

Wechselwirkung zwischen mechanischer Auflast und mikrobiologischer Aktivität in Böden

R. Horn, W. Markgraf, T. Baumgartl und W. Bartsch

Stress dependent effects on microbiological activity in soils

Einleitung

Böden werden intensiv vom Menschen genutzt, sei es als Lebensraum oder als landwirtschaftlich bearbeitete Flächen zur Sicherstellung der Ernährung. Durch den Einsatz schwerer landwirtschaftlicher Fahrzeuge wird der Boden mechanisch belastet und je nach Eigenstabilität auch irreversibel degradiert (PETH und HORN, 2006). Denn mit jeder Überschreitung der mechanischen Belastbarkeit kommt es nicht nur zu einer entsprechenden Verfeinerung und Abnahme der Porengrößen und des Gesamtvolumens,

sondern hydraulische wie auch pneumatische Bodenfunktionen: Leitfähigkeit und Diffusion werden herabgesetzt, sobald die Vorbelastung des Bodens überschritten ist. Darüber hinaus trägt die räumliche Neuausrichtung von Poren zu einer weiteren Modifikation bei.

Je weniger intensiv Böden bearbeitet werden, je höher der Gehalt an organischer Substanz und je besser aggregiert sie sind, umso weniger deutlich treten derartige Änderungen bzw. erst bei höheren Auflasten dann ebenfalls auf (WIERMANN, 1999). Konservierend bewirtschaftete Böden sind daher immer strukturstabiler als konventionell bewirtschaft-

Summary

The stress dependent alteration of soil strength under mostly static loading conditions and their effect on physical properties like changes in hydraulic conductivity are well defined. However, coupled and in addition short term processes on soil deformation and changes in the microbial activity and gas diffusion are mostly unknown. Thus, it was the aim of this paper to develop an adequate method which enables us to detect stress dependent changes in microbial activity. The corresponding stress strain measurements with simultaneous determination of the CO₂-concentrations revealed increased and decreasing values with stress depending on the applied stress and the soil management practice. These differences ranged between 29–65 mg CO₂/m²/h.

Key words: Microbiological activity, mechanical stress, CO₂-emission of soils, pore continuity, tortuosity.

Zusammenfassung

In der Literatur werden unterschiedliche Methoden zur Bestimmung des Gasflusses in Böden sowie Studien zur mechanischen Belastung und deren Auswirkungen auf physikalische Kenngrößen (LARINK et al., 2001, CZYZ, 2004, HORN et al., 2006, KRÜMMELBEIN et al., 2008) vorgestellt. Dabei wurden allerdings vorrangig die Auswirkungen von statisch aufgebrachten mechanischen Belastungen analysiert. Hingegen sind gekoppelte und dabei gleichzeitig auch kurzzeitig wirkende Prozesse von mechanischer Belastung auf die Setzung und der Auswirkung auf die Respirationaleistung von Mikroorganismen und Gasdiffusion weitestgehend unerforscht.

Ziel der Arbeit war es daher, eine Methode zu entwickeln, mit der diese Verknüpfung erreicht werden kann. Die mechanischen Belastungsversuche mit gleichzeitiger Messung der CO₂-Gehalte an zuvor unterschiedlich bewirtschafteten Bodenproben ergaben, dass es während der Belastung zu Veränderungen der CO₂-Gehalte in der Bodenluft kommt. Dabei kann es je nach Bearbeitungsweise sowohl zu sinkenden, stagnierenden als auch zu steigenden Werten kommen. Diese Schwankungen bewegen sich im Bereich von 29 bis 65 mg CO₂/m²/h.

Schlagworte: Mikrobielle Aktivität, mechanische Belastung, Porenkontinuität, -tortuosität, CO₂-Emission von Böden.

tete Flächen (EHLERS und CLAUPEIN, 1994, WERNER und WERNER, 2000).

Darüber hinaus sind mit den auch tiefer in den Boden reichenden Veränderungen des Porenraumes, des Gefüges und damit der Stabilität über eine Änderung im Wassergehalt sowie des Wassersättigungsgrades des Bodens, des pH-Wertes und des Redoxpotentials durch bodenbearbeitende Maßnahmen auch negative Folgen für die mikrobielle Tätigkeit und die Bodenfruchtbarkeit zu erwarten. BAUMGARTL et al (2001) beschreiben eine neue Apparatur, mit der Gasflüsse in Bodenproben unter mechanischen Belastungen quantifiziert werden können. JASINSKA et al. (2006) konnten zeigen, dass bei Überschreitung der mechanischen Vorbelastung (= Eigenfestigkeit) die CO_2 -Emission abnimmt; eine Analyse von einer Vielzahl von Bodenproben zur statistischen Absicherung steht jedoch noch aus. Hierbei müssen auch die Interaktionen zwischen Wassergehaltsänderung und CO_2 -Freisetzung, Druck- und temperaturabhängiger CO_2 -Emission und physicochemische Interaktionen in durch mechanische Belastungen induzierten Porenraumänderungen mit berücksichtigt werden.

Im Rahmen dieser Arbeit soll eine erste genauere Analyse der auflastabhängigen Änderungen der Gasfreisetzung bzw. der -konsumption erfolgen, um auch den Aspekt der Änderung von Aerobie zu anaeroben Umgebungsbedingungen als Grundlage auch für spätere Diskussionen von Klimafolgeneffekten in zukünftigen Forschungsarbeiten mit einbeziehen zu können.

