

Die Bedeutung von Pflanzenwurzeln bei der ökologischen Beurteilung des Bodengefüges im Labor und in der Landschaft

M. Dannowski und A. Werner

The importance of plant roots for ecological assessment of soil structure in laboratory and in the landscape

1. Einleitung

Die Durchwurzelbarkeit ist ein wichtiger Indikator für den Effekt von Bewirtschaftungsmaßnahmen auf das Bodengefüge und liefert Erkenntnisse über die Eignung des Bodens

als Pflanzenstandort (SELIGE und VORDERBRÜGGE, 1991; DANNOWSKI, 1995). Bei der Beurteilung von Agrarlandschaftselementen hinsichtlich ihrer agrarischen Nutzbarkeit stellt sie deshalb einen unentbehrlichen ökologischen Parameter dar.

Summary

The rootability of soils is an important parameter in laboratory tests as well as on the scale of agricultural landscape for characterizing ecological functions of the soil. Rootability is an indicator for soil structure properties, for the effect of land management measures, especially for soil compactions, and informs about the suitability of a soil as plant site. While the root number serves as indicator for the mechanical state of the soil and for permeability properties, the root length density provides information on the efficiency of root systems at supplying water and nutrients to the whole plant. Both parameters are in a close mathematical relation, which can vary in dependence of the thickness of the tested soil layer and the stage of plant ontogenesis. The tested plant species and varieties react to soil compactions with different intensity, some of them even have a remarkable tolerance. The underground biomass can also vary in dependence on soil conditions. This is important for the determination of landscape carbon balances. Rootability results of soils in an agricultural landscape element provide knowledge of the state of soil structure, the growth conditions in different soil substrates and the suitability for agricultural use.

Key words: plant species, root length density, root number, soil compaction.

Zusammenfassung

Die Durchwurzelbarkeit des Bodens ist sowohl im Laborversuch als auch in der Agrarlandschaft ein wichtiger Indikator zur Charakterisierung der ökologischen Funktionen des Bodens. Sie gibt Aufschluß über Bodengefügeeigenschaften sowie über den Effekt von Bewirtschaftungsmaßnahmen, insbesondere von Bodenverdichtungen. Während die Wurzelanzahl als Indikator für den mechanischen Zustand und die Leitfähigkeitseigenschaften des Bodens dient, ermöglicht die Wurzellängendichte Aussagen über die Leistungsfähigkeit des Wurzelsystems hinsichtlich seiner Versorgungsfunktion für die Gesamtpflanze. Beide Parameter stehen in einem engen mathematischen Zusammenhang, der in Abhängigkeit von der untersuchten Bodenschichtstärke und vom Ontogenesestadium der Pflanzen mehr oder weniger stark variieren kann. Die getesteten Pflanzenarten und -sorten reagieren unterschiedlich stark auf Bodenverdichtungen, einige sogar relativ tolerant. Auch für die unterirdische Biomasse ergaben sich in Abhängigkeit von den Bodenbedingungen erhebliche Unterschiede, was bei der Ermittlung von C-Bilanzen in der Landschaft von Bedeutung ist. Die Ergebnisse zur Durchwurzelung des Bodens in einem Agrarlandschaftsausschnitt lieferten Erkenntnisse über den Bodengefügezustand, die bodensubstratabhängigen Wachstumsbedingungen und über die Eignung des Bodens für eine agrarische Nutzung.

Schlagworte: Pflanzenarten, Wurzellängendichte, Wurzelanzahl, Bodenverdichtung.

Zwei wichtige Indikatoren zur Charakterisierung der Durchwurzelbarkeit sind die Anzahl der Wurzeln, die eine spezifische Bodenschicht durchdringen können und die Wurzellängendichte (cm Wurzel pro cm³ Boden) der einzelnen Bodenschichten.

Während die Wurzelanzahl als Indikator für den mechanischen Zustand und die Leitfähigkeitseigenschaften des Bodengefüges dient (HAMPL und PREUSCHEN, 1991; HARRACH und VORDERBRÜGGE, 1991; DANNOWSKI, 1994) und zugleich auch die mechanische Penetrationskraft der Wurzeln charakterisiert (ASADY et al., 1985; LEHFELDT, 1986; MATERECHERA et al., 1991; DANNOWSKI, 1992), liefert die Wurzellängendichte Aussagen über die Durchwurzelungsintensität in den einzelnen Bodenschichten, das Ausnutzungsvermögen der Wurzeln für Wasser und Nährstoffe im Boden (KÖPKE, 1979; PEARSON und JACOBS, 1985; CALDWELL und VIRGINIA, 1989) und verdeutlicht den Einfluß physiologisch wirksamer Standortfaktoren auf die Wurzelverteilung.

In den letzten Jahren gibt es Hinweise darauf, daß Pflanzenwurzeln aufgrund ihrer unterschiedlich ausgeprägten genetisch bedingten Anpassungsfähigkeit und Streßtoleranz als „Werkzeug“ bei der Auslösung von Gefügeregenerationsprozessen dienen können (ELKINS, 1985; MATERECHERA et al., 1991; DANNOWSKI, 1992). Deshalb sollte der Quantifizierung meliorativer Effekte von Pflanzenwurzeln bei den Forschungsarbeiten zur Gefügesanierung bzw. -erhaltung mehr Aufmerksamkeit gewidmet werden als bisher.

In der vorliegenden Arbeit wurden unterschiedliche Pflanzenarten und -sorten auf ihre Indikatorfunktion bzw. Streßtoleranz gegenüber Bodenverdichtungen untersucht.

Die experimentelle Ermittlung der Wurzellängendichte kann nur durch einen unvermeidbar hohen Arbeitsaufwand realisiert werden. Deshalb wurde für die Ergebnisse der Wurzelanzahl und der Wurzellängendichte in Abhängigkeit von den untersuchten Bodenlagerungsdichten eine mathematische Beziehung abgeleitet. Es galt zu klären, unter welchen Bedingungen sie Gültigkeit besitzt bzw. inwieweit sie verallgemeinert werden kann.

Für ökologische Betrachtungen in der Agrarlandschaft hat sich auch der Zeigerwert der Pflanzen als wertvoll erwiesen. Die Standortcharakterisierung kann dabei um so exakter erfolgen, je genauer neben den oberirdischen auch die unterirdischen Pflanzenteile berücksichtigt werden. Diese ganzheitliche Betrachtung des Lebensraumes der Pflanzen gibt Hinweise auf die standorttypischen Wachstumsbedingungen und erleichtert Entscheidungen für geeignete Kultur- bzw. Bewirtschaftungsmaßnahmen.

Es war deshalb von besonderem Interesse, neben Labor- und punktuellen Felduntersuchungen die Durchwurzelungsverhältnisse in einem größerflächigen Ausschnitt eines Agrarlandschaftselementes zu analysieren und zu prüfen, welche pflanzenbaulichen Schlußfolgerungen aus der räumlichen Verteilung der Pflanzenwurzeln für diesen Ausschnitt abgeleitet werden können.

2. Material und Methoden

2.1 Die Wurzelanzahl als Indikator für den mechanischen Zustand des Bodengefüges

Zum Nachweis der Indikatorfunktion der Wurzeln für den Bodengefügezustand diente ein Schnelltest im Labor nach DANNOWSKI (1989). Dabei gilt die Anzahl der Wurzeln, die eine bestimmte Bodenschicht durchwachsen können, als Maß für den Durchwurzelungswiderstand des Bodens (Abb. 1).

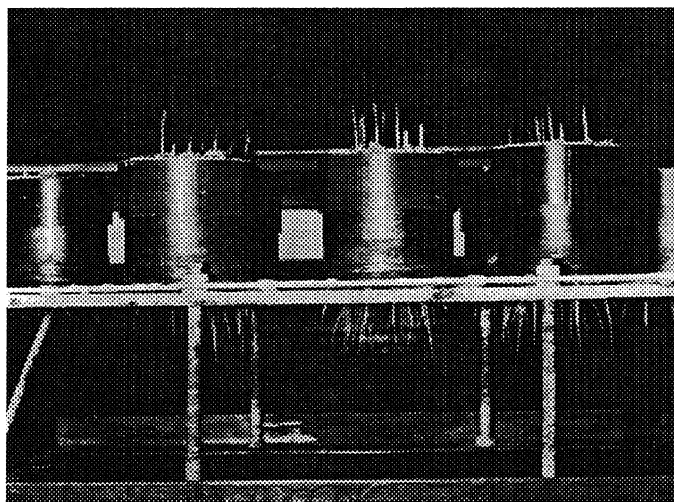


Abbildung 1: Labortest zur Ermittlung der Durchwurzelbarkeit von Bodenproben bzw. zur Ermittlung des Penetrationsvermögens von Pflanzenwurzeln

Figure 1: Laboratory test for determination of rootability of soil core samples and of the penetration capability of plant roots

Für die Gewinnung ungestörter Bodenproben (100 cm³ – Stechzylinder) diente ein Feldversuch (Standortcharakteristik siehe Tabelle 1) mit Fahrgassen. In diesem Versuch wurden die Auswirkungen mehrfacher Überrollungen des Bodens bei allen Feldarbeitsgängen zu Kartoffeln ermittelt. Alle bodenphysikalischen und pflanzenbaulichen Ergebnisse beziehen sich auf Messungen in Fahrgassen im Vergleich zu unbefahrenem Boden.

Tabelle 1: Wichtige Bodeneigenschaften des Ap-Horizontes am Versuchsstandort Mittenwalde

Table 1: Important soil properties of the Ap-horizon at the site Mittenwalde

Versuchsstandort	Mittenwalde
Versuchsbezeichnung	„Fahrgassenversuch im Kartoffelanbau“
Bodentyp	Parabraunerde
Bodenart	schwach lehmiger Sand
Sand (%)	85
Schluff (%)	14
Ton (%)	1
Organische Bodensubstanz (%)	1,4
pH	5,9
Fruchtart	Kartoffeln
untersuchte Varianten	– unbefahren – Radspur (Pflanzung, mechanische Pflege) – Radspur (Pflanzung, mechanische Pflege, Düngung, Pflanzenschutz) Alle Überrollungen bei unterschiedlichen Bodenwassergehalten
WK bei pF 1,7 (M %)	12,5
WK bei pF 2,5	8,0
WK bei pF 4,2	1,0
nWK	11,5

Nach Bestückung der auf gleiche Feuchte eingestellten Stechzylinder mit je 8 vorgekeimten Karyopsen der Testpflanze Sommergerste „Krona“ wurden die Bodenproben auf Metallgitter gestellt und in Pflanzenküvetten untergebracht. Raumklimatisch einheitliche Bedingungen während des Versuches garantierten die Reproduzierbarkeit der Ergebnisse und die Vergleichbarkeit der Testserien.

