

# „Nachhaltige Sicherung der Humusgehalte und Bodenfruchtbarkeit unter Beachtung von Klimawandel und EU-WRRL“

Workshop am 22./23. 03. 2016 in Nossen

Diskussion der Beiträge, Schlussfolgerungen und zukünftige Handlungsoptionen

## **Sektion I: Einfluss konservierender Bodenbearbeitung auf Humus- und Nährstoffumsatz: Ursachen für positive, negative oder ausgeglichene Bilanzen**

Sektionsleitung: Fabian Kirsten (Institut für Geographie, Universität, Leipzig)

- 1 Zwischenfruchtanbau als wichtige Voraussetzung für Strip-Till auf strukturschwachen Böden unter besonderer Berücksichtigung der Nährstoffverluste**
- 2 Ergebnisse aus dem Bodenbearbeitungsversuch in Puch**
- 3 Anbau und Ertrags-Ergebnisse zur nichtwendenden Bodenbearbeitung aus dem Bodenbearbeitungsversuch am Standort Gülzow**
- 4 C-Status und Dynamik nach 20-jährigem Pflugverzicht am Standort Lüttewitz**
- 5 Diskussion und Schlussfolgerungen Sektion I**

In ihrem Vortrag stellte *Nadine Tauchnitz* die Auswirkungen des Anbaus von Zwischenfrüchten als wichtiger Voraussetzung für Strip-Till auf strukturschwachen Böden im Hinblick auf  $\text{NO}_3$ -Konzentrationen in der Bodenlösung bzw. N-Auswaschungen vor. Die hierzu durchgeführten Untersuchungen an einer Lysimeteranlage (Falkenberg, UFZ) ergaben folgende Ergebnisse:

- Die höchste Sickerwassermenge und die höchste  $\text{NO}_3$ -Auswaschung traten unter Schwarzbrache auf.
- Im Vergleich dazu wies mit untersuchtes mehrjähriges Luzernegras von allen geprüften Varianten die niedrigsten  $\text{NO}_3$ -Konzentrationen und die geringsten Auswaschungen auf. Aufgrund des hohen Wasserverbrauchs der Luzerne bildete sich dort die geringste Sickerwassermenge bzw. setzte keinerlei Sickerwasserbildung über längere Zeit ein. Außerdem waren bei der unmittelbar nach Luzerne angebauten Hauptfrucht niedrigere Erträge zu verzeichnen. Ein Grund hierfür könnten die geringeren Bodenwasservorräte als Folge des vorangehenden wasserzehrenden Luzerneanbaus sein.
- Im Vergleich zu umgebrochenen Zwischenfrüchten trat bei abfrierenden Zwischenfrüchten eine leicht höhere Sickerwassermenge ein und es fand eine etwas höhere  $\text{NO}_3$ -Auswaschung statt.
- Bei allen Zwischenfruchtvarianten mit Leguminosen waren kurzzeitig hohe  $\text{NO}_3$ -Peaks im Sickerwasser nach dem Abfrieren bzw. nach dem Umbruch mit allerdings starker zeitlicher Verzögerung nachweisbar.

Fazit: Auf leichten und gleichzeitig niederschlagsarmen Standorten sind zur Bodenstrukturverbesserung und zur Sicherung einer entsprechenden Mulchauflage für die nachfolgende Strip-Till-Bearbeitung abfrierende Zwischenfrüchte zu bevorzugen. Sie schonen den Wasservorrat im Boden und bewahren gleichzeitig Nitrat-N vor der winterlichen Auswaschung. Beim Anbau von abfrierenden Zwischenfrüchten mit Leguminosenanteilen ist durch eine auf das Nötige reduzierte Bodenbearbeitung im Frühjahr einer umfassenden Mineralisierung und einer dadurch potenziell erhöhten Nitratauswaschung entgegenzuwirken. Dies gelingt am besten durch das Strip-Till-Verfahren z. B. zu Mais. Eine wichtige Maßnahme ist zudem die Berücksichtigung des Boden-NO<sub>3</sub>-Gehaltes im Frühjahr bei der Bemessung der N-Düngung zur nachfolgend angebauten Sommerkultur.

In den weiteren im Rahmen der Sektion I gehaltenen Vorträge mit Darstellung von Ergebnissen von Bodenbearbeitungsversuchen wurden je nach Standort (Boden, Klima, Bewirtschaftung, Fruchtfolge) unterschiedliche Ergebnisse im Hinblick auf die Wirkung der nichtwendenden Bodenbearbeitung und Direktsaat auf Humusdynamik und die Humusgehalte erzielt.

- So führte im Bodenbearbeitungsversuch in Puch (Vortrag von *Robert Brandhuber*) die langjährig nichtwendende Bodenbearbeitung mit Grubber und die Direktsaat zu keiner Zunahme des C<sub>org</sub>-Gehaltes im Boden in 0 - 50 cm Tiefe im Vergleich zur Pflugvariante. Die Direktsaat bewirkte eine Anreicherung von C<sub>org</sub> und Nährstoffen in der obersten Krume sowie eine Absenkung der pH-Werte ab 5 cm Tiefe.