1 Material und Methoden

1.1 Probenmaterial

Ungestörte Bodenproben wurden aus dem Ap Horizont einer Tschernosem Parabraunerde aus Löß entnommen (Niedersachsen, Versuchsfeld des Institutes für Zuckerrübenforschung (IfZ), Harste, eine genaue Beschreibung der Lokalität sowie der klimatischen Bedingungen sind bei FAZEKAS, 2005, zusammengestellt). Die Versuchsfelder wurden seit 1992 einerseits konventionell mit jährlich wendender Bearbeitung, bzw. konservierend ohne wendende Pflugarbeit bewirtschaftet. Die Pflugtiefe des konventionell bearbeiteten Feldes liegt bei 30 cm. Die durch einen Grubber erzeugte Arbeitstiefe des konservierend bearbeiteten Versuchsfeldes liegt bei 8–10 cm. Die Proben aus dem konventionell bearbeiteten Boden werden im Folgenden als „Pflugsaat-Proben“ (P) bezeichnet, die Proben aus dem

konservierend bearbeiteten Boden werden „Mulchsaat-Proben“ (M) genannt. Einige Standorte wurden erstmals und einmalig im Jahre 2001 mit dem Holmer Terra Dos, einem sechsreihigen im leeren Zustand bereits 35 Mg schweren Köpffrodebunker für Zuckerrüben befahren (b). Die Proben der nicht überrollten Flächen werden im Folgenden als „unbefahren“ (ub) bezeichnet.

1.2 Laborgeräte

Zur Messung der Kohlendioxidwerte wurde ein Infrarot-Gasanalyser verwendet. Die mechanische Belastung der Bodenproben erfolgte mittels eines Lastrahmens (INSTRON 5569), in den die Bodenproben eingebaut wurden. Hierzu wurden sie in einen komprimierbaren Wellenbalg GAFLOCOD (GAs-FLOW COmpression Device) (BAUMGARTL et al., 2001) überführt, der mit dem Gasanalysegerät verbunden war (Abbildung 1 und 2).

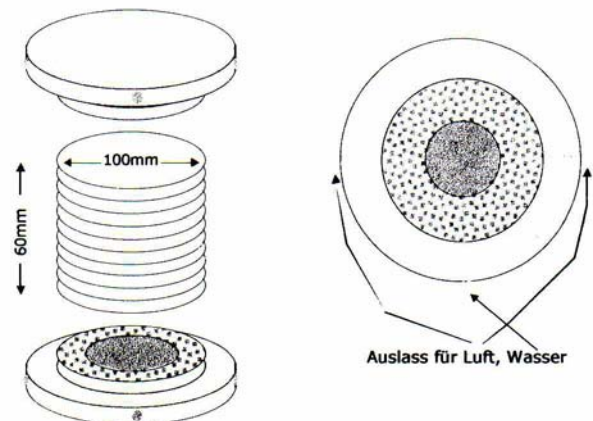


Abbildung 1: Systemaufbau des GAFLOCOD (Gas-FLOW COmpression Device) (nach BAUMGARTL, 2001)

Figure 1: Schematic design of the GAFLOCOD (Gas-FLOW COmpression Device) (according to BAUMGARTL, 2001)

1.3 Versuchsaufbau

Vor Beginn der Versuche wurden alle Bodenproben auf ein konstantes Matrixpotential von -300 hPa entwässert. Nach dem Einbau der Proben in den GAFLOCOD wurden sie anschließend über 12 Stunden mit Außenluft durchströmt, um ein CO_2 -Gleichgewicht in der Bodenprobe einzustellen. Daraufhin wurden die Proben in vier Schritten um insgesamt 4 mm komprimiert. Nach jedem erreichten Kompressionschritt wurde diese Kompression für zwei Stunden beibehalten.

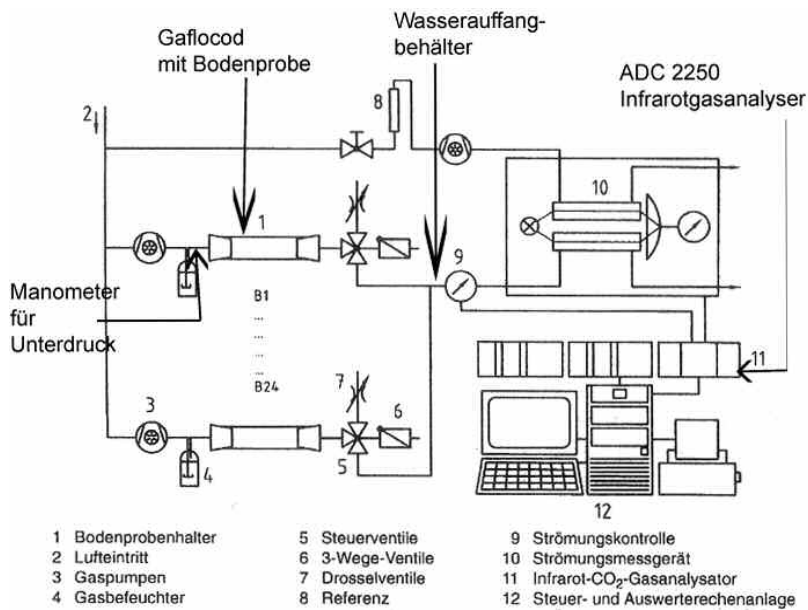


Abbildung 2: Systemaufbau der Infrarot-Gasanalyser-Messanlage; verändert nach Handbuch der Bodenuntersuchungen 4.1.2.1a, S. 9 (2001)

Figure 2: Infrared-gasanalyser-measurementsystem

ten, um eine Gleichgewichtseinstellung zu erreichen, bevor die nächste Setzungsstufe um einen weiteren Millimeter erfolgte. Im Anschluss an die letzte Setzung auf 4 mm erfolgte eine vollständige Entlastungsphase der Probe über eine Stunde.

2 Ergebnisse

2.1 Auflastabhängige Änderung der Porenziffer

Vor Beginn des Belastungsversuches variierten die Werte der Porenziffern ϵ zwischen 0,41 und 0,48 (Tabelle 1), wobei die Probenvarianten Pub und Mub die relativ höchsten Porenzifferwerte aufwiesen.

