

Echtzeitmessung von Wurzelraum-CO₂ und dessen Potenzial für die Bewässerungssteuerung

Klaus Spohrer, Shamaila Zia-Khan, Wolfram Spreer, Joachim Müller

Als Basis für die Bewässerungsplanung wurde die Eignung von CO₂-Messungen im Wurzelraum (WR-CO₂) untersucht und evaluiert. Die grundlegende Annahme war, dass Pflanzen als Reaktion auf eine defizitäre Wasserversorgung die Wurzelatmung reduzieren. Die Untersuchungen an Apfelbäumen konnten zeigen, dass das WR-CO₂ zu großen Teilen (56–72 %) seinen Ursprung in der pflanzenspezifischen CO₂-Produktion (v. a. Wurzelatmung) hat. Darüber hinaus reagierte das WR-CO₂ deutlich auf Bewässerung und korrelierte bei der Austrocknung mit dem Bodenwassergehalt. Da Veränderungen beim WR-CO₂ sich auch in Veränderungen beim Pflanzenwasserstatus widerspiegeln, besitzt das WR-CO₂ Potenzial zur Ermittlung des Bewässerungsbedarfs der untersuchten Apfelbäume. Die Übertragbarkeit auf weitere Nutzpflanzen wird untersucht.

Schlüsselwörter

Wurzelatmung, Pflanzenwasserstatus, Bodenwassergehalt

Akkurate Bewässerungsplanung ist ein wichtiger Bestandteil moderner Landwirtschaft. In der Praxis basiert diese hauptsächlich auf Bodenfeuchtemessungen oder der klimatischen Wasserbilanz (KRÜGER et al. 1999, ALLEN et al. 1998). Bodenfeuchtemessungen geben Auskunft über die Menge des vorhandenen Bodenwassers (volumetrischer Bodenwassergehalt) und/oder dessen Pflanzenverfügbarkeit (Bodenwasserspannung). Bei der klimatischen Wasserbilanz wird die potenzielle Evapotranspiration am Pflanzenstandort mithilfe von Wetterdaten berechnet und die dadurch mögliche und nötige Auffüllung des Bodenwasserspeichers bestimmt. Beide Messansätze erfassen den Bewässerungsbedarf der Nutzpflanze dabei nur indirekt, nämlich über Messungen von Wetterdaten oder Bodenfeuchte, nicht aber direkt an der Pflanze selbst.

Im Rahmen eines Forschungs- und Entwicklungsprojekts, das von der Bundesanstalt für Landwirtschaft und Ernährung (BLE) finanziell unterstützt wird, werden Wurzelraum-CO₂-Messungen (WR-CO₂) und deren Eignung für die Bewässerungsplanung in der Landwirtschaft untersucht. Dem liegt die Hypothese zugrunde, dass Pflanzen unter Stress ihre Wurzelatmung verringern, was eine Absenkung des WR-CO₂ zur Folge hat. Der Bewässerungsbedarf soll also direkt an der Pflanze durch die Erfassung einer pflanzenphysiologischen Reaktion auf eine eingeschränkte Wasserversorgung ermittelt werden. Der Vorteil dieses Messansatzes an der Pflanze liegt nicht nur in einer möglichen Ermittlung des Pflanzenwasserstatus, wodurch neben stressvermeidender Bewässerung auch ein gezielter Einsatz von Defizitbewässerung zur Steigerung der Fruchtqualität oder des Wirkungsgrades der Bewässerung möglich wäre. Ein weiterer Vorteil ist, dass die Möglichkeit, zerstörungsfrei und kontinuierlich zu messen, alle Optionen auf eine automatisierte Bewässerungssteuerung beinhaltet.

