

1. Einleitung

Wurzeln spielten in der Menschheitsgeschichte schon in den Sammlergesellschaften eine wichtige Rolle zur Sicherung der Ernährung. Auch die systematische Erforschung des sich meist im Boden befindenden, nicht sichtbaren Teiles der Pflanzen reicht weit in die Geschichte zurück. Bemerkenswerterweise liegt einer der Ursprünge der Wurzelforschung im medizinischen Interesse, im Speziellen um Heilmittel (Drogen) zu entdecken. So schreibt bereits MALPIGHI (1628–1694) in seinem Werk „Anatome plantarum“ im letzten Abschnitt über die Wurzeln der Pflanzen (zitiert in SPETA 1997). Der französische Botaniker DUHAMEL du MONCEAU (1758) begann bereits im 18. Jahrhundert mit der Freilegung von Baumwurzeln, um die ökologischen Zusammenhänge zwischen der Bewurzelung von Pflanzen in ihren arttypischen Wuchseigenschaften und dem jeweiligen Standort zu erforschen. Ab der Mitte des 19. Jahrhunderts nahm das Interesse an der Wurzelforschung besonders auch im Hinblick auf die Landwirtschaft zu. Eine ausführliche Geschichte der Wurzelforschung mit besonderer Berücksichtigung der Arbeiten in Österreich kann in der Festschrift zum 80. Geburtstag von Lore Kutschera nachgelesen werden (SPETA 1997).

Es soll auch vorweg angemerkt werden, dass die Wurzel nicht isoliert gesehen, sondern die Pflanze immer als Ganzes mit Spross und Wurzel betrachtet wird. Der Aufbau des vorliegenden Buches folgt dem Arbeitsverlauf: als erstes müssen die Wurzeln freigelegt, dann können sie vor Ort interpretiert bzw. davon Feldzeichnungen angefertigt und Proben entnommen werden.

„Wurzeln entdecken und erforschen“ ist ein Überblick über die derzeit gebräuchlichen Methoden. Da die Wurzelabbildungen von Feldfreilegungen stammen, wird insbesondere diese Arbeitsweise im Detail beschrieben. Die Autoren sind der Meinung, dass Feldfreilegungen auch heute ein unverzichtbarer Teil der Erkundung des Lebensraumes von Pflanzen sind und diese nur so als Ganzes in ihrem natürlichen Umfeld erfasst werden können. Dies wird durch viele Zitierungen sowie die Verwendung der Wurzelbilder in Publikationen verschiedenster Autoren und bei internationalen Tagungen bestätigt. Ein umfangreicher Überblick über neue Methoden der Wurzelforschung vervollständigt die Ausführungen.

Um Wurzelbilder besser verstehen und interpretieren zu können, stellen wir auch die Vielfalt der Baupläne und Formen, die Artmerkmale und auch die Anpassungen an die Umweltbedingungen vor.

Die Präsentation der Wurzelbilder ist nach dem Konzept der Lebensformen geordnet und bildet den Kern des Buches. Ausgewählte Bilder aus den Wurzelatlanten werden in einem neuen Zusammenhang präsentiert und stellen die lang erwartete Synthese der bisherigen Wurzelatlanten dar. Damit sind in einem einzigen Band Informationen über die unterschiedlichen Lebensformen, z.B. von Gräsern, Kulturpflanzen, Sträuchern bis hin zu Bäumen aufbereitet. Durch diese Vorgangsweise sind auch Vergleiche über Arten hinweg möglich, die sonst kaum so nebeneinandergestellt werden.

