

Anwendung der Minirhizotron-Technik zur Untersuchung des Wurzelwachstums und der Wurzelbiomasse von Tomaten (*Lycopersicon esculentum* Mill.) bei unterschiedlicher Bewässerung

Maik Veste ^{1,2}, Christian König ¹ & Matthias Minnich ¹

¹ Universität Bielefeld, Abteilung Ökologie;

² Rheinische Friedrich-Wilhelms-Universität Bonn, Nees-Institut für Biodiversität der Pflanzen

Abstract

The use of minirhizotrons is a common tool for the investigation of root growth, turn-over and longevity in various ecosystems. The effects of irrigation amounts and salt stress on root growth were investigated using the tomato varieties 5656 and *Daniela* as model plants. The study was carried out in the southern Arava (Israel) using 0.2 m³ lysimeter. Changes of root numbers were measured by minirhizotrons. Salt reduced root growth rates as well as below and aboveground biomass in both cultivars. The correlation between root number from the minirhizotrons and fine root biomass was tested ($r^2=0.76$). The future development of the minirhizotrons needs an improved system of image analysis to optimize the data analysis.

Einleitung

Die Wurzeln haben für die Pflanze wichtige Funktionen: sie dienen der Verankerung und zur Aufnahme von Wasser und Nährstoffen aus dem Boden. Dabei ist die Durchwurzelung des Bodens, d.h. die Wurzellängendichte, im Endeffekt entscheidend für die Wasseraufnahme und Nährstoffaufnahme (EHLERS 1996). Aufbau und Tiefe des Wurzelsystems werden im Wesentlichen von den physikalischen und chemischen Bodeneigenschaften beeinflusst (WAISEL ET AL. 1991), aber auch genetisch gesteuert (YANAI 1999). Direkte Untersuchungen zur Struktur und Dynamik des Wurzelsystems sind allerdings im Boden erschwert. Vielfältige methodische Ansätze wurden für Wurzeluntersuchungen entwickelt (BÖHM 1979, SMIT ET AL. 2000). Destruktive Methoden – wie das Ausgraben von Wurzeln – erlauben keine langfristigen Untersuchungen der Wurzeldynamik. Ein langfristiges Beobachten kann allerdings mit sogenannten Rhizotronen erfolgen. Hierzu werden Glasscheiben verwendet, die allerdings den Nachteil haben, dass sie den Boden stören, Wurzeln entlang der Scheiben wachsen können und das sie nur einen Ausschnitt des Wurzelsystems wiedergeben. Bei der Minirhizotron-Technik hingegen werden durchsichtige Röhren in den Boden eingelassen, die nicht-destruktive Wurzelbeobachtungen über einen längeren Zeitraum ermöglichen (BÖHM 1974, UPCHURCH & RITCHIE 1983, UPCHURCH 1987, VAN DE GEIJN ET AL. 1994, SMIT ET AL. 1994, 2000).

Das Wurzelwachstum und die Wurzelarchitektur werden durch toxische Elemente, wie Salze und

VESTE, M., WUCHERER, W. & HOMEIER, J. (2005): Ökologische Forschung im globalen Kontext. Festschrift zum 65. Geburtstag von Prof. Dr. S.-W. Breckle. Cuvillier Verlag, Göttingen. 55-69.

Schwermetalle, deutlich beeinflusst (WASEL & BRECKLE 1987, BRECKLE 1996a,b, HAGEMeyer & BRECKLE 1996). Versalzung der Böden als Folge des Bewässerungslandbaus ist in Trockengebieten ein Problem für die Entwicklung einer nachhaltigen Landnutzung und bedroht langfristig die Erträge (WASEL 2001). Die oberirdische Biomasseproduktion und die Wurzelbildung wird mit steigendem Salzgehalt reduziert (BRECKLE 1996b, BEN-GAL & SHANI 2002b). Die Ziele der vorliegenden Untersuchungen waren den Einfluss von Bewässerungsmenge und von Salzstress auf die Wurzeldynamik von Tomaten aufzuzeigen.

Material & Methoden

Pflanzenmaterial und Lysimeterversuche

Tomaten (*Lycopersicon esculentum* Mill.) der Sorten 5656, eine strauchförmige Feldtomate und *Daniela*, eine hochwüchsige Gewächshaus-Tomate, wurden für die Untersuchungen verwendet (Abb. 1). Gepflanzt wurden die Tomaten in Lysimetern mit 0.2 m³ Volumen in der 'Arava' Research Station im südlichen Arava in Israel. Die Lysimeter waren mit einer automatischen Tröpfchenbewässerung und einer automatischen Sammlung zur Messung des Drainagewasser ausgestattet (BEN-GAL & SHANI 2002a, BRECKLE ET AL. 2003). Die Effekte des Salzstress wurden bei 7 Salinitätsstufen untersucht: 1 mS cm⁻¹, 2 mS cm⁻¹, 3 mS m⁻¹, 4 mS m⁻¹, 5.5 mS m⁻¹, 8 mS m⁻¹ and 11 mS m⁻¹. Die relativen Bewässerungsmengen (30%, 60%, 100%, 130%) wurden mit unterschiedlicher Anzahl von Tropfern bestimmt und richteten sich nach der täglichen Evapotranspiration. Die Gesamtbewässerungsmenge während des Versuches im Frühjahr 1998 belief sich auf 593 l (= 100% Bewässerung).



Abb. 1: (A) Die hochwüchsige Gewächshaus tomate cv. *Daniela* und (B) die Feldtomate cv. 5656 mit strauchförmigen Wuchs.

Minirhizotron-Technik

Die Feinwurzelndynamik wurde mit der Minirhizotron-Technik untersucht (Abb.2). In jedem Lysimeter wurden Glasröhren (75 cm Länge, 3 cm Durchmesser) in einem Abstand von 15 cm von der Pflanze installiert. Die Wurzelanzahl wurde mit einem Endoskop (Storz und Wolf-Endoskope, Germany) in einem 10tägigen Intervall erfasst und die Bilder mit einer CCD-Kamera für die Auswertung auf VHS-Videobändern gespeichert. Die Bestimmung der Wurzelndichte (Root density RD) wurde pro Tiefe durch Mittelwertbildung von vier Minirhizotrone mit je vier Richtungen durchgeführt. Als Bezug für die Tiefenskalierung für die Glasröhren wurde die Oberkante des Lysimeters verwendet. Gegen den Lichteinfall wurden die Glasröhren am oberen Ende auf einer Länge von 7,5 cm mit schwarzem Isolierband umwickelt und mit Gummistopfen abgedichtet. Da der beobachtete Bildausschnitt nur ca. 0,8 cm² groß war, wurden alle Daten auf RD/cm² umgerechnet. Für alle Daten der Minirhizotrontechnik die sich auf die Tiefe in 5 cm Schritten beziehen gilt $n = 16$ für die Tiefen in sechs Horizonten $n = 32$, für ein Minirhizotron $n = 52$, für ein Lysimeter $n = 208$.



Abb. 2: Anwendung der Minirhizotron-Technik zur Erfassung von Tomatenwurzeln im Feld. 1: Endoskop mit Führungsrohr, 2: CCD-Kamera, 3: Monitor, 4: Videorekorder, 5: Kaltlichtquelle.