Tabelle 1: Auflastabhängige Änderungen der Lagerungsdichte und der Porenziffer

Table 1: Bulk density and void ratio values due to stress application

	Pub	Pb	Mub	Mb
d_B [g/cm ³] vor der Bel. Porenziffer	1,79 0,48	1,89 0,41	1,82 0,46	1,85 0,43
d_B [g/cm ³] bei 1 mm Porenziffer	1,82 0,46	1,92 0,38	1,85 0,43	1,88 0,41
d_B [g/cm ³] bei 2 mm Porenziffer	1,85 0,43	1,95 0,36	1,88 0,41	1,92 0,38
d_B [g/cm ³] bei 3 mm Porenziffer	1,88 0,41	1,99 0,33	1,92 0,38	1,95 0,36
d_B [g/cm ³] bei 4 mm Porenziffer	1,92 0,38	2,02 0,31	1,95 0,36	1,98 0,34

Die mit dem Köpfrödebunker Terra Dos erst- und einmalig befahrenen Flächen wurden sehr deutlich zusätzlich verdichtet, wie anhand der noch wesentlich niedrigeren Werte nachgewiesen werden kann. Ebenso wie bei den unbefahrenen Bodenproben, tritt der gepflügte Boden durch eine signifikant niedrigere Porenziffer hervor. Es fällt auf, dass die Differenz der Porenziffer zwischen der befahrenen und unbefahrenen Probenvariante ebenfalls bei dem gepflügten Boden größer ist als bei dem nicht gepflügten Boden (vgl. Tabelle 1).

Durch die erzwungene Setzung um insgesamt 4 mm nehmen die Werte der Porenziffer nahezu proportional zu den Ausgangswerten vor dem Belastungsversuch ab, da sich versuchsbedingt das Volumen des Bodens im GAFLOCOD bei allen Proben setzungsgesteuert gleichmäßig verändert.

Adäquat zu den Porenziffern verhalten sich die Werte der Lagerungsdichte d_B [g/cm³]. Die Bodenproben aus dem Ah-Horizont der Tschernosem-Parabraunerde aus Löss weisen bereits vor der mechanischen Belastung Werte zwischen d_B 1,79 und 1,89 [g/cm³] auf, die als äußerst hoch einzustufen sind (Tabelle 1).

Um weitere Setzungen zu erreichen, müssen die zusätzlichen Auflasten teilweise bis auf über 200 kPa steigen. Die in Tabelle 2 aufgeführten mittleren maximalen Auflasten zeigen deutlich, dass für die Komprimierung um 4 mm der zuvor am stärksten beanspruchten Bodenprobe auch die höchste Auflast erforderlich ist. Die mittlere maximale Auflast der Pb-Proben ist dabei signifikant höher als die nicht mit dem Köpfrödebunker befahrenen Bodenproben.

Tabelle 2: Mechanische Vorbelastung (kPa) der Bodenproben (nach Vorentwässerung auf -300 hPa) sowie maximale Auflast [kPa], die zur Kompression um weitere 4 mm erforderlich ist. (SD) = Standardabweichung

Table 2: Precompression stress (kPa) of the soil samples (predrying at -300 hPa) and maximum load [kPa] to reach a settlement of additional 4 mm; SD: standard deviation

	Pub	Pb	Mub	Mb
Vorbelastung [kPa]	77,5	173,3	79,6	125,8
SD	13,5	59,6	18,5	66,3
Auflast max. [kPa]	162,3	252,8	174,2	209,1
SD	25,9	39,6	43,9	38,9

Einen vergleichbaren Verlauf zeigen auch die Proben aus der konservierend bewirtschafteten Mulchsaat. Allerdings ergeben sich zwischen den Varianten deutliche Unterschiede hinsichtlich der für die Einstellung einer Setzung um 4 mm erforderlichen Auflast. So werden für die befahrene Variante der Pflugsaat deutlich höhere Werte ermittelt als bei der Mulchsaat, während die benötigte Auflast des unbefahrenen Bodens bei den Proben der Mulchsaat etwas höher ist. Dabei zeigen die Bodenproben Pub und Mub die geringste mechanische Vorbelastung, während die belasteten Pb- und Mb-Proben einen deutlich höheren Vorbelastungswert aufweisen als Folge der vorherigen Belastung mit dem Rübenroder.

2.2 Änderung der CO₂-Emission mit der Auflast

Die Bedeutung der auflastabhängigen Porenraumänderung für die mikrobielle Aktivität in Böden lässt sich anhand der CO₂-Emissionen dokumentieren.

In Abbildung 3 sind alle CO₂-Veränderungen während der Belastungsphasen für die jeweiligen Probenvarianten zusammengefasst.

Bei den Bodenproben aus der unbefahrenen Pflugsaatvariante (Pub) erkennt man bei Nichtberücksichtigung der durch die zwischenzeitliche Erhaltung des Setzungszustandes einsetzenden CO₂-Anstiege eine relativ deutliche Abnahme der CO₂-Emissionen mit steigender Setzung um ca. 10 ppm CO₂ auf 55 ppm. Dahingegen findet man bei den Pb-Proben eine klare Tendenz zum Anstieg des CO₂-Ausstoßes mit steigender Auflast um ca. 15 ppm auf 80 ppm bei sinkender Porenziffer.

Die unbelasteten Mulchsaatproben Mub zeigen nahezu konstante Werte der CO₂-Emissionen auf, die zwischen 65–70 ppm liegen und nur bei der letzten Belastungsstufe

kommt es zu einer geringfügigen Abnahme der Emissionen. Durch die Belastung mit dem Rübenroder wird die CO₂-Emission in der Mulchsaatprobe Mb bereits bei nunmehr geringen weiteren Setzungsbeträgen verringert (um ca. 10 ppm bis zu 3 mm) bevor sie bei der stärksten Setzung um insgesamt 4 mm wieder ansteigt.

