

Die Bedeutung der Wurzel für die Leistungen der Zwischenfrucht Begrünung im Boden- und Grundwasserschutz

Gernot Bodner^{1*}

Zusammenfassung

Zwischenfruchtbau ist eine wesentliche Agrarumweltmaßnahme für Boden- und Grundwasserschutz. Das vorhandene Spektrum von Zwischenfruchtarten weist eine Vielfalt an Wurzeleigenschaften auf, denen spezifische funktionelle Bedeutung für die Wirkung der Begrünungsmaßnahme zukommt. Grundwasserschutz erfordert Zwischenfrüchte mit explorativer, tiefreichender Wurzelarchitektur. Erosionsschutz wird durch intensive Oberbodendurchwurzelung gefördert, die zu Aggregat- und Porenstabilisierung sowie Bioporenbildung führt. Pflanzenarten mit starker Pfahlwurzel können zur Lockerung verdichteter Böden beitragen. Die Stabilisierung der Humusgehalte durch Zwischenfrüchte ist vor allem über deren Wurzelrückstände möglich, da diese im Vergleich zum oberirdischen Material wesentlich langsamer abgebaut werden. Für ein zielgerichtetes Begrünungsmanagement bedarf es einer exakten vergleichenden Beschreibung der artspezifischen Wurzelsysteme und vermehrter quantitativer Studien über Wechselwirkungen zwischen Wurzelparametern und Bodeneigenschaften.

Schlagwörter: Zwischenfrucht, Wurzelsystem, Umweltleistungen, Bioporen, Humus

Summary

Cover cropping is a widely used agro-environmental measure for soil and groundwater protection. The existing spectrum of cover crop species shows a diversity of root systems with specific functions relevant for their environmental impact. Groundwater protection requires cover crops with deep explorative root architecture. Soil erosion is reduced by an intense rooting of the upper soil layers resulting in aggregate and pore stabilization as well as bio-pore formation. Species with strong tap roots can contribute to loosening of dense soil layers. Stabilization of humus content by cover crops is mainly a function of their roots which have a slower decay compared to above-ground residues. For a targeted cover crop management an exact comparative root system description is required as well as quantitative studies on the interaction of root traits with soil properties.

Keywords: cover crops, root system, environmental impact, biopores, humus

Einleitung

Zwischenfruchtbau gehört zu den wichtigsten Agrarumweltmaßnahmen in Europa. In Österreich stellt die „Begrünung von Ackerflächen“ mit einer Teilnahme von 49.905 Betrieben und 433.640 ha Ackerfläche eine der am weitesten angenommenen ÖPUL-Maßnahmen dar (GRÜNER BERICHT 2011).

Zielsetzungen des Zwischenfruchtbaus sind Verringerung der Nitratauswaschung, Erosionsschutz, Verbesserung der Humusbilanz und Bodenstrukturstabilisierung. Viele Zwischenfruchteffekte hängen ursächlich mit dem Wurzelsystem der eingesetzten Pflanzenarten zusammen. Eine systematische Beschreibung von Zwischenfruchtarten und -sorten im Hinblick auf ihre Umweltleistungen ist im Vergleich zur Sortenbeschreibung von Hauptfrüchten jedoch nicht vorhanden. Dies gilt umso mehr für die Wurzeleigenschaften der Begrünungspflanzen. Die Berücksichtigung der Wurzeleigenschaften und ihrer Funktionen im Zwischenfruchtmanagement wäre jedoch für einen optimalen Einsatz des vorhandenen Artenspektrums zum Boden- und Grundwasserschutz notwendig. Im folgenden

Beitrag werden die Funktionen und Wirkungen der Zwischenfruchtwurzeln im Zusammenhang mit den Zielen der Begrünungsmaßnahme aufgezeigt.

Wurzelsysteme von Zwischenfrüchten

Die Systematik der Wurzelsysteme bietet nur eine grobe Unterscheidung in Pflanzenarten mit homorrhizen und allorhizen Wurzelbild. Homorrhizie findet sich bei monokotylen Pflanzen und zeichnet sich durch die Gleichrangigkeit der primären samenbürtigen mit den sekundären sproßbürtigen Wurzeln aus, wobei die Primärwurzeln in manchen Fällen mit der Ausbildung des Sekundärsystems ihre Funktion verlieren. Allorhizie, wie sie bei Dikotylen auftritt, bezeichnet Wurzelsysteme mit einer dominanten Primärwurzel von der die hierarchisch nachgeordneten Seitenverzweigungen ausgehen. Manche Arten bilden dabei eine verdickte Primärwurzel aus (Pfahlwurzel), die zur Stoffspeicherung dient.