In Abb. 3 sind Beispiele von Aufnahmen aus verschiedenen Lysimetern, Minirhizotrone und Tiefen wiedergegeben, um einen Eindruck von den Möglichkeiten und Grenzen der Minirhizotrontechnik sowie der Auszählung der Bilder zu vermitteln.

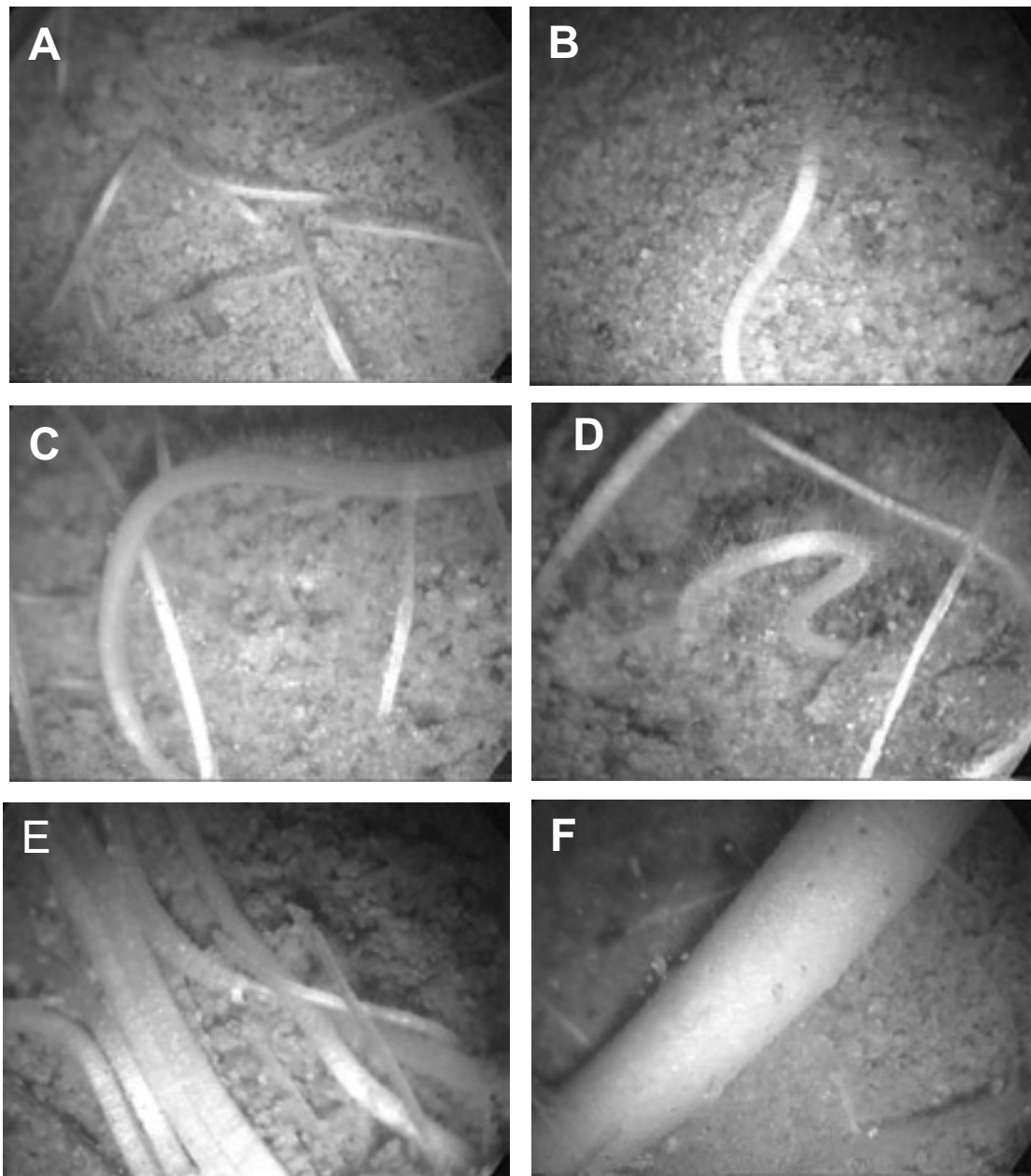


Abb. 3: A-F: Repräsentative Minirhizotron-Aufnahmen aus verschiedenen Lysimetern und Tiefen. Anzahl der Wurzeln in den Bildern: A: 13, B: 1, C: 8, D: 6, E: 10, F: 1

Wurzelbiomasse

Nach 95 Versuchstagen wurde die Biomasse der Pflanzen geerntet. Für die Bestimmung der Wurzelbiomasse wurde jeweils die Hälfte des Bodenvolumens in 10 – 12 cm dicken Schichten ausgewaschen. Die gewählten Schichten entsprachen zwei Wurzelhorizonten, die mit der Minirhizotron-Technik erfasst wurden, so dass die Mittelwerte direkt mit der Biomassebestimmung verglichen werden konnten. Das Wurzelsystem wurde in Fein- (< 1 mm Durchmesser) und Grobwurzeln (> 1mm Durchmesser) getrennt. Zur Bestimmung der Trockenbiomasse wurden die Wurzeln bei 60° C im Trockenschrank bis zur Gewichtskonstanz getrocknet.

Statistische Auswertung

Für die statistische Analyse der Korrelationen von Biomassebildung / Wurzelichtenbestimmung und EC-Stufe wurde die Pearsonsche Produkt-Moment-Korrelation verwendet. Für die Analyse der Daten von Wurzernte und Minirizotrontechnik wird der Korrelationskoeffizient nach Spearman für unabhängige Stichproben verwendet.

Für die Analyse der Daten wurden die Programme Excel 7.0 und Statistica 5.0 verwendet, die Diagramme mit Grapher 2.0 und Surfer 2.0 (Golden Software) erstellt.

Die Angabe der Signifikanzgrenzen erfolgt durch Kennzeichnung der Korrelationskoeffizienten nach folgendem Schlüssel:

0,00***	entspricht $0,00 < p < 0,001$ (höchst signifikant),
0,00**	entspricht $0,001 < p < 0,01$ (hoch signifikant),
0,00*	entspricht $0,01 < p < 0,05$ (signifikant),
0,00·	entspricht $0,05 < p < 0,1$ (schwach signifikant),
0,00	entspricht $p > 1$ (kein signifikanter Zusammenhang).

Analog gilt dieser für negative Korrelationen.

Ergebnisse

Wurzelverteilung

Die höchste Feinwurzelichte im Feld wurde in den oberen Bodenschichten erreicht (< 25 cm; Abb.4), während die Lysimeter eine größere Durchwurzelung aufwiesen, was eine Vergleichbarkeit der Ergebnisse erschwert. Ursache dürften hier unterschiedliche Bodenbeschaffenheiten sein.

