

## Executive Stakeholder Summary

Projektnummer	406840_143023
Titel	Indikatoren für die Störungsanfälligkeit von Bodenkohlenstoff
Projektleiter	Timothy Eglinton, ETH Zürich

Beitrag zur thematische(n) Synthese(n):

<input type="checkbox"/> Boden und Nahrungsmittelproduktion	<input checked="" type="checkbox"/> Boden und Umwelt	<input type="checkbox"/> Raumentwicklung	<input type="checkbox"/> Bodendaten, Methoden und Instrumente	<input type="checkbox"/> Bodenpolitik
---	--	--	---	---------------------------------------

Ort, Datum: Birmensdorf, 7. April 2017

## Hintergrund

Die Auseinandersetzung mit dem fortschreitenden Klimawandel erfordert ein vertieftes Verständnis für die Dynamik des Kohlenstoffkreislaufs und dessen Beziehung zum globalen Klima. Eine genauere Erfassung von Kohlenstoffquellen und -senken trägt dazu bei, Umfang und Geschwindigkeit der Klimaveränderung besser beurteilen und dadurch zu Klimaschutz und Klimaadaptation beitragen zu können. Böden enthalten etwa doppelt so viel Kohlenstoff wie die Atmosphäre (in Form von CO<sub>2</sub>) und bilden damit das grösste terrestrische Reservoir für organischen Kohlenstoff. Neben der Einlagerung von Kohlenstoff spielt organische Bodensubstanz (OBS) eine Schlüsselrolle bei physikalischen und chemischen Prozesse im Boden. Sie enthält die essenziellen Nährstoffreservoirs, von denen die Ökosysteme des Bodens (Pflanzen und Kleinlebewesen) abhängig sind. Ausserdem trägt OBS zur Filterung von Wasser bei und zur Rückhaltung von Schadstoffen. Allerdings gibt es derzeit keinen Konsens über den Nettoeffekt, den Klimawandel und veränderte Landnutzung auf diese grossen Kohlenstoffbestände haben werden. Aufgrund der Komplexität und der Vielzahl von Einflussfaktoren auf die Stabilität und Anfälligkeit der OBS ist die Parametrisierung und die Vorhersage des Verhaltens von OBS beeinträchtigt. Durch neue Erkenntnisse über die Dynamik des OBS kann das Wissen über die Vielzahl der Funktionen erweitert werden. Zunehmende Anwendung in OBS-Studien findet die Radiokarbonmethode (14C), da sie mit einem Zeithorizont von Jahrzehnten bis Jahrtausenden ein wirkungsvolles Mittel zur Bestimmung der Geschwindigkeiten in der Kohlenstoffdynamik darstellt. Bei der Untersuchung von OBS muss ein Ansatz gewählt werden, der der Heterogenität und Komplexität des OBS gerecht wird und der erlaubt, mehrere räumliche und zeitliche Bezugsräume zu erfassen, die wiederum verschiedene klimatische und ökologische Gradienten umspannen sollten. Komposition und Verbleib des OBS werden durch komplizierte Prozesse bestimmt, deren Untersuchung die Erforschung unterschiedlicher Stabilisierungsmechanismen durch spezifische Kohlenstoffspeicher erfordert.

## Ziel

Das Projekt «Anfälligkeitsindikatoren» hatte zum Ziel, das Verständnis der OBS-Dynamik und seiner Variationen über verschiedene räumliche und zeitliche Bezugsräume zu verbessern. Ausserdem sollte identifiziert werden, welche Komponenten des OBS besonders anfällig beziehungsweise stabil gegenüber Umweltveränderungen sind. In diesem Zusammenhang stellten sich folgende Fragen:

1. Wie variiert das Alter des Bodenkohlenstoffs (ausgedrückt in Radiokarbonatierungen) über verschiedene räumliche und zeitliche Skalen und über klimatische und geologische Gradienten?
2. Wie verändern sich die Radiokarbonatierungen im Boden im zeitlichen Verlauf in verschiedenen Ökosystemen? Welche Implikationen ergeben sich dadurch für Stabilität und Dynamik des Bodenkohlenstoffs?
3. Welche Rolle spielt die OBS im Kontext von Kohlenstoffakkumulation und -verluste? Ist OBS besonders anfällig für Schwankungen des Klimas und dadurch verursachte Veränderungen?
4. Welche Erkenntnisse über Stabilität und potenzielle Anfälligkeit des Bodenkohlenstoffs können durch quellspezifische Verbindungen (Pflanzenlipide) gewonnen werden?