Im zwanzigjährigen Bodenbearbeitungsversuch in Gülzow (Vortrag von *Ines Bull*) bewirkte die dauerhaft nichtwendende Bodenbearbeitung eine Nährstoffschichtung sowie eine Schichtung der Humusgehalte. So ist eine Zunahme des C<sub>org</sub>-Gehaltes in der oberen Krume zu verzeichnen und, bezogen auf die Bodentiefe 0 - 30 cm, deutet sich eine Zunahme des C<sub>org</sub>-Gehaltes als Folge pflugloser Bodenbearbeitung an.

Am Standort Lüttewitz (Sächsisches Lößhügelland, Vortrag von *Fabian Kirsten*) hat die langjährig nichtwendende Bodenbearbeitung und insbesondere die Direktsaat unter Berücksichtigung der unterschiedlichen Bodenlagerungsdichten eine signifikante Zunahme des C<sub>org</sub>-Gehaltes in der Bodenschicht von 0 - 60 cm im Vergleich zur Pflugvariante bewirkt.

Bezüglich der unterschiedlichen Wirkung der nichtwendenden Bodenbearbeitung auf den C<sub>org</sub>- bzw. den Humusgehalt von Ackerflächen in den vorgestellten Versuchen sind neben möglichen Fruchtfolgeeinflüssen (ggf. in Verbindung mit Zwischenfruchtanbau) auch die im jeweiligen Versuch erzielten Erträge auf den einzelnen Versuchsfeldern einzubeziehen. Es ist zu prüfen, welche Auswirkungen hierdurch auf die auf und im Boden verbleibenden Mengen an Ernte- und Wurzelrückständen und damit auf den C-Input des Bodens entstehen. Zusätzlich beeinflusst die Intensität der Bodenbearbeitung die Humusdynamik und damit den Humusgehalt der nichtwendend bestellten Ackerflächen. Ein Beleg hierfür ist die Direktsaatfläche am Standort Lüttewitz: Sie weist nach gut 24jähriger Direktsaat mit nur noch geringem mechanischen Eingriff in den Boden die höchsten Humusgehalte im Vergleich zu den gepflügten und zu den nichtwendend bestellten Teilschlägen auf (Vortrag von *Fabian Kirsten*). Bei der Direktsaat in Lüttewitz werden bei Winterweizen die gleichen Erträge erzielt wie bei der Pflugvariante, bei Zuckerrüben weist die Direktsaat in Lüttewitz um 10 – 15 % geringere Erträge auf. In Puch ist die Direktsaat mit geringeren Erträgen verbunden, was ein Grund für die nicht erhöhten C<sub>org</sub>-Gehalte sein kann.

Die im Rahmen des Humus-Workshops vorgestellten Versuchsergebnisse zeigen, dass nichtwendende Bodenbearbeitung und Direktsaat nicht automatisch zu höheren Humusgehalten führen. Vielmehr werden höhere Humusgehalte von einer Reihe von weiteren Einflussfaktoren bestimmt wie z. B.:

