasse in 40cm-120cm in kg/m ²	12,67	15,45	20,35	13,18	10,95	10,67*

Tabelle 13: Quantifizierung der Wurzelmasse im gesamten Beobachtungszeitraum (40 cm-120 cm)
*Wurzelmasse ermittelt am 17.07.2007

Die größte Wurzelmasse ist nach KUTSCHERA (1960) zum Beginn der Blüte (BBCH Stadium 61) des Winterweizens zu erwarten. Der Maximalwert der Wurzelmasse, die für diese Arbeit ermittelt wurde, ist während des Schossens (BBCH Stadium 32/33) und damit etwas früher zu finden. Die starke Abnahme nach dem 18.04.2007 geht einher mit der durch KUTSCHERA (1960) postulierten Aussage, dass mit zunehmender Ausbildung von Früchten und Blüten die Wurzelmasse verstärkt abnimmt, weil in dieser Entwicklungsphase der Wurzelabbau durch den Wurzelzuwachs nicht mehr ausgeglichen werden kann (vgl. Kapitel 2.1.1 Seite 6). Diese Ergebnisse widersprechen auf der anderen Seite unveröffentlichten Daten von EHLERS (1996) (zitiert in NEUMEISTER 2007),

die aussagen, dass die Wurzelmasse des Winterweizens bis zur Ernte nur unwesentlich abnimmt. Im Kapitel 5.3 wird auf diesen Sachverhalt genauer eingegangen.

Abbildung 55 zeigt die Verteilung der Wurzelmasse in den einzelnen Tiefenbereichen. Es wird deutlich, dass die Wurzelmassen in den oberen beiden Tiefenbereichen bereits am 14.03.2007 ihr Maximum erreicht haben und danach bereits eine Abnahme einsetzt. Die beiden untersten Tiefenbereiche weisen am 18.04.2007 den größten Wert auf und im weiteren Verlauf des Beobachtungszeitraums setzt eine Verringerung ein.

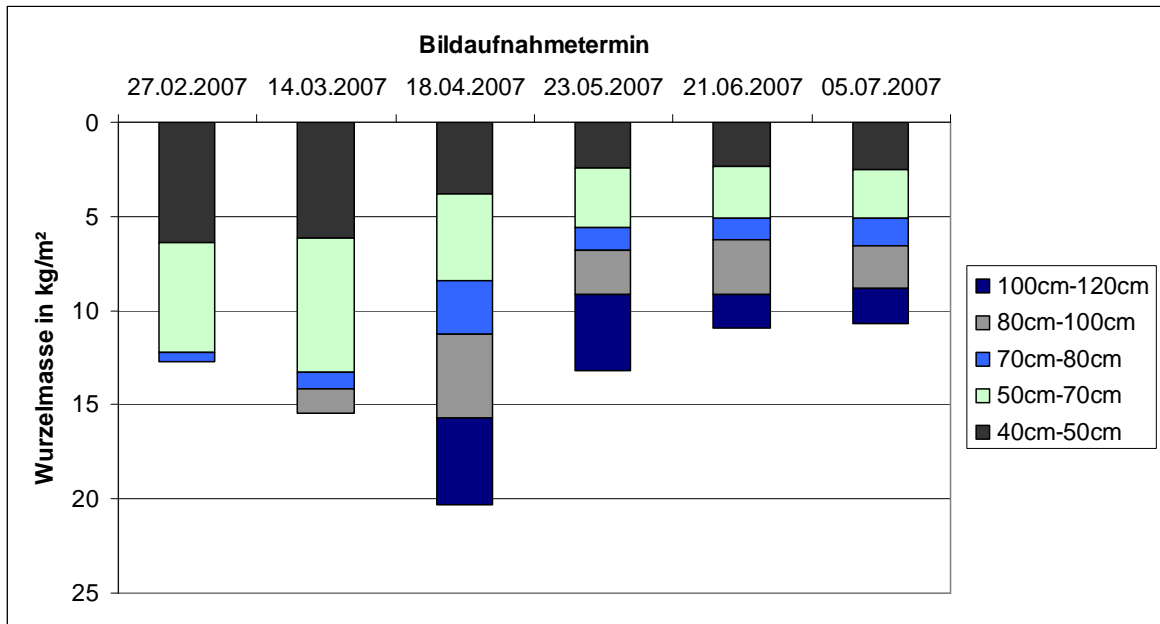


Abbildung 55: Berechnete Wurzelmasse im Beobachtungszeitraum (40 cm-120 cm)

Mit demselben Verfahren kann die Wurzellänge des Tiefenbereichs von 40 cm bis 120 cm im Beobachtungszeitraum bestimmt werden. Dafür stehen die WinRHIZO Tron MF Daten zur Gesamtwurzellänge lebender Wurzeln und die Wurzellängen in den einzelnen Tiefenbereichen des Rasterauszählungsverfahrens zur Verfügung (vgl. Tabelle 14). Daraus werden wiederum Faktoren für die fünf Tiefenbereiche berechnet (vgl. Abbildung 54).

4.4 Minirhizotron-Methode vs. Bohrkernmethode

Wurzellänge aus Tiefenbereich	Wurzellänge in km/m ²	Gesamtwurzellänge aus Tiefe	Gesamtwurzellänge in mm	Faktor
40cm-50cm	1,09	45cm	1681,32	0,00065
Summe 50cm-70cm	1,31	60cm	1200,20	0,00109
70cm-80cm	0,44	75cm	908,32	0,00048
Summe 80cm-100cm	0,78	90cm	449,94	0,00172
Summe 100cm-120cm	0,67	120cm	62,99	0,01072

Tabelle 14: Faktoren zur Berechnung der Wurzellänge anhand der Gesamtwurzellänge (Win) lebender Wurzeln

Durch die Faktoren wird es möglich für jeden ausgewerteten Bildaufnahmetermin die Wurzellänge im Boden zu berechnen (vgl. Abbildung 54). Für den 18.04.2007 ergibt sich beispielsweise eine Wurzellänge von 4,68 km/m² (vgl. Tabelle 15). An diesem Bildaufnahmetermin findet sich, wie schon bei der Wurzelmasse, der Maximalwert innerhalb des Beobachtungszeitraums. Als Gründe für die Zunahme bis zu diesem Zeitpunkt können dieselben wie bei der Wurzelmasse angeführt werden. Anders als bei der Wurzelmasse kommt es nach dem Erreichen des Maximums zu keiner sehr starken Abnahme der Wurzellänge. Dieses Ergebnis deckt sich mit Erfahrungen, die während der manuellen Datenauswertung mit WinRHIZO Tron MF gemacht wurden. Die Wurzellängen der lebenden Wurzeln blieben in den Minirhizotron-Bildern der Bildaufnahmetermine nach dem Erreichen des Maximalwerts relativ konstant. Veränderungen zeigten sich aber durch eine Abnahme des Wurzeldurchmessers nach dem 18.04.2007. Weil der Wurzeldurchmesser einen wichtigen Anteil bei der Berechnung des Wurzelvolumens hat, kommt es zu einer deutlichen Abnahme des Wurzelvolumens und damit verbunden zu einer starken Abnahme der berechneten Wurzelmasse.