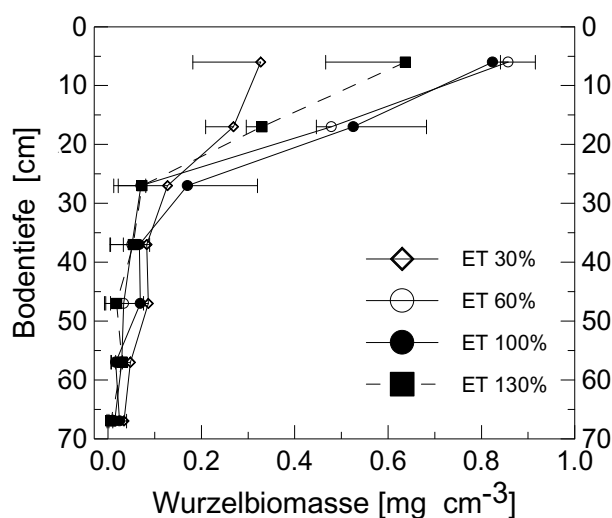


Abb. 4: Tiefenverteilung der ausgewaschenen Feinwurzeln der Tomate cv. 5656 im Feld bei unterschiedlichen Bewässerungsmengen.

Einfluß der Bewässerungsmenge

Im Feldexperiment konnte nur bei den trockengestressten Pflanzen von 5656 eine deutliche Reduzierung der Wurzelbiomasse in den oberen Bodenschichten bis zu einer Tiefe von 20 cm festgestellt werden (Abb. 4). Im Sortenvergleich erreicht die cv. *Daniela* eine deutlich höhere mittlere Wurzelichte als die cv. 5656 (Abb. 5), wobei ein signifikanter Effekt der Bewässerungsmenge auf die Feinwurzelbildung, wie im Feldversuch beobachtet (Abb. 4), nicht festgestellt wurde. Bei *Daniela* lagen die Wurzelichten der trockengestressten sogar höher als der gut mit Wasser versorgten Pflanzen (Abb. 5b).

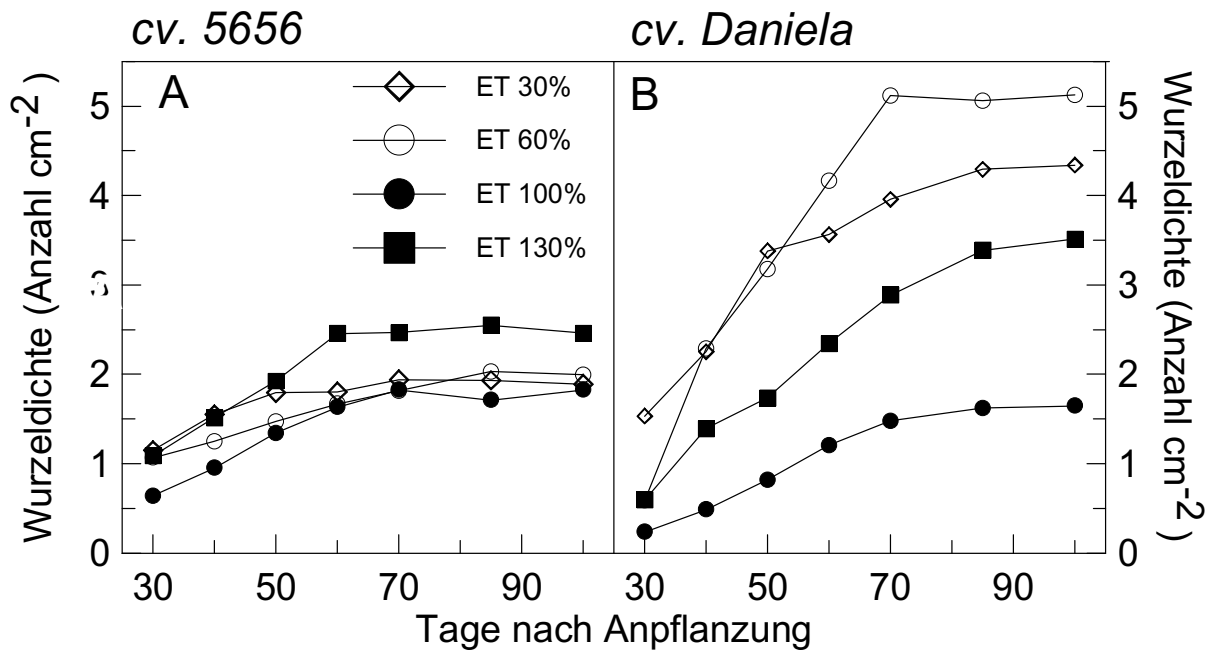


Abb. 5: Dynamik der mittleren Wurzelichte von 5656 (A) und *Daniela* (B) in Abhängigkeit der Bewässerungsmenge in den Wintermonaten.

Charakteristisch für beide Tomatensorten ist ein unterschiedliches Wachstumsverhalten. Bei der Strauchtomate 5656 ist die maximale Wurzelichte nach etwa 60 Tagen erreicht, während die hochwüchsige *Daniela* eine deutlich längere Wachstumsperiode aufweist (Abb. 5). Dies gilt insbesondere für die gut gewässerten Pflanzen, wobei auch eine längere oberirdische Biomasseproduktion dieser Sorte beobachtet wurde.

Einfluss von Salzstress

Salzstress verursachte bei beiden Sorten eine deutliche Reduzierung des Wurzelwachstums (Abb. 6). Auch in diesem Versuch war die mittlere Wurzelichte von *Daniela* deutlich höher als bei 5656. Bei ungestressten *Daniela* Pflanzen stieg die mittlere Wurzelichte auf 5,8 Wurzeln cm⁻² (Winter) bzw. 7,2 Wurzeln cm⁻² (Frühjahr), während sie bei 5656 nur bei 4,1 (Winter) bzw. 5,0 Wurzeln cm⁻² (Frühjahr) betrug. Mit steigendem Salzstress sank die Wurzelanzahl deutlich ab. Die Wachstumsgeschwindigkeit war bei beiden Sorten durch den Salzstress reduziert (Abb. 7). 5656 scheint dabei sensibler auf den Salzgehalt zu reagieren, da schon ab EC 2 ein geringeres Wurzelwachstum mit der Minirhizotron-

Technik zu beobachten war. Im Gegensatz zu 5656 zeigte die Sorte *Daniela* bei nicht gestressten Pflanzen ein unvermindertes Wachstum (Abb. 7), wie dies schon beim vorhergehenden Versuch beschrieben wurde (Abb. 5).

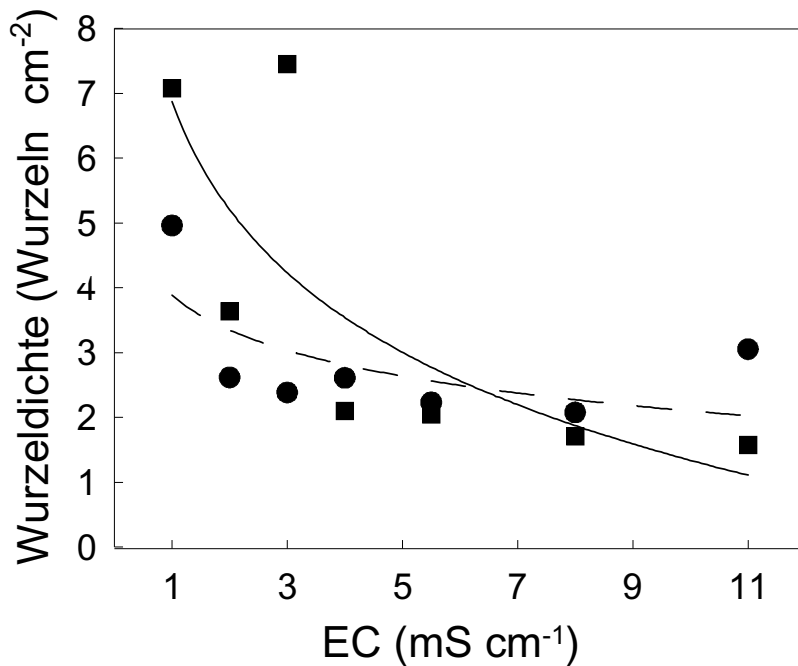


Abb. 6: Mittlere Wurzeldichte (n = 208) nach 94 Tagen von *L. esculentum* cv. *Daniela* (■) und cv. 5656 (●) in Abhängigkeit von der Salinität des Bewässerungswassers.