- der Intensität der Bodenbearbeitung

- der Ertragshöhe und der damit verbundenen Anlieferung an Ernte- und Wurzelresten
  - der Fruchtfolgegestaltung und dem Umfang des Zwischenfruchtanbaus
  - dem Belassen von Stroh auf dem Acker
  - den standortspezifischen Witterungsbedingungen
  - der beprobten Bodentiefe, usw.
- Der Verzicht auf Bodenbearbeitung bzw. eine sehr schonende, auf das Nötige beschränkte nichtwendende Bodenbearbeitung und die beständige und umfassende Zufuhr von organischer Substanz (Stroh, Pflanzenreste von Zwischenfrüchten, Zufuhr organischer Düngemittel usw.) schaffen die Voraussetzung für einen Anstieg der Gehalte an organischer Substanz auf den Ackerflächen, auch im Sinne einer klimaschonenden C-Sequestrierung (siehe Sektion III).  
Bei stetiger Fortführung der Maßnahmen ist davon auszugehen, dass sich auf nichtwendend bzw. in Direktsaat bestellten Ackerflächen ein neues Gleichgewicht zwischen Humusauf- und -abbau einstellt. Die Humusgehalte können sich erhöhen, bleiben dann aber weitgehend konstant. Eine intensivere Bearbeitung (z. B. auch eine verstärkte mechanische Unkrautbekämpfung, mehrfaches Grubbern, usw.) kann eine Mineralisation und in Folge davon eine Abnahme der Humusgehalte auf dauerhaft nichtwendend bestellten Ackerflächen bewirken. Dies gilt es hinsichtlich der damit verbundenen CO<sub>2</sub>-Freisetzung, aber auch hinsichtlich der N-Mineralisation und der Wirkung auf die Bodenstruktur zu beachten.
  - Die konservierende Bodenbearbeitung und die Direktsaat weisen im Hinblick auf bodenphysikalische Parameter (Bodenstruktur, Aggregatstabilität) deutliche Vorteile gegenüber der konventionellen Bodenbearbeitung auf. Herauszustellen ist die nachweislich in Verbindung mit pflugloser Bearbeitung/Direktsaat durch Ab- und Umbauprozesse von organischer Substanz im oberen Krumbereich verursachte günstigere Bodenstruktur bzw. die signifikant größere Aggregatstabilität (s. Vorträge von *Robert Brandhuber*, *Ines Bull* und *Fabian Kirsten*). Die Verschlammungsanfälligkeit von Ackerflächen nimmt in folgender Rangfolge ab: Pflug > Bearbeitung mit Grubber > Direktsaat.  
Gleichzeitig weisen nichtwendend bestellte Ackerflächen im Vergleich zu gepflügten Flächen nachweislich eine größere Zahl tiefgrabender Regenwürmer auf (insbesondere *Lumbricus terrestris*). Die hierdurch geschaffenen Makroporen erhöhen die Wasserinfiltration und vermindern so die Bodenerosion durch Wasser auf nichtwendend bearbeiteten Flächen. Ein vorsorgender Erosionsschutz vor Wind und Wasser durch eine hohe Aggregatstabilität, einen hohen Besatz an Regenwürmern und eine ständige Mulchbedeckung der Bodenoberfläche ist nur bei beständiger Zufuhr von organischer Substanz auf einer Ackerfläche sicherzustellen.
  - Der Anteil der Bodenbearbeitung an der saisonalen oder jährlichen Schwankung der C-Vorräte wird sowohl durch die Faktoren Klima/Witterung als auch durch Bodeneigenschaften mitbeeinflusst. So reichen die durchschnittlichen Jahresniederschläge von 560 mm im Bodenbearbeitungsversuch in Gülzow bis annähernd 900 mm Niederschlag im Dauerversuch in Puch. Hierdurch kann die Erfassung und Quantifizierung bewirtschaftungsbedingter Effekte auf den Humusgehalt erschwert werden.
  - Unerlässlich im Hinblick auf die Untersuchung der C-Sequestrierung in Ackerböden als Folge pflugloser Bodenbearbeitung ist der Bezug des ermittelten C<sub>org</sub>- bzw. Humusgehaltes auf die Lagerungsdichte bzw. Trockenrohdichte der jeweils untersuchten Bodenschicht.
  - Zu beachten ist die hohe Variationsbreite an vorkommenden C<sub>org</sub>-Gehalten, die eine statistische Absicherung von Variantenunterschieden erheblich erschweren kann. So wurden z.B. im Vortrag von *Fabian Kirsten* Ergebnisdarstellungen sowohl in Tonnen C<sub>org</sub> ha<sup>-1</sup> als auch in % C<sub>org</sub> i.d. Trockenmasse des Bodens von den in halbjährlichem Abstand auf der Versuchsfläche ermittelten Humuswerten vorgestellt. Durch beide Darstellungen können bei zeitlich aufeinander folgenden Untersuchungen große Veränderungen in den Humusgehalten festgestellt werden, die weder durch die kurzfristige Zufuhr bzw. den Abbau von organischer Substanz noch durch Witterungseinflüsse und andere Ursachen erklärt werden können. Diese hohe Fehlerschwankung kann nur durch möglichst oft wiederholte und sorgfältig durchgeführte Bodenuntersuchungen ausgeglichen werden.

- Weitere Ergebnisse von verschiedenen Bodenparametern auf nichtwendend bearbeiteten Ackerflächen können u.a. den Berichten aus dem Catch-C-Projekt der EU entnommen werden: <http://www.catch-c.eu/>.

Nachfolgend werden einige zusammengefasste Ergebnisse aus 291 Dauerversuchen des Catch-C-Projektes über die Wirkung der konservierenden Bodenbearbeitung aufgeführt (Pflug = 100 %):

<b>Merkmal</b>	<b>Direktsaat</b>	<b>Reduzierte Bodenbearbeitung</b>
- Humusvorrat	<b>+ 6 %</b> (-34 bis +34 %)	<b>+ 7 %</b> (-34 bis +117 %)
- N <sub>2</sub> O-Emissionen	<b>+ 348 %</b> (-90 bis + 3300 %)	<b>± 0 %</b> (-90 bis + 400 %)
- Ertrag	<b>- 4 %</b> (-32 bis +31 %)	<b>- 2 %</b> (-46 % bis +52 %)
- Quelle: MALLAST et al. (2015): Wird „Pfluglos“ überbewertet? DLG-Mitteilungen Nr. 6, 58 – 60.		