Bildaufnahmetermin	27.02.2007	14.03.2007	18.04.2007	23.05.2007	21.06.2007	05.07.2007
Wurzellänge in km/m ²	1,91	2,68	4,89	4,71	4,19	4,29*

**Tabelle 15: Quantifizierung der Wurzellänge im gesamten Beobachtungszeitraum (40 cm-120 cm)
*Wurzelmasse ermittelt am 17.07.2007**

Die Tatsache, dass die Wurzellänge am 21.06.2007 größer ist als am 05.07.2007 kann der Bildqualität dieser beiden Bildaufnahmetermine geschuldet sein.

Abbildung 56 zeigt die Verteilung der Wurzellängen in den einzelnen Tiefenbereichen. Auch hier lässt sich erkennen, dass es nach dem Erreichen der maximalen Wurzellänge in einem Tiefenbereich nachfolgend nur zu geringen Abnahmen kommt und sich damit auch der Unterschied zur Entwicklung der Wurzelmasse zeigt.

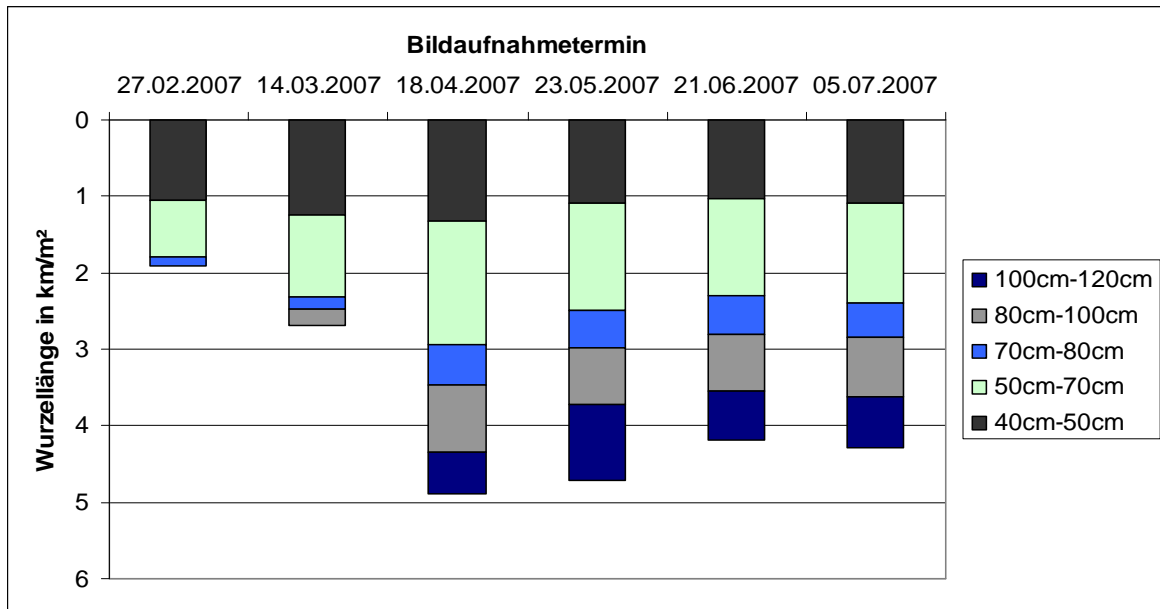


Abbildung 56: Berechnete Wurzellänge im Beobachtungszeitraum (40 cm-120 cm)

4.5 Zusammenfassung

Sowohl die Betrachtung als auch die Analyse der Ergebnisse haben ergeben, dass eine vollautomatische Analyse der Minirhizotron-Bilder mit dem Programm MiRIA teilweise scheinbar in der Lage ist Daten zu liefern, die einen Zusammenhang zu den WinRHIZO Tron MF Daten aufweisen. Genauer betrachtet ist erkennbar, dass die Korrelationen sehr unterschiedlich ausgeprägte Zusammenhänge hervorbringt. Insgesamt muss deshalb gesagt werden, dass das Programm MiRIA ein gewisses Potential hat ein Hilfsmittel in der Bildauswertung im Rahmen der Minirhizotron-Methode zu werden. **Bei einer vollautomatischen Detektion liefert MiRIA bisher aber keine Ergebnisse, die einen ausreichenden Zusammenhang zu den WinRHIZO Tron MF Daten aufweisen.** Im Rahmen dieser Arbeit konnte es deshalb für eine Datenermittlung zur Quantifizierung der Rhizodeposition nicht verwendet werden.

Die Verringerung der Bilderanzahl auf 30 Minirhizotron-Bilder pro Röhre bei der Verwendung des Programms WinRHIZO Tron MF führte zu guten Korrelationen und zeigt einen Weg zukünftig mit geringerem Aufwand Daten zu erhalten.

Die Korrelation der ermittelten Kenngrößen der Bohrkernmethode mit den ermittelten Kenngrößen von WinRHIZO Tron MF für den 05.07.2007 ergab, dass die Kenngrößen der

lebenden Wurzeln die realen Wurzelkenngrößen im Boden am besten repräsentieren. In einem weiteren Schritt wurde für den gesamten Beobachtungszeitraum, für den ausgewertete Minirhizotron-Daten vorlagen, eine Quantifizierung der Wurzellänge und der Wurzelmasse mit Hilfe berechneter Faktoren vorgenommen.

5 Diskussion und Ansätze für eine verbesserte Quantifizierung der Rhizodeposition

Auf Grund der praktischen Anwendung der Minirhizotron-Methode und der anschließenden Betrachtung der Ergebnisse wurden verschiedene methodische Verbesserungsmöglichkeiten offensichtlich. Im folgenden Kapitel soll über die Anwendung der Minirhizotron-Methode und die daraus resultierenden Ergebnisse diskutiert und in dem Zusammenhang Vorschläge zu einer verbesserten Anwendung der Methode eingebracht werden. Am Schluss des Kapitels wird ein Fazit über die vorliegende Arbeit gezogen.

5.1 Datenaufnahme

Der erste Schritt bei der Anwendung der Minirhizotron-Methode ist die Aufnahme der Minirhizotron-Bilder. Bereits hier muss genau bedacht werden, welche Daten für die Bearbeitung der Fragestellung nötig sein werden. Die Datenaufnahme für diese Arbeit wurde am 27.02.2007, und damit 151 Tage nach der Aussaat, begonnen. Bei diesem Bildaufnahmetermin hatten die Wurzeln des Winterweizens bereits eine Tiefe von 75 cm erreicht. Über die Dynamik des Wurzelwachstums und über quantitative Angaben zu den Wurzeln können zwischen der Aussaat und dem 27.02.2007 keine Aussagen gemacht werden. Um Aussagen über die gesamte Vegetationsphase treffen zu können, ist es nötig direkt nach der Aussaat mit der Beobachtung zu beginnen. Die Aufnahme der Minirhizotron-Bilder muss aber erst beginnen, wenn die erste Wurzel der aktuellen Kulturart die Röhre in 45 cm Tiefe erreicht hat. Eine Beobachtung ohne Bildaufnahme umfasst nur eine regelmäßige optische Suche nach Wurzeln mit Hilfe des Minirhizotron-Kamerasystems.

