

# Reaktionen des Wurzelsystems auf bodenphysikalische Bedingungen

Margarita Himmelbauer<sup>1\*</sup>, Monika Sobotik<sup>2</sup> und Willibald Loiskandl<sup>1</sup>

## Zusammenfassung

Das Pflanzenwurzelwachstum wird von bodenphysikalischen Eigenschaften stark beeinflusst. Insbesondere der Eindringwiderstand, die Lagerungsdichte des Bodens, die Bodenstruktur und das Porensystem des Bodens wirken sich auf den Wachstumszustand und die räumliche Verteilung der Wurzeln im Boden aus. Dies wird besonders auf landwirtschaftlichen Flächen bei Bodenverdichtungen und anderen bodenphysikalischen Belastungen durch die Hemmung der Wasser- und Nährstoffaufnahme deutlich. Die Auswirkungen variieren je nach Pflanzenstadium, Alter und Lage der Wurzel, Bodenwasser- und Klimabedingungen. Die Ergebnisse zweier Fallstudien mit Mais, die unter verschiedenen Boden- und Klimabedingungen durchgeführt wurden, werden dargestellt. Das Klima in Andau, Ostösterreich ist kontinental bis semi-arid, während es in Surnevo, Südbulgarien kontinental bis mediterran ist. In beiden Fällen wurden unterschiedliche Bodenbearbeitungsmethoden auf ihren Einfluss einiger bodenphysikalischer Parameter wie Lagerungsdichte, Porengrößenverteilung und Bodenwasserkapazität untersucht. Die Wurzelsystementwicklung wurde sowohl an tiefen Bodenprofilen als auch durch Bohrkernuntersuchungen zur quantitativen Bewertung der Wurzelmorphologie durchgeführt. Eine quantitative Bewertung der Wurzelmorphologie wurde anhand der Bodenmonolithe durchgeführt. Die Ergebnisse werden in Bezug auf die wichtigsten bodenphysikalischen Parameter und der ortsspezifischen Bedingungen diskutiert.

*Schlagwörter:* Mais, bodenphysikalische Eigenschaften, Wurzelentwicklung, räumliche Wurzelverteilung und -morphologie

## Summary

Plant root growth is highly influenced by soil physical conditions. In particular, spatial distribution and morphology of roots are affected by penetration resistance, bulk density, structure, and pore system of soil. Root growth and uptake are often depressed by a combination of soil physical stresses in agricultural areas, mainly by soil compaction. The impact varies depending on the plant growth stage, root age and location, soil water and climate conditions, etc.

Results of two case studies with maize conducted under different soil and climate conditions in Andau, Eastern Austria and in Surnevo, South Bulgaria are presented. The climate in Andau is continental to semi-arid, while in Surnevo is continental-Mediterranean. In both cases, different soil management systems affecting a series of soil physical parameters such as bulk density, pore size distribution, soil water capacity have been compared. The root system development was evaluated on deep soil profiles as well as by taking bulk soil samples for detailed root morphological analyses. The results on maize root system response are discussed with respect to main soil physical parameters and for different site-specific conditions.

*Keywords:* maize, soil physical parameter, root development, distribution pattern and morphology

## Einleitung

Das Pflanzenwurzelwachstum steht in einem engen Zusammenhang mit bodenphysikalischen Eigenschaften. Insbesondere die räumliche Verteilung und die Morphologie der Wurzeln werden durch den Eindringwiderstand, die Lagerungsdichte, die Struktur und das Porensystem des Bodens und der Wasserverfügbarkeit beeinflusst. Es gibt eine Vielzahl von physiologischen und morphologischen Reaktionsmechanismen von der Zellebene (Sprossmeristem) bis zur Wurzelsystemebene, die in der Literatur erfasst wurden (z.B. TARDIEU et al. 1992, MARSCHNER 1995). Auf landwirtschaftlich genutzten Flächen wird oft die Entwicklung besonders durch verschiedene Funktionen

der Wasser- und Nährstoffaufnahme der Wurzeln durch verschiedene bodenphysikalische Eigenschaften geschwächt. Die Auswirkungen variieren je nach Pflanzenstadium, Wurzelalter und Standort sowie Bodenwasser- und Klimabedingungen.

Bodenverdichtungen, natürlich vorkommend oder als Folge der Bewirtschaftung, sind oft ein Problem auf landwirtschaftlichen Flächen. Dadurch verschlechtert sich vor allem die Bodenstruktur und die Makroporosität bzw. die Luftkapazität. In solchen Böden leiden angesichts des erhöhten mechanischen Eindringwiderstandes die Pflanzenwurzeln durch erschwerte Wasser-, Nährstoff- und Sauerstoffversorgung (HORN et al. 2000). Demzufolge

<sup>1</sup> Institut für Hydraulik und landeskulturelle Wasserwirtschaft, Universität für Bodenkultur Wien (BOKU), Muthgasse 18, A-1190 WIEN

<sup>2</sup> Pflanzensoziologisches Institut Klagenfurt, Kempfstraße 12, A-9020 KLAGENFURT

\* Ansprechpartner: DI Margarita Himmelbauer, ml.himmelbauer@boku.ac.at

sind die Wurzelsysteme auch anfällig für Krankheiten. Eine Rekultivierung verdichteter Böden bietet die physikalische Bodenmelioration an, die durch Optimierung des Bodenwasser- und Bodenluftgehaltes eine Verbesserung anstrebt. Allerdings sind diese Maßnahmen kostspielig und die positiven Effekte sind zeitlich beschränkt.