WR-CO₂ und CO₂-Produktion im Boden

In dieser Arbeit und den begleitenden Versuchen bezieht sich der Begriff WR-CO₂ auf die gemessene CO₂-Konzentration in einer Messtiefe von 20 cm. Die CO₂-Produktion im Boden umfasst dagegen die aktuelle Gesamt-CO₂-Produktion (Wurzelatmung, mikrobielle Aktivitäten, etc.). Deshalb gilt, dass das gemessene WR-CO₂ nicht mit der aktuellen CO₂-Produktion in gleicher Tiefe gleichgesetzt werden kann. Die aktuelle CO₂-Produktion in einer definierten Tiefe Z ist vielmehr eine Funktion der Tiefenverläufe von CO₂-Konzentration und Diffusionskoeffizient zwischen der EOF (Erdoberfläche) und Z und kann folglich nur mit Kenntnis dieser Informationen eindeutig bestimmt werden (SCHACK-KIRCHNER et al. 2011).

Pflanzenspezifisches CO₂

Das gemessene WR-CO₂ kann also nur ein Hinweis auf die aktuelle CO₂-Produktion im Boden sein, gibt diese aber nicht quantitativ wieder. Darüber hinaus wird die CO₂-Produktion im Boden nicht ausschließlich von den Pflanzen determiniert. Bei der Wurzelatmung (autotrophe CO₂-Produktion) werden während der Photosynthese gebildete kohlenstoffhaltige Verbindungen über die Wurzeln veratmet. Die heterotrophe CO₂-Produktion umfasst dagegen die CO₂-Produktion aller heterotroph lebenden Mikroorganismen im Boden (KUZYAKOV 2006). Da heterotrophe Organismen auch z.B. Wurzelexudate der Pflanzen abbauen, ist es schwer, eine Grenze zwischen „CO₂-Produktion aufgrund der Pflanze“ und „CO₂-Produktion ohne Pflanze“ zu ziehen. Für die weiteren Arbeiten wurde der Begriff des „pflanzenspezifischen CO₂“ (CO_{2-P}) eingeführt. CO_{2-P} umfasst die gesamte CO₂-Produktion, zu der die Pflanzen mittelbar und unmittelbar beitragen.

Ziel der vorliegenden Arbeit waren grundsätzliche Untersuchungen darüber, ob WR-CO₂-Messungen zur Bewertung des Pflanzenwasserstatus geeignet sind und als Basis für die Bewässerungsplanung in der Landwirtschaft dienen können.

Material und Methoden

Die Arbeiten fanden in einer Wachstumskammer der Universität Hohenheim statt. Gegenstand der Untersuchungen waren fünf 1,80 m hohe Apfelbäume, die in 20-l-PVC-Pflanztöpfen mit sandigem Lehm gepflanzt waren. Die Tagesmitteltemperaturen in Luft und Boden bewegten sich im Untersuchungszeitraum zwischen 18,5 und 22,4 °C bzw. 15,2 und 18,4 °C.

Der Wassergehalt in den Pflanztöpfen wurde mit dielektrischen Sensoren gemessen und in 10-Minuten-Intervallen auf einem PC geloggt. Zur Messung der Bodensaugspannung wurde auf selbstgebaute Tensiometern Druckaufnehmer (AO-1, Reisinger GmbH) angebracht, die Messwerte wurden mit Datenloggern (HOBO U12-008, Onset) aufgezeichnet.

Referenzmessungen zum Wasserstatus der Apfelbäume wurden mit einem Porometer (SC-1, Decagon Decives) zwischen 12 und 13 Uhr durchgeführt. Die einzelnen Messwerte wurden durch Mittelwertbildung aus vier Wiederholungen an zufällig ausgewählten Blättern desselben Baumes bestimmt. Zur individuellen Unterscheidung der einzelnen Bäume bezüglich ihres Pflanzenwasserstatus wurde die relative Stomataleitfähigkeit (rg_s) definiert. Diese errechnet sich aus dem Quotienten der aktuell gemessenen Stomataleitfähigkeit des untersuchten Baumes im austrocknenden Boden ($g_{s,aktuell}$) und einer Referenz-Stomataleitfähigkeit ($g_{s,Referenz}$). Als $g_{s,Referenz}$ dient die Messung der Stomataleitfähigkeit an durchwegs gut bewässerten Bäumen. Dadurch zeigen tendenziell abnehmende rg_s -Werte eine Änderung des Pflanzenwasserstatus infolge einer Unterversorgung mit Wasser an.