Sollen Aussagen getroffen werden über die Dynamik des Umsatzes der Wurzeln im Boden, ist es nötig in einem bestimmten Beobachtungszeitraum ab dem ersten Bildaufnahmetermin in allen Tiefen, die Wurzeln aufweisen, Minirhizotron-Bilder zu erfassen. Für die Datenaufnahme dieser Arbeit wurden Minirhizotron-Bilder nur in den Röhren aufgenommen in denen Wurzeln der aktuellen Kulturart zu finden waren. Aussagen zur Dynamik des Umsatzes der Wurzeln können deshalb nur für den Tiefenbereich 45 cm bis 75 cm erfolgen. Für Untersuchungen zur Dynamik des Umsatzes der Wurzeln ist es notwendig im gesamten Beobachtungszeitraum in allen Röhren, in

denen Wurzeln (unabhängig vom Lebensstatus) zu finden sind, Minirhizotron-Bilder aufzunehmen.

In welchen Intervallen die Datenaufnahme vorgenommen wird, hängt von der Aufgabenstellung und von der verfügbaren Zeit ab. Nicht alle aufgenommenen Minirhizotron-Bilder jedes Bildaufnahmetermins müssen anschließend ausgewertet werden. Bei der Datenaufnahme für diese Arbeit betrug das Intervall der Bildaufnahme zwischen 7 und 21 Tagen. Mit den beiden Programmen MiRIA und WinRHIZO Tron MF wurden Minirhizotron-Bilder von Bildaufnahmeterminen ausgewertet, zwischen denen jeweils circa ein Monat lag. Es hat sich gezeigt, dass für die Aufgabenstellung dieser Arbeit diese Vorgehensweise richtig war, denn es konnte die Entwicklung verschiedener quantitativer Wurzelkenngrößen in einem Beobachtungszeitraum in einer aussagekräftigen zeitlichen Auflösung ermittelt werden. Für zukünftige Minirhizotron-Bildaufnahmen wäre es sinnvoll ein vorher festgelegtes Intervall im gesamten Beobachtungszeitraum beizubehalten. Somit erhöht sich die Aussagekraft der Ergebnisse.

Bei der Auswertung der Minirhizotron-Bilder fiel auf, dass viele eine mittlere oder schlechte Qualität aufweisen. Vor allem für die automatische Auswertung mit MiRIA stellt dies ein Problem dar. Hauptsächlich Gründe für die schlechte Bildqualität sind Verschmutzungen (vgl. Abbildung 23 C Seite 43) und Wassertropfen auf der Außenseite der Röhren. Des Weiteren können Bodentierchen, falsche Fokussierung der Minirhizotron-Kamera, doppelte Aufnahme einer Position und die Bewegung der Kamera während der Auslösung des Minirhizotron-Bildes zu einer Minderung der Aussagekraft der Minirhizotron-Bilder führen. Beeinträchtigungen der Bildqualität durch Verschmutzungen und Wassertropfen auf der Außenseite der Röhren können bei der Aufnahme der Minirhizotron-Bilder nicht vermieden werden, weil es keine Möglichkeit gibt das Äußere der Rohre im eingebauten Zustand zu reinigen. Die Bilder, die diese Beeinträchtigung aufweisen, müssen bei der manuellen Bildauswertung intensiver und mit höherem Zeitaufwand untersucht werden. Die anderen aufgeführten Gründe, die zu einer mittleren oder schlechten Bildqualität führen, kann man schon während der Aufnahme vermeiden. Dafür ist es nötig mit zwei Personen die Aufnahme der Minirhizotron-Bilder durchzuführen. Eine Person bedient das Kamerasystem und die zweite Person kontrolliert währenddessen die aufgenommenen Minirhizotron-Bilder auf mögliche vermeidbare Beeinträchtigungen. Bei Bedarf müssen dann Aufnahmen wiederholt werden.

In der Literatur wird als Kritikpunkt an der Minirhizotron-Technik von einer höheren Konzentration von Wurzeln an der Schnittstelle zwischen Boden und der Röhre gesprochen. Dies hat nach BÖHM et al. (1977) zur Folge, dass die Minirhizotron-Technik

nur zur phänologischen Beobachtung, nicht aber zur Studie von Wurzeldichten im Boden herangezogen werden kann. BÖHM et al. (1977) verwendeten für Studien vertikal verbaute Röhren. Die Röhren der Datenaufnahme für diese Arbeit sind horizontal in das Erdreich eingebracht und verringern so die Anfälligkeit für diesen Effekt. Bereits MCMICHAEL & TAYLOR (1987) beschreiben eine Reduzierung der Wurzelkonzentration um die Röhren, sobald die Röhren nicht vertikal, sondern in einem Winkel, verbaut sind.

Ein Nachteil der Umsetzung der Minirhizotron-Methode im Rahmen dieser Arbeit zeigt sich, wenn Ergebnisse der Bohrkernmethode hinzugezogen werden. Der größte Teil des Wurzelsystems des Winterweizens befindet sich in den oberen 40 cm des Bodens. Dieser Tiefenbereich kann auf Grund der Anordnung der Minirhizotron-Röhren nicht observiert werden. Bei Untersuchungen mit permanent installierten Minirhizotron-Röhren ist daher weiterhin die Anwendung der Bohrkernmethode oder anderer destruktiver Methoden nötig, wenn quantitative Aussagen für die oberen 40 cm des Bodens ermittelt werden sollen.

Ein weiterer Diskussionspunkt bei der Umsetzung der Minirhizotron-Methode dieser Untersuchung ist, dass sich die Tiefenentwicklung der Wurzel nur in bestimmten Tiefenintervallen beobachten lässt. Die Röhren wurden mit einem bestimmten vertikalen Abstand zu einander in das Erdreich eingebracht. Ab 90 cm Tiefe beträgt dieser sogar 30 cm. Über Tiefenentwicklungen innerhalb dieser Abstände können keine Aussagen getroffen werden. Für eine Erfassung der Dynamik der exakten maximalen Tiefenausdehnung der Wurzeln einer Kulturart ist die Anwendung der verwendeten Minirhizotron-Methode daher nicht geeignet.

5.2 Datenaufbereitung

Die Datenaufbereitung hat sich, trotz der Hilfe zweier computergestützter Auswertungsmethoden, als sehr zeitaufwändig erwiesen. Zu einem hohen Zeitaufwand kam bei der Anwendung des Programms WinRHIZO Tron MF auch noch ein hoher Arbeitsaufwand. Der Versuch der Datenaufbereitung nur einer Stichprobe, die 30 Minirhizotron-Bilder umfasste, hat gezeigt, dass es auf diese Weise möglich ist Zeit und Arbeitsaufwand einzusparen. Zu überprüfen wäre, ob der gute Zusammenhang zwischen den Daten einer 30 Minirhizotron-Bilder umfassenden Stichprobe und den Daten aller 90 Minirhizotron-Bilder einer Röhre für jeden Bildaufnahmetag zutrifft.