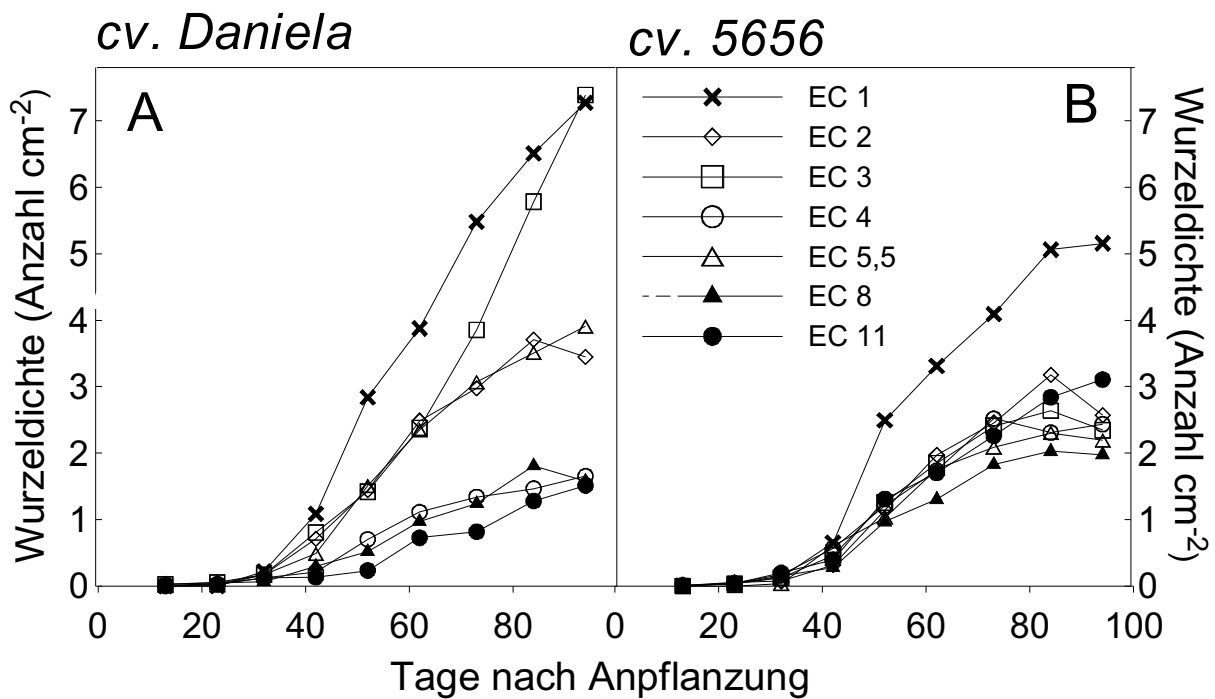
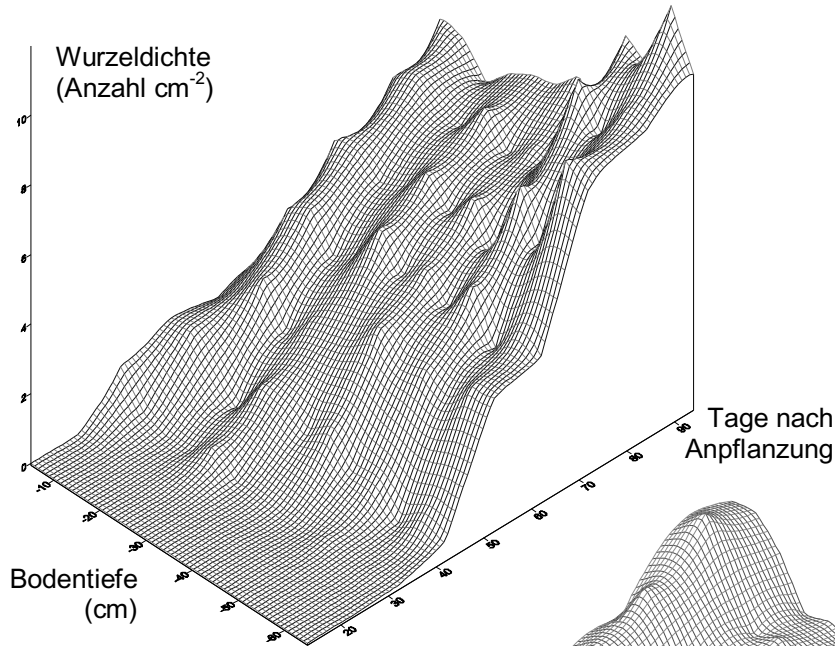


Abb. 7: Dynamik der Wurzeldichten *L. esculentum* cv. *Daniela* (A) und cv. 5656 (B) in Abhängigkeit von der Salinität des Bewässerungswassers.

Die erfasste Wurzelmenge unterschied sich zwischen den ungestressten und salzgestressten Varianten deutlich. Bei EC 1 war die Wurzelzahl annähernd gleichmäßig im Lysimeter verteilt. Salzstress (EC 8) führte nicht nur zu einem zeitlich verzögerten und verminderten Wurzelwachstum, sondern beeinflusste auch die Tiefenverteilung der Wurzeln (Abb. 8). Die höchste Wurzelmenge war auf die oberen Bodenschichten (bis ca. 20 cm) konzentriert und sank mit zunehmender Bodentiefe ab. In den oberen Bodenschichten ist deutlich das verzögerte Wurzelwachstum in Abb. 8 erkennbar.

A



B

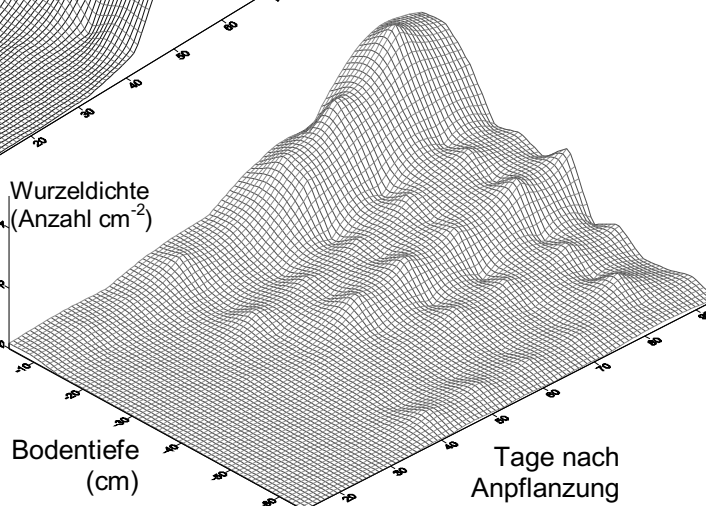


Abb. 8: Wurzelentwicklung von Tomaten cv. *Daniela* bei EC 1 mS cm⁻¹ (A) und EC 8 mS cm⁻¹ (B) in verschiedenen Bodentiefen während des Versuchszeitraums von 94 Tagen.

