



**Abb. 1:** Der Portalkran im ZALF-Landschaftslabor „AgroScapelab Quillow“ (Uckermark) mit automatischen Hauben zur Messung der Treibhausgasflüsse in drei Blöcken mit Böden unterschiedlichen Erosionsgrades (Fruchtfolge 2020–23: Grünroggen-Raps-Triticale).

### Auf der Suche nach CO<sub>2</sub>-Senken im Ackerbau: Partielle Krumenvertiefung

# NEUE WEGE ZUR HUMUSSPEICHERUNG

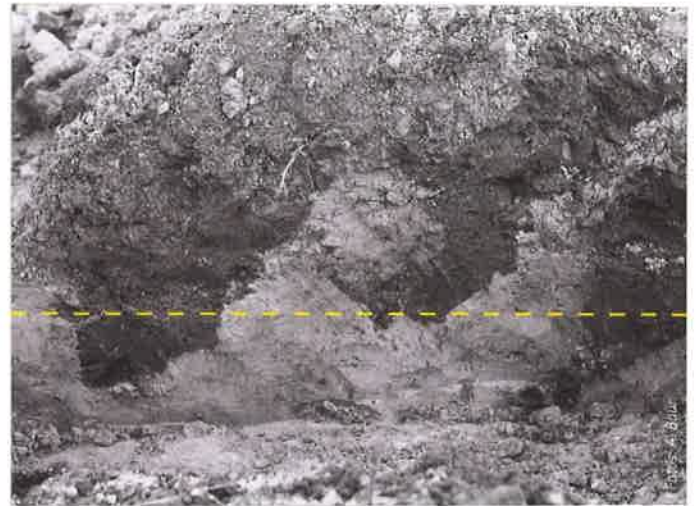
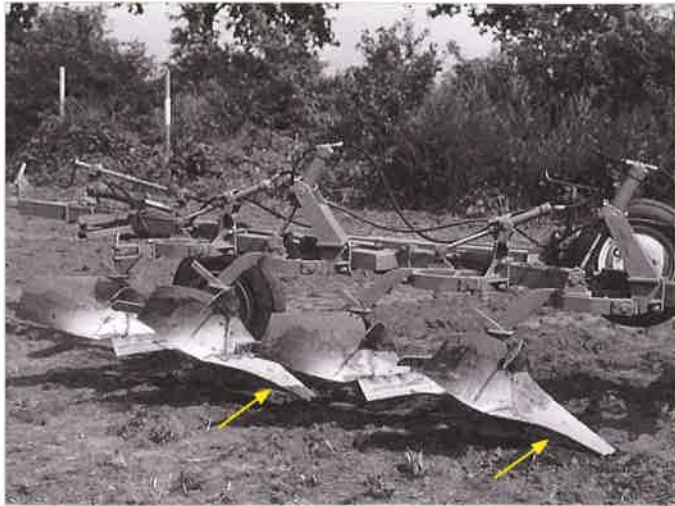
Prof. Dr. Michael Sommer, Prof. Dr. Jürgen Augustin, Dr. Andreas Baur, Marisa Gerriets, Dr. Gernot Verch  
Leibniz-Zentrum für Agrarlandschaftsforschung (ZALF) e. V., Müncheberg

*Durch die partielle Krumenvertiefung des Bodens wird humusreicher Oberboden dauerhaft in größere Tiefen vergraben, andererseits wird aber auch Unterbodenmaterial in den Oberboden eingemischt. Dies führt zu einer dauerhaften Steigerung der Humusvorräte, d.h. einer nachhaltigen CO<sub>2</sub>-Senkenwirkung, weil der Humusabbau in tieferen Bodenhorizonten nur sehr langsam erfolgt. Im Rahmen des interdisziplinären Forschungsprojekts „Krumensenke“ wird die Wirkung der partiellen Krumenvertiefung auf die langfristige C<sub>org</sub>- und N-Speicherung in Böden überprüft.*

In der aktuellen Debatte zum Beitrag der Landwirtschaft für den Klimaschutz rückt die Frage nach möglichen CO<sub>2</sub>-Senken in der Landwirtschaft zunehmend in den

Vordergrund. So betont der Entwurf der Bundesregierung zum Klimaschutzgesetz 2021 den Beitrag natürlicher Ökosysteme für eine Übergangszeit bis zur Klimaneu-

tralität 2045. Die CO<sub>2</sub>-Bindungswirkung natürlicher Senken wie Wälder, organische Böden (inkl. Moore) sowie Mineralböden soll hierfür verbessert werden.