Diese Verläufe lassen sich exemplarisch als Trends der CO₂-Emissionen jeweils für die Phase der Setzung und während der 2stündigen Erhaltungsphase der jeweiligen Setzung in Abbildung 4 darstellen, wodurch auch die deutliche Dynamik dokumentiert wird, die bei der Interpretation der Ergebnisse beachtet werden muss.

Mit einsetzender Kompression (Höhenabnahme) sinkt prinzipiell bei geringer Setzung um 1 mm die CO₂-Emission etwas ab, zeigt aber durchaus auch zwischenzeitliche Zunahmen in der Emission, während bei den folgenden und stärkeren Setzungen eine deutliche Zunahme der CO₂-Emission auftreten kann. Während der jeweils 2 h Erhaltungsphase zeigt sich generell ein anderer Verlauf. Zu Beginn nimmt die CO₂-Emission zu, um dann wieder abzusinken. Am Ende der Erhaltungsphase werden geringere CO₂-Emissionsraten gemessen als zu Beginn der Erhaltungsphase.

An den einzelnen Phasen der Setzung bzw. der Erhaltung der Setzung ist zu erkennen, dass die ausschlaggebenden Veränderungen der Kohlendioxidemission während der anfänglichen Setzungsphase stattfinden und zwar bei allen Setzungsstufen. Anschließend erfolgt in der Erhaltungsphase der erreichten Setzung ein Alternieren der CO₂-Emission. Die Einpendelung der CO₂-Werte liegt maximal bei 10 ppm.

3 Diskussion

Jede mechanische Belastung eines Bodens führt in dem Erstverdichtungsbereich zu einer weiteren plastischen Verformung und zu einer Änderung der hydraulischen aber auch der pneumatischen Diffusionsvorgänge und hat auch Folgen für die physico-chemischen Prozesse in Böden. Mit steigender Auflast ergeben sich somit auch recht hohe Werte der Lagerungsdichte bzw. niedrige Werte der Porenziffer, wobei zwischen den beiden Bewirtschaftungsvarianten deutliche Unterschiede in dem Reaktionsmuster und auch der Ausgangssituation auftreten können.

Die hohen Werte der Lagerungsdichte vor den Belastungsversuchen weisen aufgrund der früheren und auch aktuellen Bewirtschaftung der Flächen vor Ort auf eine bereits vor Versuchsbeginn hohe Verdichtung des Bodens zum

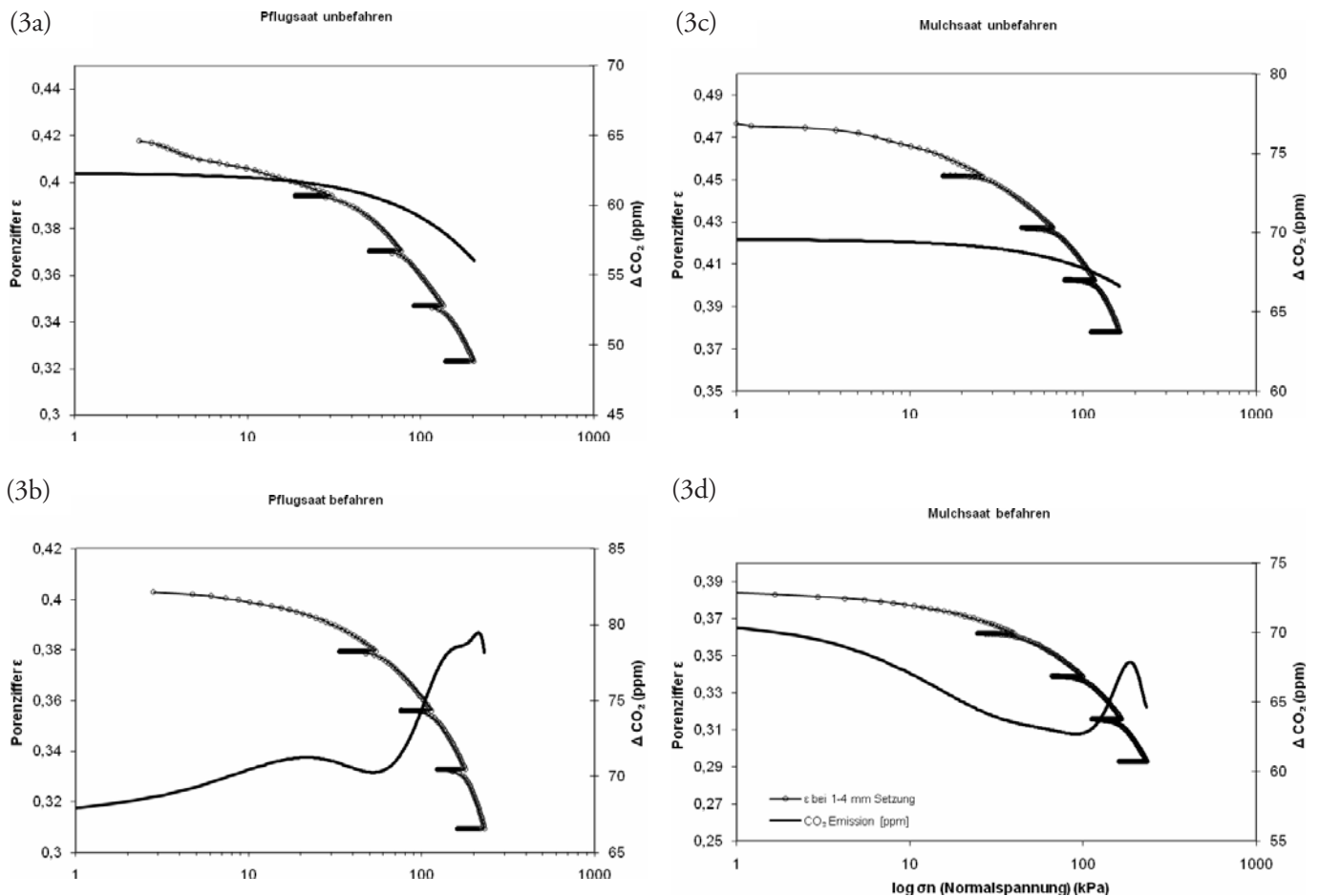


Abbildung 3 a–d: CO₂-Emission und Porenziffer während der mechanischen Belastung
 Figure 3 a–d: CO₂-emission and void ratio due to mechanical stress application