2.2 Die Wurzelanzahl als Prüfmerkmal genotypischer Unterschiede im Penetrationsverhalten von Pflanzenwurzeln

Mit demselben Labortest wurde in weiteren Untersuchungen im Jahre 1992 das Penetrationsvermögen (die Streßtoleranz) von Wurzeln unterschiedlicher Roggen- genotypen gegenüber „Schadverdichtungen“ geprüft. In diesem Fall dienten die Keimwurzeln, die die Stechzylinderproben durchwuchsen, als Prüfmerkmal genotypischer Unterschiede im Penetrationsvermögen. Als Bodenmodelle wurden 100 cm³ – Stechzylinderproben eines sandigen Substrates (5,4 % Ton, 13,8 % Schluff, 80,8 % Sand,

0,6 % Ct) verwendet, die mit einem Stempel auf die Lagerungsdichten (d_B) 1,50; 1,65 und 1,80 g/cm³ eingestellt wurden. Der Bodenwasservorrat betrug einheitlich 10 Masseprozent.

Im Testprogramm der 9 Roggen- genotypen waren sowohl zugelassene Sorten als auch Zuchtstämme der Kurz- und Normalstrohtypen enthalten. Zu jeweils einer Lagerungsdichtevariante gehörte eine Stichprobe von 24 Zylindern.

Mit 8 Pflanzen pro Zylinder standen für eine Dichtestufe 192 Pflanzen eines Genotypes als Stichprobe zur Verfügung. Die Auswertung der Ergebnisse erfolgte als statistischer Mittelwertvergleich. Zur Abschätzung der Signifikanz der Differenzen zwischen den Mittelwerten wurde der t-Test für $\alpha = 5\%$ verwendet.

2.3 Mathematische Beziehungen zwischen Wurzelanzahl und Wurzellängendichte

Mit dem Ziel, die Beziehung zwischen Wurzelanzahl und Wurzellängendichte modellhaft beschreiben zu können, wurden die Ergebnisse regressionsanalytisch ausgewertet und angegeben, unter welchen Rahmenbedingungen eine Verallgemeinerung der ermittelten Beziehung möglich ist. Zu diesem Zweck wurde wiederum in 100 cm³-Stechzylindern das oben genannte sandige Substrat auf zwei unterschiedliche Lagerungsdichten eingestellt. Nach Beendigung des Durchwurzelungstestes, nach dem Zählen der durchgewachsenen Wurzeln und nach ihrem Auswaschen aus den Proben wurde auch deren Länge gemessen.

2.4 Veränderungen der Wurzellängendichten unterschiedlicher Kulturpflanzenarten und Wildkräuter bei Bodenverdichtung

Um prüfen zu können, wie die Wurzeln unterschiedlicher Pflanzenarten in verdichteten Boden hineinwachsen bzw. wie sie beim Auftreffen auf verdichtete Bodenschichten reagieren, wurden Gefäße von 25 cm Höhe und 15,5 cm Durchmesser verwendet, die aus 5 Segmenten von je 5 cm Schichtdicke bestanden (Abb. 6).

Im ersten Test war der Boden in den Gefäßen durchgängig auf 1,50 bzw. 1,80 g/cm³ eingestellt. Im zweiten Test wurde in den oberen beiden Schichten das lockere Saatbett (1,50 g/cm³) und in den mittleren beiden Schichten eine Schadverdichtung (1,80 g/cm³) simuliert. Die untere

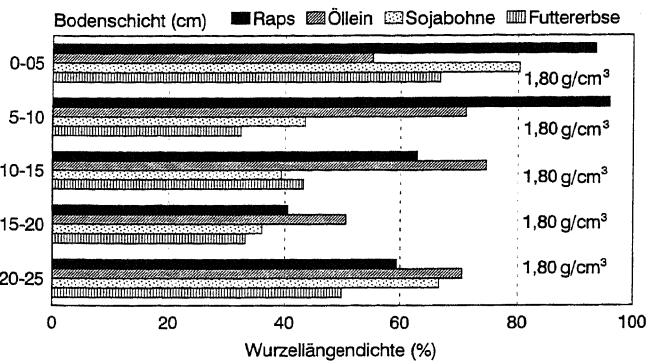


Abbildung 5: Die Verminderung der Wurzellängendichte pro Bodenschicht 90 Tage alter Pflanzen von Raps, Öllein, Sojabohne und Futtererbse bei Keimung und Wachstum in verdichtetem Boden der Lagerungsdichte 1,80 g/cm³ bezogen auf lockeren Boden der Lagerungsdichte 1,50 g/cm³ (100 %)

Figure 5: Decrease of root length density per soil layer of 90 day-old plants of rape, oil flax, soybean and fodder pea germinated and grown in compacted soil (bulk density 1,80 g/cm³) in relation to plants from loose soil (bulk density 1,50 g/cm³ = 100 %)

Schicht besaß die gleiche Lagerungsdichte wie der lockere Oberboden.

Die zu testenden Pflanzenarten wurden nach ihrer wirtschaftlichen Verwertbarkeit und nach ihrer Eignung für den Anbau auf Stilllegungsflächen ausgewählt. Nach der Aussaat der vorgekeimten Pflanzensamen wurden die Gefäße in einem Lichtthermostat der Firma Schütt kultiviert.

Zur Ermittlung der Wurzellängendichten in den einzelnen Bodenschichten wurden die Wurzeln ausgewaschen und gemessen. Aufgrund des hohen Arbeitsaufwandes beim Auswaschen der Wurzeln aus den einzelnen Gefäßringen konnte stets nur ein Gefäß mit jeweils 8 Pflanzen experimentell untersucht werden. Die Meßwerte veranschaulichen die Reaktion von 8 Pflanzen ohne Wiederholungen und sind somit als erste Testergebnisse zu betrachten, die in weiteren Experimenten zu bestätigen sind.

2.5 Die Ermittlung von Wurzelparametern in der Landschaft

Für Untersuchungen der räumlichen Verteilung von Pflanzenwurzeln in einem Ausschnitt eines Agrarlandschaftselementes wurde im Jahre 1994 ergänzend ein Untersuchungsgebiet ausgewählt, das sich in einer kuppigen Grundmoränenlandschaft des nordostdeutschen Tieflandes mit unterschiedlich stark geneigten Hängen befindet. Der Stand-

ort liegt zwischen den Gemeinden Bölkendorf und Parstein, nordöstlich des Parsteiner Sees. An einem nordexponierten selbstbegrüntem Hang dieses ca. 14 ha großen Einzugsgebietes wurde neben anderen bodenökologisch relevanten Eigenschaften (siehe KOSZINSKI et al., 1995) an vier ausgewählten Bodenprofilen die Durchwurzelbarkeit bis zu etwa 1 m Tiefe in unterschiedlichen Hangpositionen untersucht.

Zunächst wurde an den Profilgruben die Wurzelverteilung im Boden auf Folie aufgezeichnet, um die Durchwurzelungstiefe am Hang zu ermitteln. Anschließend erfolgte die schichtweise Entnahme von Bodenproben (600 cm³) am Profil zur Ermittlung der Wurzellängendichte. Im Anschluß an die Gewinnung der Wurzeln wurde auch deren Trockenmasse bestimmt.

3. Ergebnisse

3.1 Die Wurzelanzahl als Maß für die Durchwurzelbarkeit des Bodens

Die Abb. 2 demonstriert die Durchwurzelbarkeit von Stechzylinderproben aus dem Ap-Horizont eines „Fahrgassenversuches“ mit der Fruchtart Kartoffeln in Mittenwalde.

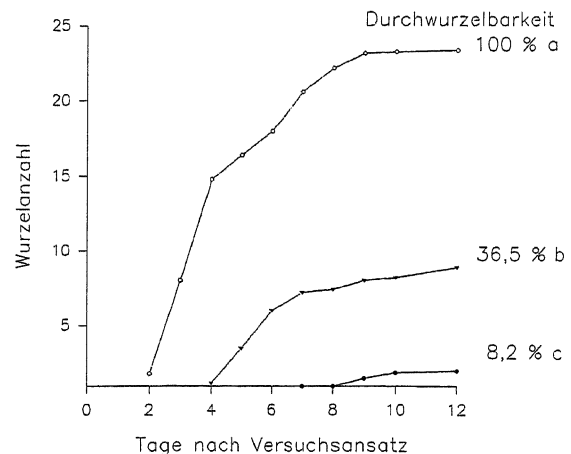


Abbildung 2: Durchwurzelbarkeit (%) von Bodenproben aus dem Ap-Horizont eines Ackerbodens mit Fahrgassen in Mittenwalde (DANNOWSKI, 1994)

○ unbefahren $db = 1,46 \pm 0,04 \text{ g/cm}^3$

∇ Radspur, 4 mal befahren $db = 1,67 \pm 0,02 \text{ g/cm}^3$

● Radspur, 8 mal befahren $db = 1,74 \pm 0,01 \text{ g/cm}^3$

Die Buchstaben a, b und c beschreiben signifikante Unterschiede zwischen den Varianten bei $\alpha = 0,05$

Figure 2: Rootability (%) of soil core samples from Ap-horizon of a ploughed soil with traffic lanes in Mittenwalde (DANNOWSKI, 1994). The letters a, b and c denote significant differences between the variants ($\alpha = 0,05$)

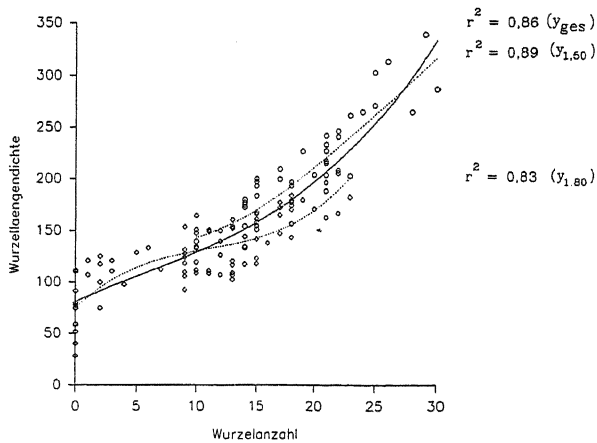


Abbildung 3: Regressionsanalytische Auswertung der Beziehung zwischen Wurzelanzahl und Wurzellaengendichte (cm/100 cm³) von 10 Tage alten Sommergerstenpflanzen der Sorte „Krona“ in Abhängigkeit von zwei Bodenlagerungsdichtestufen (○: 1,50 g/cm³, ◇: 1,80 g/cm³)

$$y_{ges.} = 85,488 + 7,426 x - 0,257 x^2 + 0,0085 x^3$$

$$r^2 = 0,864$$

$$n = 141$$

Figure 3: Regression analysis of the relation between root number and root length density (cm/100 cm³) of 10 day-old barley plants in dependence of two soil bulk densities (○: 1,50 g/cm³, ◇: 1,80 g/cm³)