Wichtige funktionelle Wurzelparameter, die sich von der Topologie und Architektur des Systems ableiten, sind Wurzeltiefe, Wurzelverteilung und Durchwurzelungsdichte. Aufgrund dieser Parameter unterscheidet FITTER (2002)

¹ Institut für Pflanzenbau und -züchtung, Universität für Bodenkultur Wien, Gregor-Mendel-Straße 33, A-1180 WIEN

* Ansprechpartner: Dr. Gernot Bodner, gbodner@groupwise.boku.ac.at



zwischen explorativen (Ausfüllung eines maximalen Bodenvolumens) und exploitativen (Optimierung des Entzuges aus einem beschränkten Volumen) Wurzelsystemen. Die Ausbildung des Wurzelsystems unterliegt stärker noch als die Formausprägung des oberirdischen Phänotyps einer intensiven Interaktion zwischen Genotyp und vorherrschenden Bodenverhältnissen.

Neben den Eigenschaften der Wurzelarchitektur spielt auch die stoffliche Zusammensetzung der Wurzel eine bedeutende Rolle im System Boden-Pflanze. Die Wurzel liefert sowohl rasch umsetzbare organische Substanzen (Exsudate, abgestorbene Zellen der Wurzelspitze, Feinwurzeln) mit einer Lebensdauer von wenigen Tagen (ZOBEL 2005, PIERRET et al. 2005) als auch schwer abbaubares Material (Lignin, Suberin) als Quelle chemisch stabiler organischer Bodensubstanz.

Abbildung 1 zeigt den Tiefenverlauf der Wurzellängendichte ausgewählter Begrünungskulturen sowie deren Gesamttrockenmasse im Vergleich zur oberirdischen Biomasse. Phacelia brachte in den Untersuchungsjahren die dichteste Durchwurzelung. Auch Lein (2009) führte zu sehr hohen Wurzellichten. Das Wurzelsystem der Leguminosen mit dickeren Einzelwurzeln lag dagegen bei der Durchwurzelungsdichte im unteren Bereich. Hinsichtlich der Wurzelbiomasse zeigte Senf mit seiner unter den Versuchsvarianten deutlichsten sekundären Verdickung der Primärwurzel die höchsten Werte. Das Wurzel/Sproß-Verhältnis lag zwischen 0,21 (Wicke 2004) und 0,94 (Roggen 2005), im Mittel bei 0,59. Dies beweist auch die mengenmäßige Bedeutung des Wurzelsystems als Quelle organischer Substanz bei Zwischenfrucht Begrünungen.