Für die CO₂-Sensorik werden üblicherweise elektrochemische (z.B. Figaro) oder optische Verfahren (Infrarot) verwendet. Für die durchgeführten CO₂-Messungen im Boden kamen Infrarot-CO₂-Messmodule (SenseAir, K30) mit einem Messbereich von 0 bis 10.000 ppm zur Anwendung. Die CO₂-Messwerte wurden in 5-Minuten-Intervallen mittels Terminal Emulator (Tera Term, V. 4.82) auf einem Personal Computer (PC) dargestellt und aufgezeichnet. Die nötige Hardware hierzu wurde durch die Hochschule Mannheim entwickelt.

Zur CO₂-Messung im Wurzelraum wurde das CO₂-Messmodul in ein oben luftdicht verschlossenes PVC-Rohr (Ø 63 mm, Länge 25 cm) eingebracht und über eine luftdichte Kabeldurchführung mit dem PC verbunden. Zur Installation des PVC-Rohres im Wurzelraum wurden vorher Installationslöcher mit einer Rammkernsonde angelegt. Größere Hohlräume zwischen PVC-Rohr-Außenwand und Boden wurden geschlossen, um künstlich geschaffene CO₂-Entgasungswege zu vermeiden. Die Öffnung des PVC-Rohrs am unteren Ende ermöglicht ein Zufluss von WR-CO₂ in das Rohr. Die Messtiefe des PVC-Rohrs betrug 20 cm.

Ergebnisse und Diskussion

Bewässerung, Bodenwassergehalt und WR-CO₂

Die ersten Untersuchungen an einem Apfelbaum galten dem Einfluss der Bewässerung auf das WR-CO₂. Abbildung 1 zeigt, dass das WR-CO₂ deutlich auf Wassergaben reagiert und entsprechend ansteigt. Die Werte stiegen unmittelbar nach der Bewässerung durchweg auf über 10.000 ppm. Da die eingesetzten CO₂-Messmodule nur Messungen bis 10.000 ppm erlauben, musste deren prinzipielle Eignung näher untersucht werden. Simultane Messungen der Bodensaugspannung (Ψ) (nicht dargestellt) zeigten dabei, dass bereits bei $\Psi < -80$ mbar (\approx Feldkapazität) das WR-CO₂ wieder unter 10.000 ppm fällt. Da bei diesen Ψ -Werten Pflanzen optimal mit Wasser versorgt sind, kann der Messbereich der benutzten CO₂-Messmodule unter den gegebenen Bedingungen als ausreichend für die weiteren Untersuchungen angesehen werden.