Fortschrittliche landwirtschaftliche Maßnahmen wie etwa die bodenschonende Bewirtschaftung, die auf den Pflugeinsatz verzichtet und meist mit Direktsaat zusammengeführt wird, können bodenphysikalische Bedingungen positiv beeinflussen. Grund dafür liefern vor allem die positiven Auswirkungen auf die Ökologie des Bodens und die damit verbundene Erhaltung der Bodenfruchtbarkeit, die Verminderung der Erosion sowie Kosten-, Energie- und Zeitersparnisse. Zu den Bodeneigenschaften, die mit einer verbesserten Bodenqualität gekoppelt sind, zählen Aggregatstabilität, erhöhte Wasserspeicherung, erhöhter Gehalt an organischen Substanzen, verbesserte hydraulische Eigenschaften, etc. Verbesserungen der Bodenqualität können die Entwicklung und die Funktionen der Wurzeln sowie die Pflanzenproduktivität begünstigen. Durch Minimierung der Bodenbearbeitung können höhere Erträge aufgrund der optimierten Nutzung von Bodenwasser und -nährstoffen gewonnen werden. Wurzelparameter wie Durchwurzelungstiefe, Wurzelichte und Wurzelmorphologie sind kritische Charakteristika in Bezug auf Wasser- und Nährstoffaufnahme sowie -verluste während und nach der Vegetationsperiode. Darüber hinaus spielt die räumliche Anordnung der Wurzeln im Boden für die Pflanzenernährung eine wesentliche Rolle (DROOGERS et al. 1997, AMATO und RITCHIE 2002).

Das Hauptziel dieser Studie war die Auswirkung verschiedener bodenphysikalischer Eigenschaften auf die Bewurzelungsweise, Wurzeltiefe, Wurzelichtverteilung und Morphologie von Mais an zwei Standorten bei unterschiedlichen Boden- und Klimaverhältnissen zu untersuchen und zu evaluieren. Ein weiteres Ziel war ein Vergleich der Auswirkung verschiedener Bodenbearbeitungssysteme und meliorative Maßnahmen auf die Wurzelentwicklung und die Produktivität der Kulturen.

## Material und Methoden

Zwei Fallstudien mit Mais (*Zea mays L.*) wurden durchgeführt, eine in Andau, Ostösterreich, und eine in Surnevo, Südbulgarien. Der Boden in Andau ist heterogener Tschernosem (FAO Bodenklassifikation), Subtyp Feuchtschwarzerde (Österreichische Bodenklassifikation) mit einem stark entwickelten humusreichen A-Horizont über Schotter. Das pannonische Klima bildet einen Übergang von semi-arid zum kontinental beeinflussten Klima mit kurzem Frühling, heißem Sommer, trockenem Herbst und relativ kaltem Winter.

Der Boden in Surnevo im thrakischen Tiefland ist als Dystric Planosol (FAO Bodenklassifikation) bezeichnet und verfügt über einen tiefen eluvial-illuvialen Bodenhorizont mit starker struktureller Differenzierung (BOYADGIEV 1994, DILKOVA et al. 1998). Das kontinentale mediterrane Klima ist durch milde Winter und heiße Sommer mit langen Trockenperioden gekennzeichnet. In beiden Fallstudien wurden verschiedene Bodenmanagementsysteme, die wesentliche

bodenphysikalische Eigenschaften beeinflussen, erforscht. In Andau, wurde eine konventionelle Bodenbearbeitung (KV) und eine pfluglose Bodenbearbeitung (DS) auf benachbarte Fläche mit Mais (Sorte PR37No1 Poncho) verglichen. Die DS-Fläche wurde seit über zehn Jahren pfluglos bewirtschaftet. Bei der konventionellen KV-Fläche wurden Wendepflug, Zweischichtenpflug und Schichtengrubber bis zu einer Bearbeitungstiefe von 25-30 cm eingesetzt. Eine Beobachtung des Wurzelverlaufs, der Wurzeltiefe und Seitenausdehnung wurde mittels Wurzelfreilegung ermöglicht, d.h. ein Bodenprofil wurde perpendicular zu den Maisreihen bis zu einer Tiefe von ca. 2 m ausgehoben. Auf diese Weise wurden die Wurzelsysteme von mehreren Pflanzen beobachtet und bewertet. Außerdem wurden Proben für eine quantitative Analyse der Wurzeln entnommen. Die Probenentnahme erfolgte mittels Bohrkern-Methode bis zu einer Tiefe von 0,5 m, die Bohrkern wurden in 10 cm lange Stücke (Boden-Wurzel-Proben) geschnitten. Im Labor wurden die Wurzeln ausgewaschen, gereinigt und mittels Bildanalysesoftware analysiert (HIMMELBAUER et al. 2004). Für die Ermittlung der Bodencharakteristika wurden gestörte und ungestörte Bodenproben entsprechend den Bodenhorizonten in unmittelbarer Nähe zu den beprobten Wurzelsystemen entnommen. Nachfolgende bodenphysikalische Parameter wurden erfasst: Korngrößenanalyse, Aggregatstabilität, Lagerungsdichte, Porenanteil und Porengrößenverteilung, Bodenwasserretention und Wasserdurchlässigkeit sowie eine Reihe bodenchemische Parameter.