## **Sektion II: Einfluss mineralischer und organischer Düngung auf $C_{org}$ -Bilanz, N-Freisetzung und Nährstoffeffizienz**

Sektionsleitung: Dr. Hartmut Kolbe (Sächsisches Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie, Nossen)

- 1 Entwicklung der Humusgehalte in einer langjährig ökologisch bewirtschafteten Fruchtfolge am Standort Gülzow**
- 2  $C_{org}$ - und  $N_t$ -Bilanz sowie N-Effizienz in Anbausystemen mit mineralischer und organischer Düngung**
- 3 Diskussion und Schlussfolgerungen Sektion II**

Am Beispiel des Ökofeldes Gülzow wurden von *Harriet Gruber* Ergebnisse einer langjährigen Bewirtschaftung auf Erträge und Boden vorgetragen. Aus den Ergebnissen geht hervor, dass durch die umfangreiche Datengrundlage (1993 – 2015) die Veränderung der  $C_{org}$ -Werte des Bodens, neben den Gehalten der Grundnährstoffe und des pH-Wertes, heute auch für ökologische Anbauverfahren recht gut eingeschätzt werden können. Neben der Wirkung der organischen Dünger trägt hierbei insbesondere die spezielle Fruchtfolgezusammensetzung mit ein- bis mehrjährigem Klee gras zur Erklärung der positiven Entwicklung der  $C_{org}$ -Gehalte bei. Zwischen den  $C_{org}$ - und  $N_t$ -Gehalten sowie den Werten an Grundnährstoffen und auch an Treibhausgasen bestehen jedoch oft keine gleichsinnigen Entwicklungen. Daher müssen im Rahmen des Nährstoffmanagements und der Fruchtfolgegestaltung alle Merkmale separat im Auge behalten werden.

Um mindestens eine ausgeglichene Humusbilanz und eine hohe N-Effizienz im Anbausystem zu erreichen, ist eine regelmäßige Zufuhr organischer Substanz in angemessener Höhe entscheidend. Zur Abdeckung einer genügend hohen Zufuhr über die organischen bzw. mineralischen Düngemittel oder über sehr verschiedene Anbaustrategien (Ernte- und Wurzelreste der Fruchtarten und Zwischenfrüchte) steht eine breite Palette an Möglichkeiten zur Verfügung.

Für die Quantifizierung der  $C_{org}$ - und  $N_t$ -Gehalte und -Bilanzen ist eine langfristige Betrachtung unumgänglich; hilfsweise können Modellrechnungen zur Unterstützung angewendet werden. Beim Humusumsatz sollte dem Bodenleben und der mikrobiellen Aktivität im Boden eine höhere Wertschätzung zukommen, mit dem Ziel, die Mechanismen und die Einflussgrößen ihrer Umsetzungsprozesse besser verstehen zu lernen.

In Perioden mit deutlicher Zunahme der Humusgehalte werden wichtige Pflanzennährstoffe (N, P, S) zunächst festgelegt und es können deshalb zwischenzeitlich sogar Ertragsreduktionen beobachtet werden. Bei stetiger Fortführung der organischen Düngungsmaßnahmen kommt es über die steigenden Humusgehalte zu einem Anstieg des Humusumsatzes, weil eine immer größere Menge an organischer Substanz gleichzeitig umgesetzt wird. Dies führt über eine

Erhöhung der Nährstofffreisetzung zu einem Anstieg der Erträge, bis nach einigen Jahrzehnten die Zufuhr und der Abbau an organischer Substanz ein Gleichgewicht erreicht (Beitrag von *Hartmut Kolbe*).

In intensiven konventionellen Tierhaltungsbetrieben kann dies, entsprechend dem vorherrschenden hohen Düngungsniveau, auch zu einer Überversorgung mit organischer Substanz führen. Es erfolgt eine deutlich höhere jährliche Nährstofffreisetzung (N) als für die Ertragsbildung der angebauten Fruchtarten verwendet werden kann, was dann als Ursache für die schlechtere Umweltwirkung gewertet werden kann: Humusbilanzen der Versorgungsstufe E, hoher N-Saldo, hohe Nährstoffverluste über Grundwasser und Atmosphäre.

Hierzu besteht für die Zukunft weiterer Forschungsbedarf in Feldversuchen und Methodenentwicklung, um auf Grundlage einer vieljährigen Aufzeichnung in den Ackerschlagkarteien z.B. verbesserte Düngungsbemessungsverfahren für die landwirtschaftliche Praxis bereitstellen zu können, bei denen diese langfristigen Gesichtspunkte der Nährstoffmineralisation besser berücksichtigt werden können.

Kurz- und langfristige Einflüsse durch die vorherrschenden Wetterbedingungen (z.B. Änderung der Jahresdurchschnittstemperatur) können sich hierbei viel stärker auf die Humus- und Nährstoffdynamik des Bodens auswirken als unterschiedliche Bewirtschaftungsstrategien, was auch einer besonderen Bedeutung im Rahmen des zukünftigen Klimawandels zukommt (siehe Sektion III).

Bisher galt die Lehrmeinung, dass die mineralische N-Düngung, oder organische Dünger mit hohem löslichem N-Anteil, durch eine höhere Nährstoffeffizienz gekennzeichnet sind. Diese Ergebnisse können jedoch bei Berücksichtigung sehr langer Zeitperioden nicht aufrechterhalten werden. Spezielle Auswertungsarbeiten von Ergebnissen aus vielen Dauerfeldversuchen Mitteleuropas haben eindeutig ergeben, dass bei einer langfristigen Berücksichtigung (Mittelwert ca. 20 Jahre) keine oder kaum Unterschiede in der Nährstoffeffizienz an Stickstoff von Versuchsvarianten mit reiner Mineraldüngung, mineralisch-organischen und vorwiegend organischen Düngemitteln verschiedener Arten zu verzeichnen sind.