Basis der Untersuchungen bildeten bereits vorhandene sowie neue Proben des langfristigen Überwachungsprogramms der WSL-Gruppe «Langfristige Waldökosystem-Forschung» (LWF) sowie

modernste Methoden der ETH-Labore. Die grossen natürlichen klimatischen und geologischen Gradienten der Schweiz sind dabei eine ideale Umgebung für die Untersuchung dieser Forschungsfragen.

## Resultate

Die zentralen Erkenntnisse des Projekts können in zwei Hauptgruppen unterteilt werden: (i) das Verhalten von OBS in verschiedenen klimatischen Umgebungen und über unterschiedliche Zeiträume (Forschungsziele 1 & 2) und (ii) die Dynamik spezifischer OBS-Speicher – anfällige (gelöste organische Bindungen) beziehungsweise stabile (Pflanzenlipide) (Forschungsziele 3 & 4). Letztere wurden hinsichtlich Stabilität oder Anfälligkeit verschiedener OBS-Speicher als Zeiger (*Sentinels*) erkannt.

## Klimatische und geologische Gradienten

### *Räumliche Variabilität von $^{14}\text{C}$*

Über Grössenordnung und Kontrollfaktoren der Variabilität OSB (Bestände, Dynamik und Fluss) über verschiedene Bezugsräume ist bislang wenig bekannt. Unsere Resultate belegen, dass die Variabilität im Plot-Bereich, im Massstab mehrerer Meter, signifikant ist und sich auch in unterschiedlichen geographischen Regionen, im Massstab mehrerer Kilometer, in derselben Grössenordnung bewegt. Mit Ausnahme von schwacher Korrelation mit der jährlichen Mitteltemperatur (MAT) und dem jährlichen mittleren Niederschlag (MAP) (Abb. 1) zeigt sich keine klare Korrelation zwischen  $^{14}\text{C}$ -Signaturen und Klimafaktoren oder Faktoren der Bodenstruktur. Die Radiokarbonsignatur tiefer Böden ist zudem trotz grosser klimatischer Kontraste unerwartet homogen. Diese Ergebnisse betonen die Wichtigkeit repräsentativer (gitterbasierter) Probenahme, die der kleinräumigen Variabilität des Kohlenstoffkreislaufs im Boden gerecht wird.

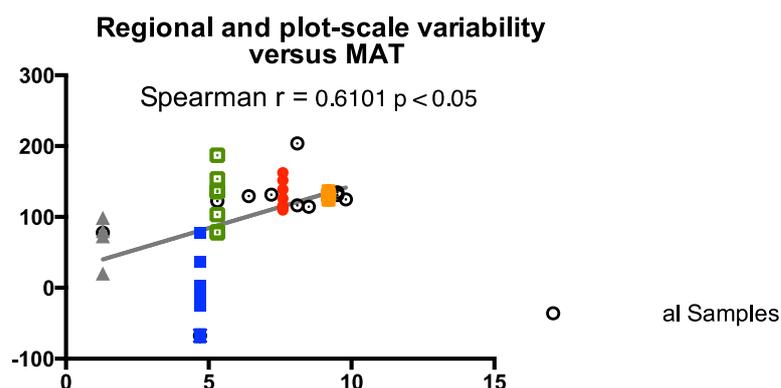


Abb. 1. Variabilität im Plot- und Regionalbereich. MAT: Jahresmitteltemperatur (mean annual temperature) (°C). Die Ergebnisse lassen für singuläre und gemischte Proben Rückschlüsse auf die Variabilität im Plot-Bereich zu, die der Variabilität im regionalen Bereich gleichen.