Die zweite Studie umfasste eine Untersuchung der physikalischen Bodenmelioration, die zur Beseitigung von Unterbodenverdichtungen in Surnevo, Südbulgarien vor ein paar Jahren durchgeführt wurde. Hauptziel dieser Maßnahmen war eine Bodenverbesserung durch Optimierung der Durchlässigkeit und des Luftgehaltes des Bodens. Zwei Varianten wurden in Bezug auf das Wurzelwachstum erforscht: eine komplexe Bodenmelioration durch eine 60cm Tiefenlockerung in Kombination mit Drainage (Mel) und eine Kontrollfläche ohne Meliorationen (NMel) (HIMMELBAUER et al. 2010). Folgende bodenphysikalische Parameter wurden bis zu einer Tiefe von 1 m in beiden Varianten erfasst: Korngrößenanalyse, Feststoff- und Lagerungsdichte, Porenanteil und Luftkapazität, Bodenwasserretention und hydraulische Eigenschaften. Die Parzellen wurden mit Mais der Sorte "Kneza" bestellt. Herbizide wurden kurz nach der Pflanzung angewendet, das Restunkraut wurde mechanisch entfernt. Die räumliche Verteilung der Maiswurzeln wurde mit Hilfe der Bodenprofilwandmethode kurz nach der Blütezeit, untersucht. Wurzelspitzen wurden auf vertikalen und übereinander positionierten horizontalen Plänen, die mit einem Raster von 2 × 2 cm bedeckt wurden, angezeigt. Die Wurzeln in jedem Quadrat wurden gezählt und Indexe der Wurzelichte wurden daraus ermittelt, die sich auf die Anwesenheit und Abwesenheit von Fein- und Grobwurzeln beziehen. Die Indexe wurden auch mit der Wurzelrockenmasse pro Bodenvolumen verknüpft. Für die Analyse der Verteilungsmuster der Wurzeln wurde ein Varianz / Mittelwert Verhältnis (VMR)-Test eingesetzt, der für die Bewertung der räumlichen Punkteanordnung in ökologischen Studien bekannt ist (GRIEG SMITH 1983).

## Ergebnisse und Diskussion

Die Ergebnisse der bodenphysikalischen Untersuchungen in Andau, Ostösterreich sind in den *Tabellen 1* und *2* und der *Abbildung 1* dargestellt. Signifikante Unterschiede konnten vor allem in den oberen 10 bis 20 cm Bodentiefe beobachtet werden. Insbesondere waren die Messwerte des Bodenwasseranteils und des pflanzenverfügbaren Wassers, der Lagerungsdichte und der Aggregatstabilität, der Wasserdurchlässigkeit, des Anteils an Grob- und Mittelporen bei Direktsaat im Vergleich zu der konventionellen Bodenbearbeitung höher. Größere Poren sind für Konvektion- und Diffusionsprozesse im Boden für die Bodenatmung als auch für die Wurzelverbreitung sehr wichtig. Der Mittelporenanteil ist wiederum mit dem Wasser, das für die Pflanzenwurzel verfügbar ist, assoziiert. Das Wasser in den Feinporen dagegen kann über lange Zeit festgebunden bleiben und ist durch die meisten Pflanzen nicht aufnehmbar. Der gemessene Feinporenanteil war bei der KV verglichen mit der DS Fläche deutlich höher. Die Aggregatstabilität ist ein Resultat vieler Faktoren, wie bodenbiologische Aktivität, organische und mineralische Zusammensetzung des Bodens, Bodenbedeckung etc. Verschiedenen Literaturquellen zufolge geht eine erhöhte Aggregatstabilität mit

einer höheren Widerstandsfähigkeit des Bodens gegenüber mechanischer Belastung einher, wie z.B. Wassererosion. Die Ergebnisse dieser Studie zeigten, dass der Anteil an stabilen Aggregaten bei DS deutlich über denen von der KV-Bodenbearbeitung lag. Dieser Anstieg wird als eine Folge des Verzichts auf den Pflugeinsatz über mehrere Jahre gesehen. Die Ergebnisse der weiteren ermittelten Bodenparameter zeigten keine wesentlichen Unterschiede hinsichtlich der verschiedenen Bodenbearbeitung. Dies könnte wohl eine Folge der hohen Bodenheterogenität sowie bestimmter Randeffekte sein, da die Proben aus benachbarten Profilen entnommen wurden.