Für das Verständnis des Wurzelraumes (der Rhizosphäre) und der Interaktionen der Pflanze mit dem belebten Boden ist von der Wurzel selbst auszugehen. Veranschaulicht wird dies im Kapitel „Anatomie der Wurzel – Jugend bis Reife“. Dabei wird der innere Bau der Wurzel mit Hilfe von Quer- bzw. Längsschnitten dargestellt. Da es für die Interpretation des Wurzelsystems besonders wichtig ist, ob eine Wurzel noch lebt oder bereits abgestorben ist, wurde dem Lebenszyklus, dem Werden und Vergehen der Wurzeln ein eigenes Kapitel gewidmet. Mit dem so präsentierten Wissen können in weiterer Folge die Aufgaben und Leistungen der Wurzeln, oder genaugenommen der Pflanzen, besser verstanden werden. Dies ist nicht nur für die pflanzenbauliche Praxis von Bedeutung, sondern auch für die Interpretation der Bodenfruchtbarkeit. Zudem ergeben sich wichtige Bezüge zur aktuellen Diskussion über die weltweite Veränderung des Klimas. Wurzeln stehen unter vielfältigem Druck durch Umweltfaktoren, Schädlinge oder Krankheiten. Daher stellen wir dieses Thema gesondert vor.

Im abschließenden Teil des Buches zeigen wir den praktischen Nutzen von Wurzeluntersuchungen. Die behandelten Beispiele stammen hauptsächlich aus dem näheren Umfeld der Autorinnen und Autoren und werden teilweise zum ersten Mal veröffentlicht. Die Rolle des Grünlandes in Bezug auf Kohlenstoffspeicherung und damit verbundener Funktionen wird vielfach ignoriert (siehe dazu: Anita Idel (2016) „Die Kuh ist kein Klima-Killer“). Um dem zumindest etwas entgegenzuwirken, ist in den Praxishinweisen ein sehr ausführlicher Beitrag dazu enthalten.

Die Nomenklatur der Pflanzennamen folgt weitgehend der Exkursionsflora für Österreich, Liechtenstein und Südtirol (FISCHER et al., 2008; 3. Aufl.).

Die Wurzelbilder sind aus den erwähnten Wurzelatlanten, daher stehen die Zusatzsymbole zu den Bodenhorizonten noch in der alten, tiefgestellten Schreibweise.

2. Wurzeln entdecken und erforschen

Für die in den Wurzelatlasbänden dargestellten Zeichnungen war das Ziel, vor allem die räumliche Wurzelverbreitung nach der Tiefe und der Seite sowie den Verlauf der einzelnen Wurzeln in ihrem arttypischen Verhalten in Wechselwirkung mit den Standortbedingungen zu erfassen. Als das zweckmäßigste Arbeitsverfahren erwies sich die unmittelbare Freilegung der Wurzeln am Wuchsort mit der gleichzeitig im Feld erstellten Zeichnung dazu. Diese Methode wurde auch von WEAVER für zahlreiche landwirtschaftliche Kulturpflanzen (1926) und viele Arten der Prärie (1954) angewandt.

Ausgehend von den Pionieren der Wurzelforschung kam es zu einer kontinuierlichen Weiterentwicklung und somit stehen heute neben den klassischen Methoden wie Feldfreilegungen und Probennahme mit Bodenkernbohrer (Abb. 2.1 b), auch hochtechnische Methoden zur Verfügung. Diese werden in weiterer Folge noch durch einen Überblick über die neuesten bildgebenden Verfahren ergänzt. Neben der Morphologie ist auch die Anatomie der Wurzel ein unverzichtbarer Teil dieses Forschungsgebietes, wie aus dem bereits zitierten Werk von MALPIGHI ersichtlich ist.

Eine Freilegung ist stets mit sehr viel Handarbeit und Geduld verbunden. Da bislang noch keine wirkliche Alternative für die Wurzelanalyse im Feld (Abb. 2.1 a) gefunden wurde und sämtliche Bilder in den Wurzelatlanten durch Freilegungen und zeichnerische Darstellung der Wurzeln gewonnen wurden, wird zum besseren Verständnis eine detaillierte Anleitung der Durchführung einer Feldfreilegung geboten. Dies soll durchaus zur Nachahmung anregen!



Abbildung 2.1

a) Wurzelfreilegung von Mais, *Zea mays*, Andau, Bgld., AT, 120 m NN, 2011.

b) Boden-Bohrkernentnahme, versetzt in der Anbaureihe (HIMMELBAUER et al. 2012).