### *Radiokarbon-basierte Analyse der Zeitreihen von Gradienten innerhalb eines Waldökosystems*

Radiokarbonmessungen aus Bodenproben, die in den 1990er Jahren und 2014 gewonnen wurden ermöglichten die Auswertung kurzzeitiger  $^{14}\text{C}$ -Variationen. Dies erlaubte, die Kohlenstoffdynamik (Speicher, Umsetzung, Fluss) näher zu beleuchten. Mit Hilfe eines neuartigen Modellierungsansatzes konnte für verschiedene Ökosysteme – gemässigt bis alpin – die Umsatzzeit für Kohlenstoff im Ober- und Unterboden ausgewertet werden. Es zeigte sich eine erhöhte Umsatzzeit für alle nicht-vernässten Böden und in allen Böden der Kohlenstofffluss mit zunehmender Tiefe exponentiell abnimmt. Dies lässt den Schluss zu, dass, obwohl ein erheblicher Teil des Kohlenstoffs im tiefen Boden gespeichert ist, der tiefe Kohlenstoffspeicher nicht signifikant zum Gesamtfluss beiträgt. Die Messungen zeigten auch keine klare Korrelation zwischen dem Kohlenstoffumsatz (oder -fluss) und Umwelttreibern (Jahresmitteltemperatur, Jahresniederschlag, Nettoprimärproduktion) oder der Bodenstruktur. Demnach ist der OBS-Umsatz nicht von einem einzelnen Faktor dominiert. Die mathematische Modellierung von Kohlenstoffprofilen weisen auf einen signifikanten Beitrag des Grundgesteins zum tiefen Kohlenstoffspeicher hin, wodurch die Grenze zwischen aktiver Umsetzung und passiven (sedimentären) Komponenten des Kohlenstoffkreislaufs verwischt wird.

### **Kohlenstoffspeicher und Resistenz während globaler Klimaveränderung**

Um die Dynamik und Anfälligkeit verschiedener Komponenten des komplexen OBS-Speichers besser zu verstehen, wurden folgende zwei Ansätze gewählt: (i) Analyse des gelösten organischen Kohlenstoffs (dissolved organic carbon, DOC) und (ii) Untersuchung der operativ-definierten Dichtefractionen und der vom Gesamt-OBS isolierten spezifischen Verbindungen (Lipide).

#### *Gelöster organischer Kohlenstoff als Indikator für den dynamischen und potenziell anfälligen Kohlenstoffspeicher*

Im Dürresommer 2015 wurden Proben von zwei Schweizer Standorten genommen, die Veränderungen der Konzentration und der Radiokarboncharakteristika von gelöstem organischem Kohlenstoff (DOC) anzeigten, was entweder auf den Nettoverlust von stabilisiertem Kohlenstoff oder die Veränderung der Kohlenstoffquelle hinweist. Aufgrund der Vorhersage von zunehmenden Dürren zur Mitte des 21. Jahrhunderts kann dieser Prozess potenziell zu einem verstärkten Verlust von älterem (stabilisiertem) Kohlenstoff führen. Zudem deuten Radiokarbonmessungen am DOC an, dass das DOC eine Schlüsselrolle bei den rapiden Veränderungen des OBS-Speichers (im Jahrzehntebereich) einnehmen könnte. Schliesslich verweisen Radiokarbonmessungen auf kontinuierliche Interaktion zwischen tiefem Gesamt-OBS und DOC innerhalb des gesamten Bodenprofils.

#### *Hydrophobe Pflanzenlipide als Indikator für den immobilen und potenziell widerstandsfähigen Kohlenstoffspeicher*

Die Radiokarbonanalyse spezifischer, vom Bodenprofil isolierter Lipidverbindungen zeigt, dass diese Vertreter des stabilsten und mineralgebundenen Kohlenstoffspeichers sind, der relativ unempfindlich gegenüber Umweltveränderungen zu sein scheint. Die weite Streuung der  $^{14}\text{C}$ -Alter der individuellen Lipidmarkern zeigt ferner, dass sich das Spektrum der Kohlenstoffdynamik im OBS-Speicher auf molekularem Level ausdrückt. Letztlich belegen die Werte der Isotopenmessungen an Biomarkern, dass der (geogene) Kohlenstoff des Grundgesteins eindeutig zum OBS beiträgt. Insgesamt verbessert die Analyse spezifischer organischer Verbindungen das

Wissen um die OBS-Kohlenstoffdynamik wesentlich im Vergleich zu Erkenntnissen aus operativ-definierten (z.B. Dichte-) Fraktionen, die sich anfällig für die Störung durch unterschiedliche Kohlenstoffquellen. Die spezifischen organischen Verbindungen (Lipidmarker) dienen deshalb als neue molekulare Zeiger für die Stabilität von OBS.