Die Wurzelfreilegungen von Mais ergaben auf der ungepflügten Direktsaat-Fläche eine um 15-20 cm größere Wurzeltiefe als auf der gepflügten Fläche. Andererseits war die Seitenausdehnung geringer zugunsten eines rascheren, mehr senkrechten Verlaufes (*Tabelle 2*). Stark gewundene Wurzeln mit Verdünnungen und Verdickungen kamen fast nur auf der KV-Fläche vor. Dort fielen auch zahlreiche längere Seitenwurzeln auf. Zum Zeitpunkt der Wurzelprobenahme im September konnten keine signifikanten Unterschiede in der Wurzeldichteverteilung zwischen den beiden Versuchsfeldern festgestellt werden. Die Wurzellänge- und Wurzel-

**Tabelle 1: Ergebnisse der bodenphysikalischen Eigenschaften, Sept. 2009, Andau**

DS Tiefe cm	Textur			K-Wert cm d <sup>-1</sup>	Aggregat- stabilität %	Wasseranteil		Pflanzenverfügb. Wasser vol %	Poren- anteil vol %	Grobporen (>10µm) vol %	Mittelporen (10-0.2µm) vol %	Feinporen (<0.2µm) vol %	
	Sand 2-0.063mm %	0.063-0.002mm %	Ton <0.002mm %			0.3b (FK) vol %	15b (WP) vol %						
0-10					22,31								
10-20	34,1	40,8	25,1	sL-L	1,55E+03	16,89	33,4	22,9	10,5	50,9	17,5	10,5	22,9
20-30													
30-40													
40-50	33,5	37,6	28,9	L	5,47E+02		26,3	18,1	8,2	37,5	11,2	8,2	18,1
50-85	56,7	26,7	16,6	IS									
85-170	78,6	18,8	2,6	S									