Korrelation Biomasse-Wurzelanzahl

Die gewonnenen Daten aus der Ernte der Biomasse ergeben ein aus sechs Horizonten bestehendes Wurzelprofil. Um die Aussagefähigkeit der Minirhizotronentechnik abzuschätzen, wurden die Mittelwerte über alle Minirhizotrone ($n = 32$ pro Horizont) aus den Aufnahmen von Tag 94 aus zwei Tiefen gebildet und in den Ergebnissen aus der Wurzelenernte in Abb. 9 gegenübergestellt. In Tab. 1 sind die Korrelationskoeffizienten (r_s) der Analyse für den Vergleich mit der Gesamtwurzelbiomasse, sowie für den Fein- und Grobwurzelanteil mit der Wurzelmenge über die Bodentiefe angegeben. Die Korrelationen zwischen der Wurzelbiomasse und der Anzahl der Wurzeln in den verschiedenen Tiefen

ist sehr uneinheitlich. Die lineare Korrelation aller Werte der Wurzelzahl und der Feinwurzelbiomasse ergab einen Korrelationskoeffizient von 0,76 (Abb. 10).

Tab. 1: Korrelationskoeffizienten (r_s) von Wurzel trockenbiomasse ($n = 1$) und mittlerer Wurzeldichte ($n = 32$) pro EC und Bodentiefe für Gesamt-, Fein- und Grobwurzelbiomasse von *L. esc.* cv. 5656 und cv. Daniela. *** höchst signifikant, ** hoch signifikant, * signifikant, ° schwach signifikant, # Verluste bei der Wurzelerte.

EC	5656			Daniela		
	Gesamt	Feinwurzeln	Grobwurzeln	Gesamt	Feinwurzeln	Grobwurzeln
1	-0,43	- 0,49	-0,49	-0,94***	0,09	- 1
2	0,81-	0,52	0,96**	0,66	0,49	0,81-
3	1	0,83*	1	-0,49	-0,09	- 0,49
4	1	0,89*	0,93**	0,66	0,37 #	0,78-
5,5	0,49	0,49	0,41	0,66	0,61	0,66
8	0,90*	0,64	0,99***	0,94**	0,71	1
11	-0,77-	- 0,83*	- 0,94**	0,31	0,49	0,60

Diskussion

Salzstress

Tomaten können als Modellpflanzen für die Wirkung von salzhaltigen Wasser bzw. Abwasser für die Bewässerung verwendet werden (CUATERO & FERNÁNDEZ-MUÑOZ 1999, BEN-GAL & SHANI 2002b, BRECKLE ET AL. 2003). Salinität bewirkt ein Wasserdefizit in der Wurzelzone ähnlich der Bodentrockenheit. Die Folgen sind eine Minderung des Zellwachstums aufgrund des geringen Wasserpotentials im Boden, Interferenz der Salzionen mit pflanzenwichtigen Nährstoffen, Beeinflussung der Nährstoffaufnahme und die Akkumulation von toxischen Salzionen führen zum Zelltod (BRECKLE 1995, 1996b, CUATERO & FERNÁNDEZ-MUÑOZ 1999). NaCl-Stress beeinflusst signifikant das Wurzelwachstum der beiden untersuchten Sorten *Daniela* und *5656* deutlich bei einer Salinität von $> 4 \text{ mS cm}^{-1}$. Der Salzgehalt, bei dem das Wurzelwachstum drastisch reduziert wird, wird für Tomaten zwischen 4 mS cm^{-1} und 6 mS cm^{-1} angegeben (NANAWATI & MALIWAL 1974, PAPADOPOULOS & RENDIG 1983). Ein verzögertes Wurzelwachstum wurde von ABRISQUETA ET AL. (1991) beobachtet: salzgestresste Wurzeln (135 mM NaCl , ca. 13 mS cm^{-1}) erreichten die 80 cm Bodentiefe 20 Tage später als die ungestressten Wurzeln. Auch eine Änderung der Wurzelsystems muß angenommen werden. So führt Trockenstress bei Tomaten zu einer Minderung der Seitenwurzelbildung (HOOKER & THORPE 1997), was sicherlich auch Auswirkungen auf die Feinwurzelproduktion in diesem Versuch haben könnte. Eine genetische Variabilität der Salztoleranz des Wurzelsystems kann für die verschiedenen Tomaten angenommen werden, ließ sich aber in unserem Fall nicht eindeutig nachweisen. So wird das Wurzelwachstum von *L. peruvianum* und *L. pennellii* weniger von Salzstress beeinflusst als *L. esculentum* (CUATERO & FERNÁNDEZ-MUÑOZ 1999).

Morphologische und physiologische Änderungen im Wurzelsystem bedingt durch den Salzstress führen zu einer Minderung der Wasseraufnahme und verändern die Ionenaufnahme sowie die