Häufig wurde bei der Ergebnisbetrachtung eine schlechte Bildqualität als mögliche Ursache für einige nicht plausible Ergebnisse vermutet. Zu überlegen gilt es deshalb, wie bei zukünftigen Untersuchungen der Einfluss von Minirhizotron-Bildern schlechter Bildqualität verringert werden kann. Hilfreich ist es auf jeden Fall eine Analyse der Bildqualität

vorzunehmen, um Informationen zu jeder Bilderreihe in jeder Röhre der verschiedenen Bildaufnahmetermine zu gewinnen und dies bei der Analyse der Ergebnisse mit einzubeziehen. Schlechte Bildqualität bedeutet nicht zwangsläufig, dass dem Minirhizotron-Bild keine Daten entnommen werden können. Einige Beeinträchtigungen, wie Unschärfe oder verschmutzte Röhren kann der Mensch als Bearbeiter mit dem Programm WinRHIZO Tron MF ausgleichen. Anders sieht es bei der vollautomatischen Analyse mit dem Programm MiRIA aus. Bereits geringe Verschmutzungen, unscharfe Minirhizotron-Bilder oder Bodentierchen auf den Minirhizotron-Bildern verfälschen die Ergebnisse ungemein. Weitere Einschränkungen für das Programm, wie ein stark variierender Hintergrund und geringer Kontrast zwischen Wurzel und Boden, erkannte auch bereits JANKOWSKI (1995). Trotzdem sollte keine Vorauswahl getroffen werden, bei der ein Bearbeiter alle Minirhizotron-Bilder mittlerer oder schlechter Bildqualität entfernt und nur eine Detektion bei den Minirhizotron-Bildern guter Bildqualität durchgeführt wird. Problem ist, dass bei einigen Bildaufnahmetermenen auf diese Weise nur noch ein Bruchteil der 90 Minirhizotron-Bilder pro Röhre zur Auswertung zur Verfügung stehen würde. Erstrebenswert ist es eher MiRIA im halbautomatischen Modus auszuführen. Das heißt, dass das Programm eigenständig nach Wurzelkeimen sucht und anschließend jedes Minirhizotron-Bild vom Bearbeiter überprüft und nachbearbeitet wird. Anschließend detektiert das Programm anhand der Wurzelkeime die Wurzeln und der Bearbeiter kann daraufhin nochmals nachbearbeiten. Diese Vorgehensweise ist mit einem höheren Arbeitsaufwand verbunden als die vollautomatische Detektion, verspricht aber bessere Ergebnisse.

Ein Problem bei der Datenaufbereitung mit WinRHIZO Tron MF und MiRIA ist in der Erkennung und Vermessung der Wurzelhaare zu suchen. An einer Wurzel auftretende Wurzelhaare kommen in sehr großer Anzahl vor und vergrößern die Wurzeloberfläche um das Zwölfwache (vgl. GISI et al. 1997). Die Auflösung der Minirhizotron-Bilder ließ es nicht zu, dass bei der manuellen Wurzelvermessung mit WinRHIZO Tron MF die Wurzelhaare nachgezeichnet werden konnten. Auch MiRIA war nicht in der Lage Wurzelhaare zu detektieren. Einfluss hat dies sowohl auf die mittels Minirhizotron-Bildern quantifizierte Wurzelmasse und -länge, denn dadurch würden sich die Werte beider Kenngrößen enorm erhöhen. Eine Lösung dafür wäre die Verwendung eines Minirhizotron-Kamerasystems mit einer höheren Auflösung, mit der es möglich wird im Programm WinRHIZO Tron MF und MiRIA das Minirhizotron-Bild stark zu vergrößern, um dadurch die einzelnen Wurzelhaare zu erfassen.

Als Vorteil des Programms WinRHIZO Tron MF hat sich herausgestellt, dass es möglich ist jeder einzelnen Wurzel einen Lebensstatus zuzuweisen. Es können quantitative Veränderungen getrennt nach Wurzeln der aktuellen und der vorangegangenen Kulturart

betrachtet werden. Außerdem hat sich in dieser Arbeit gezeigt, dass die Korrelation der Wurzellängendichte und der Wurzelmassendichte mit den Daten des lebenden Teils der Wurzeln bessere Zusammenhänge aufwies, als die Korrelation mit den Daten der gesamten Wurzeln. Nachteil der Statusbestimmung ist ein erhöhter Arbeits- und Zeitaufwand und das Risiko, dass der Lebensstatus nicht zwangsläufig richtig bestimmt wird.

Ein weiterer Vorteil des Programms WinRHIZO Tron MF gegenüber MiRIA ergibt sich aus der Möglichkeit eine Kalibrierung vornehmen zu können. Die Daten, die mittels MiRIA ermittelt wurden, beziehen sich immer auf eine konstante Ausdehnung des Beobachtungsausschnittes. Dies birgt ein großes Fehlerpotential, da fest steht, dass die Zoomeinstellung des Minirhizotron-Kamerasystems häufig von einem zum anderen Bildaufnahmetermin verändert wird. Die Ergebnisse können dadurch zu einer Über- oder Unterschätzung der realen Kenngrößen führen. Wünschenswert wäre es deshalb eine Kalibrierung in das Programm MiRIA einzubeziehen.

5.3 Datenauswertung

Bei der Datenauswertung zeigen sich sehr unterschiedliche Ergebnisse. Die Ergebnisse zur Entwicklung der Wurzeltiefe erscheinen sehr plausibel und decken sich mit Erkenntnissen anderer Studien. Die Gegenüberstellung der MiRIA Daten und der WinRHIZO Tron MF Daten lässt Platz für Diskussionen. Vor allem die Annahme einer linearen Abnahme der toten Wurzeln kann eine Fehlerquelle sein und zur Ermittlung ungenügender Zusammenhänge zwischen MiRIA und WinRHIZO Tron MF Kenngrößen geführt haben. Anhand der neuen Erkenntnisse zur Zeitersparnis durch eine Stichprobenauswahl bei der Anwendung des Programms WinRHIZO Tron MF könnten zukünftig für alle Bildaufnahmetermine in einem begrenzten Beobachtungszeitraum sowohl die lebenden als auch die toten Wurzeln vermessen werden. Damit können, in Kombination mit einer Weiterentwicklung des Programms MiRIA, bessere Korrelationen zwischen den Daten einer vollautomatischen Detektion mittels MiRIA und den mit WinRHIZO Tron MF manuell ermittelten Wurzelkenngrößen erwartet werden.