2.1 Feldfreilegung

Alle Wurzelbilder stammen von Pflanzen, die im gewachsenen Boden freigelegt wurden (Abb. 2.2). Damit die Wurzeln ihre natürliche Lage behalten, muss die Freilegung trocken erfolgen. Die Wechselbeziehung von Bodentextur, Bodenstruktur, Humusform und Horizontbildung mit dem arteigenen Wurzel Aufbau wird beim Freilegen besonders deutlich. Dies ist vor allem durch gewundenen oder gestreckten Verlauf, durch besonders starke oder schwache Verzweigung sowie auch durch Verdickungen oder Verdünnungen deutlich zu erkennen. Um möglichst gut vergleichbare Bilder erhalten zu können, wurde als Zeitpunkt der Wurzelfreilegung bevorzugt das Blühstadium gewählt.

Bevor mit der Freilegung begonnen wird, werden einige Pflanzen ausgestochen, um einen groben Überblick der Bewurzelungsweise dieser Art an diesem Standort zu bekommen. Handelt es sich um eine sprossbürtige Bewurzelung, so sind zuerst die flachstreichenden Wurzeln freizulegen und erst in der Folge die in die tieferen Schichten wachsenden Wurzeln. Eine sorgfältige, gründliche Freilegung der oberen Wurzeln erfordert viel Geduld, bringt aber später den Vorteil, dass nicht bereits freigelegte, in die Tiefe gewachsene Wurzeln wieder unnütz verschüttet werden. Zwischenzeitliches Abdecken mit Folien oder auch Steinen ist zwar möglich, aber noch mühsamer.

Bei einem eindeutigen Polwurzelsystem kann gleich mit der Freilegung in die Tiefe begonnen werden. Unerwartete Krümmungen, die sogar einen spitzen Winkel bilden können, kommen vor. Aus diesem Grund darf mit dem groben Abräumen nicht zu nah an der Pflanze begonnen werden. Daher wird in entsprechendem Abstand von der Pflanze zuerst eine etwa 1 m tiefe Grube mit Krampen (Spitzhacke) und Schaufel oder mit einem Bagger ausgehoben. Ein bis zwei Personen sollten in der Grube bequem stehen können. Je nach Wurzeltiefe muss weiteres Erdmaterial abgeräumt und gegebenenfalls auch die Grube gesichert werden.

Für die Feinarbeit zum Freilegen der Wurzeln selbst eignet sich am besten eine Reißnadel, die ein spitzes und ein gebogenes Ende hat. Mit dem spitzen Ende wird die Erde im Bereich der Wurzel vorsichtig abgestochen und mit dem Rücken des abgeboenen Teiles kann das feine Erdmaterial abgeräumt werden. Für diese Arbeit können auch Pinsel verschiedener Stärken eingesetzt werden. Bei einer ziehenden Nadelführung ist die Gefahr des Zerreißen der Wurzeln sehr groß.

Für die Darstellung der freigelegten Wurzeln erwies sich die Zeichnung am vorteilhaftesten, da so die natürliche Lage der Wurzeln weitgehend maßstabgetreu erfasst werden kann (Abb. 2.2). Empfehlenswert ist es, die Bodenstruktur mit den Wurzeln durch Fotos zu belegen.

Erwin Lichtenegger beschrieb seine Arbeit des Zeichnens wie folgt:

Vor dem Zeichnen der einzelnen Wurzelteile wurde jeweils ihre Lage im Boden sowie ihre Länge mit Maßstab oder Maßband, ihr Durchmesser mit einer kleinen Schublehre festgestellt. Nach Möglichkeit wurden auch dünne, durchsichtige, plastische Maßschablonen über die Wurzeln gelegt, die in Zentimeter- und Dezimeter-Abständen kariert sind. Sie erleichterten vor allem die Wiedergabe der Wurzelkrümmungen und die Anordnung der Faserwurzeln. Wo ein Abzeichnen mit Hilfe der karierten Maßschablone nicht möglich war, wurden die Faserwurzeln nach dem Augenmaß eingetragen. Die Abstufung der Wurzelstärken ließ sich mit Bleistiften verschiedener Härte verhältnismäßig gut wiedergeben. Die Verkleinerung der Bilder richtete sich nach der Ausdehnung der Wurzelsysteme. Als Zeichenpapier diente ein 5x5 mm kariertes Papier. (KUTSCHERA 1960)