Mit zunehmender Belastung der Fahrgassen erhöht sich der Durchwurzelungswiderstand des Bodens. Dabei sinkt die Durchwurzelbarkeit des Bodens gegenüber unbefahrenen Flächenanteilen stark ab. Die Keimwurzeln reagieren auf die Bodenverdichtungen mit einem verzögerten Erscheinen und signifikant geringerer Anzahl. Aus der Abbildung 2 ist zu ersehen, daß in der am höchsten belasteten und am häufigsten befahrenen Radspur die Durchwurzelbarkeit des Bodens nur noch 8,2 % derjenigen von unbefahrenem Boden erreicht. Die Bodenlagerungsdichte erhöhte sich dort von 1,46 g/cm³ auf 1,74 g/cm³. Die Anzahl der Wurzeln, die in der Lage sind, den Durchwurzelungswiderstand der Bodenprobe zu überwinden, veranschaulicht zugleich die Intensität des Wurzellaengewachstums in der Bodenprobe.

3.2 Mathematischer Zusammenhang zwischen der Keimwurzelanzahl und der Keimwurzellängendichte in Stechzylinderproben unterschiedlicher Bodenlagerungsdichte

Das Ableiten von Wurzellaengendichten aus Wurzelanzahlen kann durch empirische Berechnung erfolgen, d. h., mittels Regressionen, die auf der Basis experimentell ermittelt-

ter Werte der genannten Größen berechnet wurden (BLAND and DUGAS, 1988). Dieser Weg wurde vielfach beschrieben (BELFORD and HENDERSON, 1985; UPCHURCH, 1985; BOX and RAMSEUR, 1993). Mit Hilfe linearer Regressionen erhielten die genannten Autoren Bestimmtheitsmaße zwischen 52 % und 75 %.

In der vorliegenden Arbeit ergab sich bei der regressionsanalytischen Auswertung aller bei 1,50 und 1,80 g/cm³ gewonnenen Meßwerte für die Beziehung zwischen Wurzelanzahl und Wurzellaengendichte mit einer Polynomialfunktion dritten Grades der engste Zusammenhang mit der höchsten Bestimmtheit von ca. 89 % (Abb. 3).

Wegen des hohen Arbeitsaufwandes bei der Gewinnung der Meßwerte wäre die Entwicklung und Vervollkommnung theoretischer Modelle sinnvoll. Durch einfaches Verändern der Modellparameter könnte so ohne experimentellen Aufwand eine Anpassung dieser Modelle an jede beliebige Situation vorgenommen werden.

3.3 Das Durchwurzelungsvermögen unterschiedlicher Kulturpflanzenarten und -sorten sowie Wildkräuter bei Bodenverdichtung

3.3.1 Unterschiedliche Roggengenotypen

Die Abbildung 4 vermittelt einen Eindruck über die genetisch bedingte Variabilität bezüglich Wurzelentwicklung und -penetrationskraft bereits in frühen Entwicklungsstadien der Pflanzen. Obwohl junges Gewebe gegenüber mechanischem Widerstand besonders empfindlich reagiert (ALLARD, 1980), waren einzelne Genotypen in der Lage, Bodenproben zu

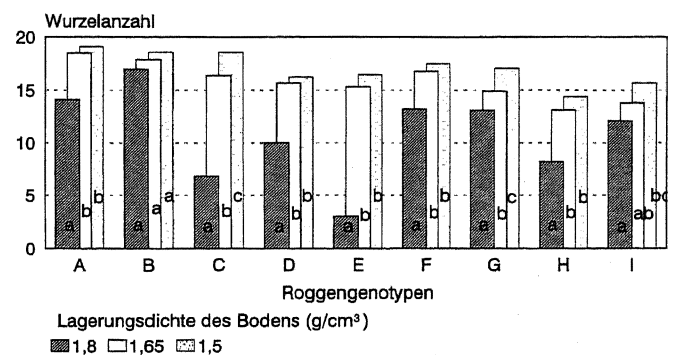


Abbildung 4: Wurzelanzahl als Maß des Durchwurzelungsvermögens unterschiedlicher Roggengenotypen am 10. Tag nach Versuchsansatz in Abhängigkeit von der Bodenlagerungsdichte (DANNOWSKI, 1992)

Figure 4: Root number as measure of penetration capability of different rye genotypes in dependence of soil bulk density ten days after the beginning of the experiment (DANNOWSKI, 1992)

durchdringen, die als „schadverdichtet“ bezeichnet werden müssen. Entgegen allen Erwartungen war das Durchwurzelungsvermögen einzelner Roggengenotypen im schadverdichteten Bereich von $1,80 \text{ g/cm}^3$ ähnlich intensiv wie in lockerem Boden (DANNOWSKI, 1992).

3.3.2 Raps/Öllein/Sojabohne/Futtererbse – Luzerne/Buchweizen/Kümmel – Zuckerhirse/Hanf/Saflor – Wegwarte/Löwenzahn/Beifuß

In größeren Gefäßen (Abb. 5 und 6) wurde die Reaktion des Wurzelsystems von Pflanzenarten unterschiedlicher agrarpolitischer und wirtschaftlicher Bedeutung auf schadverdichteten Boden geprüft. Auch hier zeigte sich die Funktion der Wurzeln als Indikator für den Nachweis von Schadeffekten im Boden in gleicher Weise wie im Stechzylinder. Die im verdichteten Boden getesteten Pflanzenarten reagier-

ten auf Grund der artspezifischen Anpassungsfähigkeit ihrer Wurzeln unterschiedlich heftig. In Abhängigkeit ihres Durchwurzelungsvermögens verminderte sich die Wurzelverteilung in allen Bodenschichten mehr oder weniger stark.

Pflanzen, die bereits in schadverdichtetem Boden keimten, hatten gegenüber unverdichtetem Boden von Anfang an ein reduziertes Wurzelwachstum (Abb. 5).

Auch beim Auftreffen auf eine schadverdichtete Bodenschicht nach anfänglich normaler Wurzelentwicklung im lockeren Oberboden reagierten die Pflanzen im Vergleich zu denen in einheitlich lockerem Boden mit teils starken Reduktionen des Wurzelwachstums (Abb. 6). Unterhalb der verdichteten Schicht begann häufig ein erneutes Wurzelwachstum.

In den Abbildungen 7 und 8 sind die Reaktionen von Wurzeln unterschiedlicher Pflanzenarten beim Auftreffen auf eine verdichtete Bodenschicht im Vergleich dargestellt. Die jeweils gleichaltrigen Pflanzen unterscheiden sich

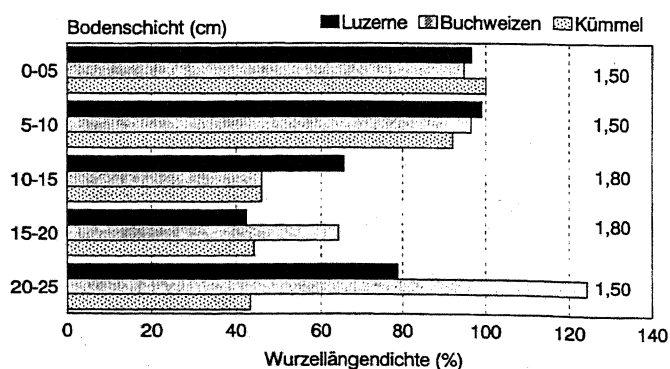
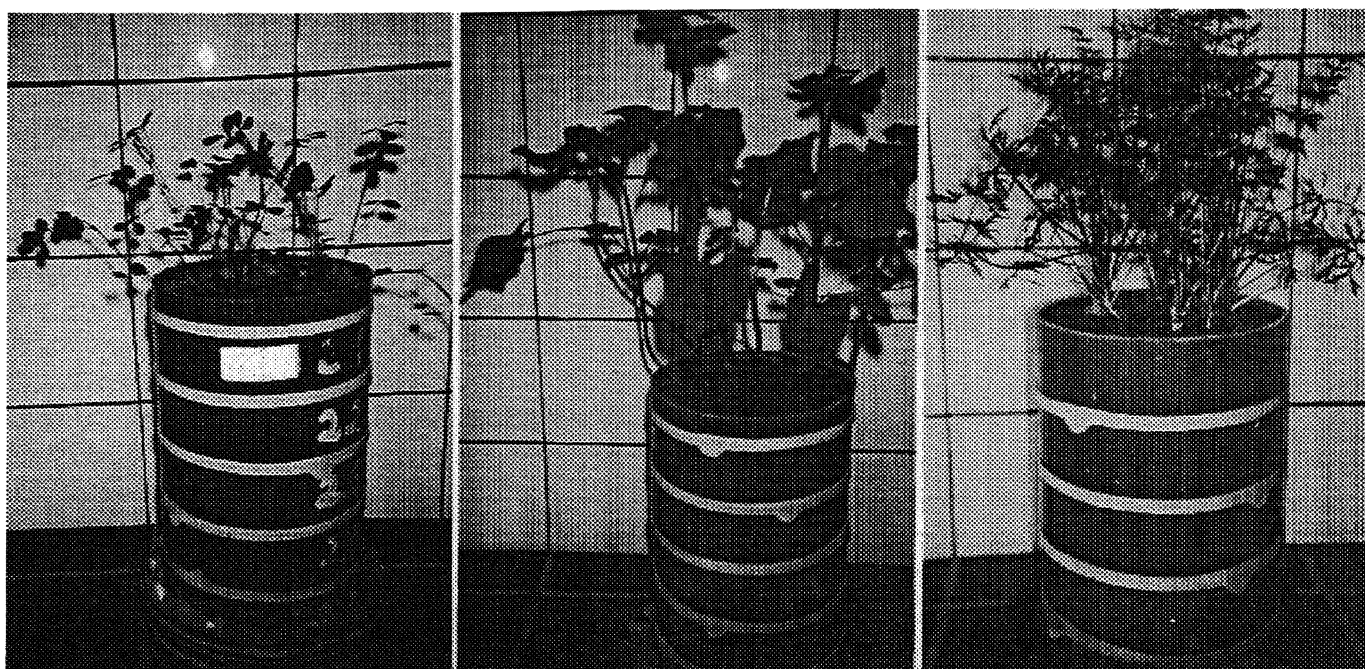