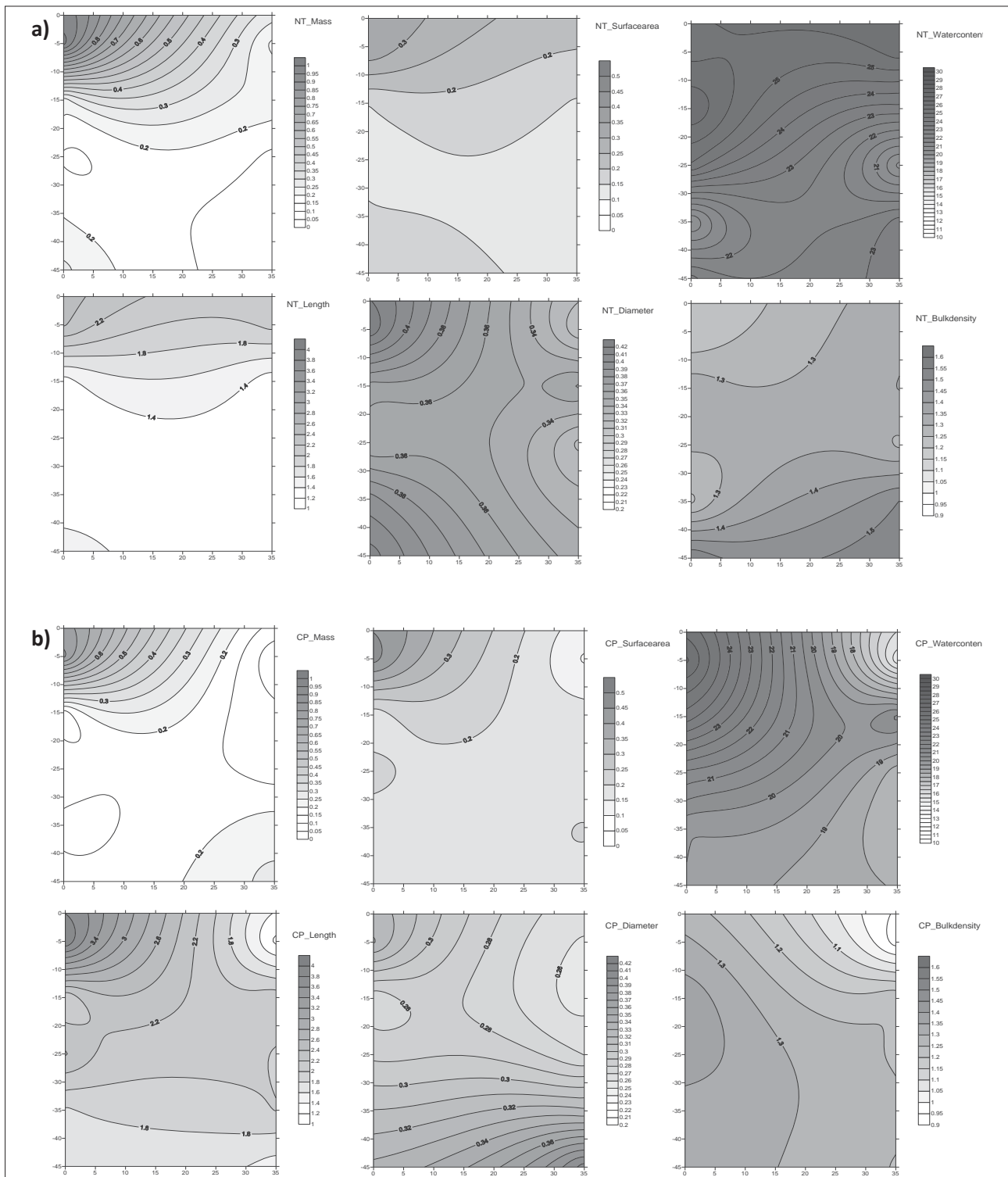
  

KV Tiefe cm	Textur			K-Wert cm d <sup>-1</sup>	Aggregat- stabilität %	Wasseranteil		Pflanzenverfügb. Wasser vol %	Poren- anteil vol %	Grobporen (>10µm) vol %	Mittelporen (10-0.2µm) vol %	Feinporen (<0.2µm) vol %	
	Sand 2-0.063mm %	0.063-0.002mm %	Ton <0.002mm %			0.3b (FK) vol %	15b (WP) vol %						
0-10					11,13								
10-20	31,5	43,2	25,3	sL-L	1,04E+03	11,46	33,5	25,6	7,9	47,4	14,0	7,9	25,6
20-30													
30-40													
40-50	29,1	43,2	27,7	L	2,36E+02		30,3	21,0	9,3	43,5	13,2	9,3	21,0
50-85	63,7	22,2	14,1	IS									
85-170	82,5	12,5	5,0	S									

DS-Direktsaat; KV- Konventionelle Bodenbearbeitung; K-Wert- Wasserdurchlässigkeitsbeiwert

**Tabelle 2: Spross- und Wurzelsystemgrößen, Maisertrag für die Direktsaat (DS) und die konventionelle Bodenbearbeitung (KV), Andau**

Variante	2007		2008		2009	
	DS	KV	DS	KV	DS	KV
Aussaat	22.05.	25.04.	27.04.	27.04.	19.04.	19.04.
Maissorte	PR37No1 Poncho	KWS 380	PR37No1 Poncho	PR37No1 Poncho	PR37No1 Poncho	PR37No1 Poncho
Wuchshöhe, cm	220	212	270	268	230	220
Ertrag, t	8,0	6,8	12,8	10,5	8,4	8,3
Wurzel						
Seitenausdehnung, cm	50	100	50-75	90	50-75	90
Tiefe, cm	130	110	140 (210)	115 (125)	130	115



**Abbildung 1: Räumliche Verteilung der Wurzelmasse- ( $\text{mg cm}^{-3}$ ), Wurzellänge- ( $\text{cm cm}^{-3}$ ) und Wurzeloberflächendichte ( $\text{cm}^2 \text{cm}^{-3}$ ), mittleren Durchmesser (mm), Bodenwasseranteil (vol. %) und Lagerungsdichte ( $\text{g cm}^{-3}$ ) für a) Direktsaat und b) konventionelle Bodenbearbeitung, Andau**

oberflächendichte war in der obersten Bodenschicht der KV-Fläche etwas höher, während die Wurzelmasse- und die mittlere Durchmesser in der DS größer waren (Abbildung 1a vs. Abbildung 1b). Allgemein war die Streuung einzelner Messungen auf den beprobten Flächen groß. Dies ist typisch für Wurzelbeobachtungen *in situ*.

In den drei Versuchsjahren waren die Maiserträge in der Regel in der DS höher als in der KV-Variante. In den Jahren 2007 und 2008 waren die Unterschiede größer als im Jahr 2009 (Tabelle 2). Im Versuchsjahr 2009 fiel ausreichend Niederschlag, allerdings war die Verteilung während der Vegetationsperiode ungünstig.



Tabelle 3: Wesentliche physikalische Eigenschaften des Bodens in Surnevo

Dystric planosol		Textur*			Feststoffsdichte	Lagerungsdichte at FK	Feldkapazität (FK, 0.3b)	Welkepunkt (WP, 15b)	Pflanzenverfügbares Wasser	Porenanteil	Luftkapazität**	Wasserdurchlässigkeit
Horizont	Tiefe cm	Ton %	Schluff %	Sand %	g cm <sup>-3</sup>	g cm <sup>-3</sup>	vol. %	vol. %	vol. %	Vol. %	Vol. %	cm d <sup>-1</sup>
<b>NMel</b>												
A <sub>1</sub> A <sub>2</sub> (0-22)	10-15	27.1	42.7	30.2	2.63	1.46	42.08	13.80	28.28	44.49	2.41	105.5
B <sub>1(0)</sub> (22-42)	35-40	40.2	32.3	27.5	2.68	1.46	40.57	20.54	20.03	45.52	4.95	0.00
B <sub>2(0)</sub> (42-72)	50-55	48.0	30.5	21.5	2.68	1.45	39.59	17.41	22.17	45.90	6.31	0.00
B <sub>3(0)</sub> (72-95)	80-85	44.9	31.2	23.9	2.70	1.47	39.23	19.37	19.86	45.56	6.32	0.36
<b>Mel</b>												
A <sub>1</sub> A <sub>2</sub> (0-28)	10-15	32.8	44.9	22.3	2.56	1.35	34.48	13.57	20.91	47.27	12.79	42.03
B <sub>1(0)</sub> (28-55)	40-45	53.8	29.9	16.3	2.73	1.47	42.14	30.30	14.76	46.15	4.01	5.04
B <sub>2(0)</sub> (55-78)	65-70	53.1	26.7	20.2	2.74	1.45	42.64	31.40	16.31	47.08	4.44	2.01
B <sub>3(0)</sub> (78-100)	85-90	51.8	33.9	14.3	2.79	1.53	41.46	29.27	15.87	45.16	3.70	10.05

\* Textur Fraktionen: Ton (<0,002 mm), Schluff (0,002 bis 0,05 mm), Sand (0,05-2 mm); \*\* Luftkapazität berechnet nach VOMOCIL (1965).