## **Bedeutung für die Forschung**

### *Kontrolle der Variablen in der Kohlenstoffdynamik des Bodens*

Die Kombination umfassender Radiokarbondatierungen und mathematischer Modellierung anhand von Schweizer Böden hat neues Licht auf die Dynamik von Kohlenstoff über einen weiten räumlichen und zeitlichen Bereich sowie über weite ökologische Gradienten geworfen. Die Kenndaten der Untersuchungsgebiete (Klima, Bodenstruktur, Bodenmineralogie) schaffen ausserdem neue Erkenntnisse über Faktoren, die mit der Kohlenstoffumsetzung im Boden kovariieren. Die Variabilität von OBS verhält sich auf kleinem (Plot-)Raum in derselben Grössenordnung wie auf regionaler Ebene. Die Temperatur beeinflusst die Kohlenstoffdynamik im Oberboden nur schwach. Hingegen stellen die Struktur des Unterbodens Bodens sowie der Niederschlag wichtigere Faktoren dar. Die Radiokarbondatierungen von Ober- und Unterboden an mehreren Waldstandorten bieten einen umfassenden Datensatz, der als Grundlage für spätere Untersuchungen räumlicher und zeitlicher Variabilität von OBS in Schweizer Böden dienen kann. Die Ergebnisse deuten trotz unterschiedlicher Umweltraumbedingungen auf sehr ähnliche Kohlenstoffdynamik in nicht-vernässten Böden hin. Es zeigte sich auch, dass der Unterboden momentan stabilen Kohlenstoff speichert.

### *Anfällige und schwer abbaubare Kohlenstoffspeicher im Kontext klimatischer und ökologischer Veränderung*

Gelöster organischer Kohlenstoff (DOC) bildet einen der dynamischsten Speicher für OBS und ist daher im Kontext der Bodenbildung, Bodenumsetzung von Kohlenstoff und Reaktion auf Klimaveränderung von grossem Interesse. Teil dieses Projekts war die Erstellung einer neuen Zeitreihe mit Radiokarbondatierungen von DOC während eines Dürresommers. Als Folge des Klimawandels ist damit zu rechnen, dass Trockenheit in der Schweiz und andernorts stark zunehmen wird. Daher ist es wesentlich, die Effekte von Trockenheit auf die Kohlenstoffdynamik im Boden besser zu verstehen. Die von uns gewonnenen Erkenntnisse zeigen starke Hinweise für einen entsprechenden Anstieg des Alters von DOC. Dies ist ein Indiz dafür, dass ein älterer Kohlenstoffspeicher durch die Trockenperiode destabilisiert wurde. Der Verlust an Kohlenstoff durch Transfer in den DOC-Speicher bildet somit einen Indikator Veränderungen im Kohlenstoffhaushalts des Bodens als Folge des Klimawandels.

Im Unterschied zum DOC bilden pflanzliche Lipidverbindungen den sehr stabilen Anteil des Kohlenstoffs im Boden. Wir führen dies auf ihre hydrophoben Eigenschaften und die Bindung an Mineraloberflächen zurück. Traditionell werden operativ-definierte (Dichte-)Fraktionen zur Aufarbeitung der verschiedenen Untergruppen von Kohlenstoffspeichern im Boden genutzt. Dieser Ansatz, ist jedoch mit verschiedenen Einschränkungen verbunden. Unsere Forschungsergebnisse basieren auf Radiokarbonmessungen an spezifischen Bindungen von Lipiden im Boden und zeigen, dass die Lipide effektivere Indikatoren für verschiedene Kohlenstoffspeicher im Boden sind und zudem ein breites Spektrum an Kohlenstoffumsatzzeiten haben. Besonders Pflanzenlipide scheinen Anzeiger für die am wenigsten anfällige – d.h. stabile – OBS zu sein und dienen daher als Zeiger für besonders stabile Kohlenstoffspeicher.