Abbildung 6: Die Reaktion der Wurzeln von Luzerne, Buchweizen und Kümmel beim Auftreffen auf eine verdichtete Bodenschicht der Lagerungsdichte $1,80 \text{ g/cm}^3$ nach Keimung in lockerem Boden der Lagerungsdichte $1,50 \text{ g/cm}^3$. Jede Schicht der Kontrollvariante ohne Verdichtungszone diente als Bezugsbasis (100 %)

Figure 6: The reaction of alfalfa, buckwheat and caraway roots on a compacted soil layer of $1,80 \text{ g/cm}^3$ after germination in loose soil of $1,50 \text{ g/cm}^3$. Every layer of the control without compaction layer served as reference (100 %)

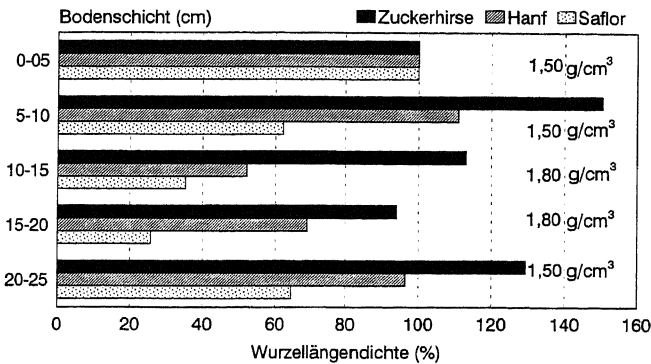


Abbildung 7: Vergleichende Darstellung der Wurzellängendichten 80 Tage alter Pflanzen von Zuckerhirse, Hanf und Saflor beim Auftreffen auf eine verdichtete Bodenzone der Lagerungsdichte 1,80 g/cm³ nach Keimung in lockerem Boden der Lagerungsdichte 1,50 g/cm³. Die jeweils erste Bodenschicht diente bei allen Pflanzenarten als Bezugsbasis (100 %)

Figure 7: Comparison of root length densities of 80 day-old millet, hemp and safflower plants on a compacted soil layer of 1,80 g/cm³ after germination in loose soil of 1,50 g/cm³. For each plant species the first soil layer served as reference (100 %)

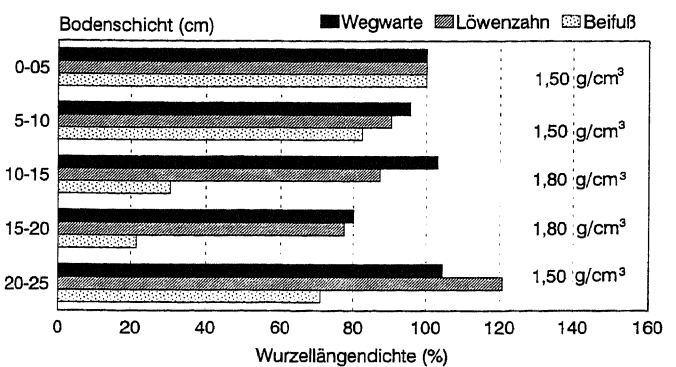


Abbildung 8: Vergleichende Darstellung der Wurzellängendichten 130 Tage alter Pflanzen von Wegwarte, Löwenzahn und Beifuß beim Auftreffen auf eine verdichtete Bodenzone der Lagerungsdichte 1,80 g/cm³ nach Keimung in lockerem Boden der Lagerungsdichte 1,50 g/cm³. Die jeweils erste Bodenschicht diente bei allen Pflanzenarten als Bezugsbasis (100 %)

Figure 8: Comparison of root length densities of 130 day-old chicory, dandelion and mugwort plants on a compacted soil layer of 1,80 g/cm³ after germination in loose soil of 1,50 g/cm³. For each plant species the first soil layer served as reference (100 %)

durch pflanzenartsspezifisch bedingte, unterschiedlich starke Reduzierungen des Wurzelwachstums in dieser Schicht und durch unterschiedlich intensive Neubildung der Wurzeln unterhalb der verdichteten Bodenschicht.

Aus Gründen einer besseren Vergleichbarkeit der Pflanzenarten untereinander wurden in den grafischen Darstellungen Relativwerte für die Wurzellängendichten verwendet. Die entsprechenden Absolutwerte sind Tabelle 2 zu entnehmen.

3.4 Die Bedeutung von Pflanzenwurzeln in der Landschaft

Bodensubstrat und Bodengefügeeigenschaften besitzen einen dominierenden Einfluß auf das Verhalten von Pflanzenwurzeln im Boden. Die bodengenetische Differenzierung am untersuchten nordexponierten Hang des Untersuchungsgebietes weist eine für Steilkatenen dieser Landschaft typische Abfolge auf. Von der Hangkuppe über den Ober-

Tabelle 2: Wurzellängendichten der untersuchten Pflanzenarten (absolute Werte)
Table 2: Root length densities of the studied plant species (absolute numbers)

Variante	Pflanzenart	Wurzellängendichte pro Schicht in cm/cm ³				
		1	2	3	4	5
Keimung und Wachstum in Boden der Lagerungsdichte 1,80 g/cm ³	Raps	3,16	2,57	1,66	1,06	1,39
	Öllein	3,97	2,80	1,56	1,04	1,41
	Sojabohne	1,02	0,36	0,26	0,17	0,12
	Futtererbse	2,34	1,05	0,63	0,32	0,26
Keimung in lockerem Boden der Lagerungsdichte 1,50 g/cm ³ , verdichtete Zone (1,80 g/cm ³) in der 3. und 4. Bodenschicht	Luzerne	1,93	2,09	1,03	0,57	1,08
	Kümmel	2,30	2,51	1,23	1,18	1,46
	Buchweizen	1,60	2,40	0,47	0,36	0,36
	Zuckerhirse	1,47	2,21	1,66	1,38	1,90
	Hanf	3,50	3,88	1,82	2,42	3,37
	Saflor	8,98	5,59	3,19	2,32	5,80
	Wegwarte	1,35	1,29	1,39	1,08	1,41
	Löwenzahn	5,84	5,27	5,09	4,52	7,05
	Beifuß	7,90	6,50	2,40	1,70	5,60

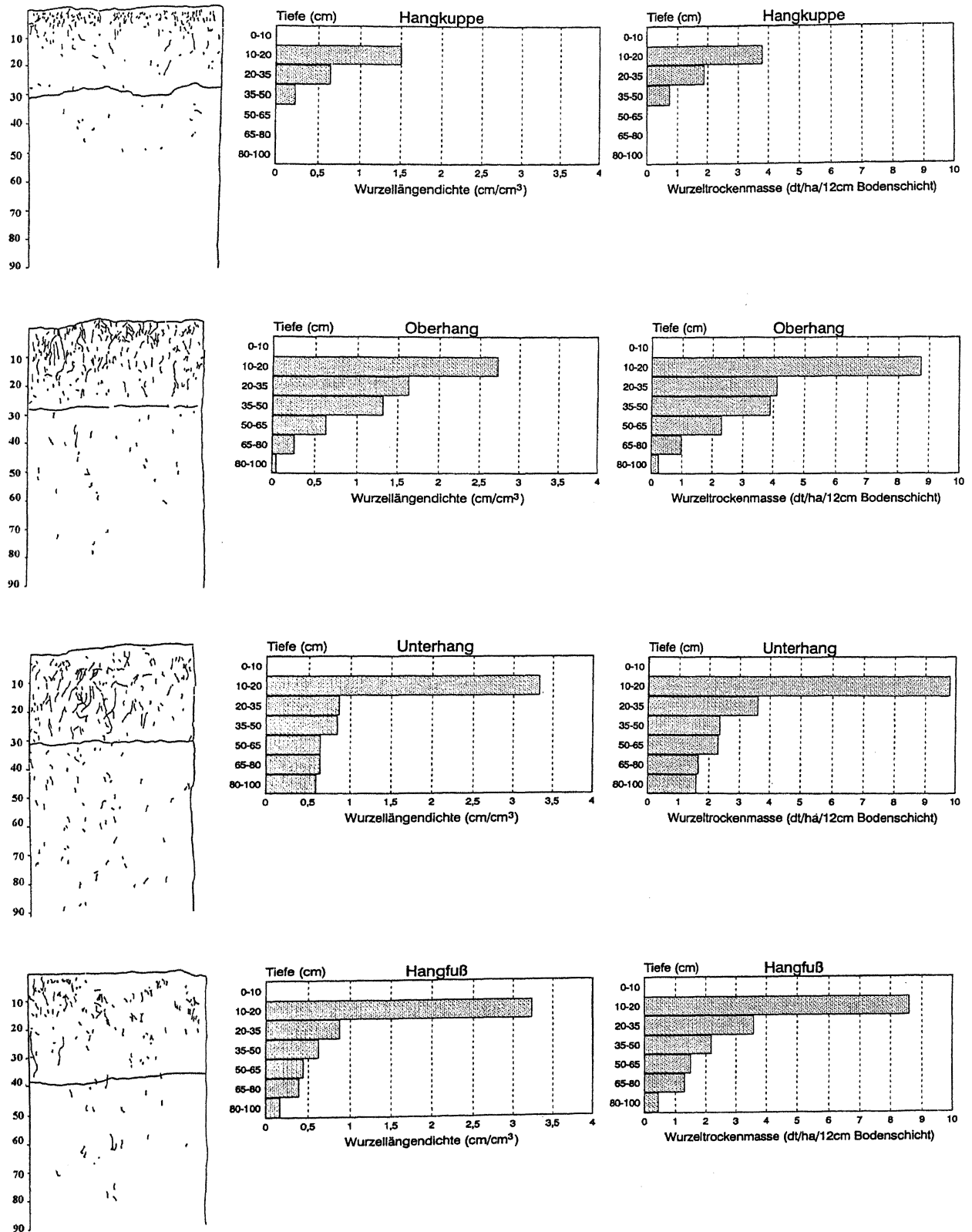


Abbildung 9: Durchwurzelungstiefen, Wurzellängendichten und Wurzelrockenmassen an einem nordexponierten selbstbegrüntem Hang eines Untersuchungsgebietes zwischen den Gemeinden Bölkendorf und Parstein
 Figure 9: Rooting depth, root length densities and root dry mass measured on a north slope of an experimental region between the villages Bölkendorf and Parstein

hang zum Mittel- und Unterhang gehen Pararendzina, erodierte Parabraunerde, Parabraunerde und Kolluvien über Gley ineinander über (KOSZINSKI et al., 1995).