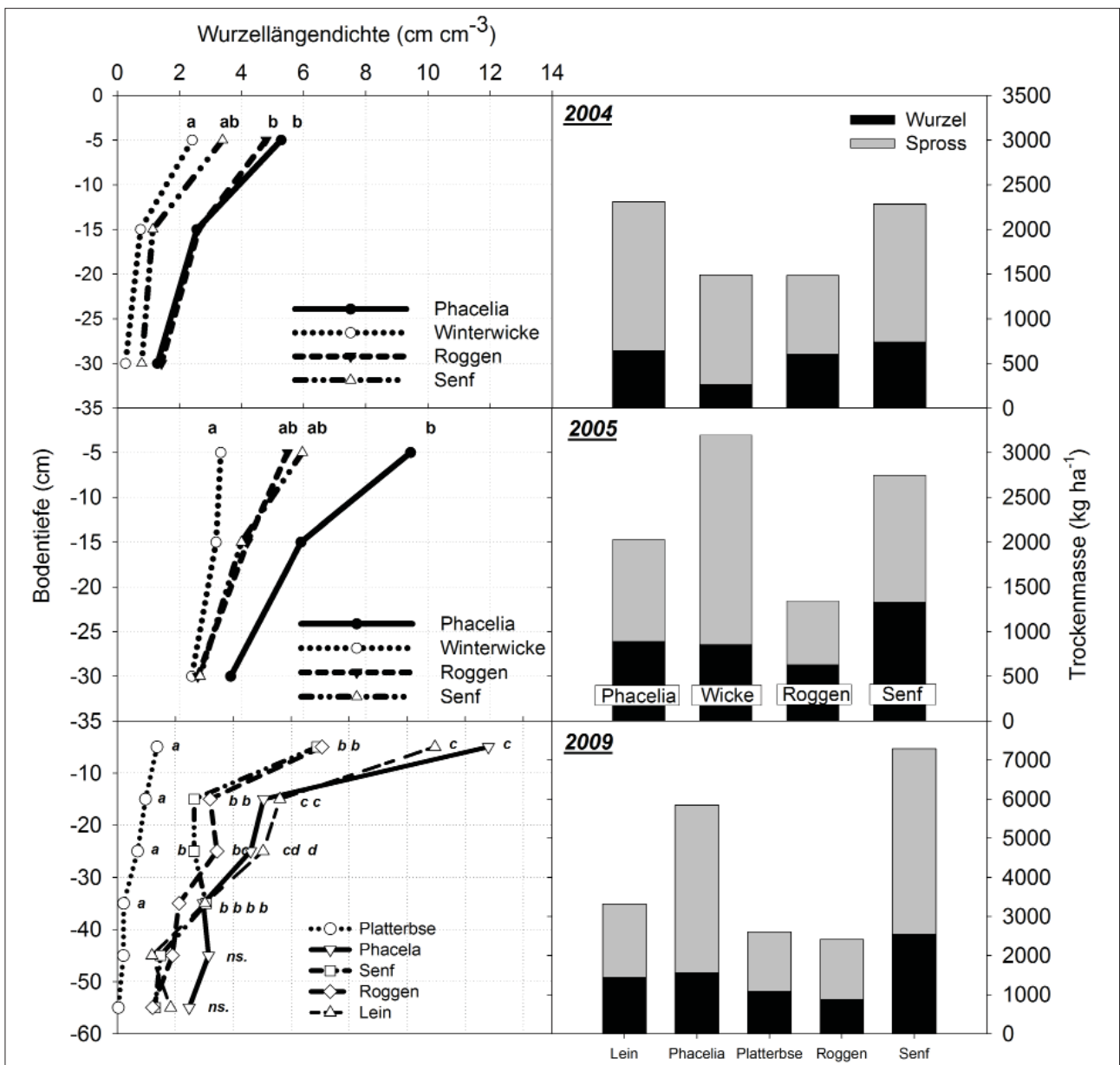


Abbildung 1: Wurzellängendichte, Wurzel- und Spross-biomasse ausgewählter Zwischenfrüchte (Versuchsstandorte Hollabrunn 2004, 2005, und Groß Enzersdorf 2009; Methode: Bodenzylinder und Bildanalyse).

Zwischenfruchtwurzel und Grundwasserschutz

Die Effektivität der Zwischenfrucht für den Schutz des Grundwassers vor der Auswaschung von Nitrat aus Dünger und Mineralisation während der Zwischenbrachzeit wurde in vielen Studien gezeigt (z.B. BÖHM und HÖSCH 2001, SPIESS et al. 2011) und spiegelt sich in der örtlichen Verbesserung des Grundwasserzustandes durch ÖPUL wieder.

Relevante Wurzelparameter für die Optimierung der Nitrataufnahme sind maximale Wurzeltiefe und Geschwindigkeit des Tiefenwachstums. Für eine unlimitierte Wasseraufnahme unter erdfeuchten Bedingungen (Feldkapazität) wird eine Wurzeldichte von $0,5 \text{ cm cm}^{-3}$ als ausreichend angenommen (PASSIOURA 1980, DE WILLIGEN et al. 2000). Nitrat wird über Massenfluss mit der Bodenlösung zur Wurzeloberfläche transportiert. Daraus kann geschlossen werden, dass schon bei geringen Durchwurzelungsdichten zwischen $0,5$ bis 1 cm cm^{-3} die Pflanze in der Lage ist, entsprechend ihrer Wasseraufnahmemenge, vorhandenes Nitrat dem Boden zu entziehen und einen Verlust in Richtung Grundwasser zu verhindern. Die Wurzelverteilungen in *Abbildung 1* zeigen, dass die Wurzeldichte der untersuchten Begrünungen exponentiell mit der Tiefe abnimmt, jedoch mit Ausnahme der Leguminosen in der Beprobungstiefe zumeist deutlich über dem kritischen Wert von $0,5 \text{ cm cm}^{-3}$ liegen. In Ausgrabungen im Trockengebiet konnte bei Ölrettich die Hauptwurzel in einer Schwarzerde bis auf etwa $1,70 \text{ m}$ verfolgt werden, wobei sich das Wurzelsystem unter dem durch Oberbodentrockenheit temporär verhärteten A-Horizont im Bereich des AC und C-Horizontes noch intensiv verzweigte.