Zeitpunkt der Probenahme hin. Dies wird auch durch die Profilbeschreibungen von FAZEKAS (2005) unterstrichen, die ausgeprägte Plattenstrukturen (als Ergebnis der früheren Bewirtschaftung und als Zeichen, dass Böden ein „Gedächtnis“ haben) beschrieben hat. Da in den vorgestellten Ergebnissen nur die A-Horizonte untersucht wurden, sind sicherlich zusätzlich auch noch Bewirtschaftungsmaßnahmen mit einzubeziehen, die die extrem hohen Dichtewerte erklären. Im Falle der Pflugsaatvariante werden die Parzellen jährlich umgebrochen, aber anschließend im Jahresverlauf auch wiederholt belastet und damit bei der geringeren Festigkeit durch die Auflasten deutlich überverdichtet. Im Falle der Mulchsaatvariante führen wiederholte Befahrungen im Jahresverlauf immer dann zu einer deutlichen Komprimierung, wenn die etwas höhere Eigenfestigkeit überschritten wird. Bei der gepflügten Variante sind zwar einige Grobporen vorhanden, die jedoch nicht ein kontinuierliches Porensystem bilden, während diese bei der Mulch-

saatvariante deutlicher als senkrecht kontinuierliches Porensystem ausgeprägt sind (BAUMGARTL UND HORN, 1999, TIGGES, 2000, FAZEKAS, 2005).

Der Vorgang der zusätzlichen Bodenverdichtung kann anhand des Datenvergleichs unbefahren/belastet mit dem Rübenroder nachvollzogen werden. Selbst wenn der gepflügte, aber unbefahrene Boden eine vergleichsweise geringere Lagerungsdichte aufweist als die übrigen Böden, so ruft die einmalige Überführung der Böden mit dem 35 Mg schweren Rübenroder eine insgesamt deutliche Steigerung der Lagerungsdichte bzw. Abnahme der Porenziffer hervor, wobei der Anstieg der dB Werte in den Mulchsaatvarianten nur gering ist. Dies stimmt mit den zahllosen Ergebnissen, die in diversen Lehrbüchern und Publikationen (z.B. HARTGE UND HORN, 1999, HORN et al., 2000, 2006) zusammengefasst sind, überein.

Durch die langfristig nichtwendende Bearbeitung wurde eine Stabilität geschaffen, die mit der Bildung von starren