Die Auswertungen haben zudem ergeben, dass die Nährstoffeffizienz in erster Linie abhängig ist von der Gesamtzufuhrhöhe aller reaktiven Stickstoffquellen. Mit steigender Zufuhr ist eine charakteristische Abnahme der Nährstoffeffizienz verbunden, dessen Ursache auf das Gesetz vom abnehmenden Ertragszuwachs zurückgeführt werden kann.

### **Sektion III: Klimawandel und C-Sequestrierung: Gefährdungs- und Kompensationspotenziale**

Sektionsleitung: Dr. Holger Flaig (Landwirtschaftliches Technologiezentrum Augustenberg, Karlsruhe)

- 1 Kohlenstoffvorräte und Treibhausgasbilanzen sandiger Ackerstandorte
- 2 **Organische Kohlenstoffvorräte der Böden Baden-Württembergs – Status Quo und zukünftige Entwicklungen**
- 3 **Humusgehalte bayerischer Böden im Klimawandel - Schlussfolgerungen aus Humusdatenbank, Bodendauerbeobachtung und Biokohleversuchen**
- 4 **Einfluss des Klimawandels auf Humus- und Stickstoffvorräte im Boden sowie Kompensationsmöglichkeiten durch Landbewirtschaftung am Beispiel von Sachsen (Modellergebnisse)**
- 5 **Diskussion und Schlussfolgerungen Sektion III**

Im Beitrag von *Julian Klepatzki* ging es um die Wirkung kombinierter mineralischer und organischer N-Düngung sowie der Fruchtfolge auf die Kohlenstoffvorräte im Boden und deren Wirkung auf die Treibhausgasbilanz. Untersucht wurden zwei Brandenburger Dauerfeldversuche sowie ein Brandenburger Landwirtschaftsbetrieb (2700 ha Ackerfläche).

Im Versuch am Standort Groß Kreuz kamen Stalldung und Kalkammonsalpeter (KAS) zum Einsatz. Es zeigte sich, dass die Kohlenstoffvorräte des Bodens durch die alleinige Mineral-N-Düngung gegenüber der ungedüngten Kontrolle kaum angestiegen sind, wohl aber durch die organische Düngung (Stalldung). Die kombinierte organisch-mineralische Düngung konnte die C-Vorräte weiter steigern, allerdings nicht unbegrenzt. Ab ca. 100 kg ha<sup>-1</sup>a<sup>-1</sup> Stalldung-N führte die dadurch beförderte Anhebung des C-Vorrats zu einer spürbaren Entlastung der Treibhausgasbilanz.

In Thyrow wurden die C<sub>org</sub>-Gehalte seit Versuchsbeginn 1973/74 erfasst. So konnte gezeigt werden, dass mit steigendem Hackfruchtanteil (Silomais, Kartoffeln) in der Fruchtfolge die C<sub>org</sub>-Gehalte messbar absinken. Der Verbleib von Stroh auf der Fläche (Winterroggen, Sommergerste) konnte den Verlust nur marginal kompensieren, selbst bei reiner Getreidefruchtfolge gelang dies nicht vollständig. Der Einfluss gesteigerter Mineral-N-Düngung auf die C<sub>org</sub>-Gehalte war ebenfalls gering.

*Frank Waldmann* berechnete die C<sub>org</sub>-Vorräte der Böden Baden-Württembergs anhand einer systematischen Zusammenführung vorliegender Analyseergebnisse, differenziert nach Bodentypengruppen und Nutzungsformen (Wald, Grünland, Acker). Durch multiple lineare Regressionen konnten die bestimmenden Faktoren

für die Ausbildung des standorttypischen  $C_{org}$ -Gehaltes herausgearbeitet werden. Maßgeblich sind vor allem Temperatur, Niederschlag und Tongehalt des Bodens. Der  $C_{org}$ -Gehalt nimmt in folgender Reihenfolge im Oberboden zu: Acker < Wald < Grünland.

Auf dieser Grundlage ließ sich unter Beachtung der Gültigkeit des Temperaturbereichs für die Regressionen berechnen, dass eine im Rahmen des Klimawandels anzunehmende Temperaturerhöhung zu einer Abnahme der  $C_{org}$ -Gehalte unter allen drei Nutzungsarten führen wird. Interessant ist die Abschätzung, dass die zu erwartende Abnahme pro Jahr durch ein Grad Temperaturerhöhung gegenüber heute nur etwa dem Doppelten entspricht, was bereits heute jährlich aus den wenigen Moor- und Anmoorböden Baden-Württembergs an  $CO_2$  in die Atmosphäre entweicht.