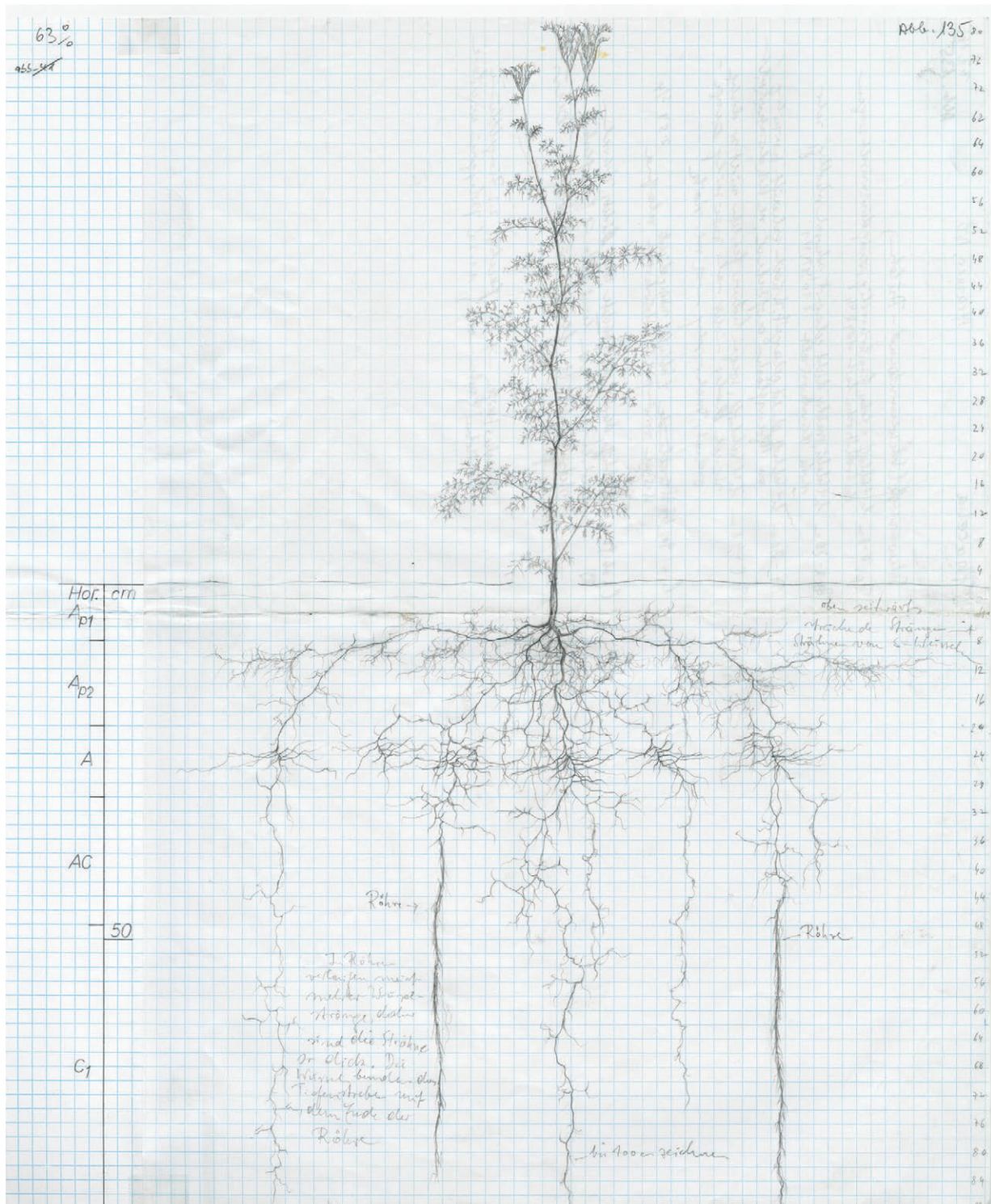


Abbildung 2.2

Feldzeichnung auf kariertem Papier, Rainfarnblättriges Büschelschön, *Phacelia tanacetifolia* (E. LICHTENEGGER).