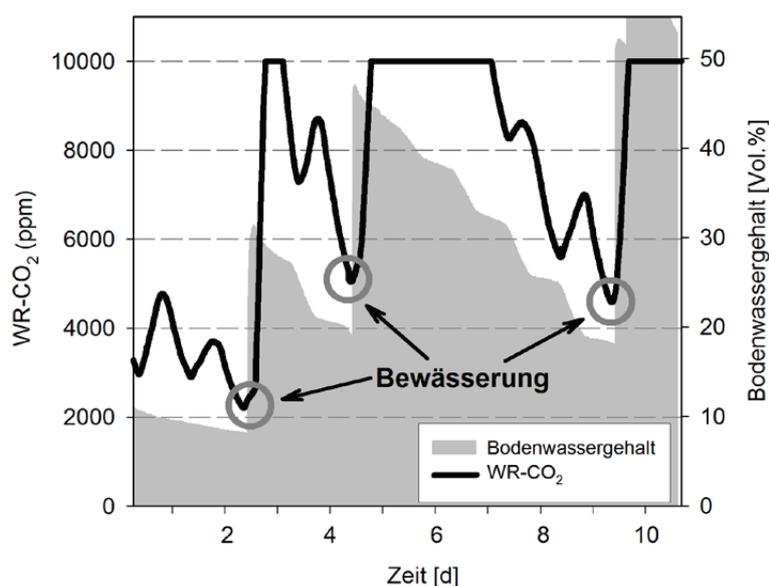


Abbildung 1: Einfluss von Bewässerung auf das WR-CO₂.

Es ist offensichtlich, dass zwischen der Bewässerung und der deutlichen Zunahme des WR-CO₂ unmittelbar nach der Bewässerung (Abbildung 1) ein kausaler Zusammenhang besteht. Dabei kann der WR-CO₂-Anstieg aber nicht alleine mit einer, dank besserer Wasserversorgung, verstärkten CO₂-Produktion (z. B. durch Wurzelatmung) erklärt werden. Es muss auch der Prozess des Gastransports im Boden mit betrachtet werden. Da u. a. auch für CO₂ die Diffusion der dominierende Transportprozess im Boden darstellt und das Diffusionsvermögen in der Gasphase gegenüber der wässrigen Phase um den Faktor 10⁴-10⁵ größer ist (MAIER und SCHACK-KIRCHNER 2014), kommt dem Bodenwassergehalt (also der Porenfüllung mit Wasser) eine entscheidende Bedeutung zu. Mathematisch kann der CO₂-Transport im Boden mit dem Fick'schen Gesetz beschrieben werden, wonach der Gasfluss zwischen zwei Punkten vom Konzentrationsunterschied und dem Diffusionskoeffizienten bestimmt wird. Verringert sich der CO₂-Diffusionskoeffizient infolge der Bewässerung, so verringert sich auch der CO₂-Fluss (MOLDRUP 2000). Die Folge kann eine absolute Zunahme des WR-CO₂ sein, selbst wenn sich die aktuelle CO₂-Produktion im Boden nicht geändert hat. Der schnelle WR-CO₂ Anstieg nach der Bewässerung lässt diesen Effekt vermuten (Abbildung 1). Bei der Bewässerung wurde das Wasser auf die Oberfläche aufgebracht. Dadurch wurde der Porenraum im obersten Bodenbereich komplett mit Wasser gefüllt und die im Boden befindliche Luft durch die Infiltrationsbewegung des Wassers sukzessive nach unten gedrückt. Ob und inwieweit eine Erhöhung der CO₂-Produktion im Boden zum beobachteten WR-CO₂-Anstieg beiträgt und eventuell auch zeitversetzt erfolgt, konnte nicht ermittelt werden.

Dem zügigen WR-CO₂-Anstieg nach der Bewässerung folgen jeweils Phasen wieder abnehmenden Bodenwassergehalts. Dabei korreliert der Verlauf des Bodenwassergehalts offensichtlich mit dem Verlauf des WR-CO₂, welches tägliche Schwankungen aufweist (Abbildung 1). Dieser Beobachtung wurde mit einem weiteren Versuch nachgegangen, in dem die Wurzelräume von drei Apfelbäumen mit Wasser gesättigt und während der Austrocknung durch Wurzelentzug sowohl das WR-CO₂ als auch der Bodenwassergehalt gemessen und aufgezeichnet wurden. In Abbildung 2 sind die mittäglichen Messungen (13 Uhr) aufgetragen.