Als Kernaussage des Vortrags von *Robert Beck* (im Workshop nicht gehalten) kann festgehalten werden, dass sich weder aus den Daten der Bodendauerbeobachtung in Bayern (BDF) noch aus der Humusdatenbank Bayern ein signifikanter Rückgang der Vorräte an organischem Kohlenstoff in den Böden ableiten lässt. Aus der BDF ergibt sich aus der Analyse von 86 Ackerflächen im Zeitverlauf 1986 bis 2012 mit 5 Beprobungszeitpunkten eine eher vage 2%-ige Abnahme (Relativwert). Gemäß Humusdatenbank konnte man bei der Wiederholungserhebung nach 10 Jahren (2001 - 04 vs. 2011 - 14) im Durchschnitt der bayerischen Bezirke dagegen eine leichte Erhöhung der Humusgehalte um 1,2 % (relativ) feststellen.

*Hartmut Kolbe* berichtete über den Einfluss des Klimawandels auf die Humus- und Stickstoffvorräte des Bodens aufgrund von Klimaprojektionsrechnungen. Exemplarisch wurden drei Standorttypen in Sachsen untersucht: Sächsisches Heidegebiet/Elbtal (anlehmiger Sand), Mittelsächsisches Lössgebiet (sandiger Lehm) und die Mittelgebirgs-Vorlandzone (sandiger Lehm). Die Standortdaten flossen in ein Modell zur C- und N-Dynamik im Boden ein (CANDY). Außerdem wurden Regressionsrechnungen durchgeführt. Die Datengrundlage hierfür bildeten statistische Auswertungen von 240 Dauerversuchen und mehr als 2400 Versuchsvarianten aus dem mitteleuropäischen Raum. Die Modelle wurden mit regionalspezifischen Klimaprojektionen des Projekts WEREX kombiniert.

Zwei Humusbilanzierungsansätze dienen zur unterstützenden Abschätzung bewirtschaftungsbedingter Humusgehaltsänderungen (VDLUFA-Methode, STAND). Nimmt man an, dass die augenblickliche Bewirtschaftung (Fruchtfolge, Düngung, Ertragsniveau) bis 2050 beibehalten wird, ist auf den Sand- und Lössböden mit einem eher geringen Humusverlust zu rechnen (0,15 % von 1,36 %  $C_{org}$  bzw. 0,04 % von 1,38 %  $C_{org}$ ). Auf dem Vorgebirgsstandort muss man je nach Klimaszenario mit einer deutlich höheren Mineralisierung und Freisetzung von organischem Kohlenstoff rechnen (hohe methodenbedingte Streuung). Allerdings ist hier auch das Ausgangsniveau mit 2,12 %  $C_{org}$  höher. Die N-Gesamtgehalte folgen im Prinzip der Entwicklung der  $C_{org}$ -Gehalte. Entscheidender Treiber ist der Temperaturanstieg.

Darüber hinaus wurde berechnet, inwieweit ausgewählte Bewirtschaftungsmaßnahmen den  $C_{org}$ -Gehalt beeinflussen können. Die untersuchten Landbewirtschaftungsmaßnahmen lassen sich hinsichtlich ihres Kompensations- oder C-Sequestrierungs-Potenzials in drei Gruppen einteilen, jeweils im Vergleich zur Beibehaltung der bisherigen Bewirtschaftung einer getreidebetonten Fruchtfolge mit organischer Düngung von ca.  $0,6 \text{ GV ha}^{-1}\text{a}^{-1}$  (die jedoch bereits zu einem Humusschwund bis 2050 führen würde):

- Anstieg der  $C_{org}$ -Gehalte: alle Varianten, in denen eine Umwidmung von Acker- zu Grünlandnutzung unterstellt wurde; höhere Anteile an Ackerfutter und Leguminosen in der Fruchtfolge; Versorgung mit Kompost
- Kaum Änderungen der  $C_{org}$ -Gehalte: Erhöhung der Viehbesatzdichte bzw. äquivalenten Versorgung mit Wirtschaftsdünger bis auf  $2 \text{ GV/ha}$ ; Umstellung auf ökologischen Landbau; angenommener Ertragsanstieg
- Minderung der  $C_{org}$ -Gehalte: bestimmte Energiefruchtfolgen mit hohen Maisanteilen, einseitige Ausdehnung von Getreide oder Hackfrüchten in der Fruchtfolge, ggf. mit Abfuhr der Koppelprodukte.

Eine Kompensation, die über den zu erwartenden klimabedingten Abbau an Humus hinausginge (z.B.  $0,15 \%$   $C_{org}$  absolut), ist nur durch die humusmehrenden Varianten machbar, deutlich nur über eine Umwidmung von Acker- in Dauergrünland, und selbst dies scheint auf dem Vorgebirgsstandort für eine vollständige Vermeidung des  $C_{org}$ -Rückgangs je nach Szenario nicht auszureichen. Das C-Sequestrierungs-Potenzial durch landwirtschaftliche Maßnahmen (u.a. auch durch pfluglose Bodenbearbeitung/Direktsaat) ist also eng begrenzt. Die Landwirtschaft kann den klimabedingten Abbau des Humusgehaltes durch gegensteuernde Maßnahmen unter Umständen kompensieren, aber vermutlich nicht mehr. Unwägbarkeitsfaktoren in der Entwicklung sind hierbei nicht zuletzt die Ertragsentwicklung unter dem Vorzeichen von Züchtungserfolgen und die höheren  $\text{CO}_2$ -Konzentrationen in der Atmosphäre.