Zusammenfassend zeigten die Ergebnisse der bodenschonenden Bewirtschaftung ein tieferes und schnelleres Wurzelwachstum und eine höhere Pflanzenproduktion.

Die Ergebnisse der bodenphysikalischen Untersuchungen und der Wurzeluntersuchungen für meliorierte (Mel) und nichtmeliorierte (NMel) Parzellen in Surnevo, Südbulgarien sind in der Tabelle 3 und den Abbildungen 2 und 3 dargestellt. Mit Ausnahme der Oberschicht in der meliorierten Parzelle, lag der Grobporenanteil (Luftkapazität) unterhalb des kritischen Grenzwertes von 10 % für Lehmböden (RUSSEL 1980, HAKANSSON und LIPIEC 2000), was ein Risiko für die Atmung und die Wasser- und Nährstoffaufnahme der Pflanzenwurzeln darstellt. Parallel dazu war der Wasserdurchlässigkeitswert im Unterboden wesentlich höher in der meliorierten Parzelle. Überraschenderweise zeigten die Messungen der Lagerungsdichte (beim FK) in beiden Parzellen nur geringe Unterschiede. Bis zum Beobachtungstermin im August kam es jedoch in der NMel-Variante dem kritischen Wert von 1,64 g cm<sup>-3</sup> ganz nahe während sich die Werte in der Mel-Parzelle bis zu einer Tiefe von 50 cm (d.h. meliorierten Bodenschichten) kaum verändert haben. Auf diese Weise wurde eine Nachwirkung der hydro-technischen Meliorationen zur Beseitigung der Unterbodenverdichtungen erkennbar. Der Rest der bodenphysikalischen Parameter brachte keine wesentlichen Unterschiede in Bezug auf die Bodenbearbeitung.

Bis zum Zeitpunkt der Wurzelbeobachtung haben die Maiswurzeln in beiden Parzellen bereits eine Bodentiefe von 1 m erreicht. Für der vertikalen Pläne waren die Wurzelwertwerte (Index > 0 oder der Anteil an "vollen" Quadraten mit mindestens einer sichtbaren Wurzel) in im Oberboden in beiden Varianten weitgehend ähnlich (Abbildung 2 oben, a) vs. b)), signifikant höher waren sie in der meliorierten Parzelle im Unterboden. Im Unterschied dazu waren in der nichtmeliorierten Parzelle mehrere Wurzelgruppierungen (Anteil an Quadraten mit Index >4) am Übergang zum

Unterboden sichtbar. Die horizontalen Pläne (Abbildung 2 unten) der nichtmeliorierten Parzelle zeigten generell weniger "volle" Quadrate (Index > 0). Die große Fläche ohne Wurzeln besagen große Entfernungen für Wasser- und Nährstofftransmission, was zur Wurzelkonkurrenz führen kann. Es wurde beobachtet, dass die Wasserentnahme durch die Wurzeln im Unterboden gehemmt wurde. Auf der nichtmeliorierten Fläche waren eine Verzögerung der Pflanzenentwicklung und eine geringere Biomasseproduktion mit 25,6 t ha<sup>-1</sup> festzustellen. Auf der meliorierten Fläche wurden 48,0 t ha<sup>-1</sup> erreicht.

Auf die Bedeutung einer gleichmäßigen Wurzelverteilung für die Wasser- und Nährstoffaufnahme weisen mehrere Autoren hin. Einigen Literaturquellen zufolge geht eine gleichmäßige Wurzelverteilung mit einer höheren Aufnahmefähigkeit einher. Laut BALDWIN (1972) verhindert ein unregelmäßig gebildetes Wurzelsystem die Nährstoffaufnahme um etwa 20 %, bei einer Aufnahme über gruppierte Wurzeln kann diese sogar auf 75 % sinken. Ergebnisse der Verteilungsmusteranalyse der Wurzeln haben gezeigt, dass nur bei einem kleinen Raster von 2 cm im Oberboden in der Mel-Variante die VMR- Testergebnisse nah 1 liegen (Abbildung 4). Dies weist auf eine nicht-Cluster, sondern zufällige Art der Wurzelverteilung hin. An allen anderen getesteten Positionen und Skalen waren die VMR-Werte deutlich höhere als 1, das auf unterschiedlich starke Wurzelgruppierungen hinweist.

Zusammenfassend zeigten die Ergebnisse beider Fallstudien, dass vor allem die räumliche Verteilung (Tiefe, Seitenausdehnung, Verteilungsmuster) der Maiswurzeln durch die bodenphysikalischen Bedingungen betroffen wurden.

## Literatur

AMATO, M. and J.T. RITCHIE, 2002: Spatial distribution of roots and water uptake of Maize (*Zea mays* L.) as affected by soil structure. *Crop Science*, 42, 773-780.