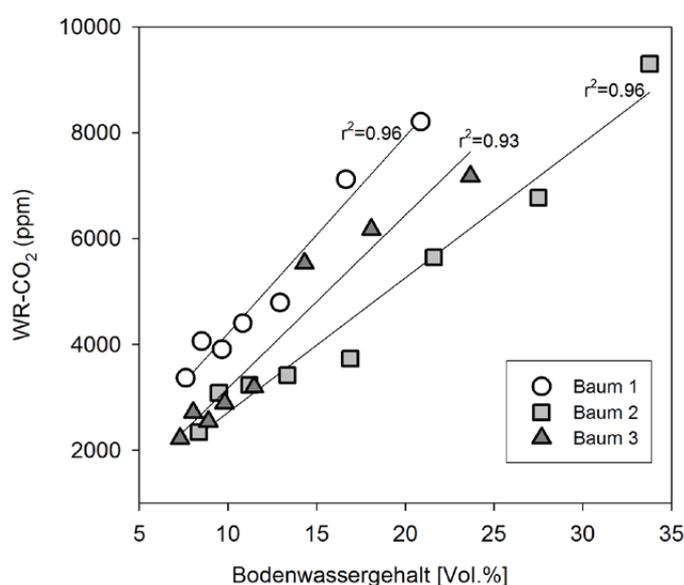


Abbildung 2: Mittägliche Werte von WR-CO₂ (13 Uhr) und Bodenwassergehalt während der Wurzelraum austrocknung von drei Apfelbäumen.

Die Ergebnisse zeigen für den Entwässerungsvorgang eine deutliche positive Korrelation zwischen WR-CO₂ und Wassergehalt im Wurzelraum. Da auch die Wasserverfügbarkeit für Pflanzen und der Pflanzenwasserstatus mit dem Wassergehalt im Wurzelraum korrelieren (INTRIGLILOLO und CASTEL 2004, JONES 2004), scheint eine WR-CO₂-basierte Bewässerungsplanung in der Landwirtschaft grundsätzlich möglich, auch wenn Unterschiede zwischen den Bäumen vorhanden sind (Abbildung 2), die eine einzige repräsentative Korrelation für alle drei Apfelbäume erschweren. Dies kann der großen Bandbreite an Einflussfaktoren auf das WR-CO₂ zugeschrieben werden. So kann eine Abnahme des gemessenen WR-CO₂ zurückgeführt werden auf (i) eine Erhöhung des Diffusionskoeffizienten infolge Wassergehaltsabnahme im Boden, (ii) einen Rückgang der CO₂-Produktion oder (iii) letztlich auf beides, mit räumlich und zeitlich unterschiedlicher Gewichtung (SCHACK-KIRCHNER et al. 2011).

Pflanzenspezifisches CO₂

Angesichts des hohen Bestimmtheitsmaßes der Korrelationen zwischen WR-CO₂ und Bodenwassergehalt (Abbildung 2) musste die Frage geklärt werden, inwieweit die Pflanzen tatsächlich zum gemessenen WR-CO₂ beitragen bzw. ob CO_{2-P} – vor allem die Wurzelatmung – in ausreichendem Maße vom WR-CO₂ widergespiegelt wird. In Anlehnung an die „root exclusion method“ (HANSON et al. 2000) wurde der Anteil des CO_{2-P} am WR-CO₂ bestimmt, indem das WR-CO₂ in Böden mit und ohne Pflanzen gemessen wurde. Abbildung 3 zeigt für eine Austrocknungsphase den gemessenen Verlauf des Bodenwassergehalts sowie Verläufe für CO_{2-P} und CO_{2-B} (CO₂ in Böden ohne Pflanze). Das CO_{2-P} wurde dabei aus der Differenz von WR-CO₂ und CO_{2-B} errechnet. Für das WR-CO₂ wurden mittägliche Werte (13 Uhr) verwendet. Das CO_{2-B} wurde im gleichen, pflanzenfreien Boden gemessen. Dazu wurde der anfangs lufttrockene Boden schrittweise bis zum gewünschten Wassergehalt gebracht und der sich einstellende Wassergehalt sowie das CO_{2-B} nach 3 Tagen erfasst. Die bei den jeweiligen Wassergehalten (Sättigung: 0,3; 0,2; 0,1) gemessenen CO_{2-B}-Werte wurden den Versuchstagen 1, 2, 4 und 8 (Tage nach Bewässerung) zugeordnet. Die CO_{2-B}-Werte für die restlichen Tage wurden linear interpoliert.