**Abb. 2:** Links: Krumenbasispflug B205A als umgerüsteter Aufsattelbeetpflug B201 (1985), Pfeile markieren die pKV-Werkzeuge an jedem 2. Schar. Rechts: Arbeitsbild unmittelbar nach einer partiellen Krumenvertiefung, die gelbe Linie markiert die Untergrenze des Pflughorizontes vor pKV.

Aufgrund ihrer Bedeutung als starke Einzelquelle wird u. a. eine umfassende Wiedervernässung landwirtschaftlich genutzter Moore vorgeschlagen. Etwa zwei Drittel der Treibhausgasemissionen der gesamten Landwirtschaft stammen – laut Umweltbundesamt – aus entwässerten Mooren (ca. 50 Mio. t CO<sub>2</sub> pro Jahr). Der Beitrag mineralischer Böden zu „negativen Emissionen“ (Netto-CO<sub>2</sub>-Aufnahme) mit traditionellen pflanzenbaulichen Maßnahmen fällt demgegenüber mit 3 bis 5 Mio. t CO<sub>2</sub> pro Jahr eher gering aus – trotz ihres Flächenanteils von rund 12 Mio. ha. Zudem ist die Dauer einer zusätzlichen Speicherung eher gering, da mineralische Böden rasch ihre Speicherkapazität erreichen. Um die Klimaschutzziele in der Landwirtschaft zu erreichen, existiert also ein enormer Entwicklungsbedarf an innovativen Technologien. Neu zu entwickelnde Techniken sollten idealerweise nicht nur die CO<sub>2</sub>-Bindung in Böden verstärken, sondern gleichzeitig auch einen Beitrag zur Stabilität der landwirtschaftlichen Produktion unter den Bedingungen häufiger auftretender Wetterextreme leisten (Klimaresilienz), ohne dabei den Bodenschutz zu vernachlässigen. Prinzipiell können Bodenbearbeitungssysteme zu dieser Multiziel-Optimierung beitragen. Eine wesentliche Voraussetzung dafür ist allerdings fundiertes Wissen über die Kohlenstoff- bzw. Humusdynamik von Böden und Möglichkeiten ihrer gezielten Beeinflussung.

### So speichern Böden den Kohlenstoff

Ein Wesensmerkmal von Böden ist die Speicherung von organischer Substanz. Bereits zu Beginn jeder Bodenentwicklung wird ein Teil der durch Pflanzen eingebrachten und durch Mikroorganismen veränderten, organischen Verbindungen an Tonmineralen, Eisenoxiden oder in Bodenaggregaten gebunden. Würden die Bodenlebewesen, inkl. der Mikroorganismen, allen pflanzlichen Kohlenstoff für ihren Stoffwechsel verbrauchen, d. h. zu CO<sub>2</sub> umwandeln, gäbe es keinen Humus in den Böden. Bleiben die Umweltbedingungen über eine gewisse Zeit konstant, stellt sich ein Gleichgewicht ein, C-Input und C-Abbau halten sich die Waage, der Humusgehalt und die Humusmenge verharren auf einem Niveau. Bodenwissenschaftler nennen dieses Niveau unter den gegebenen Umweltbedingungen das „C<sub>org</sub>-Sättigungspotenzial“. Dessen Höhe wird durch die Unterschiede in den chemischen und physikalischen Eigenschaften der Böden bestimmt. Nutzungswechsel, Bodenbearbeitung, Fruchtfolgen, Zufuhr organischer Dünger, Be- und Entwässerung, aber auch Erosion „stören“ dieses Gleichgewicht natürlicher Systeme. Landwirtschaftlich genutzte Böden sind daher generell durch Ungleichgewichte charakterisiert – und zwar auf einer Zeitskala von wenigen Jahren bis hin zu Dekaden. Eine signifikante und dauerhafte Steigerung der Kohlenstoffvorräte in Böden (CO<sub>2</sub>-Senkeneffekt) kann nur in

Böden erreicht werden, die sich unterhalb ihres spezifischen Gleichgewichtszustandes befinden, d. h. die hinsichtlich des Kohlenstoffs „untersättigt“ sind. Je größer dieses Sättigungsdefizit, desto größer ist das Speicherpotenzial für zusätzlichen Kohlenstoff, d. h. die CO<sub>2</sub>-Senkenwirkung.