Demnach ist für die Nitrataufnahme eine zwar nur extensive Wurzeldichte im Unterboden erforderlich, jedoch eine explorative Wurzelsystemarchitektur, mit der die Pflanze ein hohes Bodenvolumen erfasst. Zu den tiefwurzelnden Begrünungen mit raschem Wurzelwachstum, die für den Grundwasserschutz besonders geeignet sind, zählen die Kreuzblütler Ölrettich, Senf und Markstammkohl.

Zwischenfruchtwurzel und Erosionsschutz

Eine langandauernde Bodenbedeckung durch wachsende Pflanzen und Mulchmaterial kann den Oberflächenabfluss und Bodenabtrag effizient reduzieren: Der Bodenabtrag verringert sich exponentiell mit dem Bedeckungsgrad und ist bei einer Bedeckung von 50% der Bodenoberfläche bereits um 80% verringert (ZUAZO und PLEGUEZUELO 2008). Neben der raschen und langdauernden Bodenbedeckung durch ein Pflanzendach und Mulch spielt jedoch auch das Wurzelsystem der Zwischenfrucht eine substantielle Rolle.

Die Zwischenfruchtwurzeln tragen durch ihre Wirkung auf die Bodenstruktur im Oberboden zum Erosionsschutz bei. Wurzeln spielen in der Bodenaggregation und Stabilisierung der Aggregate eine vielfältige Rolle (vgl. SIX et al. 2004): Verkittung der Mineralteilchen über Exsudate, partikuläre Wurzelreste als Kern der Aggregatbildung, sowie Vernetzung der Makroaggregate durch Feinwurzeln und Pilzhyphen. Als „Spiegelbild“ der Bodenaggregate beeinflussen die Wurzeln auch das Porensystem: abgestorbene Wurzeln führen zu Biomakroporen, die Porenwände

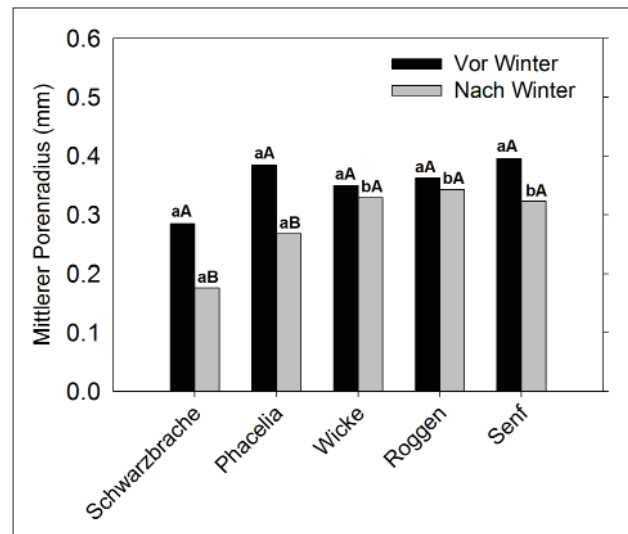


Abbildung 2: Änderung des flussgewichteten Porenradius unter verschiedenen Zwischenfrüchten im Vergleich zu Brache. (Versuchsstandort Hollabrunn 2004, 2005; Methodik: Ableitung aus Infiltrationsversuch; Kleinbuchstaben vergleichen die Varianten, Großbuchstaben den Beprobungszeitraum).