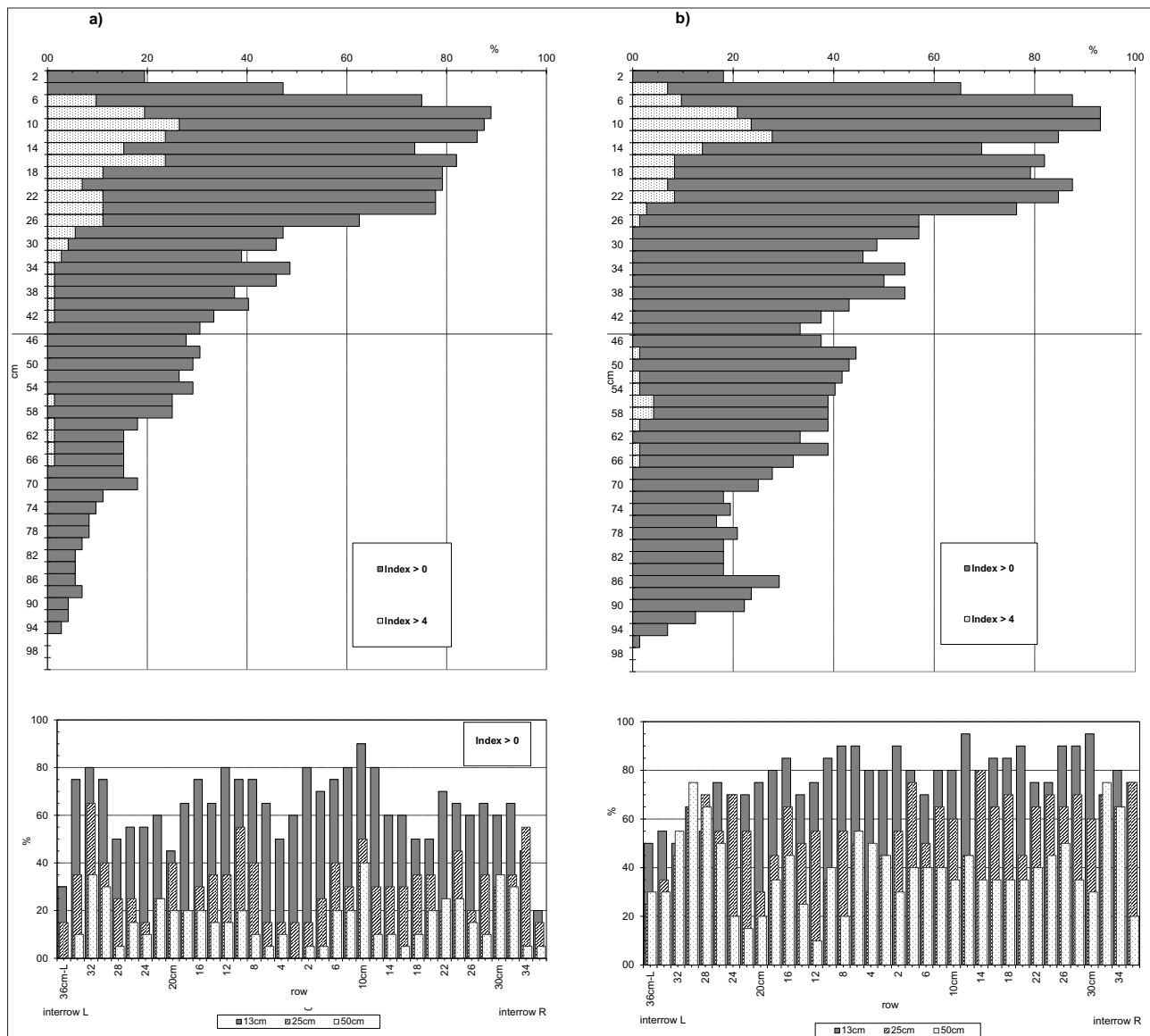


Abbildung 2: Räumliche Verteilung der Wurzeldichte in der a) nichtmeliorierten und b) meliorierten Parzelle, dargestellt als Anteil an Quadraten mit mindestens einer Wurzel sichtbar (Index > 0) und mit vielen Wurzeln (Index > 4) gemittelt für die vertikalen Pläne (oben) und die horizontalen Pläne in 13, 25 und 50 cm Tiefe (unten) in Surnevo

BOYADGIEV, T., 1994: Soil map of Bulgaria according to the FAO-UNESCO-ISRIC revised legend explanatory notes. Soil Science, Agrochemistry and Ecology, 4-6, 52-56.

DILKOVA, R., E. FILCHEVA, G. KERCHEV and M. KERCHEVA, 1998: Humus peculiarities of the virgin surface waterlogged soils. In *Congres Mondial de Sci. du sol*, 16e, Montpellier, France, 20-26 aout 1998. Res.. Vol. 1, Symp. 18, p.378.

DROOGERS, P., F.B.W. VAN DER MEER and J. BOUMA, 1997: Water accessibility to plant roots in different soil structures occurring in the same soil type. *Plant and Soil*, 188: 83-91.