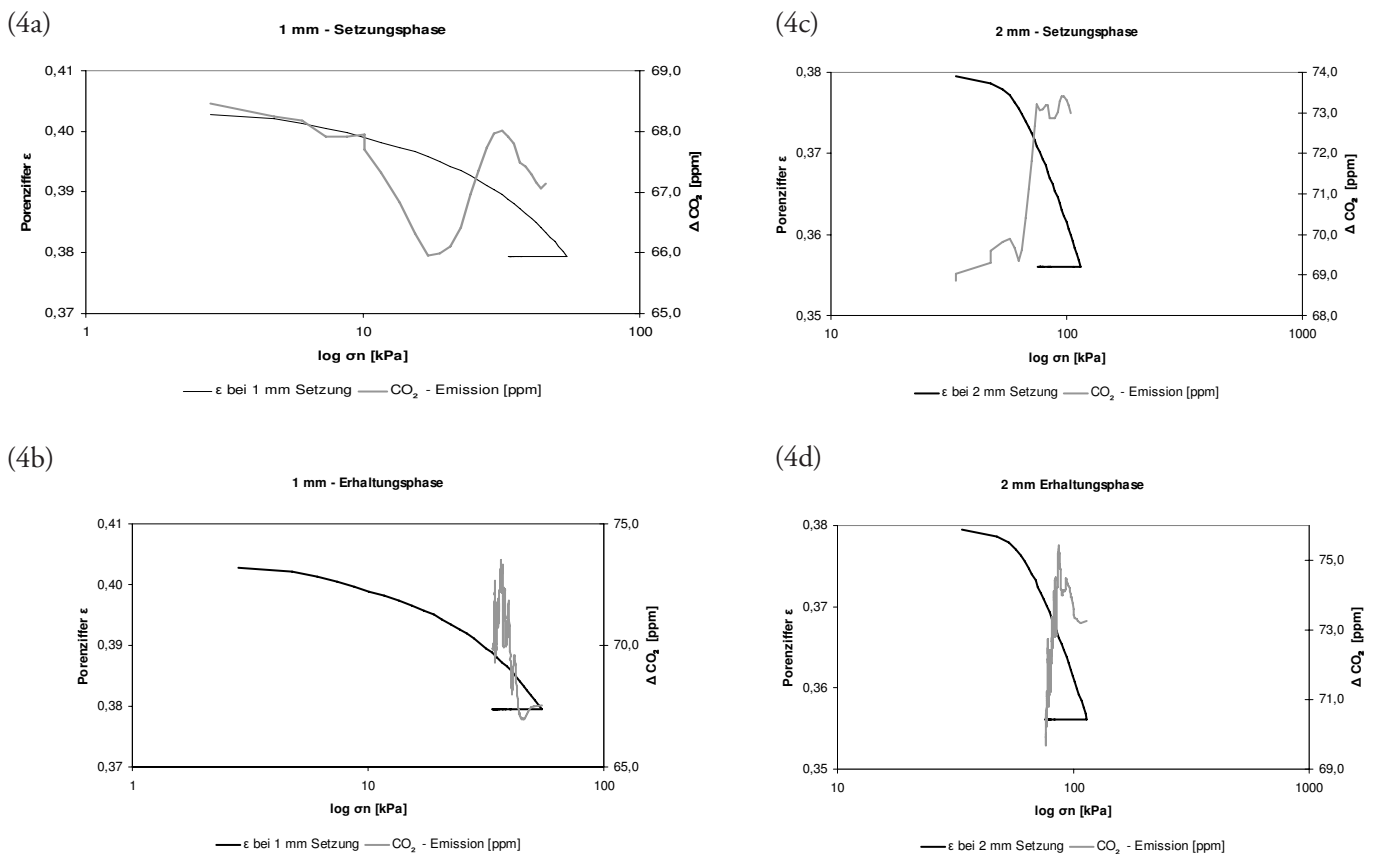


Abbildung 4 a–d: CO₂-Emission und Porenziffer während der mechanischen Belastung in Einzelschritten
 Figure 4 a–d: CO₂-emission and void ratio due to stepwise mechanical stress application

Aggregaten und einem damit stabilen Porensystem erklärt werden kann. Böden, die über mehrere Jahre nicht gepflügt wurden, weisen eine höhere Resistenz gegenüber Befahrungen mit landwirtschaftlichen Geräten auf, so dass die Kompression des Bodens geringer ist bzw. erst bei höherem Auflasten erfolgt, als bei gepflügten Böden.

Um dabei die genannten Porenraum- und Lagerungsveränderungen des Bodens hervorzurufen, wurden die in Tabelle 2 genannten maximalen Auflasten benötigt. Für den am stärksten bearbeiteten und belasteten Boden wurde für die gleiche erzwungene Setzung auch die höchste Auflast benötigt, da natürlich berücksichtigt werden muss, dass die Vorbelastung auch bereits vor Versuchsbeginn sehr hoch und gleichzeitig die Porenziffer sehr gering war. Durch die Belastung mit dem Rübenroder wurden die von vorneherein sehr hohen Werten der Korn zu Kornkontaktpunkte gleichmäßig um weitere errechnete 0,2 Korn-zu-Korn-Kontakte vergrößert, wobei vereinfachend vorausgesetzt wird, dass es sich um gleich große Kugeln handelt (die Theorie hierzu ist bei v. Engelhardt, zit. in HARTGE and

HORN, 1999, zusammengefasst). Bei beiden belasteten Varianten (Pb, Mb) werden sehr hohe Drücke erforderlich (252,8 kPa/209,1 kPa), was wiederum bestätigt, dass die vorherige maschineninduzierte Kompression schon sehr hoch war und daher erst durch darüberhinausgehende Drücke überwunden wurde, wobei der Boden wieder in den Erstverdichtungszustand überführt wird. Außerdem zeigt sich, dass aufgrund der größeren Strukturstabilität die Mulchsaatvariante sehr viel stabiler und damit auch die Differenz zwischen dem unbefahrenen und dem befahrenen Boden wesentlich geringer ist als bei den Pflugsaatproben. Da es hier zu einer wesentlich geringeren vorherigen Verdichtung durch landwirtschaftliche Geräte gekommen ist, wird damit auch die allgemeine anerkannte Aussage bestätigt, dass konservierend bewirtschaftete Böden stabiler sind als konventionell bearbeitete. MULUMBA und LAL (2008) fanden in ihren Untersuchungen über den Einfluss der Zugabe verschiedener Mengen an Mulch auf bodenphysikalische Eigenschaften eines Stagnic Luvisols in Ohio (USA) unsere Ergebnisse bestätigende Zusammenhänge.

Die Vorentwässerung der Bodenproben auf -300 hPa führt zu einer Belüftung der engen und weiten Grobporen. Damit steht in den Bodenproben eine durch die applizierte Belastung auspressbare Gas (Luft)menge zur Verfügung, die die Reaktionsmuster mit beeinflussen. Es muss darauf hingewiesen werden, dass jede Belastung und damit einhergehende Einengung des Porenquerschnittes nicht nur gleichbedeutend ist mit einer Verlängerung der Diffusions- bzw. der Fließstrecke, sondern es aufgrund der Verfeinerung der Porenquerschnitte zu einer größeren Wassersättigung und somit gegebenenfalls einer Änderung der Zusammensetzung der Mikroorganismen (aerob/fakultativ anaerob) kommen kann. Dabei kann auch eine kurzfristige Komprimierung der Bodenluft in den verbleibenden luftgefüllten Poren sowie eine zusätzliche CO_2 -Lösung im Bodenwasser hervorgerufen werden.

Die Ergebnisse der Veränderung der hier vorgestellten CO_2 -Freisetzungsraten hängen aufgrund der im Boden ablaufenden Prozesse während bzw. durch die Verdichtung von folgenden Einflussfaktoren ab:

1. die Mittel- und Feinporen sind wassergesättigt,
2. das Wasser muss im Zusammenhang mit der Kompression je nach Eigenstabilität des Bodens entsprechend umverteilt und/oder in der Folge ausgepresst werden,
3. durch die Verfeinerung der ursprünglich luftgefüllten Grobporen kommt es durch die Umverteilung des Wassers zu einem stärkeren Unterdruck und damit auch zu einer Gasfreisetzung,
4. wenn es zu einer stärkeren Wassersättigung kommt, kann Gas in dem verminderten luftführenden Porenvolumen unter kurzfristigen Überdruck geraten und entweicht durch die feineren und wassergefüllten Poren nur langsamer.
5. Außerdem fördert ein anaerobes Milieu in den wassergefüllten Poren die Lebensbedingungen anaerober Mikroorganismen, wobei wir davon ausgehen, dass diese bei einem Durchmesser von < 10 μm in den ursprünglichen oder aber durch die Belastung neugeformten Mittelporen des Bodens überleben.