### **Aus der Diskussion der Beiträge lassen sich folgende Schlussfolgerungen ziehen:**

Die Jahresmitteltemperatur in Deutschland hat seit 1881 bereits um  $1,4$  Grad zugenommen, die größte Zunahme erfolgte seit Ende der 1980-er Jahre. Die bisher verfügbaren Untersuchungen zum Humusgehalt, die längere Zeitreihen umfassen oder in Wiederholungsuntersuchungen auch Standorte früherer Untersuchungen beinhalten, zeigen mehrheitlich keine wesentlichen Reduktionen des Humusgehaltes auch unter Ackernutzung in Deutschland bzw. Mitteleuropa während der letzten Jahrzehnte. Wenn Verminderungen von  $C_{org}$ -Gehalten festgestellt wurden, dann in der Regel auf organischen Böden. Diese Befunde werden durch die Metaanalyse von langjährigen Feldversuchen unterstützt.

Aus diesen Untersuchungen ging auch hervor, dass es unter alleiniger Nutzung von Ergebnissen der Bodenuntersuchung ( $C_{org}$ ) aus Dauerversuchen oder –Testflächen nicht möglich erscheint, den Klimawandel nachzuweisen. So wird die Ceteris-

Paribus-Regel schon allein dadurch verletzt, dass die acker- und pflanzenbaulichen Bewirtschaftungsmaßnahmen über die lange Versuchszeit nicht genau konstant gehalten werden können.

Demgegenüber stehen die Simulationsberechnungen zur Humusentwicklung unter den Vorzeichen des Klimawandels, insbesondere unter der Zunahme der Jahresmitteltemperatur im Fokus. Modellberechnungen und statistische Regressionsanalysen zeigen im Rahmen ihrer gesicherten Validität, dass künftig mit einer Abnahme des Humusgehalts gerechnet werden muss. In welcher Höhe der Humusschwund stattfinden wird, hängt vom Ausgangsgehalt, den Ausgangsbedingungen der Standorte, den Annahmen der Klimamodelle und der angenommenen Bewirtschaftungsweise ab. Dabei sind nachfolgende unbekannte Größen zu berücksichtigen:

- die Auswirkungen des CO<sub>2</sub>-Gehalts der Atmosphäre auf die Erträge der Kulturpflanzen, aber auch auf die Streuqualität, die Stoffumsätze im Boden, auf die Transpirationsintensität und damit das Bestandesklima
- den Züchtungsfortschritt im Hinblick auf zu erwartende Erträge und im Hinblick auf Ernte- und Wurzelreste der Fruchtarten bei höheren Temperaturen und ggf. auch bei veränderten Niederschlägen in der Vegetationsperiode
- die tatsächliche Entwicklung der Niederschläge in Höhe und Verteilung im Jahreslauf (Niederschlagsprojektionen auf regionaler Ebene sind weiterhin mit hohen Unsicherheiten behaftet)
- dem Ausmaß der Klima- bzw. Temperaturänderung; gerade die statistischen Modelle beruhen auf der Extrapolation aufgrund historischer Messwerte, die in einem sich stark ändernden Klima keine Gültigkeit mehr beanspruchen könnten; unter Umständen stoßen hier auch dynamische Modelle an ihre Grenzen, die an historischen Feldversuchen kalibriert wurden
- die zu erwartende Verlässlichkeit hängt daher auch stark ab von der Genauigkeit der eingesetzten Berechnungsverfahren; auch hierzu besteht in Zukunft ein deutlicher Forschungsbedarf.

Die Möglichkeiten der Landwirtschaft, den potenziellen klimabedingten Änderungen der Humusgehalte durch Maßnahmen zu begegnen, sind begrenzt. Konservierende Bodenbearbeitung hat nur bei konsequentem Pflugverzicht und umfassender Reduktion der Bearbeitungsintensität (z.B. in Form der Direktsaat) und bei gleichzeitig beständig hoher Zufuhr an organischer Substanz (Stroh, Zwischenfruchtreste, usw.) eine positive Wirkung auf den Humusgehalt. In der Regel kommt es als Folge des Verzichts auf den bodenwendenden und -mischenden Pflugeinsatz zu einer Konzentration von organischer Substanz in den oberen Bodenschichten. Bezieht man jedoch tiefere Bodenschichten unterhalb von 20 cm (bis mindestens 50 cm) mit ein und korrigiert die Horizontmächtigkeiten aufgrund der unterschiedlichen Trockenrohdichten (oder wählt gleich die korrekten Entnahmetiefen bei der Probenahme), zeigt sich zumeist kaum ein Unterschied in den C<sub>org</sub>-Gehalten zwischen Pflug, Mulch- oder Direktsaat (siehe Sektion I). Es bleibt jedoch die Tatsache, dass die reduzierte Art und Weise der Bodenbearbeitung lange Zeit beibehalten werden muss, um die möglicherweise erzielten Erfolge nicht zu gefährden. Ein weiterer Faktor ist z.B. die N<sub>2</sub>O-Freisetzung bei unterschiedlicher Bodenbearbeitung, die noch gründlicherer Untersuchungen bedarf.