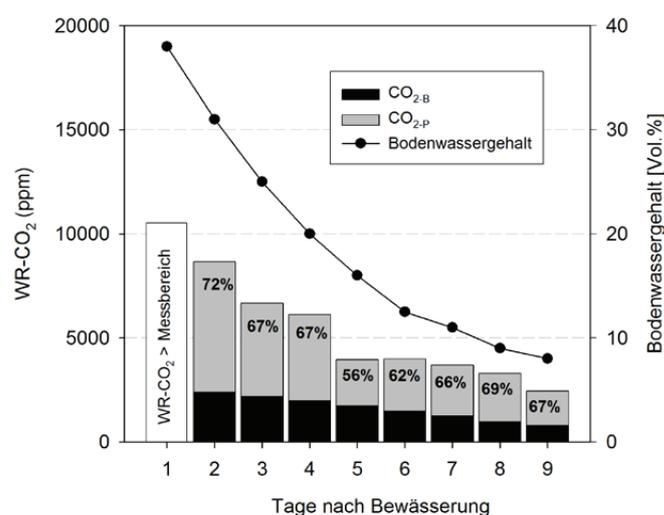


Abbildung 3: Anteile von CO_{2-P} (pflanzenspezifisches CO₂) und CO_{2-B} (WR-CO₂ ohne CO_{2-P}) bei abnehmendem Wassergehalt im Boden eines Apfelbaumes. Der prozentuale Anteil von CO_{2-P} am WR-CO₂ ist in den Balken angegeben.

Bei Sättigung können weder CO_{2-P} noch CO_{2-B} genau quantifiziert werden, da die entsprechenden Messwerte oberhalb des Messbereichs der CO_2 -Messmodule liegen. Mit abnehmendem Wassergehalt nimmt CO_{2-B} schnell auf Werte um 2300 ppm ab. Danach verläuft der Rückgang nur noch graduell bis zu Werten knapp unter 1000 ppm. CO_{2-P} ist zu jedem Zeitpunkt und bei jedem Bodenwassergehalt größer als CO_{2-B} . Der prozentuale Anteil des CO_{2-P} am WR-CO_2 beträgt zwischen 56 und 72 % und ist damit im gleichen Bereich, den EDWARDS (1991) mit einem ähnlichen Versuchsaufbau für Kiefern (*Pinus teada*) (54–78 %) ermittelt hatte. Für die untersuchten Apfelbäume kann konstatiert werden, dass CO_{2-P} deutlich zum WR-CO_2 beiträgt. Die Nutzung des WR-CO_2 als Maß für CO_{2-P} (v. a. Wurzelatmung) bei den untersuchten Apfelbäumen erscheint prinzipiell gerechtfertigt.