Unsere Belastungsversuche zeigen die durch die beschriebenen bodeninternen Prozesse hervorgerufenen Emissionsmuster.

So sinkt besonders bei den unbelasteten Proben der Pflugsaatvariante bei geringer zusätzlicher Setzung die Emission ab, was unter der Annahme der konstanten Wassergehalte in den Bodenproben mit einer durch die verstärkte Wassersättigung erzwungenen Energienutzung aus dem bodenbürtigen

CO_2 durch voraussichtlich fakultativ anaerobe Bakterien erklärt werden kann. Dieser Trend zeigt sich stärker in den Proben, in denen die Porenkontinuität durch die Bearbeitung reduziert worden ist und bestätigt damit auch die von FAZEKAS (2005) ermittelten Anisotropiekoeffizienten. Die bei den ebenfalls unbelasteten Mulchsaatproben während der Verdichtung um 4 mm ermittelten konstanten Werte sind mit der größeren Strukturstabilität zu erklären. Wenn hingegen die Setzungen zunehmen, damit die Porenquerschnitte geringer und die Fließstrecken tortuoser werden, kann die komprimierte Gasmenge nicht so schnell entweichen. Dies wird besonders anhand der durch Pflugarbeit und nachfolgende Belastung mit dem Köpfrödebunker deformierten Proben mit Plattenstruktur nachvollziehbar, bei denen es durch die weitere Komprimierung um 4 mm insgesamt zu einer deutlichen Zunahme kommt, selbst wenn es zwischenzeitlich während der Erhaltungsphasen durchaus zu Zu- und nachfolgend aber wieder stärkeren und voraussichtlich auch auf mikrobielle Aktivität zurückzuführende Verringerung der CO_2 -Emission kommt. Bei den belasteten Mulchsaatproben Mb kann die Abnahme der CO_2 -Emission mit einem durch die veränderte Belüftung hervorgerufenen leicht erhöhten Energiegewinn der Mikroorganismen aus dem CO_2 erklärt werden, und erst die letztendliche Kompression auf 4 mm und der stärkeren Abnahme der leitenden und vor allem größeren Poren resultiert in einer „Fließstreckenproblematik“ verbunden mit einer CO_2 -Akkumulation.

Die erzielten eigenen Ergebnisse zeigen also keine einheitlichen Trends, sondern unterstreichen die Notwendigkeit der gezielteren Analyse unter besonderer Berücksichtigung der jeweiligen bodeninternen Prozesse. OORTS et al. (2007) weisen unter dem Aspekt der Langzeiteffekte nach, dass in Nordfrankreich unter Berücksichtigung von konventioneller Bewirtschaftungsweise und „zero tillage“ an 53 % der Messtage die CO_2 -Emission auf dem Versuchsfeld ohne Pflugbearbeitung signifikant erhöht ist, während es auf dem Vergleichsfeld mit konventionellen Bewirtschaftungsmethoden an nur 6 % der Messtage auftrat.

An insgesamt 331 Messtagen wurden somit auf dem „zero tillage-Feld“ 3160 ± 269 $\text{kg CO}_2\text{-C ha}^{-1}$ und auf dem konventionell bearbeiteten Versuchsfeld 4064 ± 138 $\text{kg CO}_2\text{-C ha}^{-1}$ ausgestoßen.

Vergleicht man die eigenen mit den von JASINSKA et al. (2006) beschriebenen Ergebnissen an einem Pseudogley-Kolluvisol und einer Pseudogley-Parabraunerde aus Löss, so findet man zum einen an strukturierten Gesamtproben aus Rothalmünster (Bayern) stets im Bereich der Vorbelastung signifikante Veränderungen der CO_2 -Werte, wobei die

CO₂-Schwankungen zwischen 3,3 bis 3,7 mg/h variierten. Dahingegen schwanken die insgesamt in den eigenen Versuchen gemessenen CO₂-Emissionen im Mittel zwischen 29 und 65 mg CO₂/m²/h.

Vergleicht man schließlich die eigenen Werte mit denen der Bodenrespiration an Waldstandorten bei SCHULZE (2000) oder SAMPSON et al. (2001), so sind die vorliegenden Kohlendioxidemissionen als sehr gering einzuschätzen.

Die vorgestellten Ergebnisse geben somit Anlass zu weiteren detaillierten Untersuchungsreihen, nicht nur um die einzelnen Teilprozesse vollständiger zu quantifizieren, sondern um auch die Konsequenzen von mechanischen Belastungen für die CO₂-Emissionen besser zu verstehen. Dabei wird es sicherlich notwendig sein, Messungen des Redoxpotentials und des pH-Wertes während der Versuche (von STEPNIIEWSKI et al., 1991, bereits erfolgreich für Aggregatmessungen angewandt) sowie der Matrixpotentiale vorzunehmen.

Ausblick

Da die mikrobielle Aktivität der Böden wesentlich zur Mineralisierung der organischen Substanz und damit zur Freisetzung für Nährstoffe beiträgt, ist eine genauere Kenntnis der Interaktionen zwischen mechanischer Belastung und der Folgen für die mikrobielle Aktivität notwendig.

Schlagworte wie verringerte Porenkontinuität oder zunehmende Tortuosität bedeuten nicht nur einen verzögerten Wasserfluss und Gasaustausch, sondern damit werden auch die Lebensbedingungen für die Mikroorganismen und deren Zusammensetzung beeinflusst.

Hinsichtlich des viel diskutierten Klimawandels sind neue Forschungsansätze, die auch die Landwirtschaft betreffen, zu entwickeln, um weitere schädliche Belastungen unseres Lebensraumes zu vermeiden. Auf diese Weise können hohe Kosten, die durch den Global Change entstehen, vermieden oder abgemildert werden. Außerdem stellt die Erhaltung der mikrobiologischen Aktivität von Böden einen wichtigen Beitrag zu Ertragsleistungen von Ackerstandorten dar.