Der Abbildung 9 sind die Ergebnisse zur Durchwurzelungstiefe, der Wurzellängendichte und der Wurzelrockenmasseverteilung in den Profilen des untersuchten Hanges zu entnehmen.

Alle drei Wurzelparameter nehmen von der Hangkuppe bis zum Unterhang zu. Auch der Hangfuß weist eine gute Durchwurzelung auf, die jedoch ab etwa 75 cm Tiefe auf Grund von Staunässe nicht mehr exakt erfaßbar war.

Die geringe Durchwurzelungsintensität an der Hangkuppe ergibt sich aus dem Profilaufbau (Ap/C), der hohen Bodenlagerungsdichte im C-Horizont (Tab. 3) und der geringen nutzbaren Wasserkapazität, ermittelt durch SCHINDLER, 1993. In Richtung Ober- und Unterhang nahmen die nutzbare Wasserkapazität des Unterbodens und die Abundanzen der Regenwürmer (JOSCHKO et al., 1994) in gleicher Weise zu wie die Durchwurzelungsintensität, was auf einen engen funktionalen Zusammenhang hinweist. Es liegt nahe, daß auch die gute Durchwurzelung des Unterbodens am Unterhang trotz relativ

hoher Lagerungsdichte auf das Vorhandensein zahlreicher Makroporen infolge intensiver Regenwurmtätigkeit zurückzuführen ist (JOSCHKO et al., 1994). Die im Bereich des Ober- und Unterhanges zunehmende Wurzelmasse läßt auf einen steigenden Anteil der Wurzeln an der Humusbildung in diesen Bereichen schließen. Auch für den mit Hilfe einer automatisierten Infrarotgasanalyse bestimmten mikrobiell gebundenen Kohlenstoff sowie für den organisch gebundenen Kohlenstoff wurden in diesem Bereich Maximalwerte ermittelt (WIRTH, 1994; KOSZINSKI et al., 1995).

4. Diskussion

4.1 Die Durchwurzelbarkeit als wichtiger ökologischer Indikator für den Bodengefügezustand

Auf vielen Standorten haben Eingriffsintensität und -häufigkeit bei der Landbewirtschaftung zu Umweltproblemen geführt, deren Beseitigung erheblichen Forschungs- und Handlungsbedarf erfordert. Ein Schwerpunktproblem bil-

Tabelle 3: Bodenfeuchte und Bodenlagerungsdichte von Schichten in den Bodenprofilen des untersuchten Hanges
Table 3: Soil moisture and soil bulk density of layers in the profile holes on the examined slope

Bodenschicht	Hangkuppe				Oberhang			
	Bodenlagerungsdichte (g/cm ³)	Bodenfeuchte (M % Vol. %)		Sättigungsgrad (pF-Wert)	Bodenlagerungsdichte (g/cm ³)	Bodenfeuchte (M % Vol. %)		Sättigungsgrad (pF-Werte)
1		10,6				16,7		
2	1,64	11,6	19,0	2,5	1,52	16,8	25,5	2,0
3	1,79	12,6	22,6	> 2,7		17,2		
4					1,59	13,9	22,1	> 2,7
5						13,2		
6						12,7		
Bodenschicht	Unterhang				Hangfuß			
	Bodenlagerungsdichte (g/cm ³)	Bodenfeuchte (M % Vol. %)		Sättigungsgrad (pF-Wert)	Bodenlagerungsdichte (g/cm ³)	Bodenfeuchte (M % Vol. %)		Sättigungsgrad (pF-Werte)
1		17,7				16,4		
2	1,54	13,5	20,8	> 2,0	1,67	15,4	25,7	2,0
3		16,6				14,1		
4	1,68	15,8	26,5	2,5	1,63	14,3	23,3	< 2,0
5		17,7				15,4		
6		16,5				16,3		

Tiefenbereiche der untersuchten Bodenschichten: 1: 10–20 cm, 2: 20–35 cm, 3: 35–50 cm, 4: 50–65 cm, 5: 65–80 cm, 6: 80–100 cm

den schädliche Bodenverdichtungen, die auf ca. 70 % der Brandenburger Moränenböden (DÜRR et al., 1995) vorhanden sind.

Voraussetzung für die Ableitung von Strategien und Maßnahmen zur Sanierung (Regeneration) geschädigter Ackerböden und zum vorbeugenden Bodenschutz sind Analysen des Ausmaßes der Schadefekte und deren ökologische Beurteilung.

Oftmals fehlen geeignete Prüfkriterien für derartige Analysen. Da Kenntnisse über bodenphysikalische Faktoren und oberirdische Biomassebildung für eine ökologische Beurteilung des Bodens nicht ausreichen (BÖHM, 1974), wurde die Durchwurzelbarkeit des Bodens als ein solches Prüfkriterium herangezogen. Sie gibt Aufschluß über den Gefügestand eines Bodens hinsichtlich seiner Eignung als Pflanzenstandort.

Deshalb gehört die Durchwurzelbarkeit zu den wichtigsten Eigenschaften des Bodens und ist bei der ökologischen Beurteilung seiner Funktionsfähigkeit und seiner Fruchtbarkeit ein unverzichtbarer Parameter.

Um die Reaktion von Pflanzenwurzeln auf deren Haupteinflußfaktoren (Bodeneigenschaften, Bewirtschaftung, Landnutzung, Witterung) abschätzen zu können, sind Algorithmen bzw. Modelle mit einem hohen Allgemeingültigkeitsgrad dringend erforderlich. Derartige Modelle als Werkzeug zur großflächigen Abschätzung von Wurzelreaktionen stellen ein erhebliches Forschungsdefizit dar.

Wurzelnanzahlen, Wurzellängendichte und Wurzelmasse sind die am meisten analysierten Wurzelparameter, die wichtige Aussagen zu den Wachstumsbedingungen am Standort ermöglichen.

Bereits im Keimpflanzenstadium hat die Wurzel innerhalb des Gesamtstoffwechsels der Pflanze, z. B. als Lieferant rhizogener Metabolite, für die Entwicklung und Funktion des Sprosses große Bedeutung (WIEDENROTH, 1982). Deshalb setzt eine gute Bestandsentwicklung eine möglichst rasche Jungpflanzenentwicklung mit optimalem Wurzelwachstum voraus (APEL et al., 1981).

Mit zunehmender Dichtlagerung des Bodens vermindert sich die Fähigkeit der Wurzeln, Bodenschichten zu durchwachsen. Infolge des hohen Durchwurzelungswiderstandes vermindert sich somit auch die Anzahl der Wurzeln, die an der Unterseite von Bodenschichten bzw. von Bodenproben zu finden sind.

Die weit verbreitete Beobachtung der Reduzierung des Wurzellängenwachstums in Böden hoher Festigkeit (HELAL und SAUERBECK, 1986; ATWELL, 1988; BENGOUGH und

MULLINS, 1991; DANNOWSKI, 1994) wird auf eine verminderte Zellteilungsrate im Spitzenmeristem der Wurzel bei gleichzeitiger Verminderung der Zelllänge zurückgeführt (ERDMANN, 1988; BENGOUGH und MULLINS, 1990). Einen gleichartigen Effekt hat eine schädliche Dichtlagerung des Bodens auf die Durchwurzelungsintensität in den einzelnen Bodenschichten.

Daraus ergibt sich eine geringere Nährstoffaufnahmeeffizienz, für die sowohl eine verminderte Verfügbarkeit (BOHNE, 1988; KEITA und STEFFENS, 1989) als auch ein eingeschränktes Aneignungsvermögen von Nährstoffen infolge veränderter Durchwurzelung verdichteten Bodens verantwortlich gemacht werden (MÜLLER et al., 1991; GRATH und HÅKANSSON, 1992). Die Erfassung der Wurzellängendichte ermöglicht auch Aussagen zur Durchwurzelungstiefe, die eine wichtige Kenngröße für die Beregnungsbedürftigkeit darstellt.

Negative Konsequenzen verdichteten Bodengefüges ergeben sich auch für die Dynamik des Feuchteentzuges der Wurzeln besonders unter Freilandbedingungen. Es erfolgt eine Verzögerung der bedarfsgerechten Tiefenausbreitung des Wurzelsystems. Der Anschluß an leicht aufnehmbares Wasser im Unterboden wird somit verspätet oder gar nicht hergestellt (WERNER, 1988).

HELAL und SAUERBECK (1986) und HELAL (1991) berichten über vermehrte Exsudatabgabe physikalisch gestreßter Wurzeln, verdichtungsbedingt sinkende Assimilationsleistung der Pflanzen und steigenden Assimilateverbrauch verbunden mit einer starken Zunahme des Energieverbrauches (ALLARD, 1980).

Die in Gefäßen nachgewiesenen Effekte von Bodenschadverdichtungen auf das Wurzelwachstum und das Wachstum der gesamten Pflanze haben sich mehrfach auch unter Feldbedingungen bestätigt (NEGI et al., 1981; HÅKANSSON et al., 1988; LIPIEC et al., 1991; DANNOWSKI, 1994).

4.2 Mathematische Beziehung zwischen Wurzelanzahl und Wurzellängendichte

Wurzelnanzahlen sind sowohl im Freiland (Bruchschollenmethode nach VETTER und SCHARAFAT, 1964) als auch in einer Bodenprobe (Durchwurzelungstest nach DANNOWSKI, 1989) relativ einfach zu ermitteln.

Die experimentelle Erfassung von Wurzellängendichten hingegen erfordert einen auf die Dauer unverträglich hohen Arbeitsaufwand (TENNANT, 1975; BÖHM, 1978). Mit dem

Ziel, den Arbeitsaufwand zu reduzieren und dennoch ein Höchstmaß an Informationen über die Intensität des Wurzelwachstums zu erhalten, wurde die Möglichkeit geprüft, aus der an der Gefäßunterseite ermittelten Anzahl der Wurzeln auf deren Verteilung zu schließen, ohne sie experimentell ermitteln zu müssen.