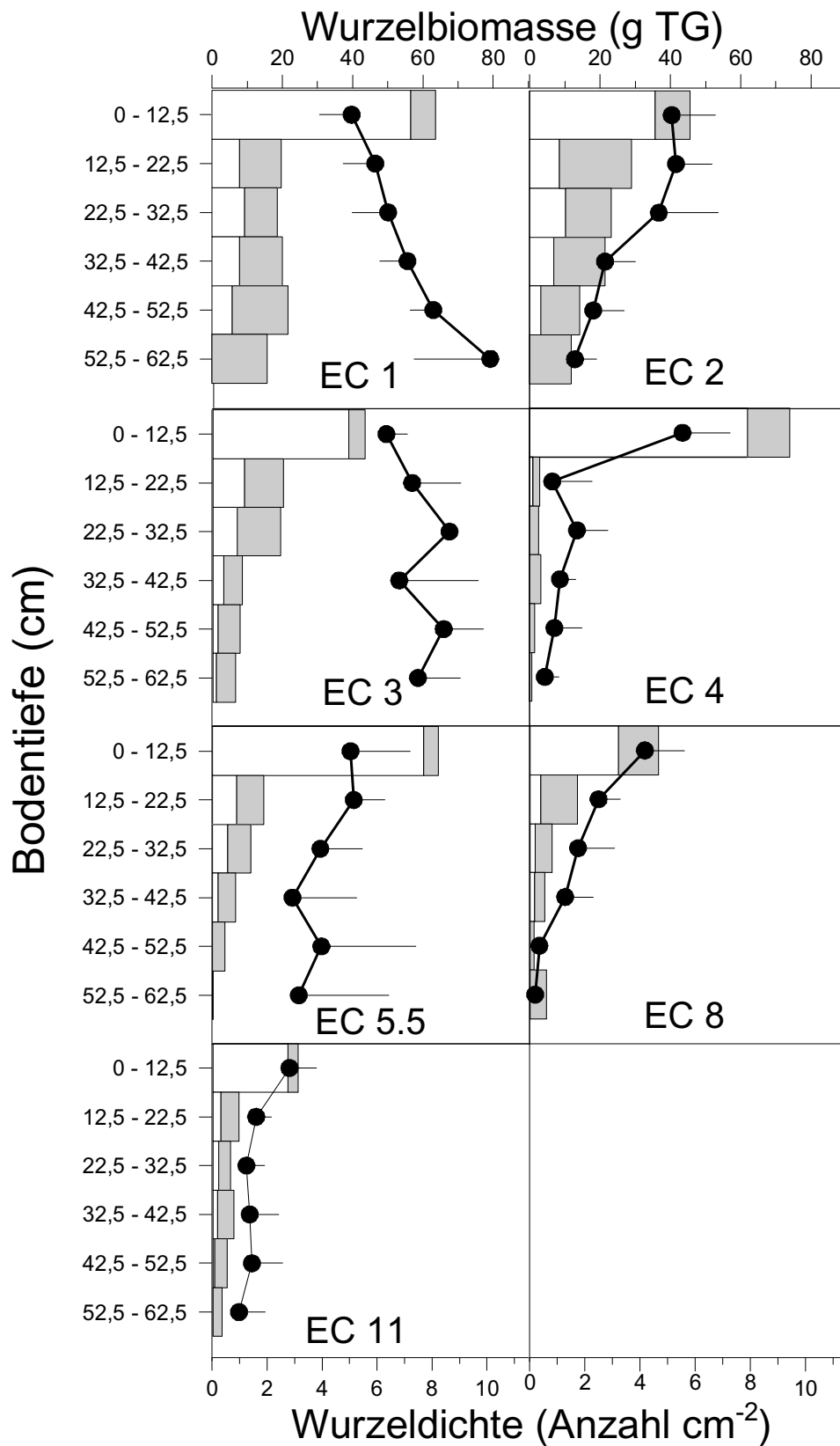


Abb. 9: Tiefenverteilung der Wurzelbiomasse (Fein- (grauer Balken) und Grobwurzeln (offener Balken) und mittlere Wurzeldichte (--●--) von *L. esculentum* cv. Daniela in Abhängigkeit von der Salinität des Bewässerungswassers.

Produktion von Pflanzenhormonen. Dies hat Rückwirkungen auf die oberirdische Biomasseproduktion und der Salzstress führt zu einer deutlichen Reduktion der oberirdischen Biomasse (BEN-GAL & SHANI

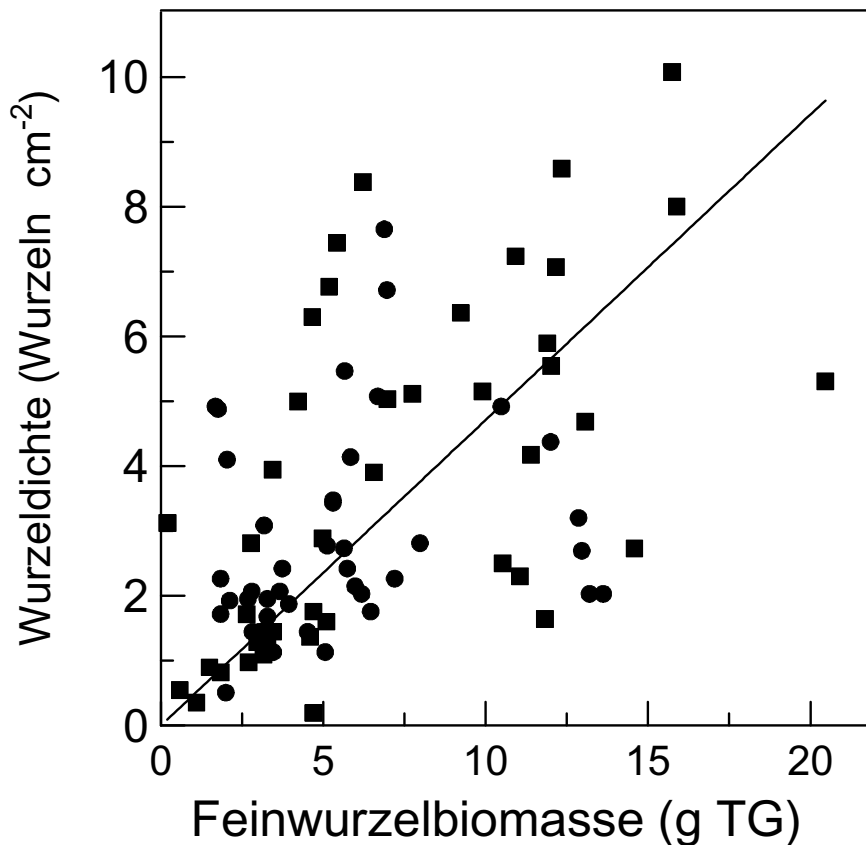


Abb. 10: Korrelation zwischen Feinwurzelbiomasse und Wurzelndichte aus den Minirhizotron-Bildern bei *L. esculentum* cv. *Daniela* (■) und cv. *5656* (●). Regressionsgleichung: $y = 0.471 * x$; $r^2 = 0,76$

2000b, BRECKLE ET AL. 2003). Während CUATERO & FERNÁNDEZ-MUÑOZ (1999) und PEREZ-ALFOCEA ET AL. (1996) angeben, dass das Wurzelsystem der Tomaten weniger vom Salzstress beeinflusst ist als der oberirdische Sproß und ein größerer Anteil des Kohlenstoff in die Wurzeln transportiert wird, konnte in unserem Versuch für beide Sorten keine deutliche Änderung der Biomasseallokation mit steigendem Salzstress festgestellt werden (Abb. 11). Nur bei EC 11 wurde bei beiden ein relativer Anstieg der Wurzelbiomasse festgestellt, allerdings ist in diesen Fällen der Anteil der Früchte deutlich gesunken. Der mittlere Anteil der Wurzeln an der Gesamttrockenmasse betrug $21,4\% \pm 3,5$ für *Daniela* bzw. $15,9\% \pm 2,9$ für *5656*.

Anwendung der Minirhizotrone

Mit den Minirhizotrone konnte die Wurzelndynamik und die Durchwurzelung des Bodens sehr gut erfasst werden. Entgegen vieler Meinungen wuchsen kaum Wurzeln entlang der senkrecht eingeführten Röhren. Viele andere Arbeiten bevorzugen Winkel zwischen 30° und 45° , wobei die Röhren nur sehr aufwendig in den Boden einzubringen sind (vgl. SMIT ET AL. 2000). Eine Hochrechnung der Wurzelzahl pro Bildausschnitt auf die Biomasse ist weiterhin mit einer großen Streuung versehen, was durch die unterschiedliche Größe der Einzelwurzeln verständlich ist (vgl. Abb. 3a und f). Aber möglicherweise ist auch der erfasste Bodenausschnitt zu gering. Vertikal eingeführte Röhren erzielen auch eine bessere Korrelation mit der Biomasse aus Bodenkernen als Röhren im 45° Winkel, wie

Untersuchungen an Kartoffeln zeigten (DE RUIJTER ET AL. 1996). Dabei spielte für die Qualität der Beziehung auch die Wurzelarchitektur eine wesentliche Rolle.