Literaturverzeichnis

- BAUMGARTL, T., R. HORN (1999): Influence of mechanical and hydraulic stresses on Hydraulic properties of swelling soils. In: VAN GENUCHTEN, M., F. J. LEIJ, L. WU (Hrg.): Characterisation and measurement of the hydraulic properties of unsaturated porous media: 449–457; University of California, Riverside Publ.
- BAUMGARTL, T., A. FICHTNER, P. HALLETT (2001): Gasflussmessung unter Auflast mit GAFLOCOD. Mitt. Dtsch. Bdkdl. Ges. 96, 55–56.
- CZYZ, E. (2004): Effect of traffic on soil aeration, bulk density, and growth of spring barley. *Soil Tillage Res.* 79, 153–166.
- EHLERS, W., W. CLAUPEIN (1994): Approaches toward conservation tillage in Germany. In: Carter, M. R. (Herg.): Conservation tillage in temperate Agroecosystems. Lewis Publishers, Boca Raton, USA.
- ELDER, J. W., R. LAL (2008): Tillage effects on gaseous emissions from an intensively farmed organic soil in North Central Ohio. *Soil and Tillage Research*, 98, 45–55.
- FAZEKAS, O. (2005): Bedeutung von Bodenstruktur und Wasserspannung als stabilisierende Kenngrößen gegen intensive mechanische Belastungen in einer Parabraunerde aus Löss unter Pflug- und Mulchsaat. Schriftenreihe des Instituts für Pflanzenernährung und Bodenkunde, CAU Kiel, Heft Nr. 67.
- HANDBUCH DER BODENUNTERSUCHUNGEN (2001): Bodenbeschaffenheit – Bestimmung der mikrobiellen Bodenatmung, DIN 19737: 2001-04, Kap. 4.1.2.1a, S. 9, Beuth Verlag, Berlin.
- HARTGE, K.H. und R. HORN (1999): Einführung in die Bodenphysik. 3. Aufl. Schweizerbart Verlag.
- HORN, R., J.J.H. VAN DEN AKKER, J. ARVIDSSON (2000): Subsoil Compaction – Distribution, Processes and Consequences. *Advances in Geocology* 32.
- HORN, R., H. FLEIGE, S. PETH und X.H. PENG, eds. (2006): Soil Management for Sustainability. *Advances in Geocology* 38.
- JASINSKA, E., H. WETZEL, T. BAUMGARTL, R. HORN (2006): Heterogeneity of physico-chemical properties in structured soils and its consequences. *Pedosphere*, 16, 284–296.
- KRÜMMELBEIN, J., S. PETH and R. HORN (2008): Determination of precompression stress of a variously grazed steppe soil under static and cyclic loading. *Soil and Tillage Research*, 99, 139–148.
- LARINK, O., D. WERNER, M. LANGMAACK, S. SCHRADER (2001): Regeneration of compacted soil aggregates by earthworm activity. *Biology and Fertility of soils*. 33, 395–401.
- MULUMBA, L. N., R. LAL (2008): Mulching effects on selected soil physical properties. *Soil and Tillage Research*, 98, 106–111.

- OORTS, K., R. MERCKX, E. GRÉHAN, J. LABREUCHE, B. NICOLARDOT (2007): Determinants of annual fluxes of CO₂ and N₂O in long-term no-tillage and conventional tillage systems in northern France. *Soil and Tillage Research* 95, 133–148.
- SAMPSON, D. A., I. A. JANSSENS, R. CEULEMANS (2001): Simulated soil CO₂ efflux and net ecosystems exchange in a 70-year-old Belgian Scot pine stand using the process model SECRETS. *Annales of forest science*, 58, 31–46, EDP Science, Les Ulis Cedex, France.
- SCHULZE, E.-D. (2000): Carbon and nitrogen cycling in European forest ecosystems. *Ecological studies*, 142, Springer, Berlin.
- SCHLEGEL, H. G. (1992): *Allgemeine Mikrobiologie*, 980, Georg Thieme Verlag, Stuttgart.
- STEPNIEWSKI, W., J. ZAUSIG, S. NIGGEMANN, R. HORN (1991): A dynamic method to determine the O₂-partial pressure distribution within soil aggregates. *Z. Pflanzenernährung und Bodenkunde*, 154, 59–61.
- TEBRÜGGE, F., R.-A. DÜRING (1999): Reducing tillage intensity – a review of results from a long-term study in Germany. *Soil and Tillage Research*, 53, 15–28.
- TIGGES, U. (2000): Untersuchungen zum mehrdimensionalen Wassertransport unter besonderer Berücksichtigung der Anisotropie der hydraulischen Leitfähigkeit. *Schriftenreihe des Institutes für Pflanzenernährung und Bodenkunde, CAU Kiel, Heft Nr. 56.*
- WERNER, D. and B. WERNER (2000): Compaction and recovery of soil structure in a silty clay soil (Chernosem): physical, computer tomographic, and scanning electron microscopic investigations. *J. Plant Nutrition and Soil Science*, 164, 79–90.
- WIERMANN, C. (1998): Auswirkungen differenzierter Bodenbearbeitung auf die Bodenstabilität und das Regenerationsvermögen lößbürtiger Ackerstandorte. *Schriftenreihe des Instituts für Pflanzenernährung und Bodenkunde* 45.

Autorenanschrift

Prof. Dr. Rainer Horn, Dr. Wibke Markgraf, W. Bartsch,
Institut für Pflanzenernährung und Bodenkunde, CAU
Kiel, Olshausenstr. 40, 24118 Kiel, Deutschland

Dr. Thomas Baumgartl, University of Queensland, Centre
of Mined Land Rehabilitation (CMLR), St. Lucia 4072,
Australien

Corresponding author

Rainer Horn, rhorn@soils.uni-kiel.de

Eingelangt am 14. März 2009

Angenommen am 6. Mai 2009