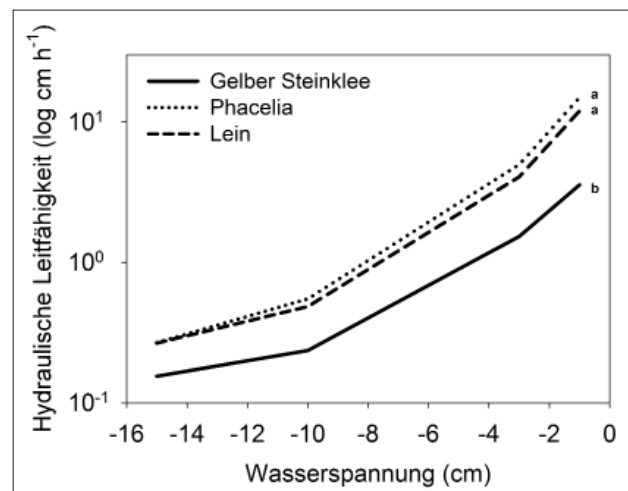


Abbildung 3: Vergleich der hydraulischen Leitfähigkeit von Zwischenfrüchten mit intensiver Pfahlwurzel (Gelber Steinklee) und Arten mit ausgeprägter Feindurchwurzelung im Oberboden (Phacelia, Lein; Versuchsstandort Groß Enzersdorf 2011; Methodik: Tensionsinfiltrometer).

bestehender Poren werden durch organische Ausscheidungen stabilisiert und in der Wurzelumgebung kann es durch kleinräumige Feuchte-Trocken-Zyklen zu erhöhter Porosität über Mikrorisse kommen (vgl. YOUNG 1998).

Abbildung 2 zeigt die Stabilisierung der Poren über Winter an einem schluff- und feinsandreichen Standort, der zu natürlicher Dichtlagerung neigt. Es zeigt sich, dass die Abnahme des mittleren Porenradius über Winter bei der Schwarzbrache höher war als unter Zwischenfrüchten. *Abbildung 3* zeigt, dass voluminöse Pflanzenwurzeln jedoch auch temporär zu einer Verringerung der Wasserleitfähigkeit führen können, wenn sie präferentiell in bestehende Poren wachsen. Nach Absterben der Pflanzen ist jedoch auch hier die Bildung von wurzelinduzierten Bioporen zu erwarten.

Tabelle 1: Maximaler axialer Wurzeldruck landwirtschaftlicher Nutzpflanzen (nach CLARK et al., 2003).

Art	Wurzeldruck (MPa)
Erbse	0,58
Weizen	0,49
Gerste	0,49
Mais	0,43
Lupine	0,41
Sonnenblume	0,24

Zwischenfruchtwurzeln und Bodenverdichtung

Schadverdichtungen beeinträchtigen die Regulations-, Lebensraum- und Produktionsfunktionen des Bodens. Die Möglichkeit Bodenverdichtungen durch Zwischenfruchtwurzeln zu durchbrechen wäre demnach eine wichtige Leistung in der natürlichen Bodenverbesserung.

Pflanzen versuchen verdichtete Horizonte mit ungünstigem Luft- und Wasserhaushalt zu vermeiden. Dennoch, manche Pflanzenarten sind besser in der Lage, dichtgelagerte Schichten zu durchdringen. Es liegen nur wenige vergleichende Messdaten über die maximale Kraft von Wurzeln, die auf ein mechanisches Hindernis treffen, vor. Als indirekter Hinweis wird daher der mittels Penetrometer gemessene Eindringwiderstand des Bodens herangezogen. Allgemein kann davon ausgegangen werden, dass Penetrometerwerte über 2,5 MPa das Eindringen von Pflanzenwurzeln in den Boden verhindern. *Tabelle 1* gibt einige Werte über den maximalen axialen Wurzeldruck verschiedener Arten wieder, wobei die Unterschiede in diesem Kennwert jedoch gering sind.

Bei Beobachtung der Anzahl von Wurzeln, die verdichtete Schichten durchdringen, zeigen sich dagegen deutliche Unterschiede zwischen zweikeimblättrigen Arten im Vergleich zu Gräsern. Zweikeimblättrige mit dickeren Wurzeln sind besser in der Lage, durch Verdichtungshorizonte durchzuwachsen. Ihr höherer Wurzelradius und das sekundäre Dickenwachstum ihrer Wurzeln führen zu einer besseren Bodenlockerung und erleichtern den wachsenden Wurzelspitzen das Vorkommen in dichten Boden. Der höhere Wurzelradius verringert darüber hinaus die Tendenz zum frühzeitigen Abknicken in die horizontale Wachstumsrichtung. Neben dem Einfluss des Wurzelradius, sind mehrjährige Pflanzen im Vergleich zu Einjährigen in ihrer Lockerungswirkung überlegen. Aus den vorliegenden Ergebnissen zur biologischen Lockerungswirkung von Wurzeln kann folgende Reihung getroffen werden: mehrjährigen Gehölzpflanzen > mehrjährige Futterleguminosen (Luzerne) > tiefwurzelnden Gräsern > einjährige Ackernutzpflanzen (dikotyle Pfahlwurzel > Leguminosen, Mais, Sonnenblume > Getreide). Wie lassen sich diese Erkenntnisse nun in der Nutzpflanzenproduktion einsetzen?