Zu diskutieren ist ebenfalls, ob der ermittelte Zusammenhang zwischen den Minirhizotron-Daten lebender Wurzeln vom 05.07.2007 mit den Daten der Bohrkernmethode vom 17.07.2007 ausreicht, um aus einer Kombination beider Datenreihen die Quantifizierung der Wurzelmasse und -länge vorzunehmen. Die Korrelation ergab einen guten Zusammenhang zwischen der Gesamtwurzellänge und der Wurzellängendichte, aber nur einen mäßigen Zusammenhang zwischen dem Gesamtwurzelvolumen und der Wurzelmassendichte. Grundsätzlich geht es auch darum, ob Minirhizotron-Bilder, die

einen zweidimensionalen Ausschnitt des Bodens zeigen, repräsentativ sein können für einen dreidimensionalen Teil des Bodenkörpers in dem sich bestimmte Wurzelkenngrößenwerte finden. Verschiedene Autoren beschreiben jedoch vor allem in tieferen Bodenbereichen einen guten Zusammenhang zwischen Daten aus Bohrkernen und Daten gewonnen aus Minirhizotron-Bildern (vgl. EPHRATH et al. 1999, HEERAMAN & JUMA 1993, MAJDI et al. 1992). Da alle Minirhizotron-Daten für diese Arbeit in einer Bodentiefe ab 45 cm abwärts aufgenommen wurden, kann davon ausgegangen werden, dass die Daten einen Zusammenhang aufweisen und die Quantifizierung gute Ergebnisse geliefert hat.

Für die Quantifizierung der Wurzelmasse und -länge im gesamten Beobachtungszeitraum wurden nur die Daten des lebenden Teils der Wurzeln, die mit WinRHIZO Tron MF manuell ermittelt wurden, verwendet. Zuvor wurde erwartet, dass bei Datengewinnung durch die Bohrkernmethode sowohl lebende als auch tote Wurzeln separiert werden und deswegen ein Zusammenhang zwischen Minirhizotron-Daten aller Wurzeln und diesen Daten vorliegen werden. Die Korrelation zeigte aber bessere Zusammenhänge nur mit den Daten der lebenden Wurzeln. Es sollte überprüft werden, ob und warum zukünftig eventuell wiederum bessere Zusammenhänge mit dem lebenden Teil der Wurzeln erzielt werden. Außerdem sollte man genauer darauf eingehen, ob Daten zu lebenden Wurzeln, die mittels WinRHIZO Tron MF ermittelt wurden, allein die realen Wurzelkenngrößen im Boden repräsentieren können.

Weiterer Diskussionsbedarf besteht über die Faktoren, die für die Quantifizierung der Wurzellänge und -masse ermittelt wurden. Die Faktoren wurden anhand der Daten eines Bildaufnahmetermins und einer leicht zeitversetzten Beprobung der Parzelle ermittelt. Es wurde zur Quantifizierung der Wurzellänge und -masse angenommen, dass diese Faktoren zu jedem Bildaufnahmetermin Gültigkeit besitzen. Ob diese Gültigkeit wirklich gegeben ist, kann nachträglich nicht überprüft werden. Möglich ist, dass die Heterogenität der Wurzelverteilung im Boden und die damit verbundene Über- oder Unterrepräsentation von Wurzeln in den Minirhizotron-Bildern zur Ermittlung falscher Faktoren geführt hat. Für eine Bestätigung der Gültigkeit der Faktoren, auch im Bezug auf andere Kulturarten, bietet es sich an, zukünftig weitere derartige Untersuchungen durchzuführen. Ideal wäre eine fortlaufende parallele Datenaufnahme von Minirhizotron-Bildern und Bohrkernen innerhalb eines Beobachtungszeitraums.

Angesprochen werden müssen ebenfalls die Ergebnisse der Quantifizierung der Wurzellänge und der Wurzelmasse im Beobachtungszeitraum. Auffällig war, dass der Wert der Wurzellänge nach dem Erreichen des Maximums nur ganz leicht bis zum Ende der Beobachtung abnimmt. Die berechnete Trockenmasse der Wurzeln hingegen verringert sich um ca. 50 %. Dadurch ergeben sich widersprüchliche Ergebnisse zur

Entwicklung der Wurzellänge und zur Wurzelmasse. Auch nach unveröffentlichten Daten von EHLERS (1996) (zitiert in NEUMEISTER 2007) verringert sich die Wurzeltrockenmasse des Winterweizens, nachdem der Maximalwert erreicht wurde, nur sehr geringfügig bis zur Ernte der Pflanze. Das mögliche Problem kann in der Verwendung des Gesamtwurzelwurzelsvolumens (Win) zur Ermittlung quantitativer Daten der Wurzeltrockenmasse zu suchen sein. Bei der manuellen Vermessung der lebenden Wurzeln mit WinRHIZO Tron MF fiel auf, dass diese in den Minirhizotron-Bildern nach dem 18.04.2007 immer geringere Wurzeldurchmesser aufwiesen. Gründe dafür können eine verringerte Versorgung der Wurzeln mit Wasser und Nährstoffen sein. Auf Grund des verringerten Wurzeldurchmessers nimmt auch das Gesamtwurzelsvolumen und damit verbunden die berechnete Wurzelmasse stark ab. Verringerter Wassergehalt der Wurzeln muss aber nicht zu einer Abnahme der Trockenmasse führen, sondern zu erst lediglich zu einer Verringerung des Volumens. Es ist daher in künftigen Untersuchungen zu überprüfen wie gut sich das Gesamtwurzelsvolumen, das aus Minirhizotron-Bildern ermittelt wurde, zu Bestimmung der Wurzeltrockenmasse eignet.

5.4 Fazit

Zusammenfassend lässt sich zu den Untersuchungen dieser Arbeit sagen, dass zur Ermittlung quantitativer Daten zur Wurzelentwicklung, Wurzelndynamik und zum Wurzelumsatz trotz technischer Neuerungen und Hilfsmittel ein hoher Aufwand betrieben werden muss. Auf der anderen Seite hat sich auch gezeigt, dass neue Ansätze die Chance bieten zukünftig den Aufwand weiter zu verringern. Das Programm WinRHIZO Tron MF lieferte aussagekräftige Werte und erwies sich als eindeutig besseres Bildauswertungsprogramm im Bezug auf die Datenqualität. MiRIA weist jedoch gewisse Potentiale auf, künftig die Arbeit zur Bildauswertung der Minirhizotron-Bilder erleichtern und verringern zu können. Bisher reicht die Leistungsfähigkeit des Programms jedoch nicht aus, um vollautomatisch zu arbeiten und gute Ergebnisse, im Vergleich zum manuellen Wurzelvermessungsprogramm WinRHIZO Tron MF, zu liefern. Die Verringerung der manuell mit WinRHIZO Tron MF auszuwertenden Minirhizotron-Bilder auf 30 pro Röhre hat ebenfalls eine Möglichkeit aufgezeigt den Arbeits- und Zeitaufwand zu verringern. Die Korrelationen zwischen Daten der Bohrkernmethode und der Minirhizotron-Methode weisen teilweise gute Zusammenhänge auf und haben es möglich gemacht, durch eine Kombination der Daten Faktoren zu ermitteln, mit deren Hilfe quantitative Aussagen zur Wurzelmasse und -länge für alle ausgewerteten Bildaufnahmetermine gemacht werden konnten. Das Programm WinRHIZO Tron MF hat sich als fähig erwiesen als Teil der nicht-destruktiven Methode zur Datengewinnung eine Quantifizierung der Rhizodeposition vorzunehmen. Um mit Hilfe der Minirhizotron-

Methode weitere fundierte quantitative Aussagen treffen zu können und somit die Bohrkernmethode oder andere destruktive Methoden zur Datengewinnung völlig zu ersetzen, ist aber noch viel Arbeit und weiterführende Forschung in dieser Richtung nötig. Vor allem sind weitergehende Untersuchungen zu Zusammenhängen zwischen Kenngrößen, die mittels destruktiver Methoden und der Minirhizotron-Methode ermittelt wurden, nötig.