## **Bedeutung für die Praxis**

Dieses Forschungsprojekt wurde erstellt, um das Verständnis grundlegender Faktoren der Kohlenstoffdynamik in Schweizer Böden zu erweitern. Die Ergebnisse unserer Grundlagenforschung sind nicht direkt in alltägliche Praxis übertragbar, leisten jedoch einen wichtigen Beitrag zum Gesamtverständnis über den potenziellen Verlust von Kohlenstoff aus dem Bodenspeicher und wie dieser Verlust auf lange Sicht durch veränderte Flächennutzung als Antwort auf Klima- und Umweltwandel gemindert werden kann. Die Ergebnisse dieser Forschung beinhalten allgemeine Implikationen für Anwender und Interessenvertreter:

1. **Bezüglich der Schweizer Kohlenstoffspeicher**  
Ober- und Unterboden in Schweizer Wäldern sind grosse Speicher von Kohlenstoff. Dieser Kohlenstoffbestand erscheint derzeit stabil, ist jedoch durch potenzielle Störungen (Trockenheit) in der Zukunft gefährdet. Kohlenstoffbestand und -stabilität hängen von Niederschlag oder Bodenfeuchtigkeit ab. Entsprechend ist zu verhindern, dass Waldböden austrocknen.
2. **Bezüglich der Extrapolationen von Bestandsaufnahmen des Bodenkohlenstoffs**  
Die unerwartete Homogenität der Kohlenstoffdynamik im Boden in oberen und unteren Schichten nicht-vernässter Böden erbringt den Nachweis für eine mögliche umfangreiche Extrapolation von Parametern in Bodenkohlenstoff-Modellen.
3. **Fossiler Kohlenstoff als ergänzende Kohlenstoffquelle und Bestandsaufnahme des Bodenkohlenstoffs**  
Bei der Berechnung der Kohlenstoffquellen in Schweizer Böden sollten nicht nur Beiträge der Vegetation miteinbezogen werden, sondern auch des darunterliegenden Grundgesteins. Der relative Anteil dieses Kohlenstoffeintrags, berechnet durch Radiokarbondatierungen, hat Folgen für den Kohlenstoffkreislauf durch die Metabolisierung von fossilem (zuvor stabilem) Kohlenstoff, der eine zusätzliche Quelle für Kohlenstoff in der Atmosphäre bildet. Dieser fossile Kohlenstoffspeicher ist derzeit nicht Teil der Modelle des Kohlenstoffkreislaufs (z.B. Yasso-Modell).

## **Empfehlungen**

1. **Kohlenstoffbestand**  
Die grossen Kohlenstoffbestände der Schweizer Böden sind anfällig gegenüber hydrologischen Veränderungen. Im Besonderen sollte die Austrocknung von vernässten Böden verhindert werden.
2. **Landwirtschaftliche Standorte**  
Die hier beschriebene Forschung bezieht sich auf Wälder und bringt neue Einsichten in die Stabilität von Kohlenstoff in Böden bewaldeter Ökosysteme. Da jedoch weite Teile der Schweiz landwirtschaftlich genutzt werden, können ähnliche Ansätze, inklusive der Untersuchung spezifischer Kohlenstoffspeicher auf molekularer Ebene, im Besonderen auch für Landwirtschaft oder Weideflächen verwendet werden.
3. **Stärke und Potenzial langfristiger Überwachung**  
Langfristigen ökologischen Überwachungsprogrammen (WSL Standorte) schaffen die Möglichkeit zur Untersuchung von Bodenstabilität und -anfälligkeit. Kurzfristige laborbasierte Experimente können dies nicht leisten. Angesichts des zu erwartenden regionalen wie globalen Klimawandels ist es von grosser Bedeutung, entsprechende

Programme langfristig zu erhalten. Es darf von ihnen einen positiv verstärkenden Effekt auf Forschung und Wissenschaft erwartet werden. Dadurch lässt sich die Nutzung von natürlichen (nationalen) Ressourcen verbessern, was auch der Schweizer Öffentlichkeit zugutekommt.