So wurde zunächst versucht, den gesetzmäßigen Zusammenhang zwischen beiden Größen mathematisch zu beschreiben.

Unter den vorliegenden Versuchsbedingungen ergab sich eine Beziehung, die in Form einer Polynomfunktion dritten Grades sowohl bei $1,50 \text{ g/cm}^3$ als auch bei $1,80 \text{ g/cm}^3$ Bodenlagerungsdichte mit einer Bestimmtheit von 89 % bzw. 83 % gut gesichert war. Da die Wurzeln immer nur an der Unterseite einer bestimmten Bodenschicht ermittelt werden, die Wurzellängendichten hingegen für ein bestimmtes Bodenvolumen gelten, ist jedoch generell zu beachten, daß die Bodenschichtstärken nicht zu groß gewählt werden, um eine gute Zuordenbarkeit beider Größen zu garantieren.

Bei der Lagerungsdichte von $1,80 \text{ g/cm}^3$ waren oft nur wenige Wurzeln in der Lage, den Boden zu durchdringen. Vielfach konnte keine Wurzel an der Zylinderunterseite ermittelt werden. Meist bleiben unter diesen Bedingungen die Wurzeln im oberen Probenbereich stecken, einzelne wachsen in untere Bereiche ein, ohne die gesamte Bodensäule zu durchdringen. Auf diese Weise können sich für die Wurzellängendichte in der Probe unterschiedlich hohe Werte ergeben, obwohl an der Zylinderunterseite keine Wurzeln sichtbar sind. Effekte dieser Art treten besonders im Keimpflanzenstadium auf, wenn das Wurzelsystem erst im Entstehen ist. Bei längerer Versuchsdauer in Vegetationsgefäßen bzw. im Freiland können sich solche Effekte auch bei der Seitenwurzelbildung ergeben.

Hier nicht dargestellte eigene Ergebnisse zeigen, daß ein gut gesicherter mathematischer Zusammenhang zwischen Wurzelanzahl und Wurzellängendichte nur bei relativ geringen Schichtstärken des Bodens (besonders in wachstumsintensiven Phasen), d. h. bei guter Zuordenbarkeit der beiden Größen und in relativ stabilen Ontogenesestadien der Pflanzen erzielbar ist.

Bei Lagerungsdichteverhältnissen, die das Wurzelwachstum beeinträchtigen und in intensiven Wachstumsphasen wird die mathematische Beziehung zwischen beiden Größen weniger gut gesichert sein. Eine für diese Bedingungen wünschenswerte Ermittlung von Korrekturfaktoren erfordert weitergehende Untersuchungen.

4.3 Das Durchwurzelungsvermögen unterschiedlicher Kulturpflanzenarten und -sorten sowie Wildkräuter

Neben der Indikatorfunktion der Wurzel für den Nachweis von Schadeffekten im Bodengefüge weisen aktuelle Ergebnisse darauf hin, daß von Wurzeln auch ein gewisser „Werkzeugeffekt“ ausgehen kann. Wurzeln schaffen Leitbahnen für den Wasser- und Lufttransport sowie für die Wurzelnachfolgender Fruchtarten (ELKINS, 1985; GOSS, 1987) und tragen durch die Ausscheidung von Exsudaten zur Stabilisierung von Bodenaggregaten bei (REID und GOSS, 1981; MATERECHERA et al., 1992).

Es hat sich gezeigt, daß erhebliche Niveauunterschiede im Durchwurzelungsvermögen bestehen, die nicht nur artspezifisch sind, sondern auch genotypische Besonderheiten innerhalb einer Pflanzenart erkennen lassen. Diese genetisch bedingte Anpassungsfähigkeit und Streßtoleranz gegenüber Bodenverdichtungen eröffnet die prinzipielle Möglichkeit, durch gezielten Anbau von Pflanzen mit hohem Penetrationsvermögen ihrer Wurzeln Regenerationsprozesse im Boden zu unterstützen und zu beschleunigen und dadurch den Bearbeitungsaufwand im Boden zu reduzieren. Pflanzenwurzeln können deshalb auch ein wichtiges Werkzeug für die Bodensanierung bzw. für den vorbeugenden Bodenschutz darstellen.

Die Ermittlung der Zeiträume und Einflußfaktoren für Regenerationsprozesse im Boden sollte Gegenstand weiterer Untersuchungen sein.

Pflanzenartspezifische, genetisch bedingte Unterschiede existieren auch für andere Wurzelparameter, z. B. für die Morphologie, die Keimwurzelanzahl, die Leistungsfähigkeit der Wurzeln und auch für die Wurzelmasse (APEL et al., 1981).

Die untersuchten Pflanzen sind sowohl in ihrer Bedeutung bei der Regeneration des Bodens als auch hinsichtlich ihrer gebildeten Wurzelmasse unterschiedlich wichtig.

Einerseits beeinflussen Pflanzenwurzeln durch das Ausscheiden von Wurzelexsudaten die Mikroorganismenaktivität positiv. Nach ihrem Absterben werden die Wurzeln abgebaut und nehmen aktiv am Humifizierungsprozeß teil. Der größte Teil der C-Anlieferung im Boden stammt aus abgestorbener Wurzelmasse. Viel Wurzelmasse bedeutet somit viel Energie und Humus für den Boden.

Andererseits gibt ein quantitativ gut entwickeltes Wurzelsystem keine Garantie für die Qualität des Pflanzenbestandes. Ein hoch aktives aber quantitativ geringer entwickeltes Wurzelsystem kann zusammen mit optimalen

Bedingungen für das Funktionieren der ober- und unterirdischen Organe einen hoch produktiven Bestand erzeugen (PETR et al., 1983).

Das Verhalten der Wurzeln wird durch das komplexe Einwirken der Umwelt am Ort des Wachstums beeinflusst. Die Eigenschaften des Bodens sind dabei von besonderer Bedeutung.

Es besteht kein Zusammenhang zwischen gebildeter Wurzelmasse und Penetrationskraft der Wurzeln. Wenige Wurzeln können eine hohe Penetrationskraft haben und Verdichtungszonen relativ leicht durchdringen, während ein quantitativ starkes Wurzelsystem nur relativ flachgründig wachsen kann, weil es auf Bodenverdichtungen sehr empfindlich reagiert. Derartige spezifische Reaktionen von Wurzelsystemen müssen in Wachstumsmodellen allgemeiner Art durch die Ermittlung geeigneter Korrekturfaktoren Berücksichtigung finden. Die Anpassung allgemeingültiger Modelle an konkrete Faktorenkonstellationen ist zur Verbesserung der Flexibilität und Aussagekraft von Modellen zum Wurzelwachstum dringend notwendig. Der Ermittlung von Korrekturfaktoren sollte deshalb verstärkte Aufmerksamkeit gewidmet werden.

4.4 Die Bedeutung von Pflanzenwurzeln in der Agrarlandschaft

Aus den Ergebnissen der Wurzeluntersuchungen an Bodenprofilen unterschiedlicher Hangposition ist zu ersehen, daß Wurzeln auf die Heterogenität der Bodensubstrate und deren Eigenschaften auch in der Landschaft sehr unterschiedlich reagieren.

Konkrete Kenntnisse zum Wachstum von Pflanzenwurzeln in heterogenen Böden ermöglichen es, den Bodenbedingungen besser angepaßte Bewirtschaftungsformen anzuwenden, um eine bestmögliche Ausbildung der Wurzelsysteme zu fördern und zu beschleunigen.

Im Untersuchungsgebiet hat sich die Hangkuppe aufgrund der Horizontabfolge (geringmächtige durchwurzelbare Zone unmittelbar auf Gesteinshorizont, Tab. 3) für den Anbau tiefwurzelnder Kulturpflanzen als ungeeignet erwiesen. Geringe nutzbare Wasserkapazität (siehe Abschnitt 3.4) und hohe Lagerungsdichte ermöglichen bestenfalls den Anbau einer trockenheitsverträglichen flachwüchsigen Pflanzengesellschaft. Oberhang und Mittelhang bieten gute Wachstumsbedingungen für Pflanzen. Für das Erschließen von Wasser und Nährstoffen sind aufgrund tiefreichender und intensiver Durchwurzelung gute

Voraussetzungen vorhanden. Auch der Hangfuß ist intensiv durchwurzelt, jedoch wegen Staunässe im Unterboden für Pflanzenwachstum nur bedingt zu empfehlen.

Die Analysen des Wurzelwachstums am untersuchten Hang liefern in Übereinstimmung mit anderen ökologischen Bodengefügeeigenschaften ein recht genaues Bild über die standortspezifischen Voraussetzungen und über den Sinn pflanzenbaulicher Aktivitäten. In einem nächsten Schritt ist vorgesehen, diese Zusammenhänge zu quantifizieren.

Die Durchwurzelbarkeit des Bodens ist somit auch in der Agrarlandschaft ein unverzichtbarer Indikator für die Beurteilung der ökologischen Funktionen des Bodens und für seine Eignung als Pflanzenstandort für eine ökologische Landnutzung.

Die große Bedeutung der Pflanzenwurzeln für die ökologische Standortbeurteilung und die daraus resultierenden Bewirtschaftungsstrategien steht in krassem Widerspruch zu dem hohen experimentellen Arbeitsaufwand für die Gewinnung von Wurzelparametern.

Für die Erfassung des Wurzelwachstums in der Agrarlandschaft steht bislang keine universell einsetzbare Methode zur Verfügung. Versuchsfrage und Versuchsziel entscheiden darüber, welche Methode bzw. Methodenkombination gewählt werden sollte. In der vorliegenden Arbeit diente ein Laborschnelltest mit ungestörten Bodenproben (Bodenmonolithen) der wenig arbeitsaufwendigen raschen Ermittlung der Durchwurzelbarkeit dieser Monolithen. Diese Methode besitzt die bisher höchste Treffgenauigkeit (KÖPKE, 1979) und ermöglicht somit eine reale Beurteilung der mechanischen Festigkeit des Bodengefüges und seiner ökologischen Funktionsfähigkeit.

Beim Vergleich der Wurzellängendichten unterschiedlicher Varianten hingegen ist es wichtiger, welche Methode eine ausreichende Differenzierung erkennen läßt. Für ökologische Fragestellungen in der Agrarlandschaft hinsichtlich der Wurzelverteilung ist die Profilwandmethode die aussagekräftigste (KÖPKE, 1979) und am wenigsten abhängig vom Bodenzustand. Sie ermöglicht die gute Erkennbarkeit unterschiedlicher Wurzelverteilungsmuster. Wurzeln und Bodenprofil sind gleichzeitig erfassbar. In situ-Längenmessungen können in hoher Auflösung der räumlichen Verteilung der Wurzeln im Bodenprofil bereits zu einem frühen Zeitpunkt vorgenommen werden.