Eigene Untersuchungen zu den Auswirkungen der Bodenerosion auf den Kohlenstoffhaushalt von Agrarlandschaften (CarboZALF) haben dieses grundlegende Prinzip bestätigt. Nach Entfernung des Oberbodens – d. h. einer simulierten Erosion – und anschließendem Pflügen trat über sieben Jahre hinweg eine starke CO<sub>2</sub>-Senke auf (+150 g C<sub>org</sub> / m<sup>2</sup> a). Der Grund hierfür liegt in der Einmischung von C<sub>org</sub>-ungesättigtem Unterboden in den Pflughorizont (Ap). Durch diese Verdünnung des Krumenbereiches ist der Oberboden stark untersättigt und damit sehr reaktiv für eine zusätzliche Kohlenstoffbindung. Nach kurzer Zeit reichern sich durch Pflanzen eingebrachte organische C- und N-Verbindungen an. Diese Anreicherung erfolgt so lange, bis das lokale Gleichgewicht wieder erreicht ist oder das Ungleichgewicht aufrechterhalten wird – wie etwa durch erneuten Bodenabtrag.

### Krumenvertiefung als zeitweilige CO<sub>2</sub>-Senke

Eine Verdünnung der Ackerkrume, durch Einmischung von Unterboden, erfolgt aber auch im Zuge der früher vielfach

untersuchten und praktizierten Krümenvertiefung. Dabei bildet sich ebenfalls eine zeitweilige CO<sub>2</sub>-Senke aus, allerdings ohne Verlust an Bodenfruchtbarkeit wie etwa bei der Bodenerosion. Historisch betrachtet hat die mit der Mechanisierung der Landwirtschaft ermöglichte Vergrößerung der Pflugtiefe (Krümenvertiefung) nicht nur zu einem Anstieg der Erträge, sondern auch der Humusvorräte in Böden geführt und damit zu einer einmaligen C-Sequestrierung.

Um Bodenverdichtungen zu beseitigen, wurden ackerbaulich genutzte Flächen meliorativ tief gelockert oder tief gepflügt. Auch diese Verfahren mischten einerseits Unterbodenmaterial in den Oberboden ein und vergruben andererseits Ober- im Unterboden, was zu einer einmaligen, aber dauerhaften Steigerung der Humusvorräte, das heißt zu einer nachhaltigen CO<sub>2</sub>-Senkenwirkung führte. Insbesondere nach Tieflockerung, aber auch nach klassischem meliorativem Tiefpflügen trat

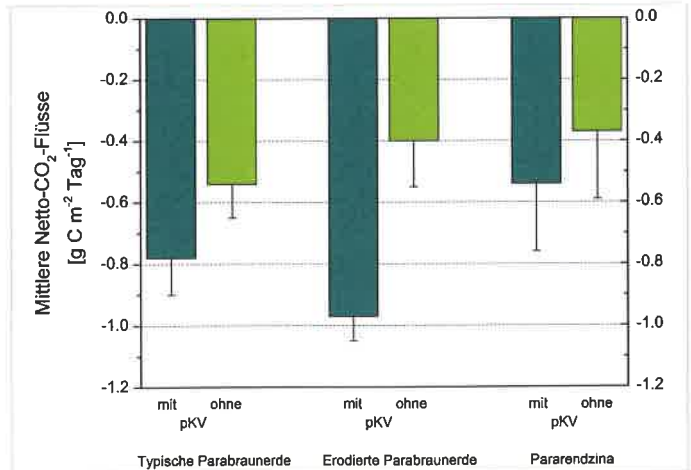


Abb. 3: Mittlere, tägliche Netto-CO<sub>2</sub>-Flüsse 07/2020–06/2021 entlang eines Erosionsgradienten; jeweils mit und ohne simulierte, partielle Krümenvertiefung (pKV); Parzellen mit mineralischer Düngung (n = 3 Wiederholungen); Daten: Dr. Mathias Hoffmann.