Schlussfolgerungen und Ausblick

Die Minirhizotron-Technik als Methode zur Untersuchung von Wurzelsystemen ist sicher auch

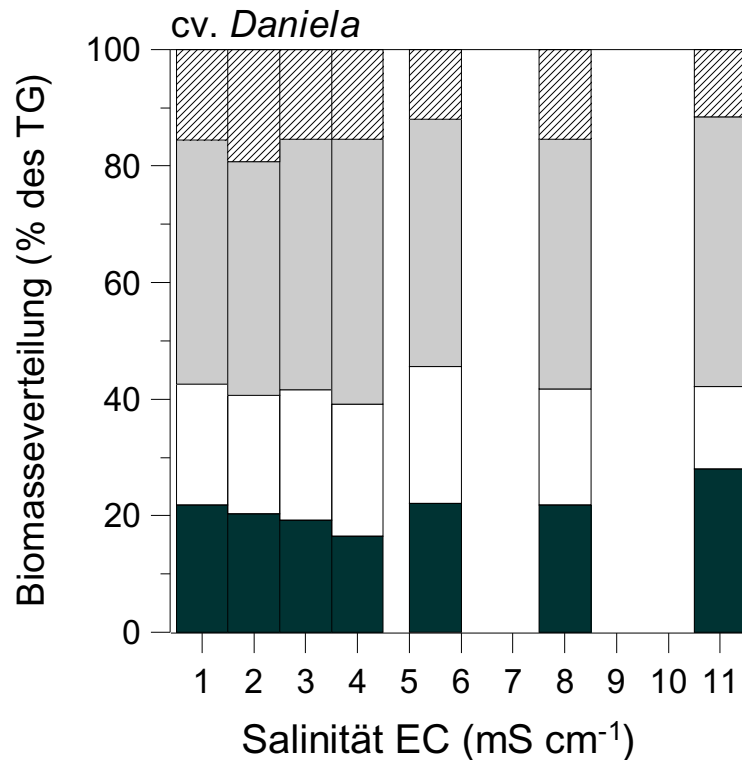


Abb. 11: Biomasseallokation (Trockengewicht) in der Tomate cv. *Daniela* in Abhängigkeit der Salinität. Daten oberirdische Biomasse ALON BEN-GAL in BRECKLE et al. 2003.

bei kleinen Stichproben geeignet um qualitative Aussagen zu treffen. Um Vergleiche bezüglich eines beliebigen Parameters durchzuführen – ob abhängig oder unabhängig – muss dabei der Stichprobenumfang auf die Spannweite der zu untersuchenden Variablen angepasst werden. Je enger der erwartete Zusammenhang ist, desto größer muß der Stichprobenumfang sein (UPCHURCH & RITCHIE 1983). Besonders problematisch ist deshalb die Anwendung der Minirizotrone in Ökosystemen mit geringer Durchwurzelung, wie z.B. Wüsten (VESTE & BRECKLE 1996). Einen Fortschritt könnte hier die Erfassung von größeren Flächen mit Hilfe von Scannern sein (PAN ET AL. 1998, ANLAUF ET AL. 2003), was allerdings mit einer größeren Bildmenge verbunden ist.

Für Untersuchungen der Lebensdauer von einzelnen Wurzeln ist diese Methode besonders geeignet. Für eine bessere statistische Absicherung der Ergebnisse ist ein höherer Stichprobenumfang notwendig, was allerdings mit einem höheren Zeitaufwand für eine manuelle Bildauswertung verbunden ist. Bereits in diesem Versuchsansatz mit 56 Minirhizotronen mussten rund 26.000 Bilder manuell ausgewertet werden. Eine bessere Effizienz bei der Bildauswertung ließe sich mit Hilfe von

Bildauswertungssystemen erreichen, die automatisch die Wurzel detektieren und entsprechend der Vorgaben biometrische Daten erfassen. Verschiedene Ansätze von interaktiven Programmen oder Ansätze zur automatischen Erkennung von Wurzeln wurden entwickelt (SMUKER ET AL. 1987, CASARIN ET AL. 1993, ANDRÈN ET AL. 1996, Übersicht bei RICHNER ET AL. 2000), sind aber als automatische Systeme nicht sehr zuverlässig. Im Rahmen der Kooperationen mit Informatikern konnten in den vergangenen Jahren neue Ansätze für die automatische Erkennung entwickelt werden (JANKOWSKI ET AL 1995, ERZ & POSCH 2003). Eine erste Validierung der entwickelten Algorithmen mit Minirhizotron-Bildern von Tomaten ergab, dass in 3 von 5 Bildern die Wurzelfläche mit einem relativen kleinen Fehler von +7,6 % bis -5.3 % detektiert werden konnte (ERZ ET AL. 2005). Eine Weiterentwicklung ist allerdings notwendig, um eine sichere automatische Erfassung der Wurzeln zu bekommen.

Danksagung

Wir bedanken uns bei Siegmund-W. Breckle (Bielefeld) für die umfangreiche Unterstützung. Des Weiteren bei Alon Ben-Gal (ARO Gilat), Uri Shani (Hebrew University, Rehovot) und Yoav Waisel (Tel Aviv University) sowie bei der Arava R&D und beim Kibbutz Yotvata für die freundliche und tatkräftige Unterstützung. Das Projekt „*Optimierung der Wassernutzung bei verschiedenen Bewässerungsverfahren in Trockengebieten des Nahen Ostens*“ wurde vom Bundesministerium für Bildung und Forschung und dem Projektträger BEO Jülich (BEO 0339677) gefördert.

Literatur

- ABRISQUETA, J.M. HERNASAENZ, A. ALARCÓN, J.J. & LAZONO, M.A. (1991): Dinámica del sistema radicular de dos genotipos de tomate en invernadero en riego por goteo sometidos a estrés salino. *Suelo y Planta* 1, 351-361.
- ANDRÈN, O, ELMQUIST, H. & HANSSON, A.C. (1996): Recording, preprocessing and analysis of grass root images from a rhizotron. *Plant Soil* 195, 259–269.
- ANLAUF, H., ERZ, G., BRECKLE, S.-W. & POSCH, S. (2003): The long way to an automatic minirhizotron. Poster presentation, Workshop on Fine Root Turnover in Forest Ecosystem, Uppsala, Sweden, 8.-10. Sept. 2003.
- BEN-GAL, A. & SHANI U. (2002a): A highly conductive drainage extension to control the lower boundary condition of lysimeters. *Plant Soil* 239, 9–17.
- BEN-GAL, A. & SHANI U. (2002b): Yield, transpiration and growth of tomatoes under combined excess boron and salinity stress. *Plant Soil* 247, 211-212.
- BRECKLE, S.-W. (1995): How do plants cope with salinity? In: Khan, M.A. & Ungar, I.A. (eds.): *Biology of salt tolerant plants*, Dept. of Botany, Univ. of Karachi/Pakistan: 199-221.
- BRECKLE, S.-W. (1996a): Growth of tree roots under heavy metal (Pb-) stress. *Acta Phytogeogr. Suec.* 81, 39-43.
- BRECKLE, S.-W. (1996b): Root growth and root architecture of non-halophytes under saline soil conditions. *Acta Phytogeogr. Suec.* 81, 44-47.