In der vorliegenden Arbeit wurden bei den Untersuchungen in der Agrarlandschaft beide Methoden kombiniert, um das Verhältnis von Arbeitsaufwand und Informationsgehalt so günstig wie möglich zu gestalten.

Tabelle 4: Charakterisierung der Einsatzmöglichkeiten und Bewertung der Aussagequalität unterschiedlicher Methoden zur Analyse der Durchwurzelung von landwirtschaftlich genutzten Böden

Table 4: Characterization of availability of different methods for rooting analysis of agricultural soils

Methode	zu betrachtende Bodenzustände oder Prozesse	berücksichtgbare Raumskala (typische kleinste Elementgröße)	Vorteile der Methode	Nachteile der Methode
<i>Laborgefäße + künstlich, eingestellte¹ (z. B. verdichtete) Böden</i>	Einfluß von Bodenzuständen (Bodengefüge, Rohdichte, Feuchtigkeit etc.) auf Wurzelbildung und Penetrationsleistung der Wurzeln	– kein Bezug – ($< 0,001 \text{ m}^2$)	<ul style="list-style-type: none"> kontrollierbare Bedingungen exakte Steuerung von Prüfgrößen erkennen kausaler Zusammenhänge Detailaufklärung von kleinskaligen Prozessen 	<ul style="list-style-type: none"> keine natürlichen Bedingungen Übertragbarkeit in größere Flächen / Räume unklar
<i>Stechzylinderproben von Freilandböden</i>	Einfluß von Pflanzenart, Bewirtschaftungsmaßnahmen / -werkzeuge / -geräte auf Wurzelbildung und Penetrationsleistung von Wurzeln bei unterschiedlichen Bodenzuständen (Gefüge etc.)	Punkt in der Landschaft ($< 0,0005 \text{ m}^2$)	<ul style="list-style-type: none"> real in Landschaft vorfindbare Bodenzustände einfache Prüfung hoher Zahl von Böden, Bewirtschaftungs- und Pflanzeneinflüssen einfache Bewertung von Bodengefügezuden (Indikatorfunktion von Wurzeln) 	<ul style="list-style-type: none"> hohe Varianz der Ergebnisse Aufwendige Probenahme / Analyse bei flächenhaften Untersuchungen Aussagen gelten nur für vergleichbare Flächen, Übertragbarkeit auf andere Flächen / Räume unklar
<i>Bruchflächenmethode von Bohrkernen</i>	Einfluß von Pflanzenart, Bewirtschaftungsmaßnahmen / -werkzeuge / -geräte auf Wurzelbildung und Penetrationsleistung von Wurzeln	Punkt in der Landschaft ($< 0,001 \text{ m}^2$)	<ul style="list-style-type: none"> real in Landschaften vorfindbare Bodenzustände einfache und schnelle Methode hohe Zahl von Einzelpunkten in Landschaft möglich 	<ul style="list-style-type: none"> hohe Varianz der Ergebnisse Ergebnis nur Wurzelichte / Penetrationstiefe, keine physiologischen Aussagen möglich Übertragbarkeit auf andere Flächen / Räume unklar
<i>Profilwandmethode</i>	Einfluß von Standorteigenschaften (Bodenart, Reliefposition, Kleinklima) Bewirtschaftungsmaßnahmen auf die lokale Wurzelbildung und das Verteilungsmuster der Wurzel	Punkt in der Landschaft ($1-2 \text{ m}^2$)	<ul style="list-style-type: none"> real in Landschaft vorfindbare Wurzelzustände in-situ-Analyse der Wurzelbildung, -verteilung Darstellung des vertikalen Verteilungsmusters und der Durchwurzelungstiefe 	<ul style="list-style-type: none"> sehr arbeitsaufwendig, nur geringe Zahl an Untersuchungspunkten in Landschaft möglich kaum Aussagen zu Wurzelmasse und -leistung liefert nur vertikalen Schnitt durch räumliches Verteilungsmuster der Wurzeln im Boden
<i>Wurzelchorologie²</i>	Wirkung von Standorteigenschaften (Bodenarten, Bodenprofil, Relief, Klima, Heterogenität etc.) und Bewirtschaftungsmuster (Arten, Intensitäten etc.) auf die raumzeitliche Dynamik von Wurzelbildung und Wurzelleistung	Fläche in der Landschaft [als raumzeitliches Muster] ($0,1-2 \text{ ha}$)	<ul style="list-style-type: none"> Darstellung des flächenhaften Verteilungsmusters von Wurzelbildung und -leistung, ggfs. horizontweise; Analyse lateraler Effekte Ermittlung von Wurzelzuständen und -leistungen in Landschaftseinheiten / -ausschnitten, regionalisierende Aussage 	<ul style="list-style-type: none"> gegenwärtig keine Methoden vorhanden (voraussichtlich: indirekte Methoden, Abschätzungsmethoden, auch für Sonderfälle) zu erwarten: Schwierigkeiten bei der Datengewinnung und Validierung von Ergebnissen der Methode

¹ Analyse der Lage, Anordnung sowie Verteilung von Wurzelstrukturen und ihren Eigenschaften im Bodenraum von Landschaften

4.5 Forschungsbedarf für die Abschätzung der flächenhaften Durchwurzelung in verschiedenen Raumskalen

In zunehmendem Maße besteht in der landschaftsorientierten Forschung das Problem, Aussagen zu Prozessen und Zuständen in größeren Landschaftsausschnitten bis hin zu Regionen vorzunehmen (BORK et al., 1995). Hierbei sind als kleinste räumliche Einheiten Pedotope, Physiotope, homogene Pflanzenbestände (z. B. Flurstücke oder ganze Felder) sowie einzelne Felder bzw. Betriebe denkbar. Die größte, dann noch einzeln zu betrachtende räumliche Einheit können Landschaftsausschnitte, Landkreise oder ganze Naturräume sein. Für diese Spannweite an möglichen Größenordnungen (Skalen) liegen gegenwärtig keine Methoden vor, mit denen die Durchwurzelung des Bodens ausreichend genau ermittelt oder beschrieben werden kann. Die gegenwärtigen Vorgehensweisen extrapolieren oft unzulässig aus einzelnen Messungen in größere Einheiten. Die Messungen selber sind in bezug auf die insgesamt zu betrachtende Fläche aber immer nur als punktförmig anzu-

sehen (Tab. 4). Wie oben dargelegt, (Kapitel 4.4) können sie in Abhängigkeit der Zielstellung sehr wohl hinreichende Aussagen über die Prozesse und Zustände der Durchwurzelung und deren Beeinflussung auf der punktförmigen Ebene liefern. Diese Analysemethoden weisen aber keine räumliche Komponente auf.

Die gegenwärtig vorliegenden Methoden zur Analyse der Durchwurzelung können somit nur begrenzt oder gar nicht für flächenhafte Aussagen herangezogen werden (s. Tab. 4). Für regionale Untersuchungen zum Wurzelwachstum in der Landschaft sind deshalb neue methodische Vorgehensweisen erforderlich. Erste Versuche einer allgemeinen qualitativen und quantitativen Beschreibung der Morphologie von Wurzelsystemen wurden mit Hilfe der fraktalen Geometrie unternommen (FITTER and STICKLAND, 1992; EGHBALL et al., 1993). Ob diese methodische Vorgehensweise der Quantifizierung von Beziehungen nach dem Prinzip der Selbstähnlichkeit einen geeigneten Ansatz auch für die großflächige Beschreibung des Wurzelwachstums in der Landschaft darstellen könnte, bleibt zu prüfen. Es besteht erheblicher For-

schungsbedarf, geeignete Methoden zur Ermittlung der raumzeitlichen Dynamik (Zustände in Raum und Zeit) von Durchwurzelung aber auch der Wurzeleistung für größere Raumeinheiten zu entwickeln. Dies werden vermutlich vorwiegend indirekte Verfahren bzw. Abschätzungen mit Prozeß- oder Objektmodellen sein. Als Sammelbezeichnung für dieses neu zu entwickelnde Wissensgebiet wird von uns der Begriff Wurzelchorologie vorgeschlagen (Tab. 4). Durch die Erforschung und Beschreibung der sicherlich andersartigen grundlegenden Prozesse der Durchwurzelung auf einer höheren Raumskala, die neu zu entwickelnden Strategien der Primärdatenbeschaffung sowie insbesondere der Validierung dieser neuen Methoden wird die Wurzelforschung zukünftig erheblich herausgefordert sein.

Danksagung

Ein ganz besonderer Dank gilt unserer Mitarbeiterin, Frau Monika RÖHL für die fleißige und gewissenhafte Arbeit bei der mühsamen Ermittlung der Wurzellängendichten.