Abb. 4: Feldeinsatz und Arbeitseffekte des 4-Schar pKV-Drehpfluges (LEMKEN); a: Pflugeinsatz im Pilotexperiment (Hof Fichtner, Uckermark), b: Grabenanschnitt mit Arbeitsbild auf einer sandigen Parabraunerde direkt nach der pKV-Maßnahme, Schachtuntergrenze in 50 cm, Pfeile verweisen auf die Schachtverfüllung mit Krümenmaterial (links) bzw. den Unterboden im Pflughorizont (rechts), c: Versuchsstreifen mit (links) und ohne pKV (rechts)

jedoch oft eine Wiederverdichtung der Böden auf. Die damit verbundenen Ertragsrückgänge bewirkten eine Abkehr von dieser Technik. Auch die erhöhten Kraftstoffkosten reduzierten in den letzten Dekaden den Pflugeinsatz und die Pflugtiefe – bis hin zur pfluglosen Bodenbearbeitung.

### Schächte von bis zu 60 cm Tiefe

In Kenntnis dieser Probleme wurde seit den späten 1950er Jahren bis hin zur Wende 1989 von Wissenschaftlern in der ehemaligen DDR die partielle Krümenvertiefung (pKV) als Meliorationsverfahren entwickelt und erprobt – zunächst an



**Abb. 5:** Grabenanschnitt (2020) eines historischen pKV-Versuches aus dem Jahr 1984. Die gestrichelte Linie markiert die aktuelle Pflugtiefe, die Pfeile verweisen auf die mit Oberbodenmaterial gefüllten Schächten.

der Universität Greifswald, dann v. a. am „Forschungszentrum für Bodenfruchtbarkeit“ (FZB, heute: ZALF). Partielle Krumenvertiefung bedeutet eine einmalige, teilweise Vertiefung des Pflughorizontes mittels spezieller Werkzeuge an Pflügen oder Lockerern. Damit werden 10–20 cm breite Schächte in einem Abstand von 35–80 cm angelegt, die jeweils 20 cm tiefer reichen als die normale Pflugtiefe. Diese Schächte werden mit Oberbodenmaterial verfüllt, während der ausgehobene Unterboden in den Ap-Horizont verlagert wird und dort zu einer Krumenverdünnung führt (**Abb. 2**).

#### Verdichtungszone aufbrechen

Intensive Forschungsarbeiten zu den Auswirkungen der pKV in über 200 Ertragsvergleichen zeigten einen signifikanten, mittleren Anstieg des Ertragsniveaus um 3 dt GE / ha bei Halmfrüchten (Getreide) und 5 dt GE / ha bei Hackfrüchten (Zuckerrübe, Kartoffel). Die Ertragswirkung der pKV ist insbesondere auf die höheren Durchwurzelungstiefen und die damit verbundene Erreichbarkeit der im Unterboden vorhandenen Wasser- und Nährstoffvorräte zurückzuführen, welche durch das Aufbrechen von Verdichtungszone in 35–45 cm Tiefe ermöglicht werden. In dem mit  $C_{org}$ -ungesättigten Unterbodenmaterial angereicherten Oberboden wird spätestens nach zehn Jahren das alte Humusniveau wieder erreicht. Ob allerdings mit der pKV ein Netto-Speichereffekt für Kohlenstoff einhergeht, ist noch unklar, da das Wissen über die Geschwindigkeit und Höhe des mikrobiellen Humusabbaus in den Schächten fehlt.

#### Aktuelles Projekt „Krumensenke“

Hier knüpft das interdisziplinäre Forschungsprojekt „Krumensenke“ an, welches vom BMEL über die Fachagentur für Nachwachsende Rohstoffe (FNR) e. V. finanziert wird. Ziel des Projektes ist es, die Wirkung der partiellen Krumenvertiefung auf die  $C_{org}$ - und N-Speicherung in Böden sowie die Erträge einer Energiepflanzen-Fruchtfolge zu überprüfen. Ein besonderes Augenmerk liegt dabei auf der Frage, ob die Kombination von pKV mit einer N-Düngung aus Gärresten der Biogasproduktion die Lachgasemissionen reduziert. In der Umsetzung werden dabei vier aufeinander aufbauende Teilaspekte untersucht:

1. Die kurzfristige Dynamik der Treibhausgasflüsse nach pKV (Modellexperiment).
2. Die Ertragswirkung und mittelfristige C-Sequestrierung der pKV auf einer Praxisfläche (Pilotexperiment).
3. Die langfristige Entwicklung der  $C_{org}$ - und N-Vorräte in Böden (historische pKV-Versuche).
4. Eine Ökobilanzierung der pKV (durchgeführt vom Thünen-Institut Braunschweig).