2.2 Bodenkernbohrung

Dazu werden Bohrer verschiedener Durchmesser und Längen eingesetzt. Damit werden vor allem Wurzelmassen und -längen in verschiedenen Bodentiefen bestimmt. Diese und weitere Methoden werden in BÖHM (1979) und SMIT et al. (2000) eingehend beschrieben.

Die im Feld gewonnenen Boden-Bohrkerne werden in der Regel gleichmäßig in Abschnitte von 10 cm geteilt. Aus diesen Teilen werden die Wurzeln im Labor durch einen speziellen Waschvorgang schonend vom Boden getrennt und, wenn notwendig, eingefärbt. Dann werden mit Hilfe eines Flachbettscanners Bilder erstellt. Der letzte Schritt ist die Auswertung der erzeugten Bilder mit einer geeigneten Software. Diese Methode ergänzt die Feldfreilegung durch die Analyse einzelner Wurzeln bzw. von Wurzelteilen durch die Bereitstellung von Wurzelparametern wie Wurzeldicke (Abb. 2.3), Wurzeloberfläche und Wurzellänge. Wurzelscans können auch direkt von im Feld freigelegten und entnommenen Wurzeln erzeugt werden bzw. ist auch die softwaregestützte Auswertung an Hand von anders gewonnenen Bildern möglich. Dafür müssen gewisse Qualitätskriterien erfüllt sein, sonst können nicht alle Parameter bestimmt werden. So können zwar für die Zeichnungen aus den Wurzelatlanten die Wurzellängen oder andere geometrische Parameter, jedoch nicht die Wurzeldickenverteilung, bestimmt werden.

Eine sehr brauchbare Vorgangsweise ist die Entnahme von Wurzelproben während der Feldfreilegung, die dann die direkten Beobachtungen im Feld ergänzen. Auf die notwendige Konservierung der Wurzel ist dabei zu achten.