Die Zufuhr von organischen Düngern, besonders von Stallmist und Kompost, ist geeignet, den Gehalt an  $C_{org}$  bei Ackernutzung zu stabilisieren und ggf. auch langfristig anzuheben. Die Steigerung des  $C_{org}$ -Gehaltes erfolgt jedoch mit der Zeit langsamer bis zu einem standorttypischen neuen Gleichgewicht. Das Aufbringen großer Mengen organischer Substanz muss hinsichtlich der Berechenbarkeit der Mineralisierung, der Nährstofffrachten und der Emissionen in Hydro- und Atmosphäre kritisch betrachtet werden. Insbesondere bei fortschreitendem Klimawandel ist das C-Sequestrierungs-Potenzial begrenzt.

Die bodenverbessernden Eigenschaften höherer Gehalte an organischer Substanz hingegen, wie z.B. der Erhöhung des Porenvolumens, der (nutzbaren) Feldkapazität, der Kationenaustauschkapazität, der Aggregatstabilität und der Resilienz gegen Verdichtung und Erosion, sind unter Klimawandel-Bedingungen mindestens genauso wichtig, wenn nicht sogar wichtiger als heute einzuschätzen. Hinzu kommt, dass die Bodenverbesserung auch höhere Erträge ermöglicht, die durch die besseren Bodenbedingungen mit weniger Stickstoffeinsatz und damit weniger Treibhausgasemission zustande kommen können.

Vor diesem Hintergrund muss ebenfalls die Nutzung von Biomasse zur Energieerzeugung kritisch beobachtet werden. Die verstärkte Abfuhr von Stroh oder die Silomais-dominierten Fruchtfolgen mit Schwerpunkt Biogaserzeugung beispielsweise können zur Humuszehrung und zum Schwund an organischer Bodensubstanz führen. Eine Kompensation der Humusverluste durch ergänzende Maßnahmen, z.B. durch Zwischenfrüchte oder organische Düngung, ist hier absolut notwendig. Hinzu kommen u.U. indirekte Landnutzungsänderungen mit fragwürdiger Treibhausgasbilanz anderenorts durch Verdrängung der Lebens- und Futtermittelproduktion von heimischen Flächen.

Biokohle kann Kohlenstoff prinzipiell relativ abbaustabil im Boden einlagern, sofern es sich um stabile Pflanzenkohleformen, in der Regel durch Pyrolyse hergestellt, handelt. Insofern hat Biokohle ein C-Sequestrierungs-Potenzial. Es muss sichergestellt werden, dass die aufgebrauchten Kohlen gütegesichert und zertifiziert sind und eine Aufbringung von anorganischen und organischen Schadstoffen nach neuestem Kenntnisstand vermieden wird. Doch selbst dann ist eine großflächige Aufbringung von Biokohle im Ackerbau derzeit und vermutlich auch langfristig ökonomisch nicht darstellbar: Die Kosten sind nach heutigen Gesichtspunkten weitaus zu hoch. Zu den aufgeführten verschiedenen Aspekten des Klimawandels besteht ein deutlicher Forschungs- und Entwicklungsbedarf.

### **Besondere Anmerkungen und Schlussfolgerungen des Workshops:**

Aus den präsentierten Ergebnissen aus allen drei Sektionen kann die Bedeutung der Versuchstätigkeiten am Erkenntnisprozess deutlich hervorgehoben werden. Zur Schließung von Kenntnislücken ist es hierzu unabdingbar, dass auch besonders in den Landeseinrichtungen für Landwirtschaft eine experimentelle Tätigkeit mit aktuellen Themenstellungen auf allen repräsentativen Standorten in Zukunft

aufrechterhalten wird. Dies trifft in besonderem Maße für die Dauerbeobachtungsflächen sowie die Dauerfeldversuche zu, da neben vielen anderen Fragestellungen nur in diesen vieljährigen Versuchsanstellungen Veränderungen in den  $C_{\text{org}}$ - und  $N_{\text{t}}$ -Gehalten des Bodens verlässlich ermittelt werden können.

Unabhängig von der spezifischen Versuchsfragestellung sind gerade diese Versuche von unschätzbarem Wert für die Gewinnung neuer Erkenntnisse zur Bodenfruchtbarkeit und Nachhaltigkeit von Anbausystemen. Durch überregionale Auswertung von vielen Versuchsergebnissen in sog. Metastudien kann überdies durch Synergieeffekte ein besonderer Zugewinn an Erkenntnissen für die Nutzung in Wissenschaft, Lehre und der praktischen Landwirtschaft gewonnen werden.