In dem Modellexperiment in der Uckermark (N-Brandenburg) wird die kurzfristige Wirkung der pKV auf die Emissionen von  $CO_2$ ,  $N_2O$  und  $CH_4$  untersucht. Prüffaktoren sind dabei die pKV – simuliert durch die gezielte Einmischung von Unterboden in den Pflughorizont – und die Gärreste. Beide werden in ihrer Wirkung auf drei Böden unterschiedlichen Erosionsgrades in einer Blockanlage analysiert: eine nicht erodierte Parabraunerde, eine stark erodierte Parabraunerde und eine extrem erodierte Pararendzina.

Die ZALF-Forschungsstation in Dedelow unter Leitung von Dr. Verch gewährleistet hier den reibungslosen technischen Betrieb.

#### Erste Ergebnisse

In dem Modellexperiment wurde im Herbst 2020 eine partielle Krumenvertiefung (pKV) durch die Einmischung von Unterboden in den Bearbeitungshorizont (Ap) simuliert. Der Austausch von ca. 25 % des Ap-Horizontes mit dem unterlagernden Al-, Bt- oder C-Horizont führt zu einer deutlichen Untersättigung des Bearbeitungshorizontes in Bezug auf C und N („Krumenverdünnung“). Nach dem ersten Anbaujahr (Grünroggen) liegen die aus Photosynthese und Atmungsvorgängen resultierenden Netto- $CO_2$ -Flüsse der pKV-Parzellen durchweg unter den Werten der Kontrollparzellen (**Abb. 3**). Je negativer die Werte, desto mehr  $CO_2$  verblieb netto im Boden-Pflanzen-System und wurde damit der Atmosphäre entzogen. Die größten Unterschiede traten auf der erodierten Parabraunerde auf, bei der tonreicher und Fe-Oxid-reicher Unterboden mit hohem C-Speicherungspotenzial in den Bearbeitungshorizont eingemischt wurde.

Wie die beiden Versuchsfaktoren „pKV“ und „Gärrestapplikation“ unter Praxisbedingungen wirken, wird in unserem Pilotexperiment (**Abb. 3**) in der Uckermark untersucht (vier Blöcke mit je vier Versuchsstreifen). Der ausgewählte Praxis Schlag weist die typische Bodenheterogenität einer kuppigen Grundmoränenlandschaft im Nordosten Deutschlands auf, welche v. a. durch erosive Bodenumlagerungen geprägt ist. Die partielle Krumenvertiefung erfolgte

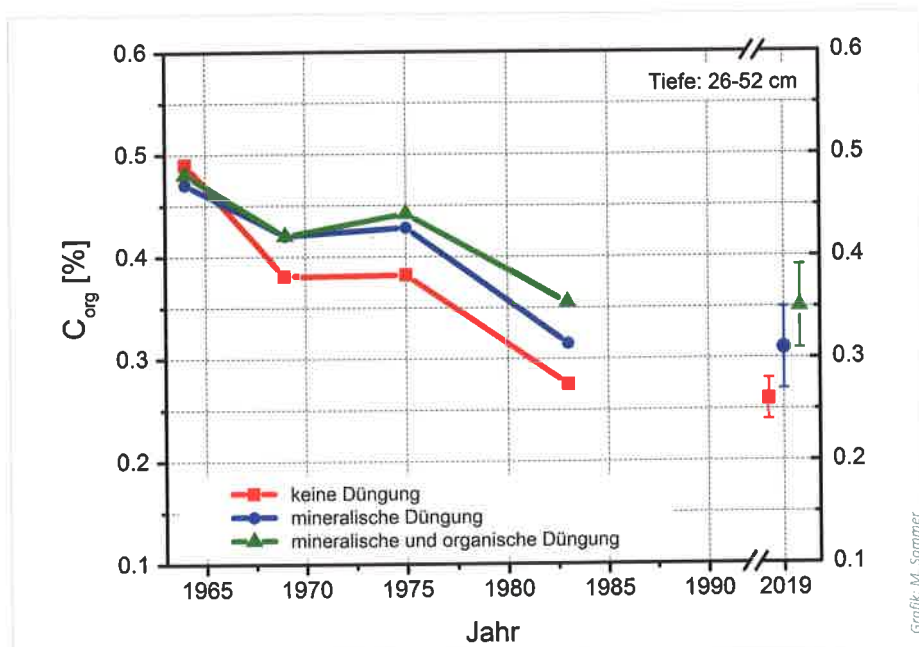


Abb. 6: Zeitliche Entwicklung der C<sub>org</sub>-Gehalte im Unterboden des Dauerfeldversuches V210 in Müncheberg