GRIEG SMITH, P., 1983: *Quantitative Plant Ecology*. Univ. of Calif. Press, Berkeley, p. 347.

HAKANSSON I. and J. LIPIEC, 2000: A review of the usefulness of relative bulk density values in studies of soil structure and compaction. *Soil & Tillage Research*, 53: 71-85.

HIMMELBAUER, M., W. LOISKANDL and F. KASTANEK, 2004: Estimating length, average diameter and surface area of roots using

two different Image analyses systems. *Plant and Soil*, 260 (1-2), 111-120.

HIMMELBAUER, M., S. ROUSSEVA and W. LOISKANDL, 2010: Spatial root distribution and water uptake of maize grown on field with subsoil compaction. *Journal of Hydrology and Hydromechanics*, 58 (3): 163-174.

HORN, R., J.J.H. VAN DEN AKKER, J. ARVIDSSON (Eds.), 2000: Subsoil compaction. *Distribution, Processes and Consequences*, Adv. Geocology, 32, 462 pp.

MARSCHNER H., 1995: *Mineral Nutrition of Higher Plants*, Sec. Edition. Academic Press, pp. 889.

RUSSEL, E.W., 1980: *Soil conditions and plant growth*. Tenth Ed. Longman Group, UK Ltd., p. 849.

TARDIEU, F., L. BRUCKLER and F. LAFOLIE, 1992: Root clumping may affect the root water potential and the resistance to soil-root water on the uptake of ions by roots: I. Soil water content near a plane transport. *Plant and Soil*, 140: 291-301.

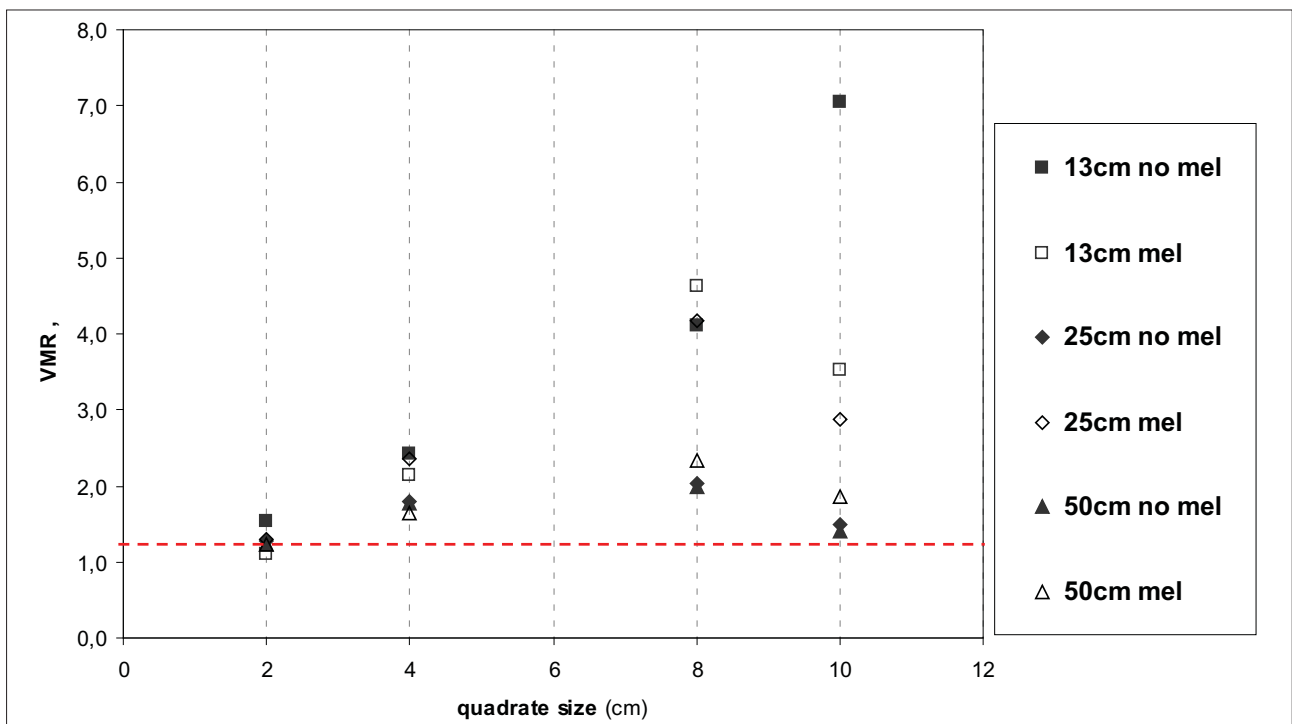


Abbildung 3: Ergebnisse der (VMR)-Analyse für verschiedene Skalen und Positionen der horizontalen Pläne in der nichtmeliorierten (no mel) und in der meliorierten (mel) Parzelle, Surnevo

VOMOCIL, J.A., 1965: Porosity. In C.A. Black (Ed.): Methods of soil analyses. Part 1: Physical and Mineralogical Properties including

Statistics of Measurement and Sampling. Agron. Monogr. 9, ASA and SSSA, Madison, WI, USA, pp. 299-314.