- BRECKLE, S.-W., HAVERKAMP, M., SCHEFFER, A. & VESTE, M. (eds.) (2003): Ökologische Optimierung der Wassernutzung bei Bewässerung in ariden Gebieten; publizierter Projekt-Endbericht. Universität Bielefeld, Bielefelder Ökologie Beiträge 16.
- BÖHM, W. (1974): Minirhizotrons for root observations under field conditions. *Z. für Acker- und Pflanzenbau* 140: 282-287.
- BÖHM, W. (1979): *Methods of studying root systems*. Springer Verlag, Berlin, Heidelberg, New York.
- CASARIN, M., JACQUEY, S., FOURE, A. & GIRADIN, P. (1991): Digital picture processing and applied to the evaluation of plant root dynamics. In: B. McMichael & H. Persson (eds.) *Plant roots and their environment*, Elsevier Science Publisher, Amsterdam, 570–575.
- CUATERO, J. & FERNÁNDEZ-MUNOZ, R.F. (1999): Tomato and salinity. *Scientia Horticulturae* 78, 83-125.
- DE RUIJTER, F. VEEN, B. & VAN OIJEN, M. (1996): A comparison of soil core sampling and minirhizotrons to quantify root development of field-grown potatoes. *Plant Soil* 182, 301-312.
- EHLERS, W. (1996): *Wasser in Boden und Pflanze: Dynamik des Wasserhaushaltes als Grundlage von Pflanzenwachstum und Ertrag*. Ulmer Verlag, Stuttgart.
- ERZ, E. & POSCH, S. (2003): A region based seed detection for root detection in minirhizotron images. In Michaelis, B. & Krell, G. (eds.), *Pattern Recognition, Proc. of 25th DAGM Symposium, LNCS 2781*, Magdeburg, Germany, September 2003. Springer, Heidelberg, 482-489.
- ERZ, G., VESTE, M., ANLAUF, H., BRECKLE, S.-W. & POSCH, S. (2005): A region and contour based technique for automatic detection of roots of tomatoes in minirhizotron images. submitted
- HAGEMEYER, J. & BRECKLE, S.-W. (1995/96): Growth under trace element stress.- (chapter 17).- 2nd. edition. In Waisel, Y., Kafkafi, U., Eshel, A.: *Plant Roots: The Hidden Half*.- Marcel Dekker, New York, 415-433.
- HENDRICK, R. L. & PREGNITER, K. S. (1996): Applications of minirhizotron to understand root function in forests and other natural ecosystems. *Plant Soil* 185, 293 – 304.
- HOO KER, T.S. & THORPE, T.A. (1997): Effects of water deficit stress on the developmental growth of excised tomato roots cultured in vitro. *In Vitro Cell. Dev. Biol. Plant* 33, 245-251.
- JANKOWSKI, M., BRECKLE, S.-W., SAGERER, G., POSCH, S. & VESTE, M. (1995): Automatische Detektion von Wurzelsystemen in Minirhizotron-Bildern, In: Sagerer, G., Posch, S. & Kummert, F. (Hrsg.): *Mustererkennung 1995 in „Informatik aktuell“*, Springer, Berlin, Heidelberg, New York, 176-185.
- NANAWATI, G.C. & MALIWAL, G.L. (1974): Note on the effect of salts on the growth, mineral nutrition and quality of tomato (*Lycopersicon esculentum* Mill.). *Indian J. Agric. Sci.* 43, 612-614.
- PAN, W.B., BOLTON, R.P., LUNDQUIST, E.J. & HILLER, L.K. (1998): Portable rhizotron and color system for monitoring root development. In: J.E. Box, Jr. (ed.) *Root demographics and their efficiencies in sustainable agriculture, grasslands and forest ecosystem*, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, Boston, London, 745-756.
- PAPADOPOULOS, I. & RENDIG, V.V. (1983): Tomato plant response to salinity. *Agron J.* 75, 696-700.
- RICHNER, W., LIEGENS, M., BÜRGI, H. SOLDATI, A. & STAMP, P. (2000): Root image analysis and interpretation. In: SMIT, A.L., et al. (eds.) *Root methods – a Handbook*. Springer Publisher, Stuttgart, Berlin, New York, 305 – 341.
- SMUCKER, A J M, FERGUSON, J C, DEBRUYN, W P, BELFORD, R K AND RITCHIE, J.T. (1987): Image analysis of video-recorded plant root systems, In: *Minirhizotron observation tubes: methods and applications for measuring rhizosphere dynamics*. Ed. H M Taylor, ASA Special publications no. 50, Madison, WI, 67 – 80.
- SMIT, A.L., BENGOUGH, A.G., VAN NOORDWIJK, M., PELERGRIN, S. & VAN DE GEIJN, S.C. (eds.) (2000): *Root methods – a Handbook*. Springer Publisher, Stuttgart, Berlin, New York.
- SMIT, A., GROENWOLD, J. & VOS, J. (1994): *The Wageningen Rhizolab – a facility to study soil-root-*

- shoot-atmosphere interactions in crops. II. Methods of root observations. *Plant and soils* 161, 289-298.
- UPCHURCH, D. R. 1987: Conservation of minirhizotron-root intersections to root length density. In H. M. Taylor (ed.) *Minirhizotron observation tubes: methods and applications for measuring rhizosphere dynamics*. ASA Special publications no. 50, Madison, WI: 51-65.
- UPCHURCH, D. R. & RITCHIE J. T. (1983): Root observations using a video recording system in mini-rhizotrons. *Agron J* 74, 1015-1017.
- VAN DE GEIJN, S.C., VOS, J., GROENWOLD, J., GOUDRIAAN, J. & LEFFELAAR, P.A. (1994): The Wageningen Rhizolab – a facility to study soil-root-shoot-atmosphere interactions in crops. II. Description of main functions. *Plant Soil* 161, 275 – 287.
- VESTE, M. & BRECKLE, S.-W. (1996): Root growth and water uptake in a desert sand dune ecosystem, *Acta Phytogeogr. Suec.* 81, 59-64.
- YANAI, S. (1999): Structure and function of cotton (*Gossypium birsutum* L.) root systems. Dissertation, Plant Sciences, Tel Aviv University.
- WASEL, Y. (2001): Salinity: a major enemy of sustainable land-use. In: Breckle, S.-W., Veste, M. & Wucherer, W. (eds.) (2001): *Sustainable Land-Use in Deserts*. Springer, Heidelberg, 166-173.
- WASEL, Y. & BRECKLE, S.-W. (1987): Differences in responses of various radish-roots to salinity. *Plant Soil* 104, 191-194.
- WASEL, Y., ESHEL, A. & KAFKAFI, U. (1991): *Plant Roots – The Hidden Half*. 2nd edition, M. Dekker, Inc. New Yoek.

Adressen

Maik Veste
Universität Bonn
Nees-Institut für Biodiversität der Pflanzen
Meckenheimer Allee 170, 53115 Bonn
Deutschland
maik.veste@t-online.de

Christian König,
Universität Bielefeld
Abteilung Ökologie
Universitätsstr. 25, 33615 Bielefeld
Deutschland

Matthias Minnich
Universität Bielefeld
Abteilung Ökologie
Universitätsstr. 25, 33615 Bielefeld
Deutschland