Zwischenfruchtwurzeln und Humushaushalt

Die Stabilisierung und standortspezifisch mögliche Erhöhung der Humusgehalte des Bodens ist eine der wichtigsten Anforderungen an eine nachhaltige Pflanzenproduktion. SPIEGEL und DERSCH (2009) zeigten, dass die Humus-

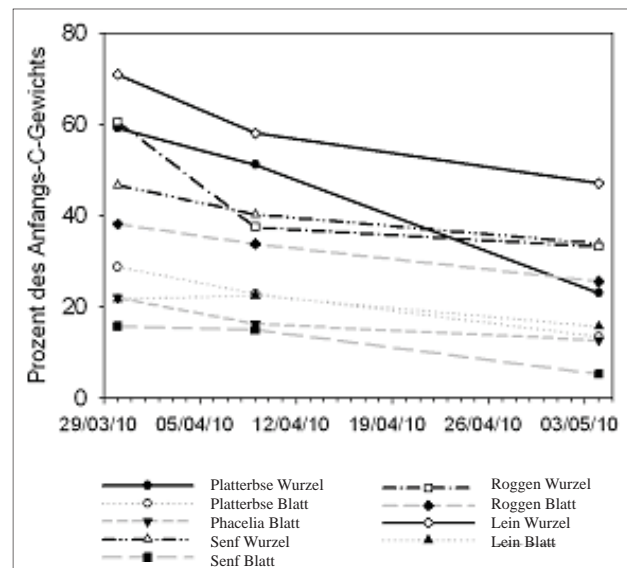


Abbildung 4: Mineralisierungsverlauf oberirdischer und Wurzelrückstände von Zwischenfrüchten (Versuchsstandort Groß Enzersdorf, 2009/10; Methode: Litterbags).

gehalte im österreichischen Ackerland stabilisiert wurden, wobei davon ausgegangen werden kann, dass die Begrünung durch ÖPUL dabei eine wichtige Rolle spielte. Besonders im Zusammenhang mit der Anreicherung stabiler Kohlenstoffverbindungen im Boden als Maßnahme zur CO₂-Reduktion kommt der Pflanzenwurzel eine besondere Rolle zu (RASSE et al. 2005). Schätzungen gehen von einer C-Speicherung von 300-800 kg C ha⁻¹ und Jahr durch Zwischenfrüchte aus. Tiefwurzelnden Pflanzen wird ein Potential von 600-800 kg C ha⁻¹ und Jahr zugerechnet (FREIBAUER et al. 2004).

Die Wurzel als Humusquelle der Zwischenfrucht ist umso bedeutender als sich oberirdische Pflanzenrückstände und Wurzeln in ihrer Abbaudynamik wesentlich unterscheiden. *Abbildung 4* zeigt die Abnahme des Kohlenstoffes von in den Boden eingebrachten Zwischenfruchtresten.

Die Wurzelrückstände wiesen eine höhere Stabilität auf als das oberirdische Material. Am 4. Mai 2010 waren im Mittel noch 34,3 % des eingesetzten Kohlenstoffes der Wurzelrückstände gegenüber 14,5 % des oberirdischen Materials vorhanden. Die unterschiedliche Qualität des Materials bei stärkerer Verholzung der Wurzelrückstände (besonders bei Lein) führte zu einer langsameren Mineralisierung des Wurzelmaterials, während die oberirdischen Rückstände als Gründünger rasch umgesetzt wurden. Die Zielsetzung Humus und Kohlenstoffspeicherung im Boden erfordert demnach einen besonderen Fokus auf die Wurzelmasse.