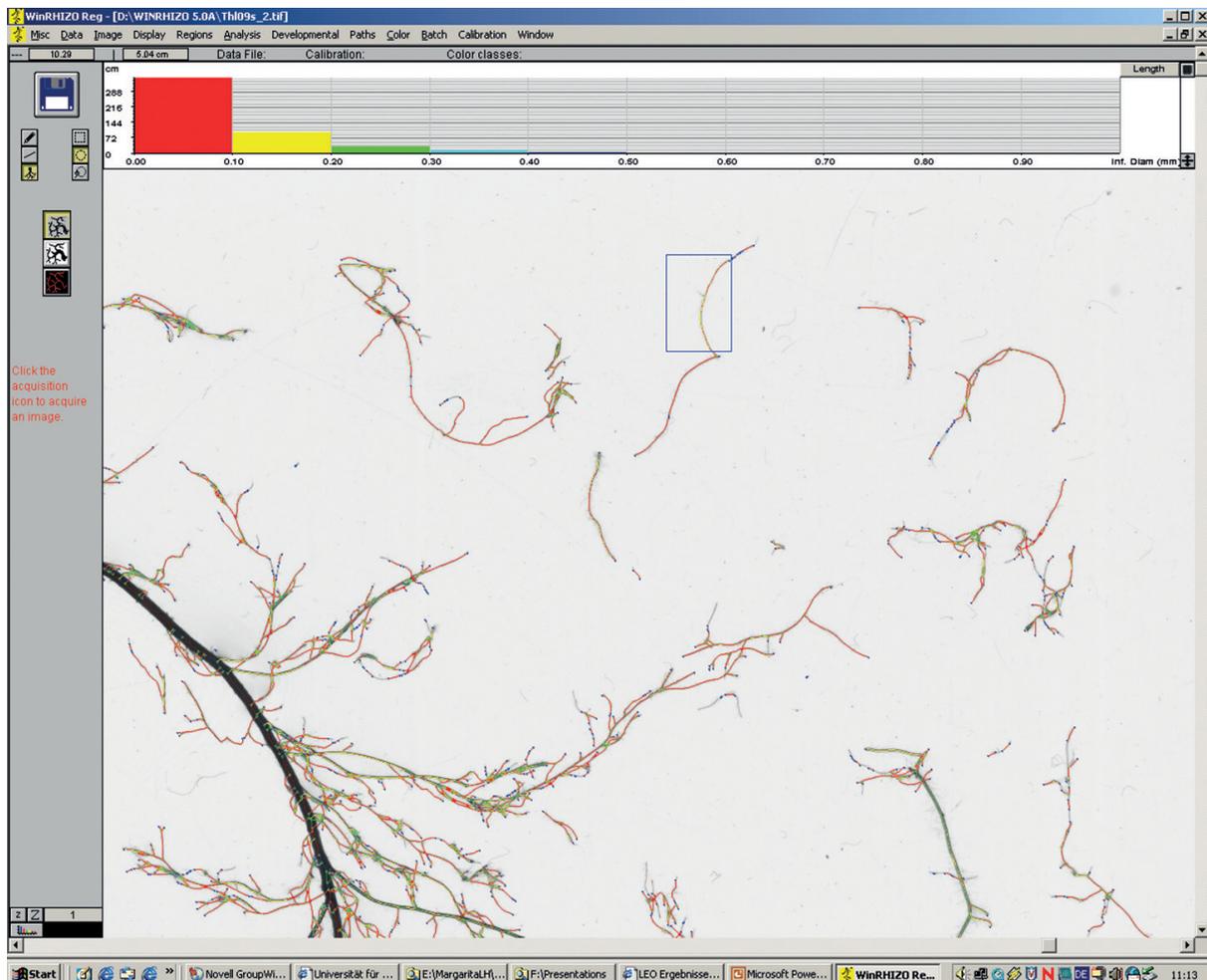


Abbildung 2.3

Seitenwurzeln von Mais, *Zea mays*, Wolnzach, BY, DE, 2015 in einem Flachbettscanner erzeugt, Auswertung mit WinRhizo. Die Wurzeldickeklassen sind im Bild farblich gekennzeichnet und im oberen Teil ist die entsprechende Häufigkeitsverteilung dargestellt. (Foto M. L. HIMMELBAUER)

In diesem Zusammenhang wird auch auf den Einbau, sowohl im Feld als auch im Labor, von sogenannten Rhizotronen hingewiesen, die als zerstörungsfreie Methoden entlang eines Sichtfensters oder Zugangsrohres Wurzeln sichtbar machen. Als Beispiel aus vielen sei hier die Studie des Einflusses von Makroporen auf die Phosphoraufnahme von Weizenwurzeln erwähnt (BAUKE et al. 2017). Mit einer digitalen Kamera aufgenommene Bilder können wie gescannte Wurzeln ausgewertet werden. In der Verbesserung der Aufnahmetechnik liegt ein großes Potenzial.

Eine Online-Datenbank von Softwareprodukten wurde von LOBET et al. (2013) erstellt, (<http://www.plant-image-analysis.org>). Derzeit werden 32 Softwareprodukte für die Analyse von Wurzeln vorgestellt und die Datenbank wird kontinuierlich auf den neuesten Stand gebracht. Enthalten sind auch die Nutzungsbedingungen der einzelnen Softwareprodukte, Information und Handbücher zum Herunterladen.

2.3 Digitalisierung von Wurzelbildern

Für die erweiterte Nutzung der Handzeichnungen kann eine Digitalisierung der Bilder von Nutzen sein. Von METSELAAR (2017, Wageningen University & Research) wurde dafür eine eigene Datenbank unter der Rubrik Image Collections erstellt (<http://images.wur.nl/cdm/landingpage/collection/coll13> oder allgemein <http://images.wur.nl/cdm>). Alle den Scans zugrunde liegenden Zeichnungen in dieser Datenbank wurden von Erwin Lichtenegger für die Wurzelatlas-Bände von Hand angefertigt.