Insgesamt ist zu resümieren, dass das Ziel der Arbeit erreicht wurde, indem alle daraus resultierenden Teilaufgaben erfolgreich bearbeitet werden konnten.

6 Ausblick

Durch die computergestützte Bildauswertung bieten sich völlig neue Möglichkeiten für Erkenntnisgewinne in der Rhizosphärenforschung. Eine Auswertung großer Bildermengen mit angemessenem Zeit- und Arbeitsaufwand ist möglich geworden. Denkbar ist zukünftig vor allem die Verknüpfung einer automatischen mit einer manuellen Bildanalyse. Der manuellen Bildanalyse sollte hauptsächlich eine kontrollierende Funktion zukommen. Es besteht die Möglichkeit, dass dies beispielsweise mit einem Programm wie MiRIA zu verwirklichen ist. Dafür müssen Erkenntnisse und aufgetretene Probleme aus der Anwendung in die Verbesserung des Programms einfließen.

Vor allem ein Wissenszuwachs über die Wurzeldynamik und die Dynamik der Rhizodeposition kann aus Verbesserungen der methodischen Umsetzung der Minirhizotron-Technik resultieren. Effizientere Untersuchungsmethoden ermöglichen die Auswertung immer größerer Datenmengen, die zweifelsohne bei Untersuchungen in diesen Forschungsfragen entstehen. Für neue Erkenntnisse in dieser Forschungsfrage sind auch weiterführende Untersuchungen über Zusammenhänge zwischen Daten, die aus Minirhizotron-Bildern entnommen werden, und den tatsächlich im Boden vorhandenen quantitativen Wurzelkenngrößen erforderlich. Für einige Forschungsfragen wird es möglich werden auf die Verwendung destruktiver Methoden zur Datengewinnung gänzlich zu verzichten.

Möglich wäre es ebenfalls, das Wachstumsverhalten und die Biomasseentwicklung verschiedener Kulturpflanzenwurzeln zu erfassen und zu vergleichen. Außerdem wären Vergleiche zum Wachstumsverhalten und zur Biomasseentwicklung der Wurzeln einer Kulturpflanze bei verschiedenen Anbauarten, wie konventionellem, ökologischem, gedüngtem und ungedüngtem Anbau möglich.

7 Literatur- und Quellenverzeichnis

AG BODEN (1996): Bodenkundliche Kartieranleitung.- 4. Aufl.: 392 S.; Hannover (E. Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung).

ALTERMANN, M.; RINKLEBE, J.; MERBACH, I.; KÖRSCHENS, M.; LANGER, U.; HOFMANN, B. (2005): Chernozem – Soil of the Year 2005.- Journal of Plant Nutrition and Soil Science; 168: 725-740; Weinheim (Wiley-VCH Verlag).

BATES, G. H. (1937): A Device for the Observation of Root Growth in the Soil.- Nature, 139: 966-967; London (Nature Publishing Group).

BELVINS, R. L.; SMITH, M. S.; THOMAS, G. W. (1984): Changes in soil properties under no-tillage.- In: PHILLIPS, R. E.; PHILLIPS, S. H. [Hrsg.]: No-tillage agriculture: principles and practices.- 306 S.; New York.

BIRKEL, P. (1990): Der Einfluss verschiedener Bodenbearbeitungsverfahren auf die Ausbildung des Wurzelsystems von Winterweizen. Diplomarbeit an der Universität Giessen.

BÖHM, W. (1974): Mini-rhizotrons for root observations under field conditions.- Zeitschrift für Acker- und Pflanzenbau, 140: 282-287.

BÖHM, W.; MADUAKOR, H.; TAYLOR, H. M. (1977): Comparison of five methods for characterizing soybean rooting density and development.- Agronomy Journal, 69: 415-419.

BÖHM, W. (1979): Methods of studying root systems.- Ecological Studies, 33: 188 S.; Berlin (Springer-Verlag).

BOX, J. E.; RAMSEUR, E. L. (1993): Minirhizotron wheat root data: Comparisons to soil core root data.- Agronomy Journal, 85: 1058-1060.

BRAGG, P. L.; GOVI, G.; CANNELL, R. Q. (1983): A comparison of methods, including angled and vertical minirhizotrons, for studying root growth and distribution in a spring oat crop.- Plant and Soil, 73: 435-440; Den Haag (Martinus Nijhoff / Dr W. Junk Publishers).

COLEMAN, K.; JENKINSON, D. S. (1995) : RothC-26.3 - A model for turnover of carbon in soil: Model description and users guide. IACR-Rothamsted.- 45 S.; Harpenden.

EPHRATH, J. E.; SILBERBUSH, M.; BERLINER, P. R. (1999): Calibration of minirhizotron readings against root length density data obtained from soil cores.- Plant and Soil, 209: 201-208; (Kluwer Academic Publishers).