Schlussfolgerungen

Der Zwischenfruchtbau ist eine der effektivsten Maßnahmen zum Boden- und Grundwasserschutz in der Landwirtschaft und zur nachhaltigen Sicherung von Bodenfruchtbarkeit und Ertragsstabilität. Es steht derzeit ein breites Artenspektrum an Begrünungskulturen zur Verfügung. Die Optimierung des Zwischenfruchtbaus erfordert (i) eine standortspezifische Diagnose der vordringlichen Umweltproblematik (Nitrat, Erosion, Humus, Verdichtung) und (ii) die Wahl der geeig-

netsten Pflanzenart. Dabei ist für alle Umwelteffekte der Zwischenfrucht die Kenntnis des Wurzelsystems entscheidend, um eine bestmögliche Wirkung zu erzielen. Obwohl der Kenntnisstand über die Zwischenfrucht durch zahlreiche nationale und internationale Studien weit fortgeschritten ist, fehlt es an exakten, vergleichenden Beschreibungen der Wurzelsysteme von Zwischenfrüchten. Auch liegen nur wenige quantitative Untersuchungen über die funktionelle Rolle der Wurzel in Wechselwirkung mit Bodeneigenschaften als Grundlage des Managements von wurzelinduzierter Bodenlockerung und Humusverbesserung vor. Das Postulat der Praxis ist es, Begrünungsmischungen anzubieten, die im Wurzelraum eine Kombination von Leistungen über einen Stockwerkbau der Wurzelsysteme bieten. Die Forschung ist daher gefordert, sich verstärkt dem arbeitsaufwendigen und komplexen Bereich der „verdeckte Hälfte“ der Pflanze zuzuwenden.

Literatur

- BÖHM, K. und J. HÖSCH, 2001: Der Zwischenfruchtanbau als Instrument der Stoffkonservierung. 9. Gumpensteiner Lysimetertagung, 51-56.
- CLARK, L.J., W.R. WHALLEY and B.P. BARRACLOUGH, 2003: How do roots penetrate strong soil. *Plant Soil* 255, 93-104.
- DE WILLIGEN, P., N.E. NIELSEN, N. CLAASSEN and A.M. CASTRIGNANO, 2000: Modelling water nutrient uptake. In: A.L. Smit, A.G. Bengough, C. Engels, M. van Noordwijk, S. Pellerin, S.C. van de Geijn (Hrsg.) *Root Methods – A Handbook*, Springer, Berlin, 511-543.
- FITTER, A. 2002: Characteristics and functions of plant roots. In: Y. Waisel, A. Eshel, T. Beeckman, U. Kafkafi (Hrsg.) *Plant Roots: The Hidden Half*. Marcel Dekker, Madison, NY, 21-50.
- FREIBAUER, A., M.D.A. ROUNSEVELL, P. SMITH and H. VERHAGEN, 2004: Carbon sequestration in the agricultural soils of Europe. *Geoderma* 122, 1-23.
- GRÜNER BERICHT, 2011: www.gruenerbericht.at
- PASSIOURA, J.B., 1980: The transport of water from soil to shoot in wheat seedlings. *J. Exp. Bot.* 31, 333-345.
- PIERRET, A., CH.J. MORAN and C. DOUSSAN, 2005: Conventional detection methodology is limiting our ability to understand the roles and functions of fine roots. *New Phytol.* 166, 967-980.
- RASSE, D.P., C. RUMPEL and M.F. DIGNAC, 2005: Is soil carbon mostly root carbon? Mechanisms for a specific stabilization. *Plant Soil* 269, 341-356.
- SIX, J., H. BOSSUYT, S. DeGRYZE and K. DENEFF, 2004: A history of research on the link between (micro)aggregates, soil biota, and soil organic matter dynamics. *Soil Till. Res.* 79, 7-31.
- SPIEGEL, H. und G. DERSCH, 2009: Die Humusversorgung selbst bilanzieren. *Bauernzeitung* 52, 24.
- SPIESS, E., V. PRASUHN und W. STAUFFER, 2011: Einfluss der Winterbegrünung auf Wasserhaushalt und Nitratauswaschung. 14. Gumpensteiner Lysimetertagung, 149-154.
- YOUNG, I.M., 1998: Biophysical interactions at the root-soil interface: a review. *J. Agr. Sci. Cambridge*, 130, 1-7.
- ZOBEL, R.W., 2005: Tertiary root systems. In: Zobel, R.W., Wright, S.F. (Hrsg.) *Roots and soil management. Interactions between roots and the soil*. *Agronomy Monograph No. 48*, 35-56.
- ZUAZO, V.H.D. and C.R.R. PLEGUEZUELO, 2008: Soil-erosion and runoff prevention by plant covers. A review, *Agron. Sustain. Dev.* 28, 65-86.