Für diese Datenbank wurden folgende Wurzelatlanten herangezogen:

- Wurzelatlas mitteleuropäischer Ackerunkräuter und Kulturpflanzen (1960)
- Wurzelatlas mitteleuropäischer Grünlandpflanzen, Band 1: Monocotyledoneae (1982)
- Wurzelatlas mitteleuropäischer Grünlandpflanzen, Band 2/1: Pteridophyta und Dicotyledoneae (1992)
- Bewurzelung von Pflanzen in verschiedenen Lebensräumen (1997)
- Wurzelatlas der Kulturpflanzen gemäßigter Gebiete mit Arten des Feldgemüsebaues (2009)

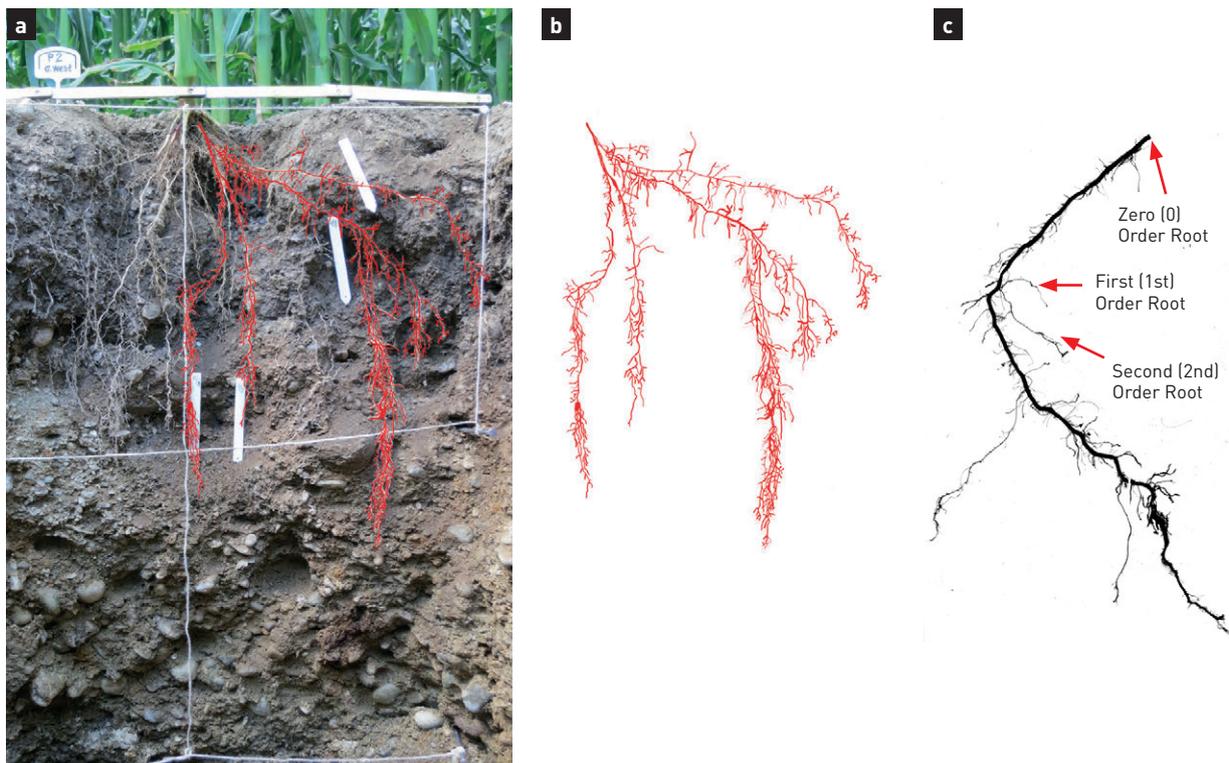


Abbildung 2.4

a) und b) Foto mit digitalisierter Wurzel rot markiert, c) Dazugehöriger Wurzelscan zur Charakterisierung der Wurzelordnung (Foto W. LOISKANDL, Scan A. WEINTRAUD 2019).