- ERZ, G. (2006): Automatische Analyse von Minirhizotronbildern. Dissertation an der Universität Halle-Wittenberg.
- FRANKO, U. (1989): C- und N- Dynamik beim Umsatz organischer Substanz im Boden. Dissertation B an der Akademie der Landwirtschaftswissenschaften Berlin.
- FRANKO, U.; OEHLSCHLÄGEL, B. (1993): CANDY – Carbon Nitrogen Dynamics.- In: REINER, L.; GEIDEL, H.; MANGSTL, A. [Hrsg.]: Agrarinformatik.- 99-110; Stuttgart (Eugen Ulmer Verlag).
- FRANKO, U. (1997): Modellierung des Umsatzes der organischen Bodensubstanz.- Archiv für Acker- und Pflanzenbau und Bodenkunde, 41: 527-547; Amsterdam (Harwood Academic Publishers).
- FRANKO, U. (2006a): Schema des Versuchsaufbaus für die Minirhizotron-Technik. Halle (unveröffentlicht).
- FRANKO, U. (2006b): Schema der Versuchsanordnung. Halle (unveröffentlicht).
- GISI, U.; SCHENKER, R.; SCHULIN, R.; STADELMANN, F. X.; STICHER, H. (1997): Bodenökologie.- 2. Aufl.: 351 S.; Stuttgart; New York (Thieme).
- HANSEN, S.; JENSEN, H. E.; NIELSEN, N. E.; SVENDSEN; H. (1990): DAISY - Soil Plant Atmosphere System Model. NPo-forskning fra Miljøstyrelsen Vol. A10.- 272 S.; Copenhagen.
- HEERAMAN, D. A.; JUMA, N. G. (1993): A comparison of minirhizotron, core and monolith methods for quantifying barley (*Hordeum vulgare* L.) and fababean (*Vicia faba* L.) root distribution.- Plant and Soil, 148: 29-41; (Kluwer Academic Publishers).
- HILTNER, L. (1904): Über neue Erfahrungen und Probleme auf dem Gebiete der Bodenbakteriologie unter besonderer Berücksichtigung der Gründüngung und Brache.- Arbeiten der Deutschen Landwirtschaftlichen Gesellschaft, 98: 59-78.
- INSTITUT FÜR ACKER- UND PFLANZENBAU MLU HALLE-WITTENBERG (2003): Standortbeschreibung Bad Lauchstädt. URL: <http://141.48.85.4/lfak/inst/iap/standort.html> (02.07.2008).
- INSTITUT FÜR ACKER- UND PFLANZENBAU MLU HALLE-WITTENBERG (2005): Lehr- und Versuchsstation Bad Lauchstädt. URL: <http://141.48.85.4/lfak/inst/iap/lauchst.html> (23.05.2008).
- JAENICKE, L. (2002): Vernalisierung, Zellgedächtnis des Winterschlafs.- Biospektrum, 8 (2): 136.
- JANKOWSKI, M.; BRECKLE, S. - W.; POSCH, S.; SAGERER, G.; VESTE, M. (1995): Automatische Detektion von Wurzelsystemen in Minirhizotron-Bildern.- In: SAGERER, G.; POSCH, S.; KUMMERT, F. [Hrsg.]: Informatik aktuell, 176-185; (Springer Verlag).

- JOSE, S.; GILLESPIE, A. R.; SEIFERT, J. R.; POPE, P. E. (2001): Comparison of minirhizotron and soil core methods for quantifying root biomass in a temperate alley cropping system.- *Agroforestry Systems*, 52: 161-168; (Kluwer Academic Publishers).
- JURZITZA, G. (1987): *Anatomie der Samenpflanzen*.- 293 S.; Stuttgart; New York (Thieme).
- KAUSSMANN, B.; SCHIEWER, U. (1989): *Funktionelle Morphologie und Anatomie der Pflanzen*.- 465 S.; Stuttgart, New York (Gustav Fischer Verlag).
- KLIMANEK, E. - M.; ZWIERS, P. (1990): Differenzierung der Ernte- und Wurzelrückstände nach ihrer stofflichen Zusammensetzung.- Tagungsbericht Akademie der Landwirtschaftswissenschaften, 295: 41-48; Berlin (Akademie der Landwirtschaftswissenschaften der DDR).
- KLIMANEK, E. - M. (1997): Bedeutung der Ernte- und Wurzelrückstände Landwirtschaftlich genutzter Pflanzenarten für die organische Substanz des Bodens.- *Archiv für Acker- und Pflanzenbau und Bodenkunde*, 41: 485-511; Amsterdam (Harwood Academic Publishers).
- KÖRSCHENS, M.; KLIMANEK, E. - M. (1988): Beitrag der Ernte- und Wurzelrückstände zur Versorgung der Böden mit organischer Substanz in Abhängigkeit vom Ertrag.- Tagungsbericht Akademie der Landwirtschaftswissenschaften, 269: 171-183; Berlin (Akademie der Landwirtschaftswissenschaften der DDR).
- KÖRSCHENS, M.; PFEFFERKORN, A. (1998): *Der Statische Düngungsversuch und andere Feldversuche*.- 56 S.; UFZ [Hrsg.]; Leipzig.
- KÜCKE, M.; SCHMID, H.; SPIESS, A. (1995): A comparison of four methods for measuring roots of field crops in three contrasting soils.- *Plant and Soil*, 172: 63-71; (Kluwer Academic Publishers).
- KUKA, K. (2005): *Modellierung des Kohlenstoffhaushaltes in Ackerböden auf der Grundlage bodenstrukturabhängiger Umsatzprozesse*. Dissertation an der Universität Halle-Wittenberg.
- KUKA, K.; FRANKO, K.; RÜHLMANN, J. (2007): Modelling the impact of pore space distribution on carbon turnover.- *Ecological Modelling*, 208: 295-306; Amsterdam (Elsevier).
- KUTSCHERA, L. (1960): *Wurzelatlas europäischer Ackerunkräuter und Kulturpflanzen*.- 574 S.; Frankfurt a. M. (DLG-Verlags-GmbH).
- LANDWIRTSCHAFTSKAMMER NORDRHEIN-WESTFALEN (2008): *Entwicklungsstadien im Getreide*. URL: <http://www.landwirtschaftskammer.de/fachangebot/ackerbau/pdf/tabelle-getreide-entwicklungsstadien.pdf> (01.06.2008).
- LIEBEREI, R.; REISDORFF, C. (2007): *Nutzpflanzenkunde*.- 7. Aufl.: 476 S.; Stuttgart, New York (Thieme).

- LUSTER, J.; FINLAY, R. (2007): Preface.- In: LUSTER, J.; FINLAY, R. [Hrsg.]: Handbook of Methods Used in Rhizosphere Research. 3-4.; Birmensdorf (Swiss Federal Research institute WSL).
- LYFORD, W.; WILSON, B. F. (1966): Controlled growth of forest tree roots: Technique and application. Harvard Forrest Paper No. 16.- 12 S.; Petersham, MA (Harvard University).
- MACHADO, R. M. A.; OLIVEIRA; M. DO R. G. (2003): Comparison of tomato root distributions by minirhizotron and destructive sampling.- Plant and Soil, 255: 375-385; (Kluwer Academic Publishers).
- MAJDI, H.; SMUCKER, A. J. M.; PERSSON, H. (1992): A comparison between minirhizotron and monolith sampling methods for measuring root growth of maize (*Zea mays* L.).- Plant and Soil, 147:127-134; (Kluwer Academic Publishers).
- MAJDI, H.; NYLUND, J. - E. (1996): Does liquid fertilisation affect life-span of mycorrhizal short roots and fine root dynamics?- Plant and Soil, 185: 305-309; Heidelberg (Springer-Verlag).
- MCMICHAEL, B. L.; TAYLOR, H. M. (1987): Applications and Limitations of Rhizotrons an Minirhizotrons.- In: TAYLOR, H. M. [HRSG.]: Minirhizotron observations tubes: methods and applications for measuring rhizosphere dynamics. ASA special publication No. 50.- 144 S.; Madison, WI (American Society of Agronomy).
- MEIER, U. (2001): Entwicklungsstadien mono- und dikotyler Pflanzen.- 2. Aufl.: 622 S.; (Blackwell Wissenschafts-Verlag)
- MERBACH, W. (1992): Einführung.- In: MERBACH, W. [Hrsg.]: Ökophysiologie des Wurzelraumes, 3: 128 S.; Müncheberg.
- MERBACH, W.; WITTENMAYER, L.; AUGUSTIN, J. (1999): Vorwort.- In: MERBACH, W.; WITTENMAYER, L.; AUGUSTIN, J. [Hrsg.]: Rhizodeposition und Stoffverwertung. 10. Borkheider Seminar zur Ökophysiologie des Wurzelraumes.- 189 S.; Stuttgart, Leipzig (B. G. Teubner-Verlag).
- METHERELL, A. K.; HARDING, L. A.; COLE, C. V. & PARTON, W. J. (1993): CENTURY Soil Organic Matter Model Environment. Technical Documentation. Agroecosystem Version 4.0. Great Plains System Research Unit Technical Report No. 4. USDA-ARS; Fort Collins, CO, USA.
- MÜLLER, G. (1985): Bodenkunde.- 392 S.; Berlin (VEB Deutscher Landwirtschaftsverlag).
- NEUMEISTER, H. (2007): Bodenabtrag (Bodenerosion) als weltweit bedeutendes landschaftsbedrohendes und wirtschaftliches Problem.- Leipziger Geowissenschaften, 18: 31-58.