WR- CO_2 und Wasserstatus der Pflanze

Schlussendlich wurde untersucht, ob über das WR-CO_2 Aussagen zum Pflanzenwasserstatus der untersuchten Apfelbäume getroffen werden können. Dafür wurden während der Entwässerung (ab ca. Feldkapazität) bei drei Apfelbäumen täglich die relative Stomataleitfähigkeit (rg_s) ermittelt und das WR-CO_2 gemessen. Die Korrelation von rg_s und WR-CO_2 ist in Abbildung 4 dargestellt. Während die einzelnen Bäume Bestimmtheitsmaße von 0,80 (Baum 2), 0,94 (Baum 3) und 0,95 (Baum 1) aufweisen (nicht dargestellt), beträgt das gemeinsame Bestimmtheitsmaß für alle 3 Bäume 0,79. Bei allen drei Bäumen wurden die höchsten rg_s -Werte (ca. 1,2) bei den höchsten WR-CO_2 -Werten gemessen. Diese liegen zwischen 6200 ppm (Baum 3) und 9300 ppm (Baum 2), was bedeutet, dass optimal mit Wasser versorgte Bäume durchaus verschiedene WR-CO_2 aufweisen können. Bis zu einem rg_s von 0,5–0,6, was ungefähr der halben Stomataleitfähigkeit optimal bewässerter Bäume entspricht, ist ein Rückgang beim WR-CO_2 mit entsprechend abnehmenden rg_s zu beobachten. Im Bereich darunter sinkt rg_s teilweise weiter, nicht jedoch WR-CO_2 , welches konstant bleibt. Offenbar wurde ein Bereich mit einem Minimum in der CO_2 -Produktion bei gleichzeitigem Maximum in der Diffusion erreicht. Beides ist als Erklärung geeignet, dass WR-CO_2 ab einem bestimmten Wert nicht mehr abnimmt, wobei dieser Wert sowohl vom Boden als auch von der Pflanze abhängt. Eine Gewichtung beider Einflussfaktoren ist aufgrund der vorliegenden Daten nicht möglich.

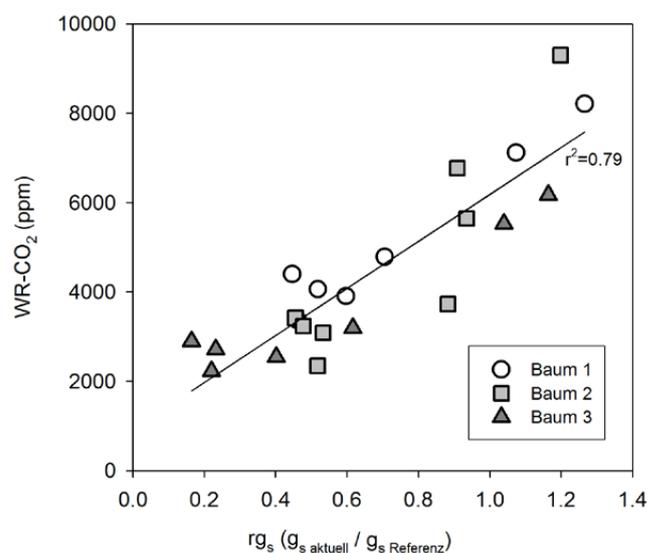


Abbildung 4: Zusammenhang zwischen WR-CO_2 und der relativen Stomataleitfähigkeit (rg_s)

Schlussfolgerungen

Die hier vorgestellten Untersuchungen haben gezeigt, dass WR-CO₂-Konzentration und Wassergehalt im Wurzelraum korreliert sind. Es wurde zudem gezeigt, dass unter Bedingungen, wie im vorliegenden Experiment, ein großer Teil (56–72 %) des WR-CO₂ von der betrachteten Kulturpflanze stammt und Veränderungen im WR-CO₂ mit Veränderungen der stomatären Leitfähigkeit korrelieren.

Die kontinuierliche Messung des WR-CO₂ mit einem eigens hierfür gefertigten Sensor zeigt neue Möglichkeiten in Bezug auf das Echtzeitmonitoring von Aspekten des Boden-Pflanze-Atmosphäre-Kontinuums auf. Hierfür sind weitere Untersuchungen notwendig, da die vorgestellten Ergebnisse bedingt durch den geringen Stichprobenumfang noch keine abschließende Beschreibung des kritischen WR-CO₂ im Boden zulassen. Bei der Fortführung der Untersuchungen kommt der Identifizierung des genauen Wasserstress-Zeitpunkts zur Optimierung der Bewässerungssteuerung und der Ermittlung entsprechender Rechenalgorithmen zur automatischen Messwertauswertung und Wasserstatusberechnung eine besondere Bedeutung zu. Darüber hinaus werden die Untersuchungen auf weitere Nutzpflanzen ausgedehnt.