mit dem Funktionsmuster eines Krumenbasispfluges der Firma LEMKEN. Um die Pflanzenbestände und Bodenzustände zu charakterisieren, wird sowohl moderne Bodensensorik (u. a. elektromagnetische Induktion) als auch drohnengestützte, hochauflösende Fernerkundung eingesetzt.

#### Vergleich mit historischen Versuchen

Mit den beiden genannten Versuchsanordnungen lassen sich jedoch nur die kurzfristigen Effekte der pKV untersuchen. Um die Langfristwirkung und damit die Nachhaltigkeit zu prüfen, werden ferner auch historische Feldversuche untersucht. Nach Rekonstruktion der genauen Lage werden Gräben quer zur Bearbeitungsrichtung gezogen und die aufgefundenen

Schächte dokumentiert, beprobt, und im Labor auf ihre bodenphysikalischen sowie bodenchemischen Eigenschaften hin analysiert. Bislang wurden drei Streifenversuche aus den Jahren 1977, 1979 und 1984 nahe Müncheberg bearbeitet. Zur Überraschung der Versuchsbeteiligten waren die Schächte nach so langer Zeit in allen Versuchen immer noch deutlich zu erkennen (Abb. 4). Die Lagerungsdichte in den Schachtzonen ist signifikant geringer als in den unmittelbar benachbarten Festzonen. Die Gehalte an organischen Kohlenstoff liegen in den Schächten 4-5fach höher als in den unmittelbar benachbarten Festzonen und betragen nach ca. 40 Jahren immer noch mindestens 50 % des ursprünglichen C<sub>org</sub>-Gehaltes der verlagerten Ap Horizontes.

Aus einem Dauerfeldversuch zur Krumenvertiefung aus dem Jahr 1964 ist bereits bekannt, dass selbst nach 55 Jahren – je nach Düngungsregime – immer noch 50–70 Prozent des ursprünglichen Oberboden-Kohlenstoffgehaltes im Unterboden erhalten sind (Abb. 6). Ein großer Teil der CO<sub>2</sub>-Senkenwirkung ist also noch erhalten. Dies unterstreicht die Nachhaltigkeit der meliorativen pKV in seiner Klimawirkung.

#### Ausblick

In den kommenden Monaten werden im Projekt „Krumensenke“ weitere historische pKV-Versuche lokalisiert und beprobt. Damit liegen für eine große Spannweite steuernder Bodeneigenschaften (Tongehalt, Eisenoxide) wichtige Erkenntnisse zur nachhaltigen C<sub>org</sub>-Speicherung nach pKV vor. Mittels drohnengestützter Fernerkundung erfolgt sowohl im Pilotexperiment als auch auf historischen pKV-Versuchsflächen eine hochauflösende Erfassung der Ertragswirkung. Abgerundet wird das Bild durch eine erste quantitative Abschätzung der regionalen wie nationalen CO<sub>2</sub>-Senkenwirkung der pKV sowie die Ökobilanzierung.

Nachfolgend ist zu klären, ob das Verfahren auch unter den Bedingungen extremerer Witterungsverhältnisse dazu beitragen kann, die landwirtschaftliche Produktion zu stabilisieren. Ferner sollen die meliorativen pKV-Pflüge und -Lockerer in praxisnahen Forschungsprojekten technisch optimiert werden, um Lösungen für die landwirtschaftliche Praxis zu schaffen. Vor dem Hintergrund der aktuellen Klimadebatte und der zu erwartenden Preissteigerung bei CO<sub>2</sub>-Zertifikaten sind die Projektbeteiligten überzeugt davon, dass die partielle Krumenvertiefung künftig ein wesentlicher Baustein zur CO<sub>2</sub>-Bindung in den Böden sein wird.

Prof. Dr. Michael Sommer



Prof. Dr. Jürgen Augustin



Dr. Andreas Baur



Marisa Gerriets



Dr. Gernot Verch