Literatur

- ALLARD, J.-L. (1980): Über den Assimilatebedarf von Pflanzenwurzeln und deren Umsatz im Boden unter dem Einfluß verschiedener ökologischer Faktoren. Dissertation Univ. Bonn.
- APEL, P., A. BERGMANN, H.-W. JANK und S. O. LEHMANN (1981): Variabilität der Keimwurzel bei Gerste. Kulturpflanze XX/X, 403–415.
- ASADY, G. H., A. M. J. SMUCKER und M. W. ADAMS (1985): Seedling test for the quantitative measurement of root tolerance to compacted soil. *Crop Science* 25(5), 802–806.
- ATWELL, B. J. (1988): Physiological response of lupin roots to soil compaction. *Plant and Soil* 11, 277–281.
- BELFORD, R. K. and F. K. G. HENDERSON (1985): Measurement of the growth of wheat roots using a TV camera system in the field. In: W. DAY and R. K. ATKIN (ed.): *Wheat growth and modelling*. Plenum Publishing Corp., New York, 99–105.
- BENGOUGH, A. G. and C. E. MULLINS (1990): The resistance experienced by roots growing in a pressurised cell. A reappraisal. *Plant and Soil* 123, 73–82.
- BENGOUGH, A. G. and C. E. MULLINS (1991): Penetrometer resistance, root penetration resistance and root elongation rate in two sandy loam soils. *Plant and Soil* 131(1), 59–66.
- BLAND, W. L. and W. A. DUGAS (1988): Root length density from minirhizotron observations. *Agron. J.* 80, 271–275.
- BOHNE, H. (1988): Neue Aspekte der Bedeutung des Bodengefüges für die Durchwurzelbarkeit des Bodens und die Ausnutzung von Wasser und Nährstoffen durch die Wurzel. *Kali-Briefe (Büntehof)* 19(5), 325–334.
- BORK, H.-R., C. DALCHOW, H. KÄCHELE, H.-P. PIORR und K.-O. WENKEL (1995): Agrarlandschaftswandel in Nordost-Deutschland unter veränderten Rahmenbedingungen. Verlag Ernst & Sohn, Berlin.
- BOX, J. E., JR. and E. L. RAMSEUR (1993): Minirhizotron Wheat Root Data: Comparisons to Soil Core Root Data. *Agron. J.* 85, 1058–1060.
- BÖHM, W. (1974): Wurzelforschung und Landschaftsökologie. *Natur und Landschaft* 49(6), 158–161.
- BÖHM, W. (1978): Die Bestimmung des Wurzelsystems am natürlichen Standort. *Kali-Briefe (Büntehof)*, 14(2), 91–101.
- CALDWELL, M. M. and R. A. VIRGINIA (1989): Root systems. In: R. W. PEARCY, J. R. EHLINGER, H. A. MOONY and P. RUNDAL (ed.): *Physiological Plant Ecology: field methods and instrumentation*. Chapman and Hall, London, 367–398.
- DANNOWSKI, M. (1989): Die Kennzeichnung von Schadverdichtungen in Krumenböden mit Hilfe von Durchwurzelungsuntersuchungen unter Laborbedingungen. *Arch. Acker-Pflanzenbau Bodenkd.* 33 (5), 277–284.
- DANNOWSKI, M. (1992): Das Penetrationsvermögen von Wurzeln unterschiedlicher Roggen- und Triticalegenotypen in Abhängigkeit von der Bodenlagerungsdichte. *J. Agronomy & Crop Science* 168, 169–180.
- DANNOWSKI, M. (1994): Einfluß differenzierter mechanischer Bodenbelastungen auf Bodengefügeeigenschaften, Durchwurzelbarkeit und Pflanzenertrag eines sandigen Moränenstandortes. Dissertation TU Berlin.
- DANNOWSKI, M. (1995): Die Auswirkungen konventioneller Landbewirtschaftung auf die nachhaltige Fruchtbarkeit des Bodens in einem Agrarlandschaftselement des nordostdeutschen Tieflandes. *Archives of Agronomy and Soil Science* 39, 237–259.
- DÜRR, H.-J., H. PETELKAU und C. SOMMER (1995): Literaturstudie „Bodenverdichtung“, Texte des Umweltbundesamtes 55/95.
- EGHBALL, B., J. R. SETTIMI, J. W. MARANVILLE and A. M. PARKHURST (1993): Fractal analysis for morphological

- description of corn roots under nitrogen stress. *Agron. J.* 85, 287–289.
- ELKINS, C. B. (1985): Plant roots as tillage tools. *Proceedings on Internat. Conference on Soil Dynamics*, Auburn, Al., 21–26.
- ERDMANN, B. (1988): Anpassung von Weizenkeimpflanzen an Sauerstoffmangel im Wurzelbereich. *Colloquia Pflanzenphysiologie HU Berlin* 12, 21–26.
- FITTER, A. H. and T. R. STICKLAND (1992): Fractal characterization of root system architecture. *Funct. Ecol.* Oxford, U. K.: *British Ecological Society* 6(6), 632–635.
- GOSS, M. J. (1987): The specific effects of roots on the regeneration of soil structure. In: G. MONNIER and M. J. GOSS (1987): *Soil compaction and regeneration. Proceedings of the Workshop on Soil Compaction*, Avignon, 1985, 145–155, Rotterdam.
- GRATH, T. and I. HÅKANSSON (1992): Effects of soil compaction on development and nutrient uptake of peas. *Swedish J. Agric. Res.* 22, 13–17.
- HÅKANSSON, I., W. B. VOORHEES and H. RILEY (1988): Vehicle and wheel factors influencing soil compaction and crop response in different traffic regimes. *Soil and Tillage Res.* 11, 239–282.
- HAMPL, U. und G. PREUSCHEN (1991): In: H. VOGTMANN (Hrsg.): *Ökologische Landwirtschaft*, Verlag C. F. Müller, Karlsruhe.
- HARRACH, T. und T. VORDERBRÜGGE (1991): Die Wurzelentwicklung von Kulturpflanzen in Beziehung zum Bodentyp und Bodengefüge. *Berichte über Landwirtschaft*, 204. Sonderheft, Band 2, Bodengefüge, 69–82.
- HELAL, H. M. (1991): Bodengefüge, Wurzelentwicklung und Wurzelfunktionen. *Z. Pflanzenernähr. Bodenk.* 154, 1–5.
- HELAL, H. M. und D. SAUERBECK (1986): Entwicklung und Aktivität des Wurzelsystems in Abhängigkeit von der Bodendichte. *VDLUFA-Schriftenreihe*, 20. Kongreßband, 381–388.
- JOSCHKO, M., O. WENDROTH, H. ROGASIK und K. KOTZKE (1994): Earth-worm activity and functional and morphological characteristics of soil structure. *Trans. 15th World Congress of ISSS*, Acapulco, Mexico, Proc. 4a, 144–163.
- KEITA, S. und D. STEFFENS (1989): Einfluß des Bodengefüges auf Wurzelwachstum und Phosphataufnahme von Sommerweizen. *Z. Pflanzenernähr. Bodenk.* 152, 345–351.
- KOSZINSKI, S., M. DANNOWSKI, R. ELLERBROCK, A. GORNY, K. HELMING, A. HÖHN, M. JOSCHKO, H. ROGASIK, K. SEIDEL, O. WENROTH, S. WIRTH und S. KOFALK (1995): Bodenökologische Eigenschaften und Funktionen einer Catena im nordostdeutschen Jungmoränengebiet. *Mitteilungen der Deutsch. Bodenkundl. Ges.* 76, 1101–1104.
- KÖPKE, U. (1979): Ein Vergleich von Feldmethoden zur Bestimmung des Wurzelwachstums landwirtschaftlicher Kulturpflanzen. *Dissertation Göttingen*.
- LEHFELDT, J. (1986): Durchwurzelung des Unterbodens von Moränenstandorten in Abhängigkeit vom Verdichtungsgrad der Krumbasis und der Pflanzenart. *Arch. Acker- Pflanzenbau Bodenk.* 30(9), 549–556.
- LIPIEC, J., I. HÅKANSSON, S. TARKIEWICZ and J. KOSSOWSKI (1991): Soil physical properties and growth of spring barley as related to the degree of compactness of two soils. *Soil and Tillage Res.* 19, 307–317.
- MATERECHERA, S. A., A. R. DEXTER and A. M. ALSTON (1991): Penetration of very strong soils by seedling roots of different plant species. *Plant and Soil* 135, 31–41.
- MATERECHERA, S. A., A. R. DEXTER and A. M. ALSTON (1992): Formation of aggregates by plant roots in homogenised soil. *Plant and Soil* 142, 69–79.
- MÜLLER, A., H. M. HELAL und D. SAUERBECK (1991): Wurzelwachstum und Nährstoffaufnahme von Weizen und Gerste als Folge unterschiedlicher Bodenbelastung. *Mitteilgn. Dtsch. Bodenkundl. Gesellsch.* 66, II, 681–684.
- NEGI, S. C., E. MCKYES, G. S. V. RAGHAVAN and F. TAYLOR (1981): Relationships of field traffic and tillage to corn yields and soil properties. *J. of Terramechanics* 18(2), 81–90.
- PEARSON, C. J. and B. C. JACOBS (1985): Root distribution in space and time in *Trifolium subterraneum*. *Aust. J. Agric. Res.* 36, 601–614.
- PETR, J., V. CERNY und L. HRUSKA (1983): Ertragsbildung bei landwirtschaftlichen Kulturpflanzen. *Deutscher Landwirtschaftsverlag Berlin*.
- REID, J. B. and M. J. GOSS (1981): Effect of living roots of different plant species on aggregate stability of two arable soils. *J. of Soil Science* 32, 521–541.
- SCHINDLER, U. (1993): In: S. KOSZINSKI et al. (1995): *Bodenökologische Eigenschaften und Funktionen einer Catena im nordostdeutschen Jungmoränengebiet. Mitteilungen Deutsch. Bodenkundl. Ges.* 76, 1101–1104.
- SELIGE, T. and T. VORDERBRÜGGE (1991): Roots and Yield as Indicators of Soil Structure. In: L. KUTSCHERA et al. (eds.): *Root Ecology and its Practical Application*, 3. ISRR Symp. Wien, Univ. Bodenkultur.
- TENNANT, D. (1975): A test of a modified line intersect

method of estimating root length. *Journal of Ecology* 63, 995–1001.

UPCHURCH, D. R. (1985): Relationship between observations in minirhizotrons and true root length density. Ph. D. diss. Texas Tech. Univ., Lubbock (Diss. Abstr. 85-28594).

VETTER, H. und SCHARAFAT, S. (1964): Die Wurzelverbreitung landwirtschaftlicher Kulturpflanzen im Unterboden. *Zeitschr. Acker- und Pflanzenbau* 120, 275–298.

WERNER, D. (1988): Einfluß des physikalischen Bodenzustandes auf den Wasserentzug landwirtschaftlicher Fruchtarten. *Arch. Acker-Pflanzenbau Bodenk.* 32(5), 303–310.

WIEDENROTH, E. M. (1982): Reaktion von Weizenkeimpflanzen auf Sauerstoffmangel in der Wurzel. In: UNGER, K. und J. SCHUH (Hrsg.) (1982): *Umwelt-Streß. Wiss. Beitr. MLU Halle-Wittenberg*, 241–244.

WIRTH, S. (1994): Räumliche Variabilität bodenmikrobiologischer Parameter entlang eines Transektes durch ein Binneneinzugsgebiet in der nordostdeutschen Agrarlandschaft Chorin. Poster, Tagung der Deutsch. Bodenkundl. Ges., Komm. Bodenbiologie, Braunschweig, 17.–18. 11.

Anschrift der Verfasser

Dr. Margitta Dannowski und **Dr. Armin Werner**, Zentrum für Agrarlandschafts- und Landnutzungsforschung e. V., Institut für Landnutzungssysteme und Landschaftsökologie, Eberswalder Str. 84, D-15374 Müncheberg.

Eingelangt am 16. August 1996

Angenommen am 11. November 1996