- Newman, E. I. (1966): A method of estimating the total length of root in a sample.- *Journal of Applied Ecology*, 3: 139-145.
- PERSSON, H. (1990): Methods of studying root dynamics in relation to nutrient cycling.- In: HARRISON, A. F. [Hrsg.]: *Nutrient cycling in terrestrial ecosystems: field methods, application and interpretation.*- 462 S.; London (Elsevier).
- PISTOHLKORS, H. (1898): *Wurzelkenntnis und Pflanzenproduktion.* Bonn.
- RÉGENT INSTRUMENTS INC. (2003): *Manual - WinRHIZO Tron 2003a,b,c.*- 74 S.
- ROBERTS, J. (1976): A study of root distribution and growth of *Pinus sylvestris* L. (Scotch pine) plantation in East Anglia.- *Plant and Soil*, 44 (3): 607-621.
- RUSSELL, R. S.; GOSS, M. J. (1974): Physical aspects of soil fertility – the response of roots to mechanical impedance.- *Neth. Journal of Agric. Sci.*, 22: 305-318.
- SAMSON, B. K.; SINCLAIR, T. R. (1994): Soil core and minirhizotron comparison for the determination of root length density.- *Plant and Soil*, 161: 225-232; (Kluwer Academic Publishers).
- SANDERS, J. L.; BROWN, D. A. (1978): A new fiber optic technique for measuring root growth of soybeans under field conditions.- *Agronomy Journal*, 70: 1073-1076.
- SCHILLING, G. (2000): *Pflanzenernährung und Düngung.*- 464 S.; Stuttgart (UTB).
- Schuurman, J. J.; Goedewaagen, M. A. (1971): *Methods for the examination of root systems and roots.*- 2. Aufl.: 86 S.; Wageningen (Centre for Agricultural Publishing and Documentation).
- SEIBEL, W. [Hrsg.] (2005): *Warenkunde Getreide – Inhaltsstoffe, Analytik, Reinigung, Trocknung, Lagerung, Vermarktung, Verarbeitung.*- 416 S.; Bergen (Agrimedia).
- SMIT, A. L.; GEORGE, E.; GROENWOLD, J. (2000): Root Observations and Measurements at (Transparent) Interfaces with Soil.- In: SMIT A. L.; BENGOUGH A. G.; ENGELS, C.; VAN NOORDWIJK, M.; PELLERIN, S.; VAN DE GEIJN, S. C. [Hrsg.]: *Root Methods - A Handbook.*- 341 S.; Heidelberg (Springer-Verlag).
- SMITH, P.; POWLSON, D. S.; GLENDINING, M. J.; SMITH, J. U. (1997): Potential for carbon sequestration in European soils: preliminary estimates for five scenarios using results from long-term experiments.- *Global Change Biology*, 3 (1): 67-79; (Blackwell Publishing).
- STRAUß, J. (2007): *UFZ Praktikumsbericht – Vergleichende Untersuchungen von Wurzelsystemen verschiedener Kulturpflanzen; Halle (unveröffentlicht).*
- TENNANT, D. (1976): A test modified line intersect method of estimating root length.- *The Journal of Ecology*, 63: 995-1001.

- UFZ (2007a): Erfassung der Wetterdaten Bad Lauchstädt. URL: <http://www.ufz.de/index.php?de=940> (20.06.2008).
- UFZ (2007b): Messfeld Bad Lauchstädt 2007. URL: <http://www.ufz.de/index.php?de=13168> (03.07.2008).
- UFZ (2008): Klimadaten Bad Lauchstädt 2007. URL: <http://www.ufz.de/index.php?de=940> (02.07.2008)
- UNFCCC (1992): Rahmenkonvention der Vereinten Nationen zum Klimawandel. New York.
- UPCHURCH, D. R.; RITCHIE, J. T. (1983): Root Observation using a Video Recording System in Mini-Rhizotrons.- *Agronomy Journal*, 75: 1009-1015.
- UPCHURCH, D. R.; MCMICHAEL, B. L.; TAYLOR, H. M. (1988): Use of Minirhizotrons to Characterize Root System Orientation.- *Soil Science Society of America Journal*, 52: 319-323.
- VAN NOORDWIJK, M.; DE JAGER, A.; FLORIS, J. (1985): A new dimension to observations in minirhizotrons: A stereoscopic view on root photographs.- *Plant and Soil*, 86: 447-453.
- VOGT, K.; PERSSON, H. (1991): Measuring growth and development of roots.- In: LASSOIE, J. P.; HINELEY, T. [Hrsg.]: *Techniques and approaches in forest tree ecophysiology*.- 616 S.; Florida (CRS Press, Inc.).
- VOLKMAR, K. M. (1993): A comparison of minirhizotron techniques for estimating root length density in soils of different bulk densities.- *Plant and Soil*, 157: 239-245, (Kluwer Academic Publishers).
- VORNBERGER, O. (1997): Skript zur Vorlesung „Multimedia“ WS 1997/98 Universität Osnabrück. URL: <http://www-lehre.informatik.uni-osnabrueck.de/~mm/skript/skript.html> (20.06.2008).
- VOS, J.; GROENWOLD, J. (1983): Estimation of root densities by observation tubes and endoscope.- *Plant and Soil*, 74: 295-300.
- WADDINGTON, J. (1971): Observation of plant roots in situ.- *Canadian Journal of Botany*, 49: 1850-1852.
- WIESENMÜLLER, J. (1999): Einfluss landwirtschaftlicher Flächenvorbereitung auf die Dynamik des Wurzelsystems und die oberirdische Regeneration der Sekundärvegetation Ostamazoniens, Pará, Brasilien. Dissertation an der Universität Göttingen.
- ZELLER, F. J.; HSAM, S. L. K. (2004): Weizen: Grundstoff für die menschliche Ernährung und für industrielle Erzeugnisse.- *Naturwissenschaftliche Rundschau*, 57 (8): 413-421; Stuttgart (Wissenschaftliche Verlagsgesellschaft).