Auch wenn die vorliegenden Daten keine endgültige Aussage über die tatsächliche Eignung zulassen, konnte doch gezeigt werden, dass die Bestimmung des WR-CO₂ ein Potenzial in der Bewässerungsplanung und -steuerung hat.

Literatur

- Allen, R. G.; Pereira, L. S.; Raes, D.; Smith, M. (1998): Crop evapotranspiration – guidelines for computing crop water requirements. Irrigation and drainage paper No. 56, FAO Rome, p. 300
- Edwards, N. T. (1991): Root and soil respiration responses to ozone in *Pinus taeda* L. seedlings. *New Phytologist* 118, pp. 315–321
- Hanson, P. J.; Edwards, N. T.; Garten, C. T.; Andrews, J. A. (2000): Separating root and soil microbial contributions to soil respiration: A review of methods and observations. *Biogeochemistry* 48, pp. 115–146
- Intrigliolo, D. S.; Castel, J. R. (2004): Continuous measurements of plant and soil water status for irrigation scheduling in plum. *Irrigation Science* 23(2), pp. 93–102
- Jones, H.G. (2004): Irrigation scheduling: advantages and pitfalls of plant-based methods. *Journal of Experimental Botany* 55(407), pp. 2427–2436
- Krüger, E.; Schmidt, G.; Brückner U. (1999): Scheduling strawberry irrigation based upon tensiometer measurement and a climatic water balance model. *Scientia Horticulturae* 81(4), pp. 409–424
- Kuzyakov, Y. (2006): Sources of CO₂ efflux from soil and review of partitioning methods. *Soil Biology Biochemistry* 38, pp. 425–448
- Maier, M.; Schack-Kirchner, H. (2014): Using the gradient method to determine soil gas fluxes: A review. *Agricultural and Forest Meteorology* 192–193, pp. 78–95
- Moldrup, P.; Olesen, T.; Schjonning, P.; Yamaguchi, T.; Rolston, D. E. (2000): Predicting the gas diffusion coefficient in undisturbed soil from soil water characteristics. *Soil Science Society of America Journal* 64(1), pp. 94–100
- Schack-Kirchner, H.; Kublin, E.; Hildebrand, E. E. (2011): Finite-element regression to estimate production profiles of greenhouse gases in soils. *Vadoze Zone Journal* 10(1), pp. 169–183
- Zia, S.; Spohrer, K.; Merkt, N.; Wanyong, D.; He, X.; Müller, J. (2009): Use of thermography for water status detection in grapevine. In: International Conference on Sustainable Land Use and Ecosystem Conservation, 4–7 May 2009, Beijing, UNESCO, pp. 317–328

Autoren

Dr. Klaus Spohrer ist wissenschaftlicher Mitarbeiter, **Dr. Shamaila Zia-Khan** ist wissenschaftliche Mitarbeiterin und **Prof. Dr. Joachim Müller** ist Leiter des Fachgebiets Agrartechnik in den Tropen und Subtropen am Institut für Agrartechnik an der Universität Hohenheim, 70593 Stuttgart, E-Mail: klaus.spohrer@uni-hohenheim.de

Dr. Wolfram Spreer ist Lecturer an der Faculty of Agriculture, Chiang Mai University, Chiang Mai 50200, Thailand

Danksagung

Die vorliegende Arbeit wurde durch die Bundesanstalt für Landwirtschaft und Ernährung (BLE) im Rahmen des Forschungs- und Entwicklungsprojekts „Entwicklung eines drahtlosen CO₂-Bodensensors zur Wasserstressbestimmung und effizienten teilflächenspezifischen Bewässerung von Nutzpflanzen“ (FKZ 28-1-55.010/011/012-11) finanziell unterstützt. Die Autoren danken den Projektpartnern Hochschule Mannheim und STEP Systems GmbH für ihre Unterstützung.